

# Augmented Reality in der Produktentstehung

Dissertation zur Erlangung des  
akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Ilmenau

von Dipl.-Ing. Thomas Schilling

geboren am 05.08.1977 in Sondershausen

1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Günter Höhne  
Technische Universität Ilmenau
2. Berichterstatter: Prof. Dr. sc. techn. Beat D. Brüderlin  
Technische Universität Ilmenau
3. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jens Bliedtner  
Fachhochschule Jena

Tag der Einreichung: 19.10.2007  
Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 07.07.2008

ISBN: 978-3-938843-42-0 (Druckausgabe)  
URN: nbn:de:gbv:ilm1-2008000157

---

## Impressum

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

### **Herstellung und Auslieferung**

Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.

Werner-von-Siemens-Str. 16, 98693 Ilmenau

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung vorbehalten.

ISBN: 978-3-938843-42-0 (Druckausgabe)

URN: nbn:de:gbv:ilm1-2008000157

---

# **Augmented Reality in der Produktentstehung**

**Dipl.-Ing. Thomas Schilling**

Fakultät für Maschinenbau  
Institut für Maschinenelemente  
und Konstruktion



Technische Universität Ilmenau

September 2008

---

## Vorwort des Herausgebers

Die Nutzung digitaler, virtueller Produktmodelle als Ersatz oder Ergänzung physischer Prototypen zur Bestimmung und Überprüfung von Produkteigenschaften erschließt Produktivitätsgewinne in Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Bedienung u. a. Phasen des Produktlebenszyklus. Eine Sonderstellung im Feld der virtuellen Techniken nehmen „Augmented-Reality (AR)“-Systeme ein, die mit einer Verknüpfung von realen und virtuellen Objekten in einer Szene operieren und damit für den Prozess der Produktentstehung ein besonders aussichtsreiches Werkzeug darstellen. Ihr Potential ist bisher unzureichend erschlossen und in der Praxis nur ansatzweise genutzt.

Die vorliegenden VR-Lösungen sind aufgrund ihrer Spezifik kaum auf neue Anwendungsfelder übertragbar. Charakteristisch für die gegenwärtige Situation ist außerdem das unübersichtliche, schwer vergleichbare Angebot einzelner Komponenten, die sich neben anderen Applikationen auch für AR nutzen lassen. Bestimmung und Systematisierung der für ein AR-System notwendigen Hard- und Software-Komponenten sowie das Ermitteln der prozessspezifischen Anforderungen hinsichtlich Visualisierung, Manipulation, Interaktion und anderer Funktionen sind deshalb ein wichtiges Anliegen dieser Arbeit. Durch die rasche und sich sehr dynamisch vollziehende Entwicklung dieses Gebietes kann der hier beschriebene Stand der Technik nur eine Momentaufnahme der aktuellen Situation sein.

Die Analyse macht deutlich, dass der Entwurf von AR-Systemen stets objekt- und prozessspezifisch erfolgen muss, sodass sich die Konfiguration dieser Systeme aus verfügbaren Komponenten mit anforderungsgerechter Softwareanpassung als geeignete Entwurfsmethode empfiehlt. Dazu stellt die vorliegende Arbeit eine Variantenmatrix bereit, auf deren Grundlage verfügbare Technik-Komponenten funktionsorientiert bestimmt sowie mit Hilfe einer Auswahlvorschrift bewertet und zu einer sinnvollen Gesamtlösung verknüpft werden können. Mit diesem Konfigurationssystem entwirft der Autor, der im Werkzeug- und Formenbau tätig ist, ein AR-System zur Fertigungskontrolle von Erodier Elektroden und einen AR-Bohrungsinspektor, der CAD/CAM-Daten direkt auf das Werkstück projiziert, wodurch Fertigungsfehler sofort erkennbar sind. Mit beiden im Betrieb erfolgreich erprobten Systemen erreichte man Zeiteinsparungen bis zu 25% und Fehlerreduzierungen bis zu 0%. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Augmented-Reality-Technologie auch in kleinen und mittelständischen Unternehmen mit wirtschaftlichem Gewinn einsetzbar ist.

---

Dem mit dieser Arbeit geleisteten wertvollen Beitrag zum Entwurf von AR-Systemen ist sowohl eine Weiterführung als auch eine breite Anwendung zu wünschen.

Ilmenau, im September 2008

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Günter Höhne

---

## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeiten als Doktorand im VR-Labor der Volkswagen AG und der anschließenden Anstellung bei der 3D-Schilling GmbH. Zu meinen Aufgaben gehörte hauptsächlich die Integration von AR-Systemen in bestehende Produktentstehungsprozesse, aber auch die Prozessanalyse sowie die unterstützende Tätigkeit in der Qualitätssicherung.

Besonderer Dank gebührt Professor Höhne als Doktorvater für die viele Geduld und die nicht endende Unterstützung sowie den Gutachtern Professor Brüderlin und Professor Bliedtner.

Michael K. möchte ich für das Korrekturlesen und die vielen Telefonate, in denen über den Inhalt sowie das Für und Wieder einzelner Streitpunkte diskutiert wurde, danken. Ebenso danke ich meinen Freunden und Kollegen Wolfgang St., Conny U., Matthias W., Daniel C., Stefan N., Frank B., Ralf R., Michael S., dem restlichen VR-Labor, meinen Kollegen bei 3D-Schilling für die Unterstützung bei der täglichen Arbeit und das sie immer ein offenes Ohr für meine Probleme hatten und haben.

Dank gebührt auch den Firmen „Metaio“ und „Mircosensys“ für die Bereitstellung von Testlizenzen und der freundlichen Beantwortung aller Fragen zu den Problemen bei der Integration der RFID-Reader in die AR-Software.

Meiner Familie möchte ich dafür danken, dass sie es mir ermöglicht haben diesen Weg einzuschlagen und meinen Vater im Besonderen für die ausdauernde Motivation, Unterstützung und die Korrekturhinweise. Meiner Freundin möchte ich für die moralische Unterstützung, Fürsorge und Liebe danken. Besonders erwähnen möchte ich auch den Einsatz von Kerstin, Christian, Mandy und Richard für ihre Hinweise zum Abstract.

Dresden, September 2008

Thomas Schilling

## Kurzreferat

Durch die Möglichkeit Informationen komprimiert und aufgabenbezogen bereitzustellen, gewinnen Augmented Reality Systeme (AR) zunehmend an Bedeutung für die Produktentstehung (PE). Mit der ständig zunehmenden Zahl von AR-Komponenten ist es möglich eine große Anzahl von unterschiedlichen AR-Systemkonfigurationen für eine Anwendung zusammenzustellen, wobei persönliche Erfahrungen und vorhandene Technik einen maßgeblichen Einfluss haben. Ausgehend von der These, dass sich AR-Systeme in einer Einheit von Aufgabe-Funktion-Technik systematisieren lassen, wurde eine Herangehensweise erarbeitet, mit der aufgabenoptimierte AR-Systeme formulierbar sind. Unter Berücksichtigung der aktuell verfügbaren Technik wurde mit Hilfe einer Variantenmatrix das theoretisch mögliche Potenzial von Augmented Reality in der Produktentstehung an möglichen Systemkonfigurationen abgeschätzt.

Diese Herangehensweise wurde für zwei unterschiedliche Lösungen im Werkzeug- und Formenbau getestet. Die Branche Werkzeug- und Formenbau wurde bewusst gewählt, da hier AR-Anwendungen bisher nicht untersucht wurden und deshalb neue Erkenntnisse für den Einsatz der Technik in der Produktentstehung gewonnen werden können. Aufbauend auf einer Analyse der Fertigungsfehler im Werkzeug- und Formenbau wurden zwei konkrete AR-Anwendungen formuliert und entsprechende Funktionen in zwei Demo-Anwendungen erprobt. Der Nutzen für diese Anwendungen berechnet sich über das Einsparpotenzial durch Fehlerprognose und letztendlich der Fehlervermeidung.

Gleichzeitig wurde mit dem Laser-Projektionssystem ein System mit großem Potenzial für den direkten Einsatz an der Werkzeugmaschine untersucht und ein Verfahren zur Kalibrierung vorgestellt.

Es hat sich gezeigt, dass AR-Lösungen dort sinnvoll sind:

- wo komplexe Vorgänge und Zusammenhänge dargestellt werden müssen
- eine große Bauteilanzahl, Positionsvielfalt und/oder Variantenvielfalt vorliegt und
- die mögliche Einsparung über den Aufwendungen für die Anschaffung und den Betrieb der AR-Lösung liegt.

Das direkte Einsparpotenzial in der PE besteht vor allem in der Reduzierung des Abstraktionsgrades zur Erfassung der Informationen. Die kontextabhängige Darstellung der Informationen in Kombination mit der gezielten Filterung der Informationen reduziert die Informationsmenge auf das wesentliche der Aufgabe und die Informationen sind für den Anwender besser zu erfassen und zu bewerten.

Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zur konkreten Herangehensweise der Formulierung einer aufgabenspezifischen AR-Lösung.

## **Abstract**

Augmented Reality Systems (AR) increasingly gain importance in research and development by condensing and providing relevant information. The constantly increasing number of AR components enables compiling of a large number of AR system configurations for use, with personal experience and existing technology being an important factor. Based on the theory that AR systems can be systemised in a *unit of task - function - technique* an approach was developed to create task optimising AR systems. Considering the currently available technology and using a matrix of variables the theoretically possible potential of augmented reality in research and development was assessed for possible system configurations.

This approach was tested on 2 different solutions in the *construction of tools and mould making*. The department of *construction of tools and mould making* was deliberately chosen as AR application had previously not been investigated in this sector and therefore new knowledge for the assignment of this technology in research and development could be gained. Based on an analysis of production faults in *construction of tools and mould making* two concrete applications were formulated and the relevant function was tested in *two-demonstration implementation*. The value of these implementations is calculated based upon the potential saving of the fault prognosis and the subsequent avoidance of faults.

At the same time a system of great potential for direct use on machine tools was tested with the laser projection system and a process for calibration was introduced.

It has been shown that AR solutions are meaningful when complex processes and procedures have to be examined, where a large number of components are utilised, diversity of positions and/ or diversity of variants exists and a potential saving against the expense of the acquisition and the operation of the AR solutions can be achieved. The potential saving in research and development consists mainly in the reduction of the degree of abstraction in the collation of information. The contextual representation of the information combined with the filtration of information reduces the amount of information to only that considered essential to the task and the end user can understand and appraise the information better.

The above work is a contribution to the concrete approach of the formulation of task-specific AR solutions.



**Inhaltsverzeichnis**

<b>IMPRESSUM.....</b>	<b>II</b>
<b>VORWORT DES HERAUSGEBERS.....</b>	<b>II</b>
<b>VORWORT DES VERFASSERS.....</b>	<b>IV</b>
<b>KURZREFERAT .....</b>	<b>I</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>III</b>
<b>THESEN.....</b>	<b>VI</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>IX</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>XI</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2 ABGRENZUNG DES THEMAS.....</b>	<b>3</b>
<b>3 GRUNDLAGEN DER AUGMENTED REALITY TECHNIK .....</b>	<b>4</b>
3.1 DEFINITION .....	4
3.2 FUNKTIONSSCHEMA EINES AR-SYSTEMS.....	5
3.3 AUFBAU VON AR-SYSTEMEN.....	9
<b>4 STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>11</b>
4.1 ARCHITEKTUR.....	12
4.2 INDUSTRIE.....	13
4.3 PRODUKTENTSTEHUNG .....	15
4.4 MILITÄRTECHNIK.....	16
4.5 MEDIZINTECHNIK.....	17
4.6 UNTERHALTUNG .....	17
4.7 FREIZEIT .....	18
4.8 BEWERTUNG DES ENTWICKLUNGSSTANDES.....	19
<b>5 AUGMENTED REALITY IN DER PRODUKTENTSTEHUNG.....</b>	<b>22</b>
5.1 DEFINITION PRODUKTENTWICKLUNG UND PRODUKTENTWICKLUNGSPROZESS.....	22
5.2 VORGANG DER PRODUKTENTSTEHUNG.....	24
5.3 PRODUKTENTSTEHUNGSPROZESS .....	27
5.4 AR FÜR DEN PRODUKTENTSTEHUNGSPROZESS .....	30
<b>6 AUGMENTED REALITY SYSTEMKOMPONENTEN.....</b>	<b>37</b>

6.1	DIE SINNESMODALITÄTEN DES MENSCHEN .....	37
6.1.1	Visuelles System .....	38
6.1.2	Auditives System.....	40
6.1.3	Taktils System .....	42
6.2	TRACKINGSYSTEME.....	43
6.2.1	Mechanisches Tracking .....	44
6.2.2	Inertiales Tracking.....	45
6.2.3	Magnetisches Tracking.....	45
6.2.4	Akustisches Tracking .....	45
6.2.5	Optisches Tracking .....	46
6.2.6	Elektromagnetisches Grundprinzip .....	47
6.2.7	Hybrides Tracking .....	48
6.2.8	Vergleich der Trackingverfahren .....	48
6.3	EINGABEGERÄTE .....	50
6.3.1	Optische Eingabegeräte .....	50
6.3.2	Auditive Eingabegeräte .....	55
6.3.3	Taktile Eingabegeräte.....	55
6.4	SZENENGENERATOREN .....	57
6.4.1	Das ein Chip System .....	58
6.4.2	Mobile Computersysteme.....	58
6.4.3	Single-CPU-Systeme.....	58
6.4.4	Multi CPU/ GPU Systeme.....	58
6.4.5	Clustersysteme .....	58
6.4.6	Verteilte AR-Systeme.....	59
6.5	SOFTWARE .....	59
6.6	AUSGABEGERÄTE .....	60
6.6.1	Visuelle Ausgabegeräte .....	61
6.6.2	Auditive Ausgabegeräte .....	67
6.6.3	Taktile Ausgabegeräte.....	69
6.7	SYSTEMATISIERUNG DER AR-AUFGABENSTELLUNGEN UND KOMPONENTEN .....	71
6.7.1	Variantenmatrix für AR-Anwendungen im PEP .....	71
6.7.2	Konfigurationssystematik für AR-Anwendungen im PEP .....	74
<b>7</b>	<b>AUGMENTED REALITY IM WERKZEUG- UND FORMENBAU.....</b>	<b>77</b>
7.1	GRUNDLAGEN DES WERKZEUG- UND FORMENBAUS .....	77
7.2	EINSATZ DER KONFIGURATIONSSYSTEMATIK FÜR AR-ANWENDUNGEN IM WFB .....	79
7.2.1	Anwendungsziel und Motivation .....	79
7.2.2	Funktionsumfang der AR-Anwendung im WFB.....	82
7.2.3	Anwendung der Konfigurationssystematik .....	83
7.3	ERGEBNIS .....	90
7.4	WEITERENTWICKLUNG DER AR-WFB-ANWENDUNGEN .....	96

---

7.5	FEHLERBETRACHTUNGEN BEI DER AR-DARSTELLUNG .....	98
7.6	EINSATZ EINES LASER-PROJEKTIONSSYSTEMS IN AR-LÖSUNGEN .....	100
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>105</b>
	<b>LITERATUR .....</b>	<b>107</b>
	<b>ANHANG A .....</b>	<b>121</b>
	<b>ANHANG B.....</b>	<b>129</b>

## Thesen

1. Augmented-Reality-Systeme verknüpfen kontextabhängig Objekte mit digitalen Informationen. Die Art der Informationsdarstellung vereinfacht den Umgang mit digitalen Daten, durch die kongruente Überlagerung der realen Objekte mit virtuellen Informationen bei gleichzeitiger Unterstützung durch intuitives Handling, natürliche Interaktion und die Automatisierung der Datenerfassung, Analyse und Darstellung. Die damit verbundene mögliche intuitive Arbeitsweise führt zur Einsparung von Zeit und Kosten.
2. Die sinnvolle Integration eines AR-Systems in einen Teilprozess der Produktentstehung setzt zur Lösung der Entwicklungsaufgaben und Probleme innerhalb des jeweiligen Prozessschrittes (Konstruktion, Versuch/Erprobung, Fertigung) eine genaue Analyse der benötigten Funktionen (Anzeige, Anwenderführung, Interaktion, Dokumentation sowie Messen und Vergleichen) und eine Erfassung der wirkenden Einflussfaktoren auf den Entstehungsprozess voraus.
3. Die möglichen Funktionen, Aufgaben und die Einsatzbereiche von AR-Systemen in der Produktentstehung können in einer Variantenmatrix zusammengefasst werden.
4. Es wurde eine Konfigurationssystematik für die Auswahl von Komponenten eines AR-Systems basierend auf den einzelnen Prozessschritten der Produktentstehung und der benötigten Funktionen für deren Umsetzung auf Basis verfügbarer Technik-Komponenten erstellt, die nach einer Auswahlvorschrift die Zusammenstellung der Systemkomponenten hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft.
5. Mittels AR-Darstellungen können schnell und einfach reale Bauteile/Baugruppen mit digitalen Informationen durch die optische Überlagerung der realen Objekte mit den digitalen Daten verglichen werden.
6. Durch AR können Fertigungs-, Bedienungs- und Kommunikationsfehler beim Umgang mit den Bauteilen/Werkstücken und zugehörigen Informationen sowie bei der Bedienung von Maschinen vermieden werden. Durch AR wird die Verwendung digitaler Informationen beim direkten Umgang am realen Produkt wesentlich vereinfacht.

7. Die Arbeitsweise mit den digitalen Inhalten während der Datenerstellung, Haltung und Konvertierung für AR-Anwendungen muss weitgehend automatisiert werden, um in der Arbeit mit dem System eine möglichst hohe Effizienz zu erreichen.
8. Für eine AR-Anwendung ist stets das Zusammenwirken mehrerer Komponenten erforderlich (Bilderfassung, Tracking, Szenengenerator, Software, Anzeigen). In Anhängigkeit der allgemeinen Einflussfaktoren auf den Produktentstehungsprozess und die spezielle Entwicklungsaufgabe ist eine zielgerichtete Komponentenauswahl zu treffen um einen optimalen Betrieb des AR-Systems zu ermöglichen.
9. Radio Frequency Identification Transponder ermöglichen eine automatisierbare Identifizierung von Bauteilen/Werkstücken im industriellen Umfeld und können in Kombination mit AR-Systemen im Werkzeug- und Formenbau für die Steuerung und Prozessplanung eingesetzt werden.
10. Der Werkzeug- und Formenbau stellt einen Produktentstehungsprozess im Produktentstehungsprozess dar. Für die Fertigung eines Kunststoffbauteiles wird ein Produktionsmittel benötigt. Dieses wird im Werkzeug- und Formenbau hergestellt. Der Herstellungsprozess im Werkzeug- und Formenbau ist dem übergeordneten Produktentstehungsprozess des Kunststoffbauteils ähnlich. Ergebnisse zum Einsatz der AR-Technik im Werkzeug- und Formenbau lassen sich für den allgemeinen Produktentstehungsprozess anwenden.
11. Durch die große Variantenvielfalt von Kunststoffteilen können bei der Fertigung im Werkzeug- und Formenbau an den Spritzgusswerkzeugen Fehler entstehen, die zu Nacharbeiten führen. Zur Reduzierung dieser Anordnungs-, Positionier- und Maßfehler in der Fertigung wurden mit der entwickelten Konfigurationsmatrix zwei AR-Systeme entworfen und diese mit Komponenten des Marktes aufgebaut und erprobt.
12. Ein AR-System für die Unterstützung der Fertigung von Erodier Elektroden gestattet die Kontrolle auf Vollständigkeit, Maßhaltigkeit, Anzeige der NC-Fräsbahn und der CAD-Informationen durch Projektion und Falschfarbenwiedergabe auf dem realen Werkstück. Das AR-System 3DS-Bohrinspektor projiziert das Bohrbild auf Basis der CAD-Daten auf die Oberfläche des Spritzgusswerkzeugs. Im praktischen Test führten alle Werkzeugma-

cher die Bauteilinspektion fehlerfrei aus und erreichten mit dem System eine Zeitersparnis von 25%.

13. AR-Systeme erreichen derzeit nicht die notwendige Darstellungsgenauigkeit für Abweichungen von  $\pm 0,01\text{mm}$  für die Qualitätskontrolle im Werkzeug- und Formenbau. Eine Maßnahme zur Verbesserung dieser Situation ist die Verwendung von Mess- und Analysedaten von zusätzlichen Messsystemen.
14. Durch die hohe Variantenvielfalt an Bauteilen ist eine Automatisierung der Qualitätskontrolle im Werkzeug- und Formenbau nur durch weitere Hilfsmittel wie elektronischen Identifikationssystemen, Datenbanken und zugehörigen Analyse- und Darstellungswerkzeugen möglich.
15. Es ist möglich eine Auswahlssystematik für den Entwurf eines AR-Systems für den Bereich der Produktentstehung zu erstellen. Mit Hilfe dieser Methodik können für den Anwendungsfall optimierte Systemkonfigurationen von AR-Systemen erzeugt werden.
16. Der Einsatz einer Auswahlssystematik für AR-Systeme wurde durch zwei praktische Beispiele „Kontrolle auf Maßhaltigkeit“ und „Anzeige von CAD/CAM Informationen direkt am Werkstück“ aus dem Bereich des Werkzeug und Formenbaus nachgewiesen. Die gewählten Systemkonfigurationen ermöglichen einen optimalen Einsatz der AR-Technik im Werkzeug- und Formenbau.

**Abkürzungsverzeichnis**

AR	–	augmented reality
CAD	–	Computer Aided Design
CAM	–	Computer Aided Manufacturing
CCD	–	Charge-coupled Device
CNC	–	Computer Numerical Control
CPU	–	central processing unit
CRT	–	cathode ray tube
DMU	–	digital mock up
DV	–	Digital Video
FED	–	field emission display
FEM	–	Finite Elemente Modell
FOV	–	field of view
FPS	–	frames per second
GPS	–	global positioning system
GUI	–	Graphical User Interface
HD-SDI	–	high definition serial digital Interface
HDTV	–	high definition television
HDV	–	high definition Video
HMD	–	head mounted Display
HRTF	–	Head Related Transfer Function
HUD	–	head up display
LASER	–	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LCD	–	liquid crystal Display
MR	–	mixed reality
MRT	–	Magnet-Resonanz-Tomographie
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
NED	–	nano emissive display
OLED	–	organic light emitting Display
OST	–	optical see through
PAL	–	phase alternation line
PDA	–	personal digital assistant
PE	–	Produktentstehung

PEP	–	Produktentstehungsprozess
RFID	–	Radio Frequency Identification
TFT	–	thin-film transistor
TOTE	–	Test-Operate-Test-Ergebnis
USB	–	Universal-Serial-Bus
VD2	–	Virtual Design 2
VDA	–	Verein Deutscher Automobilbauer
VR	–	virtual reality
VRD	–	virtual retina display
VST	–	video see through
VT	–	virtuelle Technik
WFB	–	Werkzeug- und Formenbau

### **Wissenschaftliche Einrichtungen**

HNI	–	Heinz Nixdorf Institut (Paderborn)
IPEK	–	Institut für Produktentwicklung Karlsruhe
IGD	–	Fraunhofer-Institute for Computer Graphics (Darmstadt)
IMK	–	Fraunhofer-Institut für Medienkommunikation (Berlin)
ZGDV	–	Zentrum für Graphische Datenverarbeitung (Darmstadt)



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1:	Reality-Virtuality-Kontinuum für Elektroden im WZB .....	5
Abb. 3-2:	Prinzip der kongruenten Überlagerung in AR-Systemen [ALT03] .....	6
Abb. 3-3:	Koordinatensysteme und Ortsvektoren in einem AR-System .....	7
Abb. 3-4:	Interaktionsschema VR nach Symietz [SYM03] und Weiterentwicklung für AR .....	8
Abb. 3-5:	Aufbau eines AR-Systems (nach [AZU97][ALT03]) .....	9
Abb. 5-1:	Anforderungen an neue Produkte .....	22
Abb. 5-2:	Produktlebenszyklus [EIG05] .....	23
Abb. 5-3:	Anforderungen an die Produktentwicklung .....	24
Abb. 5-4:	Konstruktionssystematik nach VDI 2221 [KRA00] .....	25
Abb. 5-5:	TOTE-Schema .....	27
Abb. 5-6:	Produktentstehungsprozess in allgemeiner Form [GAU02] .....	28
Abb. 5-7:	Quelle VDA (2001) <a href="http://www.vda.de">http://www.vda.de</a> .....	28
Abb. 5-8:	Simultanes Engineering [WIL93] .....	29
Abb. 5-9:	Einflüsse auf den Prozess der Produkterstellung [ERH00] .....	30
Abb. 5-10:	Auswirkungen im Entstehungsprozess [OVT05] .....	31
Abb. 5-11:	AR-Produktentstehungsprozess .....	32
Abb. 5-12:	Datenmodell für Prototypeneinsatz im PEP .....	34
Abb. 5-13:	Einflussfaktoren für den AR-Einsatz im PEP .....	35
Abb. 6-1:	Aufbau des Auges [WWW50] .....	39
Abb. 6-2:	horizontales Gesichtsfeld (FoV) [HOL96] .....	39
Abb. 6-3:	Stereoskopisches Sehen [PIE59] .....	40
Abb. 6-4:	Aufbau des Ohres [WWW51] .....	41
Abb. 6-5:	Wahrnehmungsebenen der Akustik .....	42
Abb. 6-6:	BOOM der Firma Fakespace [WWW49] .....	44
Abb. 6-7:	Beispiele für AR-Marker (ARToolkit, ART [WWW33], AR-PDA [WWW46]) .....	47
Abb. 6-8:	allgemeines GPS-Prinzip (a) und erweitertes GPS-Prinzip mit lokalen Korrekturdaten (b) . .....	48
Abb. 6-9:	Funktionsprinzip einer Digitalkamera [LIT97] .....	50
Abb. 6-10:	Abbildungsfehler bei sphärischen Linsen .....	51
Abb. 6-11:	Messstift der Firma ART .....	56
Abb. 6-12:	Cyberglove .....	57
Abb. 6-13:	Einteilung der Szenengeneratoren für AR .....	57
Abb. 6-14:	Video See Through [AZU97][ALT03] .....	63
Abb. 6-15:	Optical See Through [AZU97][ALT03] .....	64
Abb. 6-16:	Head Mounted Display .....	65
Abb. 6-17:	Funktionsprinzip eines Virtual Retina Displays [WWW47] .....	65
Abb. 6-18:	Professionelles Shutterssystem von Crystal Eyes .....	66
Abb. 6-19:	autostereoskopisches Display .....	66
Abb. 6-20:	AR- Projektionssystem .....	67

---

Abb. 6-21:	Schaubild zur Wellenfeldsynthese .....	68
Abb. 6-22:	CyberGrasp .....	70
Abb. 6-23:	Variantenmatrix für AR-Anwendungen im PEP .....	72
Abb. 6-24:	Aufbau der Konfigurationssystematik .....	75
Abb. 7-1:	PEP im Werkzeug- und Formenbau .....	78
Abb. 7-2:	AR-Darstellungen der fünf Demo-Anwendungen im WFB.....	80
Abb. 7-3:	Systemaufbau, AR-Darstellung und GUI von System A (Kontrolle auf Maßhaltigkeit).....	91
Abb. 7-4:	Systemaufbau, AR-Darstellung und GUI von System B (Anzeige vorhandener CAD/CAM- Informationen direkt am Werkstück) .....	92
Abb. 7-5:	Informationsfluss für die Systeme A (links) und B (rechts) .....	94
Abb. 7-6:	Schema des Informationsflusses für AR im WFB.....	96
Abb. 7-7:	Fehler in AR-Systemen .....	99
Abb. 7-8:	Prinzip einer Laser-Scan-Einheit.....	101
Abb. 7-9:	Funktionsprinzip der Laserkalibrierung .....	102
Abb. 7-10:	Laserkalibrierung bei vorhandenem Trackingsystem .....	104

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grundprinzip von AR-Systemen .....	3
Tabelle 2: Anwendungsbereiche von AR .....	11
Tabelle 3: Vergleich von Anwendungen zur eingesetzten Hard- und Software .....	20
Tabelle 4: Probleme beim Einsatz von AR-Technik .....	21
Tabelle 5: Grundprinzip Head Mounted Display .....	26
Tabelle 6: Einteilung der Sinnessysteme nach [SCH02] .....	38
Tabelle 7: Taktile Sinneszellen .....	43
Tabelle 8: Vergleich von Trackingsystemen .....	49
Tabelle 9: Vor- und Nachteile der digitalen Bildtechnik .....	52
Tabelle 10: TV-Standards .....	52
Tabelle 11: Vergleich der Kameraschnittstellen .....	54
Tabelle 12: Eigenschaften maschineller Spracherkennungssysteme nach Latoschik [LAT01] .....	55
Tabelle 13: AR-Softwarelösungen .....	60
Tabelle 14: Unterscheidung einzelner Displaysysteme nach dem Ort der Überlagerung .....	62
Tabelle 15: Simulierbare physikalische Eigenschaften von Touch- und Force-Feedback-Geräten [BUR03] .....	70
Tabelle 16: Probleme beim Einsatz von Elektroden .....	79
Tabelle 17: Informationstypen im Werkzeug- und Formenbau .....	80
Tabelle 18: Beantworteter Fragenkatalog für den AR-Einsatz im Werkzeug- und Formenbau <sup>1</sup> .....	84
Tabelle 19: Tabelle mit Wechselwirkungen für den AR-Einsatz im Werkzeug- und Formenbau .....	85
Tabelle 20: vorläufige Ordnung des Fragenkatalogs .....	86
Tabelle 21: vorläufige Ordnung nach dem 1. Schritt .....	87
Tabelle 22: vorläufige Tabelle nach dem 2. Schritt .....	88
Tabelle 23: Vergleich von zwei AR-Kalibrieralgorithmen .....	98
Tabelle 24: Vergleich von Video- und Laserprojektion .....	100



## 1 Einleitung

Die Realisierung ständig neuer Gebrauchswerte, Anforderungen an das Gestaltungsniveau und der Einsatz neuer Fertigungstechnologien gehen in der Gegenwart einher mit der Verkürzung der Produktlebenszyklen. Eine wesentliche Tendenz in der Produktentstehung ist die Verkürzung der Entwicklungszeiten durch die Optimierung von Arbeitsweisen und den Einsatz neuer Techniken, zum Beispiel der digitalen Produktentstehung. Ein Kennzeichen der zunehmenden Digitalisierung ist die Flut an Informationen und Daten in allen Bereichen des industriellen, militärischen oder privaten Einsatzes. Die Menge an Daten kann nur beherrscht werden durch den Einsatz sinnvoller Filtertechniken, deren Ziel es sein muss, dem Anwender wichtige Informationen zur richtigen Zeit im richtigen Kontext zur Verfügung zu stellen.

Eine Möglichkeit, um Informationen darzustellen, ist die Visualisierungstechnik, „Augmented Reality“ (AR). Erste Produkte auf Basis von AR-Technik wurden in den 60er Jahren für militärische Anwendungen entwickelt. Durch die rasante Entwicklung der Rechentechnik fand AR eine weite Verbreitung in allen Bereichen des Lebens und man findet sie heute in der Architektur, der Medizintechnik, in Freizeit und Unterhaltung ebenso wie in der Produktion oder der Produktentstehung.

AR-Systeme in ihrer Einheit von Aufgabe - Funktion - Technik ergeben eine Vielzahl von unterschiedlichen möglichen Systemen. Dies erschwert sowohl den Überblick als auch die aufgabenbezogene Auswahl eines Systems. Ausgehend von einer Abschätzung der theoretisch möglichen Varianten von AR-Systemen im Bereich der Produktentstehung werden Herangehensweisen formuliert, um eine effektive Auswahl einer bestimmten Systemvariante aus den möglichen Varianten vorzunehmen. Ziel muss es sein, einem potentiellen Anwender ein Handwerkszeug zur Verfügung zu stellen, damit er aufgrund seiner spezifischen Aufgabenstellung ein AR-System konfigurieren kann. Ausgangspunkt für eine solche Konfiguration ist die genaue Analyse der zu lösenden Aufgabe und der wirkenden Einflussfaktoren. Man kann davon ausgehen, dass sich der Einsatz von AR-Systemen in der Produktentstehung und in der Fertigung in den nächsten Jahren wesentlich verbreitern wird und den AR-Systemen neue Anwendungsgebiete erschlossen werden.

Dafür müssen bestimmte Anforderungen geklärt und Voraussetzungen geschaffen werden. Welche das im Einzelnen sind, wird an ausgesuchten Beispielen aus der Produktentstehung veranschaulicht. Als Hilfestellung dienen folgende Fragen:

- Was kann ein AR-System?
- Wofür werden AR-Systeme bereits eingesetzt?

- Aus welchen Komponenten besteht ein AR-System?
- Welche Komponenten sind für eine konkrete Anwendung erforderlich?
- Welche Anforderungen sind dabei zu beachten?
- Wie könnte der Einsatz aussehen?

Der Nachweis zur Gültigkeit der Herangehensweise zur Auswahl geeigneter Systemkonfigurationen sollte in einer Branche realisiert werden, in der bislang kaum oder keine AR-Anwendungen eingesetzt werden, wobei die Branche auch die wesentlichen Merkmale eines Produktentstehungsprozesses in sich tragen sollte. Der Nachweis ist anhand von konkreten Beispielen zu führen, wobei die im Verlauf der Vorbereitungen und während der Tests der Applikationen aufgetretenen Schwierigkeiten im Anschluss an das jeweilige Beispiel zu diskutieren sind. Für die Darstellung von Informationen ist alternativ zu den weit verbreiteten Displaysystemen der Einsatz von Laserprojektoren zu untersuchen.

AR ist eine virtuelle Technik, mit der gegenwärtig durch vereinfachte Bereitstellung der relevanten Informationen die Entwicklungs- und Fertigungssicherheit erhöht wird und Fehler vermieden werden können. Durch eine fortschreitende Integration in den Produktentstehungsprozess kann AR ebenfalls zur Fehlerprognose eingesetzt werden und es kann letztendlich auch als Teil eines Expertensystems genutzt werden.

## 2 Abgrenzung des Themas

Das Thema Augmented Reality in der Produktentstehung umfasst die beiden komplexen Themengebiete der virtuellen Techniken und der Produktentstehung.

Eine allgemeine Systematisierung der Verbindung dieser beiden Themen ist in der Vergangenheit bereits unternommen worden. Als Abgrenzung zu diesen Analysen, erfolgen hier die Betrachtungen zu den Einsatzmöglichkeiten von AR unter der Zuhilfenahme von Problemlösungstechniken und Herangehensweisen aus der Ilmenauer Konstruktionslehre. Eine der Methoden die dabei zum Einsatz kommt ist das Verfahren zum Erstellen technischer Grundprinzipien. In Tabelle 1 ist ein solches Prinzip allgemein für AR-Systeme dargestellt.

**Tabelle 1: Grundprinzip von AR-Systemen**

<b>Kern der Aufgabe</b>		<b>Durch</b> ein AR-System	
	Gegebenheiten	<b>werden</b>	dem Anwender
	Funktionsziel		digitale Informationen zu einem realen Objekt zur Verfügung gestellt,
	eingrenzende Bedingung	<b>und zwar</b>	als optische oder akustische Überlagerung auf dem realen Objekt,
<b>Keim für alle Lösungen</b>	erforderliche Maßnahmen	<b>wenn</b>	dies kontextabhängig von seiner Position, Blickrichtung, Aufgabe und der Bewegung des Anwenders erfolgen kann.

„Augmented Reality“ wird mit „Virtual Reality“ (VR) unter dem Überbegriff der „Virtuellen Techniken“ (VT) zusammengefasst. Als ein Untergebiet der VT wird im Weiteren nur Bezug auf AR genommen. Nur wenn es dem besseren Verständnis dient, werden Erläuterungen, Definitionen und Betrachtungen für VT und VR gegeben.

Eine Eingrenzung wird für die Produktentstehung vorgenommen: Es werden vor allem Prozessketten sowie allgemein gültige Prinzipien und Verfahren betrachtet und dabei auf die Vertiefung von Einzelheiten im Produktentstehungsprozess verzichtet.

### 3 Grundlagen der Augmented Reality Technik

#### 3.1 Definition

Das Wort „augment“ ist englisch und bedeutet wörtlich übersetzt „vermehrten“, „steigern“, „aufbessern“ [WIL90][OXF95]. Der zusammengesetzte Begriff „Augmented Reality“ beschreibt eine „vermehrte, gesteigerte oder verbesserte Realität“. In der Fachliteratur wird „Augmented Reality“ sinngemäß mit „erweiterte Realität“ übersetzt. In der Literatur sind verschiedene Definitionen für die „erweiterte Realität“, die im Weiteren als AR bezeichnet wird, zu finden. Nach Alt [ALT03] wird Augmented Reality wie folgt definiert:

*„Augmented Reality beschreibt die Ergänzung der visuellen Wahrnehmung des Menschen durch die situationsgerechte Anzeige von rechnergenerierten Informationen auf im Sichtfeld positionierten tragbaren Geräten.“* [ALT03]

Für eine Definition in der Produktentstehung soll der Spielraum weiter gefasst werden. Zum Vergleich werden die Definitionen aus anderen Anwendungsgebieten zitiert. Nach Brüderlin lässt sich AR wie folgt definieren:

*„In einem Augmented Reality- System wird die „reale“ Welt durch künstlich erzeugte Objekte angereichert. Dazu muss das AR-System die Informationen besitzen, wie die reale Welt beschaffen ist und wo sich der Betrachter in dieser Welt befindet.“* [GAU02]

Schwerpunkt dieser Definition ist die Anforderung nach der Erfassung der Umwelt und der Position des Anwenders darin. Gleichfalls lässt sie einen großen Spielraum auf die Art und Weise der „Anreicherung“ zu. Eine dritte Definition von Eversheim grenzt dies ein:

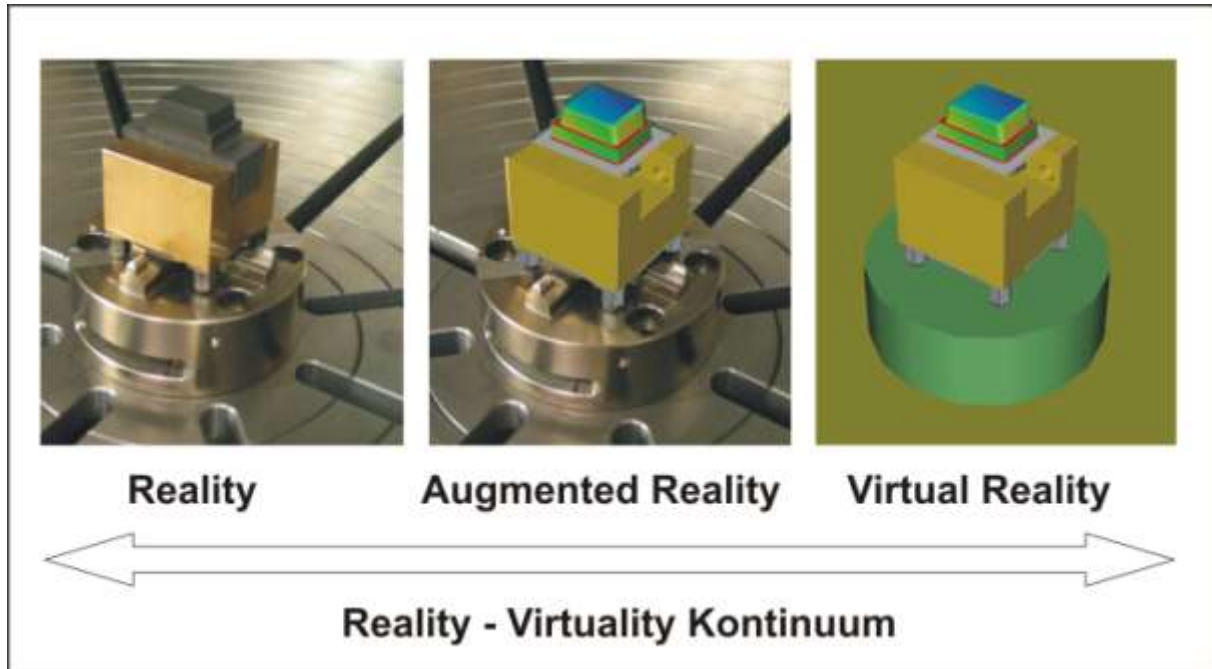
*„Augmented Reality (AR) ist eine neue Visualisierungs- Technologie, die auf einer Überlagerung der realen Umwelt mit virtuellen Objekten basiert. Ihr Potential schöpft AR aus der Möglichkeit, dem Anwender komplexe Informationen graphisch schnell und intuitiv verfügbar zu machen – beziehungsweise aus der Möglichkeit, dem Anwender über seine natürlichen Sinneseindrücke hinaus Informationen zur effizienten Bewältigung seiner Aufgaben zur Verfügung zu stellen.“* [EVE01]

Hier wird der Fokus auf den Anwender und die Möglichkeiten der vereinfachten Visualisierung gelegt. Zusammenfassend wird für diese Arbeit der Begriff der Bereitstellung nicht nur auf die „Visualisierung“ begrenzt, sondern weiter gefasst und AR wie folgt definiert:

**Augmented-Reality-Systeme stellen dem Anwender digital aufbereitete Informationen kontextabhängig von seiner Position, Blickrichtung und Aufgabe als Überlagerung seiner realen Umgebung bereit. Diese Bereitstellung erfolgt über die menschlichen Sinnesmodalitäten und ist zumeist optisch und/oder akustisch.**



Augmented Reality ist nach der Definition die Überlagerung der Realität mit digitalen Informationen. AR stellt den fließenden Übergang von der Realität in die virtuelle Realität dar (siehe Abb. 3-1). Hier wird am Beispiel von Elektroden aus dem Werkzeug- und Formenbau der Übergang verdeutlicht.



**Abb. 3-1: Reality-Virtuality-Kontinuum für Elektroden im WZB**

Als real wird eine Umgebung empfunden, in der sich der Betrachter präsent fühlt. Laut Regenbrecht ist Präsenz „das Gefühl des Nutzers, sich an einem Ort zu befinden, der Körper des Nutzers ist dabei Bestandteil des durch den Ort definierten Raumes. Der Körper ist der zentrale Punkt und die fundamentale Basis dieser Wahrnehmung.“ [REG99]

Dieses Merkmal trifft sowohl für die Realität als auch für die virtuelle Realität zu. In der Literatur wird häufig eine weitere Unterteilung in „Augmented Reality“, „Mixed Reality“ und „Augmented Virtuality“ vorgenommen, vgl. [ALT03][AUE00][MIL99]. Diese ist für die vorliegende Arbeit nicht von Bedeutung, da die Einteilung vom Anteil im Bild von realen und virtuellen Informationen abhängt. Alle im Rahmen der Arbeit beschriebenen Beispiele fallen unter die Kategorie AR-Darstellung.

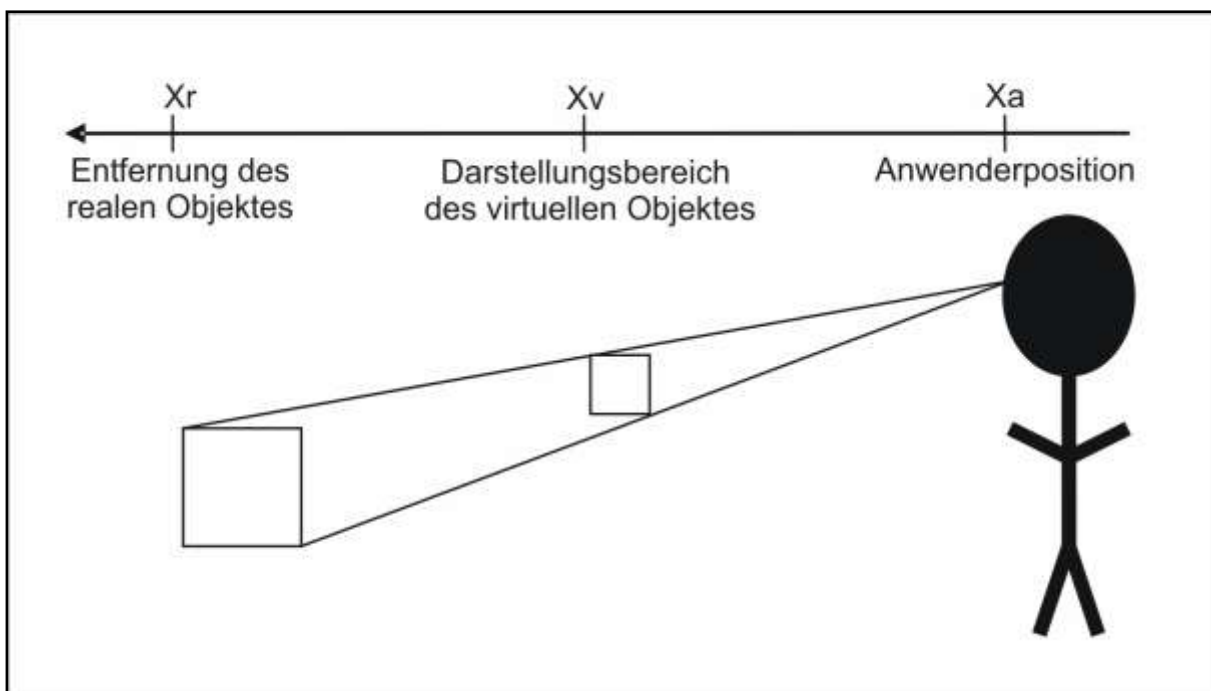
### 3.2 Funktionsschema eines AR-Systems

Wie in Abschnitt 3.1 definiert, basiert Augmented Reality auf der kontextabhängigen Überlagerung der Realität mit digitalen Informationen. Digitale Informationen umfassen alle von einem EDV-System gesammelten, erstellten und/oder mittels Algorithmen generierten bzw. ausgewählten Daten. Die Überlagerung kann sowohl visuell, akustisch als auch taktil erfol-

gen. Den geringsten Aufwand stellt die akustische Überlagerung dar. Mittels Lautsprecher oder Kopfhörer werden dem Anwender zusätzliche Informationen vermittelt [WWW22].

Die visuelle Überlagerung ist komplexer gestaltet [ALT01][BEH98]. Sie erfolgt dadurch, dass in dem optischen Strahlengang des Auges ein virtuelles Objekt auf einem Trägermedium dargestellt oder eingespiegelt wird [ALT01]. Für die Abb. 3-2 bedeutet dies:

- $X_a$  stellt die Position des Anwenders auf der gedachten X-Achse dar
- das virtuelle Objekt wird im Abstand  $X_v - X_a$  vor dem Anwender dargestellt
- das reale Objekt hat den Abstand  $X_r - X_a$



**Abb. 3-2: Prinzip der kongruenten Überlagerung in AR-Systemen [ALT03]**

Als Bedingung für eine Überlagerung muss der Abstand des virtuellen Objektes zum Anwender ( $X_v - X_a$ ) kleiner als der Abstand des realen Objektes zum Anwender sein ( $X_r - X_a$ ) [ALT03]. Der Abstand ( $X_v - X_a$ ) beschreibt nicht die Entfernung, in der das Objekt für den Anwender deutlich sichtbar ist, sondern nur, ob überhaupt eine Überlagerung der realen Umgebung mit dem virtuellen Objekt erfolgt. Bei der Verwendung von Projektionssystemen, wie zum Beispiel einer „Cave“ (siehe Kap. 6.6.1.3), kann die Darstellung ( $X_v$ ) der virtuellen Objekte auch hinter einem realen Objekt ( $X_r$ ) erfolgen. In diesem Fall überlagert das reale Objekt die virtuelle Umgebung. Dies ist zum Beispiel bei der Verwendung einer „Sitzkiste“ für Ergonomieuntersuchungen an neuen Bedienkonzepten im Fahrzeuginnenraum in einer „Cave“ der Fall. Im Weiteren wird diese Art der Überlagerung nicht betrachtet.

Bei gleichzeitiger Wahrnehmung von realem und virtuellem Objekt entsteht die visuelle Überlagerung. Wenn der Abstand zwischen realem und virtuellem Objekt zu groß ist, um gleichzeitig beide Objekte deutlich erkennen zu können, wird die Überlagerung im Allgemeinen als störend empfunden. Den zu großen Abstand muss das Auge durch ein abwechselndes Fokussieren auf die einzelnen Objekte ausgleichen. Dies führt auf Dauer zu einer Ermüdung der Augen und erhöht dadurch die mögliche Ablehnung eines solchen Systems [ALT03].

Für diese Arbeit werden für alle Objekte in einer AR-Umgebung einzelne Koordinatensysteme definiert. Sowohl für die Umwelt, den Anwender aber auch für alle anderen voneinander unabhängigen Objekte. Von Interesse sind dabei die Richtungs- und Ortsvektoren sowie die Lage der einzelnen Koordinatensysteme zueinander (siehe Abb. 3-3).

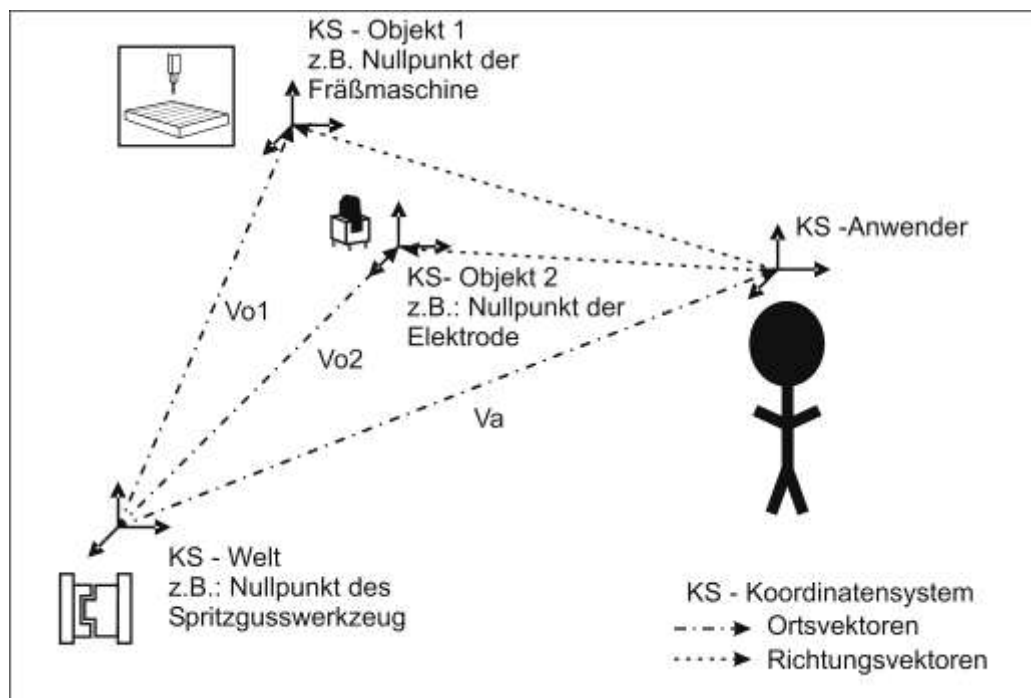


Abb. 3-3: Koordinatensysteme und Ortsvektoren in einem AR-System

Durch die Einführung eines Weltkoordinatensystems und die zugehörigen Richtungs- und Ortsvektoren für die Objekte und den Anwender vereinfachen sich der Umgang und die Verknüpfung aller Daten und Informationen erheblich. Praktisch hat dies Bedeutung für die Datenvor- und -aufbereitung, die vor dem Einsatz der AR-Anwendungen bei den einzelnen Arbeitsabläufen der Prozess- und Fertigungsabschnitte erfolgen muss. Bei fast allen Prozessschritten werden für die jeweiligen digitalen Daten (CAD, CAM, Messdaten) aufgrund der speziellen Anforderungen der einzelnen Bearbeitungs- und Qualitätssicherungsstationen jeweils neue, voneinander unabhängige Koordinatensysteme verwendet werden. Um diese Daten ohne die aufwendige Bestimmung von Transformationsmatrizen auch in einer weitgehend

automatisierten AR-Anwendung verwenden zu können, werden bereits bei der Planung/Konstruktion, der Datenerstellung/ -erfassung die Ortsvektoren der Objekte zum Weltkoordinatensystem berücksichtigt. Im Werkzeug- und Formenbau, stellt zum Beispiel der Werkzeugnullpunkt einen geeigneten Koordinatenursprung für das Weltkoordinatensystem dar. Alle weiteren Einzelteile, Komponenten, Baugruppen, Bearbeitungsinformationen und Messdaten werden bereits bei der Erstellung in diesem Weltkoordinatensystem positioniert. Bei der Fertigung sowie der Qualitätssicherung werden zusätzlich weitere Koordinatensysteme verwendet. Ein solches Koordinatensystem ist zum Beispiel der Elektrodennullpunkt. Dieser setzt sich aus dem höchsten Punkt der Elektrode und dem Mittelpunkt des Ausrichtvierkants einer Elektrode zusammen.

Für die Interaktion des Anwenders mit dem AR-System ist ein Regelkreis in der AR-Anwendung erforderlich. Dieser steuert, wie der Anwender Informationen mit dem System austauscht. In Abb. 3-4 (linke Darstellung) ist das Interaktionsschema für VR-Systeme nach Symietz dargestellt [SYM01B]. Die Bewegungen, Gesten oder Sprachkommandos des Anwenders stellen den Input für das System dar. Entsprechend der angelegten Algorithmen reagiert das System mit einem Output, der dem Anwender in visueller, auditiver oder taktiler Form zur Verfügung gestellt wird.

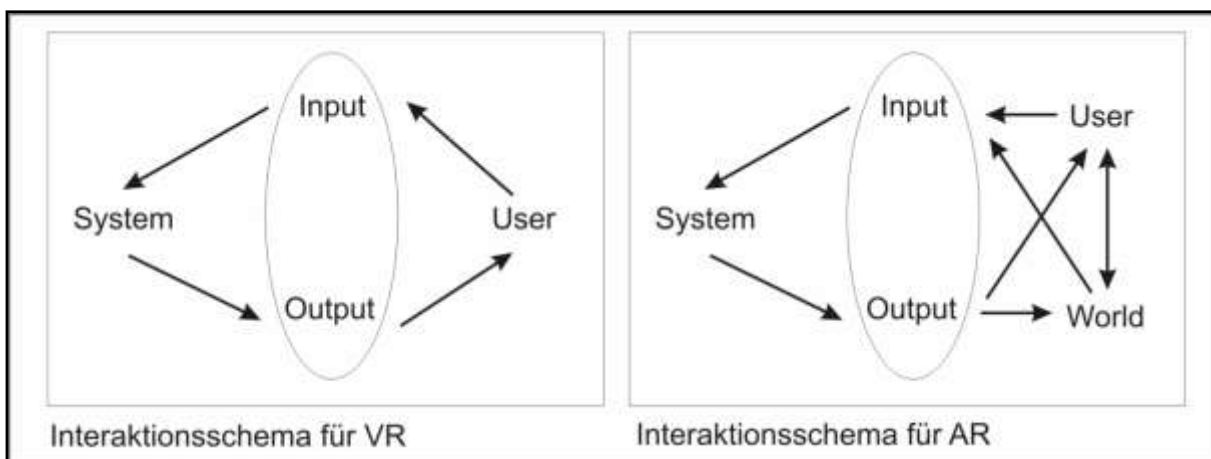


Abb. 3-4: Interaktionsschema VR nach Symietz [SYM03] und Weiterentwicklung für AR

Basierend auf dem in Abb. 3-4 (linke Darstellung) dargestellten VR-Schema erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine Weiterentwicklung zu einem AR-Schema (rechte Darstellung). Neben den Interaktionspartnern Anwender und System kann in diesem Schema auch die Welt in Interaktion mit dem System und dem Anwender treten. Ein Beispiel dafür ist, dass in bestimmten Fällen von dem System auch die Bewegung von Objekten überwacht werden muss, deren Position sich ohne Veranlassung des Anwenders verändert hat. Hier ist die Darstellung

von Zusatzinformationen bei der Bewegung von Fertigungsmaschinen oder Messanlagen denkbar [WWW25]. Ein weiterer Anwendungsfall ist die Überwachung von bestimmten Maschinen und Maschinenzuständen, wie Bearbeitungskoordinaten, Drehzahlen, Erodierpositionen usw. Dabei wertet das AR-System auch von der Maschine in elektronischer Form gemeldete Parameter aus und ändert daraufhin die Informationsdarstellung.

### 3.3 Aufbau von AR-Systemen

Nach Azuma [AZU97] ist ein AR-System durch folgende drei Merkmale charakterisiert:

- Kombination von Realität und Virtualität
- Interaktion in Echtzeit
- Positionserfassung in 3D

Diesen drei Merkmalen lassen sich technische Systeme zuordnen. Die Systeme bilden die Bausteine, aus denen ein AR-System zusammengesetzt ist: (siehe Abb. 3-5) [ALT03]:

- Trackingsystem → Positionserfassung in 3D und Interaktion in Echtzeit
- Szenengenerator → Kombination von Realität und Virtualität und Interaktion
- Anzeigesystem → Kombination von Realität und Virtualität
- Datenbanksystem → Kombination von Realität und Virtualität

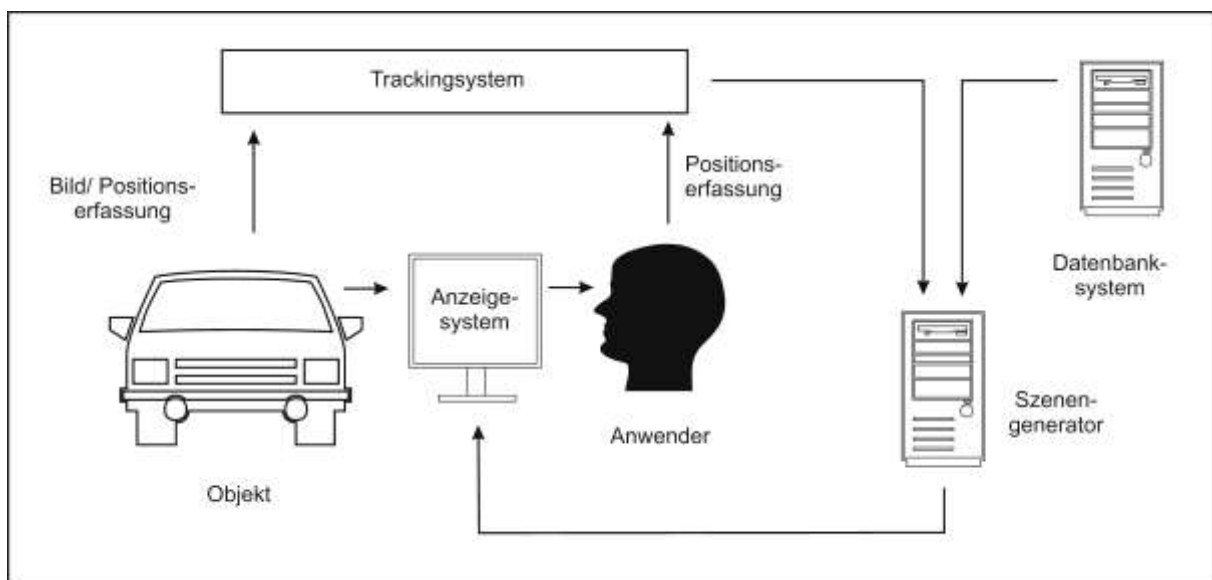


Abb. 3-5: Aufbau eines AR-Systems (nach [AZU97][ALT03])

Ein Trackingsystem erfasst die Positionen und Bewegungen der Objekte und Anwender, die für die Interaktion notwendig sind. Dieses Erfassen wird im Folgenden als Tracking bezeichnet.

net. Es existieren die unterschiedlichsten Trackingsysteme, die nach den folgenden sechs physikalischen Prinzipien arbeiten [ALT03]:

- mechanisch
- inertial
- magnetisch
- akustisch
- optisch
- elektromagnetisch.

Nachdem das Trackingsystem Position und Lage des Anwenders und der Objekte bestimmt hat, werden die Informationen an den Szenengenerator übergeben (siehe Abb. 3-5). Ein Szenengenerator besteht im Allgemeinen aus einem Computer und einer dazu passenden AR-Software, die die Informationen verarbeitet und für die Darstellung aufbereitet.

Im Szenengenerator werden auf Basis der Trackinginformationen die Positionen und Orientierungen der Objekte und Anwender zueinander bestimmt. Die Modelldaten und Zusatzinformationen über die Objekte kann der Szenengenerator von einem Datenbanksystem beziehen. Resultierend aus der eindeutigen Zuordnung, zu welchem Objekt welche Position und Lage gehört, generiert der Szenengenerator einen Output. Dieser Output wird auf einem Anzeigesystem für den Anwender dargestellt.

Zusätzlich können weitere optionale Systeme zum Einsatz kommen:

- Kamerasysteme
- Interaktionssysteme
- Autorensysteme.

Kamerasysteme bieten die Möglichkeit die Qualität der AR-Darstellung zu erhöhen und/ oder auf die Anforderungen der speziellen Aufgabe anzupassen. Ebenso verhält es sich mit den zusätzlichen Interaktionssystemen. Durch sie können entweder mehrere Benutzer gleichzeitig interagieren oder spezielle Aufgaben wie das hochgenaue Messen oder eine Maschinensteuerung mit Hilfe der Gestenerkennung, realisiert werden.

Ein Autorensystem stellt einen besonderen Teil in einem AR-System dar. Es ermöglicht dem Anwender auch schnell und einfach eine AR-Anwendung für eine spezielle Aufgabe mit einem speziellen Informationsinhalt zu erstellen und diese Anwendung zum Einsatz zu bringen.

## 4 Stand der Technik

Durch die wichtige Eigenschaft von AR „jede Art von digitaler Information anzuzeigen und mit der natürlichen Wahrnehmung eines Anwenders zu kombinieren“ lassen sich eine große Anzahl von Anwendungsmöglichkeiten finden. Durch die zunehmende Verbreitung der unterschiedlichsten elektrischen und elektronischen Geräte werden die Integration und der Einsatz von AR begünstigt. Das soll die nachfolgende Tabelle ausschnittsweise verdeutlichen:

**Tabelle 2: Anwendungsbereiche von AR**

Architektur	Industrie	Militär	Medizin	Unterhaltung	Freizeit
Visualisierung	Produktion	Aufklärung	Training	Spiele	Navigation
Planung im	Entwicklung	Statusanzeigen	Diagnose	Werbung	Zusatz und Status-
Städtebau	Wartung	Navigation	OP-	Digitale Trick-	informationen
	Bedienungs-	Wartung	Unterstützung	technik	Wohnungsplanung
	anleitungen	Training		Sport- und	
	Schulungen			Liveberichte	
	Filmindustrie			Nachrichten	

Bereits in den 60er Jahren wurden für den militärischen Einsatz die ersten Forschungs- und Entwicklungsprojekte gestartet. Die ersten Anwendungen, die hier zum Einsatz kamen, waren die so genannten „Head Up Displays“ (HUD) (siehe 6.6.1.1).

Die Forschungsergebnisse aus dem militärischen Einsatz wurden aus Geheimhaltungsgründen nicht veröffentlicht, sodass die zivile Forschung von Neuem beginnen musste. Erste zivile Forschungsvorhaben lassen sich ab Anfang der 90er Jahre finden. Ein Auslöser dafür war unter anderem, dass die Rechentechnik für eine breite Masse an Anwendern finanzierbar und nutzbar wurde [ARV04].

Die ersten Anwendungen finden sich in den USA. Als eines der ersten Unternehmen begann Boeing mit der Erforschung der militärischen Möglichkeiten der AR-Technik. Anwendungsbeispiele, die sich hier finden lassen, sind eine AR-Cockpitgestaltung und erste Montageuntersuchungen für die Wartung von elektronischen Anlagen.

In Japan etablierte sich eine von der Unterhaltungsindustrie getriebene Forschung auf dem Gebiet der AR-Anwendungen. So sind hier als Beispiele Anwendungen für Telepräsenz und „Cybershopping“ zu nennen. Als Ausgangspunkt kann das 1997 gegründete „Mixed Reality Laboratory“ gesehen werden.

In Europa haben sich in der Vergangenheit nur wenige Forschungsgruppen mit dieser Technik befasst. Zu ihnen zählten die Technische Universität Wien (TU Wien) mit ihrem Projekt

„Studierstube“ und das Fraunhofer Institut für grafische Datenverarbeitung (IGD) in Darmstadt mit dem ACTS-Projekt CICC (Collaborative Integrated Communication in Construction). In jüngerer Zeit hat die Anzahl der Projekte stark zugenommen. Hier ist als großes Forschungsprojekt das ARVIKA-Projekt (ein EU Gemeinschaftsprojekt) zu nennen. Ziel war die Betrachtung des AR-Themas mit dem Schwerpunkt der industriellen Einsetzbarkeit. Die Hauptteilnehmer waren die deutsche Automobil-, Luft-, Raumfahrt- sowie die zugehörige Zulieferindustrie [ARV04]. Aber auch Forschungseinrichtungen haben ihr Engagement an AR verstärkt. Dazu zählen unter anderem die Technische Universität Ilmenau, das Fraunhofer Institut für Medienkommunikation (IMK) in Paderborn oder auch die Technische Universität München.

Global existieren mittlerweile sehr viele Projekte, Applikationen und Systemkomponenten für AR. Um eine systematische Erfassung und Einordnung von Forschungsprojekten, Anwendungen und Hardware bemüht man sich beispielsweise auf der Homepage der Leeds Metropolitan University [WWW30][WWW01].

## 4.1 Architektur

In der Architektur wird AR größtenteils für die Visualisierung von Planungsständen im Städtebau, bei Umbaumaßnahmen sowie bei der Rekonstruktion von antiken Bauwerken eingesetzt. Ein Beispiel dafür ist das „GeBis“-Projekt an der Universität Weimar, bei dem mit Hilfe eines AR-Systems Planungsstände im Gebäudebau dargestellt oder digitale und reale Modelle verglichen werden können [WWW21].

Ein weiteres Projekt ist „ARTHUR“ vom Fraunhofer Institut Angewandte Informationstechnik (FIT). Ziel des Projektes ist es, herauszufinden wie ein Team von Architekten beim Entwurf und bei der Diskussion von Gebäuden im Stadtbild unterstützt werden könnte. Mittels „ARTHUR“ ist es möglich, zur Besprechung in Echtzeit Änderungswünsche umzusetzen. Dabei wird neben dem Entwurf eines Gebäudes auch dessen Umfeld dargestellt. Zum Einsatz kommen dabei „Optical See Through“ (OST) -HMDs [WWW20].

Der „ArcheoGuide“ ist ein System für die Darstellung historischer Bauwerke und ist vom Fraunhofer Institut IGD in Darmstadt entwickelt worden. Das System stellt den Besuchern bei der Besichtigung archäologischer Stätten positionsabhängig Informationen in Bild und Ton bereit. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit durch die Darstellung der fehlenden Bausubstanz längst zerfallene Monumente zu neuem Leben zu erwecken. Eine kommerzielle Nutzung dieses Systems ist in Vorbereitung. Als Systemkomponenten werden ein OST-Display, Global



Positioning System (GPS) für das Tracking und eine speziell entwickelte Softwareanwendung eingesetzt [WWW22].

## 4.2 Industrie

In der Industrie ist in den letzten Jahren die Erforschung und Entwicklung von AR-Anwendungen intensiviert worden. Dafür spricht eine große Anzahl an Forschungsprojekten. Eines davon ist das in den Jahren von 1999 bis 2003 laufende Projekt „ARVIKA“. Dieses Projekt wurde als deutschlandweites Verbundprojekt gestartet und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit finanziert. Ziel des Projektes war es, Möglichkeiten der Anwendung von Augmented Reality im Bereich der Produktion und Entwicklung zu untersuchen. In der industriellen Anwendung wurden dabei folgende Applikationen untersucht:

- die Montageoptimierung von Einzel- und Kleinserien,
- die Fabrik- und Hallenplanung,
- die Unterstützung in der Automobilmontage mit dem Schwerpunkt der logistischen Unterstützung und Kommissionierung und
- der Einsatz bei komplexen Montagen im Flugzeugbau bei Airbus und der Eurofighter-Fertigung.

Auf einzelne Teilprojekte des „ARVIKA“-Projektes und dessen Entwicklungsinhalt wird im weiteren Verlauf der Arbeit an den geeigneten Stellen näher eingegangen. Die Ergebnisse des Projektes wurden in Form eines Projektberichtes veröffentlicht [ARV04]. Die Projektpartner dokumentierten, wie sie die Ergebnisse zur Verbesserung ihrer Prozesse in Entwicklung und Montage einsetzen. Des Weiteren wurden Empfehlungen für die Gestaltung eines AR-Systems erarbeitet (Siehe Seite 25ff in [ARV04]).

Ein weiteres Projekt ist „TEREBES“. In diesem Projekt wurde ein System auf Basis von AR-Technik für die Unterstützung des Schweißens entwickelt und bewertet. Das AR-System wurde in einen Schutzhelm für Schweißarbeiten integriert. Durch diese Kombination ist es möglich, beim Schweißen Informationen über den Prozess zu erhalten und die Änderung der Schweißparameter zu überwachen. Der Vorteil wird von den Projektbetreibern vor allem in der anschließenden Analyse der aufgezeichneten Daten gesehen. Hier steht die Beurteilung der Qualität in Abhängigkeit der Parameter und deren Änderung zu einem bestimmten Abschnitt der Schweißnaht im Vordergrund [WWW26].

Für den Bereich Filmindustrie wird aufgrund des Umfangs der bereits im Einsatz befindlichen Anwendungen auf folgende Quellen verwiesen:

- Fernsehindustrie: Anzeige von Informationen und Animationen bei Sportübertragungen
  - o ORAD [WWW31]
  - o Sportvision [WWW35]
- Filmindustrie: Kombination von realen und virtuellen Schauspielern
  - o ALIAS, Maya [www.alias-systems.de](http://www.alias-systems.de);
  - o RealViz [www.realviz.com](http://www.realviz.com)

Alt [ALT03] untersuchte die notwendigen Voraussetzungen und die Anwendbarkeit von derzeit verfügbaren HMDs im produktiven Umfeld. Ebenfalls wurde auch ein Vergleich der Geräte untereinander vorgenommen. Bei der generellen Anwendbarkeit stand das HMD in Konkurrenz zu den „klassischen“ Arbeitsmitteln in Montage und Kommissionierung, wie der Papierliste und dem Computerbildschirm. Als Ergebnis des Tests zur benötigten Bearbeitungszeit bei einer bestimmten Aufgabe, konnte eine signifikante Verringerung der benötigten Bearbeitungszeit von der Papierliste zum HMD gemessen werden. Der Unterschied von HMD zum Monitor war nur minimal. Bemängelt wurde von 80% der Probanden die schlechte Lesbarkeit von virtuellen Texten in den HMDs.

Des Weiteren wurde ein Vergleich von HMDs verschiedener Geräteklassen (vgl. Kapitel 6.6.1) vorgenommen. Beurteilt wurde die Verwendbarkeit der Geräte in den Kriterien kontextunabhängige und kontextabhängige (nicht kongruente - kongruente) Überlagerung. Zu beachten ist, dass sich nicht jeder Displaytyp für jede Anwendung eignet. Unter dem Aspekt der Arbeitssicherheit (Bedienung von Maschinen) kann ein Video-See-Through-System nach derzeitigem Stand der Technik nicht oder nur bedingt zum Einsatz kommen, da hier das Sichtfeld des Anwenders begrenzt wird und gegebenenfalls auch eine Verzögerung zwischen Aufzeichnung des Bildes bis zur Darstellung auf dem Display liegen kann (vgl. Kapitel 6.6.1) (S.54ff).

Durch die Arbeit von Alt wurden Defizite bei den derzeitigen Displays aufgezeigt. Auch das bereits schon erwähnte „ARVIKA“-Projekt beschäftigte sich mit diesen Problemen. Da inzwischen deutliche Verbesserungen bei den Displays zu verzeichnen sind, wurde das „ARTESAS“-Projekt als Nachfolge zum „ARVIKA“-Projekt ins Leben gerufen. Ziele des Projektes sind die Bewertung von Display-Neuentwicklungen für den Industrieinsatz und die Entwicklung von robusten Trackingverfahren [WWW24].

### 4.3 Produktentstehung

In der Produktentstehung werden bereits vielfältige AR-Anwendungen untersucht und eingesetzt. Für die einzelnen Abschnitte der Produktentstehung Design, Konstruktion, Prototypenbau und Erprobung, ist jeweils ein Beispiel aufgeführt:

Design	→ SketchAR des Fraunhofer IGD in Darmstadt
Konstruktion	→ Construct3D von der Technischen Universität Wien
Simulation/FEM	→ AR-Crash bei der Volkswagen AG
Prototypenbau	→ Bolzensetzen im Prototypenbau bei BMW
Erprobung	→ IPEK Uni Karlsruhe mit dem Antriebsbaugruppenprüfstand

Ein für das Design entwickelte System ist das „SketchAR“ des Fraunhofer IGD in Darmstadt. Mit Hilfe dieses Systems kann der Designer virtuelle Objekte erzeugen und manipulieren. Für die Weiterverarbeitung der Daten ist dabei von Vorteil, dass diesem System ein CAD-System zugrunde liegt und die Daten auch in jedem anderen CAD-System verwendet werden können. [IGD03].

In Kombination mit einem Konstruktionssystem wird AR in der Anwendung Construct3D von der TU Wien eingesetzt. Diese Anwendung wird als Lernmedium für Schüler verwendet. Aufgabe ist es, Schülern unter Anleitung des Lehrers räumliche Probleme und Beziehungen besser vermitteln zu können. [KAU02].

Zwei der angesprochenen Projekte („AR-Crash“ und „Bolzensetzen“) sind Teil des bereits erwähnten „ARVIKA“ Projektes. Sie finden Anwendung in der Simulation und dem Prototypenbau. Die Untersuchungsergebnisse aus dem „AR-Crash“-Projekt und dem „Bolzensetzen“ belegen eine Verbesserung der Entwicklungsprozesse hinsichtlich Qualität und Zeitersparnis. Bei dem „AR-Crash“-Projekt wurde zusätzlich noch eine Verbesserung der Konstruktionsqualität festgestellt. Jedoch existieren derzeit noch einige Hindernisse, die überwunden werden müssen, um das Projekt weiterführen zu können. Dazu zählen unter anderem die Robustheit des Trackingsystems und die Verringerung der indirekten Tätigkeiten. Diese sind derzeit noch in erheblichem Umfang notwendig, um ein AR-System zu betreiben. [ARV04].

Bei dem Antriebsbaugruppenprüfstand am IPEK (Institut für Produktentwicklung der Universität Karlsruhe) steht die Untersuchung des Verhaltens der Prüfstandbediener bei der Erprobung von neuen Antriebsaggregaten im Vordergrund. Mittels VR- und AR-Technik wird dabei zum einen das Verhalten des Anwenders visualisiert und analysiert und zum anderen dient das AR-System als Einrichthilfe bei der Inbetriebnahme neuer Versuchsaggregate. Ziel ist es, den Umgang mit der Prüfstandsoftware zu verbessern und die Einrichtzeiten zu verkürzen [GAU03][WWW25].

## 4.4 Militärtechnik

AR wird schon seit den 60er Jahren in der Militärtechnik eingesetzt. Auf die Entwicklung in diesem Sektor soll nur kurz eingegangen werden, da für die weitere Arbeit die Ausführungen nur von geringer Relevanz sind. Sie sollen verdeutlichen, dass auch auf diesem Gebiet das Thema weiter erforscht und entwickelt wird.

Militärische Anwendungen liegen vor allem im Bereich der Unterstützung von Anwendern bei der Maschinensteuerung. In der Flugzeugtechnik kommen zum Beispiel Systeme mit „Head Up Displays“ (HUD) zum Einsatz. Für das Militär war vor allem die Möglichkeit interessant, jede Art von digitaler Information anzuzeigen und mit der natürlichen Wahrnehmung des Anwenders zu kombinieren. Dies unterstützt auf natürliche Art und Weise die Interaktion eines Piloten mit einem technischen Gerät wie einem Flugzeug [ALT03]. Mittels HUD werden den Piloten in Flugzeugen und Hubschraubern Zusatzinformationen über ihre Umgebung, in Form von Bewegungsdaten anderer Objekte, Navigation und Statusanzeigen eingeblendet. Aufgrund der Geheimhaltung auf diesem Anwendungssektor ist der Stand der Entwicklung nur schwer abzuschätzen, da die Ergebnisse über den Einsatz und die Verbreitung der AR-Technik nur selten veröffentlicht werden. So ist es durchaus denkbar, dass solche Systeme ebenso in Panzern, Schiffen oder U-Booten Anwendung finden. Häufig sind nur Hardwarehersteller von Systemkomponenten zu finden, die mit der Beteiligung an bestimmten Militärprojekten werben. So zum Beispiel auf dem Gebiet der Displayhersteller „Rockwell Collins Inc.“ [WWW36], „MicroOptical Corporation“ [WWW37] oder „NVIS“ [WWW38].

Eine der wenigen Veröffentlichungen zu diesem Thema stammt von Mark Livingston [LIV02]. Beschrieben wird ein AR System für militärische Unterstützung von Infanterieeinheiten in unbekanntem Gebiet. Das so genannte „Battlefield Augmented Reality System“ (BARS) erfüllt dabei vor allem Unterstützungsaufgaben, die die Orientierung der Infanteristen in unbekanntem Gelände verbessert. Dazu zählt, Gebäude zu identifizieren, Baupläne und Grundrisse von Gebäuden anzuzeigen oder die Positionen anderer Einheiten sowie die Straßennamen darzustellen. Für das Tracking werden GPS und inertielle Systeme eingesetzt. Als Displays fungieren OST-HMDs. Die Software ist eine Eigenentwicklung und in den Programmiersprachen Java und C geschrieben.

Aufgrund der sinkenden Investitionskosten im Computerbereich sind derzeit mehr und mehr Software- und Systemhersteller zu finden, die neben ihren militärischen Anwendungen auch zivile Applikationen anbieten. Ein Beispiel für ein kommerzielles Produkt ist das „Looksea“ Navigationssystem für Wassersportler. Mit Hilfe dieses Systems wird einem Bootsführer die

Möglichkeit gegeben, basierend auf GPS-Positionsdaten und geografischem Kartenmaterial vom Meeresgrund, Sandbänken auszuweichen oder einen festgelegten Kurs abzufahren [WWW32].

#### **4.5 Medizintechnik**

In der Medizintechnik finden Forschungen in Kombination mit der AR-Technik auf den Gebieten der Diagnostik, dem chirurgischen Training von Ärzten sowie der OP-Unterstützung statt.

Die Grundlage bildet in den meisten Fällen ein Datensatz, der mittels bildgebender medizinischer Diagnosesysteme erzeugt wurde. Diese Systeme arbeiten nach den Verfahren der Computer Resonanz Tomographie (CRT), der Magnet Resonanz Tomographie (MRT) und des Ultraschalls (2D und 3D Ultraschall).

In der Literatur werden vielfältige Beispiele für den Einsatz von AR beschrieben, wie der ARSyS Tricorder des IMK (Fraunhofer Institut für Medienkommunikation) [WWW13]. Bei diesem Projekt wird untersucht, ob mittels AR-Technik intraoperativ navigiert werden kann. Ziel ist es, ein kostengünstiges Standardsystem für die Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie zu entwickeln. Probleme bereitet bisher die Einpassung des individuellen Transplantatdesigns in den Kiefer, das für den Patienten angefertigt wird. Derzeit besteht das Problem darin, dass der Chirurg die vor der Operation geplante Positionierung des Implantates nicht präzise genug umsetzen kann. Mit Hilfe des ARSyS Tricorders soll die Positioniergenauigkeit während des Eingriffs verbessert werden.

Ein Projekt mit ähnlichem Focus stellt das „MEDARPA“ Gemeinschaftsprojekt des ZGDV (Zentrum für Graphische Datenverarbeitung e.V.) und IGD dar. Wie beim „ARSyS“-Projekt sind auch hier die Ziele: intraoperative Unterstützung, Diagnostik, Training und Planung von chirurgischen Eingriffen. Ein weiteres Beispiel ist der von Tim Suthan beschriebene Einsatz in der Leberchirurgie. [SUT02].

Eine besondere Herausforderung im medizinischen Bereich stellt das Tracking dar [WWW13][WWW26]. Grund dafür sind die Randbedingungen, die in der Patientenumgebung oder in einem Operationssaal bestehen. Dazu zählen die Sterilisierbarkeit aller Objekte oder eine sterile Verpackung und das keine Beeinflussung oder Wechselwirkung mit den bereits vorhandenen medizinischen Geräten erfolgt.

#### **4.6 Unterhaltung**

Auf dem Unterhaltungssektor ist eine stetige Zunahme von AR-Anwendungen zu beobachten. Ein Forschungsbeispiel ist die Umsetzung des „First-Person-Ego-Shooter“-Spiels „Quake“ in

das „AR-Quake“. Diese Umsetzung stellt eine Erweiterung der Realität mit AR-Komponenten in Form von virtuellen Gegnern und Gegenständen dar. Dass heißt, der Anwender bewegt sich in einer für das System bekannten realen Umgebung mit Wänden, Türen, Fenstern usw. und muss dabei die Angriffe virtueller Gegner abwehren. Zu beachten ist, dass dieses Projekt einen starken Prototypencharakter hat. Die Hardwareanforderungen der Software und die daraus resultierenden Kosten für mobile Rechnersysteme sind relativ hoch im Vergleich zu anderen PC-Systemen. Um dennoch kostengünstig zu bleiben wurden Standard-PC-Komponenten verwendet. Diese schränken teilweise die Mobilität der Anwender ein [WWW28].

Ein ähnliches Beispiel ist das „Netattack“-Projekt. In diesem Spiel steht mehr der Wettbewerb zweier menschlicher Gegner im Vordergrund [WWW29]. Ein erster kommerzieller Versuch, AR im Unterhaltungsbereich einzusetzen, wurde von der Firma Tiger Telematics mit der tragbaren Spielkonsole „Gizmondo“ unternommen. Hierbei ist es möglich, die Navigation in der virtuellen Umgebung der Spielkonsole durch eine Bewegung des Gerätes selbst zu steuern. Die Position der Spielkonsole wird dabei mittels Markertracking erfasst. Als eine Erweiterung soll eine Integration virtueller Gesprächs- und Handlungspartner, so genannter Avatare und unterschiedlicher Objekte in das Videobild des „Gizmondo“ möglich sein. Der Vertrieb der Konsole wurde wegen zu geringen Absatzzahlen Anfang 2006 eingestellt.

Ein AR-System im Unterhaltungsbereich, das bereits erfolgreich vertrieben wird, ist das Sony „Eyetoy®“ in Kombination mit der Spielkonsole „Playstation2®“. Bei diesem System und den damit vertriebenen Programmen wird es dem Anwender ermöglicht, durch die Bewegung seines Körpers direkt mit der virtuellen Welt zu interagieren. Die Palette der möglichen Anwendungen ist dabei sehr breit gehalten. Sie reicht von Fitness und Sportprogrammen bis hin zum Lösen von Geschicklichkeitsaufgaben oder dem virtuellen Spielen von Instrumenten [WWW27].

Ein Bereich, in dem AR bereits als etablierte Technik bezeichnet werden kann, ist die Übertragung von Sport-, Spiel- und Live-Berichten. Beispiele dafür sind die Einblendung von Zusatzinformationen wie Spielernamen, Linien und Abständen beim Skispringen oder Fußball sowie die Bewegungsanalysen von Sportlern (siehe Kapitel 4.2).

## 4.7 Freizeit

Für den Endanwender sind Systeme entwickelt worden, die einen praktischen Einsatz außerhalb der beruflichen Anwendung und dem Unterhaltungssektor bieten. Die auf dem Freizeitsektor verfügbaren Systeme beschränken sich derzeit fast nur auf Navigationssysteme. Jedoch ist eine Weiterentwicklung dieser Navigationssysteme zu geografischen Informationssystemen

men erkennbar. Hierbei wird die Qualität der Information nicht mehr nur auf eine reine Positionsangabe beschränkt, sondern es können auch weitere Informationen in Form von „Orten von Interesse“ (Tankstellen, Restaurants, Museen, usw.) angezeigt werden:

mobile Navigation	→	diverse Anbieter (TomTom, Gamin, ...)
Stadtführer, Museum	→	Location Based Services (IGD)

Ein völlig anderes System ist der Einrichtungsplaner "KPS Click & Design" der Firma Me-taio. Dieses System ist gedacht, um die Kaufentscheidung beim Aussuchen neuer Einrichtungsgegenstände zu erleichtern. Zu einem Einrichtungsprogramm wird ein Marker geliefert. Dieser Marker wird in der eigenen Wohnung oder an dem Ort wo die neue Einrichtung stehen soll, positioniert und mit einer Digitalkamera fotografiert. Mit dem Foto, der AR-Software und den 3D-Modellen aus dem Einrichtungsangebot der jeweiligen Firma können am privaten PC die Bilder in die AR-Software geladen werden. Durch ein Menü können jetzt die 3D-Einrichtungsgegenstände perspektivisch korrekt in dem Bild positioniert, verschoben und gedreht werden. Zusätzlich ist eine Auswahl der Einrichtungsgegenstände hinsichtlich ihrer Farbe, Anordnung und Konfiguration (2-Sitzer-, 3-Sitzer-Couch) möglich [WWW11].

#### **4.8 Bewertung des Entwicklungsstandes**

Die vorgestellten Projekte und Anwendungsbeispiele zielen meist auf die Umsetzung einer konkreten Aufgabe oder die Lösung eines Problems. Dabei stehen vor allem der Nachweis der Machbarkeit, die Identifikation der Rahmenbedingung sowie die Beurteilung des Nutzens im Vordergrund. Bei den industriegetriebenen Projekten wird in der Regel ein Einsatz nach Abschluss des Projektes angestrebt oder das System befindet sich bereits vereinzelt im Einsatz.

Im Ergebnis der Recherche kann festgestellt werden, dass sich bisher keine übergreifenden Standards hinsichtlich einer Anwendungssoftware oder eines einheitlichen Vorgehens für die Auswahl von AR-Komponenten und deren Einsatz entwickelt haben. So ist für fast jede Anwendung eine eigene AR-Software entwickelt worden. Diese Software-Systeme sind häufig sehr speziell auf die eingesetzten Hardwarekomponenten und dem damit verbundenen Anwendungsfall zugeschnitten. In Tabelle 3 ist eine Zusammenstellung der aufgeführten Beispiele aus der Literatur hinsichtlich des verwendeten Displays, des Trackingsystems und der eingesetzten Software dargestellt.

**Tabelle 3: Vergleich von Anwendungen zur eingesetzten Hard- und Software**

Anwendung/ Projekt	Display	Tracking	Software
Archeoguide	OST- HMD	GPS und Image based	Eigenentwicklung
ARTHUR	OST- HMD	-	-
TEREBES	VST- HMD	Marker based	keine Angabe
AR-Sketch	OST- HMD	ART <sup>1</sup>	ACIS Kern <sup>2</sup> und Studierstube/VT <sup>3</sup>
Construkt3D	OST- HMD	Marker based	Studierstube/VT
AR-Crash	Monitor	ART	VD2 <sup>4</sup>
Bolzensetzen	tragbares Display	ART	ARVIKA
ABP	Monitor	keine Angabe	keine Angabe
Flugzeuge	HUD	-	-
BARS	OST- HMD	GPS, inertial	Eigenentwicklung
Looksea	Monitor	GPS, digital Kompass	-
ARSyS Tricorder	tragbarer OST- Monitor	IR- und Magnet-Tracking	AVANGO <sup>5</sup>
MEDARPA	tragbarer OST- Monitor	IR- und Magnet-Tracking	keine Angabe
AR-Quake	OST- HMD	GPS	-
EyeToy®	Fernseher	Objekterkennung	Sony-Software
KPS Click & Design	Monitor	Marker based	Metaio

<sup>1</sup> ART - Advanced Realtime Tracking der Firma A.R.T. GmbH [WWW33]

<sup>2</sup> ACIS - Kern für parametrische CAD Systeme

<sup>3</sup> Studierstube/VT - Softwareentwicklung der TU-Wien für AR

<sup>4</sup> VD2 - Virtual Design 2 Produkt der Firma VRCOM [WWW34]

<sup>5</sup> AVANGO - AR/VR Software Framework des Fraunhofer IMK [WWW13]

Es kann festgestellt werden, dass neben der Entwicklung von reinen AR-Softwareapplikationen verstärkt an Authoring- oder auch Autorensystemen geforscht wird. Ein Autorensystem dient einer schnellen und unkomplizierten Erstellung von AR-Anwendungen durch die Führung des Autors bei der Applikationserstellung. Auf diese Weise werden:

- die abzuarbeitenden Arbeitsschritte,
- der benötigte Funktionsumfang,
- die darzustellenden Informationen und Modelle und
- die verfügbaren Hardwarekomponenten



zu einer lauffähigen Applikation zusammengefasst [ABA04][WWW12]. Die Konfiguration des Systems und die Anwendungserstellung werden in den Aufgabenbereich eines AR-Spezialisten verlagert. Die Arbeit an einem konkreten Problem kann somit durch einen Sachbearbeiter erfolgen, der nicht zwangsläufig spezielle AR-Kenntnisse besitzen muss.

Basierend auf dem Stand der Entwicklung werden in Tabelle 4 die Probleme zusammengefasst, die bei den vorgestellten Systemen identifiziert wurden. Als systemspezifische Probleme werden die bezeichnet, die direkt auf die verwendeten AR- Systemkomponenten zurückzuführen sind. Infrastrukturelle Probleme dagegen erfordern eine Optimierung oder eine Änderung von bisher bestehenden Prozessen oder Schnittstellen.

**Tabelle 4: Probleme beim Einsatz von AR-Technik**

<b>systemspezifische Probleme</b>	<b>infrastrukturelle Probleme</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringe Auflösung der Displaysysteme</li> <li>- geringe Auflösung der Kamerasysteme</li> <li>- unzureichende Überlagerungsgenauigkeit</li> <li>- aufwendige und lange Prozessketten für Datenvorbereitung und Anwendungserstellung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- derzeit noch sehr aufwendige Kontextgenerierung für den Anwender (Anleitungen usw.)</li> <li>- fehlende Standardisierungen für allgemeine Schnittstellen, Tracking, usw.</li> <li>- fehlende Integration in die unterschiedlichen industriellen Prozesse</li> </ul>

Die technischen Anforderungen an Displays und Kameras können nur von den Komponentenherstellern gelöst werden. Die mögliche Überlagerungsgenauigkeit hängt direkt mit der verwendeten AR-Hardware und den Kalibrieralgorithmen zusammen.

Aus dem Stand der Technik ergibt sich als ein Ziel dieser Arbeit, die kritischen Faktoren beim Einsatz von AR-Technik in der Produktentstehung zu identifizieren und eine Konfigurationsmatrix zu erstellen, um schneller zu einem erfolgreichen Einsatz dieser neuen Technologie zu gelangen.

## 5 Augmented Reality in der Produktentstehung

Eine Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten von Augmented-Reality-Technik in der Produktentstehung setzt eine Analyse der Produktentstehung und seiner Komponenten voraus.

Im Einführungskapitel des Buches „Optimierung von Entwicklungszeiten: Just-in-Time in Forschung und Entwicklung“ von Wildemann sowie einem Vortrag von Ovtcharova zum ICIDO User Meeting 2005 wird ausführlich auf die Anforderungen eingegangen, die an neue Produkte gestellt werden [WIL93][OVT05].

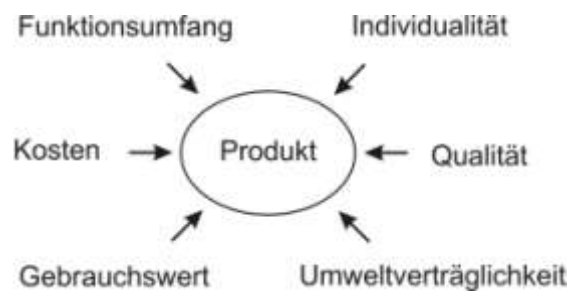


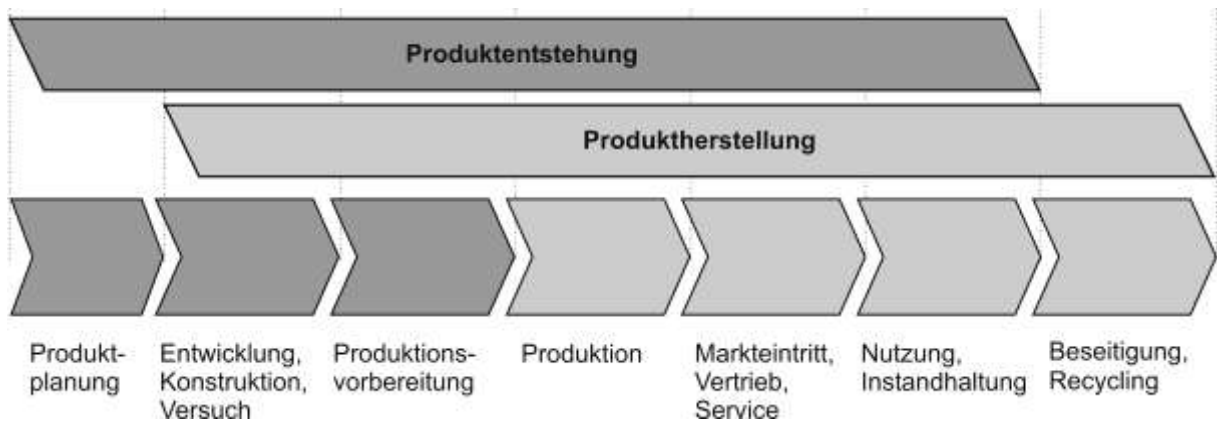
Abb. 5-1: Anforderungen an neue Produkte

In Abb. 5-1 werden die generellen Anforderungen genannt, die ein neues Produkt erfüllen muss. Ein neues Produkt muss dem Zeitgeist entsprechen, das heißt sich den heutigen Bedürfnissen potenzieller Käufer anpassen. Es muss für den Anwender einen Mehrwert bieten, den das bisherige Produkt nicht enthalten hat [EHR95][KRA00]. Um dies zu realisieren, muss die Produktentstehung optimiert werden. In einer These dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich für die Optimierung der Produktentstehung auch die Augmented Reality Technik eignet. Um die Verknüpfung von Produktentwicklung und AR besser darstellen zu können, werden zuerst folgende Fragen beantwortet: Was ist Produktentstehung? Wie geschieht die Produktentstehung? Was für Methoden werden dabei eingesetzt? Für die Beantwortung wird zunächst ein Einblick in die Methoden der Produktentstehung gegeben. Im Anschluss erfolgt eine kurze Einleitung in die Tätigkeit der Produktentstehung selbst und an welcher Stelle im Produktlebenszyklus sie einzuordnen ist.

### 5.1 Definition Produktentwicklung und Produktentwicklungsprozess

Die Begriffe Produktentwicklung (PE) und Produktentwicklungsprozess (PEP) werden in der Literatur häufig auch in Verbindung mit den Worten Produktentstehung, -erstellung und integrative Produktentwicklung verwendet [EHR95][GAU01]. In der Fachliteratur wird die Produktentstehung als Teil des Produktlebenszyklus dargestellt. Sie umfasst die Teilabschnit-

te Produktplanung, Entwicklung, Konstruktion, Versuch und Produktionsvorbereitung. Zeitlich gesehen, endet die Produktentstehung nicht zwangsläufig mit dem Einsetzen der Produktion, sondern kann in reduziertem Umfang auch, wie in Abb. 5-2 dargestellt, bis zum Ende der Nutzungsdauer in Form von einer Modellbetreuung fortgesetzt werden [EIG05].



**Abb. 5-2: Produktlebenszyklus [EIG05]**

*„Zur Entwicklung eines Produktes zählen alle Vorgänge, die nach dem Anstoß des Entwicklungsvorhabens die Aufnahme einer Produktion vorbereiten.“* [EHR98]

Bei dieser Definition von Ehrlenspiel umfasst die Produktentwicklung alle Vorgänge, die die Entwicklung eines neuen Produktes zum Ziel haben. In einer weiteren Definition von Ehrlenspiel wird aus dem Begriff Entwicklung die Produkterstellung und der Begriff des Prozesses eingeführt:

*„Unter dem Prozess der Produkterstellung versteht man den Vorgang der Erzeugung eines Produktes von der ersten Idee bzw. der Auftragserteilung bis zur Auslieferung an den Nutzer.“* [EHR95] S.120

Krause erweitert den allgemeinen Begriff auf den „konstruktiven Entwicklungsprozess“:

*„Der konstruktive Entwicklungsprozess ist Teil der technischen Vorbereitung der Produktion. Er umfasst alle zur Vorausbestimmung eines technischen Gebildes notwendigen gedanklichen, manuellen, und maschinellen Operationen, ...“* [KRA00] S.26

Davon ausgehend werden die Begriffe der Produktentwicklung und des Produktentwicklungsprozesses für diese Arbeit wie folgt definiert:

**Die Produktentstehung umfasst alle Vorgänge und Methoden zur Bestimmung der äußeren und inneren Parameter eines Produktes.**

**Der Produktentwicklungsprozess stellt die Gesamtheit aller Teilprozesse, von der ersten Idee eines Produktes, bis zum Start der Produktion sowie gegebenenfalls auch Weiterentwicklungen während der Serienproduktion, dar.**

Um einschätzen zu können, ob und in welcher Art und Weise die Augmented Reality Technik in der Produktentstehung Verwendung finden kann, wird der Vorgang der Produktentstehung genauer betrachtet.

## 5.2 Vorgang der Produktentstehung

Der Vorgang der Produktentstehung ist nach Krause „die gedankliche Vorausbestimmung eines Erzeugnisses“ und der „Beginn eines Lebenszyklus“ [KRA00].

Dabei wird ausgehend von einem Problem oder einer Aufgabenstellung eine technische Lösung entwickelt. Dies kann zum Beispiel ein neues Produkt in Form von Software, einzelnen Bauteilen oder komplexen Maschinen sein. Das fertige Produkt ist dadurch gekennzeichnet, dass 100% Produktwissen vorhanden ist und die Produktion in Serie starten kann. Neben den konkreten technischen Anforderungen, wie zum Beispiel Belastbarkeit eines Lagers, existieren allgemeine Anforderungen die grundsätzlich an die Produktentwicklung gestellt werden. Die von Eigner und Gausemeier erwähnten Anforderungen wurden in Abb. 5-3 zusammengefasst. [GAU01][EIG01][EIG05]:



**Abb. 5-3: Anforderungen an die Produktentwicklung**

Damit bei der Vielzahl der allgemeinen und technischen Anforderungen eine zielgerichtete Entwicklung erfolgt und kein notwendiger Schritt bei der gedanklichen, manuellen und maschinellen Bearbeitung des Entwicklungsvorhabens vernachlässigt wird, ist in der Fachliteratur ein Ablaufplan oder auch Vorgehensplan beschrieben. In der VDI Richtlinie 2221 ist ein allgemeiner Ablaufplan zur Entwicklung technischer Produkte definiert. Diese Richtlinie

dient als Leitlinie für die Definition von Produktentstehungsprozessen. In ähnlicher Form ist dieser Ablaufplan auch in anderen Literaturquellen zu finden. In den Veröffentlichungen von Krause, Ehrlenspiel und Gausemeier [KRA00][EHR95][GAU01] wird die Entwicklung als Tätigkeit in 7 Schritten erklärt [Abb. 5-4].

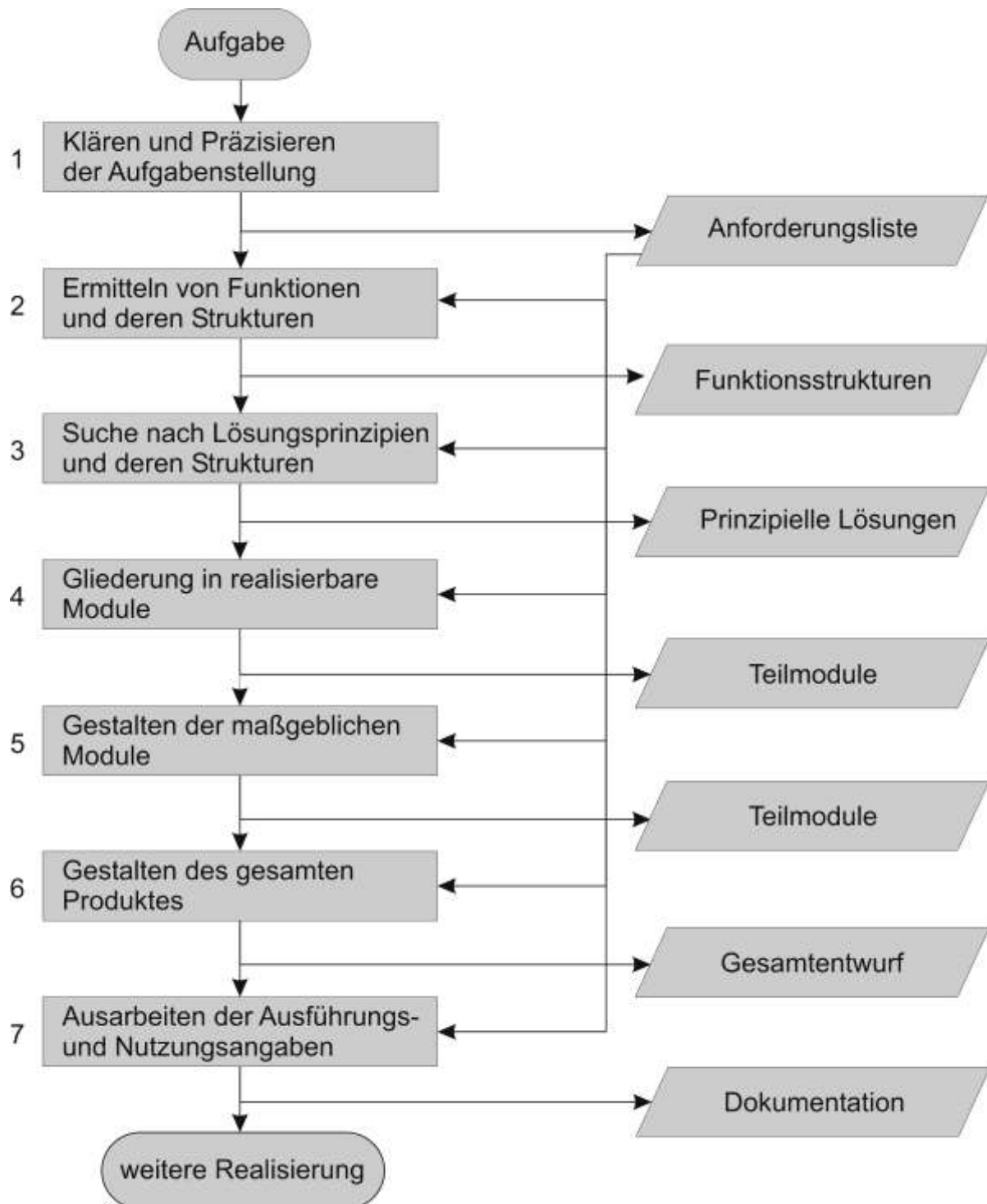


Abb. 5-4: Konstruktionssystematik nach VDI 2221 [KRA00]

In dem ersten Schritt wird eine Anforderungsliste oder auch ein Lastenheft basierend auf der Aufgabe durch „Klären und präzisieren der Aufgabenstellung“ erarbeitet. Daraus werden mittels verschiedener Methoden in einem zweiten Schritt die Funktionen und deren Strukturen synthetisiert. Anschließend werden prinzipielle Lösungen für das Problem aus den Bereichen Optik, Mechanik, Elektromechanik, Elektronik und Software gesucht. Diese werden in dem vierten Schritt in realisierbare Module gegliedert. In dem fünften Schritt erfolgt die Gestaltung der Teilmodule, die für die Aufgabe von Bedeutung sind. Im sechsten Schritt werden die Teilmodule zu einem Gesamtentwurf zusammengefasst. Im siebten und letzten Schritt findet die Erarbeitung der Ausführungs- und Nutzungsangaben, der Fertigungsunterlagen, Produktdokumentationen, Schaltpläne und Programmdokumentationen statt. Dieser Ablaufplan beschreibt den Gesamtprozess der konstruktiven Entwicklung eines Produktes.

Für die konkrete Bearbeitung von Einzelproblemen werden verschiedene Methoden eingesetzt, auf die nicht weiter eingegangen wird, da dies für die weitere Arbeit unerheblich ist. Vergleiche dazu [KRA00][EHR95][PAH97].

Um das elementare Arbeiten zu demonstrieren, das bei der gedanklichen Entwicklung notwendig ist, werden zwei ausgewählte Methoden näher beschrieben. Die erste Methode ermöglicht eine „Klassifizierung“ der Lösungsideen, die dadurch geordnet und systematisiert werden können, mit dem Ziel Mehrdeutigkeiten beim Konstruieren zu vermeiden. Zusätzlich ermöglicht die Klassifizierung weitere Voraussetzungen und Lücken in der Beschreibung zu finden sowie neue Prinzipien zu generieren [KRA00].

**Tabelle 5: Grundprinzip Head Mounted Display**

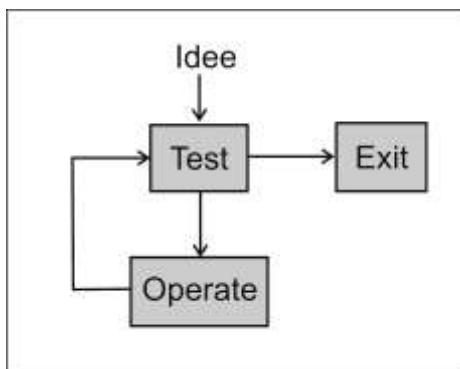
<b>Kern der Aufgabe</b>		<b>Durch</b> ein Anzeigesystem	
	Gegebenheiten	<b>werden</b>	dem Anwender
	Funktionsziel		in seinem Sichtfeld digitale Informationen über seine Aufgabe in Abhängigkeit mit realen Objekten und Umgebung zu Verfügung gestellt,
	eingrenzende Bedingung	<b>und zwar</b>	durch Überlagerung,
<b>Keim für alle Lösungen</b>	erforderliche Maßnahmen	<b>wenn</b>	dies in Abhängigkeit der Blickrichtung und der Bewegung des Anwenders erfolgen kann.

Entwickelt wurde diese Methode von Bischhof und Hansen. Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Konsumgütern und der fortschreitenden Industrialisierung und technisierten Pro-

duktion, mussten für die Produktentstehung Methoden entwickelt werden, mit deren Hilfe eine gerichtete Produktentstehung durchgeführt werden kann, die mit der steigenden Produktion und Nachfrage mithalten konnte. Diese Methode wird auch als „Methode des Grundprinzips“ bezeichnet. Dabei wird ein zu lösendes Problem auf „den Kern der Aufgabe“ und die „erforderlichen Maßnahmen“ zur Lösung vereinfacht. Beispielhaft wird dies im Rahmen der Arbeit für Head Mounted Displays demonstriert (Tabelle 5, vgl. auch Tabelle 1).

Aufbauend auf der Methode des Grundprinzips können jetzt die einzelnen Displaytypen in ein System eingeordnet werden. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass für ein bestimmtes Problem eine hohe Anzahl an Lösungen generiert werden kann. In einem anschließenden Schritt wird durch Wichtung der einzelnen Eigenschaften und weiteren Anforderungen sowie einer getrennten Bewertung der Lösungen die optimale Lösung für das Problem ermittelt. Sollte im weiteren Lauf der Entwicklung ein Problem mit der gewählten Lösung auftreten, kann in der Bewertungstabelle eine andere Lösung entsprechend der jetzt bekannten Rahmenbedingungen gewählt werden.

Die zweite hier kurz vorgestellte Methode ist das „TOTE-Schema“. In der Literatur wird sie zum Beispiel im Zusammenhang mit dem „Münchner-Vorgehens-Modell“ MVM zur Produktentwicklung beschrieben (vgl. Abb. 5-5) [EHR98]. Dabei wird ein Modell, ein Verfahren oder ein Algorithmus einem Test unterzogen. Entspricht das Ergebnis des Testes nicht dem



Zielwert, wird die Lösungsidee durch eine gezielte Variation verändert, bis das Testergebnis dem Zielwert entspricht.

Umso häufiger eine Idee durch Variation getestet und verändert werden muss, umso zeitaufwendiger und kostenintensiver gestaltet sich die Produktentwicklung. [EHR95]

Abb. 5-5: TOTE-Schema

### 5.3 Produktentstehungsprozess

Der Produktentstehungsprozess (PEP) ist ein spezifisch definierter Arbeitsprozess mit dem Ziel, ein bestimmtes Produkt zu erzeugen. Allgemein können, wie in Abb. 5-6 dargestellt, Prozessschritte für den PEP definiert werden.

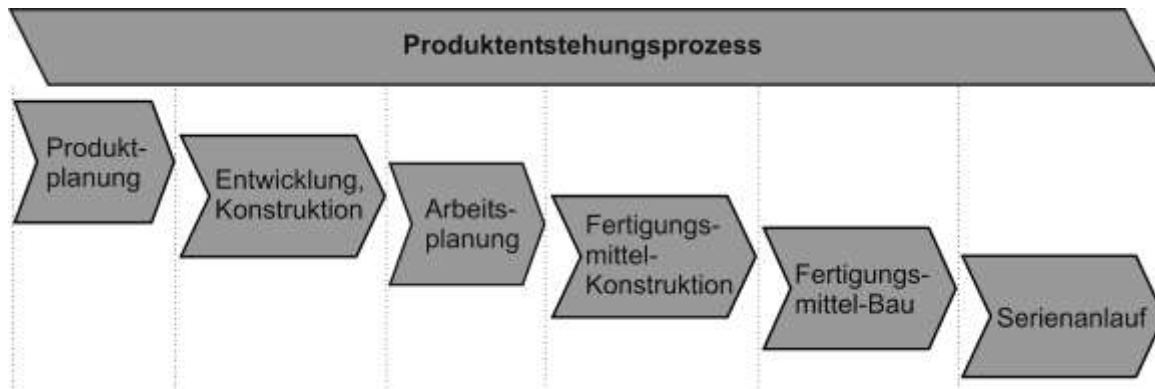


Abb. 5-6: Produktentstehungsprozess in allgemeiner Form [GAU02]

Der Abschluss der einzelnen Teilprozesse wird in der Literatur häufig als Meilenstein bezeichnet. Der „Verein Deutscher Automobilbauer“ (VDA) hat für den Produktentstehungsprozess eines Kraftfahrzeuges die Meilensteine wie in Abb. 5-7 definiert. Durch die Zerlegung des Prozesses in kleine Teilschritte ist es möglich, das Entstehen des Gesamtproduktes bei der Entwicklung transparenter zu gestalten und dadurch mehr Chancen für die Prozesssteuerung zu erhalten [GAU01].

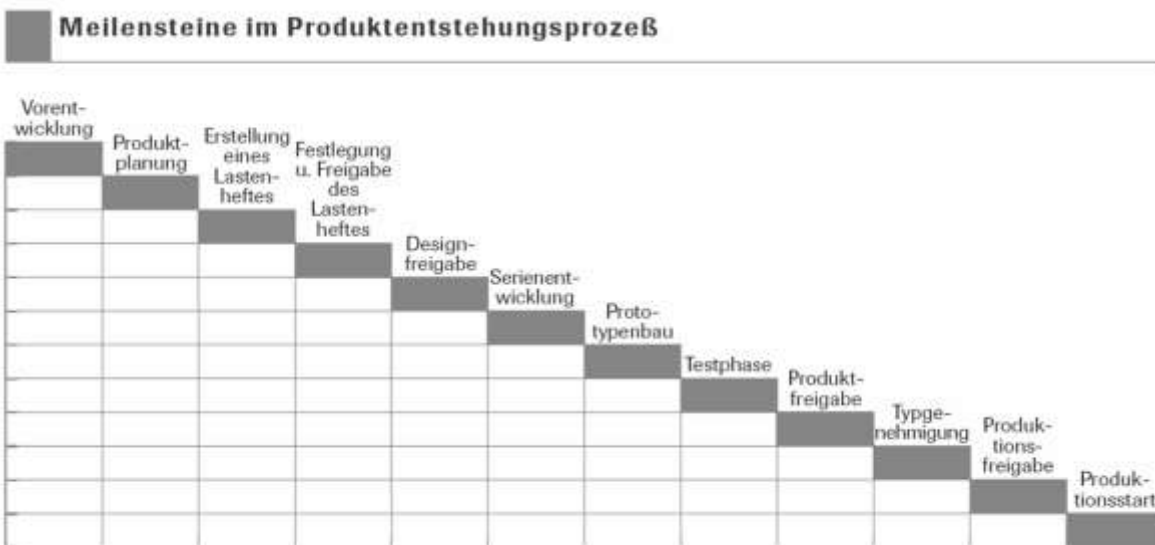


Abb. 5-7: Quelle VDA (2001) <http://www.vda.de><sup>1</sup>

Die Darstellung in Abb. 5-7 entspricht einer seriellen Abarbeitung der einzelnen Teilprozesse. Um der allgemeinen Anforderung der Verkürzung der Entwicklungszeit der Produktentstehung gerecht zu werden, ist es erforderlich Prozesse zu starten, bevor die vorhergehenden Prozesse vollständig abgeschlossen sind. Es entsteht ein annähernd paralleles Arbeiten aller Beteiligten an einem Entwicklungsprojekt. Diese Veränderung in der Prozessreihenfolge wird

<sup>1</sup> (Quelle VDA (2001) [http://www.vda.de/de/service/jahresbericht/auto2001/pdf\\_charts/7\\_194.pdf](http://www.vda.de/de/service/jahresbericht/auto2001/pdf_charts/7_194.pdf))



als „Simultanes Engineering“ bezeichnet. In Abb. 5-8 ist in einem Zeitdiagramm dargestellt, wie durch das Parallelisieren von Prozessschritten Entwicklungszeit eingespart werden kann [GAU01][WIL93]. Um eine Parallelisierung zu ermöglichen ist ein hohes Maß an Transparenz im Entstehungsprozess und eine strikte Einhaltung der definierten Schnittstellen und Zielwerte zwischen den Entwicklungsteams der einzelnen Prozessschritte erforderlich.

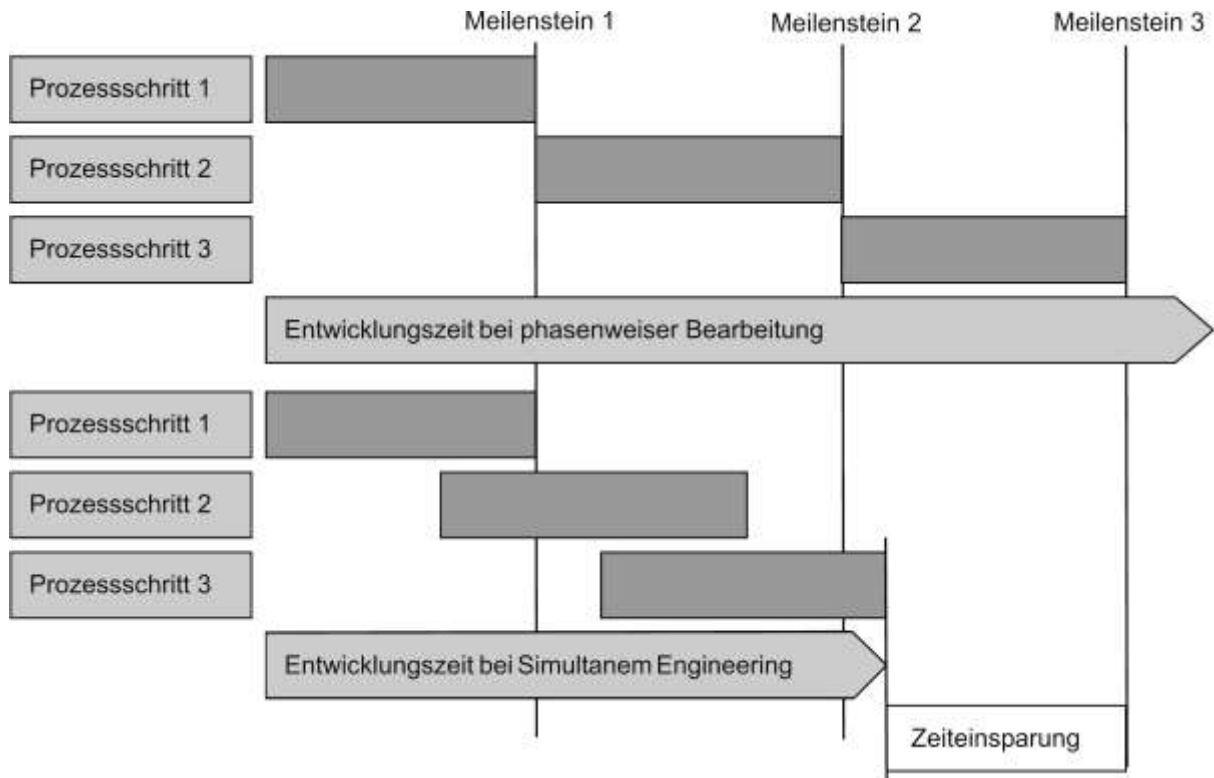


Abb. 5-8: Simultanes Engineering [WIL93]

Eine vollständige Parallelisierung der Teilprozesse ist nicht möglich, da ergebnisbedingt bestimmte Prozesse erst gestartet und andere wiederum abgeschlossen werden können, wenn die vorhergehenden Prozesse ihre Ergebnisse übermittelt haben.

Neben der Prozessabfolge, der einzelnen Teilprozesse und deren Wirken untereinander, existieren weitere Einflussfaktoren für einen PEP. Ehrlenspiel fasst in der „Integrierten Produktentwicklung“ [EHR98] die allgemeinen Faktoren in Form eines „Ishikawa“ (Fischgrätendiagramm) zusammen (siehe Abb. 5-9).

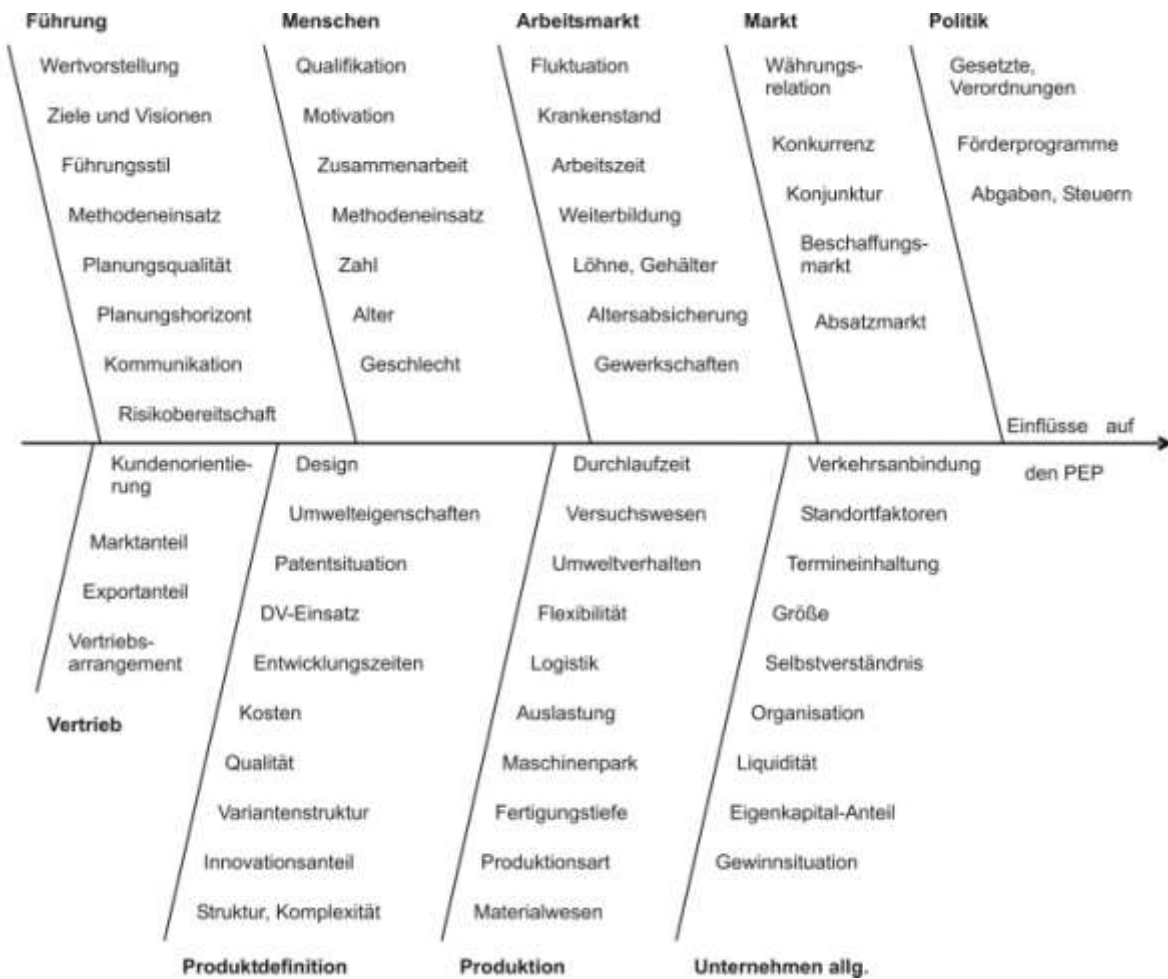


Abb. 5-9: Einflüsse auf den Prozess der Produkterstellung [ERH00]

Die Vielzahl an Faktoren macht deutlich, dass es sich bei dem PEP um einen komplexen Vorgang handelt. Nach dem Systemansatz von Lindemann ist Produktentwicklung „ein komplexer Prozess mit vielen Beteiligten...“ [LIN05].

## 5.4 AR für den Produktentstehungsprozess

Eine weitere Verkürzung der Entwicklungszeit über das „Simultane Engineering“ hinaus, wird durch eine Optimierung der einzelnen Prozessschritte erreicht. Ziel ist es die Schleifendurchläufe des „TOTE-Schemas“ während der Produktentstehung zu reduzieren. Spath beschrieb den Nutzen der Digitalisierung für den Produktentstehungsprozess anhand der vier Auswirkungen der Zeitoptimierung, der Prozessoptimierung, der Qualitätssteigerung und der Kostenreduktion [SPA05].

In Abb. 5-10 [OVT05] sind die Auswirkungen des Einsatzes von virtuellen Techniken auf den PEP und dessen zeitlichen Verlauf dargestellt. Es ist zu erkennen, dass zu einem früheren Zeitpunkt die Produktionsreife, in Form von 100% Produktwissen, erreicht werden kann. 100% Produktwissen bedeutet, dass über das zu entwickelnde Produkt das gesamte für die

Herstellung notwendige Wissen zusammengetragen wurde. Diese Erkenntnis wird durch die Arbeiten von (Eigner [EIG05] und Gausemeier [GAU01]) bestätigt.

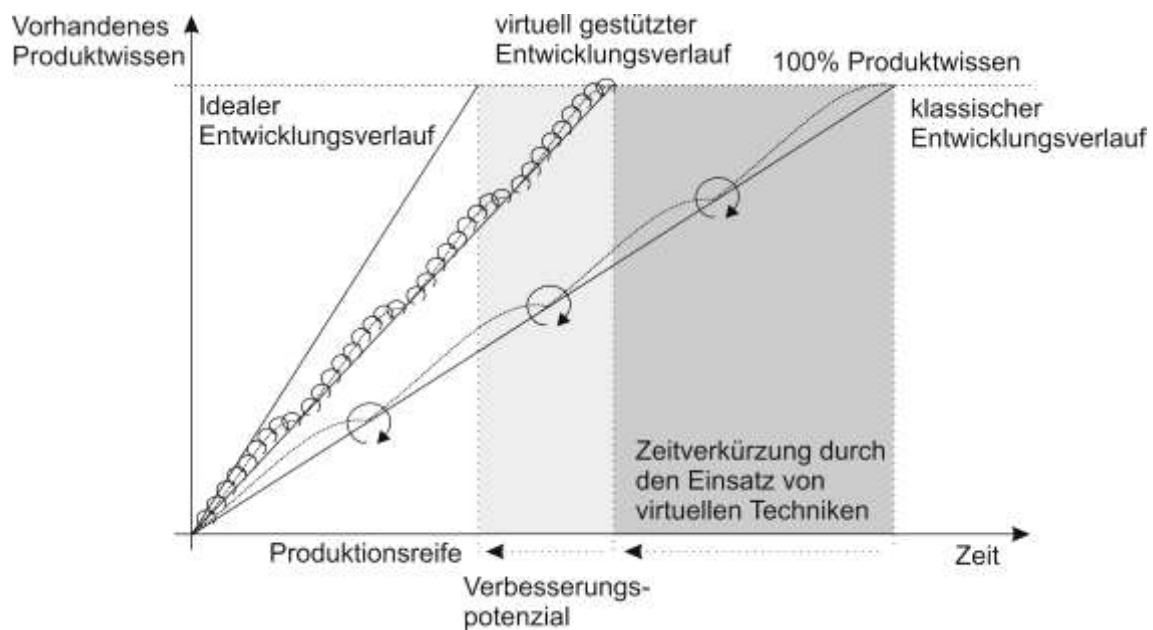


Abb. 5-10: Auswirkungen im Entstehungsprozess [OVT05]

Ausgehend von diesen Erkenntnissen, ist die Frage zu beantworten, warum nicht alle Entwicklungen rein virtuell durchgeführt werden. Ein wichtiger Grund dafür ist, dass aufgrund der Modellbildung mit einem digitalen Modell nur ein kleiner Bereich der Realität abgebildet wird. Aufgrund dieser „Reduzierung“ der Realität im Modell ist für eine endgültige Beurteilung von Produkten und deren Zulassung zum Verkauf, das Testen mit realen Prototypen erforderlich.

Durch den Einsatz der virtuellen Techniken in der Produktentstehung hat bereits eine Veränderung des klassischen Produktentstehungsprozesses stattgefunden.

Um die Zusammenhänge während der Produktentstehung in Kombination mit AR besser darstellen zu können, wird für diese Arbeit ein spezieller AR-Produktentstehungsprozess definiert. Dieses AR-PEP wird für die drei obersten Prozessschritte der Produktentstehung definiert. Innerhalb dieser Prozessschritte kommen die unterschiedlichsten Verfahren und Methoden zur Produktentstehung zum Einsatz. Für den AR-PEP werden die jeweiligen Prototypen, die für die einzelnen Tests und Versuche aufgebaut werden, betrachtet (siehe Abb. 5-11). In der „klassischen“ Produktentstehung kommen dabei sehr unterschiedliche Prototypen zum Einsatz. Das Ziel eines Prototyps ist es, einen kleinen Teil der Realität abzubilden, um Aussagen über das Endprodukt treffen zu können. Weicht das Ergebnis eines Versuchs vom Ziel ab, werden der jeweilige Prototyp und damit auch das fertige Produkt angepasst. Die jeweiligen

Prototypen können analog zu den in Kap. 5.3 beschriebenen Meilensteinen, auch als eben solche bezeichnet werden.

Die Ausgangsbasis einer Produktentstehung stellt die Entwicklungsaufgabe dar. Dieser Aufgabe schließt sich das Produktdesign mit dem Designprototyp an. Basierend auf den Vorgaben der Aufgabe wird dem Produkt eine äußere Form gegeben. Entspricht das Design den Vorstellungen, schließt sich mit der Konstruktion die vollständige Produktdefinition an. In diesem Schritt steht vor allem die vollständige Formbeschreibung im Mittelpunkt. Die Hauptaufgaben, die die Konstruktion umsetzen muss, sind das Erfüllen der geforderten Produktfunktionen (Funktionsprototyp, Materialprototyp) sowie die Gewährleistung der Herstellbarkeit des Produktes (Fertigungsprototyp, Montageprototyp). Sind die notwendigen Daten für die jeweiligen Prozessschritte in der Konstruktion bestimmt, kann im Prototypenbau ein Produktentwurf in Form eines Prototyps gefertigt werden. Dieser Prototyp wird einer ausführlichen Testphase unterzogen, um sicherzustellen, dass die Funktionen erfüllt, sowie gesetzliche Bestimmungen eingehalten werden. Sind die erforderlichen Tests mit dem Prototypen erfolgreich verlaufen, schließt sich die Produktionsvorbereitungsphase an. In dieser Phase werden alle Produktionsmittel gefertigt. Daran schließt sich die eigentliche Einzelteilerfertigung an. In dem letzten Schritt, der Fertigstellung des Produktes, erfolgt die Montage der Einzelteile.

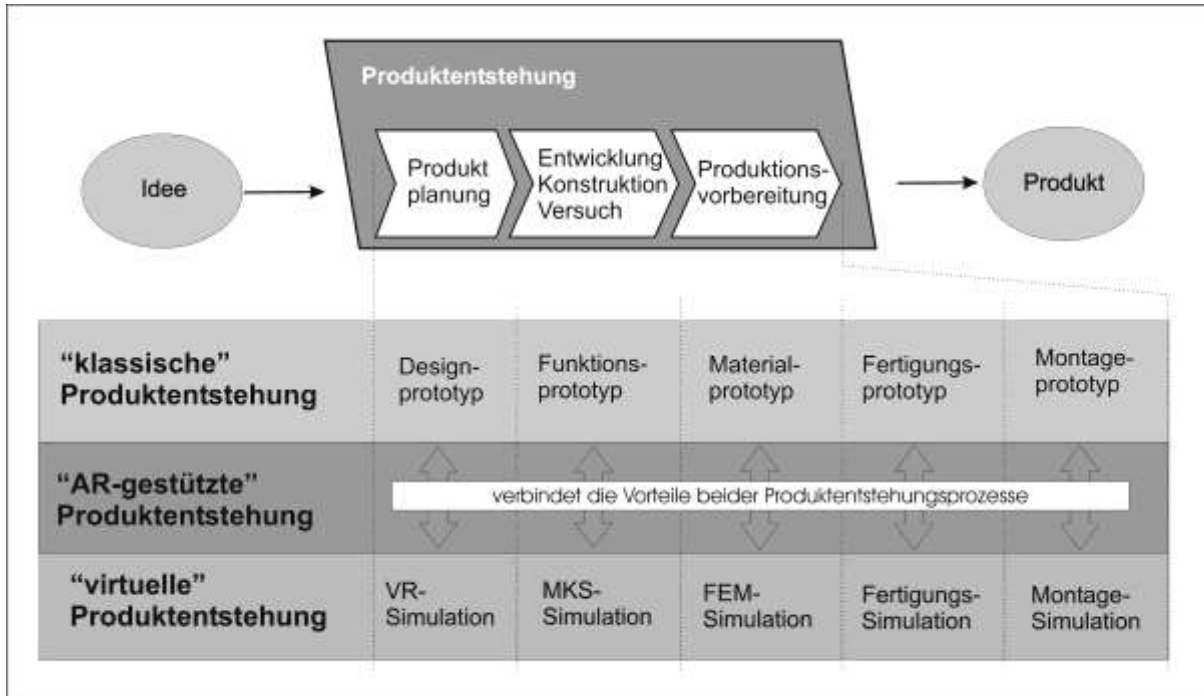


Abb. 5-11: AR-Produktentstehungsprozess

Parallel zu dem „klassischen“ PEP etabliert sich schon seit einiger Zeit der „virtuelle“ Produktentstehungsprozess. Bei dem „virtuellen“ Produktentstehungsprozess wird im Anschluss an die Konstruktion kein realer, sondern ein virtueller Prototyp aufgebaut (siehe Abb. 5-11).

Dafür müssen die Daten der Konstruktion in einem Datenaufbereitungsschritt für die virtuellen Prototypen aufbereitet werden. Mit Hilfe dieser Daten werden die verschiedensten Berechnungen und Simulationen durchgeführt um das Verhalten des späteren Produktes besser beurteilen zu können. Sind alle Vorgaben erfüllt, wird analog zum „klassischen“ PEP mit der Produktionsvorbereitung fortgefahren.

Es existiert somit eine Möglichkeit, den klassischen Prototypen durch einen Virtuellen zu ersetzen. Für die verwendeten Prototypen im PEP existieren jeweils reale sowie virtuelle Prototypen. Diese werden in Abb. 5-11 dem jeweiligen Gegenstück gegenüber dargestellt (Rapi-tech 2007).

Welcher Prototyp jeweils eingesetzt wird, richtet sich nach Zeit- und Kostenfaktoren. Prinzipiell kann davon ausgegangen werden, dass mit der steigenden Komplexität auch der Preis eines Prototyps zunimmt. Für die Entscheidung, ob ein realer oder virtueller Prototyp verwendet wird, ist in den meisten Fällen die zu erwartende Qualität der ausschlaggebende Faktor. Das heißt, es wird aufgrund der kürzeren Zeit für die Erstellung und die größere Variantenvielfalt häufig den virtuellen Prototypen der Vorzug gegeben. Dies wiederum führt dazu, dass die zeitaufwendige mechanische Bearbeitung auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden kann und mehr Möglichkeiten bestehen, schneller Änderungen am Modell vorzunehmen. Mit anderen Worten, es wird zu einem früheren Zeitpunkt der Zustand von 100% Produktwissen erreicht [KRA00][EIG05].

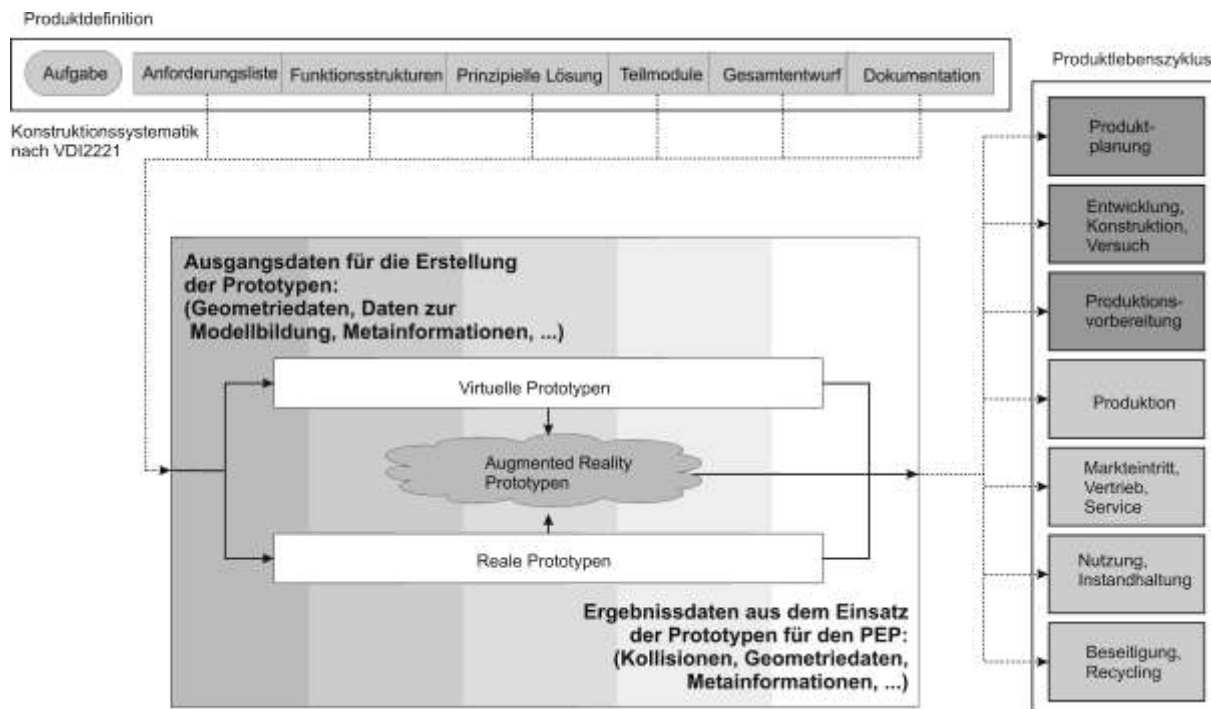
Erst wenn auf Basis der virtuellen Prototypen keine sicheren Aussagen hinsichtlich der Erfüllbarkeit der Vorgaben getroffen werden können, wird auf reale Prototypen zurückgegriffen. Dazu zählen Vorgaben mit Bezug auf bestimmte physikalische Eigenschaften: wie Kollisionen, Gravitation, Schwingungen, Wärmeausdehnungen und elastische Verformungen, aber auch Aussagen zu Montageabläufen und Montagetoleranzen.

In einer vom Fraunhofer Institut IAO im Jahr 2003 durchgeführten Studie zur „Digitalen Produktentwicklung“ wird von einer Zunahme bis zu 60% der Anwendung von digitalen Prototypen, innerhalb von 5 Jahren, ausgegangen [SPA05]. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass der Einsatz von realen Prototypen vollständig aus der Produktentstehung verschwinden wird. Aufgrund neuer Prototypenfertigungsverfahren wird versucht, mit realen Prototypen gegenüber den virtuellen Prototypen konkurrenzfähig zu bleiben bzw. zu werden.

In dem beschriebenen AR-PEP erfolgt eine Erweiterung des PEP um die AR-Komponente als Bindeglied zwischen dem realen und dem virtuellen Prototypen. Augmented Reality als virtuelle Technik verwendet die gleichen aufbereiteten Daten für die „augmentierten“ Prototypen, wie die „virtuellen“ Prototypen und bietet dadurch die Möglichkeit, die Vorteile der „vir-

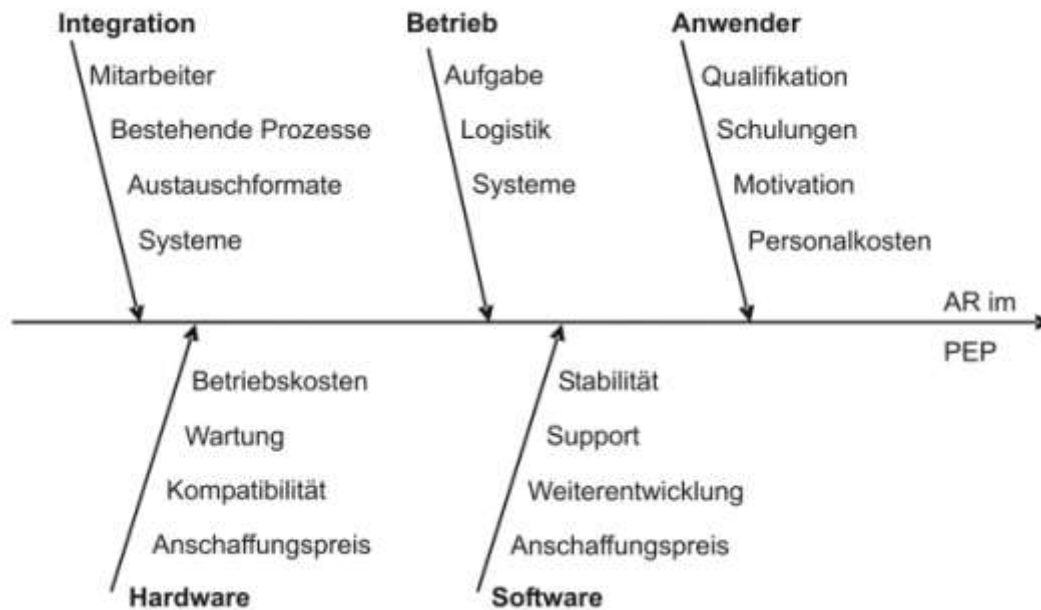
tuellen“ Prototypen zu nutzen. Ein Vorteil der realen Prototypen ist, dass das Größenverhältnis in den augmentierten Prototypen übernommen wird. Aufgrund der Betrachtung der virtuellen Daten im realen Kontext ergeben sich zusätzlich weitere Vorteile für die Entwicklung. Es ist nicht notwendig, ein komplettes Produkt oder eine Baugruppe neu zu bauen, sondern es wird ein virtueller Austausch von einzelnen Komponenten oder die Darstellung von Metainformationen in Form von Werten oder Hinweisfeilen möglich. Dadurch wird es erreicht die Vorteile der klassischen und der virtuellen Prototypen zu kombinieren.

Wie bereits erwähnt, basieren alle Prototypen auf den gleichen Ursprungsinformationen. Wie in Abb. 5-12 dargestellt, bilden die erzeugten Daten während der Produktdefinition (Konstruktionssystematik nach VDI 2221) die Datenbasis für alle Prototypen. Diese wiederum finden Verwendung in den einzelnen Prozessschritten des Produktlebenszyklus.



**Abb. 5-12: Datenmodell für Prototypeneinsatz im PEP**

Um eine erfolgreiche Integration der AR-Technik in den PEP vornehmen zu können, müssen die wirkenden Einflussfaktoren als Randbedingungen für den Einsatz identifiziert werden. Während des „ARVIKA“-Projektes wurde die Kostenstruktur für die Integration und den Betrieb von AR-Anwendungen in der Entwicklung untersucht [ARV04]. Diese Strukturen bilden einen Teil der Einflussfaktoren, die in Abb. 5-13 dargestellt und in Umgebungsfaktoren (oben) und Systemfaktoren (unten) unterschieden werden.



**Abb. 5-13: Einflussfaktoren für den AR-Einsatz im PEP**

Die Umgebungsfaktoren stellen das betriebliche Umfeld dar, in dem die AR-Anwendung integriert werden soll. Die Integration ist abhängig von den verschiedenen Integrations-, Betriebs- und Anwenderfaktoren. Diese Faktoren beschreiben die systemtechnischen Randbedingungen hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Mitarbeiter, der bisher zur Anwendung kommenden Arbeitsprozesse und deren mögliche Erweiterbarkeit. Des Weiteren zählen die eingesetzten Konstruktionssysteme mit ihren jeweiligen Schnittstellen dazu.

Für den Einsatz ist entscheidend, welche Aufgabe das System hat. Wichtig ist hierbei:

- ob eine feste Integration des AR-Systems in die bestehenden Prozesse erfolgen,
- weitere Prozesse auf die AR-Ergebnisse aufbauen,
- das System zur Fehlerkontrolle in der Qualitätssicherung eingesetzt werden,
- oder es als Werbe- und Präsentationssystem dienen soll.

In Abhängigkeit der Aufgabe stellen die umgebenden Datenbank- und Verwaltungssysteme ebenfalls zwei Einflussfaktoren dar. Durch diese Systeme werden in komplexen Prozessen alle Arten von Daten, Baugruppen und Komponenten verwaltet. In welcher Art und Weise ein Austausch von Informationen erfolgt, kann ein wichtiger Faktor sein, ob ein AR-System erfolgreich eingesetzt werden kann oder nicht.

Der Anwender stellt ebenfalls einen Umgebungsfaktor für ein AR-System im PEP dar. Seine Qualifikation sowie sein persönliches Interesse an dieser Technik sind für die Integration und den erfolgreichen Betrieb eines AR-Systems verantwortlich.

Die Systemfaktoren sind die Parameter und Anforderungen, die ein AR-System erfüllen muss, um für den jeweiligen Anwendungsfall geeignet zu sein.

Bei der Auswahl der Hardware sind die allgemeinen Betriebskosten, die Wartungskosten, die Kompatibilität mit bereits bestehenden Systemen und der Anschaffungspreis die entscheidenden Parameter.

Die Softwareparameter lassen sich in gleicher Weise beschreiben. Hier sind es neben dem Anschaffungspreis, den Kosten für Weiterentwicklung und dem allgemeinen Support auch die Stabilität des Systems, die über dessen Anschaffung entscheiden.



## 6 Augmented Reality Systemkomponenten

In den Grundlagen der AR-Technik wurden Definition und Aufbau von AR-Systemen diskutiert. Um für eines der Ziele der Arbeit, der Erstellung einer Konfigurationssystematik für AR, eine Grundlage zu schaffen, müssen die einzelnen Systemkomponenten ausführlicher beschrieben und diskutiert werden. Ziel ist es, die Funktionen und Eigenschaften der jeweiligen Komponenten aufzuzeigen und ihre Verwendbarkeit für den jeweiligen Einsatz kritisch und objektiv beurteilen zu können. Die Reihenfolge ergibt sich durch den Informationsfluss, der in Kapitel 3.3 für ein AR-System beschrieben wurde.

### 6.1 Die Sinnesmodalitäten des Menschen

Der Mensch erlebt seine Umgebung mit Hilfe der Sinnesorgane. Diese Organe nehmen als Sensoren Reize aus der Umwelt wahr. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird von fünf Sinnen gesprochen. Dem Sehen, Hören, Riechen, Tasten und Schmecken. Jedoch können nicht alle Wirkprinzipien von Stimulationsgeräten der VR- und AR-Applikationen eindeutig einem der fünf Sinne zugeordnet werden. Aus medizinischer Sicht wird nicht von einem Sinn gesprochen, sondern von verschiedenen Sinnessystemen, die sich in körperferne und körpernahe Sinne einteilen lassen. Dem klassischen Begriff des Sinns könnte hier der Begriff der Sinnesmodalität gleich gesetzt werden. Eine Einteilung wurde in Tabelle 6 vorgenommen (vgl. [SCH02]). Diese erweiterte Unterscheidung wird kurz am Beispiel der Anwendung eines Flugsimulators erläutert. Bei einer Flugsimulation wird neben Auge, Haut und Ohr auch das Gleichgewichtsorgan stimuliert. Bei der klassischen Einteilung kann keine direkte Zuordnung des Gleichgewichtssinns erfolgen. Hinzu kommt, dass dieser Sinn anatomisch ein Teil des Ohres ist.

In den weiteren Ausführungen werden hauptsächlich das visuelle, das auditive und das taktile System betrachtet. Kurz erwähnt an dieser Stelle sei das olfaktorische und vestibuläre System, da für diese Systeme ebenfalls eine künstliche Stimulation möglich ist.

Das vestibuläre System oder auch der „Gleichgewichtssinn“ genannt, lässt sich mit dem aktuellen Stand der Technik nicht mit Hilfe eines technischen Gerätes virtuell stimulieren. Bei der Verwendung von Fahrsimulatoren, erfolgt zu der visuell wahrgenommenen Bewegung eine reale Lageänderung, durch eine von außen erzwungene Bewegung des Anwenders. Im Vergleich zur visuellen bzw. taktilen Stimulation, wird dem Gleichgewichtsorgan, kein rein virtueller Sinneseindruck vermittelt, sondern eine Überlagerung der virtuellen Bewegung mit einer realen Lageänderung des Anwenders.

Für die Stimulation des olfaktorischen Systems sind ebenfalls technische Systeme entwickelt worden. Diese fanden bisher keine Verbreitung, da Versuche der Markteinführung misslungen. Von Nachteil für diese Systeme ist, dass bei vielen Anwendungen Gerüche nicht erforderlich sind und dass die Bewertung, ob ein Geruch angenehm oder abstoßend ist, etwas Subjektives darstellt.

**Tabelle 6: Einteilung der Sinnessysteme nach [SCH02]**

	System	Sinnesmodalität	Organ	Reiz
<b>Körperferne Sinnessysteme</b>	Visuelles System	Sehen	Auge	Licht (400-800nm)
	Auditives System	Hören	Ohr	Schallwellen (20-16000Hz)
	Olfaktorisches System	Riechen	Nase	chemischer Reiz
<b>Körpernahe Sinnessysteme</b>	Taktils System	Tasten	Haut	mechanischer Reiz
	Vestibuläres System	Gleichgewicht	Gleichgewichtsorgan	Gravitation, Bewegung, Beschleunigung
	Gustatorisches System	Schmecken	Zunge und Mund	chemischer Reiz
	Kinästhetisches System	Tiefensensibilität, Bewegungsempfindung	Muskeln, Gelenke	Muskelkontraktion
	Kardiovaskuläres System	viszerale Sensibilität	Herz	mechanischer Reiz
	Gastrointestinales System	viszerale Sensibilität	innere Organe, Leber, Lunge, Magen	chemischer Reiz
	Pulmonales System			

### 6.1.1 Visuelles System

Das Auge ist ein komplexes Organ das optische Reize in Form von Lichtstrahlen der Wellenlänge 400-800nm, für das Gehirn in interpretierbare elektrische Impulse umwandelt. Diese Interpretation der Lichtstrahlen und das Entstehen der auswertbaren Signale, erfolgt in der Retina (Netzhaut) [Abb. 6-1]. Sie ist in Stäbchen und Zäpfchen unterteilt. In der so genannten Sehgrube, dem gelben Fleck, ist die Dichte der Zäpfchen am größten. Das lässt darauf schließen, dass hier die Auflösung und somit die Sehschärfe am höchsten ist. Das Auge richtet sich automatisch so aus, dass der Fixationspunkt den gelben Fleck trifft.

Die Sinneszellen der Netzhaut sind in einer besonderen Art und Weise vernetzt, die es ermöglicht, den Nervenreiz bei hoher Lichtintensität zu reduzieren (Dämpfer) und ihn bei niedriger Intensität zu erhöhen (Verstärker). Das Auge ist in der Lage bis zu 15 unterschiedliche Bilder pro Sekunde zu erfassen und an das Gehirn weiter zu leiten [SCH02]. Dadurch wird es möglich eine schnelle Abfolge von Bildern als zusammenhängende Bewegung wahr zu nehmen. Die Angabe der Anzahl der Bilder, die mit einem Simulationssystem dargestellt werden, erfolgt in Bildern pro Sekunde mit der Abkürzung „fps“ (Frames per Second).

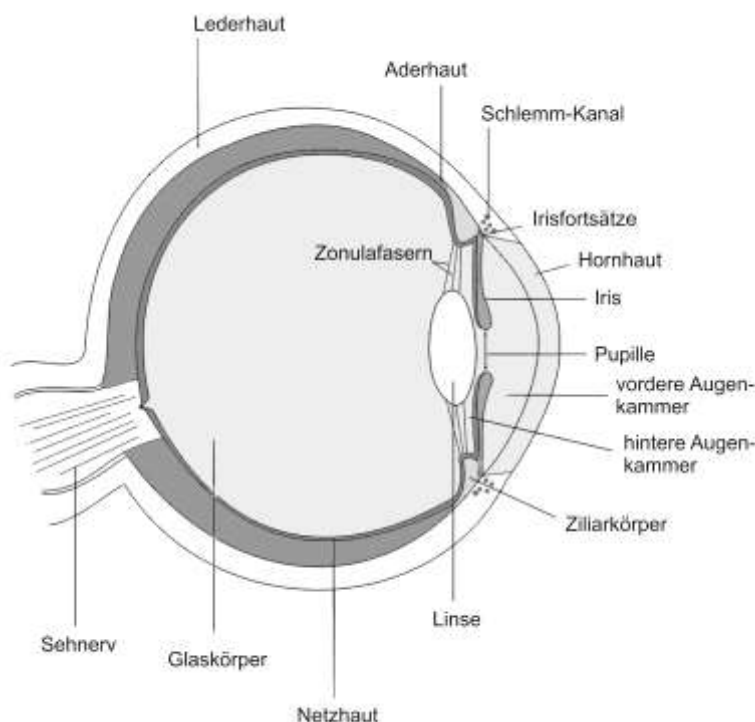


Abb. 6-1: Aufbau des Auges [WWW50]

Zwei wesentliche Eigenschaften, die den optischen Sinneseindruck beeinflussen, sind die Größe und Anordnung des Gesichtsfeldes (engl. Field of View) und die Anordnung des Augenpaares für das räumliche Sehen. In Abb. 6-2 ist die Form des Gesichtsfeldes dargestellt. Zu sehen ist, dass jedes Auge einen Öffnungswinkel von ca.  $150^\circ$  horizontal und  $120^\circ$  vertikal besitzt.

Werden beide Augen verwendet, erweitert sich das Gesichtsfeld auf horizontal  $180^\circ$  [PIE59][BUR03]. Nur innerhalb des Überlappungsbereiches beider Augen ist ein räumlicher Sinneseindruck möglich [HOL96].

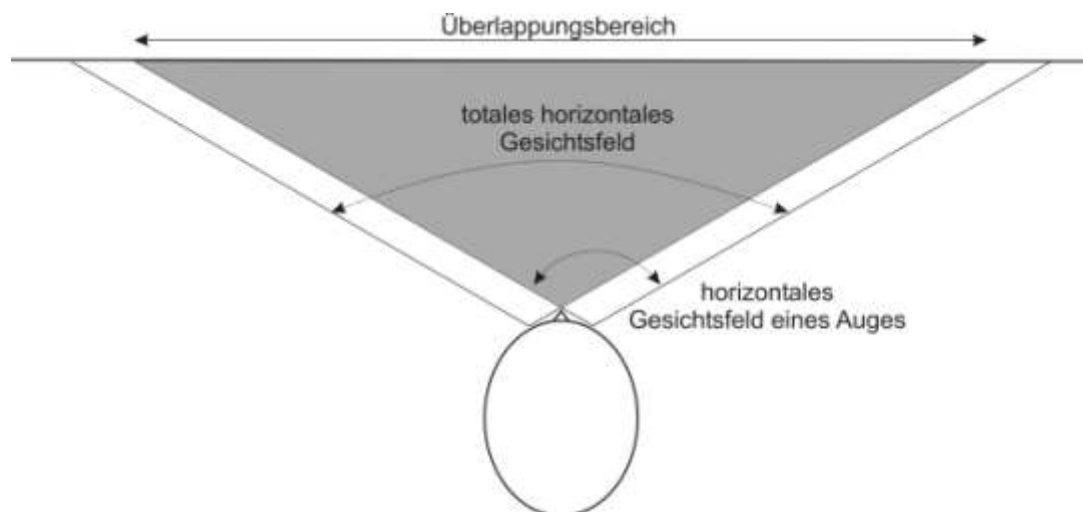


Abb. 6-2: horizontales Gesichtsfeld (FoV) [HOL96]

In Abb. 6-3 wird die Stellung der Augen bei der Fokussierung des Objektes  $P_1$  und dessen Abbildungen auf der Netzhaut des linken und rechten Auges ( $P_{1L}$ ,  $P_{2L}$ : korrespondierende Netzhautstellen) dargestellt.

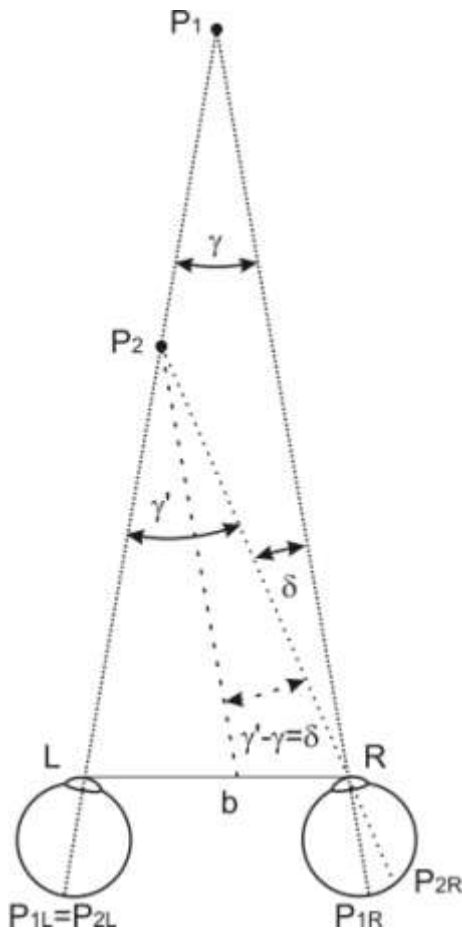


Abb. 6-3: Stereoskopisches Sehen [PIE59]

Das Maß  $b$  beschreibt den Augenabstand und wird auch als Basis bezeichnet. Dieser Abstand liegt in der Regel zwischen 53 und 73 mm und wird mit 65 mm als Durchschnittswert bei einem erwachsenen Menschen angenommen [BUR03][PIE59]. Liegt ein weiterer Punkt  $P_2$  in dem direkten Sehstrahl des linken Auges zum Punkt  $P_1$ , so haben  $P_1$  und  $P_2$  den gleichen Bildpunkt auf der Netzhaut ( $P_{1L}=P_{2L}$ ). Die Winkelstellung der Augen zu den Objekten  $P_1$  und  $P_2$  wird als Konvergenzwinkel  $\gamma$  und  $\gamma'$  bezeichnet. Aufgrund des unterschiedlichen Abstandes von  $P_1$  und  $P_2$  zum Betrachter entsteht die Winkeldifferenz  $\delta$ .  $\delta$  wird auch als Parallaxenwinkel bezeichnet.

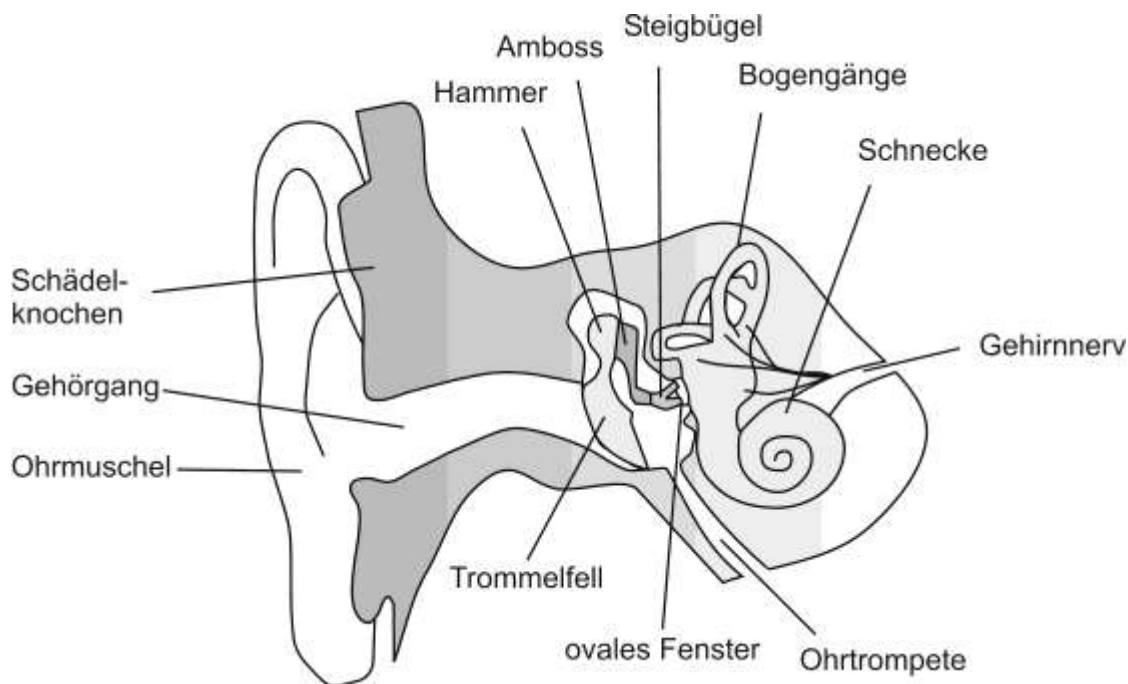
Die Wahrnehmung zweier unterschiedlicher Netzhautbilder ermöglicht den räumlichen Seheindruck. Eine künstliche Stimulation des Sehsinns auf diese Art und Weise wird auch als Stereoskopie bezeichnet [HOL96].

### 6.1.2 Auditives System

Bei der Sinneswahrnehmung Hören werden dem Gehirn akustische Schwingungen in interpretierbare Signale übersetzt. In Abb. 6-4 ist der Aufbau des Ohres dargestellt. Es besteht aus Ohrmuschel, dem äußeren Gehörgang, dem Mittelohr und dem Innenohr. Die Schallwellen werden von der Ohrmuschel in den äußeren Gehörgang geleitet. Beide Abschnitte des Ohres erfüllen die Funktion eines Schalltrichters. Das Ende des äußeren Gehörganges ist durch das Trommelfell verschlossen. Durch die von außen eindringenden Schallwellen wird das Trommelfell in Schwingungen versetzt.

Das Mittelohr liegt in einer kleinen luftgefüllten Knochenhöhle. In dieser Höhle verläuft die Kette der drei Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel. Diese drei Knöchelchen übertragen die Schwingungen des Trommelfelles an das Innenohr. Das Innenohr besteht aus den Bogengängen und der Schnecke. In den Bogengängen befindet sich das Gleichgewichtsorgan. In der Schnecke findet die Umwandlung der Schwingung in Nervenimpulse statt. Das Innere der Schnecke ist mit Härchen bedeckt, die durch die übertragenen Schwingungen me-

chanisch bewegt (gebogen) werden. In Abhängigkeit vom Alter können Schwingungen der Frequenzen von ca. 20 – 20.000 Hz wahrgenommen werden.



**Abb. 6-4: Aufbau des Ohres [WWW51]**

Durch die Kombination der Sinneseindrücke beider Ohren ist der Mensch in der Lage die Position, Richtung und Geschwindigkeit von Geräuschquellen zu erkennen.

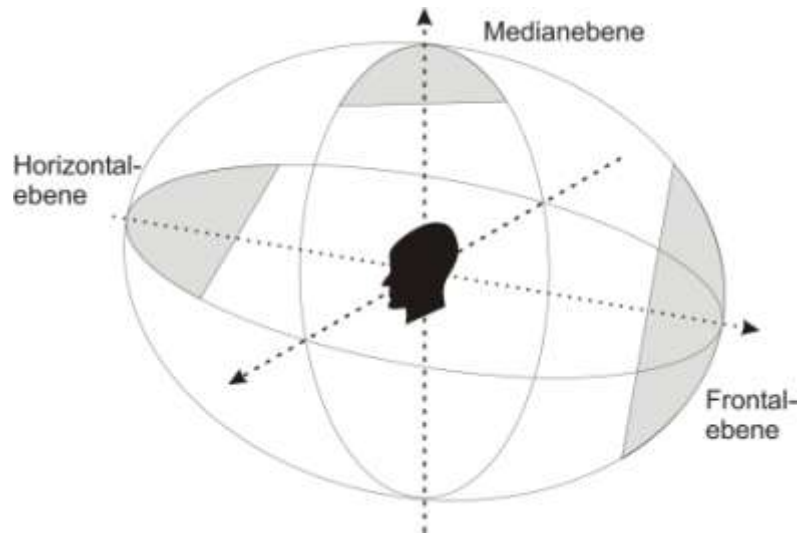
Die Positionsbestimmung der Geräuschquelle erfolgt in Bezug zum Kopf des Anwenders. Das Erkennen von Richtung und Höhe der Schallquelle wird dabei durch die Wahrnehmung beider Ohren in drei Ebenen ermöglicht. In Abb. 6-5 sind diese dargestellt. In der Horizontalebene wird bestimmt, ob eine Schallquelle oberhalb oder unterhalb des Kopfes liegt. In der Medianebene wird nach rechts und links unterschieden und in der Frontalebene nach vor und hinter dem Anwender.

Die Richtungswahrnehmung erfolgt in der Horizontalebene. Sie basiert auf der Unterscheidung des Schalldrucks und der Laufzeitdifferenz, die von beiden Ohren wahrgenommen wird. Das Signal auf dem abgewandten Ohr wird dabei in Abhängigkeit von Richtung und Kopfdurchmesser in seiner Laufzeit um 0,5 – 1 ms verlängert und der Schallpegel ab 150 Hz frequenzabhängig um 10 – 25 dB gedämpft.

Das Hören in der Medianebene ist monoaural (einkanalig). Die wahrgenommene Schallquelle wird durch Reflexion an Ohrmuschel, Kopf und Schulter beeinflusst.

Bei dem Entfernungshören ist das Hauptmerkmal der Schalldruckpegel. Durch ihn wird das Wissen über die Art der Schallquelle übermittelt. In Innenräumen ist es die Energiedifferenz zwischen Direktschall und Reflexion, die die Information über die Entfernung von Objekten

liefert. Zusätzliche Hilfsmittel beim Hören sind die Augen und die Peilbewegungen mit dem Kopf.



**Abb. 6-5: Wahrnehmungsebenen der Akustik**

Es können auch die Geschwindigkeit und deren Änderung wahrgenommen werden. Aufgrund der Frequenzänderung durch den so genannten Dopplereffekt kann das menschliche Ohr die Geschwindigkeit und Richtung einer Schallquelle im dreidimensionalen Raum bestimmen.

### 6.1.3 Taktils System

Die Haut ist das Sinnesorgan für die Wahrnehmung von unterschiedlichsten Reizen. Für die unterschiedlichen physikalischen Reize existieren die verschiedensten Sinneszellen in der Haut. Unterschieden wird nach der Reizart und dem Aufbau der Sinneszellen [Tabelle 7]. Die Verteilung der Sinneszellen im Körper ist nicht gleichmäßig. In Abhängigkeit der Funktion schwankt die jeweilige Anzahl der Sinneszellen. Von Bedeutung ist diese Verteilung beim Entwurf und Einsatz von taktilen Simulatoren. Die Merckelschen Scheiben zusammen mit den Meissnerschen Körperchen sind die taktilen Sinneszellen, die an Händen, Fußsohlen, Lippen und weiteren haarlosen Körperteilen, Berührungen und Druck wahrnehmen. Dabei ist die Stärke des Reizes dafür verantwortlich, ob es als Berührung oder Druck wahrgenommen wird [SCH02]. Die Vater-Pacinschen-Lamellenkörperchen nehmen vor allem Druck und Vibration in der Unterhaut, aber auch in inneren Organen sowie den Muskeln wahr. Einhergehend mit diesen Sinneszellen ist die Tiefensensibilität. Die Tiefensensibilität stellt eigentlich einen eigenen Sinn dar, wird aber an dieser Stelle mit dem taktilen System diskutiert, da letztendlich nicht nur ein Druck, sondern auch eine bestimmte Gliederstellung und ein Kraftgefühl bei der Simulation der Interaktion mit einem virtuellen Objekt eingesetzt wird.

Tabelle 7: Taktile Sinneszellen

Sinneszellen	Reiz	Wo
Merkelsche Scheiben	mechanische Verformung	haarlose Körperstellen
Meissnersche Körperchen	Mechanorezeptoren	haarlose Körperstellen
Vater-Pacinische- Lamellenkörperchen	Druck und Vibration	Unterhaut, innere Organe, Muskeln und Gelenke
freie Nervenenden	Mechanorezeptoren, Schmerz-, Temperatur- und Juckreiz	Haarwurzeln
Temperaturrezeptoren	Kälte- oder Wärmereize	überall
Tiefensensibilität - Stellungssinn, - Bewegungssinn, - Kraftsinn	mechanische Verformung	Muskeln, Sehnen, Gelenke

Freie Nervenenden sind vor allem an den Haarwurzeln zu finden. Sie dienen als Berührungsezeptoren und sind in der Lage, zusätzlich auch Schmerz-, Temperatur- und Juckreiz wahrzunehmen.

Temperatursensoren sind im gesamten Körper verteilt und informieren das Gehirn über den Temperaturzustand der einzelnen Organe. Diese Sinneszellen sind jeweils auf Kälte oder Wärme spezialisiert. Durch ihr Zusammenwirken können Temperaturen im Bereich von ca. 10°C bis 45°C wahrgenommen werden. Temperaturen außerhalb dieses Bereiches werden als Schmerz empfunden [SCH02].

## 6.2 Trackingsysteme

Für die kongruente Überlagerung von realen und virtuellen Objekten, sowie für eine möglichst natürliche, intuitive Interaktion des Anwenders mit dem Computersystem ist es erforderlich, die Position und Bewegung des Anwenders zu ermitteln. Burdea definiert ein Trackingsystem als: „*The special-purpose hardware used in VR to measure the real-time change in a 3D object position and orientation is called a tracker*“ [BUR03].

Je nach Anwendungsfall kann bzw. muss aufgrund der unterschiedlichen Umweltbedingungen und Eigenschaften ein spezielles Trackingsystem zum Einsatz kommen. Trackingsysteme können durch das verwendete physikalische Grundprinzip unterschieden werden:

- mechanisch
- inertial
- magnetisch

- akustisch
- optisch
- elektromagnetisch.

Je nach Ausführung können bis zu sechs Freiheitsgrade gemessen werden. Das heißt, nicht nur die Position (X, Y, Z) eines Anwenders und der Objekte sondern auch deren Orientierung bzw. Rotation ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) zu einem gedachten Weltkoordinatensystem werden ermittelt.



Abb. 6-6: BOOM der Firma Fakespace [WWW49]

Durch die physikalischen Grundprinzipien ergeben sich für jedes Trackingsystem verschiedene Randbedingungen und Systemparameter. Diese entscheiden über die Einsatzmöglichkeiten eines Trackingsystems. Eine Randbedingung kann zum Beispiel der Einsatzort, wie geschlossener Laborraum, eine Werkstattumgebung oder ein freies Gelände sein. Die vier beschreibenden Systemparameter für ein Trackingsystem sind nach Burdea [BUR03] die absolute Genauigkeit, das Rauschen um einen Mittelwert, das Driftverhalten während der Messung und die Latenzzeit zwischen Bewegung und Messung.

Je kleiner diese vier Werte bei einem Trackingsystem ausfallen, umso größer ist die Qualität der Messung.

Die sechs Prinzipien von Trackingsystemen werden im Folgenden näher erläutert werden.

### 6.2.1 Mechanisches Tracking

Ein mechanisches Trackingsystem besteht aus einer Kette von seriell oder parallel angeordneter kinematischer Strukturen, deren Bewegungen zueinander in den Verbindungspunkten durch Sensoren gemessen wird [ALT03][BUR03] (siehe Abb. 6-6). Eingesetzt wird dieses Verfahren zum Beispiel bei HMDs.

Der Vorteil ist die große Genauigkeit, die durch die verwendeten Messsysteme erreicht werden kann. Einen Nachteil stellen vor allem die hohen Anschaffungskosten und die begrenzte Bewegungsfreiheit dar [ALT03].



### 6.2.2 Inertiales Tracking

Inertiale Messsysteme basieren auf dem Drehimpulserhaltungssatz. Anwendungen finden diese Sensoren vor allem bei der Messung von Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Lageänderungen. Von Vorteil sind das geringe Gewicht eines Gyrosensors, die Abschirmbarkeit gegenüber Umwelteinflüssen und der theoretisch uneingeschränkte Wirkungsbereich [ALT03]. Ein technologischer Nachteil ist das vergleichsweise große Driften des Sensors und die Anforderung, dass der Sensor in bestimmten Intervallen durch eine genauere Messmethode reinitialisiert oder recalibriert werden muss [BUR03]. Deshalb werden diese Sensoren häufig in Kombination mit anderen Trackingverfahren verwendet. Ein kommerzielles Produkt ist der „InterTrax<sup>2</sup>“ von Intersense [WWW44] (siehe Kapitel 6.2.7).

### 6.2.3 Magnetisches Tracking

Ein magnetisches Trackingsystem ist aus einem stationären Transmitter und einem oder mehreren beweglicher Receiver aufgebaut. Der Transmitter besteht aus drei Antennen, die jeweils ein Magnetfeld für die Koordinatenachsen X, Y, Z erzeugen. Die einzelnen Magnetfelder liegen auf unterschiedlichen Frequenzen im Bereich von 7 bis 14 kHz. In einem der Messung vorangehenden Kalibrierschritt werden die erzeugten Magnetfelder vermessen. Die Receiver bestehen aus drei Magnetfeldsensoren. Mit ihnen werden die Feldstärken der drei Magnetfelder gemessen. Mit Hilfe einer Steuereinheit und in Kombination mit der Trackingsoftware auf dem Szenengenerator ist es möglich, Position und Orientierung des Receivers zum kalibrierten Nullpunkt des Trackingsystems zu berechnen. Je nach technischer Ausführung können so bis zu 144 Messungen pro Sekunde durchgeführt werden. Kommerzielle Systeme sind zum Beispiel „Fasttrack“ [WWW42] und „Flock of Birds“ [WWW43]. Ein großer Nachteil magnetischer Trackingsysteme ist deren Interferenzverhalten gegenüber metallischen Gegenständen, die innerhalb des Magnetfeldes bewegt werden [BUR03].

### 6.2.4 Akustisches Tracking

Ultraschallsysteme stellen eine Alternative zu magnetischen Systemen dar. Sie weisen kein Interferenzverhalten gegenüber metallischen Objekten auf. Ein kommerzielles System ist der „3D Head tracker“ der Firma „Logitech“ [WWW45]. Ein Ultraschall-Trackingsystem besteht aus einem Transmitter, einem Receiver und einer elektronischen Kontrolleinheit. Der Transmitter setzt sich aus drei Ultraschallsendern zusammen. Diese sind dreieckförmig auf einem Gestell angeordnet. Korrespondierend zu dem Transmitter ist der Receiver aus einem Dreieck von Ultraschallmikrophonen aufgebaut, das zum Beispiel auf dem HMD angebracht ist. Bei diesem Verfahren ist eine direkte Verbindung zwischen dem Transmitter und dem Receiver nötig. In der Kontrolleinheit werden die Daten der Mikrophone in Orientierungs- und Positi-

onsdaten konvertiert und an den Szenengenerator übermittelt. Dabei sind Messraten von bis zu 50 Positionen pro Sekunde möglich. Die Messraten fallen so gering aus, weil zur Fehlerminimierung nach jeder Messung ein Pause von 5-100 Millisekunden erfolgt, um Fehlmessungen durch Echos zu vermeiden. Diese Echos stellen neben der Anfälligkeit gegenüber fremden Schallquellen die größten Nachteile beim Einsatz dieser Systeme dar. Ultraschalllösungen sind kostengünstige und vor allem für mobile Anwendungen ausreichende Trackingsysteme, die sich durch ihr geringes Gewicht auszeichnen [BUR03][ALT03].

### 6.2.5 Optisches Tracking

Ein optischer Tracker ist bei Burdea folgendermaßen definiert:

*„An optical tracker is a no contact position measurement device that uses optical sensing to determine the real-time position/orientation of an object“* [BUR03] S.35

Ein optisches Trackingsystem besteht aus den Komponenten Transmitter, Receiver und einer Kontrolleinheit. In dem Receiver erfolgt die optische Erkennung eines vom Transmitter ausgesandten Signals durch Fototransistoren, durch Arrays von Fototransistoren in Form von CCD-Chips oder durch andere Fotosensoren. Es können auch mehrere Receiver miteinander gekoppelt und verbunden werden, um einen größeren Bereich und/oder mit größerer Genauigkeit messen zu können. Ein Transmitter wird auch als Marker oder Marke bezeichnet. Das Signal eines Markers kann in aktiver oder passiver Form ausgesendet werden. Als aktiv werden Marker bezeichnet, wenn sie aus Lichtquellen in Form von Infrarot-Dioden, Laserdioden oder LEDs aufgebaut sind, deren Strahlen direkt vom Receiver empfangen werden. Passive Marker funktionieren nach dem Prinzip der Reflexion oder Absorption, zum Beispiel retroreflektierende Objekte, Schwarzweiß-Symbole oder die Objektkontur selbst wie zum Beispiel bei dem AR-PDA Projekt [WWW46]. In Abb. 6-7 sind diese dargestellt.

Je nach dem, ob der Transmitter oder der Receiver bewegt wird, spricht man von einem Outside-In (Transmitter) oder Inside-out (Receiver) Tracking [ALT03]. Die Berechnung der Position kann dabei auf zwei Arten erfolgen. Zum einen, wie bei dem LaserBIRD System durch eine Triangulation der Position des 3D-Sensors mit Hilfe mehrerer Signale oder durch eine Objekterkennung und Bestimmung der Lageorientierung, wie bei dem AR-Browser der Firma Metaio. Die beschriebenen Verfahren besitzen eine dynamische Genauigkeit, das heißt, die Qualität der Messung ist von mehreren Parametern abhängig. Diese Parameter sind für Systeme die mit reflektierenden oder schwarz/weiß Kontrastmarken arbeiten: die Lichtverhältnisse, die während der Messung bestehen, die Auflösung des Videobildes, der Abstand der Marke von der Kamera und die Größe, Form und Anordnung der Marker selbst [BUR03][ALT03]). Ein grundlegendes Problem des optischen Trackings stellt das so genann-

te „line of sight“ Problem dar. Das bedeutet, dass eine Position nur so lange ermittelt werden kann, wie eine direkte „Sichtverbindung“ zwischen Transmitter und Receiver besteht.

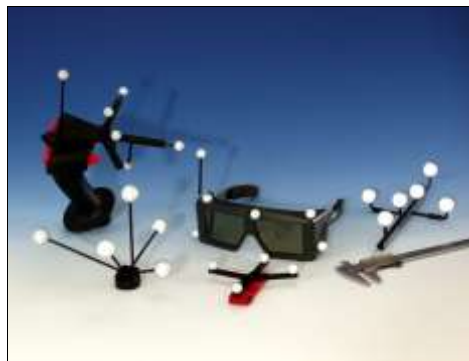


Abb. 6-7: Beispiele für AR-Marker (ARToolkit, ART [WWW33], AR-PDA [WWW46])

Für den Einsatz von optischen Trackingsystemen sprechen vor allem die hohe Bewegungsfreiheit des Anwenders, die geringeren Wechselwirkungen mit metallischen Objekten und der niedrige Preis, bei gleicher oder höherer Genauigkeit und Messrate im Vergleich zu anderen Verfahren [BUR03].

### 6.2.6 Elektromagnetisches Grundprinzip

In der Fachliteratur wird das elektromagnetische Tracking häufig nicht getrennt vom magnetischen Tracking diskutiert, sondern es findet eine Kombination von magnetischen und elektromagnetischen Tracking statt. An dieser Stelle wird eine Unterscheidung auf Basis der gemessenen physikalischen Größe vorgenommen. Beim magnetischen Tracking wird die magnetische Feldstärke mit Hall-Sensoren an einer bestimmten Position im Magnetfeld gemessen. Beim elektromagnetischen Tracking hingegen werden elektromagnetische Wellen identifiziert und analysiert. Durch Trilateration der Wellen kann die Position des Empfängers berechnet werden.

Das kommerziell erfolgreichste System dieser Art ist das Global Positioning System (GPS). Es besteht aus einem Netz von mindestens 24 Satelliten in der Erdumlaufbahn in einer Höhe von ca. 20200 km (Prinzip A) [KIR02] [Abb. 6-8]. Für eine Positionierung müssen die Signale von mindestens vier Satelliten simultan empfangen werden. Das Messprinzip beruht auf der Trilateration. Dabei werden auf Basis der Signallaufzeit die Entfernungen zu den Satelliten gemessen. Jeder Satellit sendet zeitcodierte Navigationssignale aus, mit denen der Empfänger die Signallaufzeiten berechnen kann. Mit Hilfe der bekannten Positionen der Satelliten lässt sich die Position des Empfängers ermitteln. Die Genauigkeit der Positionslösung ist abhängig von Einflüssen auf das Navigationssignal. Das sind vor allem die beschränkte Synchronisationsgenauigkeit der Satelliten, Satellitenbahnfehler, atmosphärische Einflüsse und Mehrwegeausbreitung durch Reflexionen.

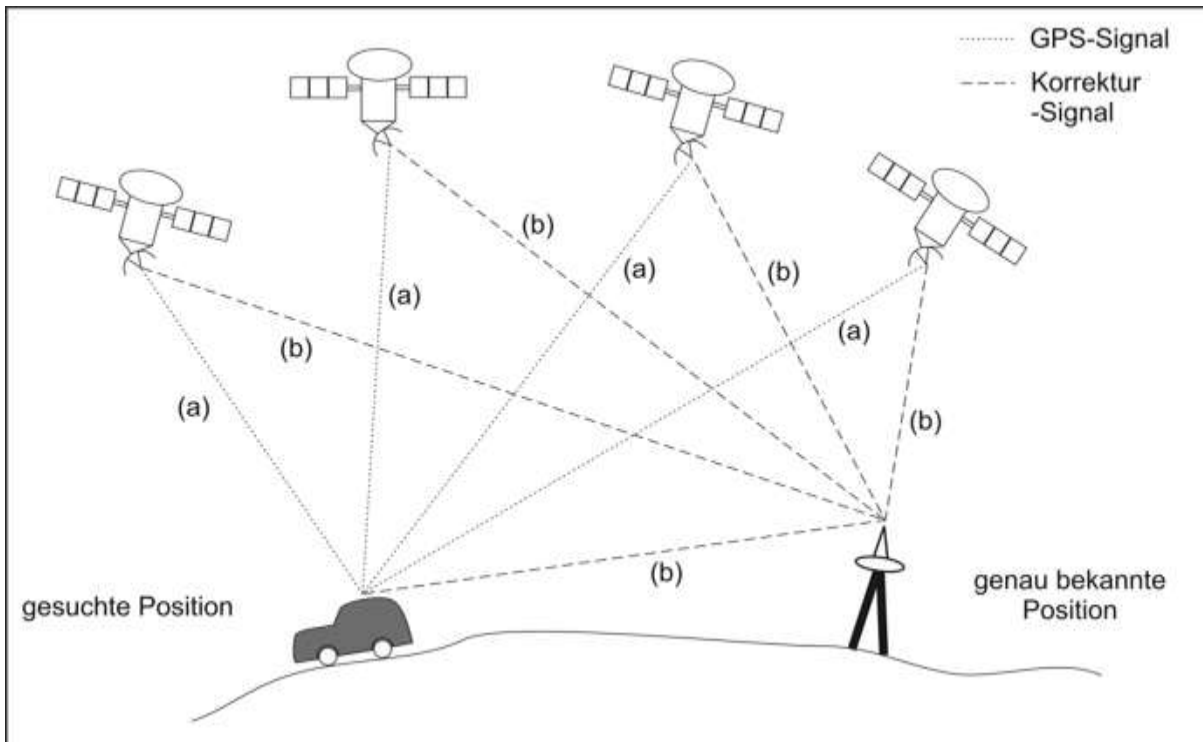


Abb. 6-8: allgemeines GPS-Prinzip (a) und erweitertes GPS-Prinzip mit lokalen Korrekturdaten (b)

Aufgrund der geringen Stärke des GPS Signals und dem Effekt der Mehrwegeausbreitung, ist es schwierig, mittels GPS eine Positionsbestimmung innerhalb von Gebäuden durchzuführen. Um dennoch diese Möglichkeit zu bieten, wurden spezielle „Indoor GPS“ Konzepte (Prinzip B) entwickelt. Im Unterschied zum regulären GPS werden bei der Indoor Variante eigene Sender, so genannte Pseudolites, eingesetzt. Im Unterschied zu den anderen Trackingverfahren wird bei GPS keine Orientierung des Objektes bestimmt, sondern nur eine absolute Position. Eine Bewegungsrichtung und damit die mögliche Orientierung eines bewegten Objektes wird aus zwei aufeinander folgenden Positionen ermittelt.

### 6.2.7 Hybrides Tracking

Durch eine Kombination von Trackingverfahren ist es möglich, die spezifischen Nachteile einzelner Verfahren auszugleichen. Eine Kombination mehrerer Verfahren in einem System wird als „Hybrides Tracking“ bezeichnet [ALT03]. Beispiele für solche Systeme sind das „InterTrax2“ und das „IS-900“ System der Firma Intersense.

### 6.2.8 Vergleich der Trackingverfahren

Im Interesse eines besseren Überblicks über die einzelnen Trackingsysteme wird in Tabelle 8 ein direkter Vergleich anhand der Systemparameter vorgenommen.

Diese Tabelle fasst die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Trackingverfahren und die damit arbeitenden kommerziell erhältlichen Produkte zusammen. Die Werte in der Tabelle basieren auf den Angaben der Hersteller. Um eine einfachere Möglichkeit des Ver-

gleiches zu erhalten, wird sich auf folgende Eigenschaften beschränkt: Genauigkeit, maximale Messentfernung, Messungen pro Sekunde, Störeinflüsse. Bei der Zusammenstellung wird eine kleine Auswahl getroffen. Dabei handelt es sich um die Beispiele, die in den physikalischen Grundlagen der einzelnen Trackingverfahren bereits erwähnt wurden.

**Tabelle 8: Vergleich von Trackingsystemen**

Trackingsystem	Genauigkeit	Reichweite	Messungen pro Sekunde	Störeinflüsse
<b>Kameratracking</b> www.orad.tv	-	360°	-	-
<b>Logitech 3D Headtracker</b>	2% des Abstandes zum Transmitter	1,82 m	50 Hz	Reflexionen
<b>Fasttrack</b> www.polhemus.com	ca. 0,7 mm	(+-)0,75 m	120 Hz	metallische Objekte
<b>Flock of Birds</b> www.ascension-tech.com	1,8 mm	(+-)1,2 m	144 Hz	metallische Objekte
<b>IS-300 Pro</b> www.intersense.com	1° in yaw, 0.25° in pitch & roll	360° alle Achsen	180 Hz	-
<b>Hi-Ball 3100</b> www.3rdtech.com	0,4 mm	12,2 m	2000 Hz	Reflexionen und Lichtverhältnisse
<b>laserBIRD2</b> www.ascension-tech.com	0,7 mm	1,83 m	240 Hz	Reflexionen und Lichtverhältnisse
<b>AR-Tracking</b> www.ar-tracking.de	0,4 mm	3 m	60 Hz	Line of sight, Reflexionen, Lichtverhältnisse
<b>GPS ohne Korrektur</b>	ca. 20 m	global	1-10 Hz	Atmosphäre, Mehrwegeausbreitung
<b>GPS mit Korrektur</b>	ca. 5 cm	lokal	1-10 Hz	Atmosphäre, Mehrwegeausbreitung
<b>Hybrid IS-900</b> www.intersense.com	2 – 3 mm	2,0 m	180 Hz	
<b>InterTrax2</b> www.intersense.com	-	-	256 Hz	

## 6.3 Eingabegeräte

Die Definition für Eingabegeräte wird aus der Definition von Symietz für Eingabegeräte für VR weiterentwickelt und um die Komponente der realen Bestandteile erweitert [SYM01B] (vgl. Seite 30). Sie können wie folgt definiert werden: „Für eine natürliche Interaktion eines Anwenders in einer augmentierten Umgebung werden Eingabegeräte benötigt, die eine sensorische Erfassung der Bewegung und Interaktion des Anwenders mit der realen und virtuellen Umwelt ermöglichen.“

In den folgenden Abschnitten wird auf die Möglichkeiten der sensorischen Erfassung von Benutzerbewegungen und Interaktionen für die drei Sinnesmodalitäten visuell, auditiv und taktil näher eingegangen.

### 6.3.1 Optische Eingabegeräte

Bei vielen technischen Visualisierungen der AR ist die korrekte Überlagerung sehr wichtig, das heißt die virtuellen Objekte und die realen Objekte müssen in derselben Darstellungstiefe angezeigt werden [ALT03]. Bei Optical-see-through-HMDs erfolgt die Anzeige von virtuellen Objekten in einer durch den technischen Aufbau bedingten fest vorgegebenen Darstellungstiefe. Um reale und virtuelle Objekte im selben Tiefenbereich zu überlagern, werden digitale Bilderfassungssysteme (video-see-through) verwendet. Die Vor- und Nachteile dieser Systeme sollen in den folgenden Abschnitten im Mittelpunkt stehen.

#### 6.3.1.1 Physikalische Parameter

Im Bereich der AR werden hauptsächlich digitale echtzeitfähige Bilderfassungssysteme eingesetzt. Diese arbeiten nach dem in Abb. 6-9 dargestellten Prinzip.

Die Lichtstrahlen, die von einem Objekt reflektiert werden, werden durch das Objektiv gebündelt und auf einem CCD-Chip (Fotodetektor) abgebildet. Dieser wandelt die Lichtstrahlen in elektronisch auswertbare Informationen um. Für die weiteren Betrachtungen sind der Wandlungsvorgang sowie die unterschiedlichen Arten von Fotosensoren nicht relevant.

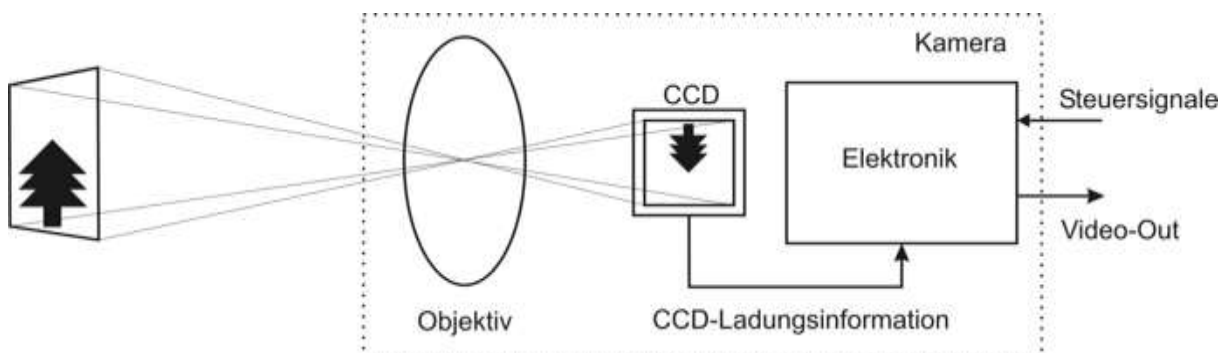


Abb. 6-9: Funktionsprinzip einer Digitalkamera [LIT97]

Von Interesse für das Zusammenwirken mit der AR-Technik sind die Probleme, die mit dem Einsatz einer Digitalkamera verbunden sind. Aus Kostengründen sind fast alle Objektive von Konsumerkameras aus sphärisch geschliffenen Linsen aufgebaut. Bei dieser Linsenform kommt es zu drei Bildfehlern: Erstens zu einer Unschärfe in der Abbildung, zweitens zu einer geometrischen Verzerrung (Verzeichnung) und drittens zu einer Farbzerlegung [LIT97]. Der Farbzerlegung begegnet man durch die Verwendung verschiedener Glassorten in einem Linsenpaket eines Objektivs. Einer unscharfen Abbildung kann ebenso durch die Verwendung von Mehrlinsenoptiken entgegengewirkt werden. Bei einer Verzeichnung spricht man entweder von einer Kissenverzeichnung oder Tonnenverzeichnung (siehe Abb. 6-10) [NEU05]. Um diese zu korrigieren, kommen verschiedene Möglichkeiten in Betracht. Durch den Einsatz einer zusätzlichen Blende vor dem Objektiv, kann der Verzeichnungsfehler verringert werden. Eine weitere Korrekturform stellt die „Entzerrung“ des Bildes nach der Aufzeichnung durch eine Bildbearbeitungssoftware dar. Dies erfolgt durch spezielle Berechnungsalgorithmen, zum Beispiel nach den Vorlagen von Zhang oder Tsai [ZHA98][TSA87]. In professionellen Kamerasystemen kommen hingegen meist erheblich kostenintensivere, asphärisch geschliffene Linsensysteme zur Anwendung. Bei diesen Linsen sind diese Fehler durch die besondere Form minimiert.

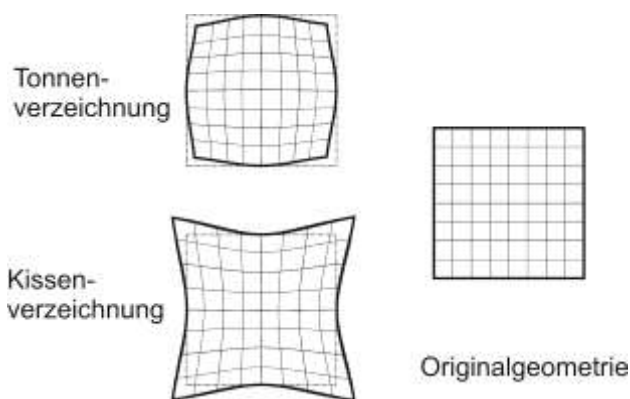


Abb. 6-10: Abbildungsfehler bei sphärischen Linsen

Diese Verfahren basieren darauf, dass mit Hilfe bekannter Kalibriermuster, Bilder dieser Muster mit einer Kamera aufgezeichnet werden. Als weitere Parameter müssen dem Algorithmus die physikalischen Abmessungen des Fotosensors zur Verfügung stehen. Auf Basis dieser Angaben werden für eine Kamera, mit einem bestimmten Linsensystem und einer bestimmten Brennweite die Verzeichnungsparameter errechnet.

Die Parameter können in einem zur Kalibrierung inversen Algorithmus zur „Entzerrung“ des Bildes verwendet werden. In der Literatur gibt es viele Veröffentlichungen, die sich mit die-

Für eine korrekte Überlagerung von virtuellen und realen Objekten ist zusätzlich eine Berechnung der Position und der Blickrichtung der Kamera erforderlich. Der gesamte Vorgang der Ermittlung der Kameraparameter wird als Kamerakalibrierung bezeichnet. Es gibt eine Vielzahl von Kalibrierverfahren und zugehörigen Kameramodellen.

sem Thema beschäftigen und die Qualität und Geschwindigkeit der verschiedenen Algorithmen untersuchen [GOD02][BAX04][ABR99].

In Tabelle 9 werden die Vor- und Nachteile digitaler Kamerasysteme, die bei den praktischen Arbeiten identifiziert werden konnten, zusammengefasst.

**Tabelle 9: Vor- und Nachteile der digitalen Bildtechnik**

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualitativ gute Überlagerung</li> <li>- Überlagerung kann sehr gut dokumentiert werden</li> <li>- eine Ansicht kann von mehreren Anwendern gleichzeitig gesehen werden (Display)</li> <li>- Videobild kann für das Tracking verwendet werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringe Auflösung</li> <li>- geringer Blickwinkel (FOV)</li> <li>- nur mit großem technischen Aufwand autostereoskopisch realisierbar</li> <li>- aufgrund der nicht linearen Abbildung (Linsenverzerrung) muss diese aufwendig korrigiert werden</li> </ul>

### 6.3.1.2 Video- und TV-Standards

Geräte, die allgemeinen Video- und TV-Standards, wie dem europäischen PAL-Standard entsprechen, bieten sich besonders für den Einsatz in einem AR-System an. Gründe dafür sind die günstigen Anschaffungskosten und die große Software Unterstützung. Das bisherige TV-Standardformat für Europa war bis 2005 das „PAL“- Format (Phase Alternation Line). Die Spezifikationen für das PAL-Format sowie die der derzeit üblichen TV- und Videoformate finden sich in Tabelle 10.

**Tabelle 10: TV-Standards**

Eigenschaften/ Formate	PAL-Format	Digital Video (DV)	HDV-Format	HDTV-Format
<b>Zeilen:</b>	576	576	1080	720/1080
<b>Seitenverhältnis:</b>	4:3	4:3	4:3	16:9
<b>Auflösung in Pixel:</b>	765x576	720x576	1440x1080	1280x720/ 1920x1080
<b>Bildrate in (fps):</b>	25	25	25/50	25/30/50/60
<b>Halb/Vollbilder:</b>	halb	halb	beides	beides

Für digitale Camcorder wurde neben dem PAL-Standard ein weiteres Format definiert. Das Digital-Video-Format (DV). Im Unterschied zu PAL beträgt hier die Zeilenlänge nur 720 Pixel und nicht 765. Ein Vorteil des DV-Formats ist, dass die Daten mittels einer digitalen Uni-



versalschnittstelle übertragen werden, der so genannten Firewire Schnittstelle. Für derzeitige AR-Anwendungen eignet sich der DV-Standard besonders aufgrund der guten Bildqualität und dem geringen Preis derameratechnik im Vergleich zu anderen Standards.

Die Weiterentwicklung der TV-Technik führte 2005 zu einem neuen Standard. Die wesentlichen Neuerungen betreffen die Auflösung und den Datentransport der Bildinformationen. In Tabelle 10 sind die beiden Formate HDV als Fortführung des DV und HDTV für PAL aufgeführt. Durch die neuen Formate konnte bereits in ersten Tests ein enormer Qualitätsgewinn für die AR-Darstellung festgestellt werden. Jedoch ergeben sich auch Nachteile. Für die Echtzeitverarbeitung eines HDTV-Signals ist ein sehr leistungsstarker PC oder der Einsatz spezieller Videohardware notwendig. Ein weiterer Nachteil, der sich aus der Datenmenge ergibt, ist die derzeit noch sehr aufwendige Speicherung des Datenstromes. Ein unkomprimiertes Vollbild mit 1920x1080 Pixel bei 24 Bit Farbtiefe benötigt ca. 6 MB Speicherplatz. Das bedeutet, in einer Sekunde fallen bei einem HDTV-Datenstrom mit 30 Vollbildern insgesamt 180 MB an. In einer Stunde sind das ca. 633 GB an Videodaten.

Neben den TV-Normen existieren weitere Darstellungsformate für andere Kamerasysteme. Dies können zum Beispiel Webcams, Netzwerkkameras oder Industriekameras sein. Eine Standardisierung hinsichtlich einer bestimmten Auflösung lässt sich bei diesen Systemen nicht erkennen. Als mögliches Unterscheidungskriterium bei diesen Systemen bietet es sich an, die Schnittstelle für die Bildübertragung zu verwenden.

Neben der Bildübertragung ist zu berücksichtigen, in welcher Art und Weise die rechnerinterne Verarbeitung des Bildsignals erfolgt. Ein derzeit weit verbreiteter Verarbeitungsstandard für Webcams und einzelne Netzwerk- und Industriekameras ist das „DirectShow“ Filtersystem von Microsoft. Es ermöglicht eine universelle Darstellung der Bildinformationen der verschiedensten Kamerasysteme unter Windows. Einzige Bedingung ist eine Treiberinstallation für die jeweilige Kamera, um die Daten verarbeiten zu können. Jedoch bietet nicht jede Kamera diese Treiberunterstützung an, so dass ohne einen eingehenden Funktionstest der Kamera-AR-Software-Kombination keine generelle Aussage zur Kompatibilität getroffen werden kann.

### **6.3.1.3 Schnittstellen**

Für die Videotechnik sind eine Vielzahl von Schnittstellen für die Bildübertragung entwickelt worden. Für diese Arbeit wurden die gebräuchlichsten in Tabelle 11 zusammengefasst.

Je nach Anwendungsfall und Aufgabe (Echtzeitdarstellung, Qualität) können unterschiedliche Schnittstellen verwendet werden. Ein Unterscheidungsmerkmal ist, ob die Übertragung des Bildsignals analog oder digital erfolgt. Eine digitale Schnittstelle hat den Vorteil, dass wäh-

rend der Übertragung keine Bildverluste durch Signalstörungen oder Leitungslängen auftreten. Analoge Schnittstellen sind zum Beispiel der S-Video-Standard, der Composite und der Component Standard.

**Tabelle 11: Vergleich der Kameraschnittstellen**

Kameratyp	Auflösung in M-Pixel	Schnittstellen	Preis	echtzeitfähig	Framegrabber erforderlich
Fotoapparat	1 - 16	USB, Speicherkarte	++	nein	nein
S-Video Kamera	0,4	S-Video, Composite	-	ja	ja
DV-Kamera	0,4	Firewire	+	ja	nein
USB-Kamera	0,4 - 3	USB	o	ja	nein
HDV-Kamera	1,5	Firewire, Component	+	nein/ja	nein/ja
Netzwerk Kamera	0,4 - 3	Ethernet	o	ja	nein
HDTV-Kamera	2,1	Component, Firewire, HD-SDI	++	ja	ja
Camera Link	0,4 - 11	Camera link	++	ja	ja

Neben den bereits beschriebenen Schnittstellen, die hauptsächlich in der TV- und Videotechnik zum Einsatz kommen, existieren weitere Schnittstellen wie USB (Universal-Serial-Bus) für Webcams sowie netzwerkbasierte Systeme für Überwachungskameras. Beide Systeme eignen sich theoretisch hervorragend für den AR-Einsatz. Die Gründe dafür sind die niedrigen Anschaffungskosten und dass keine zusätzliche Hardware-Steckkarte für den PC, in Form eines Framegrabbers, verwendet werden muss. Nachteilig für USB-Kameras ist die vergleichsweise geringe Auflösung oder die geringe Framerate bei hohen Auflösungen aufgrund der Beschränkung der Datenübertragung auf maximal 480Mbit/s.

Netzwerkkameras haben im Vergleich dazu eine größere Bandbreite zur Verfügung. Sie richtet sich nach der vorhandenen Netzwerkgeschwindigkeit (10/100/1000 Mbit/s) und der Übertragungsgeschwindigkeit der Teilkomponenten im Netzwerk. Derzeit existiert jedoch keine Standardisierung der Netzwerkkameras und der Treiber als Echtzeit-Videoquellen, so dass nur vereinzelte Produkte dieses Segmentes in AR-Anwendungen Einsatz finden.

Bei den Kamerasystemen für den Industrieinsatz ist vor allem die Camera Link-Schnittstelle hervorzuheben. Sie zeichnet sich durch die Möglichkeit zur Übertragung großer Datenmengen aus.

Neben dem physikalischen Merkmal der Auflösung einer Kamera sind für die Auswahl noch weitere Kriterien, wie Echtzeitfähigkeit und Zusatzkosten für Framegrabber von Bedeutung.

Je nach Anwendungsfall kann auch die mögliche/benötigte Kabellänge ein Kriterium für den Einsatz eines bestimmten Kamerasystems sein.

### 6.3.2 Auditive Eingabegeräte

Mit Hilfe auditiver Eingabegeräte können „aus einem technisch erfassten analogen Sprachsignal und die in dem Signal transportierten Wörter in ihrer symbolischen Notation“ ermittelt werden. Das Ziel ist die Realisierung einer intuitiven Mensch-Maschine-Schnittstelle (vgl. [LAT01]).

Die ersten Spracherkennungs- und Interaktionssysteme wurden schon vor über 10 Jahren entwickelt und erforscht. Jedoch besitzt ein solches Spracherkennungssystem je nach Ausführung verschiedene Eigenschaften (siehe Tabelle 12), die den Einsatz nicht überall ermöglichen.

**Tabelle 12: Eigenschaften maschineller Spracherkennungssysteme nach Latoschik [LAT01]**

<b>Merkmale</b>	<b>steigender Schwierigkeitsgrad bei der Spracherkennung</b>	
Training	Sprecher abhängig	Sprecher unabhängig
Vokabelumfang	10+	1000+
Äußerungsmodus	Einzelwort	kontinuierlich
Sprachäußerung	gelesen	spontan
Sprachschatz	begrenzt	natürliche Sprache
Umgebung	vorteilhaft	ungünstig

### 6.3.3 Taktile Eingabegeräte

Als taktile Eingabegeräte werden alle Geräte bezeichnet, durch deren manuelle Betätigung der Anwender mit der virtuellen Umgebung und den virtuellen Objekten interagieren kann. Nach Regenbrecht gilt: „je ergonomischer die Geräte sind und je intuitiver sie sich bedienen lassen, um so leichter fällt es, Präsenz zu erzeugen“ (vgl. S. 60 [REG99]). Das heißt, für den Anwender verschwimmen die Grenzen zwischen den realen und den virtuellen Objekten. Ziel der taktilen Eingabegeräte ist es, eine möglichst schnelle, intuitive und einfache Form der Informationsübermittlung an den Computer zu schaffen.

#### 6.3.3.1 Zeigegeräte

Computer-Mäuse und Trackballs sind stationäre Eingabegeräte. Sie bilden die absolute Position und Orientierung von virtuellen Objekten auf ihren Standort ab. Ein kommerzielles Eingabegerät für eine freie Bewegung in allen sechs Freiheitsgraden ist die Space Mouse. Mit diesen Eingabegeräten erfolgt hauptsächlich eine Navigation in der virtuellen Umgebung.

Darüber hinaus kommen weitere Geräte, wie Schalter und Tasten zum Einsatz, durch die die verschiedensten Ereignisse ausgelöst werden können [SYM01B].

### 6.3.3.2 Multifunktionsgeräte für AR

Für das Arbeiten in AR-Umgebungen sind in Ergänzung zu den VR-Eingabegeräten besondere Werkzeuge entwickelt worden. Diese unterstützen die Kombination der realen mit der virtuellen Welt stärker als die „klassischen“ aus der VR-Technik bekannten Eingabegeräte.

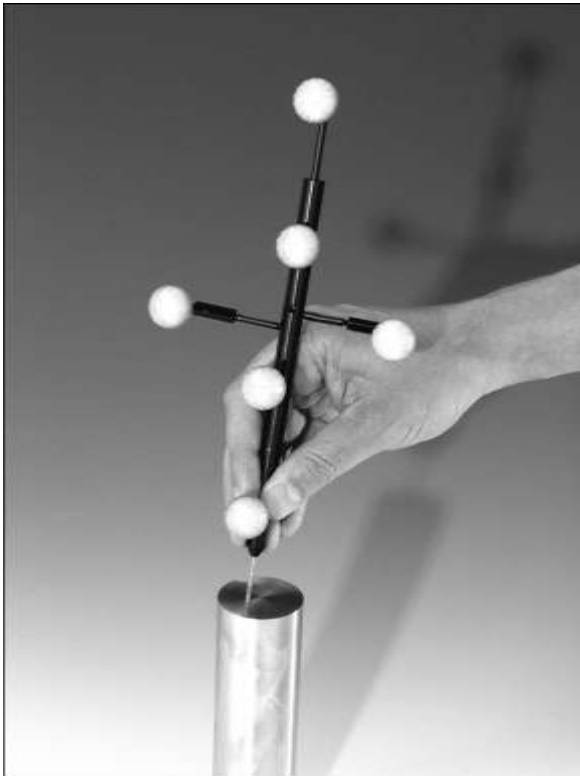


Abb. 6-11: Messstift der Firma ART

Ein aus praktischer Erfahrung sehr gut geeignetes Interaktionsgerät ist der „Messstift“ der Firma ART [WWW33]. Der Messstift, dargestellt in Abb. 6-11, erfüllt drei Funktionen. Er arbeitet analog zu einem Messsystem als Messtaster, da die Koordinaten der Messspitze über ein Trackingsystem berechnet werden können. Ebenfalls kann er als Zeiginstrument verwendet werden und gleicht in seiner Bedienung einem Stift. Darüber hinaus kann mit Hilfe des „Messstiftes“ zwischen realen und virtuellen Objekten gemessen werden. Dafür werden reale Messpunkte analog zum realen Messtaster gewählt und virtuelle Messpunkte durch einen virtuellen Selektionsstrahl.

„Getrackte“ Interaktionswerkzeuge dieser Art finden einen zunehmenden Einsatz in AR-Anwendungen. Beispiele sind die aus dem „ARVIKA“ bekannte Bolzenschweißpistole [ARV04] oder chirurgische Instrumente, die in Simulatoren wie dem „EyeSi“ eingesetzt werden [WAG03].

### 6.3.3.3 Datenhandschuhe

Für das Messen der Bewegung der Hand und der einzelnen Finger sind Datenhandschuhe entwickelt worden. Dadurch ist es möglich, neben der Bewegung der Hand auch eine gestenbasierte Interaktion in virtuellen Umgebungen zu verwenden. Dafür werden als Informationen benötigt:

- die absolute Lage der Hand im Raum
- die Ausrichtung der Hand
- und die Stellung der Finger zueinander

Kommerzielle Produkte werden von verschiedensten Firmen angeboten. Ein Beispiel ist der „CyberGlove“ (Abb. 6-12). Er wurde zur Transformation von Gesten in Sprache entwickelt. Mittels Zug empfindlicher Sensoren über den Fingergelenken wird hier die Krümmung der Finger gemessen. Der Handschuh ist mit 22 Sensoren ausgestattet, drei Krümmungs- und ein Seitenbewegungssensor pro Finger (inklusive Daumen). Zusätzlich gibt es sieben weitere Sensoren, die am Handgelenk das Anwinkeln und das seitliche Kippen der Hand vermessen [BUR03].



Abb. 6-12: Cyberglove

## 6.4 Szenengeneratoren

Wie bereits in Kapitel 3.3 ausgeführt, besteht ein AR-System aus den Komponenten: Szenengenerator, Software, Kamera, Tracking, Anwender und reales Objekt. Je nach Komplexität der Anwendung fallen auch die Komponenten unterschiedlich aus. Bedient man sich der Definition von AR als „das kontextabhängige Einblenden von digitaler Information im Sichtfeld“, zählt auch das Navigationssystem im 5er BMW in Kombination mit dem HUD (Head up Display) als AR-System. Das Navigationssystem setzt sich aus einem GPS-Tracking und einem Anzeigesystem sowie einem Szenengenerator zusammen. Dieser besteht aus einer Navigationssoftware und einem speziell auf diese Anwendung zugeschnittenen Rechnersystem. Im Rahmen der Arbeit wurde eine Klassifizierung der zur Verfügung stehenden Computerhardware für AR-Szenengeneratoren vorgenommen. Als Kriterien für die Einteilung dient die Rechen- sowie die Grafikgeschwindigkeit der einzelnen Systeme. Hierbei stehen nicht die möglichen Hardwarespezifikationen einer speziellen Grafikkarte und eines Prozessors im Vordergrund, sondern die Systemstruktur und die sich daraus ergebenden Eigenschaften für den AR-Einsatz (vgl. Abb. 6-13).

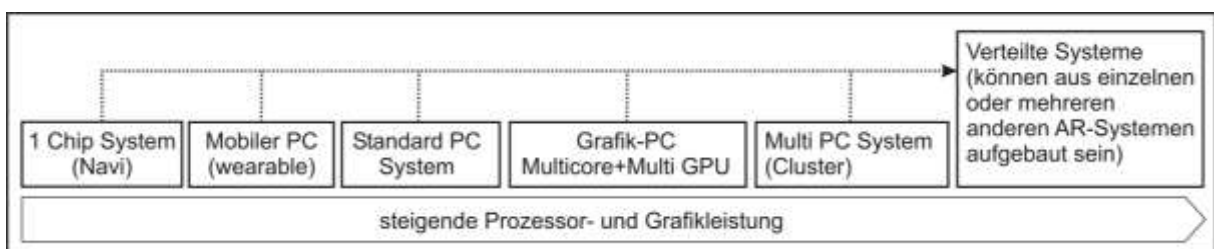


Abb. 6-13: Einteilung der Szenengeneratoren für AR

### **6.4.1 Das ein Chip System**

Unter einem Single-Chip-System wird ein System verstanden, das nur eine einzige Aufgabe erfüllt, zum Beispiel ein Navigationssystem. In diesem System sind alle Komponenten eines AR-Systems vereint. Es existiert keine direkte Trennung von Tracking, Software, Rendering und Datenhaltung. Der Vorteil eines solchen Systems ist seine extreme Robustheit und Zuverlässigkeit. Nachteilig ist hingegen, dass eine Veränderung der Aufgabe oder eine Variation an einer Stelle des Systems häufig nur schwer oder nicht durchgeführt werden kann.

### **6.4.2 Mobile Computersysteme**

Auf Basis neuer Prozesstechnik mit Stromsparfunktionen gibt es mobile PCs, so genannte „wearable PCs“. Diese PC-Systeme sind für einen mobilen Einsatz entwickelt worden. Sie bieten meist einen großen Umfang an mobilen Schnittstellen. Theoretisch kann softwareseitig mit einem solchen PC derselbe Funktionsumfang wie mit einem Grafik-PC realisiert werden. Abstriche müssen bei der Leistungsfähigkeit gemacht werden. Aufgrund der begrenzten Akkulaufzeit und dem wärmetechnischen Problemen schneller Computerhardware, kommen in diesen Systemen vor allem energiesparende und damit auch langsamere Komponenten zum Einsatz. Im Vergleich zu stationären Systemen sind auf einem solchen PC durch die geringere Leistungsfähigkeit Abstriche bei der Qualität der Berechnungen des Trackings und/oder des grafischen Renderings zu machen.

### **6.4.3 Single-CPU-Systeme**

Ein Single-CPU-System stellt das Standard-PC-System für AR-Anwendungen dar. Es bietet ausreichend Leistung für Tracking, Rendering und Datenverwaltung. Im Vergleich zu mobilen Lösungen bietet ein solches System ein Mehrfaches an Leistung.

### **6.4.4 Multi CPU/ GPU Systeme**

Multi-CPU/GPU-Systeme bestehen aus mehreren Prozessoren und Grafikchips. Durch Parallelisierung von Prozessen ist ein deutlicher Leistungsgewinn möglich. Dadurch wird ein neues Zusammenspiel der AR-Technik-Komponenten ermöglicht. Der Vorteil bei diesen Systemen ist, dass parallel auf unterschiedlichen Prozessoren spezielle Algorithmen für die einzelnen Teilkomponenten (Tracking, Entzerrung, Rendering) abgearbeitet werden können. Dadurch kann eine höhere Geschwindigkeit und bessere Qualität der einzelnen Teilkomponenten erreicht werden.

### **6.4.5 Clustersysteme**

Eine zum großen Teil aus Kostengründen entstandene System-Struktur sind die Clustersysteme. Sie ermöglichen im AR Einsatz eine individuelle Kombination und Zusammenarbeit der einzelnen Systemkomponenten (Tracking, Entzerrung, Rendering). Diese Systeme eignen sich

zur Realisierung sehr hoher Ansprüche an Leistung und Qualität. Clustersysteme ermöglichen es, unterschiedliche Trackingsysteme zu kombinieren, um deren diverse Vorteile zu nutzen. Ebenso kann eine Aufteilung des Renderings auf mehrere Grafiksysteme und eine Berechnung der Videobildkorrektur in Echtzeit erfolgen. Des Weiteren ist es möglich, die Zusammenarbeit mehrerer Anwender in einer AR-Umgebung zu realisieren. Durch die Verwendung von zusätzlichen Clusterknoten kann fast beliebig die Renderinggeschwindigkeit und -qualität erhöht werden.

#### **6.4.6 Verteilte AR-Systeme**

Unter einem verteilten AR-System wird eine Kombination zweier oder mehrerer Teilsysteme zu einem Gesamtsystem verstanden. Die Systemstruktur eines verteilten AR-Systems entspricht der eines verteilten VR-Systems. Verteilte Systeme ermöglichen mehreren Anwendern auf den gleichen Kontext zuzugreifen und gemeinsam zu interagieren. Der Zugriff lässt sich auch über weite Entfernungen realisieren. Das Rendering mehrerer AR-Darstellungen für mehrere Anwender an einem Ort entspricht ebenfalls einem verteilten System. Die einzelnen Systeme arbeiten dabei unabhängig voneinander.

### **6.5 Software**

Aufgrund der zunehmenden Forschungsarbeiten ist bereits eine große Anzahl an AR-Softwaresystemen verfügbar. Jedoch wurde bei der Suche nach einer geeigneten Softwarelösung für den Werkzeug- und Formenbau festgestellt, dass aufgrund der sehr speziellen funktionellen Ausrichtung der meisten Anwendungen ihre universelle Anwendbarkeit eingeschränkt ist. In Tabelle 13 wurden die Softwaresysteme, die im Rahmen der Technikanalyse beschrieben wurden, zusammengestellt.

Unabhängig von der durch die Software zu realisierenden Aufgabe, stellen alle Systeme eine Reihe von Standardfunktionen zur Verfügung. Diese sind:

- das Rendering der AR-Informationen für die Darstellung,
- das Tracking oder die Verwendung externer Trackingdaten für die Berechnung der Darstellungsposition und
- ein User Interface, das eine zusätzliche Interaktion des Anwenders mit dem System ermöglicht.

Zusätzlich können je nach Entwicklungsstand und Aufgabe der Softwareanwendung weitere Komponenten hinzukommen:

- Workflow Komponenten für die sequenzielle Bearbeitung von Problemen und Aufgaben,

- Autorenkomponenten für eine einfachere Erstellung einer AR-Anwendung für einen bestimmten Verwendungszweck und
- ein erweitertes User Interface, das auch spezielle Interaktionslösungen zur Verfügung stellt, wie zum Beispiel zusätzliche Maus/Tastatur Interaktion, eine Sprachsteuerung oder Schnittstellen zum Datenaustausch mit anderen Informationssystemen.

**Tabelle 13: AR-Softwarelösungen**

Softwarelösungen:	Anwendungsbeispiele:	Funktionen:
VD2 <sup>1</sup>	AR-Crash (ARVIKA)	Messfunktionen
Metaio AR-SDK	KPS Click & Design	Überlagerung, Positionierung und Variation von 3D-Modellen auf Fotos
AR-Toolkit	diverse OpenSource Anwendungen	je nach Programmierung, verschiedene Funktionen möglich
ARVIKA AR-Browser	AR-Plan (ARVIKA)	Überlagerung, Positionierung und Variation von 3D-Modellen auf Fotos
ACIS Kern <sup>2</sup> und Studierstube/VT <sup>3</sup>	AR-Sketch	3D-Skizzierfunktionen
AVANGO <sup>4</sup>	ARSyS Tricorder	Überlagerung medizinischer Informationen
Sony-Software	EyeToy®	Motiontracking und Mapping von Fotos

<sup>1</sup> VD2 - Virtual Design 2 Produkt der Firma VRCOM [WWW34]

<sup>2</sup> ACIS - Kern für parametrische CAD Systeme

<sup>3</sup> Studierstube/VT - Softwareentwicklung der TU-Wien für AR

<sup>4</sup> AVANGO - AR/VR Software Framework des Fraunhofer IMK [WWW13]

## 6.6 Ausgabegeräte

Als Ausgabegeräte bezeichnet man die Geräte, die nach dem Interaktionsschema von Abb. 3-4 in Abschnitt 3.2 den Output eines AR-Systems, speziell den eines Szenengenerators, in für den Anwender wahrnehmbare Reize umwandelt. Betrachtet werden Systeme zur Stimulation des visuellen, auditiven und taktilen Sinnessystems.

Es bedarf eines großen technischen Aufwandes, um einen realistischen Eindruck einer Umgebung zu simulieren. Die menschlichen „Eingabeschnittstellen“ müssen dabei den gleichen Reizen wie in einer realen Umgebung ausgesetzt werden. Um die einzelnen Sinnesorgane zu stimulieren, werden verschiedene Systeme, wie 3D-Display, 3D-Sound, taktile und Force-



Feedback-Systeme eingesetzt. Mit der Vielzahl einzelner, meist autonomer Systeme und der Kombination miteinander wird eine virtuelle „Realität“ erzeugt. Die Ausgabegeräte unterscheiden sich in der Anzahl der möglichen Freiheitsgrade für die Bewegung der Anzeige. Wichtig ist, dass bei haptischen und visuellen Ausgabegeräten die Anzahl der Freiheitsgrade mit der gewünschten Anwendung übereinstimmen. [ALT03]

Nachfolgend werden die für die Stimulation der jeweiligen Sinnesorgane passenden Ein- und Ausgabegeräte vorgestellt.

### 6.6.1 Visuelle Ausgabegeräte

Burdea definiert grafische Displays als: „*A graphics display is a computer interface that presents synthetic world images to one or several users interacting with the virtual world.*“ [BUR03]

Die Einteilung der Displays wird auf Basis der Bauweise, Displayparameter und Funktionsweise vorgenommen. Eine grundlegende Unterscheidung bei der Bauweise ist Einteilung in monoskope und stereoskope Anzeigesysteme. Displayparameter, die betrachtet werden, sind die Gesichtsfeldabdeckung (Field of view - FoV) eines Displays und dessen Auflösung. Des Weiteren können Displays nach dem physikalischen Funktionsprinzip eingeteilt werden. Auf die einzelnen Funktionsweisen wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da sie für die Arbeit nicht relevant sind. Von Relevanz für die weiteren Betrachtungen sind jedoch einzelne Eigenschaften der Displays, die sich aus der Funktionsweise ergeben. Die hier besprochenen Prinzipien sind:

- CRT → Cathode Ray Tube Display
- LCD → liquid crystal Display
- OLED → organic light emitting Display
- Laser → Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- NED → nano emissive display

Ein CRT-Display weist funktionsbedingt ein großes Volumen auf und hat aufgrund der eingesetzten Materialien im Verhältnis zu den anderen Prinzipien ein hohes Gewicht und einen hohen Energieverbrauch. Aufgrund der besseren Ergonomie und der günstigeren Preise im Vergleich zu CRT-Displays werden derzeit hauptsächlich LCD- und OLED-Displays eingesetzt [ALT03]. Eine bisher kaum verwendete Displaytechnik stellt die Laserprojektionstechnik dar. Diese wird im Rahmen der Arbeit ausführlicher diskutiert [siehe Kapitel 7.6].

NED oder FED (field emission display) arbeiten nach einem ähnlichen Funktionsprinzip wie die CRT-Displays, jedoch sind bei einem NED keine Ablenkspulen erforderlich. Da keine Ablenkung eines Elektronenstrahls über die gesamte Displayfläche erfolgen muss, kann die

Bautiefe eines Displays auf die Abmaße eines LCDs reduziert werden. Derzeit wird an der Markteinführung dieser Displays gearbeitet. Vorteile dieses Displaytyps sind laut Hersteller, die deutlich geringeren Produktionskosten sowie der geringere Energieverbrauch gegenüber LCDs [WWW39][WWW40].

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Portabilität eines Displays. Es wird unterschieden in:

- portable Bildschirme beliebiger Größe, zum Beispiel: Mobiltelefon, PDA;
- in tragbare Displays, die direkt vor den Augen des Anwenders positioniert werden, zum Beispiel: Head Mounted Displays (HMDs) und
- in fest installierte Bildschirme und Projektionssysteme, zum Beispiel: LCD, Laser-Projektoren.

Im Allgemeinen beschränken sich die Ausführungen der Fachliteratur an dieser Stelle auf die HMDs. Diese Beschränkung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen, da immer mehr AR-Systeme neben den mobilen Displays auch mit fest installierten Displays oder Projektionssystemen genutzt werden [BEI03].

**Tabelle 14: Unterscheidung einzelner Displaysysteme nach dem Ort der Überlagerung**

Ort der Überlagerung	Displaytyp		
	portabler Bildschirm: Handy, PDA, TFT	fester Bildschirm: TFT, Projektion	HMD
im Kamerabild	existiert	existiert	VST
im Auge	existiert (Lumos Handy Konzept)	existiert nicht	OST
auf dem Objekt	existiert nicht	existiert	existiert nicht

Eine andere Einteilung kann durch die Unterscheidung nach dem Ort der visuellen Überlagerung erfolgen. Dies ist exemplarisch in Tabelle 14 für den jeweilig möglichen Ort der Überlagerung und die einzelnen Displaytypen zusammengestellt.

### 6.6.1.1 Mobile Displaysysteme

Zu den mobilen Displaysystemen zählen alle transportablen Displays und Handgeräte, mit denen eine Überlagerung bei gleichzeitiger freier Sicht in die Umgebung möglich ist. Alt bezeichnet diese Art der Geräte als „Look-Around-Systeme“. Solche Systeme können zum Beispiel Mobiltelefone, PDAs und Tablet-PCs sein. Von einer weiteren Klassifizierung wird ab-

gesehen, da die Anzahl und die unterschiedlichen Konfigurationen der verfügbaren Geräte und Systeme auf diesem Sektor schnell zunehmen.

### 6.6.1.2 Head Mounted Displays

Die Unterscheidung der HMDs erfolgt nach dem Funktionsprinzip, in der die Überlagerung erzeugt wird (vgl. [AZU97][ALT03]). Hierbei wird in so genannte „video-see-through“ (VST) und „optical-see-through“ (OST) Systeme unterschieden. Bei einem VST-System wird ein Videobild mittels einer Kamera aufgezeichnet und von dem Szenengenerator mit den virtuellen Informationen kombiniert und dann auf einem Display dargestellt [Abb. 6-14].

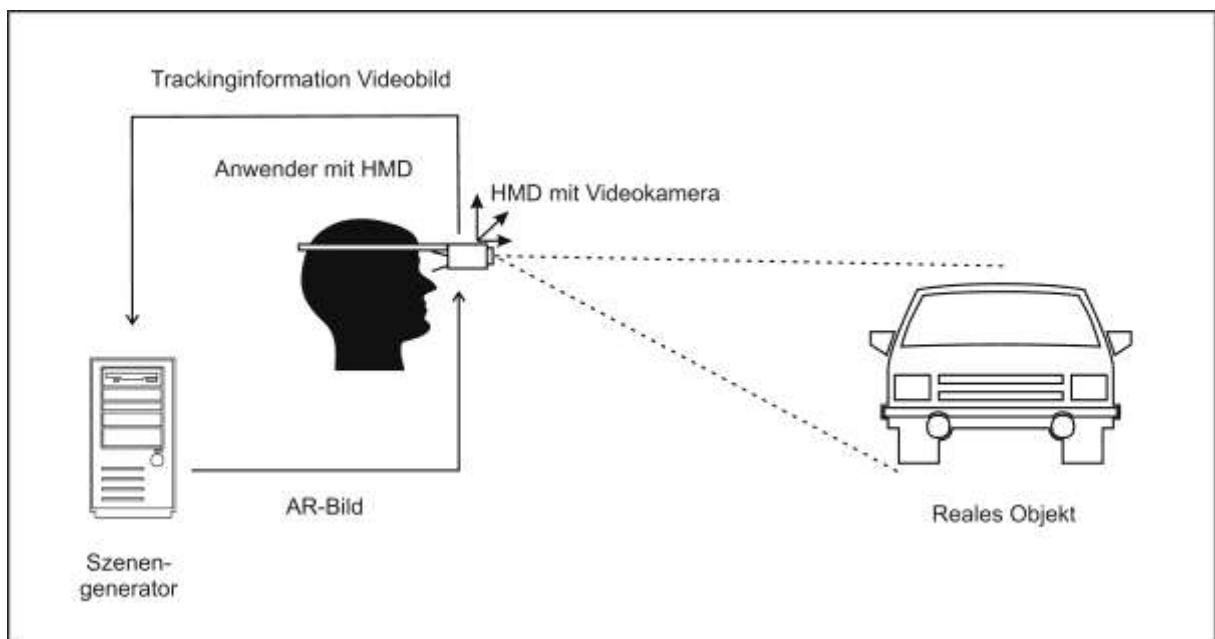


Abb. 6-14: Video See Through [AZU97][ALT03]

Die Überlagerung kann dabei auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Eine der einfachsten Möglichkeiten stellt das so genannte „chroma keying“ oder auch „Blue-Box Feature“ dar [AZU97][WWW31]. Dabei weist der Szenengenerator dem Hintergrund des berechneten Bildes, das für die virtuellen Objekte erzeugt wird, einen festen Farbwert zu, z. B. blau. Im Anschluss erfolgt die Kombination des Videobildes mit dem berechneten Bild der virtuellen Objekte. Die Kombination erfolgt dadurch, dass jeder Bildpunkt, der den Farbwert „blau“ hat, durch den dazugehörigen Bildpunkt des Videobildes ersetzt wird [WWW31].

Ein anderes Verfahren basiert auf der Berechnung des Bildes mit Hilfe der Tiefeninformation der Objekte in der realen Umgebung. Dafür ist ein System oder eine Technik notwendig, die diese Tiefeninformation aus der Umgebung ermitteln kann [AZU97].

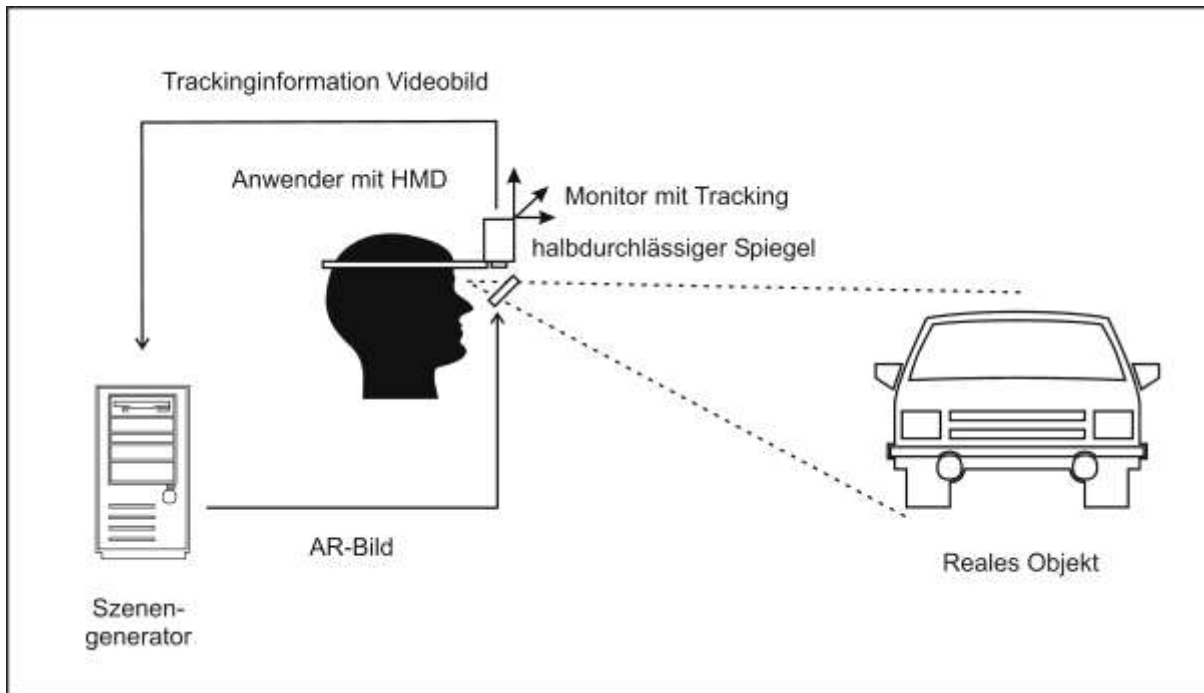


Abb. 6-15: Optical See Through [AZU97][ALT03]

Im Gegensatz zum Video-See-Through-Verfahren entsteht bei einem OST-System die Überlagerung mit Hilfe eines halbdurchlässigen Spiegels, auch Bildteiler genannt. Wie in Abb. 6-15 beschrieben, nimmt der Anwender durch den Bildteiler seine Umgebung wahr. Mittels Tracking wird die Blickrichtung des Anwenders ermittelt und im Szenengenerator die darzustellende Information berechnet. Diese Information wird über einen Monitor ausgegeben, der so angebracht ist, dass das Bild des Monitors auf dem halbdurchlässigen Spiegel zu sehen ist. In einigen Fällen ist der Monitor selbst als halbdurchlässiger Spiegel ausgeführt und das Bild entsteht direkt im Sichtfeld des Anwenders. Die Kombination von realen und virtuellen Objekten findet bei diesem Verfahren im Auge des Anwenders statt [AZU97][ALT03].

Die Auflösung von professionellen HMDs liegt heute bei 1280x1024 Pixel pro Auge. Für die Zukunft ist tendenziell zu erkennen, dass die Pixelzahl solcher Displays weiter ansteigt. HMDs für den Entertainmentbereich liegen derzeit bei 800x600 Pixel pro Auge. Einen neuen Aufschwung und eine stärkere Verbreitung ist durch die Verbesserung der Technik in Form von neuen Displaytypen wie zum Beispiel „Organic Light Emitting Displays“ (OLED's) zu erwarten. In Abb. 6-16 ist ein HMD in der „klassischen“ Helmform zu sehen.

Eine weitere Displayart ist das Virtual Retina Display (VRD), auch als Laserscan bezeichnet. Entwickelt wurde das Display an der University of Washington im Auftrag des amerikanischen Verteidigungsministeriums.



Abb. 6-16: Head Mounted Display

Es unterscheidet sich von HMDs dadurch, dass die Bilder erst direkt im Auge entstehen. Mittels eines roten Lasers werden monochromatische Bilder direkt auf die Retina des Auges abgebildet. Momentan wird das Verfahren für Farbanwendungen weiterentwickelt und arbeitet laut Herstellerangaben bereits mit RGB-Farben bei 320x320 Pixel. Theoretisch sind durch dieses Verfahren auch höhere Auflösungen möglich.

In Abb. 6-17 ist das Wirkprinzip eines VRD dargestellt. Das auf der Retina darzustellende Bild wird dabei in die drei Grundfarben zerlegt. Durch die drei Farblaser und die zugehörigen Laserscanner (Ablenkspiegel) werden aus den einzelnen Farblichtimpulsen Bildpunkte erzeugt, die zusammengesetzt ein komplettes Bild ergeben. Der Laserstrahl wird über eine Optik fokussiert, um ihn auf der Netzhaut deutlich darstellen zu können.

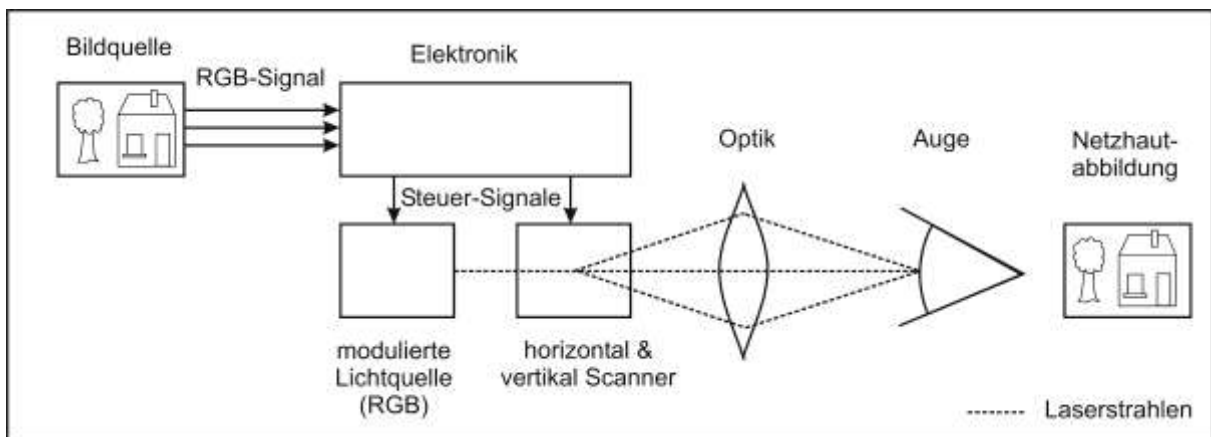


Abb. 6-17: Funktionsprinzip eines Virtual Retina Displays [WWW47]

### 6.6.1.3 Fest installierte Displaysysteme

Zu den fest installierten Displaysystemen zählen Stereo-Projektionen (Wall), Mehrseitenprojektionen (Cave), Monitor-Shutterbrillen Kombinationen, 3D-Displays aber auch Systeme mit Video- und Laserprojektoren. Der Einsatz solcher Systeme als AR-Display ist bisher nur selten in Veröffentlichungen zu finden.

Um eine 3D-Darstellung bei fest installierten Systemen zu ermöglichen, ist es erforderlich, jedem Auge ein eigenes Bild des Stereopaars anzuzeigen. Dafür werden vor allem Brillen verwendet, die nach folgenden Prinzipien arbeiten:

- Shutter Technik

- Polfilter Technik
- Anaglyphen Technik

Die Brillentechniken sind eine vergleichsweise kostengünstige Alternative zu HMDs, wenn gleichzeitig mehrere Personen die gleiche Information auf einem Display nutzen sollen. Der Betrachter setzt eine Brille auf und betrachtet damit die Bilder an einem Monitor oder einer Leinwand.

Bei der Shutter-Technik schaltet die Shutterbrille jeweils ein Augenglas transparent und das andere undurchsichtig. An das dabei verwendete Projektions-Displaysystem werden im Vergleich zu einer HMD Lösung höhere Ansprüche hinsichtlich der Bildwiederholfrequenz gestellt. Ist die Frequenz zu niedrig, können bei längerer Benutzung Schmerzen und Tränen der Augen auftreten. Der Vorteil der Shutterbrille ist, dass der Benutzer ständig auch seine reale Umgebung sehen kann (siehe Abb. 6-18).

Bei der Polfilter Technik wird die Trennung der Bilder durch die Polarisation des Lichtes bei der Projektion und die entsprechenden Filter in der Brille realisiert. Die Filter können horizontal, vertikal oder diagonal angeordnet sein. Problematisch ist dabei, dass der Kopf nicht in der Art gedreht werden darf, da sonst die Polarisationsrichtung der Brille nicht mehr zu der Polarisationsrichtung des jeweilig projizierten Bildes passt. Um dies zu vermeiden können zirkulare Polfilter eingesetzt werden.



**Abb. 6-18: Professionelles Shuttersystem von Crystal Eyes**    **Abb. 6-19: autostereoskopisches Display**

Die Anaglyphentechnik basiert auf einem Farbfilter. Dabei wird für jede der drei Grundfarben (je nach Farbmodell zum Beispiel RGB) zugehörig zu jedem Auge ein bestimmter Teil des Farbspektrums festgelegt und nur dieser dargestellt. Durch eine geschickte Wahl des Farbbereiches sind die Unterschiede zwischen den linken und dem rechten Bild für den Betrachter kaum spürbar.

Eine weitere Displaytechnik kommt bei den so genannten autostereoskopischen Displays zur Anwendung. Stereoskopische Bilder werden auf einem Bildschirm Zeilen- oder Spaltenweise

gleichzeitig angezeigt. Über ImageSplitter, einer Schicht kleinster Prismen, die vor jedem Bildpunkt liegen, wird jedem Auge der bestimmte Bildanteil sichtbar gemacht.

Zusätzlich ist eine Positionserfassung der Augen und Blickrichtungsbestimmung (Eyetracking) notwendig, um eine korrekte Darstellung zu erhalten. Diese Technik ermöglicht die Wahrnehmung räumlicher Szenen ohne Sehhilfe. Nachteilig für den Einsatz ist die Halbierung der vertikalen Auflösung dieser Bildschirme. Ein kommerzieller Anbieter ist zum Beispiel die Firma: Elsa AG mit dem 3D Monitor „Ecomo 4D“ (siehe Abb. 6-19).

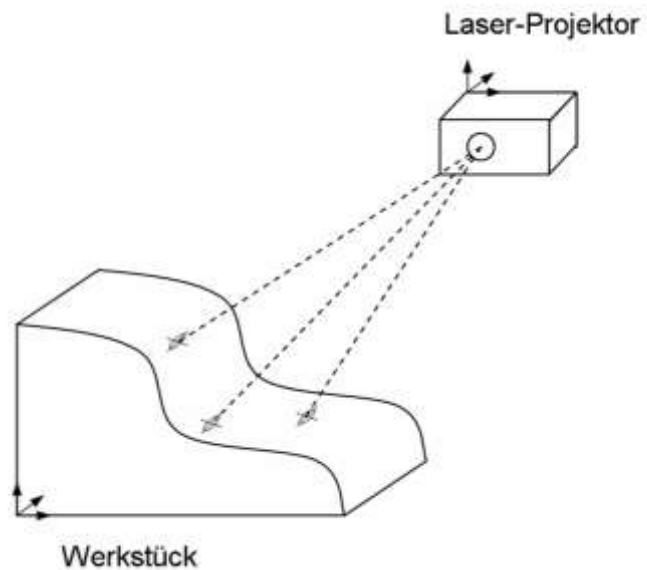


Abb. 6-20: AR- Projektionssystem

Eine bisher nur wenig betrachtete Möglichkeit zur Visualisierung in AR bilden so genannte Aufprojektionssysteme. Bei dieser Visualisierung dient nicht eine Leinwand als Ebene auf der das virtuelle Bild entsteht, sondern das zu überlagernde Objekt selbst. Beispiele dafür sind die Überlagerung von Videobildern auf beliebig geformten Oberflächen mit Hilfe eines Videoprojektors vgl. [WWW48] oder die Verwendung eines Laser-Projektors zum Anzeichnen von Soll-Lagen bei der Montage von Fahrzeugteilen. Von Vorteil ist, dass der Anwender direkt auf seinem Arbeitsobjekt die Information angezeigt bekommt und er keine zusätzliche Displaytechnik (HMD) benötigt. In Abb. 6-20 ist zu sehen, wie ein möglicher Einsatz aussehen kann. Ein Laser zeichnet direkt auf dem Werkstück Positionen und Werte. Bei ersten Versuchen mit einem Laserprojektionssystem hat sich gezeigt, dass für eine korrekte Überlagerung eine Kalibrierung und Positionsbestimmung des Lasers im Koordinatensystem des AR-Systems erforderlich ist. Eine Vorschrift für die Kalibrierung von Projektionslasersystemen wurde im Rahmen dieser Arbeit erstellt und wird in Kapitel 7.6 näher beschrieben.

### 6.6.2 Auditive Ausgabegeräte

Durch den Einsatz akustischer Ausgabegeräte kann die Güte der künstlichen Realität stark erhöht werden [REG99]. Wichtig ist dabei, dass das akustische Feedback zum visuellen Feedback stimmig und synchron sein muss, anderenfalls tritt eine eher negative Wirkung auf. Für die weitere Beschreibung wird ein Beispiel von Burdea verwendet [BUR03]: In einer VR- oder AR-Umgebung wird einer Versuchsperson ein virtuell springender Ball angezeigt. Wird

dieses Szenario mit dem Springeräusch des Balles erweitert, so wird die Qualität der Simulation durch Versuchspersonen subjektiv höher eingestuft. Es ist dadurch möglich die Existenz des Balles akustisch anzuzeigen, auch wenn er nicht im Blickfeld des Anwenders liegt.

Es entstehen jedoch in Konsequenz der Implementierung von Sound in die virtuelle Umgebung weitere Anforderungen an die akustischen Geräte selbst. Laut Regenbrecht und Burdea ist hier vor allem von Bedeutung, dass der Anwender die Position und Richtung einer Soundquelle bestimmen kann.

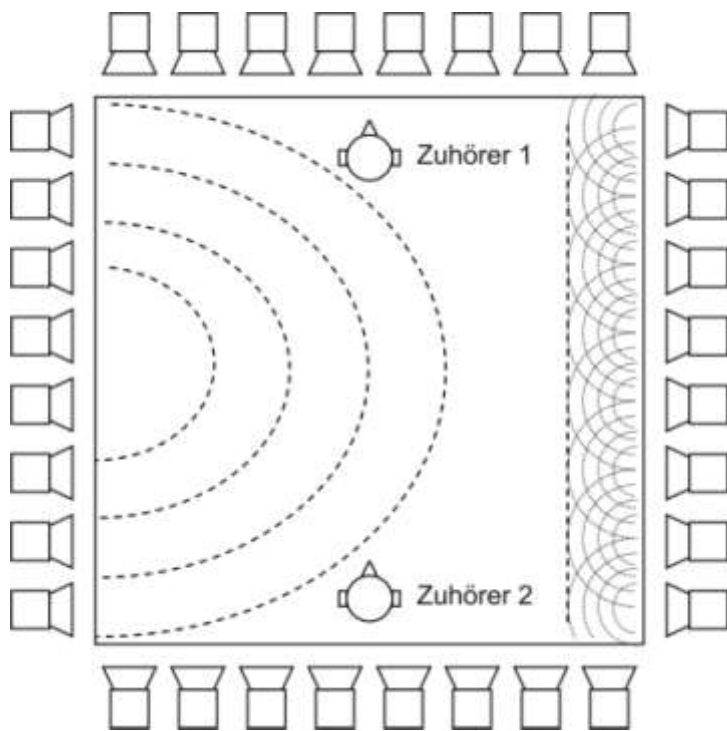


Abb. 6-21: Schaubild zur Wellenfeldsynthese

Hierbei muss zwischen dem bekannten Stereo-Sound und einem „virtual Sound“ unterschieden werden. Bei Stereo-Sound wird mittels zweier Lautsprecher für jedes Ohr ein individueller Sound ausgegeben, der aber keinen Bezug zur Position oder Blickrichtung des Anwenders, im folgenden Zuhörer genannt, hat. Virtual-Sound wird um diesen Anspruch erweitert. In Abhängigkeit der Bewegung des Zuhörers und der Objekte im virtuellen Raum, wird in Echtzeit der Sound für jedes Ohr errechnet [BUR03].

Systeme mit realistischer Wiedergabe des Sounds sind in großer Anzahl kommerziell verfügbar. Auf dem Gebiet der realistischen Simulation zeichnet sich ein anderes Bild ab. Dolby-Surround-Systeme sind laut einer von Regenbrecht angeführten Untersuchung nur bedingt für den Einsatz in virtuellen Umgebungen geeignet [REG99]. Das HRTF-System (Head Related Transfer Functions) wurde von der NASA für diesen Zweck entwickelt. Mittels HRTF kann die Filtereigenschaft des Außenohrs und des Körpers modelliert und nachgebildet werden. Die allgemeinen HRTF können für viele Menschen benutzt werden. Wie beim Raytracing-Verfahren werden die Schallwellen (analog den Lichtstrahlen) auf das jeweilige Ohr abgebildet. Zusätzlich werden die Oberflächeneigenschaften von Objekten und die Entfernungen zu Geräuschquellen berücksichtigt. Testpersonen waren mit einem solchen System in der Lage,



Objekte in VR aufgrund der gehörten Informationen räumlich zu detektieren. Ein großer Nachteil des Verfahrens ist der enorme Rechenaufwand der HRTF [BUR03].

Eine andere Entwicklung stellt ein vom Fraunhofer Institut auf dem Prinzip der Wellenfeldsynthese entwickeltes Soundsystem dar. Hierbei wird mit Hilfe einer hohen Anzahl von Lautsprechern möglich, Soundquellen außerhalb und innerhalb der Lautsprecheranordnung zu orten (siehe Abb. 6-21). Zuhörer an unterschiedlichen Positionen im Raum hören alle das gleiche. Jeder Zuhörer nimmt jedoch die Soundquelle aus einer anderen Richtung wahr. Das heißt, der Zuhörer 1 vorn im Raum, detektiert die Soundquelle in der Mitte des Raumes hinter ihm. Der Zuhörer 2 im hinteren Teil des Raumes hingegen, detektiert den Ort der Soundquelle vor ihm [HÖH07][GRO03].

### 6.6.3 Taktile Ausgabegeräte

Mit Hilfe der taktilen Ausgabegeräte können geometrische Formen wie Oberflächenverläufe und Materialeigenschaften, wie die mechanische Konsistenz eines virtuellen Objektes simuliert werden [BUR03][BÖS01].

Bisher finden diese Geräte kaum einen Einsatz in AR-Systemen [IWA99]. Iwata untersuchte die Möglichkeit, mittels Force-Feedback virtuelle wie auch reale Objekte fühlbar zu gestalten. Im Ergebnis der Untersuchung wurden drei Kategorien von Force-Feedback-Systemen für AR klassifiziert.

- „Desktop-Feel-Through“:

Das virtuelle und das reale Objekt befinden sich in greifbarer Entfernung zum Anwender. Beispiel kann die Arbeit an der Kombination eines realen und virtuellen Designmodells sein.

- „Feel-Through in large space“:

Der Anwender befindet sich in einer größeren Entfernung zu den realen und virtuellen Objekten. Prädestiniert ist diese Konfiguration für den Einsatz in der Architektur bei der Gebäudeplanung und dem Gebäudedesign.

- „Feel-through in real objects“:

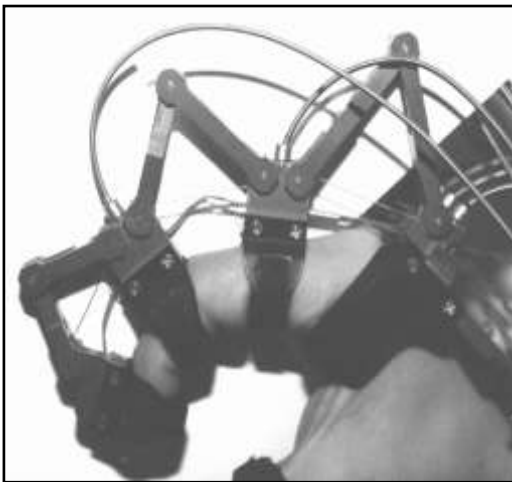
Der Anwender interagiert mit virtuellen Objekten, die innerhalb eines realen Objektes liegen. Anwendungsfälle dieser Art werden vom Autor vor allem in der Medizin für die Implantatplanung gesehen [IWA99].

In der Fachliteratur werden taktile Ausgabegeräte in zwei Gruppen eingeteilt, die Touch-Feedback- und die Force-Feedback-Geräte. Die Unterscheidung erfolgt anhand der Möglichkeiten bestimmte Objekteigenschaften zu simulieren (siehe Tabelle 15).

**Tabelle 15: Simulierbare physikalische Eigenschaften von Touch- und Force-Feedback-Geräten [BUR03]**

Touch-Feedback	Force-Feedback
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oberflächengeometrie</li> <li>- Oberflächenrauigkeit</li> <li>- Ebenheit einer Oberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewicht</li> <li>- Trägheit</li> <li>- kann durch den Anwender aktiviert und gestoppt werden</li> </ul>

Stellvertretend für den Bereich der Touch- und Force-Feedback-Geräte werden die Datenhandschuhe „Cybertouch“ und „CyberGrasp“ der Firma Immersion Corporation vorgestellt [WWW41].

**Abb. 6-22: CyberGrasp**

Der „Cybertouch“-Datenhandschuh ist die Erweiterung eines „Cyberglove“-Datenhandschuhs um Touch-Feedback-Aktuatoren. An jedem Finger sowie der Handinnenfläche sind insgesamt sechs anschaubare Aktuator-Module angebracht. Diese Module bestehen aus einem gleichstrombetriebeenen Motor mit einer Schwungmasse, die dezentral an der Antriebswelle befestigt ist und nach dem Unwuchtprinzip arbeitet.

Das heißt, in Abhängigkeit der Drehzahl kann eine Stimulation der Sinneszellen in Form einer Vibration erzeugt werden. Die Drehzahl kann zwischen 0 und 125 Umdrehungen pro Sekunde frei eingestellt werden. Gleichzeitig wird eine Kraft von ca. 1,2 N erzeugt. Zum Auslösen einer Vibration muss der Anwender eine virtuelle Kollision seiner Hand mit einem virtuellen Objekt auslösen [BUR03].

Für die Simulation größerer Kräfte kann beispielsweise der „CyberGrasp“- Datenhandschuh eingesetzt werden. Analog zum „Cyberglove“ basiert auch der „CyberGrasp“ auf einem „Cyberglove“-Datenhandschuh für die Gestenerkennung. In Abb. 6-22 ist der Aufbau eines „CyberGrasp“ zu erkennen. Durch die Sensoren des Datenhandschuhs werden die Bewegungen der einzelnen Finger erfasst. Im Szenengenerator werden die Bewegungen auf Kollisionen mit virtuellen Objekten überprüft. Werden Kollisionen ermittelt, wird die benötigte Gegenkraft errechnet. Diese Kraft wird über das Exoskelett individuell an jeden Finger übertragen. Es können Kräfte bis zu 16 N ausgeübt werden.

## 6.7 Systematisierung der AR-Aufgabenstellungen und Komponenten

### 6.7.1 Variantenmatrix für AR-Anwendungen im PEP

Die in Kapitel. 6.1 bis 6.6 beschriebene AR-Technik, die möglichen Funktionen und die Aufgaben beziehungsweise Einsatzbereiche der AR-Technik in der Produktentstehung können in einer Variantenmatrix (vgl. Abb. 6-23). zusammengefasst werden.

Die jeweiligen Unterpunkte ergeben sich aus den einzelnen Prozessschritten des Produktentstehungsprozesses und der Komponenten eines AR-Systems. Die Unterpunkte der Gruppe Funktion wurde durch eine Systematisierung der bisher vorgestellten Anwendungen aus dem Stand der Technik entnommen. Die Variantenmatrix kann entsprechend des fortschreitenden Erkenntnis- und Technikstandes ergänzt werden, wobei die gegebene Übersicht keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, sondern sie soll den Berechnungsvorgang demonstrieren und einen Ausblick auf die mögliche Variantenanzahl liefern.

Aus der Literaturrecherche, dem Vergleich der Anwendungen sowie der verwendeten Hard- und Software zeigte sich, dass ein direkter Zusammenhang zwischen diesen Punkten besteht. Die drei Hauptpunkte Aufgabe, Funktion und Technik werden deshalb in der Variantenmatrix zusammenhängend betrachtet. Basierend auf einer bestimmten zu lösenden oder zu bearbeitenden Aufgabe, werden zugehörige Funktionen benötigt. Zur Erfüllung der Funktionen wiederum sind in Kombination der Aufgabe bestimmte Technikkomponenten möglich oder teilweise zur Realisierung auch erforderlich.

Gelesen wird diese Variantenmatrix wie im folgenden Beispiel dargestellt. Zu Beginn erfolgt die Auswahl eines horizontalen Aufgabengebietes: Dies könnte in einer Fertigung die Unterstützung des Einrichtens einer Maschine sein. Nach der Festlegung der Aufgabenstellung aus dem Block „Aufgabe“, der Spalte Fertigung und dem Unterpunkt Maschineneinrichtung werden in einem zweiten Schritt die Funktionen, die erforderlich sind um die Aufgabe zu realisieren, aus dem zweiten Block „Funktion“ ausgewählt. Dies kann zum Beispiel mit Hilfe der folgenden Fragen geschehen:

- |   |  |
|---|--|
| – was soll angezeigt werden               | → Werte (Maschinenkoordinaten)                             |
| – wie wird der Anwender geführt:          | → Abarbeitung der Einrichtvorschrift (Arbeitsfolge)        |
| – wie soll die Interaktion erfolgen       | → Hand und Gestenerkennung ohne zusätzliche Eingabegeräte  |
| – wie wird das Ergebnis dokumentiert:     | → Speicherung der selektierten Objekte in Form von Bildern |
| – wie soll gemessen und verglichen werden | → nicht erforderlich                                       |

Aufgabe	<p><b>Design&amp;Konstruktion</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwurf</li> <li>- Prüfung</li> <li>- Varianten</li> <li>- Baureihen</li> </ul> <p><b>Berechnung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- FEM</li> <li>- MKS</li> <li>- Strömung</li> <li>- Kinematik</li> </ul> <p><b>Planung &amp; Logistik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hallenbau</li> <li>- Arbeitsabläufe</li> <li>- Transportwege</li> </ul> <p><b>Prototypenbau</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwurf</li> <li>- Vergleich</li> <li>- Dokumentation</li> </ul> <p><b>Erprobung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Statusinformationen</li> </ul> <p><b>Fertigung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fertigungssimulation</li> <li>- Maschineneinrichtung</li> <li>- Wartung &amp; Schulung</li> </ul> <p><b>Qualitätssicherung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Soll/Ist Vergleich</li> <li>- Fehlerfassung</li> <li>- Produktion</li> <li>- Arbeitsfolge</li> <li>- Logistik</li> </ul>
Funktion	<p><b>Anzeige</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Werte</li> <li>- CAD-Daten</li> <li>- Messdaten</li> <li>- Hinweise</li> </ul> <p><b>Anwenderführung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Navigation</li> <li>- Arbeitsfolgen</li> <li>- intuitiv</li> <li>- Aufgabenabhängig</li> </ul> <p><b>Interaktion</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- keine</li> <li>- Datenhandschuh</li> <li>- Hand und Gesten</li> <li>- ohne Eingabegeräte</li> <li>- Maus, Spacemouse und andere Eingabegeräte</li> </ul> <p><b>Dokumentation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Werte</li> <li>- Modelle</li> <li>- Bilder</li> <li>- Videos</li> </ul> <p><b>Messen &amp; Vergleichen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Real - Virtuell</li> <li>- Virtuell - Virtuell</li> <li>- Real - Real</li> <li>- optische Sichtkontrolle</li> <li>- Qualitativ/Quantitativ</li> </ul>
Technik	<p><b>Kamera</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Video PAL</li> <li>- Video HD</li> <li>- Firewire</li> <li>- S-Video</li> <li>- Netzwerk</li> <li>- USB</li> <li>- Cameralink</li> <li>- Fotoapparat</li> </ul> <p><b>Tracking</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mechanisch</li> <li>- Inertial</li> <li>- magnetisch</li> <li>- ultraschall</li> <li>- optisch</li> <li>- elektromagnetisch</li> <li>- hybrid</li> </ul> <p><b>Displaysystem</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- HMD (VST)</li> <li>- HMD (OST)</li> <li>- VRD</li> <li>- PDA</li> <li>- TFT</li> <li>- Projektion</li> <li>- Aufprojektion</li> <li>- Lautsprecher</li> <li>- Force-Feedback</li> <li>- Touch-Feedback</li> </ul> <p><b>Szenengenerator</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 Chip Systeme</li> <li>- mobile Systeme</li> <li>- Standard PC</li> <li>- Multi CPU/GPU Systeme</li> <li>- Cluster</li> <li>- Verteilte Systeme</li> </ul> <p><b>Interaktionstool</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Messstift</li> <li>- Handschuh</li> <li>- PC-Maus</li> <li>- Sprache</li> </ul> <p><b>Software</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- AR-Toolkit</li> <li>- Metaio</li> <li>- ARVIKA</li> <li>- VRCom</li> <li>- Studierstube</li> </ul>

Abb. 6-23: Variantenmatrix für AR-Anwendungen im PEP

Im letzten Schritt ist es notwendig, die Technikkomponenten auszuwählen, die die gewünschten Funktionen realisieren:

Kamerasystem:	→	Firewire Kamera
Trackingsystem:	→	Marker basiert (optisch)
Anzeigesystem:	→	OST-HMD
Szenengenerator:	→	mobiles System
Interaktionstools:	→	Datenhandschuh
Software:	→	Metaio (AR-Browser)

Durch die Auswahlmöglichkeit jeweils eines der Unterpunkte aus Aufgabe, Funktion und Technik, sowie der freien Kombination untereinander, ergeben sich die unterschiedlichsten Konfigurationen für die jeweiligen AR-Systeme. Dabei wird für die Berechnung der Variantenanzahl nicht berücksichtigt, ob alle Systemkombinationen und Konfigurationen auch sinnvoll und wirtschaftlich sind. Der Variablen A in Gleichung 1 entspricht die Anzahl der Möglichkeiten einer Kategorie.

$$\sum AR - Systeme \quad (1)$$

$$= A_{Aufgabe} \cdot A_{Anzeige} \cdot A_{Anwenderführung} \cdot A_{Interaktion} \cdot A_{Dokumentation}$$

$$\cdot A_{Messen \& Vergleichen} \cdot A_{Kamera} \cdot A_{Tracking} \cdot A_{Displaysystem}$$

$$\cdot A_{Szenengenerator} \cdot A_{Interaktionstool} \cdot A_{Software}$$

In Anwendung Gleichung 1 ergeben sich circa  $1,98 \times 10^9$  theoretisch mögliche AR-Systeme. Diese Zahl reduziert sich durch unwirtschaftliche und nicht praktikable Kombinationen ebenso, wie durch AR-Software, die mehrere Funktionen zur Verfügung stellt und für eine entsprechend große Anzahl an AR-Anwendungen eingesetzt werden kann.

Aufgrund der unüberschaubaren Vielfalt von Systemkonfigurationen für die theoretisch möglichen Lösungen, stellt die Auswahl eines optimalen Systems eine große Herausforderung für den Anwender dar. In Hinblick auf die große Anzahl bereits existierender Soft- und Hardware, wird eine Standardisierung der Komponenten für einen breit gefächerten Einsatz in der Entwicklung notwendig. Dieser Notwendigkeit wird mit einer Konfigurationssystematik für AR-Anwendung im PEP entsprochen.

## 6.7.2 Konfigurationssystematik für AR-Anwendungen im PEP

Ziel der Konfigurationssystematik ist die Auswahl von Komponenten für ein AR-System gemäß der Aufgabe und der geforderten Funktionen auf Basis verfügbarer Technik-Komponenten. Dabei soll ein so genannter „Konfigurator“ zum Einsatz kommen, der die Zusammenstellung der Systemkomponenten hinsichtlich ihrer Kompatibilität überprüft. Ein Vorteil dieser Systeme ist die Plausibilitätskontrolle der erstellten Konfiguration hinsichtlich der gestellten Aufgabe und der vorgegebenen Funktionen. Grundlage des Konfigurators ist die Variantenmatrix aus Abschnitt 6.7.1.

Im Folgenden werden die Erkenntnisse zu den AR-Systemkomponenten (vgl. Kap. 3.3) und den wirkenden Einflussfaktoren auf AR-Systeme im PEP (vgl. Kap. 5.4) unter der Abkürzung KF (Komponenten und Faktoren) zusammengefasst. Ausgehend von den KF werden Fragen erzeugt, die dabei helfen sollen, das Problem, das mit der Auswahl der jeweiligen KF verbunden ist, besser darzustellen und den Umgang mit diesen Komponenten und Faktoren für den Anwender zu vereinfachen. Diese Fragen sind in einem Fragenkatalog zusammengefasst und im Anhang A dargestellt.

Der Aufbau der Konfigurationssystematik wird in Abb. 6-24 dargestellt. Um mit der Systematik und dem Fragenkatalog zu arbeiten sind 3 Vorbereitungen zu treffen:

1. Sammlung von Anforderungen, die die AR-Anwendung erfüllen muss (Genauigkeit, Einsatzort, usw.)
2. Aktualisierung des Fragenkatalogs an den Stand der Technik
3. Ordnung der Fragen nach ihrer Bedeutung für die Anwendung

Entsprechend Punkt 3 der Vorbereitungen, werden die Fragen und damit die KF hinsichtlich der subjektiven Bedeutung für den einzelnen Anwender und seine Aufgabe gewichtet. Dadurch wird eine erste Reihenfolge der Abarbeitung der Fragen festgelegt. Diese Wichtung ist erforderlich, da sonst aufgrund der zeilenweisen Bearbeitung nicht garantiert werden kann, dass eine notwendige Systemkomponente kurz vor Abschluss der Konfiguration noch selektierbar ist. Die Selektionsfähigkeit einzelner Auswahlmöglichkeiten ergibt sich aus den zuvor bearbeiteten KF, der darauf basierenden Auswahl und den damit verbundenen Wechselwirkungen. Wechselwirkung bedeutet, dass aufgrund von Eigenschaften der einzelnen Komponenten und der Einflussfaktoren sich bestimmte Kombinationen gegenseitig ausschließen oder die Reihenfolge (Wichtung) der nachfolgenden KF beeinflusst wird.

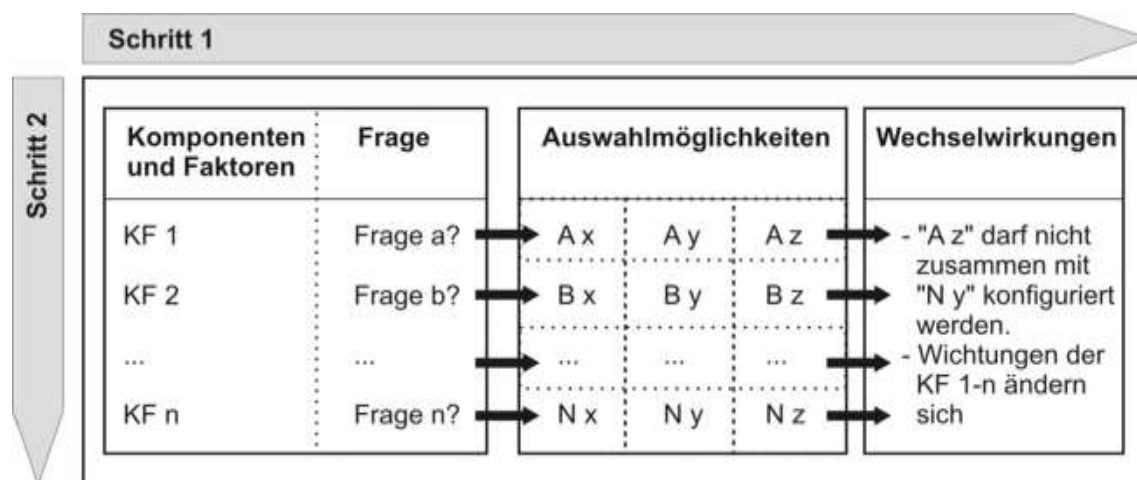


Abb. 6-24: Aufbau der Konfigurationssystematik

Sind die Vorbereitungen abgeschlossen, kann wie folgt verfahren werden. Im ersten Schritt erfolgt die Beantwortung der ersten Frage durch die Auswahl einer Option und damit verbunden zu Wechselwirkungen mit den nachfolgenden Fragen. Die Auswahl führt ebenfalls zu einer Änderung der Wichtung (Ordnung) der nachfolgenden Fragen und erfordert eine Anpassung der Auswahloptionen der nachfolgenden Fragen. Dies hat zum Ziel, Inkompatibilitäten zu vermeiden. Wenn zum Beispiel in Frage 2 Wechselwirkungen zu Frage 7 existieren, muss sicher gestellt werden, dass nicht in einer Frage zwischen 2 und 7 eine wichtige Auswahlmöglichkeit aus 7 gelöscht wird. Zum Beispiel, eine besondere Genauigkeitsforderung an das Trackingsystem. Wird in einer nachfolgenden Frage, das günstigste System favorisiert, ist es möglich, dass in den darauffolgenden Fragen, nicht mehr ein Trackingverfahren angezeigt wird, das die geforderte Genauigkeit bietet, obwohl aufgrund der Wichtung der Fragen, der Genauigkeit eine größere Bedeutung beigemessen wird als dem Preis des Systems.

Im anschließenden 2. Schritt erfolgt die vertikale Bearbeitung der Fragen entsprechend ihrer Ordnung.

Am Beispiel der Selektion eines Trackingverfahrens soll der Einfluss der Wechselwirkungen der KF auf die Reihenfolge demonstriert werden: Die Aufgabenstellung ist es, ein System zu konfigurieren, das gleichzeitig sehr genau und sehr günstig Trackinginformationen erfasst und als mobiles System im Gelände eingesetzt werden kann. Wird allein nach dem Kostenminimum selektiert, fällt die Wahl auf das markerbasierte Tracking. Die hohe Genauigkeitsanforderung fordert hingegen eher ein optisches Tracking-System mit Mehrkameratechnik (z.B.: von A.R.T.). Durch die KF „Mobilität im Gelände“ kann das A.R.T.-System aufgrund der Störanfälligkeit durch Fremdlicht und des relativ hohen Einricht- und Kalibrieraufwandes als Technikkomponente ausgeschlossen werden.

Die Wechselwirkungen sowie der beantwortete Fragenkatalog für die Anwendung im Werkzeug- und Formenbau sind in Kapitel 7.2.3 beschrieben. Die Konfiguration der Anwendung erfolgte anhand der beschriebenen Konfigurationssystematik. Die verwendeten Fragen und die Auswahlmöglichkeiten (Funktionen und Technikkomponenten) stellen aufgrund der fortschreitenden technischen Entwicklung nur einen Teil der möglichen Lösungsmenge und des Konfigurationsumfanges dar und müssen zu Beginn einer neuen Systemkonfiguration aktualisiert werden.



## 7 Augmented Reality im Werkzeug- und Formenbau

Die kunststoffverarbeitende Industrie ist weltweit einer der wichtigsten Industriezweige. Sie ist mit ihren Produkten in fast allen anderen Industriezweigen präsent. Mit ihr wurde die massenhafte und kostengünstige Herstellung unterschiedlichster Erzeugnisse zumeist erst möglich. Ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Kunststoffindustrie ist der Werkzeug- und Formenbau (WFB), der für die Realisierung der formgebenden Produktionsmittel die Verantwortung trägt. Die technologische Entwicklung als Einheit von Material, Maschinen, Werkzeugen und Formen hat der Kunststofftechnik Anwendungen vom Mikro- bis zum Makrobereich gesichert, wobei der WFB mit seinen Produkten die Variabilität der Erzeugnisse der kunststoffverarbeitenden Industrie sichert.

Entsprechend den Aussagen [REI07], die sowohl auf der amtlichen Statistik als auch auf den Veröffentlichungen der unterschiedlichen Verbände beruhen, gab es 2005 in Deutschland ca. 2500 Unternehmen des WFB mit ca. 60.000 Beschäftigten und einem geschätzten Jahresumsatz von 5,5 Mrd. Euro. Nicht berücksichtigt wurden unternehmensinterne Werkzeug- und Formenbauabteilungen (z.B. in Bereichen der Automobilindustrie, Elektroindustrie, Medizintechnik, etc.).

### 7.1 Grundlagen des Werkzeug- und Formenbaus

Die Kunststoffformgebung kann wie folgt beschrieben werden: das Ausgangsmaterial, das in unterschiedlicher Form vorliegen kann, wird in eine Form gegeben, in der es in geeigneter Art und Weise so verfestigt oder umgeformt wird, dass es die Kontur der Form abbildet. Ausgangsmaterialien können sein: lichterhärtende Materialien, reaktive Zweikomponentenharze und -lacke, Ausgangsprodukte für die Polymerisation, Granulate von Thermo- und Duroplasten, Plattenware für das Tiefziehen usw.

Bei der thermoplastischen Kunststoffverarbeitung wird das Ausgangsmaterial, das als Granulat vorliegt, durch gezielte Erwärmung verflüssigt und in eine meist metallische Form eingespritzt. Der Kunststoff wird anschließend abgekühlt und damit plastifiziert. In diesem Prozess schrumpft der Kunststoff (Wärmeausdehnung) und verzieht sich in Abhängigkeit der geometrischen Form. Basis der Formenkonstruktion ist ein CAD-Modell, welches entsprechend dem kunststoffspezifischen Schrumpf- und Verzugverhalten verändert wird. Um das so erhaltene CAD-Hilfsmodell wird die Spritzgussform konstruiert, die Formtrennung festgelegt und entsprechende Entformungshilfen wie Schieber, Kerne, Auswerfer eingearbeitet. Für die Herstellung der Formeinzelteile werden ausgehend, von Rohlingen und Halbzeugen, Bearbeitungsstrategien festgelegt. Mögliche Fertigungsverfahren sind:

- Schruppfräsen
- Bohren
- Drehen
- Härten
- Schleifen
- Schlichtfräsen, z. B. HSC-Bearbeitung
- Drahterodieren
- Senkerodieren

Für das Senkerodieren sind Formelektroden aus Kupfer oder Graphit herzustellen, um mittels Funkenerosion Material von dem Rohling abzutragen.

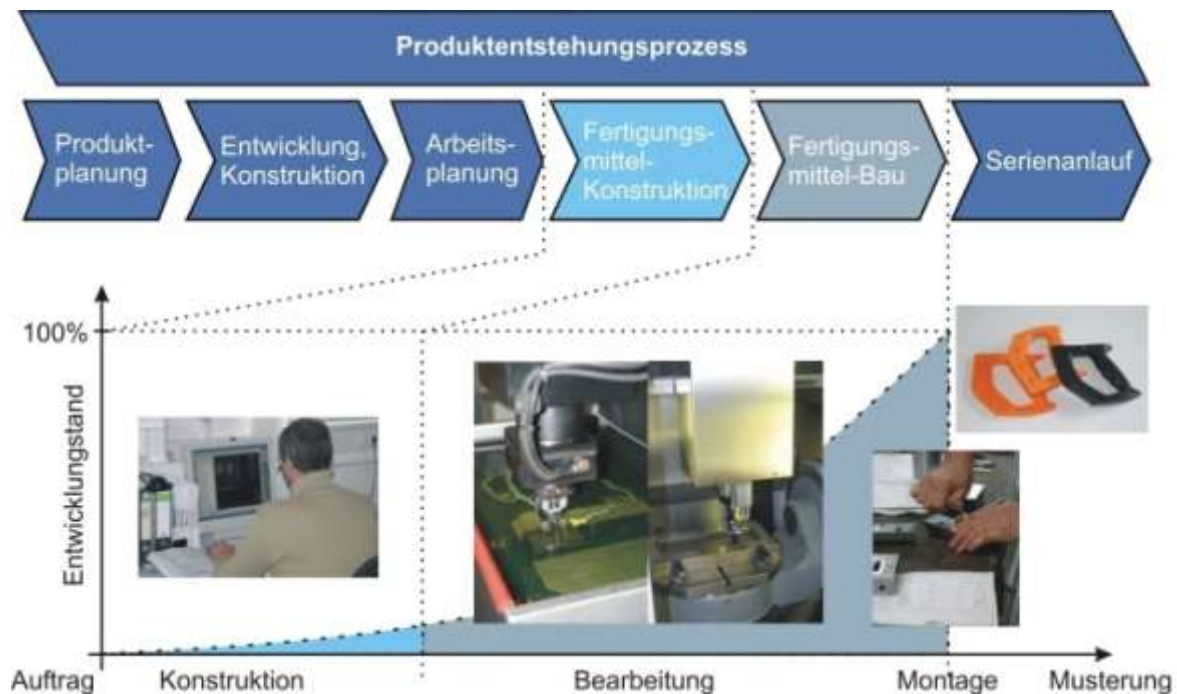


Abb. 7-1: PEP im Werkzeug- und Formenbau

Jedem Bearbeitungsschritt wird ein CAD-Modell hinterlegt, auf dessen Basis die NC-Programme und andere Fertigungsunterlagen wie z.B. Zeichnungen erstellt werden. Durch den Werkzeugmacher werden die maschinell hergestellten Teile fein abgestimmt und montiert. Das fertige Werkzeug bzw. die Form wird abgemustert und das erhaltene Kunststoffteil mit dem CAD-Modell verglichen. Sind die Abweichungen im Rahmen vorgegebener Toleranzen, wird das Werkzeug für die Produktion freigegeben.

Näher betrachtet unterliegt der PEP im WFB den gleichen Anforderungen und Einflussfaktoren wie auch der Produktentstehungsprozess des Zielproduktes und man kann von einem PEP

im PEP sprechen (vgl. Abb. 7-1). Im Vergleich zu anderen Branchen kommt im WFB bisher kaum AR-Technik zum Einsatz.

## 7.2 Einsatz der Konfigurationssystematik für AR-Anwendungen im WFB

### 7.2.1 Anwendungsziel und Motivation

Der WFB ist dadurch gekennzeichnet, dass er überwiegend eine Einzelteilfertigung ist und dementsprechend parallel zur Werkstückbearbeitung ein Datenfluss synchronisiert werden muss. Im Verlauf der Formteilebearbeitung kann es zu den unterschiedlichsten Fertigungsfehlern kommen. Die Art und Verteilung der Fehler im Werkzeug- und Formenbau wurden von Zoch untersucht [ZOC05]. Die Analyse hat ergeben, dass circa 65% der Nacharbeiten bei Spritzgusswerkzeugen auf Fehler bei der Durchführung des Arbeitsgangs Erodieren zurückzuführen sind. Diese wiederum setzen sich aus Fehlern während der Elektrodenfertigung und bei der Verwendung der Elektroden als konturerzeugendes Werkzeug zusammen (Tabelle 16). In diesem Prozessschritt ruht das größte Verbesserungspotenzial für die Fehlervermeidung.

**Tabelle 16: Probleme beim Einsatz von Elektroden**

Probleme bei der Elektrodenfertigung	Probleme beim Erodieren
<ul style="list-style-type: none"> <li>- fehlerhafte Fräsbahn (falsche NC-Folge)</li> <li>- fehlerhafte Aufspannung</li> <li>- falscher Fräserradius</li> <li>- falscher Rohling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Positionsfehler durch Rotieren des Halters</li> <li>- Lagefehler des Werkstücks nach dem Einmessen</li> <li>- fehlerhafte Erodierkoordinaten</li> </ul>

Ausgehend von dieser Analyse wurde als eine Aufgabe für ein AR-System formuliert, Fehler beim Erodieren zu vermeiden, um Nachbearbeitungskosten zu reduzieren. Um weitere Aufgaben zu finden, die ein AR-System als Anwendung im WFB lösen soll, wurde eine entsprechende Befragung durchgeführt. Die von den Mitarbeitern des WFB „3D-Schilling GmbH“ genannten Wünsche und Anregungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

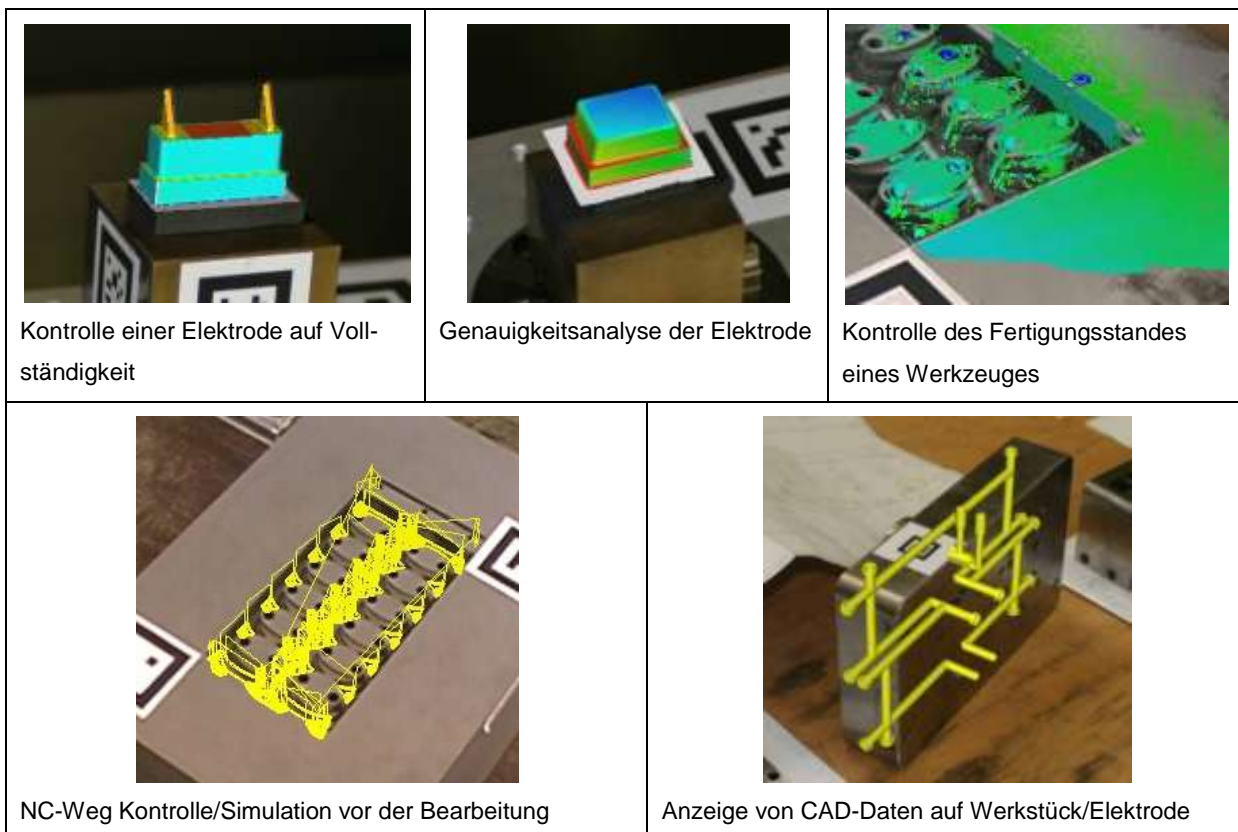
- Positionierhilfe beim Einmessen
- Positionskontrolle nach dem Einmessen
- Fertigungskontrolle nach der Bearbeitung (Soll-/Ist-Vergleich)
- Positionskontrolle der Elektrode im Halter
- Positionskontrolle von NC-Bearbeitungspositionen zum Werkstück
- Anzeigen von Zusatzinformationen (Abweichungen, Radius, Form, Länge)

Von großer Bedeutung ist, wie die Informationsdarstellung erfolgt. Nach [SCH05] und [ALT03] kann diese Darstellung durch Text, 2D-Grafiken oder 3D-Grafiken erfolgen. Für die

vorliegende Arbeit wurden die unterschiedlichsten Informationen, die im WFB Verwendung finden, bestimmt und je nach Informationstyp in fünf Klassen eingeteilt (Tabelle 17).

**Tabelle 17: Informationstypen im Werkzeug- und Formenbau**

Informationstypen:	Beispiele:
Zustandsinformation	allgemeine Maschinenangaben (Drehzahl, Laufzeit,...)
Bewegungspfad	CNC Bewegungspfade (Fräsbahnen)
absolute Positionsinformationen	allgemeine Bearbeitungspositionen (Bohrungen,...)
Interaktionsinformationen	allgemeine Bearbeitungsfolgen (Einrichthilfe)
Geometrieinformationen	3D-Geometriedarstellungen (Flächen, Kanten,...)



**Abb. 7-2: AR-Darstellungen der fünf Demo-Anwendungen im WFB**

Nicht für jeden Informationstyp ist jede Darstellung geeignet, bzw. es ist nicht sinnvoll, jede Information zu jeder Zeit darzustellen. Der Aufwand eine Information zu erfassen, zu halten und darzustellen ist im Vergleich zur klassischen Bereitstellung das entscheidende Kriterium (z. B. für einfache Bearbeitungsschritte, wie Sägezuschnitte).

Allgemein wurden für den WFB auf Basis der Fehleranalyse, der Befragung und der Informationstypen bei der Werkzeugfertigung folgende mögliche Anwendungsszenarios generiert

Abb. 7-2:

- **Kontrolle einer Elektrode auf Vollständigkeit**

Aufgrund der mechanischen Eigenschaften des verwendeten Elektrodenmaterials, kann es auch bei leichter Belastung zu einem Ausbrechen von Teilen der Elektrode kommen. Ein solcher Fehler ist aufgrund des meist glatten Bruches nicht immer sofort sichtbar. Die Abweichung liegt im Bereich größer 0.5 mm. Durch die Überlagerung mit einem Drahtgitter oder Flächenmodell sind diese Abweichungen einfach in der AR-Darstellung zu identifizieren.
- **Genauigkeitsanalyse der Elektrode**

Bei der Erstellung der CNC-Befehlsfolge für die Fertigung der Elektrode können falsche Parameter gewählt werden. Ebenso kann es durch Beschädigungen der Fräsergeometrie oder eines falsch gewählten Fräasers zu Abweichungen der Elektrode kommen. Mit Hilfe eines optischen Messsystems, kann die gefertigte Geometrie mit einer Genauigkeit von bis zu 0,01mm vermessen und digitalisiert werden. In der AR-Darstellung werden diese Daten in Form einer Falschfarbendarstellung direkt auf der realen Elektrode dargestellt.
- **Kontrolle des Fertigungsstandes eines Werkzeuges**

Durch die AR-Darstellung wird der Werkzeugmacher in die Lage versetzt, sich die durch einen bestimmten Fertigungsschritt zu realisierende Form oder das fertige Endprodukt anzeigen zu lassen.
- **NC-Weg Kontrolle/Simulation vor der Bearbeitung**

Ein durch hohe Variabilität in der Formengröße und Vielfalt erzeugtes Problem, entsteht bei Einrichten der Werkstücke auf den Maschinen bei dem jeweiligen Verarbeitungsschritt. Hier kann es zu Lage- und Orientierungsfehlern kommen, die eine falsche Bearbeitung zur Folge haben. Die im Computer generierten NC-Bearbeitungswege lassen sich mittels AR-Technik aufgabenaktuell für den NC-Bearbeiter darstellen.
- **Anzeige von CAD-Informationen direkt auf Werkstück/Elektrode.**

Zusätzlich kann es erforderlich sein, auch Informationen die nicht von außen sichtbar sind oder zu den Metainformationen zählen (Gewinde, Kühlbohrungen, usw.) an einem Werkstück oder einer Elektrode darzustellen.

Die Szenarien wurden hinsichtlich möglicher Effekte für die Fertigung und ihrer Allgemeingültigkeit untersucht. Für jedes Szenario wurde ein realer Demonstrator geschaffen und Praktikern im Unternehmen 3D-Schilling GmbH und während des 3. Mitteldeutschen Werkzeug-

und Formenbauforums sowie der Euromold 2006 vorgestellt. Die Gesprächsanalysen ergaben, dass das größte Interesse an folgenden zwei Systemen besteht:

- System A:** der Kontrolle einer Elektrode oder eines Werkstückes auf Vollständigkeit und Maßhaltigkeit
- System B:** der Anzeige vorhandener CAD/CAM-Informationen direkt am Werkstück für ein vereinfachtes Datenhandling.

Das System A ist eine Kombination aus den bereits vorgestellten Anwendungsszenarios **Kontrolle einer Elektrode auf Vollständigkeit** und **Genauigkeitsanalyse der Elektrode**. Aufgrund des identischen Hardwareaufbaus bietet sich die Kombination bereits an. Bei den Demonstrationen wurde häufig der Wunsch geäußert, bei einer bestehenden Abweichung, deren Größe qualitativ beurteilen zu können. Ebenso wurde bei der Vorstellung der Genauigkeitsanalyse danach gefragt, wie die vollständige Kontur aussieht, um gegebenenfalls, die Elektrode teilweise nutzen zu können.

Das System B stellt eine Weiterentwicklung des Szenarios **Anzeige von CAD-Informationen direkt am Werkstück/Elektrode** dar. Der Schwerpunkt liegt hier vor allem auf der Vereinfachung des Datenhandlings, der Untersuchung des Datenaustausches und der automatischen Datenaufbereitung für die AR-Darstellung. Auf eine genaue Beschreibung wird jedoch aufgrund der hohen Vielzahl an CAD-Produkten und unterschiedlichen Prozessketten in den einzelnen Unternehmen verzichtet. Jedoch werden in den meisten CAD-Systemen bestimmte Informationen und geometrische Elemente auf so genannte Layer oder ViewSets gelegt. Diese wiederum können automatisiert exportiert und für die jeweilige AR-Anwendung konvertiert werden.

Allgemeines Ziel der Anwendungen ist eine gezielte Informationsbereitstellung, die auf vorhandenen CAD- und Messdaten beruht, um Fehler rechtzeitig zu identifizieren, Fehlerquellen zu analysieren und damit eine Fehlerprognose zu erstellen, sowie letztendlich eine Optimierung der Anwendungen nach Nutzervorgaben.

### **7.2.2 Funktionsumfang der AR-Anwendung im WFB**

Entsprechend der Variantenmatrix und der Konfigurationssystematik folgt nach der in 7.2.1 formulierten Aufgabenbeschreibung die Festlegung der Funktionen, die die AR-Anwendung zur Verfügung stellen muss. Für die Kontrolle der Maßhaltigkeit (System A) sind das:

Anzeige:	Falschfarbenmodell des Soll/Ist-Vergleiches auf dem Werkstück
Anwenderführung:	intuitiv
Interaktion:	ohne zusätzliche Hilfsmittel
Dokumentation:	in Bildschirmfotos
Messen und Vergleichen:	nicht erforderlich

Für die Anzeige vorhandener CAD/CAM-Informationen (System B) direkt am Werkstück sind folgende Funktionen zu realisieren:

Anzeige:	Drahtmodell oder Flächenmodell von Bohrungen, Gewinden, Einsätzen, Auswerfern, Bearbeitungsflächen, CNC-Bearbeitungswegen, Elektrodenpositionen direkt auf dem Werkstück
Anwenderführung:	aufgabenabhängig, um die Vielzahl der gleichzeitig dargestellten Informationen zu reduzieren
Interaktion:	Auswahl des Informationstyps mittels Maus oder Funktionstasten
Dokumentation:	sofern erforderlich in Bildschirmfotos
Messen und Vergleichen:	real-virtuell, optisch

### 7.2.3 Anwendung der Konfigurationssystematik

Die in Abschnitt 7.2.2 beschriebenen Funktionen der AR-Anwendungen, lassen sich nicht direkt auf spezielle Hard- oder Softwarekomponenten übertragen. Vielmehr ergeben sich aufgrund der Wechselwirkungen der Hard- und Softwarekomponenten weitere Anforderungen die zu berücksichtigen sind, um ein funktionierendes System zu konfigurieren. Diese Anforderungen werden gemäß Aufgabenstellung und Funktionsdefinition in die Tabellen des Anhangs A eingetragen und entsprechend der Selektionsvorschrift aus Kapitel 6.7.2 gewichtet. Im Ergebnis entsteht die Tabelle 18, die die speziellen Anforderungen für die gesuchte Anwendung „System A“ enthält und mit deren Hilfe eine Auswahl der Komponenten erfolgt.

Tabelle 18: Beantworteter Fragenkatalog für den AR-Einsatz im Werkzeug- und Formenbau<sup>1</sup>

W	Komponenten und Faktoren:	Frage:	Antwort:
1	Positionserfassung	Wie sollen die Objekte erfasst werden?	möglichst günstig, Markertracking
2	Softwaresysteme	Was sind die notwendigen Funktionen und wie soll die Darstellung aussehen?	RFID gestützter Datenbankzugriff
3	Investitionskosten	Was darf die Anschaffung kosten?	wenig (< 10.000€)
4	Interaktion	Wie soll interagiert werden?	ohne Hilfsmittel (natürliche Interaktion mit den Händen ohne zusätzliche Geräte)
5	Stabilität	Welche Ausfallsicherheit muss das System gewährleisten?	hoch (weniger als 1 Ausfall im Monat)
6	Anzeige	Wie soll die Darstellung erfolgen?	Monitor
7	bestehende Prozesse und Betriebsfaktoren	An welcher Stelle soll das System zum Einsatz kommen und welcher Stellenwert ist dafür vorgesehen?	Integration in den Fertigungsprozess
8	Mitarbeiter	Für welchen Anwenderkreis ist das System?	Werkzeugmacher
9	Logistik und Prozesse	Woher kommen die darzustellenden Informationen?	Datenbanksystem → Messsystem
10	Szenengenerator	Wie viele Anwender sollen gleichzeitig mit dem System arbeiten können?	1 Hauptanwender und mehrere Anwender als Zuschauer
11	Einsatzort/Umgebung/Objekt	Welche Umweltbedingungen sind zu berücksichtigen?	Werkstattumgebung (Stau, Magnetfelder, Störgeräusche)
12	Datenformate	Über welche Schnittstellen sollen die Systeme Daten austauschen?	Standardschnittstellen für Messtechnik und 3D-Visualisierung
13	Datenbank	Wo werden die Daten für die AR-Anwendung vorgehalten?	in einem PDM System
14	Bilderfassung	Welche Qualität soll die Darstellung haben?	mittel (ca. 1 Megapixel)
15	Betriebskosten	Was darf das System im Betrieb kosten?	wenig (<1.000,-€ / Monat)
16	Support/Wartung	Wie oder wer wartet das System?	allgemeiner PC-Support
17	Schulung	Wie sollen die Anwendungen entstehen und sind Schulungen erforderlich?	nein
18	Aufgaben und Ergebnisanalyse	Wie soll das Ergebnis des AR-Einsatzes dokumentiert werden?	nicht erforderlich
19	Motivation/Akzeptanz	In welchem Verhältnis stehen die Mitarbeiter zur AR-Anwendung?	ungeklärt
20	Personalkosten	Ist für den Betrieb weiteres Personal/Fachpersonal erforderlich?	nein
21	Kompatibilität	Soll das System erweiterbar sein?	nein
22	Weiterentwicklung	Ist eine Weiterentwicklung des Gesamtsystems angestrebt?	offen
23	Qualifikation	Ist für die Bedienung spezifisches Fachwissen erforderlich?	nein

<sup>1</sup>Die zugehörigen Wechselwirkungen für Tabelle 18 sind in Tabelle 19 dargestellt.



Tabelle 19: Tabelle mit Wechselwirkungen für den AR-Einsatz im Werkzeug- und Formenbau

Wechselwirkungen der Komponenten und Faktoren untereinander	Positionserfassung	Softwaresysteme	Investitionskosten	Interaktion	Stabilität	Anzeige	Prozesse und Betriebsfaktoren	Mitarbeiter	Logistik und Prozesse	Szenengenerator	Einsatzort/Umwelt/Objekt	Datenformate	Datenbank	Bilderfassung	Betriebskosten	Support/Wartung	Schulung	Aufgaben und Ergebnisanalyse	Motivation/Akzeptanz	Personalkosten	Kompatibilität	Weiterentwicklung	Qualifikation	
Positionserfassung		x	x	x		x				x	x						x			x				
Softwaresysteme	x		x	x	x	x		x	x			x	x	x	x		x	x		x	x			
Investitionskosten	x	x		x	x	x				x				x			x			x	x	x		
Interaktion	x		x					x		x	x						x						x	
Stabilität		x	x							x						x				x				
Anzeige	x	x	x				x	x		x	x			x	x	x				x	x	x		
Prozesse und Betriebsfaktoren						x		x	x		x													
Mitarbeiter		x		x		x	x			x							x		x	x			x	
Logistik und Prozesse		x					x					x	x											
Szenengenerator	x		x	x	x	x		x			x			x	x	x	x					x	x	x
Einsatzort/ Umwelt/Objekt	x			x		x	x			x				x		x	x				x			x
Datenformate		x							x					x		x				x	x	x	x	
Datenbank		x							x			x			x	x	x			x	x	x	x	
Bilderfassung		x		x		x				x	x							x	x		x	x	x	
Betriebskosten		x				x				x			x			x				x				
Support/Wartung					x	x				x	x		x		x					x			x	
Schulung	x	x	x	x						x	x		x									x	x	
Aufgaben und Ergebnisanalyse		x												x										
Motivation/ Akzeptanz								x				x		x							x			x
Personalkosten	x		x		x	x		x			x		x		x	x	x		x				x	
Kompatibilität		x	x				x			x		x	x	x									x	
Weiterentwicklung			x									x	x	x			x					x		
Qualifikation				x				x		x	x	x	x	x		x	x		x	x				

Für die ersten 3 Fragen des Kataloges wird die Konfiguration Schritt für Schritt erklärt und anhand der Auswahl der Fragen „Positionserfassung“, „Softwaresysteme“ und „Investitionskosten“ kurz verdeutlicht:

In einer ersten Wichtung wurden die Fragen bereits in eine vorläufige Ordnung gebracht.

**Tabelle 20: vorläufige Ordnung des Fragenkatalogs**

<b>W</b>	<b>Komponenten und Faktoren:</b>	<b>Frage:</b>	<b>Antwort:</b>
1	Positionserfassung	Wie sollen die Objekte erfasst werden?	möglichst günstig, Markertracking
2	Datenbank	Wo werden die Daten für die AR-Anwendung vorgehalten?	in einem PDM System
3	Softwaresysteme	Was sind die notwendigen Funktionen und wie soll die Darstellung aussehen?	RFID gestützter Datenbankzugriff
4	Investitionskosten	Was darf die Anschaffung kosten?	wenig (< 10.000€)
5	Betriebskosten	Was darf das System im Betrieb kosten?	wenig (<1.000,-€ / Monat)
6	Schulung	Wie sollen die Anwendungen entstehen und sind Schulungen erforderlich?	nein
7	Mitarbeiter	Für welchen Anwenderkreis ist das System?	Werkzeugmacher
8	Interaktion	Wie soll interagiert werden?	ohne Hilfsmittel (natürliche Interaktion mit den Händen ohne zusätzliche Geräte)
9	Logistik und Prozesse	Woher kommen die darzustellenden Informationen?	Datenbanksystem → Messsystem
10	Stabilität	Welche Ausfallsicherheit muss das System gewährleisten?	hoch (weniger als 1 Ausfall im Monat)
11	Anzeige	Wie soll die Darstellung erfolgen?	Monitor
...	...	...	...

Die höchste Wertung wurde in diesem Fall an die Positionserfassung vergeben.

<b>W</b>	<b>Komponenten und Faktoren:</b>	<b>Frage:</b>	<b>Antwort:</b>
1	Positionserfassung	Wie sollen die Objekte erfasst werden?	möglichst günstig, Markertracking

Aufgrund der technischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten ergeben sich die dargestellten Wechselwirkungen (siehe Tabelle 19), wie zum Beispiel, dass die Software die Funktionalität bieten muss, ein solches Tracking System zu unterstützen, welche Interaktionen ermöglicht werden und auch die Höhe der erforderlichen Investitionskosten wird dadurch beeinflusst.

Wechselwirkungen der Komponenten und Faktoren untereinander	Positionserfassung	Datenbank	Softwaresysteme	Investitionskosten	Betriebskosten	Schulung	Mitarbeiter	Interaktion	Logistik und Prozesse	Stabilität	Anzeige	Szenengenerator	Prozesse und Betriebsfaktoren	Einsatzort/Umwelt/Objekt	Datenformate	Bilderfassung	Support/Wartung	Aufgaben und Ergebnisanalyse	Motivation/Akzeptanz	Personalkosten	Kompatibilität	Weiterentwicklung	Qualifikation
	Positionserfassung		x	x		x		x			x	x		x						x			

Die Reihenfolge der Wechselwirkungen ist hierbei auch von der Wichtung des Fragenkatalogs abhängig. Eine Auswirkung auf eine als 3 eingestufte Frage ist mit größerer Aufmerksamkeit zu betrachten als Auswirkungen auf Frage 17. Diese Auswirkungen sind zwar nicht außer Acht zu lassen, jedoch werden diese erst später in vollem Umfang berücksichtigt.

In Schritt zwei entsteht deshalb aus der Tabelle 20 die Tabelle 21.

**Tabelle 21: vorläufige Ordnung nach dem 1. Schritt**

W	Komponenten und Faktoren:	Frage:	Antwort:
1	Positionserfassung	Wie sollen die Objekte erfasst werden?	möglichst günstig, Markertracking
3	Softwaresysteme	Was sind die notwendigen Funktionen und wie soll die Darstellung aussehen?	RFID gestützter Datenbankzugriff
4	Investitionskosten	Was darf die Anschaffung kosten?	wenig (< 10.000€)
6	Schulung	Wie sollen die Anwendungen entstehen und sind Schulungen erforderlich?	nein
8	Interaktion	Wie soll interagiert werden?	ohne Hilfsmittel (natürliche Interaktion mit den Händen ohne zusätzliche Geräte)
11	Anzeige	Wie soll die Darstellung erfolgen?	Monitor
2	Datenbank	Wo werden die Daten für die AR-Anwendung vorgehalten?	in einem PDM System
5	Betriebskosten	Was darf das System im Betrieb kosten?	wenig (<1.000,-€ / Monat)
7	Mitarbeiter	Für welchen Anwenderkreis ist das System?	Werkzeugmacher
9	Logistik und Prozesse	Woher kommen die darzustellenden Informationen?	Datenbanksystem → Messsystem
10	Stabilität	Welche Ausfallsicherheit muss das System gewährleisten?	hoch (weniger als 1 Ausfall im Monat)
...	...	...	...

Wechselwirkungen der Komponenten und Faktoren untereinander	Positionserfassung	Softwaresysteme	Interaktion	Investitionskosten	Stabilität	Anzeige	Prozesse und Betriebsfaktoren	Mitarbeiter	Logistik und Prozesse	Szenengenerator	Einsatzort/Umwelt/Objekt	Datenformate	Datenbank	Bilderfassung	Betriebskosten	Support/Wartung	Schulung	Aufgaben und Ergebnisanalyse	Motivation/Akzeptanz	Personalkosten	Kompatibilität	Weiterentwicklung	Qualifikation
	x		x	x	x	x		x	x			x	x	x	x		x	x		x	x		

In dem folgenden 2. Schritt, wird die Frage mit der Überschrift „Software“ beantwortet: *Was sind die notwendigen Funktionen und wie soll die Darstellung aussehen?*

Die gewünschten Funktionen sind die Unterstützung einer automatisierten Objektidentifikation, niedrige Investitionskosten, sowie die Funktionalität des Markertrackings. Aufgrund dieser Anforderungen ergibt sich mit den Wechselwirkungen eine neue Reihenfolge im Fragenkatalog. Zu berücksichtigen ist noch, dass wie oben bei der Systembeschreibung gefordert, keine besonderen Interaktionstools verwendet werden sollen. Dies führt zu einer Verschiebung der Fragen 6 und 8 in Tabelle 21 und hat als Ergebnis die Tabelle 22.

**Tabelle 22:** vorläufige Tabelle nach dem 2. Schritt

W	Komponenten und Faktoren:	Frage:	Antwort:
1	Positionserfassung	Wie sollen die Objekte erfasst werden?	möglichst günstig, Markertracking
3	Softwaresysteme	Was sind die notwendigen Funktionen und wie soll die Darstellung aussehen?	RFID gestützter Datenbankzugriff
4	Investitionskosten	Was darf die Anschaffung kosten?	wenig (< 10.000€)
8	Interaktion	Wie soll interagiert werden?	ohne Hilfsmittel (natürliche Interaktion mit den Händen ohne zusätzliche Geräte)
6	Schulung	Wie sollen die Anwendungen entstehen und sind Schulungen erforderlich?	nein
11	Anzeige	Wie soll die Darstellung erfolgen?	Monitor
2	Datenbank	Wo werden die Daten für die AR-Anwendung vorgehalten?	in einem PDM System
5	Betriebskosten	Was darf das System im Betrieb kosten?	wenig (<1.000,-€ / Monat)
7	Mitarbeiter	Für welchen Anwenderkreis ist das System?	Werkzeugmacher
9	Logistik und Prozesse	Woher kommen die darzustellenden Informationen?	Datenbanksystem → Messsystem
10	Stabilität	Welche Ausfallsicherheit muss das System gewährleisten?	hoch (weniger als 1 Ausfall im Monat)
...	...	...	...

Wechselwirkungen der Komponenten und Faktoren untereinander	Positionserfassung	Softwaresysteme	Investitionskosten	Interaktion	Stabilität	Anzeige	Prozesse und Betriebsfaktoren	Mitarbeiter	Logistik und Prozesse	Szenengenerator	Einsatzort/Umwelt/Objekt	Datenformate	Datenbank	Bilderfassung	Betriebskosten	Support/Wartung	Schulung	Aufgaben und Ergebnisanalyse	Motivation/Akzeptanz	Personalkosten	Kompatibilität	Weiterentwicklung	Qualifikation
	Investitionskosten	x	x		x	x	x				x				x			x			x	x	x

Dieses Vorgehen wird für alle Fragen des Katalogs angewendet. Daraus ergeben sich die beiden zu Beginn dargestellten Tabellen für den Fragenkatalog (siehe Tabelle 18) und die Wechselwirkungen (siehe Tabelle 19). Für die in Abschnitt 7.2.1 formulierten Anwendungen und den geforderten Funktionsumfang in Abschnitt 7.2.2 sowie dem Ergebnis der Konfiguration werden für die „**Kontrolle der Maßhaltigkeit**“ folgende Technikkomponenten ausgewählt:  
(System A)

Kamera	USB-Kamera
Tracking	optisches Tracking, Marker basiert
Displaysystem	Bildschirm
Szenengenerator	Standard-PC
Interaktionstool	nicht erforderlich
Software	Metaio AR-Browser
3D-Datenerfassung	photogrammetrisches System der Firma „GOM“

Als Technikkomponenten für die „**Anzeige vorhandener CAD/CAM-Informationen direkt am Werkstück**“ werden ausgewählt: (System B)

Kamera	USB-Kamera
Tracking	optisches Tracking, Marker basiert
Displaysystem	Bildschirm
Szenengenerator	Standard-PC
Interaktionstool	PC-Maus
Software	Metaio AR-Browser

Zusätzlich wurden beide Systeme durch folgende Komponenten erweitert:

Anwendung	eigene Benutzeroberfläche, die die speziellen Anforderungen des Einsatzgebietes und der Anwender im WFB berücksichtigt
Datenselektion	RFID-Objektidentifikation
Datenbank	Fileserver

### 7.3 Ergebnis

Für die beiden in Abschnitt 7.2.1 formulierten Anwendungen wurden mit den jeweils ausgewählten Technikkomponenten gemäß Abschnitt 7.2.3 zwei AR-Systeme aufgebaut und erste Versuche durchgeführt.

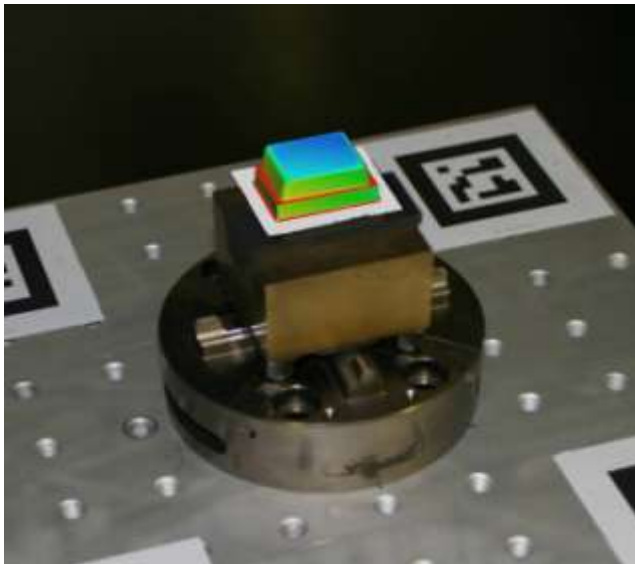
Als eines der Ergebnisse zeigte sich, dass die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte Definition von Koordinatensystemen für die Umwelt, den Anwender und für die unabhängigen Objekte sehr vorteilhaft für das Handling der digitalen Daten ist. Eine manuelle Transformation von 3D-Daten für den jeweiligen Verwendungszweck der einzelnen Anwendungen entfiel vollständig. In der Praxis bedeutet dies, dass die Definition von Koordinatensystemen für die einzelnen Objekte und Bauteile sowie deren Position und Orientierung im Werkzeug direkt bei der Konstruktion berücksichtigt wurden. Dadurch ist eine automatisierte Konvertierung der parametrischen CAD-Daten in ein für das AR-System geeignetes Datenformat möglich. Manuelle Eingriffe im Betrieb des Gesamtsystems sind dadurch kaum noch erforderlich.

Beide AR-Systeme (System A und B) sind für den Einsatz direkt an der Werkbank des Werkzeugmachers konzipiert. Es wurde deshalb bereits bei der Auswahl der Komponenten auf Verwendbarkeit im Werkstattbereich, d.h. Robustheit beim Einsatz durch geringe Störanfälligkeit gegenüber Fremdlicht, Verschmutzung, elektromagnetische Felder sowie Erschütterungen geachtet.

Beide Systeme wurden auf einem Werkstattrollwagen installiert. Die Systeme wurden entsprechend der Konfigurationsauswahl aus Abschnitt 7.2.3 ausgewählt. Eine besondere Anpassung fand bei der Benutzeroberfläche oder auch GUI (Graphical User Interface) statt. Hier entstand eine besondere Anwendung, die als Basissystem das AR-SDK der Firma Metaio [WWW11] verwendet. Dies wurde erforderlich, da zum einen beide Systeme von Werkzeugmachern ohne AR-Kenntnisse bedient werden sollen und zum anderen bestand keine Anbindung des RFID-Readers in dieser Software. Programmiert wurden die Programmoberfläche und der Schnittstellenzugriff in der Software C++. In den folgenden Abbildungen ist zu jeder Anwendung der entsprechende Systemaufbau, die angezeigte AR-Darstellung sowie das GUI, das dem Werkzeugmacher zur Verfügung steht, zu sehen.



Systemaufbau

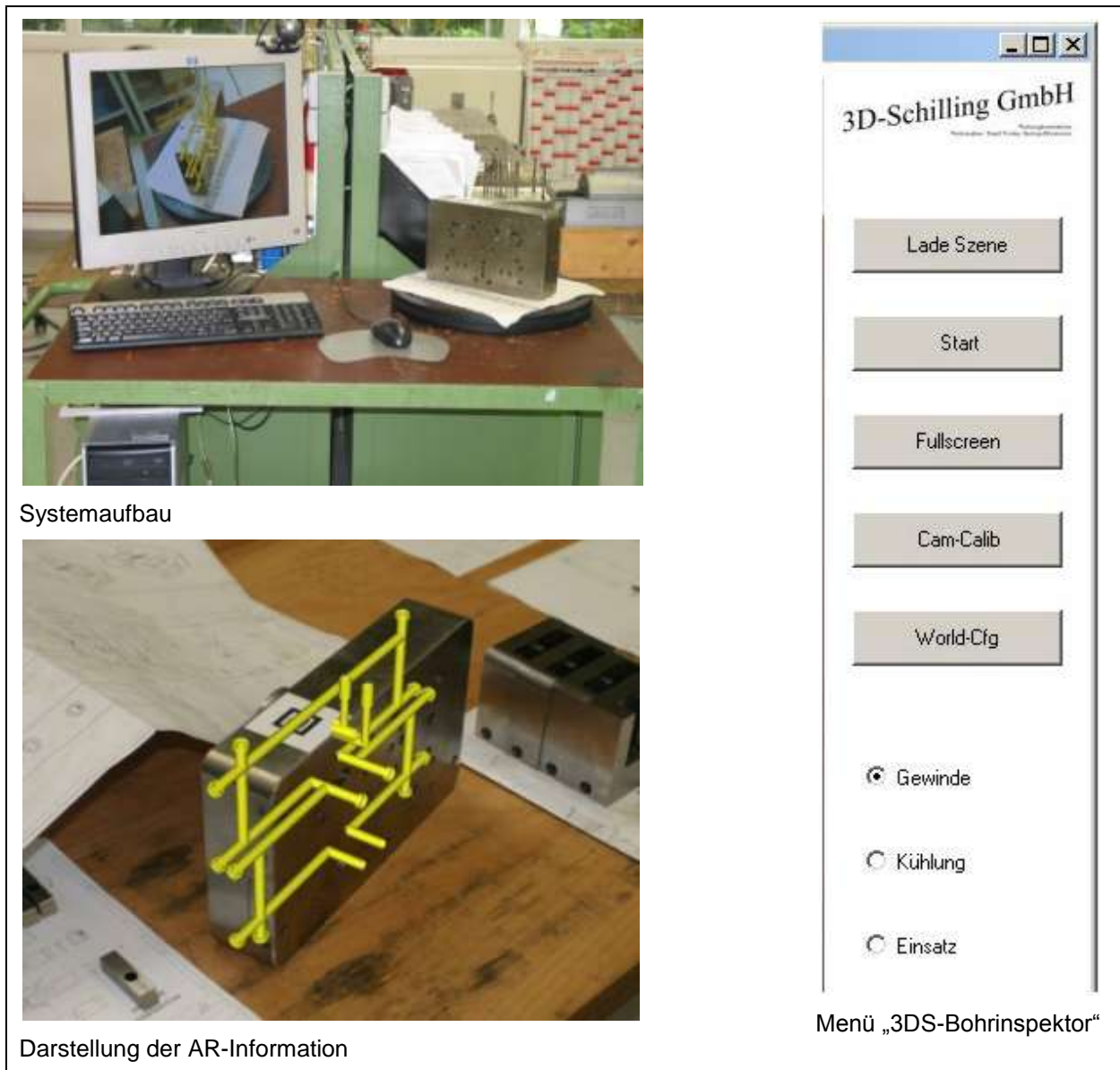


Darstellung der AR-Information



Menü „3DS-Elektrodenhalter“

Abb. 7-3: Systemaufbau, AR-Darstellung und GUI von System A (Kontrolle auf Maßhaltigkeit)



**Abb. 7-4: Systemaufbau, AR-Darstellung und GUI von System B (Anzeige vorhandener CAD/CAM-Informationen direkt am Werkstück)**

Die Menüs wurden zweiteilig in Form von Systembuttons und Aufgabenbuttons realisiert. Die Systembuttons können im Serieneinsatz auch komplett entfallen. Die einzelnen Buttons realisieren folgende Funktionen:

- Lade Szene → lädt die Projektdatei
- Start → initialisiert die Kamera und startet die AR-Darstellung
- Fullscreen → blendet das Menü aus und stellt die AR-Darstellung auf dem ganzen Bildschirm dar
- Cam-Calib → ermöglicht das Laden alternativer Kamerakalibrierungen für die Verwendung mehrerer Kameras
- World-CFG → ermöglicht das Laden alternativer Markerkonfigurationen für den Einsatz mehrerer Elektrodenhalter oder Werkstückpaletten



Das Zusammenspiel der einzelnen Hard- und Softwarekomponenten für die Systeme A und B ist in Abb. 7-5 dargestellt.

Umfangreiche Tests ergaben, dass die beiden AR-Systeme die gewünschten Funktionen realisieren und sich für den Werkstatteinsatz eignen. Zur Überprüfung der Akzeptanz der Systeme wurde ein Test mit verschiedenen Anwendern durchgeführt. Nach der Versuchsdurchführung wurden Anwender gebeten, einen Fragebogen (siehe Anhang B) auszufüllen, um zu ermitteln, welche Verbesserungen der AR-Anwendungen erforderlich sind und welches Potenzial im Einsatz der Systeme gesehen wird.

Der Anwenderkreis bestand aus 20 Personen, wobei 10 als Werkzeugmacher tätig sind. 10 weitere Personen waren branchenfremd. Es wurden vier Versuchsgruppen zu je 5 Personen gebildet. Jeweils 2 Gruppen mit Werkzeugmachern und 2 Gruppen mit Nichtwerkzeugmachern. Die Aufgabe bestand darin, eine Vollständigkeitsinspektion von 32 Bohrungen und 8 Gewinden durchzuführen.

Jeweils eine Gruppe „Werkzeugmacher“ und „Nichtwerkzeugmacher“ arbeitete mit dem AR-System, die Andere löste die Aufgabe mit Hilfe der konventionellen 2D-Zeichnung.

Die Teilnehmer der Gruppe Werkzeugmacher, die mit dem AR-System arbeitete, benötigte zur Überprüfung aller Bohrungen und Gewinde im Durchschnitt 1,45 Minuten. Die Teilnehmer der Gruppe Nichtwerkzeugmacher benötigten für die gleiche Aufgabe ca. 2,1 Minuten. Im Vergleich dazu benötigten bei der konventionellen Arbeitsweise mit der 2D-Papierliste die Teilnehmer der Gruppe Werkzeugmacher ca. 4,5 Minuten und die Nichtwerkzeugmacher Teilnehmer ca. 7,2 Minuten. Als besonders wichtig wird an dieser Stelle erachtet, dass die Teilnehmer beider Gruppen (Werkzeugmacher und Nichtwerkzeugmacher) die Inspektion mit dem AR-System durchweg fehlerfrei durchführten.

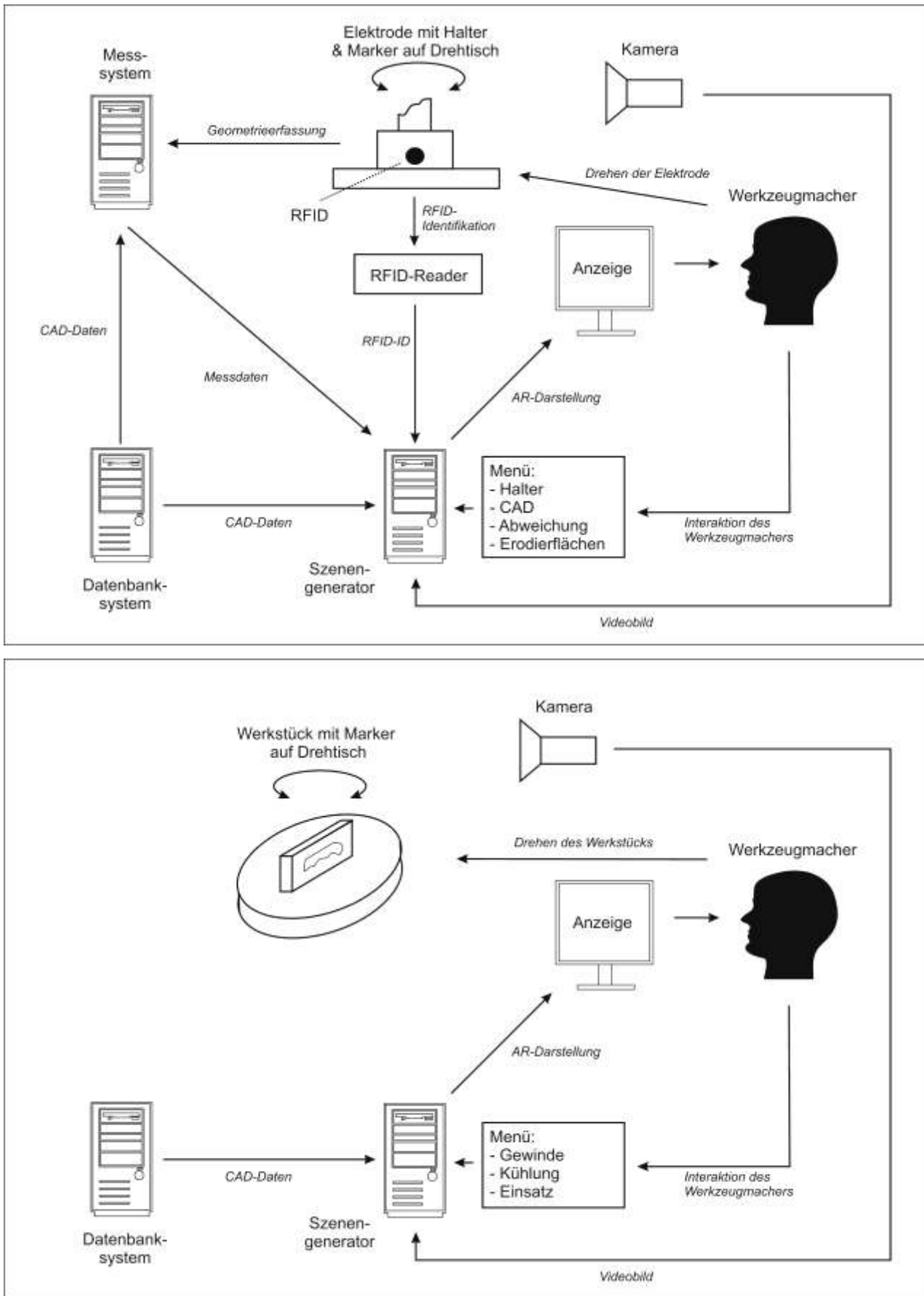


Abb. 7-5: Informationsfluss für die Systeme A (links) und B (rechts)

Den 10 Werkzeugmachern wurde im Anschluss durch den Autor jeweils die Elektrodenbeurteilung mittels AR vorgestellt. Da die Auswertung der Informationen spezielles Fachwissen voraussetzt, war es nicht sinnvoll, mit dem gesamten Anwenderkreis diesbezüglich Versuche durchzuführen. Der Test wurde mit vier Arbeitsvorbereitern und drei Facharbeitern für Funkenerosion durchgeführt. Die Aussagen hierzu flossen ebenfalls in die Fragebogenaktion ein. Während der Versuche wurde festgestellt, dass die vorgestellten AR-Systeme:

- die Arbeit sinnvoll ergänzen,
- den Lernaufwand bei der Einarbeitung gering bzw. akzeptabel halten,
- die ständige Verfügbarkeit der Daten aus der Qualitätssicherung unterstützen,
- bei einer ständigen Verfügbarkeit des Systems zur Analyse von CAD- und Messinformationen für den Werkzeugmacher, dieses selbstständig zur Eigenkontrolle genutzt wird,
- eine Dokumentation der Datenanalyse ermöglichen, um die Rückverfolgbarkeit der Prüflinge zu gewährleisten,
- individuelle Anpassungen im CAD-Modell bei der CAD/CAM-Inspektion noch nicht in ausreichendem Maße ermöglichen (z.B.: Toleranzdarstellung),
- durch bewegliche Stativlösungen für mehr Mobilität zu ergänzen sind, um auch Formen bis 300 kg zu inspizieren,
- in die CAD/CAM-Inspektion auch Messdaten integrieren können, analog zur Elektrodeninspektion,
- als ein Teil des Gesamtprozesses WFB zu verstehen sind und ein effektiver Einsatz nur durch eine vollständige Automatisierung der Datenverarbeitungsprozesse zu erreichen ist.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die AR-Systeme die Prozesssicherheit durch die zeitnahe und damit kostengünstige Identifikation von Fehlern wie Form- und Lageabweichungen der Elektroden wesentlich verbessern und die Informationen für die CAD/CAM-Inspektion effektiv bereitstellen. In der Anwendung hat sich ebenfalls gezeigt, dass durch die AR-Technik die bisherige Arbeitsweise des Werkzeugmachers nicht durch ein weiteres System belastet, sondern sinnvoll ergänzt wird. Durch die Eigenschaften des AR-Systems wird ihm die Möglichkeit gegeben, intuitiv mit den digitalen Daten aus der Konstruktion und der Qualitätssicherung (Messdaten, Prozessdaten) zu arbeiten. Durch die Reduzierung des Inspektionsaufwandes um ca. 25% werden ca. 5min/Arbeitsstunde für andere Arbeiten an dem Werkzeug gewonnen. Es wurde durch die Versuche bestätigt, dass die beschriebenen AR-Szenarios das Potenzial haben, zu einem kommerziellen System ausgebaut zu werden.

## 7.4 Weiterentwicklung der AR-WFB-Anwendungen

Die Arbeiten zu den beiden AR-Systemen erfolgten im Werkzeug- und Formenbau 3D-Schilling GmbH. Dieser Werkzeugbau bietet durch seine durchgängige CAD/CAM- Datenbereitstellung gute Voraussetzungen, den Informationsfluss in die Erhöhung der Prozesssicherheit einzubeziehen. Bei einem Vergleich der Datenhaltung verschiedener Firmen aus dem Sektor des WFB musste festgestellt werden, dass es keine einheitlichen Standards für die Datengenerierung und -haltung gibt. Die Integration eines AR-Systems in ein Unternehmen erfordert demzufolge einen entsprechenden Adaptionaufwand, da für einen reibungslosen Informationsfluss einheitliche Datenstrukturen notwendig sind.

Es ist zu gewährleisten, dass „die RICHTIGEN Daten zur RICHTIGEN Zeit am RICHTIGEN Ort“ (R<sup>3</sup>) verfügbar sind. In Abb. 7-6 sind die Zusammenhänge der Bereiche und der Datenfluss bei Anwendung von einem AR-System im WFB dargestellt.

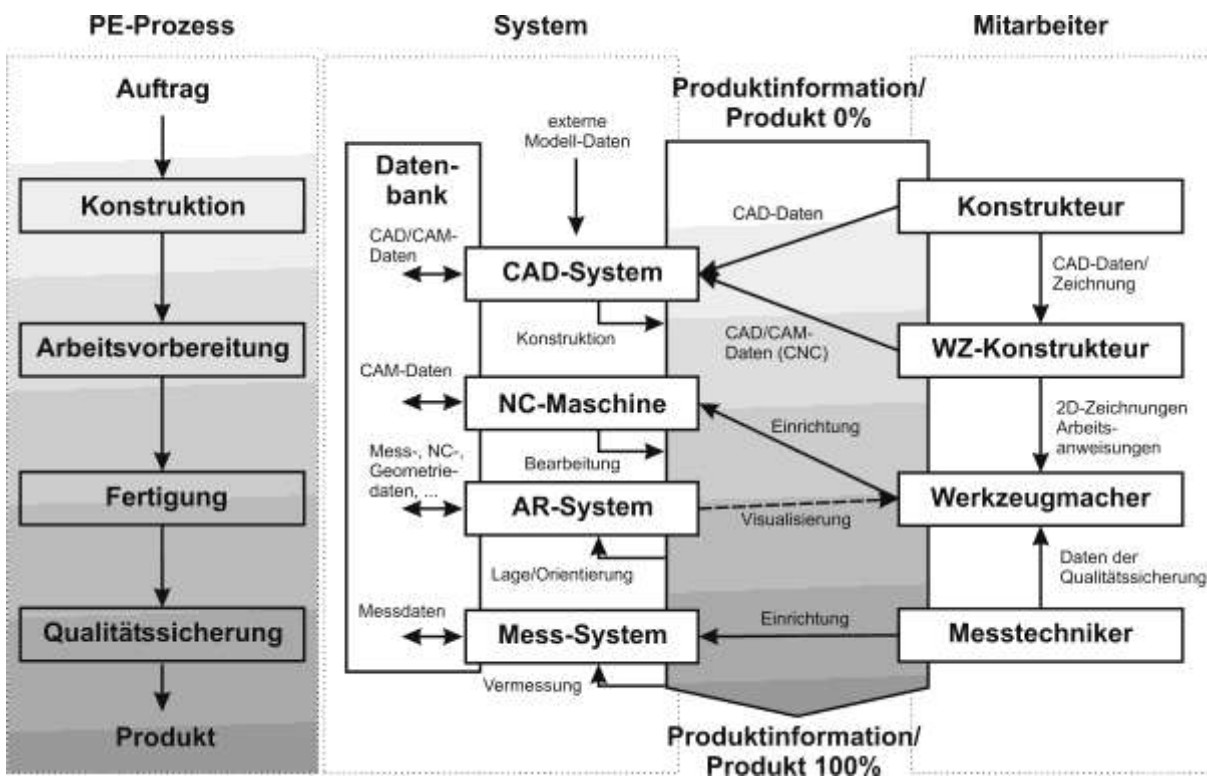


Abb. 7-6: Schema des Informationsflusses für AR im WFB

Das AR-System in Kombination mit einer zentralen Datenhaltung wird zu einem wichtigen Werkzeug der Informationspräsentation und -analyse für den Werkzeugmacher.

Die Weiterentwicklung der bisher beschriebenen prototypenhaften AR-Systeme bedingt zunächst die Integration in ein Produktions-Planungs-Steuerungs-System. Die Identifikation der unterschiedlichen Werkstücke soll über RFID erfolgen, die in Kombination mit einer Datenbank die Zuordnung zwischen realen Daten und CAD/CAM-Daten ermöglichen.

Ziel dieser Weiterentwicklung ist ein autonom arbeitendes System mit folgenden Eigenschaften:

- automatisierte Bereitstellung von CAD/CAM-Daten aus Konstruktion und Arbeitsvorbereitung für den Werkzeugmacher
- Darstellung von Prüf- und Inspektionsschritten in den Arbeitsabfolgen
- automatisierte 3D-Vermessung von Elektroden und Werkstücken für die AR-Inspektion
- Bereitstellung der Informationen für das AR-System aus der Datenbank
- Sammlung der Ergebnisse von AR-Analysen in der Datenbank
- Integration in ein Expertensystem zum Wissensmanagement

Als das zu erreichende Gesamtergebnis wird eine AR-gestützte Fehlerprognose gesehen, deren Aufgabe es ist, frühzeitig Abweichungen im Bearbeitungsprozess zu erkennen und dem Bearbeiter zur Begutachtung vorzulegen. Die beiden entworfenen Systeme ermöglichen gegenwärtig, Geometrieabweichungen am Werkstück bzw. an der Elektrode sichtbar zu machen. Für eine AR gestützte Fehlerdiagnose ist es notwendig, die Erodier-Startposition in die Betrachtung mit einzubeziehen. Die Darstellung, wo an dem Werkstück die Elektrode zu erodieren beginnt, muss im Koordinatensystem der Maschine erfolgen. Aufgrund möglicher Verschmutzung durch Elektrolyt und der Arbeitsschutzvorschriften ist es an Erodiermaschinen nicht praktikabel, mit dem bisher beschriebenen Systemaufbau „Kamera und Monitor“ aus System A und B zu arbeiten. Für diese Anwendung können somit nicht die bisher beschriebenen Systemkonfigurationen (A und B) zum Einsatz kommen. Als eine gut geeignete Displaykomponente für die Darstellung z. B. von Erodier-Startpositionen direkt in der Maschine, wird ein Laserprojektionssystem erachtet, siehe auch Kap. 7.6. Die Laserprojektion kann analog für die Darstellung von NC-Wegen bei Fräsmaschinen zum Einsatz kommen.

Allgemein kann es als sinnvoll erachtet werden, dass bei dem Vermessen von Elektroden und Werkstücken aufgrund der unzureichenden Darstellungsgenauigkeit von AR-Systemen, auf eine externe Vermessung mittels GOM-Scanner ausgewichen wurde. Für Genauigkeitsbeurteilungen im WFB ist es erforderlich, Abweichungen ab einem Fehler von 0,01 mm zu ermitteln. Anwendungen, wo dies erforderlich ist, ist der Soll/Ist-Vergleich von Elektroden und Werkzeugkavitäten. Diese Genauigkeit ist aber nicht zwingend für alle Anwendungen notwendig. Wenn es z. B. darum geht, die Vollständigkeits von Geometrieelementen zu analysieren, kann auch mit der technisch bedingten Darstellungsungenauigkeit der AR-Systeme gearbeitet werden. Ein Wunsch der Anwender ist es, die Darstellungsgenauigkeit der AR-Systeme bei einer gerade betrachteten Szene bestimmen oder angeben zu können. Grundle-

gende Fragen die während der Tests gestellt wurden, sollen in der folgenden Fehlerbetrachtung kurz andiskutiert werden (siehe Punkt 7.5).

## 7.5 Fehlerbetrachtungen bei der AR-Darstellung

Ein allgemeiner Tenor der Versuchspersonen war, dass sie sich eine Aussage zur dargestellten Genauigkeit des AR-Systems wünschen würden. Das heißt, in wie weit wird falsch dargestellt und inwieweit können deshalb Rückschlüsse auf die Korrektheit des untersuchten Bauteils gezogen werden. Über die Genauigkeit von AR-Darstellungen lassen sich nur wenige Aussagen in der Literatur finden, obwohl Messabweichungen einzelner Komponenten bekannt sind. So wird der durchschnittliche Messfehler eines Trackingsystems, zum Beispiel des A.R.T. System [WWW33] mit ca. 0,4 mm angegeben.

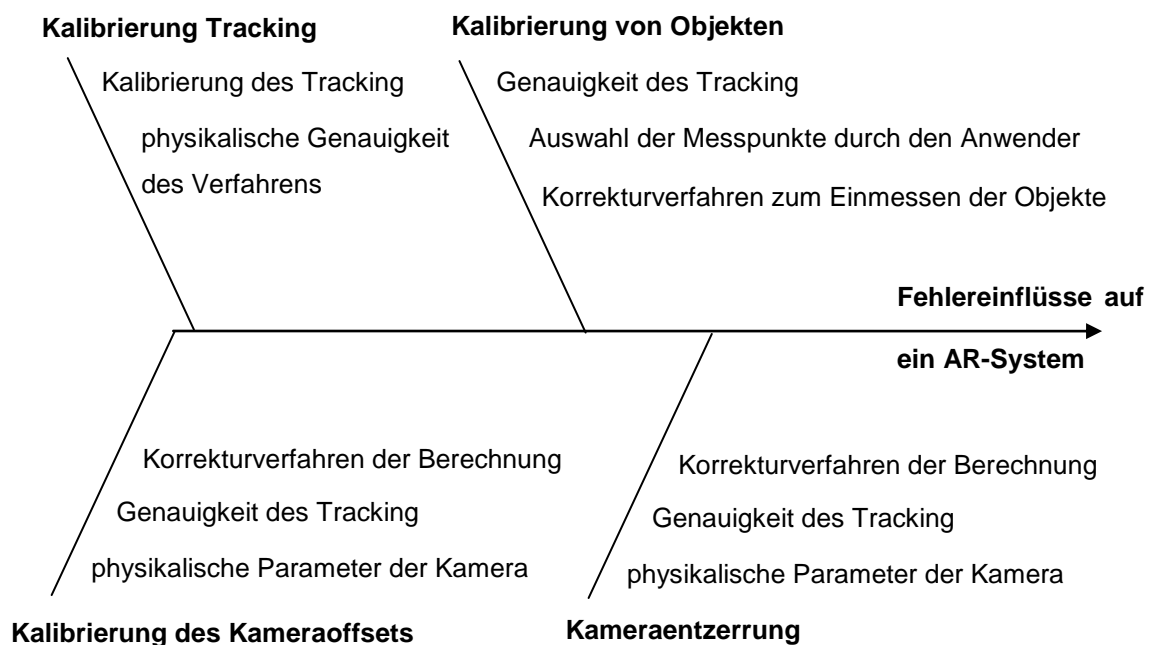
Tabelle 23: Vergleich von zwei AR-Kalibrieralgorithmen

Metaio- AR-Browser	VRCom +A.R.T. (VD2)
<p style="text-align: center;"><b>Kalibrierung des Tracking</b> (Definition der Maße eines Markers in der Software)</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	<p style="text-align: center;"><b>Kalibrierung des Tracking</b> (Kalibrierung des A.R.T.-Tracking Systems)</p> <p style="text-align: center;">↓</p>
<p style="text-align: center;"><b>Kalibrierung von Objekten zum Tracking</b> (Einmessen der Marker in die Bezugskoordina- tensysteme der realen Objekte)</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	<p style="text-align: center;"><b>Kalibrierung von Objekten zum Tracking</b> (Raumkalibrierung: Transformation des A.R.T. Koordinatensystems in das Koordinatensystem der CAD-Daten [vereinfacht die Darstellung])</p> <p style="text-align: center;">↓</p>
<p style="text-align: center;"><b>Kalibrierung des Kameraoffset</b> (in diesem Fall nicht erforderlich, da die Position des Markers zur Kamera berechnet wird)</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	<p style="text-align: center;"><b>Kalibrierung des Kameraoffset</b> (Berechnung der Transformation des virtuellen CCD-Chips der Kamera zum Kamera- Trackingmarker)</p> <p style="text-align: center;">↓</p>
<p style="text-align: center;"><b>Kameraentzerrung</b> (Entzerrung des Videobildes, um eine verzer- rungsfreie Abbildung zu erhalten)</p>	<p style="text-align: center;"><b>Kameraentzerrung</b> (Entzerrung des Videobildes um eine verzer- rungsfreie Abbildung zu erhalten)</p> <p style="text-align: center;">↓</p>
	<p style="text-align: center;"><b>Kalibrierung des Interaktionswerkzeuges</b> (Kalibrierung des Messwerkzeuges)</p>

Die folgenden Betrachtungen sind eine erste Abschätzung der Einflussfaktoren die die Darstellung von AR-Systemen beeinflussen. Ziel der Analyse ist eine Skizzierung der wirkenden

Zusammenhänge als Grundlage für weiterführende Untersuchungen um Aussagen über die existierende Messungenauigkeit von AR-Applikationen bei der Bestimmung von Abweichungen realer Objekte zu ihren virtuellen Repräsentanten treffen zu können. Um die Fehlerquellen identifizieren zu können, werden die Prozessschritte, die in einer AR-Applikation seriell abgearbeitet werden, einzeln betrachtet. In Tabelle 23 sind die Schritte für eine Standard- und eine Mess-AR-Applikation zusammengestellt, wobei zum besseren Verständnis jeder Schritt an einem Beispiel beschrieben wird.

Basierend auf Tabelle 23 wird in Abb. 7-7 eine Übersicht der möglichen Fehlereinflüsse auf ein AR-System dargestellt. Dafür werden die einzelnen Arbeitsschritte weiter zerlegt. So ergibt sich die Abweichung eines Trackingsystems, vor allem aus der vorgenommenen Kalibrierung des Systems und den physikalischen Grenzen, die an das jeweilige Trackingverfahren gebunden sind. Der Abweichung des Trackingsystems kommt bei der Gesamtbetrachtung eine besondere Bedeutung zu. Da meist die weiteren Kalibrierverfahren im Gesamtprozess „AR-System-Kalibrierung“ mit dem Trackingsystem und dessen Messdaten durchgeführt werden, kann der Gesamtfehler nie kleiner sein als die Abweichung der Trackingsystem-Kalibrierung an sich. Dieser Umstand wird in den drei weiteren Kalibrierungen durch den Punkt „Genauigkeit des Tracking“ ausgedrückt.



**Abb. 7-7: Fehler in AR-Systemen**

Mit Hilfe der in Abb. 7-3 dargestellten Fehlereinflüsse werden Funktionsgleichungen für die Kalibrierverfahren erstellt.

$$K_{Tracking} = f(\text{Genauigkeit der Trackingkameras, Kalibrieralgorithmus})$$

$$K_{Objekte} = f(K_{Targets}, K_{Messstiftpunkte 1}, \dots, K_{Messstiftpunkte N})$$

$$K_{Kamera} = f(K_{Target der Kamera}, K_{Offset zum CCD-Chip})$$

$$K_{Kameraentzerrung} = f(K_{Kameraparameter}, \text{Kalibrieralgorithmus})$$

(ein groß geschriebenes „K“ bezeichnet eine Kalibrierung in mm)

Der Darstellungsfehler eines AR-Systems setzt sich wiederum aus diesen vier Kalibrierungsfehlern zusammen. Das Ziel weiterführender Arbeiten sollte eine grobe Abschätzung der maximal zu erwartenden Abweichung eines AR-Systems bei einer bestimmten Systemkonfiguration sein. Dieser Wert wird allgemein von den Probanden als wichtig angesehen, um ein Vertrauen zu der AR-Technik zu bekommen und um dessen Anwendungsgrenzen besser einschätzen zu können.

## 7.6 Einsatz eines Laser-Projektionssystems in AR-Lösungen

Eine sinnvolle Alternative zu den bereits im Einsatz befindlichen AR-Displays stellen Projektionssysteme dar. Der wesentliche Vorteil dieser Systeme ist, dass die Information direkt auf dem Werkstück angezeigt wird, was die Anwenderakzeptanz wesentlich verbessert, da weder ein Display noch eine Brille verwendet werden muss. Für die Darstellung eines virtuellen Objektes auf einem realen Objekt eignen sich zwei Projektionsarten. Das ist zum einen die normale Videoprojektion, zum anderen die Laserprojektion. In Tabelle 24 werden die Vor- und Nachteile beider Technologien ausgeführt.

**Tabelle 24: Vergleich von Video- und Laserprojektion**

	<b>Videoprojektor:</b>	<b>Laserprojektor:</b>
Vorteile:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vollfarbendarstellung möglich</li> <li>- niedriger Anschaffungspreis</li> <li>- standardisierte Bildausgabe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Darstellung ist auf der gesamten Projektionstiefe scharf</li> <li>- keine Linsenverzerrung</li> </ul>
Nachteile:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unschärfen im Bild bei der Darstellung außerhalb des Fokusbereiches</li> <li>- Linsenverzerrung der Abbildung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- relativ hohe Anschaffungskosten</li> <li>- derzeit nur mit Aufwand eine Vollfarbendarstellung möglich</li> <li>- stellt standardmäßig eine Liniengrafik dar (keine Vollflächengrafikausgabe)</li> </ul>

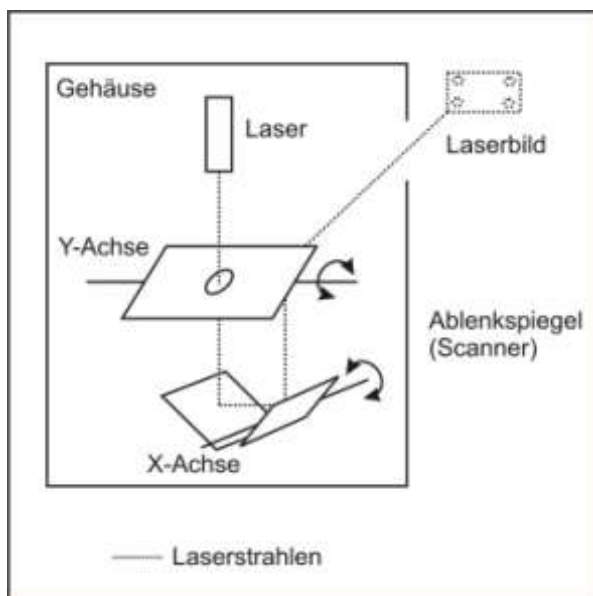
Für die meisten einfachen Anwendungen ist es ausreichend: einen Punkt zu markieren, eine Linie zu zeichnen, ein Messgitter zu visualisieren oder auch nur einen einfachen Text wieder-



zugeben. Für diese Fälle sind Laserprojektoren hervorragend geeignet. Die höheren Anschaffungskosten gleichen sich durch geringe Wartungskosten aus.

Die Kombination von Laserprojektoren und AR-Systemen haben sich bisher nicht durchgesetzt, sei es aufgrund der in Tabelle 19 dargestellten Nachteile oder dass es noch keine zwingende Anforderung für ihren Einsatz gab. Mit der Weiterentwicklung der AR-Lösungen für den Werkzeugbau ist ein möglicher Einsatz bei der Informationsdarstellung direkt auf der Werkzeugmaschine gegeben.

Bei ersten Versuchen einen Laserprojektor für AR-Anwendungen einzusetzen, wurde schnell festgestellt, welche Probleme derzeit gegen einen Einsatz dieser Technik sprechen. Für die Verwendung von Laserprojektoren ist es erforderlich, diese innerhalb des AR-Koordinatensystems zu kalibrieren, um eine korrekte Überlagerung zu erhalten. Ein solches Kalibrierverfahren für den AR-Anwendungsfall ist bisher nicht in der Literatur beschrieben. Ein mögliches Verfahren zur Kalibrierung von Laserprojektoren als AR-Projektionssystem wurde im Rahmen der Arbeit untersucht.



**Abb. 7-8: Prinzip einer Laser-Scan-Einheit**

Die so genannte „Laser-Offset“-Kalibrierung (analog zur Kamera-Offset-Kalibrierung) ermittelt den Transformationsvektor zwischen der virtuellen Strahlenquelle des Lasers und dem Trackingmarker des Lasers. Dadurch wird gewährleistet, dass der Laser auch während des Betriebs bewegt werden kann und eine korrekte Projektion erfolgt.

Das Laserprojektionssystem setzt sich im Wesentlichen aus den Komponenten: Laser, Steuerungselektronik und der Ablenkeinheit, auch als „Laser-Scan-Einheit“ bezeichnet, zusammen.

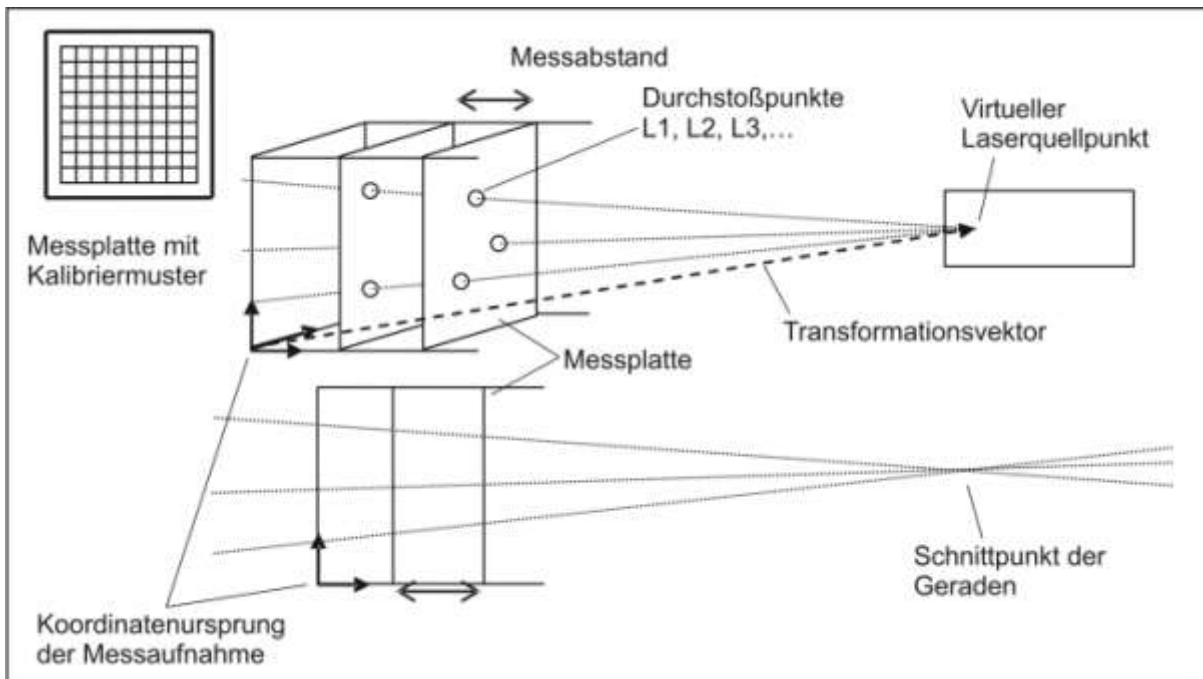
Die Laser-Scan-Einheit besteht aus zwei Ablenkspiegeln (Scanner), jeweils einen für die X- und einen für die Y-Richtung, siehe Abb. 7-8.

Es wird von den Annahmen ausgegangen, dass das Abbildungssystem verzerrungsfrei ist und dass die Strahlenbündel einen gemeinsamen Ursprungspunkt besitzen. Dieser Ursprungspunkt wird mittels Triangulation ermittelt.

Mit dem Laser wird ein Punktmuster, bestehend aus mindestens drei Punkten, auf eine Messplatte projiziert. Die Messplatte befindet sich in einer Messaufnahme, die es ermöglicht, den Abstand der Messplatte zum Laser zu variieren. Für die Kalibrierung ist es erforderlich, die Koordinaten der Durchstoßpunkte, auf dem Messraster der Messplatte, in zwei unterschiedlichen Abständen der Platte zum Laser, zu messen.

Auf Basis der Punktkoordinaten eines Strahles werden Lasergeraden berechnet. Der Koordinatenursprung dieser Berechnung liegt auf der Messaufnahme. Der Schnittpunkt, in dem sich die Laserkoordinaten schneiden, ist der virtuelle Laserstahlpunkt (Abb. 7-9).

Bei der praktischen Durchführung der Kalibrierung hat sich gezeigt, dass die Messpunkte messtechnisch toleranzbehaftet sind und die gefundenen Geraden zumeist windschief zu einander im Raum stehen. Damit entspricht der Laserquellpunkt den Koordinaten des Schnittpunktes bzw. der Koordinaten des minimalen Abstandes zwischen den Geraden.



**Abb. 7-9: Funktionsprinzip der Laserkalibrierung**

Zur Berechnung des Laserquellpunktes sind von zwei Geraden die Richtungsvektoren  $P$  und  $Q$  zu berechnen. Die 3. Gerade wird zur Kontrolle und Verbesserung des errechneten Punktes verwendet. Die Gleichung für den minimalen Abstand lautet:

$$l^2 = (x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 + (z_p - z_q)^2 \quad (2)$$

$$l^2 = (x_1 + p \cdot a_x - x_2 - q \cdot b_x)^2 + (y_1 + p \cdot a_y - y_2 - q \cdot b_y)^2 + (z_1 + p \cdot a_z - z_2 - q \cdot b_z)^2 \quad (3)$$

Bildung der Differenzialgleichung und Ableitungen nach p und q

$$1. \quad \frac{dI^2(p,q)}{dp} = 0 \quad 2. \quad \frac{dI^2(p,q)}{dq} = 0$$

Ableitung nach p

$$\begin{aligned} \frac{dI^2(p,q)}{dp} = & (x_1 + p \cdot a_x - x_2 - q \cdot b_x)a_x + (y_1 + p \cdot a_y - y_2 - q \cdot b_y)a_y \\ & + (z_1 + p \cdot a_z - z_2 - q \cdot b_z)a_z \end{aligned} \quad (4)$$

Ableitung nach q

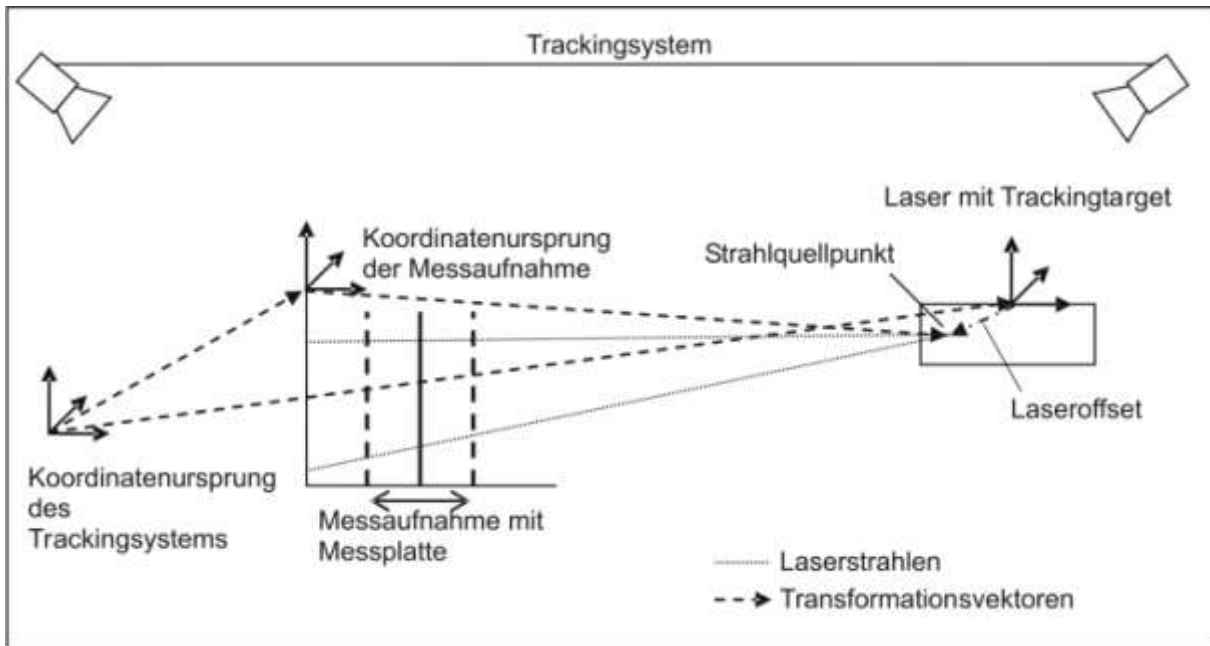
$$\begin{aligned} \frac{dI^2(p,q)}{dq} = & (x_1 + p \cdot a_x - x_2 - q \cdot b_x)b_x + (y_1 + p \cdot a_y - y_2 - q \cdot b_y)b_y \\ & + (z_1 + p \cdot a_z - z_2 - q \cdot b_z)b_z \end{aligned} \quad (5)$$

In den ersten Versuchen wurde der Abstand vom Laserquellpunkt zum Koordinatenursprung der Messplatte mit einem maximalen Fehler von ca. 4 Millimetern bestimmt. Eine Orientierung des Lasers zur Projektionsfläche kann durch das Ablenkensystem nicht bestimmt werden, so dass zum Laserquellpunkt keine Projektionsrichtung angegeben werden kann, weil im Vergleich zu Kamerasystemen keine Bildebene existiert. Um dennoch eine korrekte Überlagerung erzielen zu können, wird festgelegt, dass der Laser immer direkt auf den Koordinatenursprung der Messplatte orientiert ist. Nach der Bestimmung des Laserquellpunktes, muss noch eine Größenskalierung des Lasers in Höhe und Breite auf der „Zero-Parallaxe-Ebene“ erfolgen. Im VR wird als „Zero-Parallaxe-Ebene“ die Ebene bezeichnet, in der keine Skalierung im Modell aufgrund der Tiefenabbildung entsteht. Das heißt, ein Rechteck von der Größe 1x1 Meter wird auf einer Projektionsfläche in der „Zero-Parallaxe-Ebene“ mit exakt 1x1 Meter abgebildet. Dieses Verfahren wird auch für die Laserprojektion genutzt.

Für die Größen und Entzerrungskalibrierung wird in die „Zero-Parallaxe-Ebene“ eine Kalibrierplatte gestellt. Auf dieser sind Markierungen mit einem bestimmten Abstand zueinander angebracht. Mit dem Laserprojektor wird ein Bild dieser Marken auf die Marken projiziert. Jetzt erfolgt eine Anpassung des Lasersystems in der Art und Weise, dass die Parameter für die Auslenkung des Lasers, für die Verschiebung (oben-unten, links-rechts) und die Skalierung (Breite und Höhe) so variiert werden, dass das projizierte Bild mit den Marken übereinstimmt. Eine Veränderung der erhaltenen Skalierungsparameter darf in der weiteren Arbeit nicht erfolgen.

Für den Einsatz in einem AR-System ist es erforderlich das Projektionssystem auch innerhalb des Trackingsystems zu kalibrieren. In Abb. 7-10 sind die Transformationsvektoren und die

erforderlichen Koordinatensysteme sowie das Trackingtarget dargestellt. Der Vorgang der Laserkalibrierung ist dabei identisch zur bereits beschriebenen Arbeitsweise. Durch die Erweiterung und Kalibrierung innerhalb des Trackings, erfolgt eine Positionsbestimmung des Lasers im Weltkoordinatensystem des Trackings. Durch die Befestigung eines Trackingtargets am Laser, für die Positions- und Richtungsberechnung, kann der Laser frei im Trackingvolumen bewegt werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, bei einem fest stehenden Objekt mit nur einem Laser auf jeweils wechselnde Flächen zu projizieren.



**Abb. 7-10: Laserkalibrierung bei vorhandenem Trackingsystem**

Die Kalibrierung kann nach dem aufgezeigten Verfahren durchgeführt werden. Der Vorteil eines Laser-Projektionssystems liegt bei der fokusunabhängigen Abbildung des Bildes auf beliebig gekrümmten Oberflächen. Durch diese Eigenschaft lässt sich dieses Projektionssystem für viele Anwendungen in der Produktentstehung einsetzen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend vom Stand der Technik wurde in einer Variantenmatrix das theoretisch mögliche Potenzial von Augmented Reality in der Produktentstehung mit circa  $1,98 \times 10^9$  theoretischen unterschiedlichen Systemkonfigurationen abgeschätzt. Da der Einsatz dieser Technologie nicht bei jeder Anwendung sinnvoll und lohnenswert ist, wurde mit der Konfigurationssystematik eine neuartige Herangehensweise für die Konfiguration eines AR-Systems gewählt. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass ausgehend von einer Aufgabenstellung sowie den geforderten Funktionen und den damit verbundenen KF (Komponenten und Faktoren) die Technikkomponenten zielgerichtet zusammengestellt werden.

Der „Werkzeug- und Formenbau“ ist eine Branche, in der AR bisher noch nicht zum Einsatz kam. Erste AR-Arbeiten im Werkzeug- und Formenbau erfolgten mit der Formulierung von Aufgaben im Rahmen dieser Arbeit.

Zunächst konnte festgestellt werden, dass die Arbeiten an Werkzeugen und Formen einen Produktentstehungsprozess darstellen. Es wurde die Aufgabe formuliert, das Potenzial von AR-Lösungen im Rahmen der Kommunikation und der Fehlerprognose bzw. -vermeidung in der Formteilebearbeitung zu untersuchen. Aufbauend auf der Analyse der Art und Verteilung der Fertigungsfehler im Werkzeug- und Formenbau wurden zwei konkrete AR-Anwendungen formuliert und entsprechende Funktionen in zwei Demo-Anwendungen erprobt. Für die Auswahl der Systemkomponenten wurde die Konfigurationssystematik verwendet. Die Systeme (A und B) wurden im Werkstatteinsatz getestet und auf Messen, wie der „Euromold 2006“ oder zum Mitteldeutschen Werkzeug- und Formenbau-Forum den möglichen Anwendern vorgestellt. Die erhaltenen Anregungen flossen in die Verbesserung der Systeme ein. Gleichzeitig wurde mit dem Laser-Projektionssystem ein System mit großem Potenzial für den direkten Einsatz an der Werkzeugmaschine untersucht und ein Verfahren zur Kalibrierung vorgestellt.

Die gewählte Herangehensweise, ein AR-System aufgabenbezogen zu konfigurieren und dabei auf eine Konfigurationssystematik zurückzugreifen kann als erfolgreich eingeschätzt werden.

Die gewählten Beispiele haben ebenfalls gezeigt, dass AR-Techniken im Wesentlichen für Analysen, Vergleiche und Informationsmanagement anzuwenden sind. Der Nutzen für diese Anwendungen berechnet sich über das Einsparpotenzial der Fehlerprognose und letztendlich der Fehlervermeidung. Die AR-Technik stellt ihrerseits Anforderungen an die Systemlandschaft, in der sie integriert wird. AR-Systeme können nur Informationen verarbeiten, die sich datentechnisch erfassen, auswerten und darstellen lassen.

Eine wichtige Anforderung an AR-Systeme ist die Bedienbarkeit und Darstellung der Daten in der Anwendung, d.h. es ist ein intuitives und/oder gut strukturiertes Bedienkonzept ebenso erforderlich wie eine aufgabengerechte Darstellung der digitalen Informationen.

Es hat sich gezeigt, dass AR-Lösungen dort sinnvoll sind, wo komplexe Vorgänge und Zusammenhänge dargestellt werden müssen, eine große Bauteilanzahl, Positionsvielfalt und/oder Variantenvielfalt und ein mögliches Einsparungspotenzial über den Aufwendungen für die Anschaffung und den Betrieb der AR-Lösung vorliegt. Das Einsparpotenzial in der PE besteht vor allem in der Reduzierung des Abstraktionsgrads zur Erfassung der Informationen. Die kontextabhängige Darstellung der Informationen in Kombination mit der Filterung der Informationen reduziert die Informationsmenge auf das wesentliche der Aufgabe. Somit sind die Informationen für den Anwender besser zu erfassen und zu bewerten. Dies führt in der PE zu einer Kostenreduzierung durch Verringerung von:

- Entwicklungsschleifen
- Aufwendungen für Prototypen
- Dokumentationsaufwand.

Die praktische Erprobung hat gezeigt, dass es trotz eines geplanten Herangehens zur Integration von AR-Lösungen in einen PE-Prozess notwendig ist, zunächst Vorbehalte auszuräumen und gezielt AR-Lösungen für den Arbeitsprozess des Anwenders bereitzustellen. Durch möglichst intuitive Bedienung werden Hemmschwellen abgebaut.

In der Produktentstehung bieten AR-Lösungen eine Vielzahl von Möglichkeiten. Über die Effektivität der AR-Anwendungen entscheidet die Analyse des Prozesses. Aufgrund der Analyse sind Aufgabenstellungen mit den jeweiligen Komponenten und Faktoren zu formulieren. Diese Aufgaben sind hinsichtlich des Realisierungsaufwandes und des Beitrages zur Kostenreduzierung zu bewerten, wobei gleichzeitig die Möglichkeiten der technischen Umsetzung abgeschätzt werden müssen. Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zur konkreten Herangehensweise und Formulierung einer aufgabenspezifischen AR-Lösung.

**Literatur**

- [ABR99] Abraham, S.:  
„Kamera-Kalibrierung und metrische Auswertung monokularer Bildfolgen“,  
Dissertation 1999, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn
- [ABA04] Abawi, D. F.; Dörner, R.; Grimm, P.:  
„Werkzeuge für eine Mixed Reality Autorenumgebung“,  
In: Tagungsband zum 3. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung 2004. Band 149 Paderborn 2004
- [ALT01] Alt, T.; Schreiber, W.; Akerson, H.:  
„Einsatz von Augmented Reality in der Produktion“,  
VDI-Z Integrierte Produktion 143 (2001), Nr. 5 (Mai)
- [ALT03] Alt, T.:  
„Augmented Reality in der Produktion“,  
Herbert Utz Verlag GmbH 2003, ISBN: 3-8316-0226-3
- [ARV04] Friedrich, W.:  
„ARVIKA Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service“,  
<http://www.publicis-erlangen.de/books>, 2004, ISBN: 3-89578-239-4
- [AUE00] Auer, T.:  
„Hybrid Tracking for Augmented Reality“,  
Dissertation 2000, Technische Universität Graz
- [AZU97] Azuma, R.T.:  
„A Survey of Augmented Reality“,  
In Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6, 4 (August 1997), 355-385
- [BAR01] Barfield, W; Caudell, T.:  
„Fundamentals of wearable computers and augmented Reality“,  
Lawrence Erlbaum Associates, Publishers London, 2001 Mahawah, New Jersey
- [BAX04] Bax, M.:  
“Real-Time Lens Distortion Correction: 3D Video Graphics Cards Are Good for More than Games”,  
Stanford Electrical Engineering and Computer Science Research Journal; 2004;  
[http://ieeestanford.edu/ecj/articles/bax\\_spr04.pdf](http://ieeestanford.edu/ecj/articles/bax_spr04.pdf)

- [BEH98] Behringer, R.; Klinker, G.; Mizell, D.W.:  
„Augmented Reality Placing artificial objects in real scenes”,  
proceedings of IWAR'98; ISBN:-Nr. 1 56881 098 9
- [BEI03] Beier, D.; Billert, R.; Brüderlin, B.:  
„Model-based Object Recognition and Localization for Augmented Reality“,  
In: Tagungsband zum 2. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung 2002. Band 123 Paderborn 2003
- [BEN01] Bente, Gary; Krämer, C. Nicole; Peterson, Anita:  
„Virtuelle Realitäten“,  
Hogrefe-Verlag GmbH & Co. KG, Göttingen-Bern-Toronto-Seattle 2002
- [BEU01] Beutner, E.; Weißflog, S.; Neukirchner, H.:  
„Virtuelle Bauentwicklung heute und in naher Zukunft“,  
VDI Berichte NR. 1564, 2001
- [BÖS01] Böse, H.; Monkman, G.J.; Freimuth, H.; Klein, D.; Ermert H.:  
"Entwicklung eines haptischen Sensor-Aktor-Systems für die Virtuelle Realität",  
Veröffentlichung im Rahmen des Verbundprojektes „Haptisches Sensor-Aktor-System“ beim Fraunhofer Institut für Silicatforschung, 2001
- [BUR03] Burdea, B.C.; Coiffet, P.:  
„Virtual Reality - Second Edition“,  
Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey; 2003  
ISBN: 0 471 36089 9
- [DEI02] Deisinger, J.:  
„Immersives Modellieren“,  
Werkstatttechnik online Jahrgang 92 (2002) H.1/2
- [EHR95] Ehrlenspiel, K.:  
„Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkt-  
erstellung und Konstruktion“,  
Carl Hanser Verlag München Wien 1995; ISBN: 3-446-15706-9
- [EHR98] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.:  
„Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren“,  
Springer-Verlag Berlin 1998; ISBN: 3-540-64705-8; 2. Auflage



- [EIG01] Eigner, M.; Stelzer, R.:  
„Produktdatenmanagement-Systeme: ein Leitfaden für product development und Life-cycle-Management“,  
Springer Verlag Berlin Heidelberg 2001; ISBN: 3 540 66870 5
- [EIG05] Eigner, M.:  
„Virtuelle Produktentwicklung – eine Chance für innovative Produkte“,  
ICIDO Summit „Next Generation VR“ 2005;  
Vorlesungsskript „Virtuelle Produktentwicklung 1“ 2005; Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für virtuelle Produktentwicklung
- [EVE01] Eversheim, Walter.; Weck, M.; Jahn, D.; Koschig, M.; Fricker, I.:  
„Augmented Reality-Technologie unterstützt manuelle Montage“,  
VDI-Z Integrierte Produktion 143 NR. 9, September, 2001
- [FIS01] Fischer, Bob; Dawson-Howe, Kenneth; O’Sullivan, Carol:  
„Virtual and Augmented Architecture (VAA’01)“,  
Springer-Verlag London 2001
- [GAU01] Gausemeier, J.; Ebbersmeyer, P.; Kallenmeyer, F.:  
„Produktinnovation: Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen“,  
Carl Hanser Verlag München Wien, 2001, ISBN: 3-446-21631-6
- [GAU02] Gausemeier, J.; Fründ, J.; Matysczok, C.; Radkowski, R.:  
„Neue Interaktionstechniken in der rechnerintegrierten Produkt- und Produktionsprozeßentwicklung“,  
HNI-Verlagsschriftenreihe Band 107, 1. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung
- [GAU03] Gausemeier, J.; Fründ, J.; Matysczok, C.; Radkowski, R.:  
„Einsatz der Technologie Augmented Reality in der Automobilentwicklung“,  
HNI-Verlagsschriftenreihe Band 123, 2. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung
- [GAU04] Gausemeier, J.; Matysczok, C.; Mueck, B.:  
„Einsatzpotenziale der Technologie Augmented Reality“,  
ZWF Jahrgang 99 (2002) 1-2

- [GOD02] Godding, R.:  
„Geometrische Kalibrierung und Orientierung digitaler Bildaufnahmesysteme“,  
Dokumentation AICON 3D Systems GmbH, Braunschweig, 2002
- [GRO03] Gronert, T.:  
„Distanzwahrnehmung bei virtueller Tondarstellung mittels Wellenfeldsynthese  
Diplomarbeit“,  
Technische Fachhochschule Berlin; Fachbereich Elektrotechnik / Feinwerk-  
technik; Studiengang Kommunikationstechnik und Elektronik und Institut für  
Rundfunktechnik München; Abteilung Audiosystemtechnik; Januar 2003
- [HAR96] Harrison, D. J.; Jaques, M.W.S.:  
„experiments in virtual reality“,  
Butterworth-Heinemann; 1996; ISBN: 0 7506 2225 3
- [HÖH07] Höhne, G.; Husung, S.; Weber, C.; Brix, S.:  
„Audiovisuelle Produktoptimierung“  
6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentste-  
hung, 2007, ISBN: 978-3-939350-28-6
- [HOL96] Hollands, R.:  
„The VIRTUAL REALITY Homebrewer’s Handbook“,  
Published by John Wiley & Sons, Ltd; England 1996  
ISBN: 0 471 95871 9
- [IGD03] Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung in Darmstadt  
„Jahresbericht 2003 – Leistungen und Ergebnisse“,  
<http://www.iuk.fraunhofer.de/downloads/jahresberichte/>
- [IWA99] Iwata, H.:  
„Feel-through: Augmented Reality with Force Feedback“,  
In: “Mixed Reality-Merging Real and Virtual Worlds” Tagungsband zur  
ISMR99 (First International Symposium on Mixed Reality),  
Springer-Verlag, ISBN: 5 540 65623 5
- [KAU02] Kaufmann, H.:  
„Dynamische Geometrie in Virtual Reality Construct3D für den Geometrie-  
und Mathematikunterricht“,  
Institut für Softwaretechnik und Interaktive Systeme, Technische Universität  
Wien

- [KIR02] Kirchner, M.:  
„Kinematische Modellierung von GPS-Referenzstationen auf Eis für Flugzeug-  
gestützte Messvorhaben“,  
Diplomarbeit Technische Universität Dresden, Institut für Planare Geodäsie
- [KRA00] Krause, W.:  
„Gerätekonstruktion: in Feinwerktechnik und Elektrotechnik“,  
Carl Hanser Verlag München Wien; ISBN: 3-446-19608-0; 3. Auflage
- [LAT01] Latoschik, M. E.:  
„Multimodale Interaktion in Virtueller Realität am Beispiel der virtuellen Kons-  
truktion“,  
Dissertation 2001; Universität Bielefeld; ISBN: 3-89838-251-6
- [LIN05] Lindemann, U.:  
„Methodische Entwicklung technischer Produkte“,  
Springer-Verlag Berlin 2005; ISBN: 3-540-14041-7
- [LIT97] Litfin, G.:  
„Technische Optik in der Praxis“,  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; 1997; ISBN: 3 540 60613 0
- [LIV02] Livingston, M. A.; Rosenblum, L. J.; Julier, S. J.; Brown, D.; Baillot, Y.; Swan  
II, J. E.; Gabbard, J. L.; Hix, D.:  
“AN AUGMENTED REALITY SYSTEM FOR MILITARY OPERATIONS  
IN URBAN TERRAIN”,  
Proceedings of the Interservice/Industry Training, Simulation & Education  
Conference (I/ITSEC '02), Orlando, FL, December 2-5, 2002.
- [LUC04] Luczak, H.; Schmidt, L.; Koller, F.:  
„Benutzerzentrierte Gestaltung von Augmented-Reality-Systemen“,  
Reihe: Fortschritt-Berichte Sachgebiet: Mensch-Maschine-Systeme  
Nr.: 17 Jahr: 2004 (Hrsg. ISBN: 3-18-301722-9 ISSN: 1439-958X
- [MIL99] Milgram, P.:  
„A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration“,  
Vortrag: First International Symposium on Mixed Reality (ISMR) 1999  
“Mixed Reality - Merging Real and Virtual Worlds”, Ohmsha-Springer-Verlag,  
Japan

- [NEB02] Nebl, T.; Dikow, A.:  
„Erschließung von Produktivitätspotenzialen Produktivitätsbenchmarking und Best Practice Konzept“,  
Angewandte Arbeitswissenschaften, 2002, Nr. 171, S. 25-47
- [NEU05] Neumann, B.:  
„Bildverarbeitung für Einsteiger“,  
Springer-Verlag London Berlin Heidelberg New York; 2005;  
ISBN: 3 540 21888 2
- [OVT05] Ovtcharova, J.:  
„Life cycle Engineering Konzepte“,  
ICIDO Summit „Next Generation VR“ 2005
- [OXF95] Oxford University Press:  
„Oxford Advanced Learner’s Dictionary“,  
Oxford University Press, Cornelsen Verlag Berlin; 1995; ISBN: 3 464 11223 3
- [PAH97] Pahl, G; Beitz, W.:  
„Konstruktionslehre“,  
Springer-Verlag Berlin 1997, ISBN: 3-540-61974-7
- [PIE59] Pietsch, W.:  
„Stereofotografie“,  
Fotokinoverlag Halle, 1959
- [REG99] Regenbrecht, H.:  
„Faktoren für Präsenz in virtueller Architektur“,  
Dissertation Universität Weimar, 1999
- [REI07] Reinhäkel, T.; Schilling, M.:  
„Augmented Reality im Werkzeug und Formenbau“,  
6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 2007, ISBN: 978-3-939350-28-6
- [REI01] Reinhart, G.; Patron, C.; Weber V.:  
„Augmented Reality in der Produktion“,  
Zeitschrift: wt Werkstatttechnik 91 (2001) H. 6, S. 325-327
- [REI02A] Reinhart, G.; Patron, C.:  
„Nutzenorientierte Integration von Virtual und Augmented Reality“,  
ZWF Jahrgang 97 (2002) 4 (VW intern: S 02ZWF04205)

- [REI02B] Reinhart, G.; Patron, C.; Meier, P.:  
„Virtual- und Augmented Reality in der Montage - Durchgängiger Einsatz von Virtual und Augmented Reality im Bereich der manuellen Montage“,  
Zeitschrift: wt Werkstatttechnik 92 (2002), S. 12-15.
- [ROS99] Rosch, H.:  
„Augmented Reality, eine Übersicht“,  
Technischer Bericht Sep. 1999, TU-Ilmenau, Fachgebiet Graphische Datenverarbeitung
- [SCH02] Schäffler, A.; Schmidt, S.:  
„Lehrbuch und Atlas des menschlichen Körpers“,  
KOMET MA-Service und Verlagsgesellschaft mbH, München,  
ISBN: 3-89836-225-6
- [SCH05] Schmid, L.:  
„Erstellung einer Ausbildungs- und Trainingskomponente für die Interventionsplanung in der Leberchirurgie“,  
Diplomarbeit 2005, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- [SCH99] Schiebler, T.H.; Schmidt, W.; Zilles, K.:  
„Anatomie“,  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999, ISBN: 3 540 65824 6
- [SPA05] Spath, D.:  
„Integrierte Konstruktion und Planung mit Virtual Reality“,  
ICIDO Summit „Next Generation VR“ 2005
- [SUT02] Suthau, T.; Vetter, M.; Hassenpflug, P.; Meinzer, H.P.; Hellwich, O.:  
„Konzeption zum Einsatz von Augmented Reality in der Leberchirurgie“,  
DGPF 2002
- [SYM01A] Symietz, M.; Ostermann, F.; Zimmermann, P.;  
„Aspekte der virtuellen Produktentstehung – virtuelle und augmentierte Realität“,  
10. Produktionstechn. Kolloquium v. 27./28.09.01 in Berlin
- [SYM01B] Symietz, M.:  
„Echtzeitbasierte Generierung und Verlegung von Leitungsobjekten in einem digitalen Fahrzeugmodell mit einem Virtual-Reality-System“,  
Dissertation 2001 UNI Bielefeld

- [TSA87] R. Y. Tsai:  
„A versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D”,  
Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses. IEEE  
Journal of Robotics and Automation, RA-3(4), 1987
- [VIE03] Vienenkötter, A.:  
„Entwicklung einer Versuchsplattform für den Einsatz der Technologie Augmented Reality (AR) in der Automobilentwicklung“,  
Diplomarbeit Universität Paderborn/ Volkswagen AG, März 2003
- [VIN01] Vince, J.:  
„Essential virtual Reality fast: how to understand the techniques and potential of virtual reality“,  
Springer-Verlag London Berlin Heidelberg; 2001; ISBN: 1 85233 012 0
- [WAG03] Wagner, C.:  
„Virtuelle Realitäten für die chirurgische Ausbildung: Strukturen, Algorithmen und ihre Anwendung“,  
Dissertation Universität Mannheim, 2003
- [WIL90] Willmann, H.:  
„Langenscheidts Taschenwörterbuch Englisch“,  
Langenscheidt KG, Berlin und München; 1990; ISBN: 3 468 10122 8
- [WIL93] Wildemann, H.:  
„Optimierung von Entwicklungszeiten: Just-in-Time in Forschung & Entwicklung und Konstruktion“,  
München: Transfer-Centrum 1993; ISBN: 3-929918-01-1
- [ZÄH02A] Zäh, M. F.; Reinhart, G.; Petzold, B.; Patron, C.:  
„Force-Feedback in VR/AR-Anwendungen - Grundlagen, Bewertungsgrößen und technische Integration“,  
In: Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung 2002. Band 107 Paderborn 2002
- [ZÄH02B] Zäh, M. F.; Reinhart, G.; Patron, C.; Meier, P.:  
„Augmented und Virtual Reality in der manuellen Montage“,  
In: Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung 2002. Band 107 Paderborn 2002

- [ZHA98] Zhengyou Zhang:  
“A Flexible New Technique for Camera Calibration”,  
Technical Report; MSR-TR-98-71; <http://research.microsoft.com/~zhang/>  
Zuletzt besucht am: 30.04.2007
- [ZOC05] Zoch, D.:  
„Erarbeitung eines Konzeptes für die Vorgabe von Mess-, Prüf- und Inspektionsprozessen bei der Fertigung von Spritzgießwerkzeugen“,  
Diplomarbeit, Staatliche Studienakademie-Eisenach, 11.08.2005

## Internet Links:

- [WWW01] <http://www.augmented-reality.org/>  
allgemeine Infos zu Augmented Reality  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW02] <http://www.mvis.com/>  
Microvision- Hersteller von Head Mounted Displays und Retinal scanning displays  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW03] <http://www.microopticalcorp.com/>  
MicroOptical- Hersteller von Miniature head-worn displays  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW04] <http://www.rockwellcollins.com/keo/index.html>  
Kaiser Electro-Optics – Hersteller von Head-mounted displays  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW05] <http://www.ascension-tech.com/>  
ascension – Hersteller von Motion Tracking Software  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW06] [http://www.isense.com/index\\_ns\\_f.htm](http://www.isense.com/index_ns_f.htm)  
isense – Hersteller von Motion Tracking Software und Applikationen  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW07] <http://www.xybernaut.com/>  
Xybernaut – Hersteller von tragbaren Computersystemen  
gefunden am 04.06.2005

- 
- [WWW08] <http://www.fjeld.ch/hci/>  
Tool für Mensch-Maschine-Kommunikation und Gruppenarbeit  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW09] <http://www.medlibre.org/artma/>  
Open Source Software für virtuelle Implantat Planung  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW10] <http://www.liteye.com/>  
Web Seite der Firma Liteeye–Hersteller von Head-mounted displays  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW11] <http://www.ar-solutions.de/>  
Web Seite der Metaio GmbH- Hersteller von AR Software und Anwenderbera-  
tung  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW12] <http://www.amire.net/>  
Web Seite zum AMIRE–Projekt zur Entwicklung eines Mixed Reality Toolkits  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW13] <http://www.arsys-tricorder.org/>  
Web Seite zum ARSyS–Projekt des Fraunhofer IMK  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW14] <http://aris-ist.intranet.gr/>  
Web Seite zum ARIS–Projekt zur Entwicklung von E-Commerce Applikatio-  
nen mit realer Beleuchtungsrekonstruktion  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW18] [http://lsc.univ-evry.fr/Projets/ARITI/ARITI\\_WEB/index\\_en.html](http://lsc.univ-evry.fr/Projets/ARITI/ARITI_WEB/index_en.html)  
Web Seite zum ARITI–Projekt zum Einsatz von AR in der Telerobotic via  
Internet  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW16] <http://www.arvika.de/>  
Web Seite zum ARVIKA Projekt  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW17] [http://www.boeing.com/defense-  
space/aerospace/training/instruct/augmented.htm](http://www.boeing.com/defense-space/aerospace/training/instruct/augmented.htm)  
Webseite zum Einsatz von AR bei Boeing



- gefunden am 04.06.2005
- [WWW18] <http://www1.cs.columbia.edu/graphics/top.html>  
Webseite des Institutes „Computer Graphic and User Interface lab“ der Universität Columbia  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW19] <http://www.cc.gatech.edu/projects/ael/>  
Homepage des „the Georgia Institute of technology“  
gefunden am 04.06.2005
- [WWW20] <http://www.fit.fraunhofer.de/projekte/arthur/>  
Homepage des Fraunhofer Institut Angewandte Informationstechnik  
gefunden am 30.05.2005
- [WWW21] <http://infar.architektur.uni-weimar.de/infar/deu/forschung/gebis/intro.html>  
Homepage der Bauhaus-Universität Weimar  
gefunden am 30.05.2005
- [WWW22] <http://Archeoguide.intranet.gr>  
Homepage des Archeoguide Projektes  
gefunden am 19.06.2006
- [WWW26] <http://www.iaw.rwth-aachen.de/projekte/terebes/>  
Homepage des TEREDES Projektes  
gefunden am 20.06.2006
- [WWW24] <http://www.artesas.de/>  
Homepage des Artesas Projektes  
gefunden am 21.06.2006
- [WWW25] <http://www.ipek.uni-karlsruhe.de/cms/de/institut/forschungsgruppen/antriebsgruppen>  
Homepage des ABP Projektes der Universität Karlsruhe Institut für Produktentwicklung  
gefunden am 31.05.2005
- [WWW26] <http://www.medarpa.de>  
Homepage des MEDAPRA Projektes des IGD und ZGDV in Darmstadt  
gefunden am 21.06.2006

- [WWW27] <http://www.eyetoy.com/index.asp>  
Homepage der Firma Sony für das Produkt „Eyetoy®“  
gefunden am 21.06.2006
- [WWW28] <http://wearables.unisa.edu.au/projects/ARQuake/www/>  
Homepage des AR-Quake Projektes  
gefunden am 21.06.2006
- [WWW29] <http://www.fit.fraunhofer.de/projekte/netattack/index.xml?aspect=ar-gaming>  
Homepage des „Netattack“ Projektes beim Fraunhofer Institut für Angewandte  
Informationstechnik,  
gefunden am 21.06.2006
- [WWW30] <http://www.leedsmet.ac.uk/> und <http://www.augmented-reality.org/>,  
Homepage der Leeds Metropolitan University,  
gefunden am 01.07.2007
- [WWW31] <http://www.orad.tv>  
Homepage der Firma ORAD, Spezialist für Echtzeit-Grafik-Video-Systeme  
gefunden am 21.06.2006
- [WWW32] <http://www.looksea.com/>  
Homepage der Firma „Looksea™ LLC“ zum Produkt Looksea  
gefunden am 21.06.2006
- [WWW33] <http://www.ar-tracking.de>  
Homepage der Firma ART, Hersteller von optischen Trackingsystemen  
gefunden am 31.05.2005
- [WWW34] <http://www.vrcom.de>  
Homepage der Firma VRCOM, Hersteller von VR und AR Software  
gefunden am 31.05.2005
- [WWW35] <http://www.sportvision.com/>  
Homepage der Firma Sportvision Inc., Anbieter von Systemtechnik und Dienst-  
leistungen im broadcasting Sektor  
gefunden am 31.05.2005
- [WWW36] [http://www.rockwellcollins.com/optronics/ProductsAndServices/DisplayProduc  
ts/SoldierSystems/page813.html](http://www.rockwellcollins.com/optronics/ProductsAndServices/DisplayProducts/SoldierSystems/page813.html)  
Homepage der Firma Rockwell Collins Inc., Hersteller von HMD Technik  
gefunden am 31.05.2005

- [WWW37] <http://www.microopticalcorp.com/Applications/military.html>  
Homepage der Firma MicroOptical Corporation, Hersteller von HMD Technik  
gefunden am 31.05.2005
- [WWW38] [http://www.nvisinc.com/case\\_studies\\_06.php](http://www.nvisinc.com/case_studies_06.php)  
Homepage der Firma NVIS, Hersteller von HMD Technik  
gefunden am 31.05.2005
- [WWW39] <http://www.futaba.co.jp/english/vfd/what/index.htm>  
Homepage der Firma Futaba, Hersteller von Field emissive Displays,  
gefunden am 12.10.2006
- [WWW40] <http://www.ifire.com/>  
Homepage der ifire Technology Corporation, Hersteller von Field emissive  
Displays,  
gefunden am 12.10.2006
- [WWW41] <http://www.immersion.com>  
Homepage der Firma Immersion Corporation, Hersteller von VR/AR Hard-/  
und Software für Handinteraktion;  
gefunden am 16.10.2006
- [WWW42] <http://www.polhemus.com/>,  
Homepage der Firma Polhemus, Hersteller von Tracking und 3D-Scansysteme;  
gefunden am 16.04.2007
- [WWW43] <http://www.ascension-tech.com/products/flockofbirds.php>,  
Homepage der Firma Ascension, Hersteller von Systemlösungen für Medizin,  
Militär und Real-Time Anwendungen;  
gefunden am 16.04.2007
- [WWW44] <http://www.5dt.com/products/pitrax2.html>,  
Homepage der Firma InterSense,  
gefunden am 16.10.2006
- [WWW45] <http://www.vrdepot.com/vrteclg.htm>,  
Homepage der Firma Logitech,  
gefunden am 17.10.2006
- [WWW46] <http://www.ar-pda.de/>,  
Homepage zum Projekt „AR-PDA“,  
gefunden am 04.07.2007

- 
- [WWW47] [http://www.cs.nps.navy.mil/people/faculty/capps/4473/projects/fiambolis/vrd/vrd\\_full.html](http://www.cs.nps.navy.mil/people/faculty/capps/4473/projects/fiambolis/vrd/vrd_full.html)  
Homepage zum VRD Projekt der US-Navy  
gefunden am 08.09.2007
- [WWW48] <http://www.vioso.com/>  
Homepage der Firma Vioso,  
gefunden am 11.09.2007
- [WWW49] [http://www.inition.com/inition/product.php?URL\\_=product\\_hmd\\_fakespace\\_boom3&SubCatID\\_=34](http://www.inition.com/inition/product.php?URL_=product_hmd_fakespace_boom3&SubCatID_=34)  
Homepage der Firma INITION,  
gefunden am 06.09.2008
- [WWW50] <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Auge.png>  
Schematische Darstellung des Auges,  
gefunden am 20.09.2008
- [WWW51] <http://www.vioso.com/>  
Schematische Darstellung des Ohrs,  
gefunden am 20.09.2008

## Anhang A

Basierend auf der Beschreibung der Konfigurationsvorschrift aus Kapitel 6.7.2 wird im Folgenden der Fragenkatalog und dessen Aufbau erklärt. Der Katalog wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit für Konfiguration von AR Systemen entwickelt. Mit Hilfe des Fragenkataloges soll der Anwender durch die Konfiguration geführt werden und nicht nur stur bestimmte Komponenten auswählen, sondern gleichzeitig die Problematik, die sich für die nachfolgenden Fragen ergibt, erkennen.

Der Katalog besteht aus 23 Fragen. Diese sind aus den bereits genannten AR-Systemkomponenten sowie den Einflussfaktoren auf AR-Systeme im PEP erstellt worden (siehe Kap. 3.3 und 5.4).

Jede Fragekarte ist in die 4 Felder eingeteilt

1. Die Wichtung drückt die Priorität der einzelnen Fragestellungen für den Anwender aus,
2. Mit der Frage im Feld „Komponenten und Faktoren“ soll eine Hilfestellung gegeben werden, um die Auswahl zu vereinfachen
3. Die Auswahl stellt die jeweiligen Möglichkeiten dar, zwischen denen sich der System-Ersteller entscheiden muss. Diese Auswahloptionen müssen zu Beginn dem aktuellen Stand der Technik angepasst werden
4. Die Wechselwirkungen ergeben sich aus den Auswahloptionen und hier im Besonderen aus deren technischen Eigenschaften beziehungsweise Anforderungen an den PEP

Die Anwendung des Fragenkatalogs wird an einem konkreten Beispiel in Kapitel 7.2.3 beschrieben.

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Einsatzort/Umgebung/Objekt <b>Frage:</b> Welche Umgebungsbedingungen sind zu berücksichtigen?
<b>Auswahl:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Laborbedingungen</li> <li>- Werkstattumgebung</li> <li>- Außeneinsatz</li> </ul>	<b>Wechselwirkung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Systeme eignen sie sich unterschiedlich für einen bestimmten Einsatzort (Portabilität, Störeinflüsse, Industrietauglichkeit, usw.)</li> <li>- Der Einsatzort, die Umgebungsbedingungen und das zu trackende Objekt stellen direkt Anforderungen an die verwendete Hard- und Software und diese müssen bei der weiteren Auswahl von Komponenten berücksichtigt werden</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Bilderfassung <b>Frage:</b> Welche Qualität soll die Darstellung haben?
<b>Auswahl:</b> - niedrig (>1 Megapixel) - mittel (1 Megapixel) - hoch (<2 Megapixel)	<b>Wechselwirkung:</b> - Je nach gewünschter Bildqualität ergeben sich weitere Systemanforderungen an die Leistung und Ausstattung des Szenengenerators, das Anzeigesystem und die Kamera. Alle 3 Komponenten müssen die Auflösung und die dabei anfallenden Datenmengen verarbeiten können.

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Positionserfassung <b>Frage:</b> Wie sollen die Objekte erfasst werden?
<b>Auswahl:</b> - mechanisch - inertial - magnetisch - akustisch - optisch - elektromagnetisch - Hybrid	<b>Wechselwirkung:</b> - in Abhängigkeit von der Aufgabe und dem Einsatzort, Umwelt und Objekt ist ein bestimmtes Trackingverfahren/ bzw. System zu wählen. Mögliche Parameter für eine Auswahl sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Genauigkeit</li> <li>○ Reichweite</li> <li>○ Freiheitsgrad</li> <li>○ Preis</li> <li>○ usw.</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Szenengenerator <b>Frage:</b> Wie viele Anwender sollen gleichzeitig mit dem System arbeiten können?
<b>Auswahl:</b> - Einzelanwender - zwei (Support/ Anwender) - drei und mehr	<b>Wechselwirkung:</b> - die zu wählende Software muss die jeweiligen Funktionen für Mehrbenutzeranwendungen zur Verfügung stellen - die Auswahl stellt Anforderungen bei der Festlegung der Hardwarekomponenten <ul style="list-style-type: none"> <li>○ des Tracking,</li> <li>○ der Anzeige,</li> <li>○ der Bilderfassung,</li> <li>○ der Interaktionsgeräte,</li> <li>○ die Investitionskosten und</li> <li>○ des Szenengenerators selbst</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Interaktion <b>Frage:</b> Wie soll interagiert werden?
<b>Auswahl:</b> - Gar nicht - Standardgeräte - Intuitiv ohne Hilfsmittel - intuitiv mit Hilfsmittel	<b>Wechselwirkung:</b> - die zu wählende Software muss die jeweilig gewünschte Funktion zur Verfügung stellen - das Interaktionsgerät muss für den Einsatzort und die Aufgabe geeignet sein (Bewegungsfreiheit, Freiheitsgrade, Kalibrierung)

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Datenbank <b>Frage:</b> Wo werden die Daten für die AR-Anwendung vorgehalten?
<b>Auswahl:</b> - Festplatte - Datenbanksystem - Online (permanente Aktualisierung aus anderen Systemen, wie zum Beispiel Messdaten) - Laufzeitdaten (zur Laufzeit vom Anwender selbst generierte Daten im AR-System)	<b>Wechselwirkung:</b> - Je nach Auswahl ist eine Betreuung und ein Support für das jeweilige System erforderlich um dessen Betrieb zu garantieren - für eine Systemintegration müssen die Randbedingungen und die Schnittstellen zu den bereits bestehenden Systemen und Prozessen berücksichtigt werden - die zu wählende Software muss die benötigten Funktionen und Schnittstellen zur Verfügung stellen

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Anzeige <b>Frage:</b> Wie soll die Darstellung erfolgen?
<b>Auswahl:</b> - mobiles Display - HMD (OST) - HMD (VST) - feste Anzeige - Projektion	<b>Wechselwirkung:</b> - die Auswahl stellt Anforderungen an die Komponenten: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Szenengenerator,</li> <li>○ Trackingsystem,</li> <li>○ Bilderfassung,</li> <li>○ Software und</li> <li>○ Investitionskosten</li> </ul> in der Art und Weise, dass sie zu dem verwendeten Anzeigesystem und untereinander kompatibel sind.

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Mitarbeiter <b>Frage:</b> Für welchen Anwenderkreis ist das System?
<b>Auswahl:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- allgemeiner Anwender ohne besondere Fachkenntnisse</li> <li>- Fachpersonal Aufgabe (spezielle Kenntnisse bezogen auf die Aufgabe)</li> <li>- Fachpersonal AR (spezielle Kenntnisse bezogen auf die AR-Technik)</li> </ul>	<b>Wechselwirkung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- je nach Anwenderkreis ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Hardware und deren Konfiguration,</li> <li>- an die Software und deren Funktionsumfang und Bedienung sowie an die Art und Weise der Informationsdarstellung</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> bestehende Prozesse und Betriebsfaktoren <b>Frage:</b> An welcher Stelle soll das System zum Einsatz kommen und welcher Stellenwert ist dafür vorgesehen?
<b>Auswahl:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Forschung und Entwicklung</li> <li>- Produktiv Umgebung</li> <li>- Kritische Systemumgebung</li> <li>- Entertainment</li> </ul>	<b>Wechselwirkung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Je nach Einsatz ist die Konfiguration bzw. Auslegung des Gesamtsystems hinsichtlich der Schwerpunkte:           <ul style="list-style-type: none"> <li>o Systemstabilität,</li> <li>o Erweiterbarkeit,</li> <li>o Bedienbarkeit,</li> </ul>           zu optimieren.         </li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Datenformate <b>Frage:</b> Über welche Schnittstellen sollen die Systeme Daten austauschen?
<b>Auswahl:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelldaten</li> <li>- Metadaten</li> <li>- Onlinedaten</li> <li>- Echtzeitdaten</li> </ul>	<b>Wechselwirkung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- die AR-Software muss die jeweiligen Funktionen für das Datenhandling zur Verfügung stellen und gegebenenfalls auch Online-Schnittstellen für die externen Systeme bieten, die die passenden Daten liefern</li> <li>- je nach Komplexität und Menge der Daten ist eine Unterstützung von automatischen Prozessabläufen erforderlich oder zu berücksichtigen</li> </ul>



<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Softwaresysteme <b>Frage:</b> Was sind die notwendigen Funktionen und wie soll die Darstellung aussehen?
<b>Auswahl:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anwenderanzahl</li> <li>- Tracking</li> <li>- Interaktionsmetaphern</li> <li>- Informationsdarstellung (Status-, Bewegungs-, Positions-, Interaktions- und Geometrieinformationen)</li> </ul>	<b>Wechselwirkung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die gewählte Software gibt für nachfolgende Konfigurationsschritte Vorgaben bezüglich der Kompatibilität. Wechselwirkungen bestehen zu den:             <ul style="list-style-type: none"> <li>o Anzeigesystemen,</li> <li>o Trackingsystemen,</li> <li>o Interaktionsgeräten,</li> <li>o Szenengeneratoren und</li> <li>o Investitionskosten.</li> </ul> </li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Aufgaben und Ergebnisanalyse <b>Frage:</b> Wie soll das Ergebnis des AR-Einsatzes dokumentiert werden?
<b>Auswahl:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bilder</li> <li>- Video</li> <li>- Geometriedaten</li> <li>- Metadaten</li> <li>- Datenanalyse</li> </ul>	<b>Wechselwirkung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- die jeweilig benötigten Funktionen müssen von der Software bereitgestellt werden</li> <li>- gegebenenfalls eine Schnittstelle zur Datenbank um die Daten Projektbezogen zu archivieren</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Logistik und Arbeitsprozesse <b>Frage:</b> Woher kommen die darzustellenden Informationen?
<b>Auswahl:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Datenbank</li> <li>- Messdaten</li> <li>- Anwenderdaten (zur Laufzeit generiert)</li> </ul>	<b>Wechselwirkung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- die AR-Software muss die jeweiligen Schnittstellen anbieten</li> <li>- die Datenbank muss den Datenaustausch ermöglichen</li> <li>- die anderen Prozessteilnehmer (Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Qualitätssicherung, und weitere) müssen ihre Daten in die Datenbank einstellen</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Qualifikation <b>Frage:</b> Ist für die Bedienung spezifisches Fachwissen erforderlich?
<b>Auswahl:</b> - ja - nein - weiß nicht	<b>Wechselwirkung:</b> - je nach Vorgabe, ist Fachpersonal für den Betrieb erforderlich - gegebenenfalls entstehen besondere Anforderungen an die Ergonomie der Programmoberfläche und die Interaktion - ebenso kann eine Störanfälligkeit oder der Entwicklungsstand eines AR-Systems den Einsatz von Fachpersonal erfordern oder einen Mehraufwand bei Konfiguration des Systems bedeuten

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Schulung <b>Frage:</b> Wie sollen die Anwendungen entstehen und sind Schulungen erforderlich?
<b>Auswahl:</b> - feste Anwendung (Aufgabe) mit festem Funktionsumfang - wechselnder Umfang der Funktionen und der Aufgaben - Anwendung im Bereich Entwicklung und Forschung	<b>Wechselwirkung:</b> - je nach Auswahl bestehen Wechselwirkungen zu den Punkten <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Personalkosten</li> <li>○ Support und Wartung</li> <li>○ Softwareauswahl</li> <li>○ Hardwareauswahl</li> <li>○ Investitionskosten</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Motivation/Akzeptanz <b>Frage:</b> In welchem Verhältnis stehen die Mitarbeiter zur AR-Technik/AR-Anwendung?
<b>Auswahl:</b> - interessiert - ablehnend - weiß nicht	<b>Wechselwirkung:</b> - die Auswahl in diesem Punkt bedingt im wesentlichen die Qualität und den Erfolg mit dem die AR-Anwendung eingesetzt werden kann - Punkte die die Akzeptanz und damit die Motivation fördern sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ die Bedienung der Software</li> <li>○ die Störanfälligkeit des Gesamtsystems</li> <li>○ die Qualität der AR-Darstellung hinsichtlich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Personalkosten <b>Frage:</b> Ist für den Betrieb weiteres Personal/Fachpersonal erforderlich?
<b>Auswahl:</b> - ja - nein - weiß nicht	<b>Wechselwirkung:</b> - dieser Punkt erzeugt Wechselwirkungen mit den Punkten: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Schulung auf das System</li> <li>○ den anfallenden Betriebskosten für Wartung und Support</li> <li>○ den Investitionskosten</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Betriebskosten <b>Frage:</b> Was darf das System im Betrieb kosten?
<b>Auswahl:</b> - wenig - mittel - kein Entscheidungskriterium	<b>Wechselwirkung:</b> - Je nach Budget ist zu berücksichtigen was die jeweilige Systemkonfiguration im Betrieb für Kosten verursacht. Die Gesamtkosten setzen sich zusammen aus den Einzelkosten für: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Hard-/ Softwareauswahl</li> <li>○ Mitarbeiter (Fachpersonal)</li> <li>○ Investitionskosten</li> <li>○ Support &amp; Wartung</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Support/Wartung <b>Frage:</b> Wie oder wer wartet das System?
<b>Auswahl:</b> - Fremdfirma - lokaler Administrator - der jeweilige Mitarbeiter	<b>Wechselwirkung:</b> - In Anhängigkeit der Auswahl entstehen Wechselwirkungen zu den Punkten: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Betriebskosten</li> <li>○ Anschaffungskosten</li> <li>○ Systemstabilität</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Kompatibilität <b>Frage:</b> Soll das System erweiterbar sein?
<b>Auswahl:</b> - ja - nein - weiß nicht	<b>Wechselwirkung:</b> - Mit dieser Frage wird eine Erweiterbarkeit des Systems berücksichtigt. Diese schließt je nach Erweiterungswunsch mehr oder weniger alle Punkte der Systemkonfiguration ein. - Hauptsächlich sind jedoch bei der Auswahl der Hard-/ Softwarekomponenten auf eine eventuelle Erweiterbarkeit zu achten.

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Anschaffungspreis/ Investitionskosten <b>Frage:</b> Was darf die Anschaffung kosten?
<b>Auswahl:</b> - wenig - mittel - kein Entscheidungskriterium	<b>Wechselwirkung:</b> - Je nach vorhandenem Budget kann eine für die Gesamtqualität der AR-Anwendung vorteilhafte Auswahl der Hard-/ Softwarekomponenten vorgenommen werden

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Stabilität <b>Frage:</b> Welche Ausfallsicherheit muss das System gewährleisten?
<b>Auswahl:</b> - irrelevant - unkritisch - kritisch	<b>Wechselwirkung:</b> - Durch den Prozess und dessen Randbedingungen in dem das System eingesetzt werden soll, wird bestimmt welche Ausfallsicherheit das System gewährleisten muss. Je nach verlangter Sicherheit, ist dies bei den folgenden Komponenten und Faktoren zu berücksichtigen: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Support</li> <li>○ Mitarbeiter</li> <li>○ Hardware</li> <li>○ Software</li> </ul>

<b>Wichtung:</b> ...	<b>Komponenten und Faktoren:</b> Weiterentwicklung <b>Frage:</b> Ist eine Weiterentwicklung des Gesamtsystems angestrebt?
<b>Auswahl:</b> - ja - nein - weiß nicht	<b>Wechselwirkung:</b> - In Abhängigkeit der Auswahl ist zu beachten, dass die gewählten Hard-/ Softwarekomponenten sowie deren Kompatibilität und Erweiterbarkeit zu der angestrebten Strategie der Weiterentwicklung passen.

## Anhang B

### Fragebogen: Augmented Reality im „Werkzeug und Formenbau“

**Autor:** Thomas Schilling/ Tel: 03632-522752/ 3D-Schilling GmbH

**Anleitung:** Dieser Fragebogen soll die Frage klären:

#### **Welche Anforderungen und Wünsche bestehen bezüglich Einsatz und Anwendung von Augmented Reality (AR)?**

Er ist Bestandteil meiner Dissertation und soll die Anforderungen an die neue Visualisierungstechnik „Augmented Reality“ klären. Ferner soll geklärt werden, wo und wie diese Technologie am effektivsten im „Werkzeug und Formenbau“ genutzt werden kann.

*Bitte lesen Sie sich die Fragen/Feststellungen gründlich durch. Bei manchen Fragen/Feststellungen genügt ein Kreuz, manchmal ist ein wenig Text notwendig, Stichpunkte genügen. Dieser Fragebogen ist anonym und wird nach Abschluss der Arbeit vernichtet.*

**Zeit zum Ausfüllen: ca. 5 min**

---

1. Frage: Würden Sie sagen, das durch den Einsatz dieser Technik die Bearbeitung der vorliegenden Aufgabe vereinfacht wurde?

Ja

Nein

Weiß nicht

---

2. Frage: Haben Sie Verbesserungsvorschläge für die Darstellung der CAD-Information?

Ja

welche? .....

Nein

Weiß nicht

3. Frage: Haben Sie Verbesserungsvorschläge für die Bedienung der AR-Anwendung?

Ja

welche? .....

Nein

Weiß nicht

---

4. Frage: Sehen Sie für ihr Arbeitsgebiet weitere Einsatzmöglichkeiten für diese Art der Informationsdarstellung?

Ja

welche? .....

Nein

Weiß nicht

---

5. Frage: Können Sie sich vorstellen ein solches System bei ihrer täglich Arbeit zu verwenden?

Ja

Nein

Weiß nicht

---

6. Frage: Wie schätzen Sie selbst ihre Häufigkeit im Umgang mit einem Computer ein?

Sehr hoch			Sehr gering
1	2	3	4
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

---

7. Frage: Wünschen Sie sich weitere Funktionen neben den Vorgestellten für diese Anwendung?

Ja

welche? .....

Nein

Weiß nicht

*Ein großer Vorteil der AR-Technik besteht darin, digitale Information für den Betrachter darzustellen.*

8. Frage: Für welchen Typ von digitalen Informationen halten Sie die AR- Darstellung am besten geeignet?

<b>Informationstyp</b>	Ja	Nein	Weiß nicht	Platzierung
Status/ Zustandsinformation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
Bewegungspfad/ Routing Information	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
absolute Positionsinformationen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
Interaktionsinformationen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
Geometrieinformationen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz

9. AR ist eine neue Form der Darstellung von Computerinformationen.

Frage: Sehen Sie in bestimmten Arbeitsgebieten des „Werkzeug- und Formenbaus“ Einsatzmöglichkeiten für AR? Wenn ja, bewerten Sie diese auf einer Skala von 1 bis 4 nach ihrem Nutzen für den einzelnen Bereich!

(1 – sehr hoch, 2 – hoch, 3 – gering, 4 – sehr gering)

	Nein	Ja	Sehr hoch 1	2	3	Sehr gering 4
Konstruktion:	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Montage:	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fertigung:						
Fräsen	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erodieren	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Drahten	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qualitätssicherung:	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sonstige: .....	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

10. Frage: Welche Probleme bei der Fertigung von Werkzeugen tauchen in Ihrem Tätigkeitsfeld auf und geben Sie den Problemen eine Rangfolge, angefangen mit dem schwerwiegendsten Problem! (von 1-7)

Probleme bei der Entwicklung	Ja	Nein	Weiß nicht	Platzierung
Konstruktion:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
Montage:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
Fertigung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
Fräsen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
Erodieren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
Drahten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
Qualitätssicherung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz
Kommunikation der Mitarbeiter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	... Platz



---

11. Frage: Wie hoch schätzen Sie persönlich den Zeitgewinn durch den Einsatz der vorgestellten AR-Anwendung ein?

Sehr hoch			Sehr gering
1	2	3	4
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
75-100%	50-75%	25-50%	0-25%

---

12. Allgemeine abteilungs- und tätigkeitsbezogene Daten:

Tätigkeitsbereich:

CAD

AV

WZM

Fräser

Erodierer

Spritzguss

Sonstige \_\_\_\_\_

---

**Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!**



## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise entgeltlich/unentgeltlich<sup>1)</sup> geholfen:

1. ....
2. ....
3. ....

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch angesehen wird und den erfolglosen Abbruch des Promotionsverfahrens zu Folge hat.

Erfurt, den 10.09.2007                      .....

*(Ort, Datum)*                                *(Unterschrift)*

<sup>1</sup> Unzutreffendes bitte streichen.