





# **TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN**

Lehrstuhl für  
Montagetechnik und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

## **Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern**

**Wolfgang Vogl**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl, Universität Stuttgart

Die Dissertation wurde am 11.09.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 12.12.2008 angenommen.





Wolfgang Vogl

**Eine interaktive räumliche  
Benutzerschnittstelle für die Programmierung  
von Industrierobotern**



Herbert Utz Verlag · München

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2008

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2009

ISBN 978-3-8316-0869-0

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.



# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Eine vertrauensvolle und konstruktive Zusammenarbeit, engagierte Kolleginnen und Kollegen sowie hervorragende Rahmenbedingungen haben die Zeit am *iwb* für mich in höchstem Maße wertvoll und lehrreich gemacht.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl, dem Leiter des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) an der Universität Stuttgart und Leitungsmitglied des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Herrn Dr.-Ing. Michael Spitzweg, Herrn Dr.-Ing. Ulrich Munzert und Herrn Dr.-Ing. Christian Patron möchte ich für viele konstruktiv-kritische Beiträge und Anregungen zu dieser Arbeit danken. Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Studenten, die mich bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt haben.

Meiner Frau Karin danke ich für ihre Geduld und ihre immerwährende Unterstützung. Sie hat damit maßgeblich zur Entstehung und zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen.

Zuletzt möchte ich meinen Eltern, die mir diese Ausbildung ermöglicht und mich immer motiviert haben, in besonderer Weise danken. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

München im Juli 2009

*Wolfgang Vogl*



# **Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XII</b>
<b>Notation und physikalische Größen .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	3
<b>2 Robotereinsatz und -programmierung.....</b>	<b>7</b>
2.1 Robotertypen.....	7
2.1.1 Klassifizierung von Robotern .....	7
2.1.2 Einteilung von Industrierobotern .....	8
2.2 Applikationen und Randbedingungen .....	9
2.2.1 Roboteranwendungen.....	9
2.2.2 Einsatzumfeld.....	10
2.3 Programmierung von Industrierobotern.....	12
2.3.1 Online-Programmierung .....	14
2.3.1.1 Teach-In-Programmierung .....	15
2.3.1.2 Playback-Programmierung .....	16
2.3.1.3 Sensorunterstützte Programmierung .....	17
2.3.2 Offline-Programmierung.....	18

2.3.2.1	Simulationsgestützte Programmierung.....	18
2.3.2.2	Textuelle Programmierung.....	21
2.3.2.3	Grafische Programmierung .....	22
2.3.3	Verfahren mit künstlicher Intelligenz .....	23
2.3.3.1	Programmierung durch Vormachen (PbD) .....	23
2.3.3.2	Implizite, aufgabenorientierte Programmierung .....	24
2.3.3.3	Instruktiv-dialogorientierte Programmierung.....	25
2.4	Situationsanalyse und Fazit.....	26
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Technik .....</b>	<b>29</b>
3.1	Augmented Reality .....	29
3.1.1	Begriffsklärung .....	29
3.1.2	Funktionsprinzip von AR-Systemen.....	30
3.2	Visualisierungsverfahren .....	32
3.2.1	Monitorbasierte Systeme (MAR).....	35
3.2.2	Head-Mounted Displays (HMD) .....	36
3.2.3	Räumlich erweiterte Realität (Spatial AR) .....	37
3.2.3.1	Projektion auf beliebige Umgebungsoberflächen .....	38
3.2.3.2	Projektionsgeräte .....	40
3.2.3.3	Anwendungen von Projektions-AR.....	41
3.3	Positionserfassung.....	43
3.3.1	Definition .....	43
3.3.2	Einteilung und Charakterisierung .....	43
3.4	Interaktionstechniken.....	45



3.4.1	Definition .....	45
3.4.2	Interaktion in räumlichen Benutzerschnittstellen .....	45
3.5	AR-Anwendungen in der Mensch-Roboter-Interaktion .....	47
3.5.1	Grundprinzip und Überblick .....	47
3.5.2	Telepräsenz und Telemanipulation .....	48
3.5.3	Servicerobotik .....	50
3.5.4	Industrierobotik .....	51
3.5.4.1	Montage- und Anlagenplanung .....	52
3.5.4.2	Bedienung und Schulung.....	53
3.5.4.3	Zusammenarbeit von Werkern und Robotern .....	53
3.5.4.4	Programmierung und Inbetriebnahme .....	54
3.5.5	Übersicht und Bewertung bestehender Ansätze .....	56
3.6	Fazit und Handlungsbedarf.....	59
<b>4</b>	<b>Anforderungsanalyse .....</b>	<b>61</b>
4.1	Zieldimensionen.....	61
4.2	Anforderungsstruktur .....	61
4.3	Konzeptionelle Anforderungen.....	63
4.4	Technische Anforderungen.....	64
4.4.1	Leistungsmerkmale .....	64
4.4.2	Konfigurierbarkeit und Flexibilität .....	65
4.4.3	Integration mit Robotersteuerung und Simulation.....	66
4.4.4	Sicherheit .....	67
4.5	Benutzerorientierte Anforderungen .....	68

<b>5</b>	<b>Konzeption und Systementwurf.....</b>	<b>71</b>
5.1	Überblick.....	71
5.2	AR-basierte Roboterprogrammierung und Simulation.....	71
5.2.1	Funktionsprinzip .....	71
5.2.2	Einsatzvorgehen .....	74
5.2.2.1	Konfiguration des AR-Systems.....	75
5.2.2.2	Modellierung .....	75
5.2.2.3	Programmbearbeitung .....	77
5.2.2.4	Simulation und Test.....	80
5.2.2.5	Zusammenfassung des Vorgehens .....	80
5.2.3	Anforderungen an ein Systemkonzept .....	81
5.3	Konzeption der Visualisierung .....	82
5.4	Projektionsgestützte AR-Visualisierung.....	85
5.4.1	Videoprojektoren .....	85
5.4.1.1	Grundlegende Eigenschaften.....	85
5.4.1.2	Mathematisches Modell .....	87
5.4.1.3	Kalibrierung.....	88
5.4.1.4	Bewertung der Anzeigeeigenschaften .....	91
5.4.2	Laserprojektoren .....	91
5.4.2.1	Funktionsweise .....	91
5.4.2.2	Kalibrierung.....	93
5.4.2.3	Bewertung der Anzeigeeigenschaften .....	93
5.4.3	Erweiterung des Arbeitsraumes .....	94

5.4.3.1	Mehrprojektorensystem.....	95
5.4.3.2	Ortsveränderliche Anbringung der Projektoren .....	97
5.5	Automatisierte Geometrierfassung.....	98
5.5.1	Funktionsprinzip und Verfahren .....	98
5.5.2	Nutzungsszenarien der automatisierten Vermessung .....	100
5.6	Räumliche Eingabe und Interaktion .....	101
5.6.1	Eingabeprinzip .....	101
5.6.2	Manipulation von Trajektorien .....	105
5.6.3	Interaktive Modellierung.....	108
5.6.4	Weitere Interaktionsformen .....	110
5.6.4.1	Anwendungssteuerung und sonstige Eingaben .....	110
5.6.4.2	Umgebungsmodellierung und Kinematiksimulation .....	111
5.7	Zusammenfassung des Konzepts und der Teilverfahren .....	113
<b>6</b>	<b>Umsetzung und Erprobung .....</b>	<b>117</b>
6.1	Übersicht .....	117
6.2	Systemgestaltung und Implementierung.....	117
6.2.1	Systemaufbau .....	117
6.2.2	Basissystem und graphische Benutzerschnittstelle.....	120
6.2.3	Projektionsanzeige .....	122
6.2.4	Positionserfassung und 3D-Eingabe .....	123
6.2.5	Bildverarbeitung.....	125
6.2.5.1	Bildaufnahme und Kamerakalibrierung .....	125
6.2.5.2	Vorgehen zur Erkennung von Laserpunkten.....	126

6.2.5.3	Charakterisierung der Messgenauigkeit .....	126
6.2.6	Interaktionssteuerung .....	127
6.2.7	Datenmodell und Simulation .....	128
6.2.7.1	Roboterschnittstelle .....	128
6.2.7.2	Programm- und Aufgabenmodell .....	129
6.2.7.3	Zellenmodell .....	131
6.2.7.4	Berechnung und Simulation .....	132
6.2.8	Kalibrierung und Referenzierung des Gesamtsystems .....	133
6.2.8.1	Interne Kalibrierung der Einzelgeräte .....	133
6.2.8.2	Lokalisierung und Referenzierung der Geräte .....	134
6.3	Systemkonfigurationen und realisierter Aufbau .....	137
6.4	Erprobung und Anwendung des Systems .....	139
6.4.1	Grundlegende Erprobung im Labor .....	139
6.4.2	Programmierung einer robotergestützten Laserhärteanlage ....	141
6.4.3	Programmierung einer Remote-Laserstrahlschweißanlage ....	144
<b>7</b>	<b>Technische und wirtschaftliche Bewertung .....</b>	<b>147</b>
7.1	Technische Bewertung .....	147
7.2	Wirtschaftliche Bewertung .....	149
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>153</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>157</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>197</b>
10.1	Entwicklung der AR-Forschung .....	197
10.2	Head-Mounted Displays (HMD) .....	198

10.2.1 Grundlagen und Bauarten .....	198
10.2.2 Bewertung HMD-basierter AR-Ansätze .....	200
10.3 Verfahren der Positionserfassung .....	204

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Wirtschaftlichkeit des Robotereinsatzes nach WTEC (2006).....	1
Abbildung 2 Aufbau der Arbeit.....	5
Abbildung 3 Einteilung von Industrierobotern .....	8
Abbildung 4 Verteilung auf Anwendungsklassen (IFR 2007, S. 41).....	10
Abbildung 5 Robotereinsatz nach Losgröße (ARMBRUSTER et al. 2006a) .....	11
Abbildung 6 Grundprinzip der Roboterprogrammierung .....	12
Abbildung 7 Übersicht der Programmierverfahren für Industrieroboter .....	14
Abbildung 8 Lernprogrammierverfahren .....	15
Abbildung 9 Vorgehen bei der simulationsgestützten Programmierung .....	20
Abbildung 10 Ansatzpunkte zur Unterstützung der Roboterprogrammierung ....	28
Abbildung 11 Funktionsprinzip von Augmented-Reality-Systemen .....	30
Abbildung 12 Anzeigeverfahren für Augmented Reality .....	34
Abbildung 13 Stereoskopisches HMD (Video See-Through).....	37
Abbildung 14 Displayanbringung nach BIMBER & RASKAR (2006, S. 72).....	38
Abbildung 15 PAR in architektonischen Anwendungen (BIMBER et al. 2005b).....	41
Abbildung 16 Funktionsprinzipien der Positionserfassung.....	44
Abbildung 17 Grundprinzip der AR-gestützten Mensch-Roboter-Interaktion ....	48
Abbildung 18 AR-System für die Montageplanung (PATRON 2005) .....	52
Abbildung 19 Zieldimensionen, Systemstruktur und Anforderungen .....	62
Abbildung 20 Übersicht der Anforderungen an die Benutzerschnittstelle .....	69
Abbildung 21 Prinzip der AR-gestützten Programmierung und Simulation .....	72
Abbildung 22 Überblick der mit AR visualisierbaren Informationen.....	74
Abbildung 23 Visualisierung des Umgebungsmodells und Vermessung .....	77

Abbildung 24 Visualisierung und Bearbeitung von Trajektorien .....	78
Abbildung 25 AR-gestützte Kinematikvisualisierung .....	80
Abbildung 26 Vorgehen für die AR-basierte Programmierung und Simulation ..	81
Abbildung 27 Arbeitsraumgeometrie eines Videoprojektors.....	86
Abbildung 28 Überlegung zur Schärfentiefe.....	87
Abbildung 29 Abbildungsverhalten eines Videoprojektors .....	88
Abbildung 30 Kalibrierfehler nach HARTLEY & ZISSERMAN (2004, S. 183).....	90
Abbildung 31 Funktionsprinzip eines scannenden Laserprojektors.....	92
Abbildung 32 Vergleich von Video- und Laserprojektion.....	94
Abbildung 33 Projektion einer Bahnkurve durch zwei Anzeigergeräte .....	95
Abbildung 34 Wirkung der Heuristik für ein System mit drei Projektoren.....	96
Abbildung 35 Transformationen bei Anbringung des Projektors am Roboter ....	97
Abbildung 36 Epipolargeometrie eines Kamera-Projektor-Paares .....	99
Abbildung 37 Geometrieerfassung mit einem Kamera-Projektor-Paar .....	100
Abbildung 38 Konzept für die direkte Interaktion mit projizierten Inhalten ....	104
Abbildung 39 Manipulation von Trajektorien mittels interaktiver Projektion ..	105
Abbildung 40 Drag-and-Drop-Metapher.....	106
Abbildung 41 Manuelle Erstellung von Konturmodellen .....	108
Abbildung 42 Interaktion mit den Scannerfunktionalitäten.....	109
Abbildung 43 Metaphern für die interaktive Geometrievermessung.....	110
Abbildung 44 Projizierte Menüs .....	111
Abbildung 45 Aufteilung der Benutzerinteraktion.....	111
Abbildung 46 Interaktionsformen zur Positionierung virtueller Objekte .....	113
Abbildung 47 Übersicht des gesamten Systemkonzeptes .....	115

Abbildung 48 Übersicht des Systemaufbaus.....	119
Abbildung 49 Graphische Bedienoberfläche und MAR-Ansicht.....	121
Abbildung 50 Anbindung der Geräte an das Basissystem .....	121
Abbildung 51 Eingesetzte Projektionsgeräte und deren Leistungsmerkmale.....	123
Abbildung 52 Komponenten des verwendeten Positionserfassungssystems .....	124
Abbildung 53 Modellierung des Programms und der Aufgabe .....	131
Abbildung 54 Übersicht der verwendeten Messreferenzen .....	135
Abbildung 55 Bestimmung der Relativtransformation zwischen Geräten.....	136
Abbildung 56 Dialog für die Kalibrierung.....	136
Abbildung 57 Übersicht des Versuchssystems und seiner Konfigurationen .....	138
Abbildung 58 Einsatz des mobilen Programmiersystems.....	139
Abbildung 59 Versuchsaufgabe (links) und VST-Visualisierung (rechts) .....	140
Abbildung 60 Programmierzeiten der Versuchspersonen.....	140
Abbildung 61 Robotersystem für das Laserhärten von Umformwerkzeugen.....	141
Abbildung 62 Arbeitsplatz und zugehörige VST-Visualisierung .....	142
Abbildung 63 Zu programmierende exemplarische Härtespuren .....	142
Abbildung 64 Grundprinzip des RLS-Verfahrens.....	144
Abbildung 65 Wirtschaftlichkeitsgrenze bei der Nutzung des AR-Systems .....	150
Abbildung 66 Tiefenwahrnehmung in HMD (DRASIC & MILGRAM 1996).....	202
Abbildung 67 Zusammenhang von Trackingungenauigkeit und Registrierung	203



## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 Eigenschaften von AR-Anzeigeverfahren .....	35
Tabelle 2 Konfigurationsraum für PAR-Anzeigesysteme.....	39
Tabelle 3 Übersicht bestehender Ansätze zum Einsatz von AR in der Robotik ..	57
Tabelle 4 Gegenüberstellung monitorbasierter und projektionsbasierter AR .....	84
Tabelle 5 Nutzungsaspekte für die Anzeigeverfahren MAR und PAR.....	84
Tabelle 6 Bewertung von 3D-Eingabemöglichkeiten .....	102
Tabelle 7 Eingabemetaphern für die Bearbeitung von Bahnkurven .....	107
Tabelle 8 Übersicht der Teilverfahren und ihrer Einsatzbereiche.....	114
Tabelle 9 Eckdaten der durchgeführten Programmiersuche .....	145
Tabelle 10 Wirtschaftliche Bewertung der AR-gestützten Programmierung ....	150
Tabelle 11 Eigenschaften von Head-Mounted Displays .....	200

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
API	<b>A</b> pplication <b>P</b> rogramming <b>I</b> nterface
AR	<b>A</b> ugmented <b>R</b> eality
BRD	<b>B</b> undesrepublik <b>D</b> eutschland
CAD	<b>C</b> omputer <b>A</b> ided <b>D</b> esign
CAM	<b>C</b> omputer <b>A</b> ided <b>M</b> anufacturing
CRT	<b>C</b> athode <b>R</b> ay <b>T</b> ube
DLP	<b>D</b> igital <b>L</b> ight <b>P</b> rocessing
DOF	<b>D</b> egrees <b>o</b> f <b>F</b> reedom
FOV	<b>F</b> ield <b>o</b> f <b>V</b> iew
FTP	<b>F</b> ile <b>T</b> ransfer <b>P</b> rotocol
GUI	<b>G</b> raphical <b>U</b> ser <b>I</b> nterface
HMD	<b>H</b> ead- <b>M</b> ounted <b>D</b> isplay
IGES	<b>I</b> nternational <b>G</b> raphics <b>E</b> xchange <b>S</b> pecification
IR	<b>I</b> nfrarot
IRL	<b>I</b> ndustrial <b>R</b> obot <b>L</b> anguage
KI	<b>K</b> ünstliche <b>I</b> ntelligenz
LCD	<b>L</b> iquid <b>C</b> hrystal <b>D</b> isplay
LCOS	<b>L</b> iquid <b>C</b> rystal <b>o</b> n <b>S</b> ilicon
LED	<b>L</b> ight <b>E</b> mitting <b>D</b> iode
MAR	<b>M</b> onitor- <b>A</b> R
MVC	<b>M</b> odel <b>V</b> iew <b>C</b> ontroller

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
OST	<b>O</b> ptical <b>S</b> ee- <b>T</b> hrough
PAR	<b>P</b> rojektions- <b>A</b> R
PbD	<b>P</b> rogramming <b>b</b> y <b>D</b> emonstration
PHG	<b>P</b> rogrammier <b>h</b> and <b>g</b> erät
PTP	<b>P</b> oint- <b>T</b> o- <b>P</b> oint
RDP	<b>R</b> emote <b>D</b> esktop <b>P</b> rotocol
RLS	<b>R</b> emote- <b>L</b> aserstrahl- <b>S</b> chweißen
STEP	<b>S</b> tandard for the <b>e</b> xchange of <b>p</b> roduct model data
TCP	<b>T</b> ool <b>C</b> enter <b>P</b> oint
TCP/IP	<b>T</b> ransmission <b>C</b> ontrol <b>P</b> rotocol / <b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol
USB	<b>U</b> niversal <b>S</b> erial <b>B</b> us
VR	<b>V</b> irtual <b>R</b> eality
VRML	<b>V</b> irtual <b>R</b> eality <b>M</b> arkup <b>L</b> anguage
VST	<b>V</b> ideo <b>S</b> ee- <b>T</b> hrough
XML	<b>E</b> xtensible <b>M</b> arkup <b>L</b> anguage

## Notation und physikalische Größen

Zeichen	Bedeutung
$\alpha$	Auslenkungswinkel eines Drehspiegels in vertikaler Richtung
$\mathbf{a}_i^{KOSj}$	Zum Zweck der Kalibrierung gemessener i-ter Raumpunkt im Bezugskordinatensystem j
atan	Mathematischer Operator Arcus-Tangens
b	Basisabstand zweier optischer Systeme
$\beta$	Auslenkungswinkel eines Drehspiegels in horizontaler Richtung
C	Zentrum eines optischen Systems (Kamera oder Projektor)
h	Höhe
Hz	Hertz, abgeleitete SI-Einheit für die Frequenz
d	Distanz
$\Delta d_{\text{Gesamt}}$	Gesamtauflösung eines Messsystems
$\Delta d_{\text{Kamera}}$	Auflösung eines Messpunktes auf dem Kamerachip
$\Delta d_{\text{Laser}}$	Auflösung eines Laserpunktes in der Bildebene
$\Delta xy_{\text{Laser}}$	Auflösung eines Laserpunktes im Raum in der x-y-Ebene
$\Delta xy_{\text{Kamera}}$	Auflösung eines Messpunktes im Raum in der x-y-Ebene
$\Delta xy_{\text{Gesamt}}$	Auflösung eines Messsystems im Raum in der x-y-Ebene
$\Delta z_{\text{Kamera}}$	Auflösung eines Messpunktes im Raum in z-Richtung
$\Delta z_{\text{Gesamt}}$	Auflösung eines Messsystems im Raum in z-Richtung
D	Durchmesser
$\varepsilon$	Kantenlänge eines (quadratischen) Kamerapixels
$\mathbf{e}_i$	Residuum eines Projektionspunktes in der Bildebene

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
$E_i$	Residuum eines Projektionspunktes im Raum
$f$	Brennweite: Abstand der Bildebene vom optischen Zentrum C
$\mu\text{m}$	$10^{-6}$ m, auch: Mikrometer
$\mu\text{rad}$	$10^{-6}$ rad
<b>P</b>	Homogene Projektionsmatrix (3x4)
$p_i$	i-tes Element einer Projektionsmatrix (zeilenweise fortlaufend)
rad	Winkelgröße im Bogenmaß
w	Breite
$\mathbf{X}=(X,Y,Z,w)$	Homogener Raumpunkt (3D)
$\mathbf{X}_i$	i-tes Element eines Tupels von Raumpunkten
$\mathbf{x}=(x,y,w)$	Homogener Bildpunkt (2D)
$\mathbf{x}_i$	i-tes Element eines Tupels von Bildpunkten
Zoll	Angloamerikanische Maßeinheit („Inch“), entspricht 0,0254 m

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Im Jahr 2006 befanden sich weltweit rund eine Million Industrieroboter im Einsatz. Bis zum Ende des Jahrzehnts wird ein Anstieg auf 1,2 Millionen Stück erwartet (IFR 2007, S. 334). Die Motivationen für den Einsatz von Robotersystemen in der Produktion werden auch in den kommenden Jahren darin liegen, Kosten zu sparen, die Produktivität zu steigern und die Qualität zu verbessern, um im globalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben (UNECE/IFR 2005, S. 2).

Während die Anschaffungspreise von Industrierobotern in der Zeit von 1990 bis 2005 unter Berücksichtigung des Leistungszuwachses um nahezu 80 % gefallen sind (IFR 2006, S. XII), sind die Lohnkosten in Deutschland im selben Zeitraum um mehr als 40 % angestiegen (DESTATIS 2006). Dennoch ist eine umfassende Substitution manueller Arbeit durch Roboteranlagen bisher nur für die Massenproduktion erfolgt, in der heute eine Sättigung an Robotersystemen zu beobachten ist (WECK & BRECHER 2006, S. 418). Die Abbildung 1 stellt qualitativ die Stückkosten als Funktion der jährlichen Ausbringung für automatisierte und manuelle Fertigungssysteme gegenüber. Dabei wird ersichtlich, dass Industrieroboter mit sinkender Seriengröße wirtschaftliche Vorteile gegenüber starr automatisierten Anlagen aufweisen, jedoch für Kleinserien noch nicht konkurrenzfähig zu manueller Arbeit sind (WTEC 2006, S. 182).

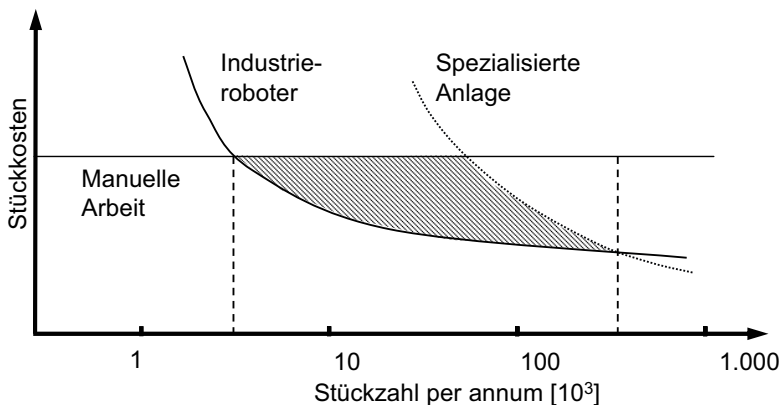


Abbildung 1 Wirtschaftlichkeit des Robotereinsatzes nach WTEC (2006)

Gerade in Hochlohnländern wie Deutschland – die BRD wies im Jahr 2005 die weltweit dritthöchsten Arbeitskosten auf (SCHRÖDER 2005) – konnten die Lohnstückkosten in den vergangenen Jahren nur durch permanente Prozessinnovationen begrenzt, zuletzt sogar gesenkt werden (BERGER 2006). Eine Ausweitung der Automatisierung auf die Fertigung kleiner Losgrößen kann vor diesem Hintergrund einen weiteren Beitrag zur Rationalisierung und damit zu einer Steigerung der Produktivität leisten (WECK & BRECHER 2006, S. 418).

Die Entwicklungen der Robotertechnik begünstigen die Erschließung derartiger Einsatzbereiche. So ist eine stetige Verbesserung der Manipulationsfähigkeiten, ein zunehmender Einsatz von Sensorik und ein Anwachsen der Planungsintelligenz in den Steuerungssystemen zu beobachten (KNOLL 2003a). Auch die Entwicklung von Assistenzrobotern, welche in der Umgebung des Menschen arbeiten können, schreitet weiter voran und eröffnet neue Nutzungsperspektiven für Roboter in der Produktion (HÄGELE et al. 2002, SCHRAFT & MEYER 2006b).

Der zentrale Ansatzpunkt für einen wirtschaftlichen Robotereinsatz in der Fertigung kleiner Losgrößen ist jedoch in der Programmierung und Bedienung der Systeme zu sehen (DENKENA et al. 2005, SCHRAFT & MEYER 2006a, ZÄH et al. 2004a). Roboter sind komplexe Bewegungsautomaten, die über frei programmierbare Achsen verfügen und mit Sensoren und Effektoren ausgestattet werden können (VDI 2860). Die Bedienung und Programmierung dieser Geräte erfordert eine umfangreiche Kommunikation zwischen Mensch und Maschine im Rahmen derer der Programmierer seine räumliche Vorstellung und sein Prozessverständnis in ein Roboterprogramm überführt. Dabei sind die Prozessanforderungen, die Bewegungsmöglichkeiten der Maschine, vorhandene Modell- und Sensordaten sowie die realen geometrischen Gegebenheiten zu berücksichtigen.

Da viele dieser Aspekte sich der Vorstellungskraft des Benutzers entziehen und mit heutigen Hilfsmitteln nur in Ausschnitten betrachtet werden können, erfordert die Roboterprogrammierung ein hohes Maß an Expertenwissen und gestaltet sich zudem sehr zeitaufwendig (PETTERSEN et al. 2004, ZÄH et al. 2004b, GOTTSCHALD 2001). Selbst kleine Programmanpassungen sind mit hohem Aufwand verbunden, so dass ein wirtschaftlicher Robotereinsatz heute nur für hohe Stückzahlen und dem damit günstigeren Verhältnis von Programmierzeit zu Betriebszeit möglich ist (SCHRAFT & MEYER 2006a). Entsprechend sieht der Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) in der Vereinfachung der Programmierung von Produktionsmitteln einen zentralen Ansatzpunkt, um die Kosten in der Produktion zu senken und die Produktqualität zu erhöhen (BDI 2005).



Die Entwicklungen auf dem Gebiet interaktiver, multimodaler Mensch-Maschine-Schnittstellen können hierzu wesentliche Beiträge leisten (KRAISS 2006, S. 5; WTEC 2006, S. 62). Insbesondere die Technologie der erweiterten Realität (engl.: Augmented Reality, AR) erfährt in diesem Kontext eine hohes Maß an Aufmerksamkeit. Der Begriff Augmented Reality beschreibt allgemein Techniken der Mensch-Maschine-Interaktion, bei welchen die menschliche Wahrnehmung, vornehmlich der Gesichtssinn, interaktiv mit computergenerierten Informationen angereichert wird (WELLNER et al. 1993). Somit können virtuelle 3D-Informationen durch den Menschen unmittelbar im realen Umfeld wahrgenommen und darüber hinaus interaktiv manipuliert werden.

In zahlreichen industriellen und akademischen Forschungsstudien wurde dieser Technologie ein hohes Potenzial zur Vereinfachung und zur Verbesserung der Roboterprogrammierung attestiert (ESTABLE et al. 2002, BISCHOFF & KAZI 2004b, PETERSEN et al. 2004, ZÄH et al. 2004b, GIESLER 2006, ZÄH et al. 2005b). Zugleich wurde aber auch deutlich, dass dieses Potenzial durch eine unmittelbare Anwendung der bestehenden AR-Ansätze nur bedingt ausgeschöpft werden kann (VOGL 2005, GIESLER 2006, S. 185). Vielmehr bedarf es der Erarbeitung geeigneter Einsatzkonzepte und Methoden, welche eine größtmögliche Kongruenz zwischen den Erfordernissen der Roboterprogrammierung und den Nutzenaspekten dieser Technik herstellen. Insbesondere müssen der Entwurf und die Gestaltung entsprechender Verfahren und Systeme einem Einsatz im Produktionsumfeld Rechnung tragen.

Die Erarbeitung eines ganzheitlichen Ansatzes, der interaktive AR-gestützte Benutzerschnittstellen tatsächlich in der betrieblichen Praxis der Roboterprogrammierung nutzbar macht, ist eine bis heute offene Fragestellung. Es obliegt der produktionstechnischen Forschung, diese Aufgabe zu adressieren und zu lösen.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, die Potenziale der Augmented-Reality-Technologie für die Industrierobotik zu erschließen. Das vorrangige Ziel ist es hierbei, die Programmierung und Bedienung des Produktionsmittels Roboter zu vereinfachen und den damit verbundenen Aufwand maßgeblich zu reduzieren. Auf Basis der AR-Technologie sollen neuartige, effiziente Formen der Benutzerinteraktion erarbeitet und für einen industriellen Einsatz qualifiziert werden. Im Einzelnen sind dazu die folgenden Schritte erforderlich:

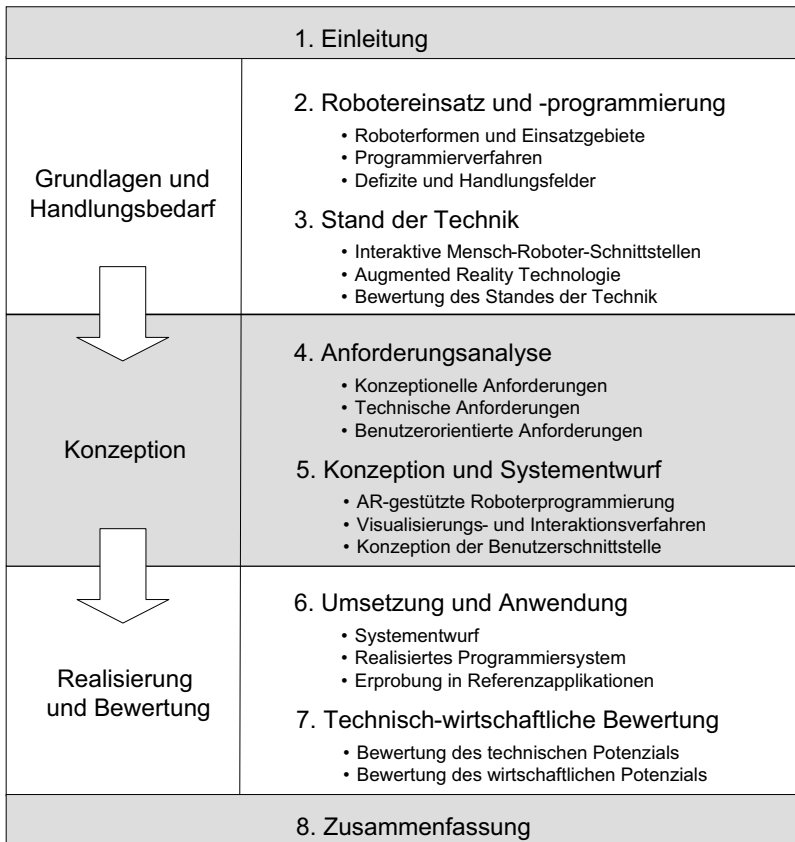
- Es müssen **praxisgerechte Ansätze** der AR-gestützten Visualisierung und Interaktion zur Bearbeitung von Roboterprogrammen aufgezeigt werden.
- Zu deren Nutzung ist, unter Berücksichtigung bestehender Werkzeuge und Methoden, ein durchgängiges **methodisches Vorgehen** zu definieren.
- Es ist eine übertragbare Systemgestaltung zu finden, welche die erarbeiteten Verfahren als **leistungsfähiges und robustes System** bereitstellt.
- Für die Anwendbarkeit in der betrieblichen Praxis und das realisierbare Nutzenpotenzial ist ein Nachweis durch **Erprobung** zu führen.

Die Abbildung 2 zeigt die Gliederung der Arbeit und spiegelt dabei das Vorgehen wider, welches zur Erreichung der angeführten Ziele gewählt wird. Zunächst erörtert das **Kapitel 2** den Status und die aktuellen Entwicklungen des industriellen Robotereinsatzes. Es wird auf existierende Roboterformen und auf ihre Anwendungsgebiete eingegangen. Zudem werden die verfügbaren Methoden, Verfahren und Werkzeuge der Roboterprogrammierung betrachtet und Handlungsfelder für Verbesserungen aufgezeigt. Das **Kapitel 3** führt den Stand der Technik für das zentrale Feld der Arbeit aus: interaktive und multimodale Mensch-Roboter-Schnittstellen, insbesondere die Nutzung der AR-Technologie in der Programmierung und Bedienung von Robotern. Dabei werden die bisherigen Ansätze der Forschung und der industriellen Technik analysiert und verglichen.

In **Kapitel 4** werden die Anforderungen an AR-basierte Verfahren und Systeme zur Programmierung von Industrierobotern geklärt. Aufbauend darauf wird in **Kapitel 5** zunächst ein Vorgehensmodell für den Einsatz der AR-Technologie erarbeitet. Dieses weist die verschiedenen Nutzungsaspekte der AR-gestützten Roboterprogrammierung aus und ordnet diese in ein systematisches Vorgehen ein. Daraufhin werden Teilverfahren der Visualisierung, der Eingabe und der Interaktion konzipiert, welche schließlich in einem modularen Konzept für ein AR-gestütztes Programmiersystem zusammengeführt werden.

In **Kapitel 6** werden die Teilverfahren und das Systemkonzept vollständig ausgearbeitet und in Form eines Hard- und Softwareprototyps umgesetzt. Das realisierte Programmiersystem wird zunächst in Laborversuchen und anschließend anhand zweier Referenzapplikationen erprobt. Die dabei gesammelten Erkenntnisse bilden die Grundlage für eine Bewertung in **Kapitel 7**. Es erfolgt eine technische Betrachtung des Ansatzes sowie eine wirtschaftliche Beurteilung der damit erzielbaren Nutzenpotenziale. Das **Kapitel 8** schließt die Arbeit mit einer

Zusammenfassung ab und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungsrichtungen und Anwendungsmöglichkeiten.



*Abbildung 2 Aufbau der Arbeit*

---

## 2 Robotereinsatz und -programmierung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick der verschiedenen Roboterarten, charakterisiert ihre Anwendungsbereiche und erörtert die Methoden und die Werkzeuge der Roboterprogrammierung. Darüber hinaus werden bestehende Defizite analysiert und Handlungsfelder für Verbesserungen aufgezeigt.

### 2.1 Robotertypen

#### 2.1.1 Klassifizierung von Robotern

Heutige Roboter<sup>1</sup> sind im Wesentlichen in drei Klassen zu unterteilen: Industrieroboter, Serviceroboter und Humanoide (WTEC 2006, S. 55). Humanoide Roboter orientieren sich an der Nachbildung des menschlichen Bewegungs- und Kognitionsapparates. Sie stellen ein wichtiges Leitbild für die Robotikforschung dar (BROOKS & STEIN 1995, KNOLL 2003a), spielen aber für die Fabrikautomation keine unmittelbare Rolle. Serviceroboter sind teil- oder vollautonome Systeme, die nützliche Tätigkeiten – per definitionem außerhalb der industriellen Produktion – verrichten (UNECE/IFR 2003, S. 25). Sie sind in der Mehrzahl mobil und werden zur Erfüllung spezieller Aufgaben in verschiedensten Domänen des professionellen Umfeldes eingesetzt sowie in zunehmendem Maße als Konsumgut verkauft (VERL et al. 2007; IFR 2006, S. IX).

Industrieroboter sind das älteste und derzeit noch größte Segment des Robotikmarktes. Die DIN EN ISO 8373 definiert Industrieroboter als „automatisch gesteuerte, frei programmierbare Mehrzweck-Manipulatoren die zur Handhabung von Werkzeugen oder Werkstücken in drei oder mehr Achsen programmierbar sind und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder statisch oder mobil angeordnet sein können“. Seit dem Ende der 1960er Jahre sind über 1,75 Millionen Industrieroboter verkauft worden, von denen heute nahezu eine Million Einheiten im operativen Einsatz sind (IFR 2007, S. 21). Der Fokus dieser Arbeit liegt ausschließlich auf der Programmierung von Robotern im industriellen Umfeld. Die adressierten Aspekte weisen jedoch auch für zahlreiche Serviceroboteranwendungen eine hohe Relevanz und Übertragbarkeit auf.

---

<sup>1</sup> Der Begriff des „Roboters“ wurde, in Anlehnung an das tschechische Wort für Fronarbeit „Robota“, 1921 von Karl Capek in einem Bühnenstück als Bezeichnung für menschenähnliche, maschinelle Arbeitsklaven geprägt (SIEGERT & BOCIONEK 1996, S. 1)

### 2.1.2 Einteilung von Industrierobotern

Industrieroboter lassen sich nach dem Aufbau ihrer Kinematik und nach der Art ihrer Steuerung unterscheiden. Die Kinematik von Robotern und die Gestalt des Arbeitsraumes werden durch die Anzahl, die Art und die Anordnung ihrer Gelenke bestimmt. Es wird zwischen rotatorischen und translatorischen Achsen unterschieden, welche entweder parallel zueinander oder seriell angeordnet sein können. Die meistverwendete Kinematik stellt der fünf- oder sechssachsig ausgeführte Gelenkarmroboter, auch Knickarm genannt, dar (NIKU 2001, S. 11; UNECE/IFR 2003, S. 76). Die Aufgabe der Robotersteuerung besteht darin, eine oder mehrere Kinematiken gemäß der im technologischen Prozess geforderten Aufgabe zu steuern. Die Steuerung bildet zudem die Schnittstelle zum menschlichen Bediener. Die Abbildung 3 gibt einen Überblick typischer Kinematikkonfigurationen und Steuerungsarten gemäß DIN EN ISO 8373.

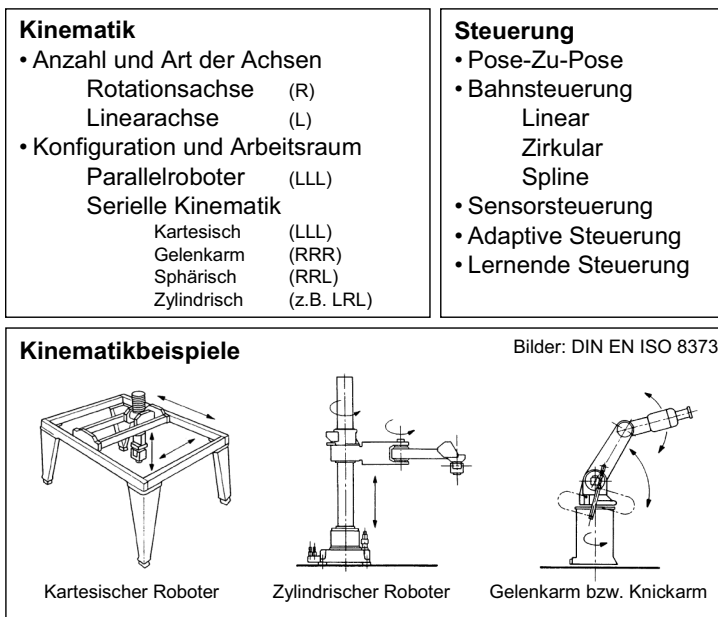


Abbildung 3 Einteilung von Industrierobotern

## **2.2 Applikationen und Randbedingungen**

### **2.2.1 Roboteranwendungen**

Der Hauptunterschied zwischen starren Automatisierungslösungen und Industrierobotern liegt in der Fähigkeit, komplexe räumliche Bewegungsabläufe, ähnlich denen des menschlichen Armes, flexibel programmierbar durchzuführen (COLESTOCK 2004, S. 3). Dementsprechend werden Industrieroboter in überwiegender Mehrheit dort eingesetzt, wo die Handhabung von Werkstücken oder die Führung von Werkzeugen relativ zu Werkstücken mit drei und mehr Freiheitsgraden erfolgen muss und eine manuelle Durchführung der Handhabungsaufgabe aus ergonomischen, sicherheitstechnischen, leistungsmäßigen oder wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht in Frage kommt.

Der internationale Robotikverband „International Federation of Robotics“ (IFR) führt jährlich statistische Erhebungen zum weltweiten Einsatz von Industrierobotern durch. Die Applikationen werden dabei in sogenannte Anwendungsklassen eingeteilt. Diese teils überlappenden Klassen spiegeln jeweils den Prozess bzw. diejenige Produktionstätigkeit wider, für die ein Roboter überwiegend genutzt wird. Abbildung 4 stellt demgemäß die Verteilung des weltweiten Industrieroboterbestandes auf diese Klassen im Jahr 2006 dar. Als Schwerpunkte erweisen sich der Einsatz in Schweißprozessen (28,9 %), in der Montage (23,0 %) und bei der Handhabung von Werkstücken innerhalb des Produktionsablaufes (35,4 %).

Naturgemäß ist nahezu allen Roboteranwendungen ein hoher Anteil an räumlichen Bewegungsabläufen mit 6 Freiheitsgraden inhärent. Bei der Programmierung müssen diese gemeinsam mit den Aktionsfolgen von Peripheriegeräten sowie prozessspezifischen Parametern festgelegt werden. Während Handhabungsaufgaben in der Regel einen geringeren Anteil an Bahnprogrammierung bedingen, ist dieser bei bauteilbezogenen Bearbeitungsvorgängen – diese bilden in Summe etwa ein Drittel aller Roboteranwendungen – besonders hoch.

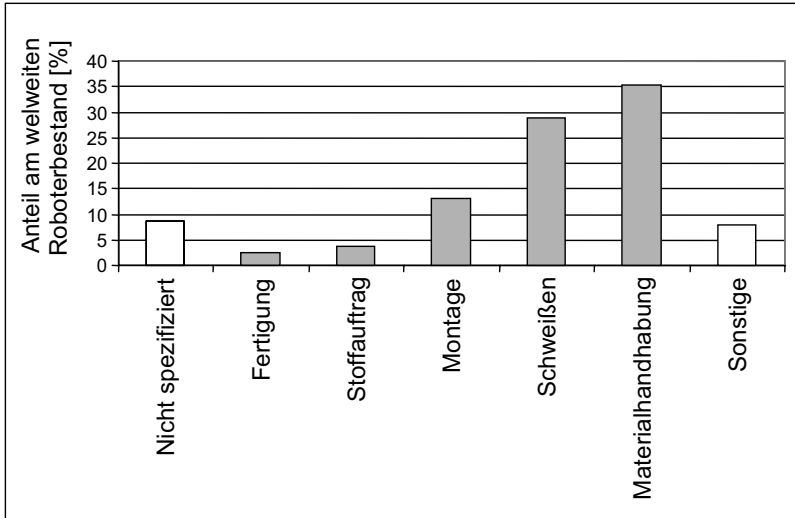


Abbildung 4 Verteilung auf Anwendungsklassen (IFR 2007, S. 41)

### 2.2.2 Einsatzumfeld

Entscheidend für den Umfang des Robotereinsatzes in einem Unternehmen sind vor allem die Betriebsgröße und die Art der Produktion. Während mehr als die Hälfte der Betriebe mit über 250 Mitarbeitern Roboter einsetzen, tun dies nur 12 % der Betriebe mit einer Größe bis 50 Mitarbeiter (ARMBRUSTER et al. 2006b). Dies ist vor allem auf die Notwendigkeit zurückzuführen, für die Planung und Programmierung der Roboterapplikationen ausgebildete Spezialisten vorhalten zu müssen, welche von kleineren Betrieben nur schwer in ausreichendem Umfang bereitgestellt werden können (GOTTSCHALD 2001, S. 7; SCHRAFT & MEYER 2006a). Viele kleinere Unternehmen scheuen die mit der Arbeitsvorbereitung und Programmierung der Roboter verbundenen Overheadkosten, so dass ein Einsatz zumeist erst ab einem Potenzial von 3-5 Robotern tatsächlich stattfindet (COLESTOCK 2004, S. 26).

Neben der Betriebsgröße hat insbesondere die Fertigungslosgröße entscheidenden Einfluss darauf, ob Industrieroboter genutzt werden. Die Abbildung 5 stellt die Ergebnisse einer Erhebung des Fraunhofer-Instituts für Innovations- und Systemforschung (ISI) dar, bei der für 1183 Betriebe des deutschen verarbeitenden Gewerbes der Status der Roboternutzung in Abhängigkeit von der überwiegend



produzierten Seriengröße erfasst wurde (ARMBRUSTER et al. 2006a, b). Mit 52 % der befragten Betriebe hatten doppelt so viele Großserienfertiger Roboter im Einsatz wie in der Mittel- und Kleinserienfertigung, in der nur 26 % bzw. 22 % der befragten Betriebe Roboter nutzten. Der geringste Anteil an Betrieben mit Robotern fand sich erwartungsgemäß in der Einzelfertigung mit 14 %.

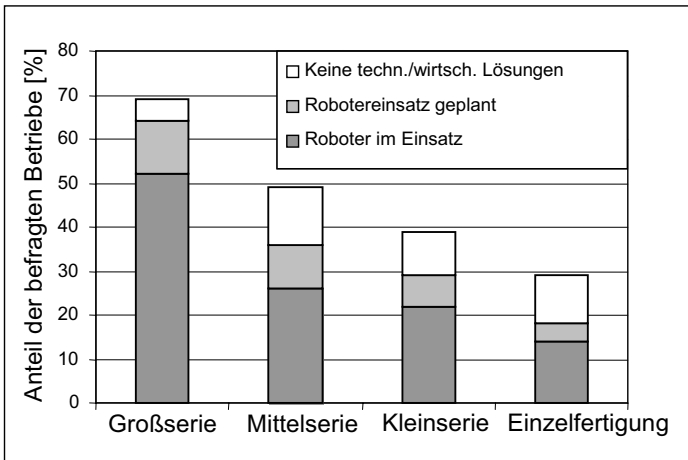


Abbildung 5 Robotereinsatz nach Losgröße (ARMBRUSTER et al. 2006a)

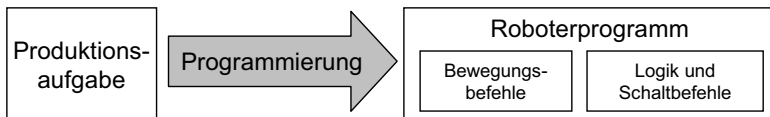
Die Tatsache, dass Roboter mit abnehmender Seriengröße weniger oft eingesetzt werden, erklärt sich vornehmlich durch das damit einhergehende, ungünstigere Verhältnis zwischen den Hauptzeiten, in welchen der Roboter im Betrieb ist und der Rüstzeit, die zur Programmierung und Konfiguration einer Anwendung benötigt wird (SCHRAFT & MEYER 2006a). Während in der Großserienfertigung hauptsächlich optimierte Zykluszeiten den Ausschlag für die Wirtschaftlichkeit der Produktion geben, liegt der Schlüssel zu einem effizienten Robotereinsatz in der Mittel- und Kleinserienfertigung in einer schnellen Programmierung und Anpassung der Roboteranwendungen (VERL & NAUMANN 2008).

So wurde in der oben genannten Befragung außerhalb der Großserienfertigung von mehr als doppelt so vielen Betrieben (Einzelfertigung: 11 %, Kleinserie: 10 %, Mittelserie: 13 %) das Fehlen von technisch-wirtschaftlich anwendbaren Lösungen als Grund für den Verzicht auf Robotereinsatz angeführt, als dies bei Betrieben mit Großserienfertigung (5 %) der Fall war (ARMBRUSTER et al. 2006a). In der Erarbeitung von geeigneten Ansätzen und technischen Lösungen zur Beschleunigung und Vereinfachung der Roboterprogrammierung liegt dem-

nach ein wesentlicher Ansatzpunkt zur Erschließung von Automationspotenzialen in der Mittel- und Kleinserienfertigung (ESTABLE et al. 2002, BDI 2005, DENKENA et al. 2005, ARMBRUSTER et al. 2006b, NAUMANN et al. 2006, SCHRAFT & MEYER 2006a).

### 2.3 Programmierung von Industrierobotern

Einen Roboter zu programmieren bedeutet gemäß DIN EN ISO 8373, ein Anwenderprogramm für eine Fertigungsaufgabe zu erstellen. Ein solches Anwenderprogramm stellt eine Befehlsfolge von Bewegungs- und Hilfsfunktionen dar, welche der Durchführung einer spezifisch beabsichtigten Aufgabe des Robotersystems dient (vgl. Abbildung 6). Hierzu können verschiedene Programmiermethoden, das heißt planmäßige Vorgehensweisen zur Erzeugung von Programmen, herangezogen werden (SPUR & UHLMAN 2005). Es existiert eine Vielzahl von Verfahren und Werkzeugen für die Programmierung von Robotern im industriellen Umfeld. Für diese werden im Folgenden zunächst Unterscheidungskriterien ausgeführt, um anschließend die zentralen Verfahren vorzustellen und einzuordnen.



*Abbildung 6 Grundprinzip der Roboterprogrammierung*

Ein zentrales Merkmal, nach dem Programmiermethoden unterschieden werden, ist der Ort an dem die Programmeingabe stattfindet (WECK & BRECHER 2006, S. 378). So spricht man in Abhängigkeit davon, ob das Programm unmittelbar in der Produktionsumgebung erstellt wird oder aber abseits davon, von prozessnaher bzw. prozessferner Programmierung (NEUGEBAUER 1997, S. 19). Weiterhin werden Methoden, bei denen die Programmierung unter **Verwendung des Robotersystems** erfolgt als Online-Methoden bezeichnet. Hingegen spricht man von Offline-Methoden, wenn die Programmierung ohne Einbindung des Robotersystems durchgeführt wird (SIEGERT & BOCIONEK 1996, S. 87). Eine dritte, weitgehend synonym zu online und offline verwendete Unterscheidung stellt der Sprachgebrauch direkte und indirekte Programmierung dar (SPUR & UHLMAN 2005). Mischformen zwischen Online- und Offline-Programmierung werden als hybride Methoden bezeichnet (NEUGEBAUER 1997, S. 20). Ein weiteres Merkmal

ist **der Abstraktionsgrad** mit dem Programme spezifiziert werden (DILLMANN 2006). Es lassen sich drei charakteristische Ebenen identifizieren. Davon stellt die Bahnprogrammierung, also die explizite Festlegung der elementaren Bewegungsabläufe eines Roboters, die niedrigste Abstraktionsstufe dar. Die nächsthöhere Ebene bildet die Festlegung der Abfolge und Logik von Roboteraktionen zur Durchführung des Produktionsprozesses. Dies umfasst einerseits den Ablauf von Bewegungssequenzen des Roboters, andererseits die Auswertung und Aktivierung von Sensoren und Aktoren in der Umgebung des Roboters (NEUGEBAUER 1997, S. 19). Die höchste Form der Abstraktion stellt eine implizite Programmierung dar. Dabei sind nicht die Aktionen des Robotersystems Gegenstand der Programmierung, sondern es erfolgt eine Spezifikation des gewünschten Produktionsprozesses, welche automatisiert in eine geeignete Abfolge von Roboteraktionen überführt wird (WECK & BRECHER 2006, S. 409). In diesem Kontext sprechen BIGGS & MACDONALD (2003) auch von dem „Automatisierungsgrad“ der Programmierung. Einhergehend mit einer Erhöhung des Abstraktionsgrades sind weniger explizite, manuelle Vorgaben durch den menschlichen Programmierer erforderlich und ein größerer Anteil der Programmerstellung erfolgt automatisiert bzw. implizit.

Schon SIEGERT & BOCIONEK (1996, S. 87) weisen darauf hin, dass keine eindeutige Zuordnung der Vielzahl von existierenden Ansätzen möglich ist. Sie schlagen aber eine Klassifizierung **nach Verfahren**, also nach Art und Ausgestaltung des Prozesses der Programmerstellung und der dabei verwendeten Werkzeuge, vor. So kann beispielsweise danach unterschieden werden, ob der Programmierer Koordinaten alphanumerisch eingibt, durch Verfahren des Roboters andeutet oder durch andere Hilfsmittel definiert. In Abbildung 7 sind zentrale Verfahren der Roboterprogrammierung dargestellt und entsprechend der Kriterien „Verwendung des Robotersystems“ und „Abstraktionsgrad“ gruppiert. Die Abbildung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da neben den angeführten Verfahren zahlreiche Mischformen und anwendungsspezifische Erweiterungen existieren.

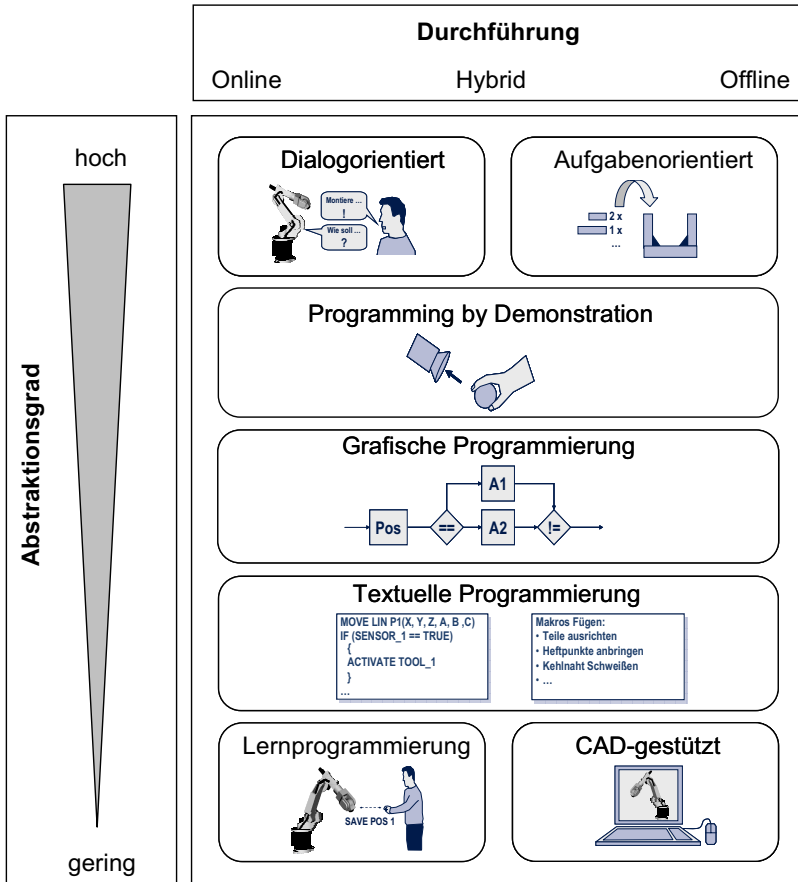


Abbildung 7 Übersicht der Programmierverfahren für Industrieroboter

### 2.3.1 Online-Programmierung

Der Begriff Lernprogrammierung (engl.: „teach in“) steht für Verfahren, bei denen der Roboter bzw. dessen Endeffektor an gewünschte Bahnpunkte bzw. entlang der gewünschten Bahn geführt wird und Positionen für eine spätere Wiederholung in der Steuerung abgespeichert werden (SIEGERT & BOCIONEK 1996, S. 88). Dieses Verfahren rührt von der ältesten Form der Roboterprogrammierung, dem Einstellen her. Bevor Servoregler verfügbar waren, wurden Roboter zur Programmierung von Bahnpunkten jeweils in die zu einem Punkt gehörende

Pose gebracht, um anschließend mittels mechanischer Stopper bzw. elektrischer Schalter die Achsstellung zu fixieren und in Codiermatrizen abzuspeichern.

Auch heute noch werden die meisten Roboter online, mit Hilfe von Lernverfahren programmiert, da diese durch den direkten Bezug zum Prozess sehr anschaulich für den Benutzer sind (WECK & BRECHER 2006, S. 380). Je nachdem, wie der Roboter geführt wird und ob dies manuell oder automatisch erfolgt, können drei Verfahrensunterarten unterschieden werden (DILTHEY 2005, S. 288): Teach-In, Playback und sensorunterstützte Programmierung. Diese drei Methoden sind in Abbildung 8 schematisch dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert.

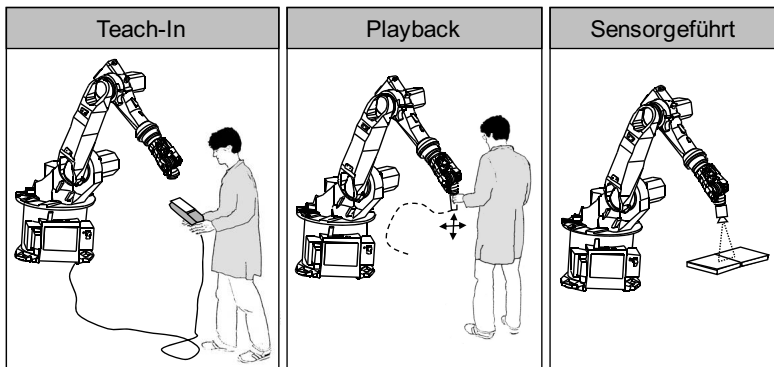


Abbildung 8 Lernprogrammierungsverfahren

### 2.3.1.1 Teach-In-Programmierung

Die am weitesten verbreitete Form der Lernprogrammierung ist das sogenannte Teach-In-Verfahren (DILTHEY 2005, S. 288). Der Benutzer verfährt dabei den Roboter an charakteristische Positionen und speichert diese ab. Die Führung des Roboters erfolgt in der Regel über ein in der Hand gehaltenes Bediengerät (Programmierhandgerät, PHG). Moderne PHG verfügen über grafikfähige Displays, Tastaturen zum Editieren der Programme und bieten intuitive Visualisierungsformen, wie symbolische Darstellungen oder 3D-Ansichten (KAZI et al. 2005). Darüber hinaus finden sich auch erste kabellose Bediengeräte, die über eine Funkverbindung an die Steuerung angebunden sind (CALCAGNO et al. 2006).

Jeder Roboter kann im achsspezifischen Koordinatenraum, das heißt durch direktes Verändern der einzelnen Achswerte, verfahren werden. Weiterhin stellen

praktisch alle Roboter, die über Bahnsteuerung verfügen ein festes kartesisches Weltkoordinatensystem sowie ein am TCP angehängtes kartesisches Werkzeugkoordinatensystem zur Verfügung und erlauben darüber hinaus die Definition weiterer beliebiger Koordinatensysteme. Die Eingaben zum Verfahren des Roboters erfolgen mittels Tasten oder durch in das PHG integrierte Eingabegeräte wie Joysticks oder die sogenannte Spacemouse, welche sechs Freiheitsgrade unterstützt (WECK & BRECHER 2006, S. 385).

Teach-In ist ein einfaches und zweckmäßiges Programmierverfahren, bei dem über das PHG und den Roboter hinaus keine zusätzlichen Komponenten erforderlich sind. Durch den direkten Bezug zum Prozess ist es überdies sehr anschaulich, erfordert aber einen geübten Benutzer und ein hohes Maß an Umsicht bei der Programmierung (PETTERSEN et al. 2004). So können beispielsweise Handhabungsbewegungen, die nur wenige Stützpunkte im freien Raum erfordern vergleichsweise schnell erstellt werden. Demgegenüber sind Bearbeitungsaufgaben, die in Bezug zu 3D-Oberflächen stattfinden und viele, präzise anzufahrende, Stützpunkte benötigen, mit diesem Verfahren extrem aufwändig zu programmieren.

### 2.3.1.2 Playback-Programmierung

Bei der Playback-Programmierung greift der Benutzer den Roboter an geeigneter Stelle, in der Regel nahe dem Tool-Center-Point, und führt ihn entlang der gewünschten Bahn. Die Aufzeichnung von Bahnpunkten erfolgt in einem festen Zeittakt oder äquidistant in Bezug auf die durch den TCP des Roboters zurückgelegte Bahn. Playback-Programmierung ist eines der ältesten Programmierverfahren, das sich vor allem zur intuitiven und schnellen Eingabe von räumlichen Bewegungsabläufen eignet. Dennoch hat es sich, abgesehen von spezialisierten Einzelanwendungen, bisher nicht durchgesetzt (SCHRAFT & MEYER 2006a).

Während Playback bei sehr leichten Robotern nach Abschalten der Antriebe ohne weitere Hilfsmittel eingesetzt werden kann, sind bei schwereren Kinematiken zusätzliche Hilfsmittel zur Führung erforderlich. Eine Möglichkeit stellen in der Nähe des Endeffektors angebrachte Kraft-Momenten-Sensoren oder auch Eingabegeräte wie Joysticks (z. B. KUKA 2006) dar, mit welchen der Roboter unter Zuhilfenahme seiner Antriebe bewegt wird. Durch die Integration von Momentensensoren in die einzelnen Achsen des Roboters kann zudem eine Nachgiebigkeit der gesamten Kinematik erreicht werden, so dass der Benutzer den Roboter an nahezu beliebigen Punkten anfassen und die Pose des Roboters verändern

kann (GRUNWALD et al. 2003). Der Vollständigkeit halber sei noch der Master-Slave-Betrieb genannt, bei dem ein kinematisches Ersatzmodell zur Steuerung des Roboters benutzt wird (SIEGERT & BOCIONEK 1996, S. 91).

Die Playback-Programmierung, bzw. allgemeiner die Interaktion und Eingabe von Positionen und Posen durch physisches Führen des Roboters stellt eine gute Eingabemöglichkeit für räumliche Bewegungsabläufe dar. Für sich alleine gesehen bietet das Verfahren jedoch nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten zum Editieren von Roboterbewegungsabläufen und stellt dem Benutzer außer dem Ausführen der Programme keine Analysemöglichkeiten zur Verfügung. In Verbindung mit multimodalen Bedienerchnittstellen, wie Sprachsteuerung und weiterführenden Mitteln zur Bahnanpassung, erscheint dieses Verfahren allerdings viel versprechend (SCHRAFT & MEYER 2006a).

### **2.3.1.3 Sensorunterstützte Programmierung**

Bei der sensorunterstützten Programmierung wird der Bahnverlauf, z. B. mittels Teach-In, nur grob vorgegeben und daraufhin das zu bearbeitende Werkstück von dem durch einen Sensor geführten Roboter automatisch abgetastet (SPUR & UHLMAN 2005). Der genaue Bahnverlauf wird in Sensorsuchläufen aufgenommen und mit Hilfe der Robotersteuerung automatisch berechnet. Anschließend kann das Programm um weitere Parameter vervollständigt werden (DILTHEY 2005, S. 288). Dieses Verfahren wird zum Beispiel häufig, in Verbindung mit optischen Triangulationssensoren wie Laserscannern oder Lichtschnittsensoren zur Bahnführung des Roboters bei Schweißanwendungen verwendet. Es stellt eine gute Möglichkeit dar, komplexe Bearbeitungsbahnen effizient vorzugeben. Zudem kann damit eine höhere Präzision erreicht werden als durch manuelle Vorgaben. Als weitere, heute selten eingesetzte Variante dieses Verfahren wird von SPUR & UHLMAN (2005) die manuelle sensorgestützte Programmierung genannt, bei welcher der Roboter mit Hilfe eines in der Hand gehaltenen, von Sensoren erfassten Stiftes, an gewünschte Bahnpunkte geführt wird (PRITSCHOW & GRUHLER 1986). Demgegenüber ordnet NEUGEBAUER (1997, S. 24) dieses Verfahren, sofern ein sensorisch erfasstes Element zum Vorzeichnen einer Bahn verwendet wird, der Playback-Programmierung zu.

### 2.3.2 Offline-Programmierung

Offline-Programmierverfahren werden per definitionem durchgeführt, ohne dass eine Notwendigkeit zur Einbindung des Manipulators und seiner Steuerung besteht. Während simulationsgestützte Programmierverfahren tatsächlich in überwiegender Mehrheit an Bildschirmarbeitsplätzen durchgeführt werden, finden andere Offline-Verfahren, wie die textuelle und die grafische Programmierung sowohl an Rechnerarbeitsplätzen, wie auch in der Produktionsumgebung Einsatz.

#### 2.3.2.1 Simulationsgestützte Programmierung

Grafische Simulationssysteme basieren entweder auf CAD-Systemen, erweitert um roboterspezifische Funktionen oder auf speziellen Entwicklungen mit integrierten Graphikfunktionen (SPUR & UHLMAN 2005). Diese Systeme ermöglichen eine realitätsnahe Simulation und Bearbeitung von Roboterprogrammen an Rechnerarbeitsplätzen, ohne dabei das reale Robotersystem zu benötigen. Im Verlauf der 1990er Jahre entstand eine Vielzahl solcher Simulationssysteme. Neben proprietären Systemen der Roboterhersteller wie RobotStudio<sup>TM</sup> (ABB 2005), KRSim<sup>TM</sup> (KUKA 2007) oder MotoSimEG<sup>TM</sup> (NOGUCHI & MAEHARA 2005) sind die herstellerneutralen Systeme IGRIP<sup>TM</sup> (DELMIA 2007) und RobCAD<sup>TM</sup> (SIEMENS 2008) heute im industriellen Umfeld am weitesten verbreitet.

Zur Modellierung und Abbildung der Umgebungsgeometrie verfügen diese Systeme über CAD-Funktionalitäten und Importschnittstellen wie STEP oder IGES und stellen zumeist Bibliotheken mit Modellen von Robotern und anderen Komponenten bereit (SPUR & UHLMAN 2005; WECK & BRECHER 2006, S. 406). Weiterhin sind das Sprachsystem und das Steuerungsverhalten der zu programmierenden Roboter in Form virtueller Modelle hinterlegt. Ein De-facto-Industriestandard hierfür ist RRS (Realistische Roboter Simulation, BERNHARDT et al. 2000). Einen alternativen Ansatz zu virtuellen Steuerungsmodellen stellt die Verbindung von realer Steuerungshardware und virtuellen Simulationsmodellen in Form von Hardware-In-the-Loop (HIL) dar. So können durch HIL-Integration zum einen die realen Robotersteuerungen (KUKA 1997), zum anderen auch das Verhalten von speicherprogrammierbaren Steuerungen und automatisierungstechnischer Peripherie realistisch in die Simulation einbezogen werden (PRITSCHOW et al. 2005, ZÄH et al. 2004c, ZÄH et al. 2005d). Ein integriertes, hybrides System, welches gleichermaßen zur Simulation und Steuerung von Roboterzellen genutzt werden kann, wurde von KEIBEL (2003) vorgestellt.



Bisherige Simulationssysteme bilden den Materialfluss und die Objekthandhabung nur logisch, also im Sinne von Animationen ab, was einen erheblichen Modellierungsaufwand bedingt und zu Fehlern in der realen Programmausführung führen kann. Dies kann in Zukunft durch den Einsatz von Starrkörpersimulationen behoben werden (ZÄH et al. 2005a). Insbesondere aus dem Bereich der Entwicklung autonomer, mobiler Roboter geht eine neue Generation von Simulationsumgebungen wie „Gazebo“ (GERKEY et al. 2003) und auch „Robotics Studio“ (MICROSOFT 2007) hervor, die eine umfassende physikalische Abbildung von Manipulationen durch Aktoren einerseits und die Simulation verschiedenster Sensormodalitäten andererseits ermöglichen.

Robotersimulationssysteme bieten zahlreiche Verfahren zur Programmeingabe an und können deshalb nicht als eigenes Verfahren, sondern vielmehr als ein grundlegendes Werkzeug zur Durchführung von Programmierverfahren an virtuellen Modellen, also zur Offline-Programmierung, betrachtet werden. Ein großer Teil der Eingabemethoden ist den Verfahren der Lernprogrammierung nachempfunden, mit dem Unterschied, dass der Benutzer einen virtuellen Roboter statt des realen bewegt (SIEGERT & BOCONEK 1996, S. 98).

So kann ein Robotermodell mit Hilfe der Maus, entsprechend der Playback-Programmierung, geführt werden oder ein virtueller Roboter, analog zur Teach-In-Programmierung, in diversen Koordinatensystemen verfahren werden. Ein weiterer Teil der Eingabemethoden zur Bahnplanung ist eng an die bei CAD-Systemen üblichen Funktionen zur interaktiven Eingabe von 3D-Daten mittels Maus und Tastatur angelehnt, so dass der Benutzer Anwenderprogramme beispielsweise direkt aus Werkstückgeometrien ableiten kann (SPUR & UHLMAN 2005). Darüber hinaus wird in der Regel die textbasierte Eingabe von roboterspezifischem Programmcode in einer steuerungsnahen Sprache oder in Form abstrahierter Skriptsprachen unterstützt (WECK & BRECHER 2006, S. 407).

Auch der Einsatz immersiver Schnittstellen aus dem Bereich der Virtual Reality wurde für die Robotersimulation intensiv betrachtet (NEUGEBAUER 1997, ROßGODERER 2002, DENKENA et al. 2005). Tatsächlich fanden einzelne Elemente davon, wie stereoskopische Darstellung und räumliche Eingabegeräte Eingang in die heute industriell eingesetzten Systeme (DELMIA 2007, SIEMENS 2008). Diese Funktionalitäten vereinfachen zwar die Bedienung der Systeme, sind aber mit zusätzlichen Kosten verbunden und werden bisher in der Praxis selten eingesetzt.

## 2 Robotereinsatz und -programmierung

Für die Bauteilbearbeitung ist zum Teil eine automatisierte Bahngenerierung mit Softwarewerkzeugen der rechnergestützten Fertigung (engl.: Computer Aided Manufacturing, CAM) möglich. Die Bearbeitungsfolgen werden dabei mithilfe eines Prozessmodells so berechnet, dass die Rohteilgeometrie in die gewünschte Zielgeometrie überführt wird. Beispielsweise nutzt SCHÄFER (2007) ein CAM-System zur Programmierung des inkrementellen Blechumformens mit Robotern.

Robotersimulationssysteme sind mächtige Werkzeuge zur Planung und Offline-Programmierung von Roboterzellen. Insbesondere für die Layout- und die Bahnplanung stellen sie effiziente Hilfsmittel wie Erreichbarkeits- und Kollisionsanalysen zur Verfügung und ermöglichen darüber hinaus die frühzeitige Ermittlung von Taktzeiten. Dass die reale Anlage dabei nicht benötigt wird und vor ihrer Entstehung oder während der laufenden Produktion programmiert werden kann, stellt einen weiteren Vorteil dar. Überall dort, wo die Planung, die Konstruktion und die Programmierung von Roboteranlagen eng ineinander greifen, mit umfassender Unterstützung durch Rechnerwerkzeuge erfolgen und Produktmodelldaten frühzeitig vorliegen, sind Robotersimulationssysteme von immenser Bedeutung. Die Abbildung 9 verdeutlicht das Vorgehen beim Einsatz der Offline-Simulation.

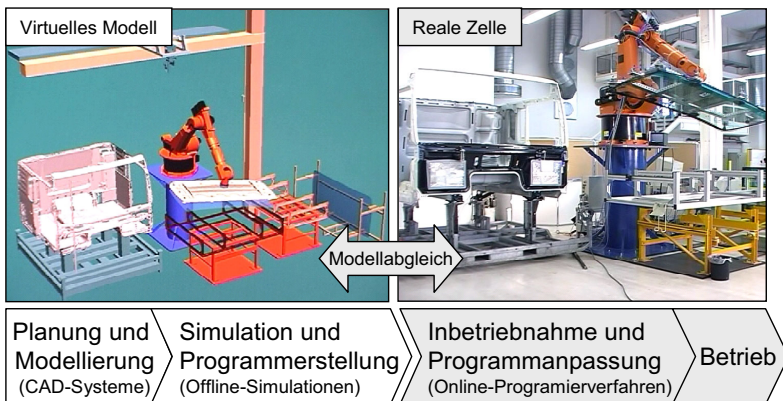


Abbildung 9 Vorgehen bei der simulationsgestützten Programmierung

Da die Programmierung an einem Modell erfolgt, bedarf es nahezu immer einer Anpassung der in der Simulation erstellten Programme an die realen Gegebenheiten. Diese erfolgt zumeist, in einem hybriden Vorgehen, online mithilfe von Lernverfahren (DILTHEY 2005 S. 290; WECK & BRECHER 2006, S. 392). Ferner sind Maßnahmen zur Vermessung und Kompensation der Roboterungenauigkeiten notwendig (BEYER 2005, DENKENA et al. 2005, SPUR & UHLMAN 2005).

Ingesamt ist der Einsatz von Simulationssystemen mit hohen Kosten verbunden (WECK & BRECHER 2006, S. 380). Im Besonderen fällt ein großer Aufwand zur Modellierung der Roboterzellen an (PATRON 2005, S. 18). Die Bedienung der Systeme ist eng an CAD-Werkzeuge angelehnt und erfordert daher Simulations-experten (ZÄH et al. 2004b). Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund einer Verwendung in kleineren Unternehmen problematisch (GOTTSCHALD 2001, S. 18). Für eine flexible Programmierung von Mittel- und Kleinserien, spielen diese Systeme daher eine untergeordnete Rolle.

### **2.3.2.2 Textuelle Programmierung**

Bei der textuellen Programmierung wird ein Roboterprogramm in einer Roboterprogrammiersprache textuell beschrieben (SIEGERT & BOCIONEK 1996, S. 96). Dabei kommen nach BIGGS & MACDONALD (2003) steuerungsnah bzw. steuerungsspezifische Sprachen, generische Hochsprachen und verhaltensorientierte Sprachen zum Einsatz.

Steuerungsnahen Sprachen sind eng an die Hardware des Roboters orientiert und erlauben die Steuerung des Roboters und des Programmflusses durch einfache, BASIC-ähnliche Befehle. Sie sind in ihrem Funktionsumfang stark eingeschränkt und nur für einen Steuerungstyp einsetzbar. Eine höhere Form der Programmierung, die Verwendung von Hochsprachen, kann durch eine Abstrahierung des Roboters und seiner Steuerung erfolgen (BIGGS & MACDONALD 2003). Dadurch können höhere Programmiersprachen wie etwa C++, ergänzt um roboterspezifische Datentypen und Befehle zur Bewegung des Roboters und seiner Effektoren, für die Programmierung verwendet werden (SIEGERT & BOCIONEK 1996, S. 96).

Verhaltensorientierte Sprachen folgen einem grundsätzlich anderen Konzept als prozedurale Sprachen. In ihnen werden Programmabläufe von Robotern nicht in Form von Abläufen und Funktionen spezifiziert, sondern es wird vielmehr festgelegt, wie ein Roboter auf verschiedene Bedingungen und Eingangsgrößen reagieren soll (BIGGS & MACDONALD 2003). Verhaltensorientierte Programmiersätze wie Yampa (HUDAK et al. 2003) und Frob (PETERSON et al. 2001) finden im Bereich der mobilen, sensorgeführten Roboter zunehmend Anwendung, werden bisher aber in der Industrierobotik ausschließlich in Forschungsarbeiten verfolgt (z. B. DAI & KAMPKER 2000).

Die meisten Hersteller von Industrierobotern bieten heute proprietäre steuerungsspezifische Sprachen zur Programmierung ihrer Roboter an. Beispiele hierfür

sind KRL (Kuka), V+ (Adept bzw. Stäubli) und Rapid (ABB). Diese können mittlerweile aufgrund des stark angewachsenen Funktionsumfanges größtenteils als Hochsprachen bezeichnet werden (WECK & BRECHER 2006, S. 393). Die Struktur und die zentralen Sprachelemente von Roboterprogrammiersprachen sind in der Norm Industrial Robot Language (IRL, DIN 66312) definiert. Diese Normung verfolgt das Ziel einer Vereinheitlichung der herstellerspezifischen Programmiersprachen und hat bisher zu deren wechselseitigen Angleichung beigetragen. Eine Form der Strukturierung und Organisation von prozeduralen Programmsequenzen stellen sogenannte Makros dar. Dies sind strukturierte Befehlssequenzen, die, einmal erstellt, für ähnliche Teilaspekte von Fertigungsaufgaben wiederholt eingesetzt werden können. Makros finden beispielsweise in der Programmierung von Schweißaufgaben Anwendung (DILTHEY 2005, S. 289).

Da eine rein textbasierte Programmierung ohne weitere Hilfsmittel das Vorstellungsvermögen des Roboterprogrammierers bei weitem übersteigen würde (WECK & BRECHER 2006, S. 404), wird die textorientierte Programmierung nahezu ausschließlich zusammen mit Robotersimulationssystemen oder in Verbindung mit dem realen Roboter als Testobjekt verwendet. Generell erfordern alle Arten der textuellen Programmerstellung ein gewisses Maß an Programmierkenntnissen und Syntaxverständnis.

### 2.3.2.3 Grafische Programmierung

Programminformationen für Roboter können nicht nur textuell kodiert werden sondern auch in Form grafischer Darstellungen. Nach BIGGS & MACDONALD (2003) werden hierfür entweder Flussdiagramme, Graphen oder diagrammartige Darstellungen des Robotersystems verwendet. Ein äußerst erfolgreiches Exempel für den Einsatz von Flussdiagrammen findet sich in dem Roboterbaukastensystem Lego Mindstorms, bei dem mit sehr einfachen Symbolen Programme für mobile, sensorgeführte Roboter erstellt werden können (BAGNALL 2002). Im Vergleich zu textbasierter Programmerstellung ist eine grafische Programmierung einfacher und intuitiver, da keine Syntaxkenntnisse erforderlich sind (BISCHOFF et al. 2002, WECK & BRECHER 2006, S. 404). Gleichzeitig schränkt sie jedoch die Flexibilität ein (BIGGS & MACDONALD 2003).

In der Programmierung von Industrierobotern finden sich zahlreiche Ansätze einer grafisch orientierten Programmeingabe (WECK & DAMMERTZ 1997, SCHRECK 1998), insbesondere vor dem Hintergrund, dass Werker ohne tiefere Programmierkenntnisse zur Roboterprogrammierung befähigt werden sollen

(GOTTSCHALD 2001, S. 33). Der Bedarf nach Entwurfsrichtlinien für grafische Oberflächen zur Erstellung von Roboterprogrammen wurde im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte adressiert. Unter anderem erarbeitete der deutsche Forschungsverbund MORPHA Empfehlungen zur Struktur und Gestaltung grafischer Bedienoberflächen für Roboter (BISCHOFF et al. 2002). Diese und andere Bemühungen flossen in eine Normungsinitiative zur Standardisierung grafischer Bedienoberflächen für Roboter ein (DIN EN ISO 15178).

Die grafische Programmierung wird bisher nur selten für eine prozessferne Programmerstellung am Bildschirmarbeitsplatz eingesetzt. Im Zusammenspiel mit Touchscreen-Programmierhandgeräten, bietet sie jedoch eine effiziente und intuitive Möglichkeit zur prozessnahen Erstellung von Programmabläufen (KAZI et al. 2005). Auch die Nutzung skizzenhafter Benutzeingaben, wie von DECURTINS & KREMERS (1987) vorgeschlagen, rückt mit heutigen digitalen Stifteingabemethoden in die Nähe der industriellen Anwendbarkeit (SMEROBOT 2006).

### **2.3.3 Verfahren mit Techniken der künstlichen Intelligenz**

Neben den bisher angeführten, im industriellen Kontext verwendeten Verfahren wird seit vielen Jahren am Einsatz von Techniken der Künstlichen Intelligenz (KI) zum Zwecke der Roboterprogrammierung geforscht. Dabei werden Methoden zur Interpretation abstrakter aufgabenorientierter Anweisungen, Methoden zur autonomen Planung der Durchführung von Fertigungsaufgaben und Methoden für das Erlernen neuer Fähigkeiten durch Robotersysteme untersucht.

#### **2.3.3.1 Programmierung durch Vormachen (PbD)**

Die Programmierung durch Vormachen (engl.: Programming by Demonstration, PbD) erscheint als das denkbar einfachste Paradigma der Roboterprogrammierung (SIEGERT & BOCIONEK 1996, S. 93): Der Mensch führt eine Aufgabe vor, der Roboter beobachtet dies mittels geeigneter Sensorik, interpretiert die Handlungen des Menschen und kann die zu Grunde liegende Handlungssequenz anschließend konkret oder sogar abstrahiert ausführen. Gegenstand der Programmierung können dabei einzelne Bewegungen sein, aber auch abstrahierte Fähigkeiten der Manipulation oder ganze Aktionssequenzen (PRASSLER et al. 2005, S. 117). Die Durchführung von PbD kann sowohl am realen Beispiel erfolgen als auch an virtuellen Modellen in einer Simulationsumgebung (ALEOTTI et al. 2004). Dieser Ansatz wurde in zahlreichen Forschungsarbeiten untersucht

(DILLMANN et al. 1999, BIGGS & MACDONALD 2003). Er bietet zweifellos ein großes Potenzial, derzeitige Grenzen der Programmierung zu durchbrechen, ist bisher aber in seiner Anwendbarkeit noch hauptsächlich auf Laborumgebungen beschränkt (ZÖLLNER et al. 2005, S. 119).

Die Herausforderungen für PbD-Systeme liegen zum einen in einer robusten sensorischen Erfassung der menschlichen Handlungen und zum anderen darin, im Idealfall aus nur einem einzigen Beispiel erfolgreich zu lernen (engl.: One-Shot Learning). Dies schließt den Einsatz statistischer Methoden, wie Neuronale Netze, die größere Datenmengen zum Training benötigen, aus. Die meisten Arbeiten setzen deshalb heute symbolische, deduktive Lernverfahren (Explanation-based Generalization, MITCHELL et al. 1986) ein, welche eine Verallgemeinerung von Beispielen auf Basis vorhandenen Domänenwissens erlauben (ZÖLLNER et al. 2005, S. 120). Ein weiterer, wesentlicher Forschungstrend liegt im zunehmenden Einsatz multimodaler Bedienerchnittstellen, mit dem Ziel, eine möglichst effektive Abstimmung zwischen dem Menschen und dem PbD-System zu ermöglichen (BIGGS & MACDONALD 2003).

### 2.3.3.2 Implizite, aufgabenorientierte Programmierung

Eine implizite, rein an Produktionsaufgaben orientierte Programmierung ist weniger ein eigenes Verfahren als vielmehr erklärtes Ziel der Bestrebungen, die Programmierung von Robotern mit Hilfe künstlicher Intelligenz zu automatisieren. Der Programmierer soll nicht mehr festlegen, *wie* ein Roboter eine Aufgabe lösen soll, sondern lediglich spezifizieren, *was* der Roboter tun soll (SIEGERT & BOCIONEK 1996, S. 96). Das Robotersystem muss in der Lage sein, die zu Grunde liegende Planungsaufgabe zu verstehen und zu lösen, das heißt eine Abfolge von Handlungen zu ermitteln, die zu dem gewünschten, durch den Benutzer spezifizierten Zielzustand führt (RUSSELL & NORVIG 2002, S. 375).

Aufgabenorientierte Programmiersysteme sind meist mit Robotersimulationsumgebungen verknüpft, da eine genaue Modellierung der Umwelt des Roboters und der zu bearbeitenden Produkte notwendig ist. Im Verlauf der 1990er Jahre entstanden zahlreiche Arbeiten, bei denen 3D-Simulationsysteme um aufgabenspezifische Module zur Aktions-, Greif-, Bahn- und Fügeplanung erweitert wurden. KUGELMANN (1999) führt hierfür zahlreiche Beispiele aus den Bereichen Laserbearbeitung, Montage und Handhabung an. Auch für schweißtechnische Anwendungen wurden aufgabenorientierte Werkzeuge entwickelt, die oftmals auf Grundlage wissensbasierter Systeme arbeiten (DILTHEY 2005, S. 303).

Bisher sind diese Werkzeuge als aufgabenspezifische Erweiterung vorhandener Offline-Simulationssysteme relativ starr auf eine Anwendung hin ausgelegt (WECK & BRECHER 2006, S. 418). Die Aufgabe, ein flexibel einsetzbares aufgabenorientiertes Programmiersystem bereit zu stellen, kann daher noch nicht als gelöst betrachtet werden (WECK & BRECHER 2006, S. 411). Dennoch stellen aufgabenorientierte Planungsmodule eine nützliche Ergänzung zu der bisherigen simulationsgestützten und textuellen Programmierung dar.

### 2.3.3.3 Instruktiv-dialogorientierte Programmierung

Mit der voranschreitenden Entwicklung neuer Roboterformen, wie Assistenz- und Serviceroboter, gewinnen Verfahren zur interaktiven Instruktion von Robotern zunehmend an Bedeutung. Instruierbare Systeme erhalten in Echtzeit Kommandos vom Benutzer und können diese interpretieren und, gegebenenfalls unter Rückgriff auf zuvor programmierte Elementarfähigkeiten bzw. Aktionsprimitiva, ausführen (BIGGS & MACDONALD 2003). Die Instruktion dieser Systeme ist ebenfalls als implizite, aufgabenorientierte Form der Programmierung zu betrachten. Gerade bei neueren Ansätzen steht jedoch mehr die Kooperation und Interaktion zwischen Mensch und Roboter als eine Programmierung im Zentrum des Interesses. Der Roboter wird in diesem Zusammenhang vom menschlichen Kooperationspartner kommandiert, kann aber – im Sinne einer symmetrischen Interaktion – auch umgekehrt die Handlungen des Menschen koordinieren bzw. mit ihm in Dialog treten (FOSTER et al. 2006).

Instruktive und dialogorientierte Systeme sind eng mit multimodalen Bediener-schnittstellen verknüpft und in hohem Maße komplementär zu PbD-Ansätzen. Ein integriertes System zur multimodalen, dialog-orientierten Zusammenarbeit zwischen einem Menschen und einem mit zwei Manipulatorarmen ausgestatteten Roboter wurde an einem einfachen Montageszenario von KNOLL (2003b) vorgestellt. Das System wird vornehmlich im Hinblick auf Techniken für eine gleichberechtigte Kollaboration zwischen dem Menschen und dem Robotersystem weiterentwickelt und bietet umfangreiche multimodale Interaktionsmöglichkeiten wie Sprache, Gestik und zukünftig auch Blickverfolgung (FOSTER et al. 2006). PIRES (2005) zeigte ein für den industriellen Einsatz ausgelegtes System, bei dem ein Industrieroboter für Pick-and-Place-Aufgaben und für ein einfaches Schweiß-szenario mittels Sprachsteuerung kommandiert wird.

FONG et al. (2006) erarbeiteten eine konzeptionelle Architektur für die Mensch-Roboter-Interaktion, die das Zusammenwirken mehrerer menschlicher und tech-

nischer Agenten in Raumfahrtszenarien vorsieht und Rollenmodelle und Interaktionsmechanismen dafür bereitstellt. Ebenso wurde der Humanoide Leonardo (BREAZEAL et al. 2004) im Hinblick auf die Zusammenarbeit zwischen Menschen und humanoiden Robotern in menschlich geprägten Umgebungen entwickelt. Er kann vom Benutzer instruiert werden, neue Tätigkeiten gelehrt bekommen und mit dem Menschen zusammenwirken. Diese Entwicklungen geben neue Impulse für zukünftige, schnell und flexibel programmierbare Roboterkonzepte für industrielle Anwendungen. Die Programmierung und die Programmausführung gehen dabei zunehmend ineinander über.

### 2.4 Situationsanalyse und Fazit

Betrachtet man den heutigen Einsatz von Industrierobotern (vgl. Abschnitt 2.2), so wird deutlich, dass die Möglichkeiten des Robotereinsatzes in der hoch automatisierten Großserienfertigung weitgehend ausgeschöpft sind. Ein großes Potenzial liegt hingegen in der Ermöglichung eines flexiblen Robotereinsatzes in der Produktion von Mittel- und Kleinserien. Zu der Erschließung dieses Automationspotenziales soll diese Arbeit durch eine Verbesserung der Programmierung einen Beitrag leisten. Es wurden vorangehend die zentralen Verfahren der Roboterprogrammierung erläutert, wobei auf Verfahren der Online-Programmierung (2.3.1), auf Verfahren der Offline-Programmierung (2.3.2) sowie auf Forschungsrichtungen zum Einsatz künstlicher Intelligenz in der Roboterprogrammierung (2.3.3) eingegangen wurde.

Die **Online-Programmierung mit Hilfe von Lernverfahren** (vgl. 2.3.1) ist durch den direkten Bezug zum Prozess sehr anschaulich. Trotz des wachsenden Einsatzes von Offline-Simulationssystemen wird sie weiterhin von großer Bedeutung für die Generierung von Roboterbewegungsabläufen bleiben (WECK & BRECHER 2006, S. 380). Mit diesen Verfahren, insbesondere der Teach-In-Programmierung ist allerdings ein hoher Aufwand verbunden, wenn es um die Erzeugung komplexerer Bewegungsabläufe geht. Darüber hinaus hat der Benutzer außer dem sukzessiven Abfahren mit dem Roboter keine Möglichkeit, die Auswirkungen des Programms zu evaluieren. Es lassen sich hierbei die folgenden Ansatzpunkte zur Verbesserung der Online-Programmierung identifizieren:

- **intuitive, effiziente Eingabemethoden** zur Programmerstellung und
- die **Bereitstellung anschaulicher, visueller Unterstützung**,



- eine effektive **Einbeziehung vorhandener Modelldaten**.

Die **simulationsgestützte Offline-Programmierung** (vgl. 2.3.2) ist in der Großserienfertigung, wo digitale Modelle der Produkte und Anlagen vorliegen, das zentrale Verfahren, um Roboteranlagen zu programmieren. Gleichwohl erfordert ihr Einsatz Simulationsexperten und ist mit einem erheblichen Aufwand zur Erstellung und Pflege der Modelle verbunden. In aller Regel müssen offline erstellte Programme trotzdem noch aufwändig an die realen Gegebenheiten angepasst werden (SPUR & UHLMAN 2005). Die textuelle Programmierung wird, ebenso wie die grafische Programmierung, hauptsächlich zur Definition von Programmabläufen, etwa in der Arbeitsvorbereitung, verwendet. Beide Verfahren werden jedoch kaum für sich alleine eingesetzt, sondern entweder in Verbindung mit einer Simulationsumgebung oder im Rahmen hybrider Ansätze, bei denen die Ermittlung der genauen Bewegungsprogramme am realen Roboter erfolgt (SPUR & UHLMAN 2005; DILTHEY 2005, S. 289). Die zentralen Ansatzpunkte für eine breitere Nutzung von Techniken der Offline-Programmierung liegen daher in

- einer **Unterstützung des Übergangs zwischen Simulation und Realität**
- und dem **effektiven Abgleich von Modellen und realen Gegebenheiten**.
- Eine **Reduzierung des Aufwandes zur Modellerstellung** ist anzustreben,
- wofür eine **effiziente Rückführung von Realgeometrien** in die zu Grunde liegende Modelldatenbasis erforderlich ist.

Nicht zuletzt sind die Entwicklungen der **impliziten Programmierverfahren** (vgl. 2.3.3) zu betrachten. Diese ermöglichen durch den Einsatz von KI-Techniken eine weitgehend automatisierte Erzeugung von Roboterprogrammen und Befehlssequenzen, benötigen dafür aber eine exakte Beschreibung der vorliegenden Produktionsaufgabe und entsprechende Instruktionen durch den Benutzer. Um das Potenzial dieser Ansätze für eine flexible Programmierung von Robotersystemen nutzen zu können, bedarf es vornehmlich einfacher und zweckmäßiger Mensch-Maschine-Schnittstellen, welche auch Personen ohne tiefer gehende Roboterprogrammierkenntnisse zugänglich sind. Schlüsselanforderungen liegen in einer effektiven Benutzerinteraktion zur Aufgabenbeschreibung sowie einer anschaulichen, leicht verständlichen Darstellung der Resultate.

**Automatisierte Planungsverfahren**, ein **zunehmender Sensoreinsatz** und eine **Erhöhung des Autonomiegrades** von Robotersystemen können in Zukunft den Umfang der durch den Menschen zu spezifizierenden Programminhalte weiter

## 2 Robotereinsatz und -programmierung

reduzieren. Ungeachtet dessen ist es für denjenigen Teil der Programmerstellung, der vom Benutzer durchgeführt werden muss, von entscheidender Bedeutung, dass eine möglichst anschauliche, effektive und aufwandsarme Benutzerinteraktion gewährleistet ist. Insbesondere gilt dies für die Visualisierung und die Bearbeitung von räumlichen Informationen und deren Bezug zur realen Umgebung. Diese Aspekte werden von heutigen Verfahren nur unzureichend unterstützt.

Die **Bereitstellung geeigneter interaktiver, räumlicher Benutzerschnittstellen** kann an dieser Stelle wesentlich zur Verbesserung der Programmierung von Robotern beitragen. Augmented Reality, die interaktive Überlagerung des menschlichen Gesichtssinnes mit computergenerierten Informationen, stellt eine Schlüsseltechnologie im Bereich räumlicher Mensch-Maschine-Schnittstellen dar. Sie verspricht eine effiziente Visualisierung und Manipulation von 3D-Informationen, eine effektive Verbindung von virtuellen Modelldaten und realen Gegebenheiten sowie einen hohen Grad an Intuitivität. Es erscheint viel versprechend, damit die vorangehend erörterten, derzeitigen Defizite der Programmierung von Industrierobotern zu adressieren. Ein besonders hohes Potenzial besteht hierbei für diejenigen Aspekte, welche einen großen Anteil an Informationen mit räumlichem Bezug aufweisen, wie etwa die Bahnprogrammierung, die Bearbeitung von Modelldaten oder die geometrische Beschreibung von Produktionsaufgaben. Die Abbildung 10 stellt diese Ansatzpunkte dar.

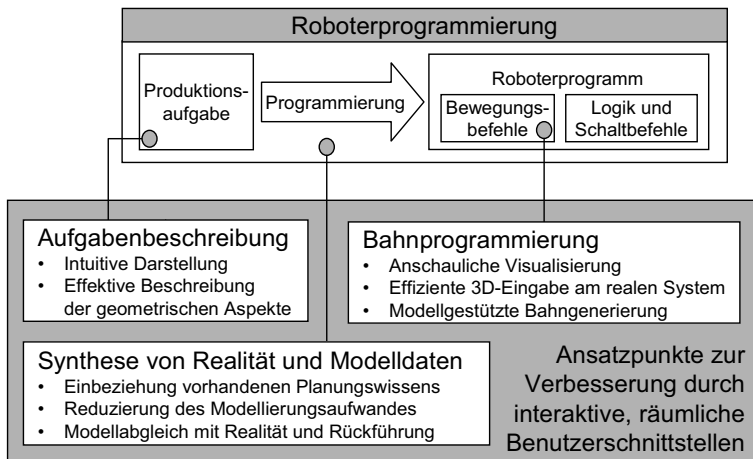


Abbildung 10 Ansatzpunkte zur Unterstützung der Roboterprogrammierung

## 3 Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel wird auf interaktive, räumliche Benutzerschnittstellen im Kontext der Robotik eingegangen. Im Zentrum steht dabei die Technologie Augmented Reality, deren Grundlagen und zentrale Verfahren nachfolgend erläutert werden. Zudem werden bisherige Forschungsansätze zur Nutzung in industriellen Roboteranwendungen analysiert und vergleichend bewertet, so dass abschließend der bestehende Handlungsbedarf charakterisiert werden kann.

### 3.1 Augmented Reality

#### 3.1.1 Begriffsklärung

Der Ausdruck Augmented Reality, zu deutsch: „Erweiterte Realität“, steht für die interaktive Überlagerung der menschlichen Wahrnehmung mit synthetischen, computergenerierten Informationen (KLINKER et al. 1997). Die am weitesten verwendete Definition von AZUMA (1997) charakterisiert AR-Systeme durch die Vereinigung der folgenden drei Eigenschaften:

- **Kombination realer und virtueller Objekte** in der realen Umgebung: Der Benutzer nimmt virtuelle Objekte in seinem realen Umfeld wahr.
- **Interaktivität** im Sinne eines Ablaufes in Echtzeit: Die virtuellen Objekte reagieren unmittelbar auf Bewegungen und Aktionen des Benutzers.
- **Räumliche Registrierung** realer und virtueller Objekte: Die virtuellen Objekte erscheinen räumlich in der Umgebung verankert zu sein.

Obwohl die künstliche Stimulation der menschlichen Wahrnehmung gleichfalls auf andere Sinne, wie beispielsweise das Gehör (COHEN et al. 1993), das Tastempfinden (VOGL et al. 2006) oder das Vestibularsensorium bzw. den Gleichgewichtssinn (FITZPATRICK et al. 2006) anwendbar ist, steht die Anreicherung des menschlichen Gesichtssinnes im Fokus der Erforschung und Anwendung von AR (MILGRAM & KISHINO 1994, KLINKER et al. 1997). Eine weiterführende Darstellung der Entstehung und der Entwicklung der AR-Technologie findet sich im Anhang (vgl. Abschnitt 10.1).

#### 3.1.2 Funktionsprinzip von AR-Systemen

AR-Systeme reichern die Umgebung des Menschen bzw. seine visuelle Wahrnehmung mit computergenerierten Informationen an (KLINKER et al. 1997). Der Mensch kann dadurch Dinge sehen, die sonst außerhalb seiner sensorischen Fähigkeiten lägen und kann situationsbezogen mit Informationen versorgt werden (AZUMA 1997). Die Wahrnehmung und die kognitiven Fähigkeiten des Menschen werden dadurch nach BROOKS (1996) so verstärkt, dass der Mensch die Durchführung von Aufgaben besser bewältigen kann.

Für die situations- und lagegerechte Anreicherung der menschlichen Wahrnehmung mit virtuellen Informationen liegt AR-Systemen ein allgemeines Prinzip zu Grunde (vgl. Abbildung 11). Sie erfassen den Anwender und sein Umfeld mittels technischer Sensorik, oftmals mit Methoden der Bildverarbeitung. Darauf basierend werden Modelldaten so aufbereitet und mit Methoden der Computergraphik dargestellt, dass sie sich in Bezug auf die Größe, ihre Lage im Raum und ihre Orientierung kongruent zur Perspektive des Benutzers verhalten und sich in sein Blickfeld einfügen. Die so aufbereiteten Informationen werden dem Menschen über ein geeignetes Anzeigesystem mit dem realen Umfeld überlagert präsentiert. Dieser Ablauf findet per definitionem in Echtzeit statt (AZUMA 1997), so dass Aktionen des Benutzers, wie eine Veränderung der Blickrichtung oder auch Manipulationen realer oder virtueller Objekte, eine unmittelbare Reaktion des Systems hervorrufen.

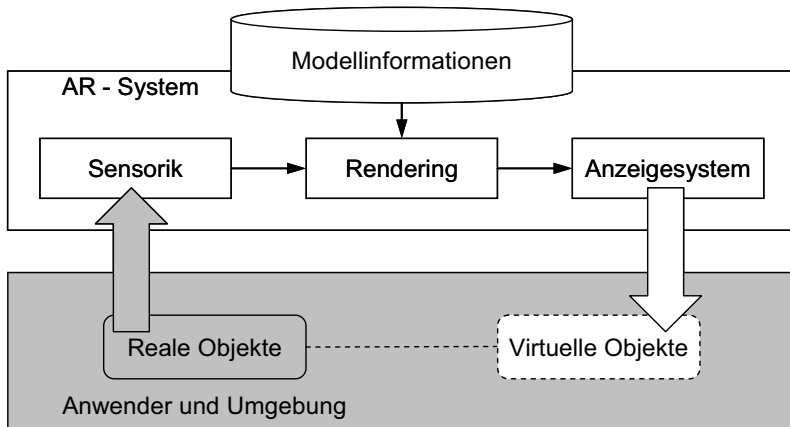


Abbildung 11 Funktionsprinzip von Augmented-Reality-Systemen

Die zentralen Aspekte und Funktionsbereiche von AR-Systemen sind demnach:

- **Sensorik:** Für eine präzise und robuste Registrierung der virtuellen Objekte in der realen Umgebung ist es notwendig, die Bewegungen des Benutzers und die von Objekten in der Umgebung in Echtzeit zu verfolgen und auszuwerten. Die räumliche Positionserfassung (engl.: Tracking) mit sechs Freiheitsgraden (engl.: degrees of freedom, DOF) stellt daher eine wichtige Anforderung an AR-Systeme dar (WAGNER 2005, S. 3).
- **Modelldaten:** Die zur Anreicherung der realen Umwelt mit virtuellen Objekten benötigten Daten müssen strukturiert bereitgestellt werden. Geometrische Modelle, Szenenbeschreibungen und Informationstexte müssen mit Bezug zur realen Umwelt hinterlegt sein (PATRON 2005, S. 22).
- **Rendering:** Die Erzeugung digitaler Bilddaten auf Basis von Modellen wird in der Computergraphik als Rendering bezeichnet. Bei AR-Systemen muss unter Berücksichtigung der Trackinginformation aus den Modelldaten ein virtuelles Bild erzeugt werden, welches sich kongruent in die vom Benutzer betrachtete Szene einfügt (BIMBER 2002). Weiterhin sind Darstellungsformen und Metaphern notwendig, die virtuelle und reale Objekte realistisch und eindeutig erscheinen lassen (FISCHER 2006) sowie Annotationen übersichtlich organisieren (ZHANG & SUN 2005).
- **Anzeigesysteme:** Die virtuellen Informationen müssen mit der realen Umwelt überlagert angezeigt werden. Dies kann prinzipiell auf zwei Arten erfolgen: Bei See-Through-Systemen betrachtet der Anwender die Umgebung durch das Anzeigesystem hindurch und virtuelle Informationen werden digital oder optisch überlagert (MILGRAM et al. 1994). Demgegenüber stellen projektionsbasierte Systeme die virtuellen Objekte durch Projektion auf Objekte der realen Umgebung dar (RASKAR et al. 1998).
- **Interaktion:** Der Benutzer muss sowohl auf seine reale Umgebung als auch auf die virtuellen Informationen einwirken und das AR-System effektiv steuern können. Dabei werden Metaphern wie grafische Menüs und Verfahren der Virtual Reality wie zum Beispiel 6-DOF-Eingabe verwendet (AZUMA et al. 2001). Weiterhin kommen multimodale Interaktionstechniken wie Gestik und Sprache (KÖLSCH et al. 2006) und sogenannte „Tangible User Interfaces“, welche die Interaktion an die Manipulation realer Objekte knüpfen, zum Einsatz (ULLMER & ISHII 2001).

Für die Beschreibung und Verwaltung von Modelldaten kann, ebenso wie im Bereich der Renderingtechnologien weitgehend auf Techniken und Verfahren der Virtuellen Realität zurückgegriffen werden (AZUMA 1997). Darüber hinaus wurden leistungsfähige AR-spezifische Modellierungswerkzeuge (SANDOR 2005, ZAUNER et al. 2003) und Renderingmethoden (BIMBER 2002, BIMBER & RASKAR 2006, FISCHER 2006) entwickelt. Die Aspekte Modelldatenerstellung und Rendering werden deshalb im weiteren Verlauf der Arbeit nicht vertieft.

Für eine Anwendung im realen Umfeld, sind AR-Systeme uneingeschränkt robust, funktionell und flexibel zu gestalten (BIMBER 2002, S. 1). Für einen Einsatz in der industriellen Produktion gilt dies in besonderem Maß. Die hauptsächlichen Problemkreise, welche die Anwendbarkeit der AR-Technologie in der Produktion derzeit noch erheblich einschränken, stellen das Tracking und die Anzeigesysteme dar (PATRON 2005, S. 114). Der Stand der Technik von AR-Visualisierungsverfahren wird deshalb in Abschnitt 3.2 und der von Positionserfassungssystemen in Abschnitt 3.3 betrachtet. Dabei wird auf die Anwendbarkeit im Kontext der Industrierobotik eingegangen. Weiterhin werden in Abschnitt 3.4 die heute verfügbaren Interaktionsmechanismen vorgestellt.

## 3.2 Visualisierungsverfahren

Zur Anzeige virtueller Informationen in der realen Umwelt stehen zwei grundlegende Techniken zur Verfügung: Videomischung zum einen, optische Überlagerung zum anderen (BIMBER 2002, S. 36). Bei der Videomischung werden Videobilder der realen Umgebung in Echtzeit mit Computergraphik gemischt und dem Benutzer angezeigt. Bei der optischen Überlagerung wird ein computergeneriertes Bild entweder durch Einspiegelung in das Blickfeld des Menschen oder durch Projektion in die reale Umgebung angezeigt. Als Anzeigesysteme kommen Monitore, in der Hand gehaltene Geräte, Head-Mounted Displays (HMD) und Projektoren zum Einsatz (AZUMA et al. 2001). Diese können jeweils monoskopisch oder stereoskopisch ausgeführt sein.

Die einfachste Konfiguration eines AR-Anzeigesystems stellt monitorbasiertes AR (MAR) dar. Dabei wird ein von einer Kamera aufgenommener Videostream mit Computergraphik überlagert auf einem Monitor dargestellt (MILGRAM et al. 1991). Dieses technisch sehr einfache Verfahren wird wegen der zu Grunde liegenden Metapher eines Fensters auch als „Window on the World“ bezeichnet (MILGRAM et al. 1994).

Zunächst wurden neben Monitoren vorwiegend Datenbrillen (engl.: Head-Mounted-Displays, HMD) im Zusammenhang mit AR-Anwendungen betrachtet (MILGRAM & KISHINO 1994, MILGRAM et al. 1994, AZUMA 1997). Sogenannte „See-Through“ Datenbrillen lassen den Anwender entweder durch Videomischung oder durch optische Einspiegelung sowohl die reale Umgebung als auch virtuelle Informationen sehen. Video See-Through (VST) Systeme nehmen die Umgebung durch Kameras auf und zeigen das Videobild überlagert mit Computergraphik an. Optical See-Through (OST) Systeme sind halbdurchlässig und spiegeln die virtuelle Graphik durch Strahlteilung in das Sichtfeld ein. Beide Ansätze weisen unterschiedliche Ausprägungen im Hinblick auf wichtige Eigenschaften wie Nachschleppen der Anzeige, Wahrnehmungstiefe und Nutzerakzeptanz auf (ROLLAND et al. 1995). Eine detaillierte Übersicht heute verfügbarer HMD-Technologien wurde von ÇAKMAKCI & ROLLAND (2006) vorgestellt.

Trotz zahlreicher ergonomischer und technischer Einschränkungen sind HMD auch heute noch die dominierenden Anzeigemedien der Augmented Reality (BIMBER 2002; PATRON 2005 S. 25). Mit dem von RASKAR et al. (1998) vorgeschlagenen Konzept „Spatially Augmented Reality“, bei dem Displaysysteme nicht am Körper des Benutzers angebracht werden, sondern in die Umgebung integriert sind, rückte jedoch ebenso der Einsatz von Projektoren zunehmend in das Interesse der AR-Forschung. Dieser ist mit technischen Einschränkungen, wie möglicher Verdeckung der Anzeige durch den Benutzer und hohem Aufwand zur Realisierung unverzerrter Projektion behaftet, bringt aber gleichzeitig entscheidende ergonomische Vorteile durch den Entfall körpergebundener Displaygeräte (PATRON 2005, S. 25). BIMBER & RASKAR (2006) haben hierzu viel versprechende Ansätze der Projektions-AR (PAR) entwickelt, bei denen Projektoren virtuelle Informationen direkt auf Objekte in der realen Umgebung projizieren und Oberflächenkonturen wie auch Texturen kompensiert werden können.

Die Anzeigeverfahren der Augmented Reality umfassen nach PATRON (2005, S. 23) monitorbasierte Anzeigesysteme (MAR), Video See-Through (VST), Optical See-Through (OST) und Projektions-AR (PAR). Typische Ausprägungen dieser Verfahren sind in Abbildung 12 dargestellt. HMD-basierte Ansätze wie VST und OST bedürfen in jedem Fall eines Trackingsystems, um die Kopfposition des Benutzers zu erfassen und eine lagegerechte Visualisierung zu erzeugen. Bei MAR wird Tracking nur benötigt, wenn die Kamera bewegt wird. PAR-Ansätze benötigen Tracking der Kopfposition des Benutzers bei blickabhängigen, stereoskopischen Renderingtechniken.

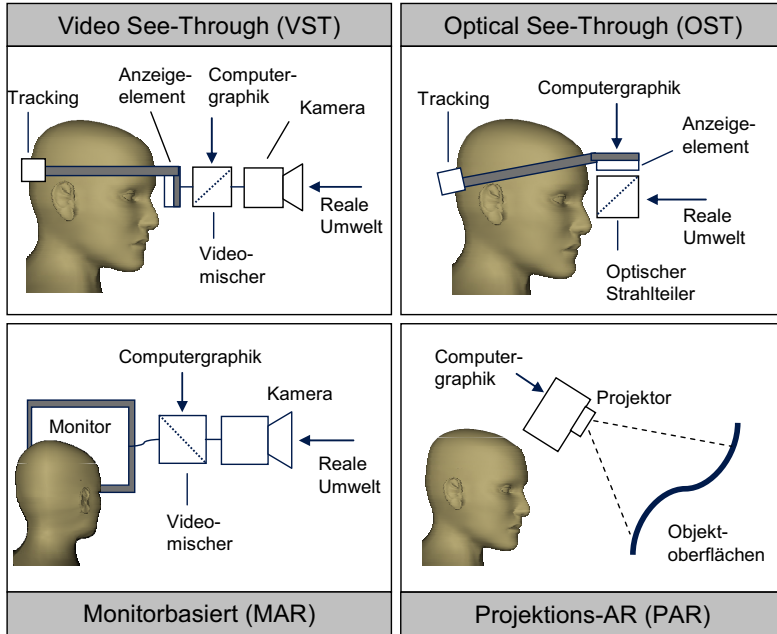


Abbildung 12 Anzeigeverfahren für Augmented Reality

In einer von MILGRAM et al. (1994) entwickelten Taxonomie zur Klassifizierung von AR-Displays sind drei wesentliche Einordnungskriterien festgehalten, welche die Sicht des Benutzers durch ein Displaysystem beschreiben:

- **Perspektive:** Immersive<sup>2</sup>, egozentrische Displays stellen demnach die Umgebung aus der Perspektive des Betrachters dar, während exozentrische Displays eine beliebige, externe Sicht auf die Umgebung ermöglichen.
- **Unmittelbarkeit:** Bei direkten Anzeigeverfahren sieht der Benutzer die reale Welt, bei indirekten sieht er ein aufgenommenes, in der Regel digitales Abbild.
- **Skalierung:** Orthoskopische Abbildungen stellen Objekte in Realgröße dar (1:1) während nicht-orthoskopische Abbildungen eine Skalierung zulassen (1:k).

<sup>2</sup> Immersion beschreibt das Eintauchen in eine künstliche oder teilsynthetische Realität.



Die Tabelle 1 fasst diese und weitere grundlegende Eigenschaften für die typischen Anzeigekonfigurationen MAR, VST, OST und PAR zusammen.

*Tabelle 1 Eigenschaften von AR-Anzeigeverfahren*

	AR-Visualisierungstechniken			
Merkmale	Monitor-AR	Video See-Through	Optical See-Through	Projektions-AR
Überlagerungsverfahren	Videomischung	Videomischung	optische Einblendung	optische Überblendung
Anzeigegeräte	Monitore, Tablet-PCs	Video-HMD mit Kameras	optisch durchlässige HMD	Projektoren
Umgebungssicht	indirekt	indirekt	direkt	direkt
Perspektive	ex.	eg.	eg.	eg.
Abbildung	1:k	1:1	1:1	1:1

eg...egozentrisch, ex...exozentrisch, 1:1...orthographisch, 1:k...nicht orthographisch

### 3.2.1 Monitorbasierte Systeme (MAR)

Monitorbasierte Systeme sind die einfachste Konfiguration von AR-Anzeigesystemen. Sie basieren auf Videomischung, stellen dem Benutzer eine indirekte Sicht auf die Umgebung aus einer exozentrischen Perspektive dar und erlauben damit auch eine Skalierung. Anzeigegeräte können monoskopisch und autostereoskopische Monitore (MILGRAM et al. 1991) sein, aber auch mobile Geräte wie Tablet-PCs, PDAs oder Mobiltelefone, sofern diese mit einer Kamera ausgestattet sind (EBBESMEYER et al. 2002, PASMAN et al. 2004, WAGNER & SCHMALSTIEG 2006, MOEHRING et al. 2004).

Das Verfahren ist sehr einfach und robust zu implementieren, bietet aber nur einen niedrigen Immersionsgrad, da die Umwelt durch eine vergleichsweise kleine Anzeigefläche betrachtet wird (PATRON 2005, S. 24) und lediglich eine indirekte Interaktion mit der AR-Umgebung möglich ist (MILGRAM et al. 1994). Aus produktionstechnischer Perspektive weist MAR den Nachteil auf, dass der Benutzer seinen Blick vom eigentlichen Zentrum der Tätigkeit abwenden und auf einen Monitor richten muss. Für die Unterstützung von Produktionsvorgängen, etwa in der manuellen Montage, bedeutet dies eine zusätzliche nicht wertschöpfende Tätigkeit. Gleichzeitig ist MAR aber auch das einzige Verfahren, das es erlaubt,

sofern Kamera- und Anzeigesystem voneinander getrennt sind, die virtuell angeereicherte Umgebung aus einer exozentrischen Perspektive zu betrachten.

#### 3.2.2 Head-Mounted Displays (HMD)

Head-Mounted Displays sind Anzeigeräte, welche durch Vorrichtungen am Kopf befestigt sind und dem Benutzer durch eine oder zwei Bildquellen und entsprechende optische Apparaturen symbolische oder bildliche Informationen anzeigen (PATTERSON et al. 2006). Wird die Kopfposition des Benutzers getrackt und darauf basierend die Bildinformation interaktiv angepasst, so können Head-Mounted Displays (HMD) ein perspektivisches Bild darstellen, das sich den Bewegungen des Menschen entsprechend verändert (SUTHERLAND 1968). Durch die Übereinstimmung der kinästhetischen Wahrnehmung der Kopfbewegung und der visuellen Wahrnehmung entsteht – selbst ohne stereoskopische Darstellung – ein guter Tiefeneindruck und virtuelle Objekte wirken räumlich registriert.

HMD sind egozentrische, also immersive Anzeigeräte. Sie stellen die Umgebung orthoskopisch in Realgröße dar und lassen den Benutzer die reale Welt entweder indirekt (Video See-Through, VST) oder direkt (Optical See-Through, OST) wahrnehmen (BIMBER 2002, S. 37). Die Abbildung 13 zeigt beispielhaft ein stereoskopisches VST-System, welches für die vorliegende Arbeit aufgebaut und als Testsystem genutzt wurde. Die technischen Grundlagen und eine Charakterisierung von HMD sind vertieft im Anhang ausgeführt (vgl. Abschnitt 10.2).

Im Hinblick auf ihre Ergonomie und ihre Einsatztauglichkeit sind HMD als problematisch einzustufen. Als wesentliche Faktoren sind **eine unnatürliche und eingeschränkte optische Wahrnehmung, ein hohes Gewicht, erhebliche Baugrößen sowie eine geringe Robustheit und Auflösung** zu nennen. Diese Einschränkungen stehen einem produktiven Einsatz dieser Anzeigesysteme – abgesehen von einer reinen mobilen Datensichtung – bis heute entgegen. Eine detaillierte Analyse dieser Aspekte findet sich im Anhang (vgl. Abschnitt 10.2.2). Insbesondere im vorliegenden Fall der Programmierung von Robotern sind komplexe räumliche Informationen mit hoher Präzision darzustellen. Gleichzeitig sind durch den Einsatz in der Produktion höchste Anforderungen an Robustheit, Ergonomie und Sicherheit zu erfüllen. Es ist dabei erforderlich, dass die AR-Systeme sich trotz stark variierender Umgebungsbedingungen robust und flexibel einsetzen lassen. Ein produktiver Einsatz von HMD erscheint im Umfeld der Industrierobotik auch in Zukunft nicht absehbar (ZÄH & VOGL 2006).

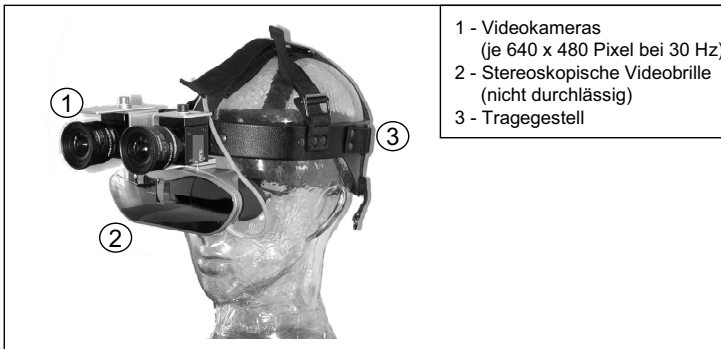


Abbildung 13 Stereoskopisches HMD (Video See-Through)

### 3.2.3 Räumlich erweiterte Realität (Spatial AR)

Im Bereich der Virtual Reality hat aufgrund der mit HMD verbundenen Probleme in den 1990er Jahren eine Umorientierung hin zu projektionsbasierten Displays stattgefunden (BIMBER 2002, S. 1). Inspiriert von den vollimmersiven Projektionsräumen, den sogenannten CAVEs (CRUZ-NEIRA et al. 1992), entwickelten RASKAR et al. (1998) das Konzept der Spatially Augmented Reality. Sie bezeichnen mit diesem Begriff solche AR-Systeme, bei denen „virtuelle Objekte direkt in der physikalischen Umgebung des Betrachters dargestellt werden, anstatt nur in das Blickfeld eingeblendet zu werden“. Wenngleich darunter auch andere Anzeigemedien, wie transparente Spiegel, Holographie oder in die Umgebung integrierte flexible LCD-Displays fallen können, stellt Projektion das zentrale Anzeigemedium dieser Forschungsrichtung dar.

PAR-Displays sind egozentrisch und orthoskopisch, das heißt der Benutzer sieht die Umgebung aus seiner natürlichen Blickposition und in Originalgröße (vgl. Tabelle 1, S. 35). Sie erlauben eine direkte Sicht auf die Umgebung und eine unmittelbare Interaktion. Es finden sich in der Literatur auch Ansätze zu am Kopf getragenen Projektionssystemen (HUA et al. 2000, INAMI et al. 2000) und zu mobilen, in der Hand gehaltenen Projektoren, welche über Sensorik eine positionsstabilisierte, kontext-sensitive Anzeige von Informationen ermöglichen (RASKAR et al. 2004, RAPP et al. 2004). Das Hauptpotenzial der Projektionsdisplays liegt jedoch im Vergleich zu am Körper oder Kopf getragenen Displays darin, dass die Anzeigegeräte vom Benutzer getrennt in der Umgebung angebracht werden können (BIMBER 2002, S. 33). Dies eröffnet die Möglichkeit, die

mit HMD verbundenen Probleme hinsichtlich technischer und ergonomischer Aspekte zu umgehen, ist aber gleichzeitig weniger gut für mobile Anwendungen geeignet (BIMBER & RASKAR 2006, S. 7). Die Abbildung 14 stellt die unterschiedlichen Formen der Anbringung für AR-Displays schematisch dar und unterscheidet dabei die drei Klassen der am Kopf getragenen, der in der Hand gehaltenen und der in den Raum integrierten Anzeigegeräte.

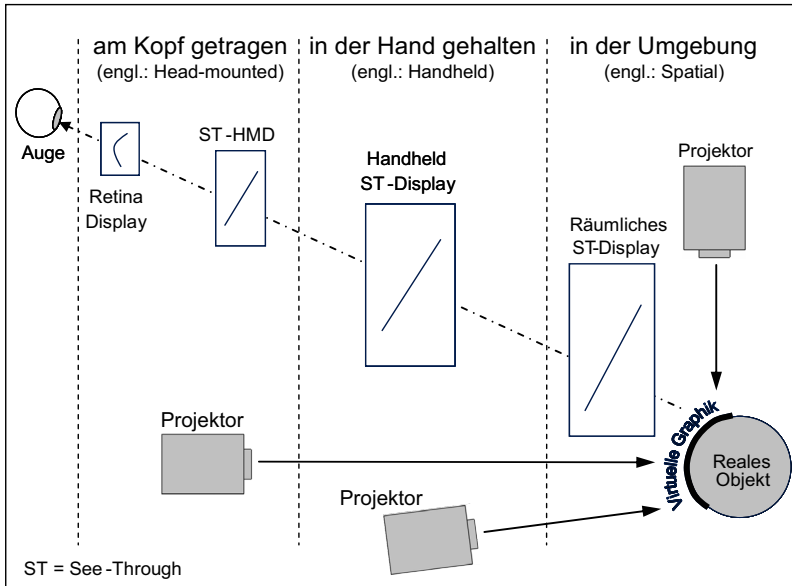


Abbildung 14 Displayanbringung nach BIMBER & RASKAR (2006, S. 72)

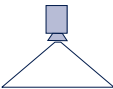
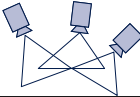
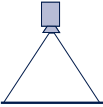

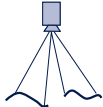
#### 3.2.3.1 Projektion auf beliebige Umgebungsoberflächen

Mittels eines Projektors kann im Grunde nur die Farbe, Leuchtstärke oder Textur einer ebenen Oberfläche verändert werden. Durch entsprechende Verfahren der Vorverzerrung, ist bei bekannter Oberflächentopographie und Kopfposition des Betrachters allerdings auch die korrekte Projektion von Bildern auf unregelmäßig geformten, unebenen Oberflächen möglich (Raskar et al 1998).

BIMBER et al. (2005a) stellen ein System vor, bei dem durch geeignete Kombination von Kameras und Projektoren die wesentlichen Eigenschaften der Umgebungsoberflächen erfasst und durch Renderingverfahren kompensiert werden. Dabei wird die Topographie der Oberfläche durch Streifenprojektion ermittelt.

Weiterhin werden die Textur und die Ausleuchtung der Oberfläche pixelweise durch Kameras erfasst und beim Rendering berücksichtigt. Damit ist es möglich, auf beliebigen texturierten Oberflächen Text, Graphik und Bildinformationen unverzerrt anzuzeigen. Werden Stereoprojektionssysteme mit Shutterbrillen verwendet, so kann auch ein Tiefeneindruck beim Betrachter erzeugt werden, der die projizierten Inhalte vor bzw. hinter den Projektionsoberflächen erscheinen lässt (RASKAR et al. 1998). Es wurden außerdem Kalibrierungsmethoden entwickelt, die es erlauben, mehrere Projektoren zu einer gemeinsamen Anzeigefläche zu kombinieren (RASKAR et al. 2002, BIMBER & EMMERLING 2006). Dadurch kann zum einen eine Vergrößerung der Anzeigefläche, zum anderen eine Ausdehnung des Tiefenbereichs, in dem scharf projiziert wird, erreicht werden. Die Tabelle 2 stellt grundlegende Eigenschaften solcher Projektionsanzeigen dar.

*Tabelle 2 Konfigurationsraum für PAR-Anzeigesysteme*

Charakteristika	Mögliche Ausprägungen
Tiefendarstellung	monoskopisch   stereoskopisch
Anzahl Projektoren	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>1</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>...</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>n</p>  </div> </div>
Projektionsrichtung	Frontprojektion   Rückprojektion
Art der Anzeigefläche	transparentes Medium   reale Objektoberfläche
Geometrie der Anzeigefläche	eben, regelmäßig   uneben, kontinuierlich   uneben, diskontinuierlich <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div>
Projektionsinhalte	3D-Punkte   3D-Polygonzüge   Texte   2D-Graphik   3D-Graphik
Modifizierbare Objekteigenschaften	Farbe   Helligkeit   Textur   geometrische Erscheinung
Berücksichtigung bei Rendering	Kopfposition   Oberflächengeometrie   Textur   Beleuchtung

Durch geometrische Entzerrung, Kompensation der radiometrischen Oberflächeneigenschaften und Kombination mehrerer Projektoren bzw. multifokale Projektion lassen sich also PAR-Visualisierungen auf beliebig geformten, farbigen und texturierten Umgebungsoberflächen realisieren (BIMBER & RASKAR 2006, S. 318). Mit diesen Visualisierungsansätzen kann die Erscheinung von realen Objekten umfassend verändert werden. Die visuelle Umgebungswahrnehmung des Benutzers, insbesondere die Tiefenwahrnehmung wird dabei – im Gegensatz zu HMD (vgl. Anhang 10.2) – nicht eingeschränkt. Die Projektion ist allerdings immer an das Vorhandensein einer geeigneten Projektionsfläche gebunden, so dass, anders als bei See-Through Displays, virtuelle Objekte nicht beliebig frei im Raum dargestellt werden können (BIMBER & RASKAR 2006, S. 320).

#### 3.2.3.2 Projektionsgeräte

Als Anzeigegeräte kommen bei den bisher geschilderten Ansätzen fast ausschließlich Videoprojektoren, auch Beamer genannt, zum Einsatz. Diese basieren je nach Bauart auf Kathodenstrahlröhren (CRT), Flüssigkristallanzeigen (LCD und LCOS) oder Spiegelarrays (DLP) als bildgebendem Element, welches entweder von konventionellen Lampen oder Leuchtdioden (LED) beleuchtet wird. Gerade LCOS- und DLP-Projektoren mit LED-Beleuchtung (z. B. TOSHIBA 2006) werden stetig kompakter bei steigender Leistungsfähigkeit (BIMBER & RASKAR 2006, S. 321). Die zentralen Einschränkungen hinsichtlich eines Einsatzes in AR-Systemen sind derzeit zum einen die begrenzte Leuchtstärke, zum anderen der geringe Tiefenbereich, in dem fokussiert projiziert werden kann.

Die Verwendung von Laserprojektoren kann diese Nachteile kompensieren (BIMBER & RASKAR 2006, S. 322), da die Projektion über die gesamte Tiefe des Projektionsraumes fokussiert bleibt und extrem hohe Leuchtstärken und Kontrastwerte realisiert werden können. Anders als Videobeamer weisen Laserprojektoren kein bildgebendes Element auf, sondern erzeugen die Projektion durch schnelle Ablenkung von Laserstrahlen (engl.: Scanning).

Eine heute gut verfügbare und robuste Projektionsmöglichkeit zur räumlich registrierten Anzeige von 3D-Daten stellen industrielle Laserprojektoren basierend auf Galvanometerscannern dar (ZÄH et al. 2006). Diese Geräte besitzen eine oder mehrere Laserquellen, mit denen durch Strahlablenkung mehrfarbige Polygonzüge und Text mit hoher Präzision in einem großen Arbeitsbereich projiziert werden. Sie finden bisher Anwendung als statische Anzeigen zur Montagehilfe und bei der Einrichtung von NC-Maschinen (FISHER MASON 2004). Allerdings ist

keine Darstellung von Graphik möglich und es kann nur eine vergleichsweise geringe Anzahl an Polygonpunkten ohne Flackern dargestellt werden.

Für den Hochleistungsvisualisierungsbereich existieren bereits mehrfarbige, voll-graphikfähige scannende Laserprojektoren, die diese Nachteile nicht mehr aufweisen (JENOPTIK 2006). Eine Verfügbarkeit dieser Geräte in hinreichender Kompaktheit ist dagegen noch nicht absehbar. Weiterhin befinden sich miniaturisierte Projektoren mit Laserdioden als Lichtquellen in der Entwicklung. Es wurden bereits zahlreiche Prototypen solcher Miniaturprojektoren vorgestellt, die entweder Mikrodисplays verwenden (LIGHT BLUE OPTICS 2007, EXPLAY 2007) oder scannend projizieren (SYMBOL 2007, MICROVISION 2007). KAHRS et al. (2006) stellten einen solchen scannenden Miniaturlaserprojektor für AR-Visualisierungen in der Chirurgie vor. Mittelfristig ist mit einer weit reichenden Verbreitung von kompakten Projektoren als Anzeigeelement in Konsumgütern, wie Mobiltelefonen und Notebooks zu rechnen.

### 3.2.3.3 Anwendungen von Projektions-AR

Die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Visualisierungsansätze der PAR, sind bisher vor allem in stationären Anwendungen im Multimediabereich, beispielsweise für interaktive Exponate in Museen (BIMBER et al. 2005a) im Einsatz. Die Visualisierung architektonischer Gestaltungsmöglichkeiten stellt ein weiteres Anwendungsszenario dar (vgl. Abbildung 15). Die dabei verwendeten Systeme sind hinsichtlich ihrer Präzision, Robustheit und Leistungsfähigkeit noch nicht für den Einsatz im industriellen Umfeld geeignet, zeigen aber dennoch viel versprechende Perspektiven für zukünftige AR-Systeme ohne körpergebundene Displays auf (BIMBER & RASKAR 2006, S. 320).



Abbildung 15 PAR in architektonischen Anwendungen (BIMBER et al. 2005b)

Einfachere Anwendungen von Projektionsdisplays, bei denen im Wesentlichen 2D-Graphik unverzerrt auf ebene Umgebungsoberflächen projiziert wird, finden sich in Verbindung mit bildverarbeitenden Verfahren, welche eine Interaktion mit dem Benutzer ermöglichen. Diese Systeme werden als Projektor-Kamera-Paare bzw. steuerbare Projektoren bezeichnet. „DigitalDesk“ (WELLNER 1993) war eines der ersten dieser Systeme, welches einen Projektor und eine Kamera kombinierte, um interaktive räumliche Benutzerschnittstellen zu schaffen. So konnte der Benutzer auf einer Tischfläche über der ein Projektor und eine Kamera montiert waren, mit den projizierten Inhalten direkt interagieren, und so mit einem optisch getrackten Stift schreiben, Dokumente editieren und projizierte Menüs bedienen.

Der „Everywhere-Projektor“ (PINHANEZ 2001) ist ebenfalls ein Projektor-Kamera-Paar, bei dem eine Schwenk-/Neigeeinheit mit Spiegeloptik für eine Erweiterung des Arbeitsbereiches sorgt. Das System kann Graphik und Text in die reale Umgebung projizieren. Durch optisches Tracking der Hände des Benutzers kann dieser auf die projizierten Inhalte, ähnlich wie an einem Touchscreen, direkt einwirken (PINHANEZ 2001). Die zunehmend robuster werdenden Verfahren des Handtrackings und der Gestenerkennung (OKA et al. 2002) ermöglichen dabei auch präzise Interaktionen mit projizierten Fenstern und Menüs. Dies kann zur Schaffung sogenannter intelligenter Umgebungen, mit nahtlos integrierter Rechnerunterstützung eingesetzt werden (BORKOWSKI et al. 2004). Steuerbare Projektoren könnten zukünftig in verschiedenen Anwendungen im Büro, in industriellen Umgebungen und im Haushalt eingesetzt werden (PINHANEZ et al. 2003).

Auch heute finden sich schon erste Produkte, die an diese Technologien angelehnt sind. Projizierte Tastaturen (ROEBER et al. 2003) stellen virtuelle Tasten durch Projektion auf ebene Flächen dar. Sie erfassen mittels Infrarotsensorik die Bewegungen der Finger, so dass die virtuellen Tasten betätigt werden können. Interaktive, auf Projektion basierende Smartboards ermöglichen es, auf die Präsentationsfläche mittels eines optisch getrackten Stiftes zu zeichnen und ähnlich wie mit einem Touchscreen zu interagieren (SMART 2008). Der Prototyp „Drag and Draw“ von PHILLIPS (2006) führt dieses Konzept als Kinderspielzeug aus: Ein tragbarer Projektor gestattet das Zeichnen virtueller Graphik auf Wände.

Ein weiteres Beispiel für die direkte Interaktion mit der Umgebung stellt das für Logistikanwendungen gedachte System „RFIG Lamp“ (RASKAR et al. 2004) dar. Es handelt sich dabei um ein mobiles, in der Hand gehaltenes Projektorensystem, das durch funkbasierte Identssysteme und optische Lokalisierungsmethoden ge-



zielt in einem Raum, etwa in einem Lager, befindliche Objekte lokalisiert und durch Projektion kenntlich macht. Darüber hinaus finden Projektionsdisplays Anwendung in der architektonischen Visualisierung (LOW et al. 2001, BIMBER et al. 2005b) und in der computergestützten Chirurgie zur Darstellung von Operationsplanungsdaten (GLOSSOP et al. 2004, WÖRN et al. 2005).

Interaktive Projektion bietet gleichfalls für die Kommunikation zwischen Mensch und Roboter viel versprechende Perspektiven (ZÄH & VOGL 2006). Ein Kamera-Projektor-System, bei dem der Mensch einen virtuellen Cursor mit Zeigegesten im Raum positionieren kann, wurde von SATO & SAKANE (2000) vorgestellt. Auch BORKOWSKI et al. (2004) diskutierten den Einsatz steuerbarer Projektoren als ein Medium für zukünftige Mensch-Roboter-Schnittstellen. Diese und weitere Ansätze zum Einsatz projektionsgestützter AR in der Robotik werden in Abschnitt 3.5 detailliert betrachtet.

## **3.3 Positionserfassung**

### **3.3.1 Definition**

Mit dem englischen Begriff „Tracking“ wird die Ortung von Objekten, also die Erfassung deren räumlicher Position bezeichnet. Tracking stellt für AR-Systeme eine wesentliche Voraussetzung dar, um virtuelle Informationen korrekt mit der realen Umgebung überlagern zu können (AZUMA et al. 2001). Zum einen müssen Objekte im Blickfeld des Menschen lokalisiert werden, zum anderen muss, abhängig vom Visualisierungsverfahren auch die Blickposition des Benutzers bzw. die räumliche Position des Anzeigegerätes verfolgt werden. Im Kontext von AR-Anwendungen ist es erforderlich, dass die Positionserfassung möglichst genau und mit hoher Abtastrate erfolgt und über eine große Reichweite robust verfügbar ist (AZUMA 1993).

### **3.3.2 Einteilung und Charakterisierung**

Die Einteilung von Trackingverfahren kann grundsätzlich nach ihrem physikalischen Wirkprinzip, also folglich in mechanische, optische, akustische und elektromagnetische Verfahren erfolgen (BISHOP et al. 2001). Zur Klassifizierung von Trackingsystemen ist es jedoch zweckmäßiger, diese nach ihrem technischen

Funktionsprinzip zu unterscheiden. Die Abbildung 16 zeigt eine solche Einteilung der wesentlichen heute verfügbaren Verfahren.

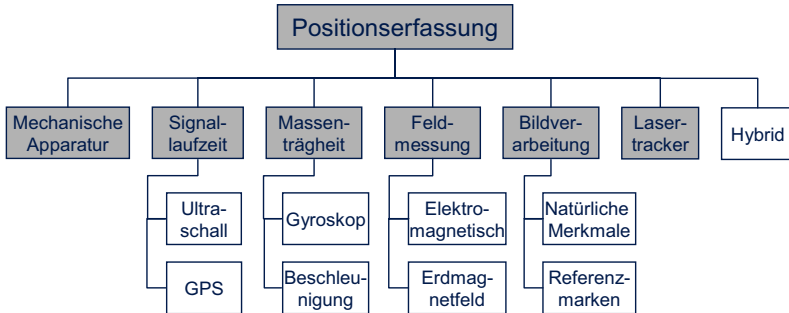


Abbildung 16 Funktionsprinzipien der Positionserfassung

Für einen Einsatz im Umfeld der Industrierobotik sind hohe Genauigkeiten, zum Teil im Submillimeterbereich, skalierbare Arbeitsräume und eine möglichst große Robustheit und Mobilität erforderlich. Diese Anforderungen werden derzeit am besten von bildverarbeitenden Systemen erfüllt. Nachfolgend wird daher ausschließlich auf optische Verfahren eingegangen. Für eine Charakterisierung der übrigen Verfahren sei auf den Abschnitt 10.3 des Anhangs verwiesen.

Bildverarbeitende Positionserfassungssysteme verwenden Kameras und Methoden der Bildverarbeitung, um die räumliche Beziehung zwischen Objekten der Umgebung und einer oder mehreren Kameras zu ermitteln (WAGNER 2005, S. 27). Dabei werden in der Regel an bekannten Positionen der Umgebung bzw. an den zu verfolgenden Objekten Referenzmarken (engl.: Marker) angebracht. Dies können entweder passive Marker sein, wie geometrische Muster (KATO & BILLINGHURST 1999, CLARON TECHNOLOGY 2007) und retroreflektierende Kugeln (ART 2007, OPTITRACK 2007), oder aktiv Licht aussendende Referenzmarken, wie LEDs (NDI 2007, REVXPERS 2008). Aktive Systeme weisen, im Vergleich zu passiven, eine höhere Unempfindlichkeit gegenüber schwankenden Beleuchtungsverhältnissen auf, erfordern gleichzeitig aber eine Energieversorgung am zu lokalisierenden Objekt. Neben markerbasierten Verfahren werden auch modellbasierte Ansätze in zunehmender Robustheit und Geschwindigkeit verfügbar (LEPETIT & FUA 2005, REITMAYR & DRUMMOND 2006, LADIKOS et al. 2007). Diese bestimmen die räumliche Lage von Objekten nicht durch Marker sondern über natürliche Merkmale, wie beispielsweise Kanten.

Optische Systeme haben sich in der industriellen Messtechnik weitgehend durchgesetzt und sind je nach System verhältnismäßig günstig realisierbar. Auch Einschränkungen durch Verdeckungen und Beleuchtungsschwankungen können durch eine geeignete Systemauslegung gut kompensiert werden. In zahlreichen Arbeiten der AR-Forschung, die den Einsatz in der industriellen Produktion adressieren, sprechen sich verschiedene Autoren deshalb für optische Trackingssysteme aus (REINHART & PATRON 2003, BISCHOFF & KAZI 2004a, ECHTLER et al. 2003, ZÄH et al. 2004b).

## **3.4 Interaktionstechniken**

### **3.4.1 Definition**

Um das Potenzial der AR-Technologie für die Roboterprogrammierung in vollem Umfang nutzbar zu machen, bedarf es neben der Visualisierung virtueller Informationen auch einer effektiven und effizienten Interaktion. Der Benutzer muss in die Lage versetzt werden, wirkungsvoll und aufwandsarm auf Roboterprogramme einwirken zu können. Dies erfordert geeignete Interaktionstechniken.

BOWMAN et al. 1999 definieren eine Interaktionstechnik als eine Methode, die es dem Benutzer erlaubt, eine Aufgabe an einer Mensch-Maschine-Schnittstelle zu erfüllen. Interaktionstechniken sind demnach Teil der Benutzerschnittstelle und umfassen sowohl Hardware, im Sinne der verwendeten Eingabegeräte, als auch Softwarefunktionalitäten. Die in räumlichen Benutzerschnittstellen zu erfüllenden Aufgaben können dabei in die Kategorien Navigation, Selektion, Manipulation und Systemsteuerung eingeteilt werden (BOWMAN et al. 1998).

### **3.4.2 Interaktion in räumlichen Benutzerschnittstellen**

Aus dem Bereich der Virtuellen Realität (VR) sind eine Vielzahl von Ansätzen für die interaktive Eingabe in vollimmersiven Umgebungen bekannt (BOWMAN et al. 2005). Dabei wurden sowohl umfassende Untersuchungen zu Auslegung und Konzeption von Eingabegeräten und -verfahren für die räumliche Interaktion in VR und Telepräsenz durchgeführt (GRIBNAU & HENNESSEY 1998, DEML et al. 2003, PETZOLD et al. 2004), als auch verschiedene multimodale Eingabekonzepte vorgestellt. Darauf basierend wurden Eingabemetaphern für eine effiziente Navigation, Eingabe und Anwendungssteuerung entwickelt (BOWMAN et al. 1998)

sowie Konzepte und Richtlinien zur Gestaltung von dreidimensionalen Menüumgebungen erarbeitet (RAYMAEKERS & CONINX 2001). Ferner wurden experimentelle Untersuchungen zur Performanz und Bedienerfreundlichkeit dieser Methoden und Verfahren durchgeführt und entsprechende Metriken geschaffen (BOWMAN & HODGES 1997, ZHAI et al. 1997, POUPYREV et al. 1998, BOWMAN et al. 1999).

Für die interaktive Eingabe von komplexen geometrischen Sachverhalten, insbesondere für das Konstruieren und Modellieren in der virtuellen Realität sind zahlreiche Forschungsansätze bekannt. Deren Anwendungen finden sich in Architektur und Städteplanung (BRIDGES & CHARITOS 1997), Design und Produktentwicklung (DEISINGER 2002, DIEHL et al. 2004, LINDEMANN et al. 2004) sowie der Produktkonfiguration (ASSENMACHER et al. 2006). Insbesondere zur Modellierung und Planung von Montagevorgängen in vollimmersiven Umgebungen existiert eine Vielzahl von Arbeiten (HEGER 1998, REINHART & ROBGODERER 1998, REINHART et al. 1999, JONAS 2000, STEFFAN & KUHLEN 2001, ROBGODERER 2002). Dabei wurden auch Modellierungswerkzeuge und Eingabehilfen für das effiziente Konstruieren mit dreidimensionalen Bedienerschnittstellen entwickelt (FIORENTINO et al. 2004a, b).

Während die Eingabe und Modellierung in rein virtuellen Welten weitgehend erforscht wurde und lediglich Einzelaspekte weiter betrachtet werden, ist die Benutzerinteraktion in der erweiterten Realität aktueller Gegenstand der Forschung (KULAS et al. 2004, BOWMAN et al. 2005, POH et al. 2005). Anders als im Fall von vollimmersiven Umgebungen, kommt der räumlichen Navigation dabei nur eine untergeordnete Bedeutung zu, da die Position des Benutzers bedingt durch die Visualisierungsverfahren immer durch die reale Kopfposition bzw. die des Aufnahmegerätes festgelegt ist. Für mobile AR-Anwendungen werden vor allem multimodale Eingabekonzepte diskutiert (KÖLSCH et al. 2006), die dem Benutzer effiziente Interaktion bei größtmöglicher Bewegungsfreiheit erlauben.

Es existieren zudem Ansätze sogenannter Tangible User Interfaces (BILLINGHURST et al. 2000), mit welchen virtuelle räumliche Informationen durch die Manipulation von physischen Gegenständen editiert werden können. Ein Beispiel hierfür ist die Positionierung von virtuellen Modellen durch eine Verschiebung realer Modellbausteine (ULLMER & ISHII 2001) oder die Interaktion mit auf Umgebungsoberflächen projizierten Menüs (BIMBER et al. 2005a). Auch Arbeiten zum Skizzieren virtueller Information auf Basis realer Objekte wurden vorgestellt (DE AMICIS et al. 2002, POH et al. 2005).

Für die Programmierung von Robotern ist es erforderlich, räumliche Positions- und Bewegungsdaten in Bezug auf die Umwelt mit hoher Präzision vorgeben und manipulieren zu können. Die dabei gestellten Anforderungen ähneln zum Teil denen von Konstruktions- und Modellierungsaufgaben in VR-Umgebungen, so dass auf die Konzepte und Eingabemethoden auch in AR-Szenarien zurückgegriffen werden kann. Dabei kommen neben Handgestenerkennung und Datenhandschuhen (GIESLER 2006, S. 101) vor allem Interaktionstechniken auf Basis stiftähnlicher 3D-Eingabegeräte zum Einsatz (ESTABLE et al. 2002, ZÄH et al. 2004a, GIESLER et al. 2004a, PETTERSEN et al. 2004).

Die existierenden Konzepte zur Interaktion, insbesondere die stiftbasierte Eingabe, erwiesen sich in den genannten Studien grundsätzlich als gut bedienbar. Jedoch erfordern die meisten Roboteranwendungen Genauigkeiten im Submillimeterbereich. Gleichzeitig ist für den Einsatz im industriellen Umfeld eine Interaktion mit einem hohen Maß an Robustheit und Bedienerfreundlichkeit unabdingbar. Diese Anforderungen konnten bisher durch Einschränkungen der Visualisierungsverfahren und des Trackings nur unzureichend erfüllt werden (PETTERSEN et al. 2004, ZÄH et al. 2004b, ZÄH & VOGL 2006).

## 3.5 AR-Anwendungen in der Mensch-Roboter-Interaktion

### 3.5.1 Grundprinzip und Überblick

Roboter führen komplexe Bewegungs- und Manipulationsabläufe mit zahlreichen Freiheitsgraden aus, zu deren Beschreibung und Steuerung eine Vielzahl von Informationen mit räumlichem Bezug zur Umgebung benötigt wird. Diese räumlich registrierten Daten sind für den Menschen nur schwer vorstellbar und ihre Bearbeitung ist mit hohem Aufwand verbunden. Konventionelle Benutzerschnittstellen für Roboter, wie beispielsweise 3D-Simulationen erlauben deren Visualisierung und Editierung nur indirekt anhand rein virtueller Darstellungen.

Demgegenüber bietet Augmented Reality die Möglichkeit, räumlich registrierte Daten und Modelle direkt in der realen Umgebung des Roboters anzuzeigen und für den Menschen interaktiv manipulierbar zu machen. So können Steuerungs-, Programm- und Sensordaten ebenso wie geometrische Modelle und Orientierungshilfen intuitiv dargestellt und bearbeitet werden. Dieses Prinzip ist in Abbildung 17 veranschaulicht.

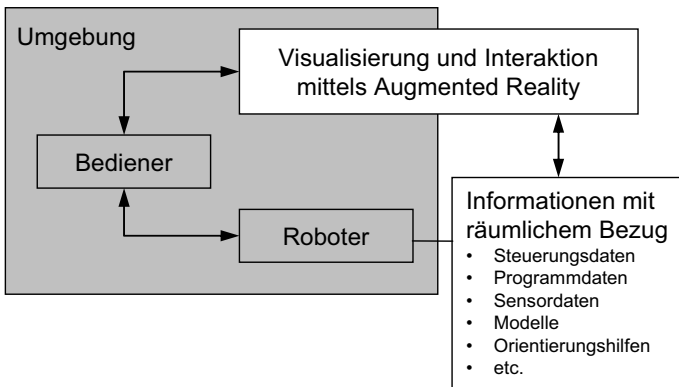


Abbildung 17 Grundprinzip der AR-gestützten Mensch-Roboter-Interaktion

Die grundlegenden Ideen für den Einsatz von Augmented Reality in Robotikanwendungen gehen auf die Arbeiten von MILGRAM et al. (1993) im Kontext von Telepräsenz- und Telemanipulationssystemen zurück. Mit zunehmender Entwicklung und Verbreitung der AR-Technologie begannen daraufhin Untersuchungen zur Nutzung von AR in industriellen Roboteranwendungen und, in jüngerer Vergangenheit, auch in der Servicerobotik.

In den folgenden Abschnitten werden die bisherigen Arbeiten in den Domänen Telepräsenz, Servicerobotik und Industrierobotik dargestellt. Zur Charakterisierung und Einordnung dieser Arbeiten wird neben dem Nutzenpotenzial von AR in der jeweiligen Anwendung auch auf die zu Grunde liegenden Verfahren der Visualisierung und der Positionserfassung eingegangen. Ebenso werden die verwendeten Interaktionstechniken erläutert.

#### 3.5.2 Telepräsenz und Telemanipulation

Die ersten AR-Anwendungen in Mensch-Roboter-Schnittstellen wurden Anfang der 1990er Jahre im Bereich der Telepräsenz realisiert. In konventionellen Telemanipulationssystemen dieser Zeit sah der menschliche Operator ein Live-Videobild des Telemanipulators und seiner Umgebung. Da die räumliche Orientierung trotz stereoskopischer Videodarstellung große Schwierigkeiten verursachte, schlugen MILGRAM et al. (1991) vor, räumlich registrierte Computergraphik als Orientierungshilfe für den Operator in das Videobild einzublenden und realisierten hierfür ein monitorbasiertes VST-System. Sie entwickelten eine Reihe

von Metaphern, wie einen virtuellen Cursor und ein damit verbundenes virtuelles Maßband, mit dem der Benutzer im Videobild Distanzmessungen vornehmen konnte (MILGRAM et al. 1993). Der Benutzer konnte dabei durch ein magnetisch erfasstes Eingabegerät indirekt mit der Remoteumgebung interagieren.

In einem System von PRETLOVE (1998) wurde dieser Ansatz auf einen mobilen Roboter als Teleoperator übertragen. Ein inertial und magnetisch getracktes HMD wurde als Anzeigemedium für den Benutzer und gleichzeitig zur Steuerung der Blickrichtung einer am Teleoperator befestigten Stereokamera verwendet. Die zentrale Interaktionsmetapher bildete ein virtueller Cursor, der durch einen Joystick gesteuert werden konnte. Ähnliche Ansätze, AR zur Unterstützung der Steuerung von stationären und mobilen Telemanipulatoren zu nutzen, finden sich in Arbeiten von CHELLALI (1998), HALME et al. (1999), LAWSON et al. (2002) und SUOMELA (2004).

Für die Erkennung und Lokalisierung von Objekten in der Teleoperatorumgebung sind modellbasierte Trackingverfahren ein viel versprechender Ansatz. In einem System von SHAHEEN et al. (2000) wurden modellbasierte Lokalisierungsverfahren in Verbindung mit einer VST-Anzeige genutzt, um den Benutzer 3D-Manipulationsaufgaben mittels Maus- und Bildschirmeingabe steuern zu lassen.

Durch die Übertragung der Bildinformationen von der Teleoperatorseite hin zum Bediener entsteht eine Latenz, also ein zeitlicher Versatz, der visuellen Darstellung. COBZAS & JAGERSAND (2005) stellten hierzu ein prädiktives Anzeigesystem vor, das eine bewegte Kamera über modellbasierte Trackingalgorithmen im Raum lokalisiert, ein Texturmodell der Umgebung aufbaut und darauf basierend zukünftige Kameraansichten vorausberechnen kann. In Experimenten konnte der Bediener einen mobilen Roboter durch einen Joystick steuern und sah die Umgebung durch eine am Roboter befestigte Kamera, deren Bild bei Bedarf in Echtzeit mit synthetisch generierten Voransichten überlagert wurde.

Auch in Nanomanipulationssystemen, bei denen Telepräsenz zur Überbrückung großer Skalierungsunterschiede verwendet wird, fand die AR-Technologie Eingang. Von VOGL et al. (2004) wurde eine Telepräsenzsystem mit einem Rasterkraftmikroskop (RKM) als Telemanipulator vorgestellt, das über ein haptisches 6-DOF-Eingabegerät gesteuert werden konnte. Da RKM während der Manipulation kein visuelles Feedback geben können, wurde eine monitorbasierte 3D-Visualisierung entworfen, in der vorab erstellte Mikroskopaufnahmen mit räumlich registrierten Modellinformationen, wie Oberflächendeformationen und Kon-

taktkräften, in Echtzeit überlagert werden (VOGL et al. 2006). Durch dieses erweiterte visuelle Feedback kann der Benutzer Manipulationsvorgänge besser kontrollieren.

#### 3.5.3 Servicerobotik

Serviceroboter sind für den Einsatz außerhalb der industriellen Produktion vorgesehen, beispielsweise in privaten Haushalten oder in Krankenhäusern. Sie stellen besonders hohe Anforderungen in Bezug auf eine einfache Interaktion und Programmierung, da die Benutzer in der Regel über kein Roboterexpertenwissen verfügen. Zudem sind viele Serviceroboter mobil, wodurch herkömmliche, von Industrierobotern bekannte Bedienmethoden nur eingeschränkt anwendbar sind.

GIESLER et al. (2004a) entwickelten vor diesem Hintergrund ein HMD-basiertes System mit optischem Tracking, bei dem ein optisch getrackter Eingabestift und ein Sensorhandschuh zur Interaktion zur Verfügung standen. Sie führten umfangreiche Untersuchungen durch, wie AR zur praxistauglichen Realisierung von Programming-by-Demonstration (PbD) genutzt werden kann (GIESLER 2006, DILLMANN & ZÖLLNER 2006). Der Benutzer führt dabei gewünschte Aktionen vor, welche durch technische Sensorik verfolgt und in entsprechende Programm-anweisungen abstrahiert werden. Durch die AR-Visualisierung können die Ergebnisse, etwa Trajektorien, direkt in der Umgebung angezeigt und durch den Benutzer validiert und angepasst werden. Insbesondere bei der Interpretation von Sensordaten und deren Überführung in ein Modell der Umgebung kann eine AR-Schnittstelle die Stärken der menschlichen Wahrnehmung und die Präzision und große Bandbreite technischer Sensorik synergetisch kombinieren (GIESLER et al. 2004b). So wurde in Experimenten gezeigt, wie der Benutzer aus 3D-Laserscandaten der Umgebung durch Interaktion mit dem AR-System ein zur Manipulationsplanung geeignetes Modell von Objekten erstellen kann.

Ein weiterer Anwendungsfall, der untersucht wurde, ist die Interaktion mit mobilen Robotern. Hierzu wurde gezeigt, wie mittels eines VST-HMD und eines optisch getrackten Eingabezeigers, Navigationspfade für eine mobile Plattform direkt in der realen Umgebung geplant werden können (GIESLER et al. 2004a ).

In einem ähnlichen Ansatz von NUNEZ et al. (2006) wurde ein monitorbasiertes VST-System zur Interaktion mit einem mobilen Roboter und zur Überwachung von dessen Pfadplanung verwendet. Zu diesem Zweck werden die Daten eines Laserrangfinders mit Verfahren zur Extraktion von Merkmalen wie Kanten und



Wänden interaktiv ausgewertet und es wird eine Karte der Umgebung erstellt. Das Tracking der am Roboter befestigten Kamera erfolgt auf Basis dieser Modelldaten. Diese Arbeit ist inhaltlich eng an die zuvor genannten Telepräsenzansätze angelehnt, verfolgt den Einsatz von AR aber nicht mit dem Ziel der Teleoperation, sondern als Bedienmedium zur Beeinflussung der ansonsten autonomen Navigation eines mobilen Roboters.

Vor dem Hintergrund mobiler Roboter wurde AR auch als Basismedium für mobile, verteilte Benutzerschnittstellen untersucht. So stellten DAILY et al. (2003) ein HMD-basiertes OST-System vor, mit dem Weghinweise durch einen Schwarm von mobilen Robotern visualisiert werden konnten. In ähnlicher Weise ermöglicht es ein von YOUNG & SHARLIN (2006) vorgeschlagenes mobiles AR-System einem Spielzeugroboter, virtuelle Informationen und objektbezogene Hinweise in der Umgebung zu hinterlassen.

BORKOWSKI et al. (2004) schlugen die Verwendung steuerbarer Projektoren zur Schaffung von in die Umgebung integrierten Bedienerchnittstellen für mobile Serviceroboter in Büros und Haushalten vor. Sie entwickelten ein Kamera-Projektor-Paar (vgl. Abschnitt 3.2.3.3), bestehend aus einem Videobeamer und einer Kamera, die beide auf einer Schwenk-Neigeeinheit befestigt waren. Durch das Zusammenspiel von Projektion und Bildverarbeitung konnten zum einen projizierte Menüs realisiert werden, zum anderen mittels Streifenprojektion die Geometrien von Objekten in der Umgebung erfasst werden.

#### 3.5.4 Industrierobotik

Mit fortschreitender Grundlagenentwicklung und Anwendungen in der Telerobotik kam der AR-Technologie Ende der 1990er Jahre zunehmendes Interesse im Kontext industrieller Roboteranwendungen zu. Der Einsatz von AR zur Unterstützung der Bedienung von Industrierobotern wurde seither in verschiedenen Arbeiten der akademischen und industriellen Forschung thematisiert. Dabei wurden in der Hauptsache die nachfolgend ausgeführten Anwendungsszenarien **„Montage- und Anlagenplanung“**, **„Bedienung und Schulung“**, **„Zusammenarbeit von Werkern und Robotern“** und **„Programmierung und Inbetriebnahme“** adressiert.

#### 3.5.4.1 Montage- und Anlagenplanung

PATRON (2005) untersuchte den Einsatz von Augmented Reality für die Planung von Montageanlagen und der zugehörigen Montageabläufe. Hierfür entwickelte er ein VST-System, das, ausgestattet mit einem optischen Trackingsystem und einem monoskopischen HMD, die Visualisierung von Montagekonzepten direkt im realen Produktionsumfeld ermöglicht. Zum einen kann mit diesem Ansatz die Vorstellungskraft mit der Planung betrauter Ingenieure maßgeblich unterstützt werden. Zum anderen wird die Konsistenz digitaler Planungsdaten und realer Gegebenheiten sichergestellt und ein Teil des ansonsten anfallenden Modellierungsaufwandes für 3D-Simulationen reduziert.

Da bei Anwendungen in der Planung eine reichhaltige Visualisierung im Vordergrund steht und diese nur temporär benötigt wird, erwies sich das VST-System als gut geeignet für den Planungseinsatz. Eine hohe Komplexität der Einzelkomponenten und die ergonomischen Einschränkungen HMD-basierter Anzeigesysteme zeigten jedoch auch deutlich die Grenzen bezüglich eines dauerhaften, operativen Einsatzes, etwa zur Bearbeitung von Planungsentwürfen in der AR-Umgebung, auf (ZÄH et al. 2005c).

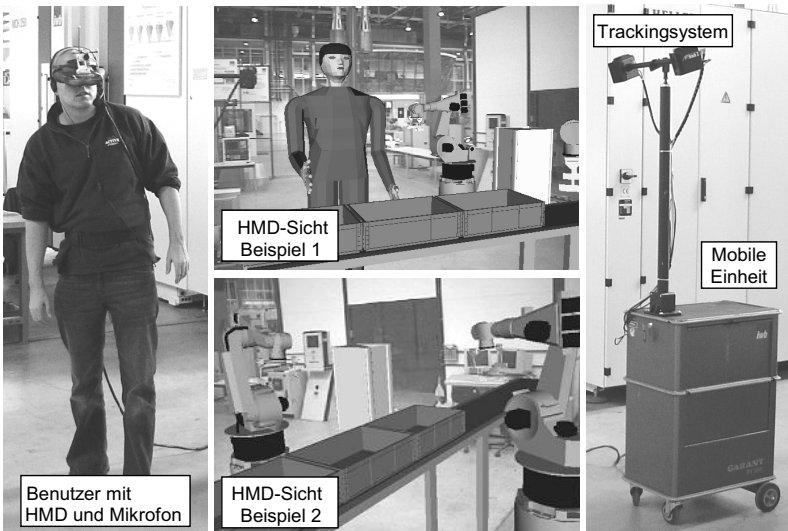


Abbildung 18 AR-System für die Montageplanung (PATRON 2005)

### **3.5.4.2 Bedienung und Schulung**

BISCHOFF & KAZI (2004a) diskutieren die Potenziale der AR-Technologie aus Sicht des Roboterherstellers Kuka Roboter GmbH. Sie weisen auf eine Vielzahl von Nutzenpotenzialen entlang des gesamten Lebenszyklus eines industriellen Robotersystems hin. Angesichts des technischen Entwicklungsstandes hinsichtlich Robustheit und Präzision, fokussieren sie ihre Arbeiten aber auf die Schulung von Roboteranwendern, da hierfür weniger hohe Anforderungen zu erfüllen sind als für einen operativen Einsatz in der Produktion.

Der Umgang mit dem Programmierhandgerät und die Führung des Roboters in den verschiedenen Koordinatensystemen, wie Welt-, Achs-, und Werkzeugkoordinatensystem, stellen hohe Anforderungen an unerfahrene Bediener und erfordern ein geübtes räumliches Vorstellungsvermögen. Das von Kuka präsentierte System nutzt hierbei eine monitorbasierte VST-Anzeige in Verbindung mit optischem Markertracking bzw. mechanischem Tracking einer am Roboter befestigten Kamera. Mit diesem System werden die verschiedenen Koordinatensysteme und die Korrelationen von Bedienelementen, wie beispielsweise der Space Mouse am PHG, und Bewegungen des Roboters anschaulich visualisiert (BISCHOFF & KAZI 2004a, b). Die Interaktion erfolgt zum einen über Maus und Tastatur, zum anderen durch das PHG. Eine interessante Kombination stellt auch die Integration einer Kamera in das PHG dar (KAZI & BISCHOFF 2003). Damit ergibt sich die Möglichkeit, AR als Interaktionsmedium in zukünftige Teachpanels zu integrieren, wenngleich die AR-Technologie mit dem derzeitigen Stand der Gerätetechnik für die Visualisierung noch zu limitiert für einen operativen Einsatz ist (KAZI et al. 2005, S. 65). Basierend auf Erfahrungen aus einer Nutzerbefragung und dem Einsatz des Schulungssystems, berichten BISCHOFF & KURTH (2006) von einer hohen Nutzerakzeptanz und stellen auch die Perspektive eines Einsatzes der AR-Technologie zur Programmierung als viel versprechend dar.

### **3.5.4.3 Zusammenarbeit von Werkern und Robotern**

Die direkte, zeitlich und örtlich verschränkte Zusammenarbeit stellt höchste Anforderungen an die Kommunikation zwischen Mensch und Roboter. Beide müssen sich bezüglich der vorliegenden Aufgabe, der jeweils nächsten beabsichtigten Arbeitsschritte und deren Abstimmung permanent austauschen, wofür die AR-Technologie einen viel versprechenden Kommunikationskanal eröffnet (WAKITA et al. 1999). Vor diesem Hintergrund wurden in Japan in den Jahren 1998-2002

zwei AR-Systeme für die interaktive Mensch-Roboter-Kooperation entwickelt. Bei beiden Ansätzen verzichteten die Autoren aufgrund der ergonomischen Einschränkungen bewusst auf den Einsatz von HMD. Stattdessen griffen sie die Konzepte des Projektor-Kamera-Systems „DigitalDesk“ (WELLNER 1993) auf und verwendeten Videoprojektoren als interaktive Anzeigesysteme.

WAKITA et al. (1998) entwickelten ein projektionsbasiertes Visualisierungssystem für ein Szenario, bei dem ein Manipulatorarm und ein Mensch an einem Tisch zusammenarbeiten. Ein Projektor über dem Tisch wurde dabei zur interaktiven Anzeige von aufgabenrelevanten Informationen, zur gefahrlosen Vorschau von Roboterbewegungen und zur gezielten Lenkung der Aufmerksamkeit des Menschen verwendet (WAKITA et al. 1999). Die Animationen anstehender Bewegungen des Roboters und andere Inhalte wurden orthogonal auf die Tischebene projiziert, so dass der Benutzer ein 2D-Bild des Manipulators praktisch im Grundriss sehen und sich so besser auf Bewegungen des Roboters einstellen konnte. Zur Interaktion wurde ein am Manipulator befestigter Kraftsensor genutzt, mit Hilfe dessen der Benutzer den Roboter lenken konnte.

Das System „PARTNER“ (TERASHIMA & SAKANE 1999) basiert ebenfalls auf Videoprojektoren zur Anzeige und bildverarbeitenden Systemen zur Interaktion. So wurden auf ebene Flächen im Arbeitsraum projizierte, berührungssensitive Anzeigen in Form von Menüs und einer AR-Darstellung des Roboterarbeitsraumes realisiert. Darauf aufbauend entwickelten SATO & SAKANE (2000) als weitere Interaktionsmetapher einen in den Arbeitsraum projizierten Cursor, der durch Fingerzeigegesten gesteuert werden konnte. Weiterhin wurde eine Annotationsfunktion vorgestellt, bei welcher der Arbeitsraum mittels Streifenprojektion erfasst wurde und dadurch kontextsensitive Textinformationen für den Bediener projiziert werden konnten (YAMASHITA & SAKANE 2001).

Wenngleich die Anzeige und Interaktion bei diesen beiden Systemen im Wesentlichen auf 2D-Darstellungen in verschiedenen Ebenen eines kleinen Arbeitsbereichs beschränkt war, so demonstrierten sie dennoch eindrucksvoll das Potenzial projektionsbasierter Schnittstellen für Roboteranwendungen.

#### 3.5.4.4 Programmierung und Inbetriebnahme

Die weitaus meisten Forschungsarbeiten zum Einsatz von AR in der Industrierobotik adressierten in den vergangenen Jahren die Programmierung und Instruktion von Robotern. Es wurden zahlreiche Konzeptstudien und Prototypen erarbei-

tet, die das Potenzial dieser Bestrebungen belegen. Die AR-Technologie ist dabei weitgehend komplementär zu klassischen Programmierverfahren der Online- und Offline-Programmierung zu sehen (vgl. Abschnitt 2.4) und bietet das Potenzial, diese deutlich zu vereinfachen und zu beschleunigen (PETTERSEN et al. 2004, ZÄH et al. 2004a).

Von dem Roboterhersteller Kuka wurde ein monitorbasiertes AR-System zur Visualisierung von Bahnen, Koordinaten und Bewegungsabläufen vorgestellt (BISCHOFF & KAZI 2004a). Dieses System bietet eine einfache und robuste zusätzliche Visualisierungsmöglichkeit. Aufgrund der starken technischen Einschränkungen der AR-Gerätetechnik wurde es bisher jedoch lediglich im Kontext der Anwenderschulung genutzt (vgl. Abschnitt 3.5.4.2). Mit Hilfe geeigneter Interaktionsmetaphern kann das System auch für die Programmierung eingesetzt werden (BISCHOFF & KURTH 2006). Ein ähnlicher Ansatz wurde von dem Hersteller Reis Robotics verfolgt, der ein MAR-System zur Anzeige von Trajektorien in die Bedienoberfläche der Programmierhandgeräte integrierte (SOM 2007).

Weitergehende Forschungsprototypen zur AR-basierten Programmierung von Robotern wurden in den Jahren 2002-2006 von ESTABLE et al. (2002), PETTERSEN et al. (2004), ZÄH et al. (2004a) und ONG et al. (2006) entwickelt. Diese Ansätze zeichnen sich durch einen hohen Grad an Immersion, im Sinne einer nahtlosen Überlagerung des Blickfeldes mit virtuellen Informationen und ein großes Maß an Interaktivität bezüglich der Manipulation räumlicher Daten aus. Als zentrales Szenario wurde bei all diesen Arbeiten die Bahnprogrammierung von Robotern betrachtet. Die erarbeiteten Systemkonzepte ähneln sich stark: Sie basieren auf der Verwendung von Datenbrillen zur Visualisierung von Bahnverläufen im realen Umfeld. Dabei erfolgte die Darstellung über OST-Systeme (ESTABLE et al. 2002) und, in der Mehrzahl, VST-Systeme (PETTERSEN et al. 2004, ZÄH et al. 2004a, CHONG et al. 2005). Die Benutzer konnten mittels räumlicher, handgeführter Eingabegeräte jeweils direkt mit den eingeblendeten 3D-Informationen interagieren und diese manipulieren. Die Eingabegeräte waren stiftähnliche Objekte, die optisch (PETTERSEN et al. 2004, ZÄH et al. 2004a, CHONG et al. 2005) bzw. magnetisch getrackt wurden (ESTABLE et al. 2002). Im einfachsten Fall dienten geometrische Referenzmarken als Eingabemittel (CHONG et al. 2005).

Vom Autor der vorliegenden Arbeit wurde ein Systemkonzept für eine HMD-basierte Bedienerschnittstelle entwickelt, prototypisch umgesetzt und evaluiert (ZÄH et al. 2004b, ZÄH et al. 2004a, ZÄH et al. 2005b). Dabei wurden Interakti-

onsmethoden für die Bahnprogrammierung, wie die stiftbasierte Eingabe von Trajektorien und das, der Playback-Programmierung nachempfundene, Führen eines virtuellen Robotermodells realisiert. Außerdem wurde die Nutzung von AR für Kollisionsanalysen und für den Test offline erstellter Programme thematisiert.

#### 3.5.5 Übersicht und Bewertung bestehender Ansätze

Die bisherigen Anwendungen der AR-Technologie in der Robotik sind, eingeteilt in die drei Domänen Telepräsenz, Servicerobotik und Industrierobotik, in Tabelle 3 zusammengefasst. Dabei werden die zentralen technologischen Aspekte der jeweiligen Arbeit benannt und es wird eine Einordnung nach inhaltlichen Schwerpunkten vorgenommen. Zudem erfolgt eine Bewertung der Relevanz im Hinblick auf die Programmierung industrieller Roboteranwendungen nach den Kriterien Präzision, Interaktionsmöglichkeiten, Ergonomie und Einsetzbarkeit.

Betrachtet man die bisherigen Ansätze, so wird deutlich, dass die Potenziale der AR-Technologie im Bereich der Robotik bereits sehr früh und in einer hohen Anzahl von Studien adressiert wurden. Die bisherigen Arbeiten bestätigen übereinstimmend das große Potenzial der AR-Technologie für die Mensch-Roboter-Interaktion und stellen dieses in diversen Prototypen exemplarisch unter Beweis. Dabei wurde, wie Tabelle 3 zeigt, vornehmlich auf klassische AR-Technologien, wie Datenbrillen und monitorbasierte Anzeigesysteme zurückgegriffen.

Gerade die Technologiebasis der Displaysysteme und Endgeräte für Augmented Reality ist allerdings mit massiven Einschränkungen verbunden, welche einem nutzbringenden, operativen Einsatz im Wege stehen (BIMBER 2002, KAZI et al. 2005). Die technischen und ergonomischen Beschränkungen von HMD lassen deren Einsatz in Bereichen, welche dauerhaftes Arbeiten erfordern nicht zu. Eine direkte 3D-Interaktion ist zwar grundsätzlich möglich, kann aber nur mit beschränkter Genauigkeit realisiert werden. Eine präzise, direkte Feinmanipulation von umgebungsbezogenen räumlichen Informationen, wie sie für die Roboterprogrammierung erforderlich wäre, ist kaum darstellbar (GIESLER et al. 2004a).

Tabelle 3 Übersicht bestehender Ansätze zum Einsatz von AR in der Robotik

		Technologien			Anwendung					Bewertung			
		Visualisierung	Tracking	Interaktionsmittel	Montageplanung	Bedienung	Programmierung	Simulation	Kooperation	Navigation	Präzision	3D-Interaktion	Ergonomie
Autor(en)													
Telepräsenz	Milgram et al. 1993	VST	MAG	Spaceball, Stift	○	●	○	●	○	○	○	○	○
	Pretlove 1998	VST	MAG	Joystick	○	●	○	○	○	○	○	○	○
	Shaheen et al. 2000	MAR	OPT	Maus	○	●	○	○	○	○	○	○	○
	Cobzas & Jagersand 2005	MAR	OPT	Tastatur	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Servicerobotik	Daily et al. 2003	OST	OPT	keine	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Borkowski et al. 2004	PAR	-	Fingergesten	○	●	○	○	○	○	○	○	○
	Giesler 2006	VST	OPT	Gesten, Stift	○	○	●	●	○	○	○	○	○
	Nunez et al. 2006	VST	OPT	Maus	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Young & Sharlin 2006	VST	OPT	keine	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Industrierobotik	Wakita et al. 1999	PAR	OPT	Kraftsensor	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Sato & Sakane 2000	PAR	OPT	Fingergesten	●	○	○	○	○	○	○	○	○
	Estable et al. 2002	OST	MAG	Stift, Sprache	○	○	●	○	○	○	○	○	○
	Pettersen et al. 2004	VST	MAG	Stift	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Zäh et al. 2004c	VST	OPT	Stift	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Bischoff & Kazi 2004b	VST	OPT	PHG	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Patron 2005	VST	OPT	Marker, Sprache	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Chong et al. 2005	VST	OPT	Marker	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Vogl 2005	PAR	OPT	Stift	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Legende: ●=voll erfüllt, ○=teilweise erfüllt, ○=nicht erfüllt

Diejenigen Ansätze, welche monitorbasierte Darstellungen nutzen sind zwar robust und ergonomisch günstiger als HMD-basierte Ansätze. Dennoch bringt der Einsatz von MAR-Systemen abgesehen von einer zusätzlichen Visualisierung nur wenig Mehrwert. Der Darstellungsbereich ist stark eingeschränkt und virtuelle Informationen können nur schwer in Bezug zum Bild der realen Umgebung räumlich eingeschätzt werden. Auch eine direkte Interaktion mit räumlichen Inhalten ist nicht möglich (ZÄH et al. 2006). Sowohl HMD-basierte Systeme als auch MAR erscheinen in Ihrem Potenzial für einen operativen Einsatz in Roboteranwendungen stark begrenzt. Es besteht ein großer Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Visualisierung (GIESLER 2006, S. 185).

Zweifelsohne ist über die Zeit mit einer weiteren, evolutionären technischen Reifung der körpergebundenen Displaygeräte zu rechnen. Diese ist jedoch in den letzten beiden Jahrzehnten im Vergleich zu anderen Bereichen wie der VR-Technologie sehr langsam verlaufen (BIMBER 2002, S. 2). Bisher existiert kein nennenswerter Markt für Hochleistungsdatenbrillen und es ist auch keine vertika-

le Applikation (d. h. eine Spezialanwendung) absehbar, die einen solchen entstehen ließe. Aufgrund dessen gehen Experten davon aus, dass HMD erst über eine breite horizontale Anwendung, etwa als mobiles Datensichtgerät für Büroanwendungen, einen wirklichen Entwicklungssprung erfahren könnten (САКМАКЦИ & ROLLAND 2006). Dies würde aber zunächst einfache, niedrigauflösende HMD betreffen. Die Verfügbarkeit präziser, hochauflösender und vor allem dauerhaft tragbarer HMD, wie sie für Robotikanwendungen benötigt würden, ist daher nicht absehbar. Es bleibt zudem zu konstatieren, dass trotz unzähliger Applikationsstudien bis heute kein tatsächlicher Durchbruch hinsichtlich eines operativen Einsatzes von HMD in der industriellen Praxis stattgefunden hat.

Anders als bei Datenbrillen und Monitoranzeigen finden sich unter den bisherigen Arbeiten in der Industrierobotik (vgl. Tabelle 3) bisher nur zwei Ansätze, welche Projektion als zentrales Anzeigemedium nutzten (WAKITA et al. 1998, SATO & SAKANE 2000). Beide betrachteten den Einsatz von AR als Interaktionsmedium für die direkte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter. Dabei war eine ergonomische, nicht störende Informationsanzeige eine der Anwendung inhärente Notwendigkeit. Diese Studien waren hinsichtlich Präzision, 3D-Interaktion und ihres Arbeitsraumes stark beschränkt, zeigten aber interessante Perspektiven für eine Nutzung der Potenziale von AR in Roboteranwendungen ohne störende körpergebundene Displaygeräte auf.

Mit der in den vergangenen Jahren zunehmenden technologischen Entwicklung von projektionsbasierten AR-Verfahren (PAR, vgl. Abschnitt 3.2.3) und der zugehörigen Anzeigegeräte erweisen sich Projektionssysteme als viel versprechende Alternative zu klassischen AR-Visualisierungsverfahren. Dies verdeutlicht ein Vergleich von klassischen AR-Displays mit projektionsbasierten Anzeigen im Hinblick auf die Erfordernisse eines Einsatzes in der Industrierobotik:

Datenbrillen und Monitorlösungen sind in ihrem heutigen Entwicklungsstand als flexibel einzustufen. Die Optionen zu einer weiteren Verbesserung sind allerdings in Bezug auf die Ergonomie und insbesondere im Hinblick auf die präzise unmittelbare Manipulation virtueller Daten stark begrenzt. Demgegenüber erscheint es durch eine konsequent auf die Anforderungen der Industrierobotik fokussierte Entwicklung PAR-basierter Bedienerschnittstellen möglich zu sein, die Kriterien für einen Einsatz in industriellen Umgebungen zu erfüllen. Damit könnte das Potenzial der AR-Technologie für die Programmierung und Bedienung von Industrierobotern tatsächlich im Feld nutzbar gemacht werden (VOGL 2005, ZÄH & VOGL 2006).



### **3.6 Fazit und Handlungsbedarf**

Augmented Reality bietet ein großes Potenzial für die Mensch-Maschine-Schnittstellen von Robotersystemen. In der Industrierobotik liegt das zentrale Nutzenpotenzial in der Vereinfachung und Verbesserung der Programmierung.

Die bisherigen Arbeiten zum Einsatz von AR in der Robotik basieren vorrangig auf Datenbrillen oder mobilen Monitoren zur Anzeige. Diese Anzeigegeräte weisen deutliche technische und ergonomische Einschränkungen auf, so dass bis heute keine tatsächliche Anwendung in industriellem Umfeld existiert. Es erscheint auf Basis dieser Verfahren nur sehr eingeschränkt möglich, das Potenzial der AR-Technologie in industriellen Roboteranwendungen nutzbar zu machen.

Projektionsbasierte AR-Verfahren hingegen ermöglichen eine Nutzung von AR ohne körpergebundene Displaygeräte. Sie weisen dadurch erhebliche Vorteile hinsichtlich der Ergonomie auf. Es bedarf jedoch der Erarbeitung robuster und präziser Verfahren der Darstellung und der Interaktion. Damit diese schließlich auch im Produktionsumfeld angewendet werden können, sind zudem flexible, industrietaugliche Systemkonzepte für derartige AR-gestützte Bedienerschnittstellen erforderlich.

---

## 4 Anforderungsanalyse

### 4.1 Zieldimensionen

Zunächst gilt es, die zentralen Zieldimensionen, welche die Qualität einer Benutzerschnittstelle festlegen, für den Kontext der Roboterprogrammierung zu klären. Die Richtlinie zur Mensch-System-Interaktion (DIN EN ISO 9241) definiert hierzu Usability<sup>3</sup> als den Grad, in welchem ein technisches System bzw. dessen Mensch-Maschine-Schnittstelle effektiv, effizient und zufrieden stellend verwendet werden können. In diesen drei Zieldimensionen soll die vorliegende Arbeit zu einer Verbesserung der Bedienung und Programmierung von Robotern beitragen:

- **Effektivität** bedeutet hierbei, wie genau und wie vollständig ein Benutzer die Anforderungen einer Anwendung im resultierenden Roboterprogramm abbilden kann.
- Die **Effizienz** bemisst sich aus dem Aufwand, der zur Erreichung einer effektiven Programmierung notwendig ist.
- Die **Zufriedenheit** des Benutzers trägt maßgeblich zur Akzeptanz des Systems bei. Darunter fallen eine ergonomische Gestaltung, insbesondere die Vermeidung unnötiger körperlicher und mentaler Belastungen, und eine hohe Robustheit und Fehlertoleranz des Schnittstellensystems.

Das Ziel des Einsatzes der AR-Technologie muss darin liegen, im Vergleich zu bekannten Systemen und Interaktionsmethoden des Standes der Technik, eine wesentliche Steigerung in Bezug auf diese drei Kriterien zu erzielen.

### 4.2 Anforderungsstruktur

Um ein höchstmögliches Maß an Usability einer Bedienerschnittstelle zu erreichen, ist es notwendig die Anforderungen an das System möglichst vollständig zu klären. Anders als rein bildschirmbasierte Bedienerschnittstellen beziehen interaktive, AR-basierte Schnittstellen den Menschen, seine Umgebung und den vorliegenden Produktionsprozess unmittelbar in die Interaktion mit der Maschine

---

<sup>3</sup> Dieser aus dem Englischen stammende Terminus wird je nach Kontext mit „Gebrauchstauglichkeit“ bzw. „Benutzerfreundlichkeit“ ins Deutsche übersetzt.

## 4 Anforderungsanalyse

ein. Um die an eine solche Bedienerchnittstelle gestellten Anforderungen zu ermitteln, ist es deshalb notwendig, über methodische und technische Aspekte hinaus auch den menschlichen Benutzer in die Systemgestaltung einzubeziehen.

Hierfür ist eine Betrachtung der Bedienerchnittstelle als soziotechnisches Gesamtsystem im Sinne von EMERY & TRIST (1960) zweckmäßig. Der Mensch, die Produktionsumgebung, der Produktionsprozess und die Maschine(n) werden dabei als ein Gesamtsystem betrachtet. Die Teilelemente dieses Systems verweisen aufeinander und beeinflussen sich gegenseitig. Gleichzeitig wird die Funktion des Systems nicht durch einzelne, technische oder menschliche Elemente bestimmt sondern sie liegt hauptsächlich in der Interaktion zwischen diesen.

Sowohl aus Einzelementen dieses Systems als auch aus den Wechselbeziehungen zwischen ihnen gehen Anforderungen an die Benutzerschnittstelle hervor. Abbildung 19 zeigt die AR-basierte Bedienerchnittstelle als soziotechnisches System und stellt den Zusammenhang zwischen den adressierten Aspekten der Usability und den sich ergebenden Anforderungen an das System dar. Diese werden nachfolgend ausgeführt, wobei methodisch-konzeptionelle, technische und benutzerorientierte Anforderungen unterschieden werden.

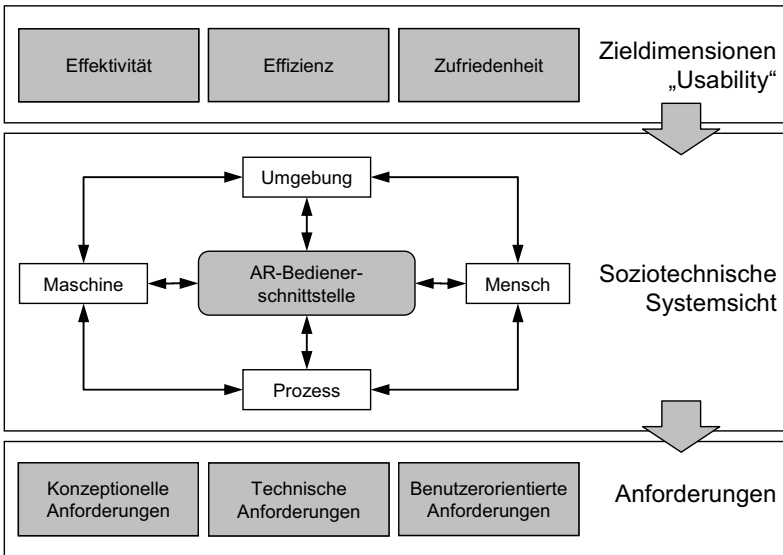


Abbildung 19 Zieldimensionen, Systemstruktur und Anforderungen

## 4.3 Konzeptionelle Anforderungen

Voraussetzung für die Konzeption einer interaktiven Benutzerschnittstelle mit hoher Effektivität ist eine umfassende methodische Unterstützung des Programmierprozesses. Das bedeutet, dass alle anfallenden Bedien- und Programmieraktivitäten betrachtet werden müssen und eine genaue Klärung erforderlich ist, ob und in welcher Form diese durch die Augmented-Reality-Technologie unterstützt werden können. Es ist zu erarbeiten, welches Vorgehen dabei am sinnvollsten gewählt wird. Hierzu ist es von essentieller Bedeutung, bisherige Methoden, Systeme und Werkzeuge zu berücksichtigen.

Die zu erarbeitenden Vorgehensweisen für Programmier- und Bedienvorgänge sollten im Sinne einer hohen Übertragbarkeit weitgehend generisch definiert werden. Demgegenüber müssen Spezifika von Produktionsprozessen möglichst umfassend berücksichtigt und in der Vorgehensweise abgebildet werden können. Die im Rahmen der Arbeit entwickelten Konzepte und Vorgehensweisen sind außerdem auf eine Übertragbarkeit in andere Bereiche der Robotik zu prüfen.

Eines der größten Potenziale der AR-Technologie besteht darin, dem Menschen eine intuitive Interaktion mit komplexen 3D-Informationen unmittelbar in der realen Umgebung zu erlauben. Hierbei gilt es auszuwählen, welche Information im Prozessverlauf in welcher Form dargeboten wird. Dabei sollte eine unmittelbare Interaktion mit Programmdaten, dem Verhalten des Roboters und anderen umgebungsbezogenen Informationen möglich sein. Es müssen dafür geeignete Metaphern zur Informationsdarstellung und zur Eingabe und Manipulation durch den Benutzer erarbeitet werden. Ziel muss es sein, den Benutzer zu einer möglichst effektiven Beschreibung des Roboterhaltens zu befähigen.

Demgegenüber gilt es, im Sinne einer effizienten Programmierung, die anfallende manuelle Benutzerinteraktion auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Die AR-Technologie sollte demnach dazu genutzt werden, Eingabevorgänge so zu gestalten, dass diese möglichst einfach und schnell zu bewältigen sind. Überdies ist es unerlässlich, dass so viele Anteile der Programmierung wie möglich automatisiert werden, damit diese den Benutzer nicht weiter belasten.

### 4.4 Technische Anforderungen

#### 4.4.1 Leistungsmerkmale

Der Programmierprozess von Industrierobotern wird im Wesentlichen von den Charakteristika der zum Einsatz kommenden Roboter und den Anforderungen des Produktionsprozesses gekennzeichnet. Dementsprechend lassen sich Größen, wie Arbeitsraum der Schnittstelle und Präzisionsanforderungen nicht allgemeingültig definieren, sondern variieren je nach Anwendungsfall. In jedem Einzelfall muss die Bedienerschnittstelle aber den spezifischen Randbedingungen des Prozesses und der Maschine gerecht werden.

Allgemein gilt es, eine möglichst hohe Präzision in Bezug auf die räumliche Registrierung virtueller Informationen in der realen Umgebung zu erreichen. Nur wenn virtuelle Objekte mit für die Anwendung hinlänglicher Genauigkeit in der realen Umgebung angezeigt und manipuliert werden können, ist eine Programmierung sinnvoll durchführbar. Diese Anforderung variiert je nach Anwendung von wenigen Zehntelmillimetern bei Schweiß- und Schneidvorgängen bis hin zu mehreren Zentimetern, wie beispielsweise bei Lackierprozessen.

Es ist ein möglichst großer Arbeitsraum bzw. ein möglichst hoher Anteil des Gesamtarbeitsraumes der zu programmierenden Maschine durch das AR-System abzudecken. Dies betrifft wiederum sowohl die Reichweite der Anzeigesysteme als auch die Abdeckung durch die verwendeten Positionserfassungssysteme. Abhängig vom Robotersystem und von den vorliegenden Werkstücken treten Volumina weit unterhalb eines Kubikmeters bei kleinen Robotern bis hin zu vielen Kubikmetern bei Portalanlagen und Systemen mit zusätzlichen Verfahrachsen auf.

Wie bei allen interaktiven Systemen ist eine geringe Latenzzeit anzustreben. Diese bemisst sich aus der Zeit, welche zwischen einer sensorisch erfassbaren Aktion des Benutzers bzw. einer Veränderung in der Umgebung und der entsprechenden Anpassung des AR-Bildes liegt. Eine hohe Latenzzeit hat zur Folge, dass das System für den Benutzer spürbar verspätet auf Interaktionen reagiert, was die Anwendbarkeit stark beschränkt. Darüber hinaus bewirkt eine hohe Latenzzeit im Falle von HMD-basierten Systemen ein störendes Nachschleppen des virtuellen Bildinhalts bei Kopfbewegungen.

Dem Benutzer müssen leistungsfähige Interaktionsmechanismen für die Arbeit mit dem System zur Verfügung gestellt werden. Wie im vorherigen Abschnitt

erläutert, sollte der Benutzer intuitiv mit räumlichen Informationen, wie Trajektorien, interagieren und diese effizient manipulieren können. Hierzu ist es erforderlich, dass die Umsetzung der Interaktionsverfahren eine genügende Präzision, in einem hinreichend großem Arbeitsraum und eine möglichst geringe Latenzzeit aufweist. Es müssen geeignete 3D-Eingabegeräte zur Verfügung gestellt werden und es ist ein effizientes Zusammenwirken von Positionserfassungssystem, Modelldatenhaltung und AR-Visualisierung zu realisieren.

Für den Einsatz in der Produktion müssen sowohl die Einzelkomponenten als auch das Gesamtsystem eine hohe Robustheit gegenüber Störeinflüssen aufweisen. Derzeitige AR-Hardware ist vorwiegend für den Einsatz in Laboratorien bzw. Alltagsumgebungen ausgelegt. Im Produktionsumfeld ist mit einer deutlich stärkeren Beanspruchung der Systemkomponenten zu rechnen. Mechanische und thermische Einwirkungen sind dabei ebenso zu berücksichtigen, wie Verschmutzung und gegebenenfalls Einwirkungen durch auftretende Prozessstrahlung. Auch wechselnde Lichtverhältnisse sollten die Funktionstauglichkeit und Leistung (bspw. Präzision, Arbeitsraum, Latenzzeit) des Systems nicht einschränken.

#### **4.4.2 Konfigurierbarkeit und Flexibilität**

Bei Anwendern aus der Produktion kann kein AR-Expertenwissen vorausgesetzt werden. Das System ist daher so zu gestalten, dass der Endanwender so wenig als möglich systemspezifisches Wissen benötigt.

Auf der Seite der Gerätetechnik kann dies durch die Bereitstellung einfach handhabbarer Hardwaremodule maßgeblich unterstützt werden. Zudem sollten dem Benutzer einfache Auswahlkriterien und Handlungsanweisungen für eine verständliche Konfiguration des Systems zur Verfügung gestellt werden. Der Benutzer muss auf Basis weniger, aussagekräftiger Kriterien entscheiden können, wie das System für die vorliegende Anwendung zu konfigurieren ist.

Am Beispiel der Kalibrierung wird dies deutlich: Dieser Prozess betrifft zahlreiche Hardwarekomponenten, also den Roboter, das Positionserfassungssystem, die Visualisierungs- und die Eingabegeräte. Deren räumliche Anordnung entscheidet maßgeblich über die erreichbare Qualität der Kalibrierung. Weiterhin ist eine geeignete Auswahl der Raumpunkte, welche zur Kalibrierung herangezogen werden, stark von den verwendeten Berechnungsalgorithmen abhängig. Daher ist eine aufwandsarme Kalibrierung erforderlich, welche dem Benutzer erlaubt, mit wenigen, einfachen Handlungs- und Entscheidungsschritten eine reproduzierbare

Kalibrierung zu erreichen. Ferner muss der Benutzer in die Lage versetzt werden, deren Qualität in einer vorstellbaren Größe bemessen und während der Arbeit mit dem System überwachen zu können.

Die Leistungsanforderungen an die AR-Benutzerschnittstelle, wie Präzision und Arbeitsraum, sind stark von der zu programmierenden Maschine und dem Produktionsprozess abhängig. Die Verfahren und die zugehörigen Systemkomponenten sollten deshalb eine hohe Skalierbarkeit in Bezug auf die Anforderungen der vorliegenden Anwendung aufweisen. Das bedeutet, dass Positionerfassungssysteme, Visualisierungsverfahren und Interaktionsmechanismen so gestaltet sein müssen, dass Skalierungen des Systems, wie eine Erweiterung des Arbeitsraumes, einfach und aufwandsarm vorgenommen werden können.

Leistungsfähige AR-Komponenten, wie sie unter den vorliegenden Bedingungen benötigt werden, sind in der Regel mit hohen Investitionskosten verbunden. In Fällen, in denen ein und dieselbe Anlage sehr häufig umprogrammiert werden muss, kann dies die stationäre Integration an einer konkreten Anlage rechtfertigen. Dennoch sollte im Sinne einer umfassenden Nutzung des AR-Systems eine hohe Mobilität angestrebt werden. Dazu ist es erforderlich, dass das Gesamtsystem leicht auf- bzw. abgebaut werden kann, gut zu transportieren und zügig in Betrieb zu nehmen ist.

### 4.4.3 Integration mit Robotersteuerung und Simulation

Zweck der AR-Benutzerschnittstelle ist es, einen einfachen und umfassenden Zugriff auf den Roboter und dessen Leistungsumfang zur Verfügung zu stellen. Dazu ist eine informationstechnische Anbindung an die Robotersteuerung erforderlich, welche folgende Punkte umfasst:

- Das AR-System muss Roboterprogramme verwalten und mit der Robotersteuerung austauschen können. Im Sinne einer hohen Übertragbarkeit sollte eine herstellernerneutrale Datenhaltung vorgesehen werden. Für die Übersetzung in spezifische Programmstandards sind entsprechende Schnittstellen (sogenannte Prä- bzw. Postprozessoren) zu gestalten.
- Ebenso ist eine Kommunikation zwischen dem AR-System und dem Roboter vorzusehen. Es muss sowohl ein Datenaustausch, etwa für den Transfer von Programmen, als auch ein Zugriff auf die Steuerungsparameter und Funktionen des Roboters gegeben sein.



Bereits vorhandenes Planungswissen, etwa in Form von Modelldaten aus der Konstruktion, muss für die Programmierung nutzbar gemacht werden: Hierzu bedarf es einer Integration von Simulationsfunktionalitäten:

- Es sollte ein dreidimensionales Umweltmodell vorgesehen werden, welches zur Planung von Bewegungsabläufen und deren Überprüfung auf Kollisionsgefahren herangezogen werden kann.
- Für die Abbildung der Geometrie des Roboters und von Objekten in der Umgebung müssen Schnittstellen für den Import von CAD-Daten realisiert werden.
- Weiterhin bedarf es effizienter AR-basierter Modellierungsmethoden, die es ermöglichen, das Umweltmodell mit der realen Umgebung abzugleichen, vor Ort anzupassen und zu ergänzen (ZÄH et al. 2005c).
- Um Sollwerte für die Roboterachsen berechnen und Erreichbarkeitsanalysen durchführen zu können, werden Modelle der Roboterkinematik benötigt. Dabei sollten übertragbare Kinematikbeschreibungen, beispielsweise nach DENAVIT & HARTENBERG (1955) genutzt werden.
- Die Dynamik und das Regelungsverhalten des Roboters haben maßgeblichen Einfluss darauf, mit welchem Bahn- und Geschwindigkeitsverlauf eine spezifizierte Bewegung tatsächlich ausgeführt wird. Daher kann es im Einzelfall notwendig sein, Modelle der Dynamik und des Interpolationsverhaltens des Roboters einzubeziehen.

### 4.4.4 Sicherheit

Die Sicherheitsanforderungen an ein AR-System im Produktionsumfeld werden von PATRON (2005, S. 48) für den allgemeinen Fall ausgeführt. Demnach muss auf eine größtmögliche Gesundheitsverträglichkeit der Komponenten geachtet werden. Das AR-System sollte so gestaltet sein, dass Gefahrensituationen zuverlässig durch den Benutzer wahrgenommen werden. Des Weiteren dürfen Ausfälle und Störungen des Systems nicht zu sicherheitskritischen Situationen führen. Für den vorliegenden Fall sind darüber hinaus die von einem Industrieroboter ausgehenden Gefährdungen zu berücksichtigen (EN ISO 10218). Insbesondere muss die Benutzerschnittstelle im Sinne der Bediensicherheit (vgl. KRAISS 2006, S. 2) die Verständlichkeit, Vorhersagbarkeit und Beeinflussbarkeit des Systems Industrieroboter gewährleisten.

### 4.5 Benutzerorientierte Anforderungen

Für den Entwurf jedweder Benutzerschnittstelle ist es von essentieller Bedeutung, diese auf den Benutzer, seine Bedürfnisse, Fähigkeiten und Grenzen abzustimmen. Umso mehr gilt dies für die Gestaltung interaktiver AR-Systeme, bei denen der Benutzer selbst ein zentraler Bestandteil des Gesamtsystems ist. Die Leistungsmerkmale des Gesamtsystems werden nicht nur durch die Charakteristika der technischen Systemkomponenten bestimmt, sondern sind wesentlich von der Wahrnehmung und den Interaktionsmöglichkeiten des menschlichen Bedieners abhängig.

Ein anschauliches Beispiel hierfür ist die Lokalisierung eines virtuellen Objektes in Bezug auf die reale Umgebung. Die erzielbare Genauigkeit wird nicht nur durch die Auflösung des Anzeigesystems bestimmt, sondern ist auch unmittelbar vom Sehvermögen des Benutzers abhängig. Dementsprechend werden direkte 3D-Interaktionsverfahren von der manuellen Positioniergenauigkeit und der physischen Reichweite des Bedieners begrenzt.

Die Gestaltung der Benutzerschnittstelle und der Interaktionsverfahren ist daher bestmöglich auf das Auflösungsvermögen und die Reichweite des menschlichen Gesichtssinnes und der physischen Interaktionsmöglichkeiten des Menschen mit seiner Umgebung abzustimmen. Die technischen Systemkomponenten sind einerseits so zu gestalten, dass diese menschlichen Eigenschaften bestmöglich zum Tragen kommen, also keinesfalls durch das System oder seine Komponenten gemindert werden. Andererseits sollte das System, wo dies möglich ist, die Wahrnehmung und die Interaktionsmöglichkeiten des Menschen durch geeignete Hilfsmittel und Verfahren verstärken.

Um ein dauerhaftes, ermüdungsfreies Arbeiten mit dem System zu ermöglichen, ist eine geringe Belastung des Benutzers anzustreben. Die Hardwarekomponenten und die damit verbundenen Verfahren sind so auszulegen, dass die physiologische Belastung durch niedriges Gewicht und gute Handhabbarkeit auf ein Mindestmaß begrenzt wird. Insbesondere dürfen die Visualisierungskomponenten auch bei längerer Arbeit mit dem System keine Beschwerden, wie Augenspannung oder Kopfschmerzen verursachen. Letztendlich soll das System wenig Stress bei der Benutzung verursachen.

Der Benutzer sollte zum einen eine umfassende Kontrolle über die Funktionen des Robotersystems erhalten, zum anderen ist die Komplexität des Systems gering zu halten, um einer Überforderung vorzubeugen. Dazu muss eine optimale

Abstimmung auf die Erfahrung und das Wissen des Benutzers angestrebt werden. Dieser Aspekt gewinnt besondere Bedeutung, da mit dem AR-System einerseits Roboterprogrammierer bei ihrer Arbeit unterstützt andererseits aber auch Personen ohne besondere Roboterkenntnisse zur Durchführung von Programmieraufgaben befähigt werden sollen.

Für diese Nutzergruppe der Nicht-Experten muss eine fest definierte Vorgehensweise zur Verfügung gestellt werden, bei welcher lediglich Wissen über die Anforderungen des Prozesses vorausgesetzt wird und nur ein Mindestmaß an Roboterkenntnissen erforderlich ist. Demgegenüber sollten erfahrene Roboterprogrammierer nicht durch einen fest vordefinierten starren Prozessablauf beschränkt werden. Ihnen sollte eine flexible Nutzung der AR-Funktionalitäten gegebenenfalls auch im Zusammenspiel mit klassischen Methoden und Werkzeugen der Programmierung offen stehen. Die Abbildung 20 fasst die in diesem Kapitel angeführten Anforderungen abschließend zusammen.

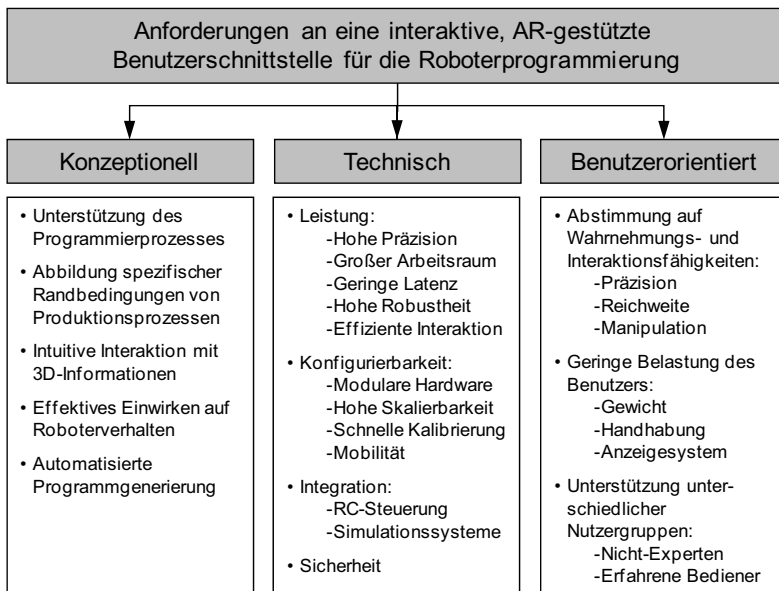


Abbildung 20 Übersicht der Anforderungen an die Benutzerschnittstelle

---

## **5 Konzeption und Systementwurf**

### **5.1 Überblick**

Im vorangegangenen Kapitel 4 wurden die Anforderungen an ein AR-gestütztes System für die Roboterprogrammierung erörtert. Darauf aufbauend werden in diesem Kapitel die erforderlichen methodischen und technischen Grundlagen erarbeitet und ein entsprechendes Systemkonzept entwickelt. Zunächst wird in Abschnitt 5.2 das grundsätzliche Funktionsprinzip einer AR-Unterstützung für die Roboterprogrammierung geklärt und es wird ein Einsatzvorgehen konzipiert.

Für die AR-Visualisierung wird in den Abschnitten 5.3 und 5.4 ein Konzept entworfen, welches insbesondere den Anforderungen eines Einsatzes im Produktionsumfeld Rechnung trägt. Ein Schwerpunkt liegt hierbei auf projektionsbasierten Visualisierungsverfahren. Ferner werden im Teilkapitel 5.5 komplementäre Methoden der automatisierten Geometrieerfassung untersucht, um neben der interaktiven Anzeige auch die Erfassung von 3D-Informationen zu ermöglichen.

Für die Interaktion mit dem Benutzer werden anschließend in Sektion 5.6, ausgehend von den Erfordernissen der Roboterprogrammierung, ein Eingabekonzept sowie AR-gestützte Interaktionsmethoden entwickelt. Letztlich werden in Abschnitt 5.7 die Teilverfahren zu Visualisierung, Eingabe und Interaktion in einer Synthese zu einem integrierten, modularen Systemkonzept zusammengeführt.

### **5.2 AR-basierte Roboterprogrammierung und Simulation**

#### **5.2.1 Funktionsprinzip**

Ein Augmented-Reality-System erweitert die menschliche Wahrnehmung so, dass virtuelle Objekte in der realen Umgebung erfasst werden können. Der Benutzer sieht sowohl reale Gegenstände, wie Werkstücke, Werkzeuge oder den Roboter selbst, nimmt aber durch die AR-Unterstützung zusätzliche Informationen wahr, die sich ansonsten seiner natürlichen Wahrnehmung entzögen. Diese virtuellen Informationen sind dreidimensional räumlich registriert. Das bedeutet, dass virtuelle Modelle so angezeigt werden können, dass sie in Größe, Form, Lage und Orientierung in direktem Bezug zu den realen Gegebenheiten stehen. Auf

diese Weise können wesentliche Informationen der Robotersteuerung, wie Bahninformationen aber auch Modelldaten, wie Bauteilgeometrien, Kollisionskörper oder Kinematikmodelle anschaulich im realen Umfeld visualisiert werden. Der Zusammenhang zwischen virtuellen Modelldaten und der Realität kann dadurch unmittelbar – ohne weiteres Umdenken – visuell erfasst werden.

Der Benutzer wird durch AR also in die Lage versetzt, mit virtuellen Objekten, gleichermaßen wie mit realen Gegenständen, auf natürliche Weise räumlich zu interagieren. Durch geeignete Interaktionsverfahren kann der Benutzer zudem räumliche virtuelle Informationen unmittelbar in der realen Umgebung manipulieren. So können virtuelle Bahnpunkte relativ zu realen Werkstücken positioniert werden oder Trajektorien an Bauteilkonturen angeglichen werden. Durch ein AR-System können dem Bediener folglich die zur Programmierung des Roboters und zur Simulation des Roboterhaltens notwendigen Informationen visualisiert werden. Der Benutzer kann so auf intuitive und anschauliche Weise mit den zu Grunde liegenden Modelldaten interagieren. Abbildung 21 verdeutlicht das Prinzip der AR-gestützten Programmierung und Simulation.

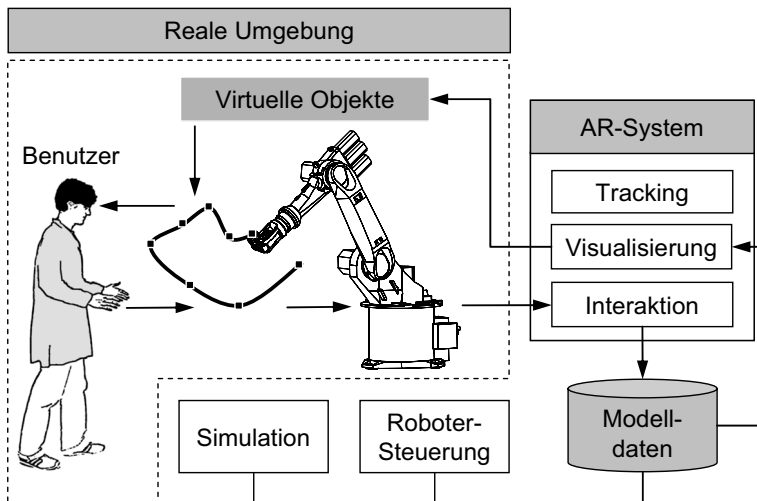


Abbildung 21 Prinzip der AR-gestützten Programmierung und Simulation

Der wesentliche Vorteil besteht darin, dass der Benutzer direkt mit den komplexen Simulations- und Steuerungsdaten in Wechselwirkung treten kann. Die Funktionalitäten von Offline-Simulationen bzw. die der realen Robotersteuerung können auf implizite Art zur Verfügung gestellt werden, ohne dass umfangrei-

ches Expertenwissen für die Bedienung benötigt wird. In Abbildung 22 sind diejenigen Inhalte dargestellt, welche mit einem AR-System visualisiert und bearbeitet werden können.

- **Umweltmodell:** Die Modelle der Umgebung des Roboters, insbesondere das Vorhandensein, die Lage und die Gestalt von Objekten können mit dem realen Umfeld überlagert angezeigt, korrigiert und ergänzt werden.
- **Bauteildaten:** Die Kontur und Maßinformationen von Bauteilmodellen können den realen Werkstücken überblendet werden. Neben dem Abgleich mit der Realgeometrie können diese Informationen, zum Beispiel Oberflächennormalen, unmittelbar zur Erstellung von Bahnprogrammen genutzt werden.
- **Kinematik:** Das Bewegungsverhalten des Roboters kann in Form eines virtuellen Modells des Roboters bzw. seiner einzelnen Achsen dargestellt werden. Dies hilft, das ansonsten schwer vorstellbare Verhalten des Roboters bei der Programmausführung einzuschätzen. Ebenso können Singularitäten, Arbeitsraumverletzungen oder Kollisionsgefahren veranschaulicht werden.
- **Trajektorien:** Die Bahn des Tool-Center-Point oder andere Trajektorien können angezeigt und dreidimensional manipuliert werden. Durch den unmittelbaren Bezug zu den realen Objekten können in der Simulation erstellte Bahnprogramme schnell an die tatsächlichen Geometrien angepasst werden. Ebenso können neue Trajektorien auf effiziente Weise erstellt werden.
- **Prozessparameter:** Bearbeitungsvorgänge bzw. deren Resultate können visualisiert und verändert werden. So können Schweißnähte oder Kleberauppen direkt am Bauteil definiert und bearbeitet werden. Weiterhin ist die Veranschaulichung von Prozessparametern, wie Vorschubgeschwindigkeiten oder Werkzeuganstellungen möglich.
- **Sensordaten:** Werden Kameras, Laserscanner oder andere Sensoren verwendet, so kann eine AR-Darstellung dem Bediener eine Rückmeldung über die Ergebnisse der sensorischen Erfassung geben und deren Qualität und Korrektheit verdeutlichen.

Zur praktischen Umsetzung der Potenziale dieser Anzeige- und Interaktionsmöglichkeiten bedarf es deren methodischer Integration in den Programmierprozess sowie geeigneter technischer Verfahren und einer entsprechenden Systemunterstützung.

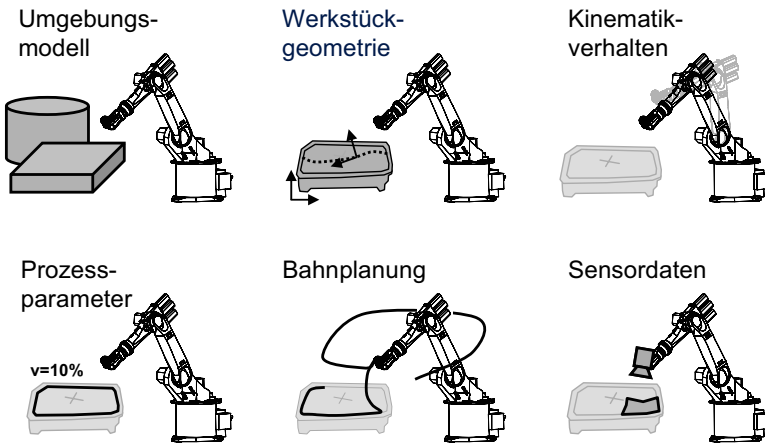


Abbildung 22 Überblick der mit AR visualisierbaren Informationen

### 5.2.2 Einsatzvorgehen

AR ermöglicht eine neue Form der Rechnerunterstützung für die Programmierung und Simulation von Robotern. Sowohl der Umgang mit AR-Systemen als auch deren Nutzung in der Roboterprogrammierung stellen für Mitarbeiter jedoch zunächst eine Herausforderung dar. Weder bei Robotersimulationsexperten noch bei Programmierern oder Produktionsmitarbeitern kann diesbezüglich Erfahrung vorausgesetzt werden. Ebenso liegt kein detailliertes Wissen vor, für welche Aspekte AR anwendbar ist und wie dabei vorzugehen ist. Um die Potenziale der AR-Technologie in vollem Umfang nutzbar zu machen, bedarf es daher eines strukturierten, definierten Vorgehens für den Einsatz der AR-Technologie.

Nachfolgend wird hierzu zunächst eine Methode erarbeitet, welche die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Nutzungsaspekte in einem strukturierten Vorgehen einbettet. Dabei werden vier verschiedene Phasen – **die Konfiguration des AR-Systems, die Bearbeitung von Modelldaten, die Bearbeitung von Programmen und deren Simulation** – unterschieden.



### 5.2.2.1 Konfiguration des AR-Systems

Zunächst ist es erforderlich, das verwendete AR-System den Anforderungen entsprechend zu konfigurieren. Sofern die Anbringung nicht stationär erfolgt, ist hierfür der Aufbau und Anschluss der Hardwarekomponenten, wie etwaiger Tracking- und Visualisierungsgeräte erforderlich. Die AR-Software muss anschließend so konfiguriert werden, dass zum einen der Hardwareaufbau entsprechend abgebildet wird, zum anderen die technischen Aspekte des Robotersystems, wie Programmstandards oder Leistungsdaten berücksichtigt werden. Im nächsten Schritt gilt es, die benötigten Modellparameter zu definieren. Dabei sind die Kinematikparameter und ein Geometriemodell des Roboters notwendige Voraussetzung. Eine Kalibrierung stellt dann eine korrekte Referenzierung des AR-Systems bzw. seiner Teilkomponenten auf die verwendeten Koordinatensysteme sicher.

### 5.2.2.2 Modellierung

Korrekte Modelldaten bilden eine wesentliche Voraussetzung für die Programmierung und die Simulation von Robotern. Augmented Reality stellt dem Benutzer virtuelle Modelle mit der Realität überlagert dar. Dabei wird der räumliche Zusammenhang zwischen virtuellen Daten und real vorhandenen Merkmalen der Umgebung für den Menschen wahrnehmbar. Der Mensch erfasst die Position, Orientierung und Gestalt der virtuellen Objekte zusammen mit seiner natürlichen Umgebungswahrnehmung. Bezüge bzw. Diskrepanzen zwischen virtuellen Modellen und realen Objekten werden – sofern ein geeignetes AR-Visualisierungssystem vorliegt – auf einfache Weise erkennbar. Durch die kombinierte Wahrnehmung kann der Mensch außerdem mit Hilfe entsprechender Interaktionsverfahren die Modelldaten an die reale Umgebung anpassen. Daraus lassen sich folgende Nutzungsszenarien für die Programmierung von Robotersystemen ableiten:

- **Visualisierung:** Der Benutzer importiert vorhandene Geometriedaten, um diese im realen Umfeld zu visualisieren und die Korrektheit zu überprüfen. Ein direkter Vergleich von existierenden Modelldaten mit realen Gegenständen ist somit möglich. Das Vorhandensein, die Lage, die Größe und die Gestalt virtueller bzw. korrespondierender realer Objekte können kontrolliert werden. Es wird sichergestellt, dass die zur Programmierung bzw. zur Simulation verfügbaren Modellinformationen mit der Realität

übereinstimmen. Dieses Verfahren eignet sich grundsätzlich für das Layout und die Struktur der Roboterumgebung, die Kinematik, Vorrichtungen und Werkzeuge sowie die Werkstückgeometrie.

- **Modellbearbeitung:** Der Bediener interagiert mit den visualisierten Informationen und erzeugt bzw. editiert Modelldaten im realen Umfeld. Die Bearbeitung der Modellinformationen stützt sich dabei unmittelbar auf die angereicherte Umgebungswahrnehmung des Benutzers. Der Mensch erkennt so zuverlässig, welche Modellaspekte für die vorliegende Aufgabe wesentlich sind und kann diese zielgerichtet bearbeiten. Die zentralen geometrischen Aspekte vorhandener Gegenstände werden durch Interaktionsverfahren, beispielsweise durch Eingabe von Raumpunkten, erfasst und in Modelle überführt. Abhängig vom Anwendungsfall muss der Benutzer durch geeignete Interaktionskonzepte, Modellierungshilfen und Messfunktionen unterstützt werden. Beispielhaft seien hier die Bearbeitung von Werkstückmodellen, die Eingabe kollisionsgefährdeter Objekte wie Vorrichtungen oder die Definition von zulässigen Bewegungsbereichen für den Roboter genannt.
- **Automatische Vermessung:** Neben der manuellen Erfassung von Umgebungseigenschaften kommt der automatisierten Vermessung mit Hilfe technischer Sensorik eine besondere Bedeutung zu. Räumlich messende Sensoren, wie beispielsweise Laserscanner, können in Verbindung mit AR-gestützten Interaktionsverfahren genutzt werden, um gezielt Modelldaten zu erzeugen. Die zu erfassenden Bereiche, etwa Teile von Oberflächen, werden direkt in der realen Umgebung bzw. an den realen Objekten definiert. Die festgelegten Messbereiche werden dann automatisch erfasst und die Ergebnisse in der AR-Visualisierung dargestellt, so dass der Benutzer eine direkte Rückmeldung erhält. Die gemessenen Informationen stehen schließlich zur weiteren Bearbeitung und zur Übernahme in die Modelldatenbasis zur Verfügung.

Mit den genannten Teilaspekten ermöglicht die AR-Technologie eine intuitive Visualisierung und Bearbeitung von 3D-Modelldaten im realen Umfeld. Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt hierzu ein Beispiel für die Vermessung zwischen realen und virtuellen Objekten. Mit den geschilderten Methoden werden Modelldaten effizient und wirkungsvoll überprüft, korrigiert und erweitert. So kann sichergestellt werden, dass für die Programmerstellung und die Simulation umfassende und korrekte Modelldaten zur Verfügung stehen.

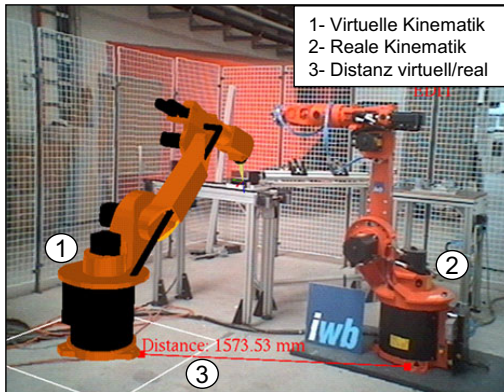


Abbildung 23 Visualisierung des Umgebungsmodells und Vermessung

### 5.2.2.3 Programmbearbeitung

Der Kern der Programmerstellung besteht darin, die Fertigungsaufgabe in für den Roboter ausführbare Abfolgen von Logik- und Bewegungsbefehlen zu übersetzen. Die Aktionen des Roboters müssen hierzu in korrektem räumlichen Bezug zur Umgebung, insbesondere zu Werkstücken, definiert werden. Offline-Verfahren stützen sich vollständig auf Modellinformationen und bieten – außer einer nachträglichen Digitalisierung – keine Möglichkeit, den Bezug zur Realität zu überprüfen. Bei der Onlineprogrammierung stellt das Abfahren mit dem Roboter die einzige Möglichkeit dar, Positionsdaten zu verifizieren.

Demgegenüber werden Programmdaten mittels der AR-Technologie unmittelbar an realen Objekten sichtbar gemacht. Der Benutzer sieht Trajektorien, Bahnpunkte, Werkzeugaktivitäten direkt vor dem Hintergrund der realen Umgebung und manipuliert diese, entweder mit klassischen Eingabemethoden oder mithilfe von 3D-Eingabegeräten. Abbildung 24 zeigt eine Trajektorie in der AR-Ansicht und ein Eingabegerät zur räumlichen Interaktion. Es eröffnen sich damit die folgenden Nutzungsfälle für die Bearbeitung von Programmen:

- **Programmüberprüfung:** Der Bediener sieht ein reales Objekt, beispielsweise ein Bauteil, überlagert mit einer Veranschaulichung der Programmdaten. Dabei werden zum einen der Inhalt des Programms, zum anderen dessen Zusammenhang mit den relevanten geometrischen Umgebungsmerkmalen für den Menschen einfach erkennbar. Der Bediener beurteilt die Korrektheit eines Programms durch direkten Vergleich der Tra-

jektoren mit realen Objekten. Es wird deutlich, wenn Programme nicht korrekt registriert, also die Gesamtheit der Bahnpunkte falsch im Raum positioniert ist oder wenn einzelne Programmbestandteile nicht den tatsächlichen Gegebenheiten und Bauteilgeometrien entsprechen.

- **Programmanpassung:** Nachdem Diskrepanzen zwischen Programmdaten und den Umgebungsrandbedingungen erkannt worden sind, beseitigt der Benutzer diese durch kontinuierliche Interaktionsmethoden. Die betroffenen Bahnpunkte oder Bahnsegmente werden unter Beobachtung der AR-Visualisierung solange manipuliert und im Raum verschoben, bis die erforderliche Übereinstimmung erreicht ist. Vorhandene Programmdaten aus der Offline-Programmierung werden auf diese Weise effektiv an die Realgeometrien angepasst. Ebenso können Bauteiltoleranzen und andere Abweichungen schnell korrigiert werden.
- **Programmerstellung:** Neben der Anpassung vorhandener Programme gestattet die AR-Technologie auch eine effiziente Generierung von neuen Programmen auf Basis vorhandener Bauteile. Der Benutzer zeichnet dabei die Programminhalte mit 3D-Eingabegeräten am realen Objekt an und erhält die resultierenden Ergebnisse unmittelbar in der AR-Ansicht visualisiert. Die Inhalte objektbezogener Bearbeitungsvorgänge wie Schweißnähte oder Kleberaupen werden am Werkstück graphisch-interaktiv editiert. Auch komplexe Bearbeitungsprogramme können mit diesem Vorgehen in kurzer Zeit zuverlässig erstellt werden. Durch die anschauliche Darstellung werden auch wenig geübte Bediener dazu befähigt, Roboterprogramme zu erstellen und zu bearbeiten.

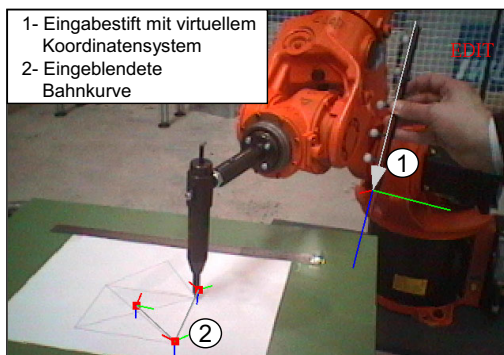


Abbildung 24 Visualisierung und Bearbeitung von Trajektorien

Durch eine konsequente methodische und technische Integration mit existierenden Ansätzen können zudem weiterführende Möglichkeiten der Bedienerunterstützung erschlossen werden. In Verbindung mit dem Interaktionsmedium AR werden die folgenden Konzepte in der realen Produktionsumgebung anwendbar:

- **Modellgestützte Programmierung:** Der Nutzer hat durch die Visualisierungs- und Modellierungsfunktionen auch im realen Umfeld unmittelbaren Zugriff auf Modelldaten. Bei der Bearbeitung von Programmdaten kann auf diese Modelle zurückgegriffen werden. Vorliegende Geometrieinformationen, wie Oberflächennormalen, Konturen oder andere Merkmale werden für die Erzeugung und Manipulation von Programminhalten verwendet. Dadurch wird der Umfang manueller Eingaben deutlich verringert. Gleichzeitig ist durch die AR-Visualisierung eine Übereinstimmung der Modellinformationen mit der Realität gewährleistet und Abweichungen sind mit wenig Aufwand korrigierbar.
- **Automatisierte Aufgaben und Bahnplanung:** Verfahren der künstlichen Intelligenz bieten große Potenziale für eine Automatisierung der Aufgaben- und Bahnplanung. Sie benötigen dazu jedoch umfassende, korrekte Modelldaten, wie sie sonst nur in Offline-Simulationen verfügbar sind. Weiterhin ist eine Interaktion mit dem Benutzer zum Abgleich der Modelldaten, zur Spezifizierung der Aufgabe und zur Verifizierung der Planungsergebnisse notwendig. Diese Anforderungen können mit der AR-basierten Interaktion abgedeckt werden, so dass damit automatische Bahnplanungsverfahren auch im Produktionsumfeld einsetzbar sind. Die Verbindung von Modelldaten und realer Beobachtung ermöglicht dem Benutzer zum einen die aufwandsarme Spezifikation der Planungsaufgabe, zum anderen eine unmittelbare Überprüfung der resultierenden automatisch generierten Trajektorien und Aktionen.
- **Implizite Programmierung:** AR-basierte Metaphern unterstützen eine intuitive, aufgabenorientierte Darstellung und Bearbeitung von Programminhalten. Das bedeutet, dass die Interaktion sich im Wesentlichen auf die Festlegung der beabsichtigten Resultate des Produktionsvorganges beschränkt. Der Benutzer legt mittels der AR-Interaktion nur das gewünschte Ergebnis, beispielsweise in Form virtueller Kleberaupen oder Schweißnähte fest während die Planung der Roboterbewegungen und -aktionen implizit im Hintergrund durch automatisierte Planungsverfahren erfolgt. Die Anforderungen an den Benutzer werden somit fast ausschließlich auf

die Spezifikation der Produktionsaufgabe und das dazu benötigte Expertenwissen beschränkt, so dass auch Personen mit geringen Roboterkenntnissen zur Programmierung befähigt werden.

### 5.2.2.4 Simulation und Test

Neben der Programmerstellung ist es von wesentlicher Bedeutung, die Auswirkungen des Programms und das Verhalten des Robotersystems beurteilen zu können. Mithilfe von AR-Darstellungen kann dem Benutzer ein anschaulicher Eindruck der Roboteraktionen vermittelt werden, wobei die Wahrnehmung des realen Umfeldes einbezogen wird. Das Verhalten der Kinematik, der Peripherie und die Prozessergebnisse können damit gefahrlos visualisiert werden (vgl. Abbildung 25). Die resultierenden Abläufe werden schrittweise visualisiert, so dass unerwünschte Effekte oder Kollisionsgefahren erkannt werden. Einen weiteren Aspekt stellt die Visualisierung von Schaltbefehlen der Roboterperipherie, etwa des Ein-/Ausschaltens von Werkzeugen dar. Die Zustandsinformationen einzelner Aktoren, wie auch die Erfassungsergebnisse bildverarbeitender oder anderer Sensoren können zu Testzwecken im realen Umfeld visualisiert und überprüft werden. Die geschilderten AR-basierten Visualisierungs- und Simulationsfunktionen sind zum einen hilfreich für den Test und die Inbetriebnahme von bereits erstellten Programmen. Zum anderen bieten sie eine zusätzliche Veranschaulichung während der Programmerstellung.

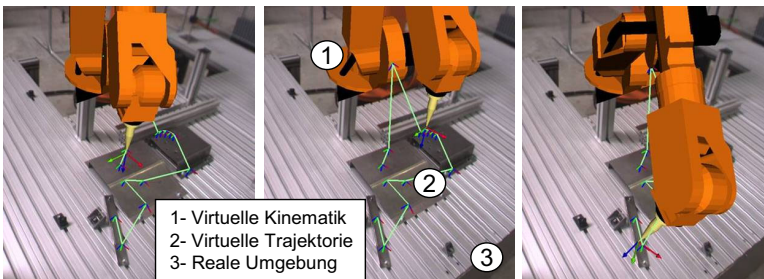


Abbildung 25 AR-gestützte Kinematikvisualisierung

### 5.2.2.5 Zusammenfassung des Vorgehens

Vorangehend wurde ein methodisches Vorgehen für den Einsatz der AR-Technologie in der Programmierung von Roboteranwendungen erarbeitet. Dabei wurden die Konfiguration des AR-Systems, die interaktive Modellierung, die

Bearbeitung und die Simulation von Roboterprogrammen betrachtet. Die Abbildung 26 gibt einen zusammenfassenden Überblick der Methode sowie der einzelnen Vorgehensschritte und ihrer Eingangs- und Ausgangsgrößen.

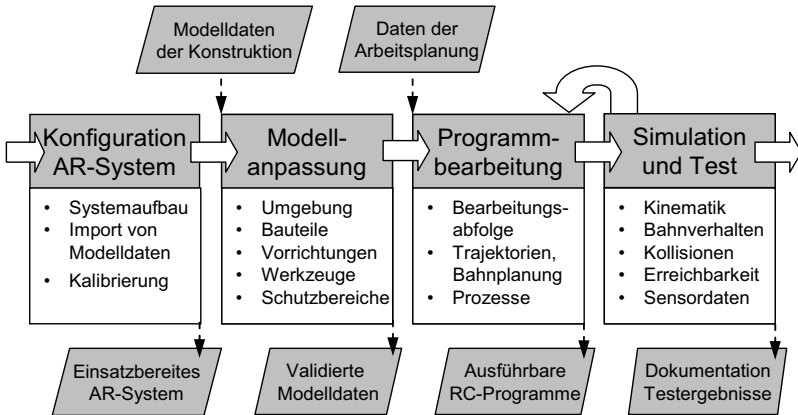


Abbildung 26 Vorgehen für die AR-basierte Programmierung und Simulation

### 5.2.3 Anforderungen an ein Systemkonzept

Bisher wurden die konzeptionellen und methodischen Grundlagen einer Nutzung der AR-Technologie bei der Roboterprogrammierung ausgearbeitet. In diesem Rahmen wurden ein Funktionsprinzip und ein Einsatzvorgehen entwickelt.

Um diesen Ansatz in der Praxis nutzen zu können, bedarf es nun der Konzeption und des Entwurfs eines geeigneten technischen Systems. Hierzu ist es erforderlich, leistungsfähige Verfahren und Komponenten zu erarbeiten und diese in einem integrierten Systementwurf zu vereinigen. Einen elementaren Bestandteil bilden in diesem Zusammenhang die Visualisierungsverfahren zur Darstellung der virtuellen Inhalte. Ebenso müssen geeignete Methoden und Verfahren der Interaktion zur Verfügung gestellt werden, um dem Benutzer ein effektives Einwirken auf die virtuellen Inhalte zu ermöglichen. Eine dafür erforderliche Basistechnologie mit wesentlichem Einfluss auf die Güte des Gesamtsystems stellt die Positionserfassung dar.

Visualisierung und Interaktion müssen zum einen so gestaltet sein, dass eine hohe Benutzerfreundlichkeit erreicht wird (vgl. Abschnitt 4.3). Dies umfasst vor allem die zu Grunde liegenden Metaphern, die verwendeten Darstellungsformen

und die Vorgehensweisen bei der Anwendung. Es muss sichergestellt sein, dass der Benutzer alle wesentlichen Inhalte in geeigneter Form verständlich erfassen und diese wirkungsvoll manipulieren kann (vgl. Abschnitt 4.5). Zum anderen müssen Visualisierung und Interaktion den technischen Anforderungen der Roboterprogrammierung entsprechen, also die geforderte Robustheit, Genauigkeit und Arbeitsraumabdeckung erreichen (vgl. Abschnitt 4.4). Nachfolgend wird die AR-Visualisierung betrachtet. Im Anschluss daran werden die Basistechnologie der Positionserfassung und darauf aufbauend Eingabe- und Interaktionsverfahren behandelt, bevor die erarbeiteten Teillösungen in einem integrierten Entwurf zusammengeführt werden.

### 5.3 Konzeption der Visualisierung

Zunächst werden an dieser Stelle die Visualisierungsverfahren der Augmented Reality vor dem Hintergrund der zuvor identifizierten Einsatzbereiche Modellierung, Programmbearbeitung und Simulation vergleichend gegenüber gestellt. Darauf basierend wird eine Zuordnung zu den jeweiligen Anwendungsbereichen vorgenommen.

#### HMD-gestützte Visualisierung

Datenbrillen bieten dem Benutzer eine AR-Darstellung mit einem hohen Immersionsgrad. Virtuelle Inhalte sind damit detailgetreu und an beliebiger Stelle in der Umgebung darstellbar. Dies eignet sich sehr gut für Aufgaben, bei denen die Umgebung umfassend synthetisch erweitert werden und der Benutzer einen möglichst tief gehenden Eindruck erhalten soll. Beispiele hierfür finden sich in der Fabrikplanung oder der Innenarchitektur. Diesen Vorteilen stehen jedoch umfangreiche ergonomische und gerätetechnische Einschränkungen entgegen (vgl. Abschnitte 3.2.2 und 10.2), welche einen operativen Einsatz im Produktionsumfeld nicht sinnvoll erscheinen lassen. Das begrenzte Gesichtsfeld, eine unnatürliche Wahrnehmungssituation und das Gewicht der Anzeigegeräte schränken den Benutzer so massiv ein, dass ein dauerhafter Einsatz, wie bei der Programmierung von Industrierobotern benötigt, nicht möglich ist. Die Hand-Auge-Koordination ist zudem stark beeinträchtigt, was eine präzise räumliche Interaktion mit den virtuellen Inhalten nicht zulässt.

Dem hohen gerätetechnischen Aufwand für HMD steht somit ein für die Roboterprogrammierung geringer Nutzeneffekt gegenüber. Im Rahmen der vorliegen-



den Arbeit wird daher nicht weiter auf Head-Mounted-Displays eingegangen. Für detaillierte Ausführungen zur Realisierung HMD-gestützter AR-Systeme sei an dieser Stelle auf Arbeiten von PATRON (2005) und GIESLER (2006) verwiesen.

### **Monitorbasierte AR-Visualisierung**

Ähnlich wie Datenbrillen eignen sich MAR-Anzeigen gut dazu, dem Nutzer übergeordnete geometrische Zusammenhänge, insbesondere den räumlichen Bezug zwischen virtuellen Modellen und realen Gegenständen, zu vermitteln. Als Beispiel sei die Lage und Gestalt einer virtuellen Kinematik vor dem realen Umfeld genannt. Ein Vorteil ist dabei, dass die Szene aus beliebiger, anhand der Kameraposition einstellbarer Perspektive betrachtet werden kann. Anwendungsmöglichkeiten liegen darin, Posen und Bewegungsbereiche des Roboters zu visualisieren. Weiterhin kann eine MAR-Visualisierung dazu genutzt werden, das Umgebungsmodell des Roboters bezüglich des Vorhandenseins, der Lage und der Gestalt von Kollisionsobjekten durch den Benutzer validieren zu lassen.

Demgegenüber sind jedoch detaillierte geometrische Verhältnisse, wie die exakte Position eines Bahnpunktes oder der Verlauf einer Trajektorie in Bezug zu einer Objektoberfläche auch trotz zusätzlicher Orientierungshilfen in MAR-Darstellungen nur unzureichend erkennbar. Auch für eine Positionierung virtueller Elemente in der realen Umgebung reicht eine MAR-Ansicht alleine nicht aus. Es ist daher nur ein geringes Maß an räumlicher Interaktion mit den virtuellen Inhalten bei gleichzeitig stark begrenzter Präzision möglich.

Die Umsetzung von monitorbasierten AR-Anzeigen ist mit einem geringen technischen Aufwand verbunden. MAR-Systeme offerieren dafür in ausgewählten Teilbereichen einen zusätzlichen Nutzwert. Vor allem für die Darstellung von Kinematikbewegungen und des räumlichen Verlaufs von Trajektorien erscheint der Einsatz von MAR als unterstützendes Visualisierungsmedium in Mensch-Roboter-Schnittstellen demzufolge sinnvoll.

### **Projektionsbasierte Anzeigen**

Ein Projektor sendet strukturiertes, in der Regel farbiges Licht aus, das dort, wo es auf ein Hindernis trifft, reflektiert und wahrgenommen wird. Diese Geräte eignen sich folglich dazu, auf Oberflächen der realen Umgebung zusätzliche Informationen einzublenden, vorausgesetzt, es befindet sich kein Hindernis zwischen Projektor und Oberfläche. Es besteht ferner die Möglichkeit, mehrere Ge-

räte gleichzeitig zu benutzen, um das Problem unerwünschter Hindernisse und der damit verbundenen Verschattung zu umgehen.

Mit projektionsbasierter AR (PAR) lassen sich vornehmlich objektbezogene 3D-Informationen, wie sie bei robotergestützten Bearbeitungsvorgängen auftreten, gut visualisieren. Hingegen sind frei im Raum verlaufende Trajektorien, beispielsweise bei Handhabungsoperationen, damit nicht direkt darstellbar. Anders als MAR belässt dieser Ansatz den Blick des Benutzers am eigentlichen Ort des Geschehens anstatt ihn auf einen Monitor zu lenken. Auch schränkt das Verfahren die Sicht und die Bewegungsfreiheit des Menschen nicht durch am Kopf getragene Displaybrillen ein. Tabelle 4 stellt die Verfahren vergleichend gegenüber.

*Tabelle 4 Gegenüberstellung monitorbasierter und projektionsbasierter AR*

Kriterium	Monitor-AR	Projektions-AR
Anzeigemöglichkeiten	frei im Raum	oberflächengebunden
Visuelle Wahrnehmung	reduziert auf Kamerabild	uneingeschränkt
Bewegungsfreiheit	eingeschränkt, Blick auf Monitor	uneingeschränkt
Direkte Interaktion möglich	nein	ja
Abgeleitete Nutzung	⇒ Ergänzende Visualisierung	⇒ Interaktionsmedium

Mittels Projektionsanzeigen können virtuelle Informationen mit einer Präzision im Submillimeterbereich auf Objektoberflächen angezeigt werden. Da PAR gleichzeitig weder die visuelle Wahrnehmung des Nutzers einschränkt noch die Hand-Auge-Koordination und die Bewegungsfreiheit mindert, birgt eine Verbindung von PAR mit direkten Interaktionsverfahren ein großes Potenzial.

Demzufolge wird der Einsatz von Projektions-AR als zentrales Interaktionsmedium für die Anzeige und die Bearbeitung von Trajektorien, Positions- und Modelldaten für Industrieroboter vorgeschlagen. Die dafür notwendigen Verfahren zur Anzeige und Interaktion werden im Folgenden detailliert ausgearbeitet. Monitorbasierte AR-Anzeigen werden dabei lediglich als ergänzendes Visualisierungsmittel zur Veranschaulichung für den Benutzer verwendet (vgl. Tabelle 5).

*Tabelle 5 Nutzungsaspekte für die Anzeigeverfahren MAR und PAR*

Visualisierungsaspekt	Monitor-AR	Projektions-AR
Darstellung von Modelldaten	Szenenaufbau: Lage und Konturen von Objekten	Exakte Objektmerkmale: Kanten, Messpunkte, etc.
Anzeige von Trajektorien	Trajektorienverlauf im Raum (Übersicht)	Objektbezogene Trajektorien (Detail)
Simulationsdarstellung	Posen und Bewegungsverhalten der Kinematik	-

## 5.4 Projektionsgestützte AR-Visualisierung

Im Folgenden wird der Einsatz von Projektionsgeräten für eine interaktive Visualisierung und Bearbeitung räumlicher Informationen betrachtet. Als Anzeigegeräte werden zum einen Videoprojektoren herangezogen, wie sie heute als Präsentationsgeräte verwendet werden. Zum anderen werden scannende Laserprojektoren betrachtet, welche einen Laserstrahl über einen Galvanometerscanner ablenken. Diese beiden Geräteklassen werden hinsichtlich ihrer Anzeigeeigenschaften und ihrer jeweiligen Einsatzmöglichkeiten charakterisiert. Zu einer geometrisch korrekten Anzeige von 3D-Informationen ist außerdem eine Kalibrierung erforderlich. Die dafür notwendigen mathematischen Modelle werden angeführt, anschließend wird ein entsprechendes Vorgehen entwickelt. Ebenso wird darauf eingegangen, wie der Arbeitsraum durch die Kombination mehrerer Projektionsgeräte bzw. durch deren mobile Anbringung erweitert werden kann.

### 5.4.1 Videoprojektoren

#### 5.4.1.1 Grundlegende Eigenschaften

Videoprojektoren, auch Beamer genannt, modulieren Licht durch ein Flüssigkristall-Array oder ein Spiegel-Array und projizieren es über ein Linsensystem auf die in der Regel senkrecht zur Projektionsrichtung stehende Anzeigefläche. Als Lichtquellen kommen Hochdrucklampen und für miniaturisierte Geräte zunehmend auch LED zum Einsatz. Die graphischen Darstellungsmöglichkeiten heutiger Beamer in Bezug auf Bildpunkteanzahl und Farbspektrum erreichen annähernd die Werte von Monitoren (vgl. Abschnitt 3.2.3.2).

Die Bildgröße verhält sich bei Projektoren direkt proportional zur Entfernung der Anzeigefläche vom Projektor. Der Arbeitsraum wird somit durch die Breite  $w$  und die Höhe  $h$  des Bildes in einer bestimmten Entfernung  $d$  vom Projektor festgelegt. Alle weiteren Kombinationen lassen sich, wie Abbildung 27 verdeutlicht, mit Hilfe des Strahlensatzes errechnen. Die Anzahl der Bildpunkte in vertikaler und horizontaler Richtung sind in der Regel so gewählt, dass quadratische Pixel vorliegen.

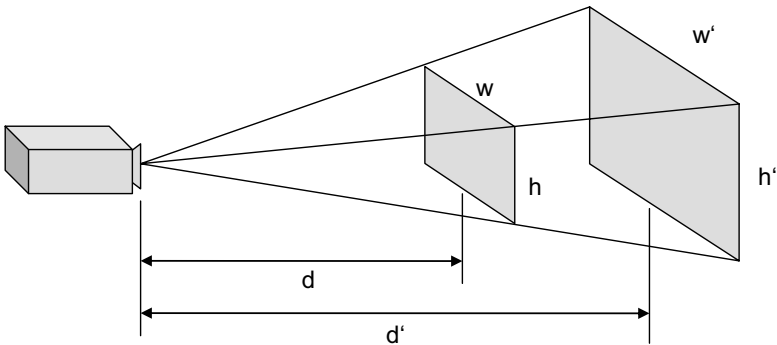


Abbildung 27 Arbeitsraumgeometrie eines Videoprojektors

Zwar wächst die Anzeigefläche von Videoprojektoren mit zunehmendem Abstand, gleichzeitig verteilt sich jedoch die Leuchtstärke auf eine größere Fläche. Damit nimmt die Größe des Bereichs, auf welchem ein einzelnes Pixel dargestellt wird, zu. Es steht also in geringer Entfernung ein leuchtstarkes, hochauflöses dafür aber kleines Bild zur Verfügung. Größere Distanzen führen zu einem größeren Arbeitsraum mit einem lichtschwächeren und geringer aufgelösten Bild.

Die Ausdehnung des für PAR nutzbaren Arbeitsraumes wird zudem von den Abbildungseigenschaften der Optik bestimmt. Videoprojektoren sind als 2D-Anzeigegeräte für eine ebene Projektionsfläche ausgelegt. So ist das Bild in jeweils einer bestimmten Entfernung von der Linse scharf und wird bei Abweichungen von dieser Distanz unscharf. Die Schärfentiefe beschreibt die Ausdehnung des Bereichs, in dem scharf projiziert wird bzw. in dem die Unschärfe vernachlässigbar klein bleibt. In der Praxis kann die Unschärfe toleriert werden solange sie kleiner als die Größe eines Pixels bleibt. So lässt sich die Schärfentiefe mittels einer einfachen geometrischen Betrachtung des Abbildungsverhaltes von Projektoren charakterisieren (vgl. Abbildung 28).

Ein Beamer mit Linsendurchmesser  $D$  sei auf die Entfernung  $d$  scharf eingestellt. Ein Punkt werde in der Entfernung  $d + \Delta d$  hinter bzw.  $d - \Delta d$  vor der Schärfenebene unscharf auf die Kreisscheibe mit Durchmesser  $\varepsilon$  abgebildet. Nach dem Strahlensatz kann die Schärfentiefe  $2\Delta d$  wie folgt berechnet werden:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{\Delta d}{d} \Leftrightarrow 2\Delta d = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot d}{D}. \quad (5-1)$$

Die Unschärfe ist tolerierbar, solange  $\varepsilon$  nicht die Größe eines Pixels übersteigt.

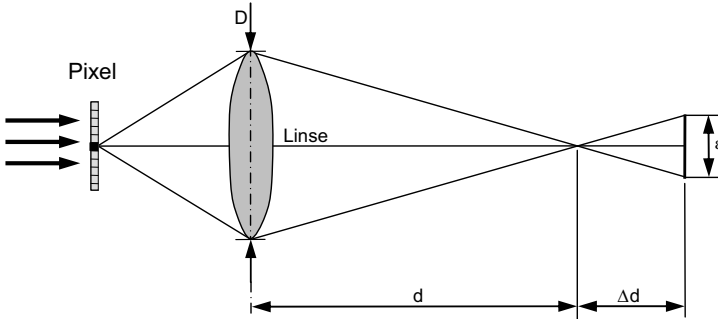


Abbildung 28 Überlegung zur Schärfentiefe

Dennoch wird der nutzbare Arbeitsraum durch die Schärfentiefe in geringen Abständen sehr stark beschränkt. Beispielsweise ergibt sich bei einer Pixelgröße  $\varepsilon = 0,5 \text{ mm}$  und einer effektiven Linsengröße  $D = 10 \text{ mm}$  im Abstand  $d = 0,5 \text{ m}$  ein Schärfebereich von lediglich  $2\Delta d = 50 \text{ mm}$ . In der Praxis ist mit einem solchen Aufbau jedoch ein brauchbarer Schärfebereich von  $0,25 \text{ m}$  und mehr zu beobachten. Dies erklärt sich zum einen dadurch, dass eine Unschärfe bis zu drei Pixel durchaus noch eine gute Sichtbarkeit zulässt. Zum anderen ist die effektive Linsengröße, welche tatsächlich genutzt wird, in der Regel kleiner als der nominelle, vom Hersteller angegebene Wert. Dennoch wird an diesem Beispiel deutlich, dass die geringe Schärfentiefe den Arbeitsraum stark einschränkt.

### 5.4.1.2 Mathematisches Modell

Die Anzeige dreidimensionaler, geometrischer Informationen mit einem Projektor setzt ein mathematisches Modell der zugrunde liegenden optischen Abbildung voraus. Zudem bedarf es eines robusten und aufwandsarmen Kalibrierverfahrens zur Bestimmung der Projektionsparameter.

Für Videoprojektoren kann die folgende, in Abbildung 29 veranschaulichte Modellvorstellung verwendet werden: Ein Beamer projiziert einen Punkt der Bildebene entlang einer Halbgeraden im Raum. Die Halbgeraden aller Bildpunkte schneiden sich an einem Punkt C, dem optischen Zentrum. Derjenige Strahl, welcher die Bildebene senkrecht im zugehörigen Punkt P durchstößt, bildet die optische Achse. Diese Vorstellung entspricht weitgehend dem in der Bildverarbeitung häufig verwendeten Modell einer Lochbildkamera (vgl. z. B. HARTLEY & ZISSERMAN 2004, S. 154), mit dem Unterschied, dass die Richtung der Licht-

strahlen umgekehrt ist. Als zulässige und häufig angewendete Vereinfachung wird zudem die Bildebene vor dem optischen Zentrum angenommen.

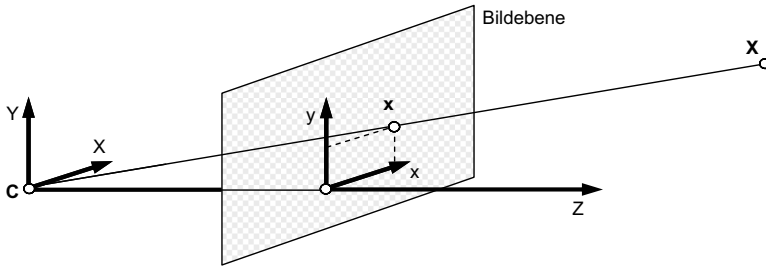


Abbildung 29 Abbildungsverhalten eines Videoprojektors

Der Zusammenhang zwischen einem homogenen<sup>4</sup> Punkt im Raum  $\mathbf{X} = (X, Y, Z, T)$  und dem zugehörigen homogenen Punkt der Bildebene  $\mathbf{x} = (x, y, w)$  lässt sich mit einer Matrix  $\mathbf{P}$  vom Typ  $(3 \times 4)$  wie folgt beschreiben:

$$\mathbf{P}\mathbf{X} = \mathbf{x}. \quad (5-2)$$

Die Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  beinhaltet dabei zum einen die extrinsischen Parameter, welche die Lage des Projektors im Raum widerspiegeln. So lassen sich die optische Achse und das Zentrum des Projektors durch Dekomposition aus  $\mathbf{P}$  bestimmen. Zum anderen sind in der Projektionsmatrix die intrinsischen Parameter der optischen Abbildung enthalten, welche vom inneren Aufbau des Projektors, also z. B. von dessen Brennweite und dem Verhältnis der Bildkanten, abhängig sind (vgl. z. B. HARTLEY & ZISSERMAN 2004, S. 163 ff.).

### 5.4.1.3 Kalibrierung

Damit ein Projektor als 3D-Anzeigegerät verwendet werden kann, ist es erforderlich, eine geeignete Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  zu ermitteln. Analog zum Vorgehen bei der Kalibrierung einer Kamera (HARTLEY & ZISSERMAN 2004, S. 178 ff.) kann dies anhand einer ausreichenden Anzahl korrespondierender Paare von Bildpunkten  $\mathbf{x}_i$  und Raumpunkten  $\mathbf{X}_i$  erfolgen. Grundlage hierfür ist die Tatsache, dass diese Punktpaare jeweils auf einer Halbgeraden im Raum liegen, welche vom

---

<sup>4</sup> Homogene Koordinaten erlauben es, affine Koordinatentransformationen durch Matrixmultiplikationen abzubilden. Sie werden in der Robotik, der Computergraphik und der Bildverarbeitung häufig verwendet (siehe z. B. HARTLEY & ZISSERMAN 2004, S. 27 ff. und S. 65).

optischen Zentrum  $\mathbf{C}$  ausgeht. Wie aus Abbildung 29 ersichtlich, zeigen die Vektoren  $\mathbf{P}\mathbf{x}$  und  $\mathbf{x}$  jeweils in die gleiche Raumrichtung, so dass ihr Kreuzprodukt Null sein muss:

$$\mathbf{P}\mathbf{x}_i \times \mathbf{x}_i = \mathbf{0}. \quad (5-3)$$

Durch geeignete Umformung erhält man das folgende Gleichungssystem, in welchem die Einzelelemente der Projektionsmatrix zeilenweise zu einem Vektor zusammengefasst sind:

$$\begin{bmatrix} 0^T & -w_i\mathbf{X}_i^T & y_i\mathbf{X}_i^T \\ w_i\mathbf{X}_i^T & 0^T & -x_i\mathbf{X}_i^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_{12} \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (5-4)$$

Durch Bestimmung einer ausreichenden Anzahl von Punktpaaren kann ein Gleichungssystem erzeugt werden, aus dem die Elemente der Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  bestimmt werden können. Da  $\mathbf{P}$  eine homogene Matrix ist, besitzt sie nur 11 Freiheitsgrade und kann mit einem beliebigen Faktor ungleich 0 skaliert sein. Mit jedem eingesetzten Punktpaar  $\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{X}_i$  erhält man zwei Bedingungen, so dass genau fünf Punkte vollständig und die x- oder y-Koordinate eines sechsten Punktpaares nötig sind, um eine exakte Lösung zu erhalten. Erstellt man die Gleichung 5-4 für 6 Punktpaare und wählt dann ein Element als fest, z. B.  $p_{12} = 1$ , so erhält man ein System von 11 Gleichungen, welches direkt, etwa durch Gauß-Elimination, lösbar ist. Eine exakte Lösung des Gleichungssystems lässt es jedoch nicht zu, Messfehler, wie sie bei der Erfassung der Punktpaare auftreten, durch Mittelwertbildung auszugleichen. Die exakte Lösung ist zudem stark von einer symmetrischen Verteilung der Punkte auf der Projektionsfläche abhängig und erweist sich in der Praxis als nicht stabil.

Wird eine größere Anzahl an Kalibrierpunkten verwendet, so ist  $\mathbf{P}$  aus dem resultierenden Gleichungssystem mittels Singulärwertzerlegung bestimmbar. Dieses Vorgehen wird im Englischen als Direct-Linear-Transform (DLT) bezeichnet. Es ist für das Problem der Kamerakalibrierung ohne Randbedingungen nahezu optimal (HARTLEY & ZISSERMAN 2004, S. 182) und liefert auch im vorliegenden Fall sehr gute und stabile Kalibrierungsergebnisse. Die Messpunkte sollten, um eine stabile Lösung zu erhalten, zuvor in ein normalisiertes Koordinatensystem transformiert werden.

Im Hinblick auf einen Einsatz in Roboteranwendungen und deren Präzisionsanforderungen kommt der Güte der Kalibrierung eine besondere Bedeutung zu. Es

ist erforderlich, die Qualität der Kalibrierung in einer aussagekräftigen Größe bewerten zu können. Ein Fehlermaß, das herangezogen werden kann, ist das sogenannte Residuum. Dieses gibt die Abweichung der Projektion  $\mathbf{x}'$  eines Raumpunktes  $\mathbf{X}$  vom eigentlichen Bildpunkt  $\mathbf{x}$  in der Bildebene an:

$$e_i = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{P}\mathbf{X}_i\|. \quad (5-5)$$

Da Angaben in der Bildebene jedoch nur wenig aussagekräftig sind, ist eine Umrechnung in Weltkoordinaten wünschenswert, so dass Projektionsfehler etwa in Millimetern angegeben werden können. Wie aus Abbildung 30 deutlich wird, erlaubt es der Strahlensatz, das Residuum in Weltkoordinaten umzurechnen. Dazu wird die Brennweite  $f$  des Projektors und der Abstand  $d_i$  des Raumpunktes  $\mathbf{X}$  vom optischen Zentrum  $\mathbf{C}$  benötigt. Beide Größen können mit Hilfe der Projektionsmatrix bestimmt werden (HARTLEY & ZISSERMAN 2004, S. 162f). Der Kalibrierfehler in Weltkoordinaten kann damit berechnet werden als

$$E_i = e_i \frac{d_i}{f}. \quad (5-6)$$

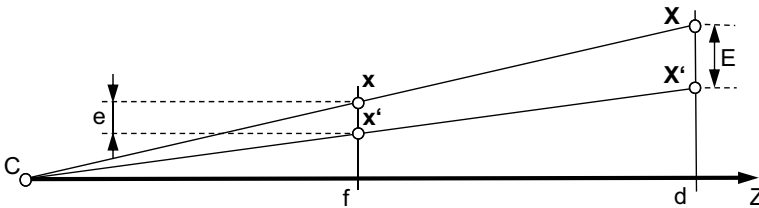


Abbildung 30 Kalibrierfehler nach HARTLEY & ZISSERMAN (2004, S. 183)

Die ermittelte Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  kann nun in Verbindung mit einer Bibliothek für 3D-Computergraphik wie etwa OpenGL (2008) genutzt werden, um ein Anzeigefenster zu generieren und ein entsprechendes 2D-Bild für den Projektor zu berechnen. Dabei wird jedem Bildschirmpixel zusätzlich ein z-Wert zugeordnet, um bei der Bildberechnung eine korrekte Darstellung von 3D-Objekten auch dann zu gewährleisten, wenn diese einander in Projektionsrichtung verdecken. Die Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  muss dazu noch um eine zusätzliche Zeile ergänzt werden, so dass adäquate Tiefenwerte für die Bildpunkte berechnet werden können.



#### **5.4.1.4 Bewertung der Anzeigeeigenschaften**

Mit Hilfe eines Videoprojektors und der geschilderten Kalibrierung sind sowohl präzise geometrische als auch reichhaltige graphische Darstellungen möglich. Programmpunkte und Trajektorien können gut als dreidimensionale Polygonzüge auf Objekten eingeblendet werden. Auch flächenhafte Darstellungen, wie Gitternetzlinien oder Farbverläufe können auf Objektoberflächen projiziert werden.

Das große Farbspektrum der Videoprojektoren ist hilfreich, da es entsprechend umfangreiche und fein aufgelöste Farbkodierungen ermöglicht. Textinformationen sind mit Hilfe einer entsprechenden Vorverzerrung auf bekannten Flächenbereichen gut lesbar darzustellen. Dem Benutzer können also auch Koordinatenwerte, Hinweise und Auswahloptionen eingeblendet werden. Damit ergeben sich umfangreiche Gestaltungsmöglichkeiten für die Benutzerinteraktion.

Die Bildwiederholfrequenzen liegen bei allen heute verfügbaren Projektoren bei mindestens 60 Hz, so dass die Darstellung vom Benutzer als flüssig wahrgenommen wird. Die Sichtbarkeit der Projektionsdarstellung ist jedoch auch bei leistungsfähigen Geräten noch vom Umgebungslicht abhängig und der realisierbare Arbeitsbereich ist durch die Schärfentiefe und die Auflösung begrenzt. Durch den geringen Gerätepreis für Videoprojektoren, stellt jedoch die Verwendung mehrerer Projektoren eine gute Alternative zur Vergrößerung des Arbeitsraumes und zur Verbesserung der Ausleuchtung dar.

### **5.4.2 Laserprojektoren**

#### **5.4.2.1 Funktionsweise**

Im Gegensatz zu Videoprojektoren besitzen scannende Laserprojektoren kein bildgebendes Element, sondern lenken einen Laserstrahl durch Spiegel mit großer Geschwindigkeit so ab, dass das gewünschte Bild entsteht. Durch das Laserlicht ist die Projektion zum einen sehr gut sichtbar und zum anderen auch über große Tiefenbereiche scharf (vgl. Abschnitt 3.2.3.2). Voll grafikfähige Laserprojektoren sind technisch extrem aufwändig zu realisieren und stehen bisher nur für Spezialanwendungen, beispielsweise in Planetarien, zur Verfügung. Demgegenüber sind Laserprojektionsssysteme auf Basis von Galvanometerscannern eine bewährte Technologie, mit der dreidimensionale Polygondarstellungen projiziert werden können.

Galvanometer sind ursprünglich als elektromechanische Strommessgeräte entstanden. Sie übersetzen den elektrischen Strom durch eine Spule in eine mechanische Drehbewegung und lenken damit einen Zeiger aus. Bei Galvanometer-scannern ist anstelle eines Zeigers ein Ablenkspiegel angebracht, welcher in Abhängigkeit des Steuerstromes rotatorisch ausgelenkt wird. Durch eine entsprechende Anordnung zweier Galvanometerscanner und einer oder mehrerer Laserquellen kann ein Projektionssystem realisiert werden, wie in Abbildung 31 veranschaulicht (SCANLAB AG 2005, S. 30).

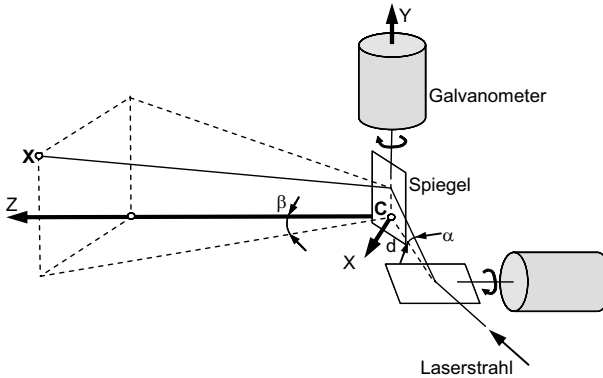


Abbildung 31 Funktionsprinzip eines scannenden Laserprojektors

Die geometrische Beziehung zwischen einem zu projizierenden Raumpunkt  $\mathbf{X} = (X, Y, Z, T)$  und den dafür einzustellenden Ablenkewinkeln  $\alpha$  und  $\beta$  wird durch die Anordnungsgeometrie der Spiegel bestimmt:

$$\alpha = \operatorname{atan} \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Z^2} + d}, \quad (5-7)$$

$$\beta = \operatorname{atan} \frac{-X}{Z}. \quad (5-8)$$

Der Arbeitsraum eines solchen Systems wird in erster Linie durch die maximalen Auslenkwinkel der Scanner beschränkt. Mit einem Laserprojektor können Tiefenbereiche bis zu mehreren Metern mit hinreichender Schärfe abgedeckt werden. Die Auflösung des Projektionssystems ergibt sich aus der Anzahl der Inkremente, mit der die digitalen Steuerkarten der Galvanometer angesprochen werden können. Bei leistungsfähigen Geräten stehen dafür 16-bit, also 65536

Inkremente in horizontaler und vertikaler Richtung zur Verfügung, was einer Winkelauflösung von wenigen  $\mu\text{rad}$  gleichkommt (SCANLAB AG 2005).

Damit für den Benutzer der Eindruck eines flackerfreien Bildes entsteht, müssen die Projektionsinhalte mit einer Updaterate von mindestens 15 Hz gezeichnet werden. Die Gesamtlänge der Polygonzüge, welche gleichzeitig ohne Flackern dargestellt werden können, ist somit durch die maximale Auslenkgeschwindigkeit der Spiegel beschränkt und liegt in der Praxis bei einigen Metern.

#### **5.4.2.2 Kalibrierung**

Da die Strecke zwischen dem ersten Spiegel und dem Bildpunkt je nach Stellung der beiden Spiegel variiert, entsteht eine kissenförmige Verzerrung des Bildes. Die meisten Geräte halten einfache aber effektive Korrekturmechanismen vor, welche diese Verzerrung bei der Ansteuerung der Galvanometer kompensieren (vgl. z. B. SCANLAB AG 2005). Es kann nach dieser Korrektur davon ausgegangen werden, dass sich die Inkremente des Scanners gleichmäßig in horizontaler bzw. in vertikaler Richtung als Punkte über den Bildbereich verteilen und damit eine Bildebene mit den Bildpunkten  $\mathbf{x} = (x, y, w)$  aufspannen.

Die Beziehung zwischen den Bildpunkten  $\mathbf{x} = (x, y, w)$  und den Raumpunkten  $\mathbf{X} = (X, Y, Z, T)$  kann dann, ebenso wie für einen Videoprojektor, mit einer homogenen Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  beschrieben werden. Das Verfahren zur Bestimmung der Projektionsmatrix eines Laserprojektors ist identisch mit dem Vorgehen, welches in Abschnitt 5.4.1.3 für Videoprojektoren aufgezeigt wurde. Es sind wiederum mindestens sechs Paare von Bildpunkten  $\mathbf{x}_i$  und korrespondierenden Raumpunkten  $\mathbf{X}_i$  erforderlich.

#### **5.4.2.3 Bewertung der Anzeigeeigenschaften**

Das Laserlicht ist unabhängig von der Umgebungsbeleuchtung sehr gut sichtbar. Es wird auch durch große Projektionsabstände nicht merklich abgeschwächt und bleibt gleichzeitig so fokussiert, dass die Liniendicke einen Millimeter nicht überschreitet. Die Galvanometerscanner bieten eine extrem hohe Winkelauflösung, so dass auch bei Distanzen von mehreren Metern noch Genauigkeiten im Submillimeterbereich realisierbar sind. Laserprojektoren weisen damit einen sehr großen nutzbaren Arbeitsraum auf.

Obwohl auch mehrfarbige Anzeigen möglich sind, ist die graphische Darstellungsfähigkeit doch stark begrenzt. Zum einen sind nur Polygonlinien darstellbar, zum anderen ist deren Gesamtlänge auf wenige Meter beschränkt. Somit sind keine flächenhaften Darstellungen möglich und auch Textanzeigen können nur in geringem Umfang eingesetzt werden.

Die Laserprojektion eignet sich allerdings sehr gut zur Einblendung von Stützpunkten und Trajektorien auf Objektoberflächen. Sie bietet hierfür eine Kombination aus einer hervorragenden Sichtbarkeit, einem im Vergleich zu Videoprojektoren um ein Vielfaches größeren Arbeitsraum und einer hohen Positionsauflösung. Für die Anzeige und Bearbeitung von Trajektorien reichen auch die niedrigen Updateraten der Geräte von ca. 15-25 Hz aus, um wirkungsvolle Interaktionsverfahren zu realisieren. Die Abbildung 32 stellt abschließend die Anzeigeeigenschaften von Video- und von Laserprojektoren im Hinblick auf einen Einsatz in Roboteranwendungen vergleichend gegenüber.

Eigenschaft	Laserprojektor	Videoprojektor
Sichtbarkeit	●	○
Arbeitsraum	●	○
Auflösung	●	●
Darstellungsmöglichkeiten	◐	●
Geschwindigkeit	○	●
Ergonomie	◐	◐
Preis	○	●

Legende: ●=positive, ◐=neutrale, ○=negative Ausprägung

Abbildung 32 Vergleich von Video- und Laserprojektion

### 5.4.3 Erweiterung des Arbeitsraumes

Der Arbeitsraum von Projektoren ist – insbesondere bei Videoprojektoren – räumlich begrenzt. Zudem erfordert die Projektion eine freie Sichtlinie zwischen Projektor und Objekt, da Verschattungen auftreten, wenn die Sichtlinie durch das Werkstück oder den Benutzer verdeckt wird. Es existieren im Wesentlichen zwei Ansatzpunkte, diesen Einschränkungen entgegen zu wirken. Diese liegen zum einen in einer Erhöhung der Projektorenanzahl, zum anderen in einer mobilen und flexiblen Anbringung der Projektionsgeräte.

### 5.4.3.1 Mehrprojektorensystem

Werden mehrere Projektoren zu einem gemeinsamen Anzeigesystem angeordnet, so wächst auf der einen Seite der Arbeitsraum des Gesamtsystems mit der Anzahl der Projektoren umso mehr, desto weniger die Arbeitsräume der Einzelgeräte überlappen. Auf der anderen Seite ist eine Überlappung der Arbeitsräume die Voraussetzung dafür, dass Verdeckungen durch eine Aufteilung der Projektion verhindert werden können. Nur für solche Punkte im Arbeitsraum, welche von mehreren Projektoren aus angestrahlt werden können, besteht im Falle von Verdeckungen auch die Möglichkeit, einen alternativen Projektor, dessen Sichtlinie zum Anzeigort nicht unterbrochen ist, auszuwählen.

Folglich ist dazu eine geeignete Aufteilung der Projektion erforderlich. Denn wenn alle Projektoren jeweils das komplette Bild projizierten, entstünden überall dort Doppelbilder, wo die Sichtstrahlen auf unberücksichtigte Hindernisse treffen. Abbildung 33 verdeutlicht dies am Beispiel einer Trajektorie, welche von zwei Laserprojektoren mit überlappendem Arbeitsbereich angezeigt wird. Eine Aufteilung der Projektion muss zur Laufzeit des Anzeigesystems dynamisch erfolgen. Sie hat die konkurrierenden Ziele, zum einen Verdeckungen so weit wie möglich zu verhindern, zum anderen Doppelbilder auszuschließen.

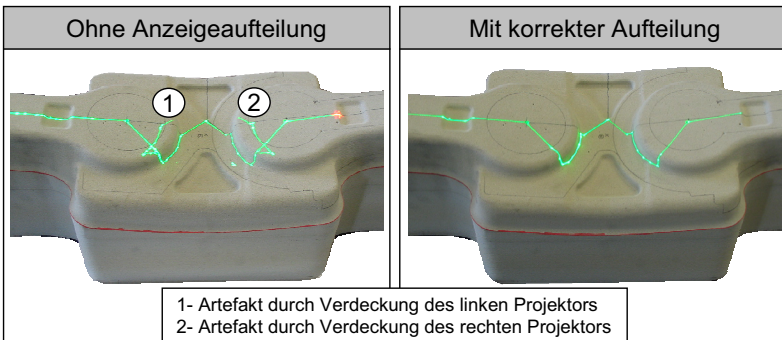


Abbildung 33 Projektion einer Bahnkurve durch zwei Anzeigegeräte

Ist die Geometrie der im Arbeitsraum befindlichen Objekte bekannt, so ist für alle Anzeigepunkte zu prüfen, von welchem Projektor aus der jeweilige Punkt unverdeckt sichtbar ist. Wenn mehrere Projektoren diese Bedingung erfüllen, kann der Punkt nach weiteren Kriterien, etwa der kürzesten Anzeigedistanz oder dem steilsten Einfallswinkel auf die Oberfläche, einem der Projektoren zugeordnet werden. Dieses Verfahren eignet sich einerseits dazu, Verdeckungen durch die

Kinematik des Roboters zu vermeiden, da deren Geometrie bzw. momentane Lage in der Regel bekannt ist. Andererseits kann es angewendet werden, wenn 3D-Modelle der Werkstücke, der verwendeten Aufspannungen oder anderer Zellenbestandteile vorliegen.

Sind die Geometrien der Objekte im Arbeitsraum nicht bekannt, so kann für die Anzeige von Trajektorien und Bahnpunkten auf eine einfache Heuristik<sup>5</sup> zurückgegriffen werden: Die Orientierung des TCP-Koordinatensystems in den anzuzeigenden Bahnpunkten gibt vor, aus welcher Raumrichtung der Roboter den Bahnpunkt mit dem Werkzeug anfährt. Ausgehend von der Annahme, dass das Werkstück in dieser Raumrichtung frei zugänglich sein muss, kann dann ein Projektor gesucht werden, dessen Projektionsrichtung mit dieser Raumrichtung einen möglichst kleinen Winkel  $\theta$  einschließt. Mit jedem Bahnpunkt kann schließlich überprüft werden, welcher Projektor für das jeweilige Bahnsegment am besten geeignet ist. Abbildung 34 veranschaulicht die Wirkungsweise der Heuristik und zeigt die resultierende Verteilung in einem System mit drei Projektoren für ausgewählte Anzeigepunkte und deren Richtungsvektoren auf.

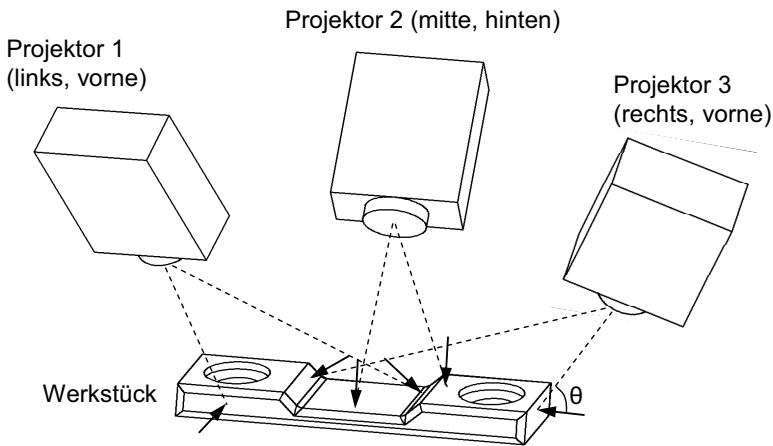


Abbildung 34 Wirkung der Heuristik für ein System mit drei Projektoren

---

<sup>5</sup> Mit dem Begriff Heuristik wird an dieser Stelle ein intuitives Vorgehen („Faustregel“) bezeichnet, welches für ein Problem zulässige Lösungen von ausreichender Güte liefert ohne dass ein formeller Nachweis geführt wird, dass es sich um optimale Lösungen handelt.

### 5.4.3.2 Ortsveränderliche Anbringung der Projektoren

Eine weitere Möglichkeit, den Arbeitsraum zu vergrößern, besteht in einer mobilen Anbringung der Anzeigegeräte. So kann bei Verdeckungen eine geeignete Neupositionierung des Projektors durch den Benutzer vorgenommen werden. Dies erfordert eine bewegliche Befestigung des Projektors, etwa auf Stativen oder an einem Schwenkarm, und ein aufwandsarmes, automatisiert ablaufendes Verfahren zur Erfassung der geänderten extrinsischen Parameter des Projektors.

Eine Montage des Anzeigegerätes am Werkzeugflansch des Roboters bzw. am Werkzeug erfüllt die genannten Voraussetzungen in besonderer Weise. Einerseits kann so mit nur einem Projektor nahezu der gesamte Arbeitsraum des Roboters ausgeleuchtet werden. Andererseits lassen sich die extrinsischen Parameter des Projektors unmittelbar aus der jeweiligen Roboterstellung bestimmen. Wie Abbildung 35 zeigt, ist nach einer Projektorenkalibrierung die Transformation **B** zwischen dem Koordinatensystem der Roboterbasis („base“) und dem des Projektors („proj“) gegeben. Ebenso ist aus der Roboterstellung die Transformation **R** zwischen Basis und Werkzeugflansch („tcp“) durch die Robotersteuerung bekannt. Wird der Roboter nun in eine neue Stellung **R'** bewegt, ergibt sich eine neue Projektionsmatrix **B'**, welche selbst ohne Kenntnis der Transformation **M** zwischen Flansch und Projektor berechnet werden kann:

$$\mathbf{B}' = \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}' \quad (5-9)$$

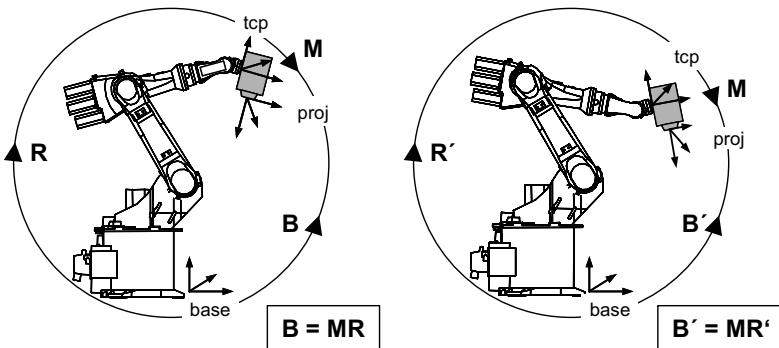


Abbildung 35 Transformationen bei Anbringung des Projektors am Roboter

In der Praxis treten nach einer gewissen Anzahl von Neupositionierungen Abweichungen der Projektion auf. Daher empfiehlt sich eine Kombination mit den

zuvor beschriebenen Kalibrierverfahren. Außerdem ist es hilfreich, eine Hand-Auge-Kalibrierung zur expliziten Bestimmung von  $\mathbf{M}$  durchzuführen.

### 5.5 Automatisierte Geometrieerfassung

Mit dem von Projektoren ausgesendeten Licht können nicht nur Informationen angezeigt werden. In Verbindung mit Methoden der Bildverarbeitung können diejenigen Objekte, auf die das Licht trifft, auch vermessen werden. Aktive optische Messverfahren nutzen hierzu das Prinzip der Triangulation zwischen dem von einer Lichtquelle angestrahlten Raumpunkt und dem korrespondierenden Punkt im Bild einer aufnehmenden Kamera (vgl. z. B. HAMFELD 2002).

#### 5.5.1 Funktionsprinzip und Verfahren

Bei der Lichtpunkttriangulation wird ein Punkt im Raum durch einen Schnitt der zugehörigen Sichtstrahlen von Projektor und Kamera lokalisiert. Dasselbe Prinzip liegt dem Lichtschnittverfahren zu Grunde, mit dem Unterschied, dass die Punktaufnahme parallelisiert erfolgt. Es wird eine Linie auf das zu erfassende Objekt projiziert und mit einer Kamera aufgenommen, so dass jedes Kamerabild einen Profilschnitt ergibt. Eine noch weiterführende Parallelisierung der Messungen lässt sich durch die gleichzeitige Projektion mehrerer Linien erreichen. Die Einzellinien werden im projizierten Bild kodiert, so dass eine Zuordnung korrespondierender Linien zwischen der Projektion und dem Kamerabild möglich ist. Diese Kodierung erfolgt entweder über die Fläche, durch strukturierte Muster, die Tiefe oder die zeitliche Abfolge der Projektion (HAMFELD 2002, S. 20).

Da das Abbildungsverhalten von Projektoren und Kameras gleichermaßen durch äquivalente Modellvorstellungen beschrieben werden kann, sind Kamera-Projektor-Paare mathematisch analog zu Stereokameras zu behandeln. Die Epipolargeometrie beschreibt hierbei, wie Abbildung 36 zeigt, den geometrischen Zusammenhang zwischen Raumpunkten  $\mathbf{X}$  und den zugehörigen Bildpunkten  $\mathbf{x}$  der Kamera und  $\mathbf{x}'$  des Projektors (HARTLEY & ZISSERMAN 2004, S. 239 ff.) Die Punkte  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}'$  und die optischen Zentren des Projektors und der Kamera spannen die sogenannte Epipolarebene auf. Diese Ebene schneidet die beiden Bildebenen der Geräte in den Epipolarlinien. Zu einem Bildpunkt des Projektors  $\mathbf{x}'$  kann somit stets die zugehörige Epipolarlinie  $\mathbf{e}$  im Kamerabild errechnet werden, auf welcher der korrespondierende Bildpunkt  $\mathbf{x}$  zu suchen ist.



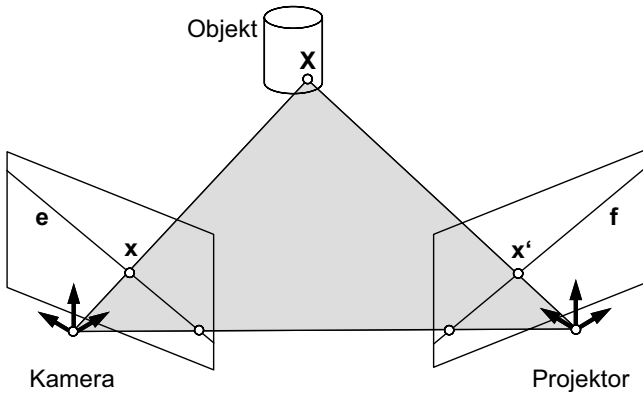


Abbildung 36 Epipolargeometrie eines Kamera-Projektor-Paares

Sowohl Videoprojektoren als auch Laserprojektoren können mit einer zusätzlichen Kamera zu einem Scannersystem erweitert werden. Bei Videoprojektoren wird dazu vor allem auf die Projektion von Mustern zurückgegriffen. Auf diese Weise sind projektionsgestützte AR-Systeme mit Videoprojektoren realisierbar, welche die Topographie von Anzeigebereichen automatisiert vermessen (RASKAR et al. 2002). Dabei kann eine große Anzahl an Punkten mit nur einer Kameraaufnahme vermessen werden. Für einen Einsatz im Produktionsumfeld sind Scannersysteme auf Basis von Videoprojektoren jedoch zu lichtschwach und zu störepfindlich in Bezug auf reflektierende Oberflächen. Eine robuste Geometrieerfassung ist nur eingeschränkt möglich.

Demgegenüber lassen sich mit dem Laser projizierte Punkte oder auch Linien aufgrund der hohen Leuchtstärke des Laserlichts auch in hellen Umgebungen und auf reflektierenden Oberflächen zuverlässig mit einer Kamera erfassen. Die erreichbare Messrate fällt beim Einsatz von Laserprojektoren im Vergleich zu Videoprojektoren niedriger aus, während die erzielbaren Genauigkeiten in beiden Fällen annähernd identisch sind. In Summe sind Scannersysteme auf Basis von Laserprojektoren daher für einen Einsatz in industriellen Umgebungen deutlich besser geeignet. Die Abbildung 37 zeigt ein Kamerabild, in welchem ein auf ein Werkstück projizierter Laserpunkt, die zugehörige Epipolarlinie sowie das Profil eines bereits vermessenen Teilbereichs zu sehen sind.

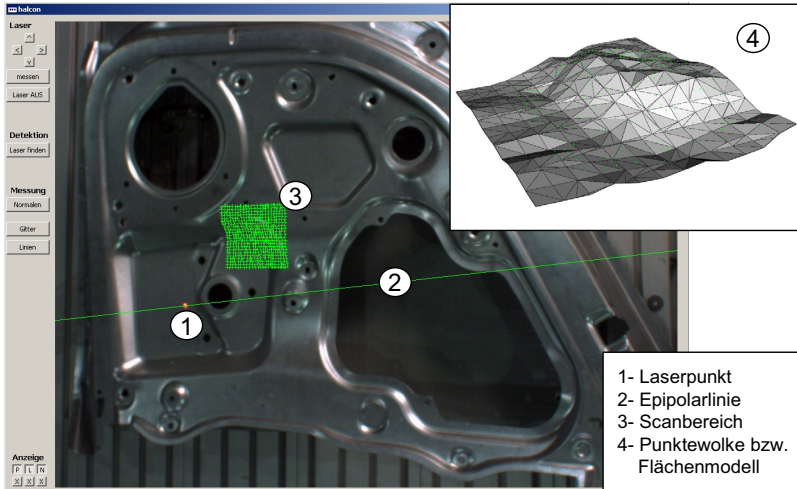


Abbildung 37 Geometrieerfassung mit einem Kamera-Projektor-Paar

### 5.5.2 Interaktive Einbindung der automatisierten Vermessung

Eine der wesentlichen Aufgaben bei der Programmierung von Industrierobotern besteht in der Erfassung und Analyse der geometrischen Aspekte des Werkstücks und der Roboterumgebung. So muss der Programmierer Bewegungsabläufe der Werkstückgeometrie und den Prozessanforderungen entsprechend gestalten und dabei Vorrichtungen, Aufspannungen und andere Kollisionsobjekte berücksichtigen. Die Verbindung einer projektionsbasierten 3D-Visualisierung einerseits und automatisierter Messfunktionen andererseits eröffnet hierbei umfangreiche Potenziale, den Bediener bei der Programmerstellung zu unterstützen (VOGL 2005):

- **Werkstückvermessung:** Die für ein Roboterprogramm benötigten Stützpunkte, Oberflächennormalen und Flächenverläufe werden, ausgehend von Vorgaben des Anwenders, automatisiert erfasst. Der Umfang der manuellen Koordinateneingaben durch den Benutzer wird so deutlich reduziert.
- **Anzeige mit geometrischem Feedback:** Bauteilbezogene Trajektorien, wie Schweißnähte oder Kleberaupen, werden auf das Werkstück projiziert und gleichzeitig bezüglich ihrer Lage und Form vermessen. Abweichungen der tatsächlich gemessenen Werte von den im Programm vorgegebenen Sollkoordinaten werden visualisiert.

- **Erfassung von Kollisionsobjekten:** Der Arbeitsraum wird in einem groben Punkteraster vermessen und es wird eine Höhenkarte vorhandener Hindernisse wie etwa von Werkstücken oder Aufspannungen erstellt. Diese dient als Grundlage für eine kollisionsfreie Bahnplanung des Roboters.
- **Erfassung von Verdeckungsobjekten:** Für den Fall, dass mehrere Projektoren eingesetzt werden, kann die Höhenkarte des Arbeitsraumes auch zur Ermittlung einer verdeckungsfreien Aufteilung der Projektion (vgl. Abschnitt 5.4.3.1) herangezogen werden.

Da ein Projektor dabei sowohl Mess- als auch Anzeigegerät ist, können Messergebnisse direkt am realen Objekt visualisiert werden. So sind beispielsweise einzelne Messpunkte, Umrisslinien von Messbereichen, Konturverläufe, Gitternetzlinien und höhenabhängige Farbkodierungen darstellbar. Der Benutzer erhält so eine direkte, leicht verständliche Rückmeldung über die gemessenen Daten.

## 5.6 Räumliche Eingabe und Interaktion

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Verfahren erarbeitet, welche Roboterprogramme und die dafür relevanten Informationen anschaulich im realen Umfeld visualisieren. Zusätzlich bedarf es intuitiver und effizienter Methoden der Interaktion mit den dargestellten virtuellen Inhalten. Erst durch diese kann ein Benutzer in die Lage versetzt werden, RC-Programme und die damit verbundenen Modelldaten mit Hilfe des AR-Systems zu erstellen und zu bearbeiten. Nachfolgend werden hierzu 3D-Eingabeverfahren betrachtet und es werden Metaphern für die Interaktion mit den virtuellen Informationen erarbeitet.

### 5.6.1 Eingabeprinzip

Ein Vorteil der projektionsbasierten Anzeigeverfahren besteht darin, dass 3D-Daten präzise und ohne störende körpergebundene Anzeigegeräte dargestellt werden. Der Benutzer ist weder in seiner Sicht auf die Umgebung noch in seiner Bewegungsfreiheit eingeschränkt und die Hand-Auge-Koordination wird nicht durch Displaybrillen beeinträchtigt. Durch eine Kombination mit geeigneten manuellen 3D-Eingabemethoden ist es auch möglich, die virtuellen Inhalte unmittelbar und präzise zu manipulieren.

Es wird dafür ein Eingabeverfahren benötigt, mit welchem der Benutzer 3D-Informationen effektiv in direktem Bezug zur realen Umgebung editieren kann. Dies erfordert eine Eingabemöglichkeit mit bis zu sechs räumlichen Freiheitsgraden, welche mit hoher Präzision getätigt werden kann. Ebenso muss das Eingabeverfahren einen hohen Grad an Effizienz aufweisen. Dies bedeutet, dass der Benutzer möglichst viele räumliche Eingabeoperationen, zum Beispiel die Vorgabe von Raumpunkten, pro Zeiteinheit bewältigen können muss.

Derartige Eingabemethoden finden sich sowohl in existierenden Programmierverfahren der Industrierobotik als auch im Bereich der virtuellen und erweiterten Realität sowie der industriellen Koordinatenmesstechnik. Die Tabelle 6 gibt einen Überblick der Methoden zur manuellen Eingabe von 3D-Koordinaten in der realen Umgebung und bewertet diese im Hinblick auf einen Einsatz in Verbindung mit der vorgestellten AR-Visualisierung.

Tabelle 6 Bewertung von 3D-Eingabemöglichkeiten

		Bewertungskriterien					
		Direkte räumliche Interaktion	Eingabe mit sechs Freiheitsgraden	Effizienz der 3D-Eingabe	Präzision	Robustheit	Geringer technischer Aufwand
Eingabemethoden	Roboterkinematik:						
	Kinematik ferngesteuert (z. B. Teach-In)	○	●	○	●	●	●
	Kinematik direkt geführt (z. B. Lead-Through)	●	●	◐	●	●	◐
	Ersatzkinematik:						
	Force-Feedback Eingabegerät	○	●	◐	●	●	◐
	Mechanischer Messarm	●	●	◐	●	●	◐
	Handgestenerkennung:						
	Datenhandschuh	●	◐	◐	○	◐	◐
	Videogestützte Verfahren	●	◐	◐	○	◐	●
	3D-Eingabegerät:						
	Optisch erfasst	●	●	●	●	◐	◐
	Magnetisch erfasst	●	●	●	○	○	◐
	Laserpointer	●	○	◐	○	○	●

Legende: ●=voll erfüllt, ◐=teilweise erfüllt, ○=nicht erfüllt

Bei den Eingabemethoden der Online-Programmierung ist zunächst das Führen des Roboters mit dem Teach-Panel zu nennen. Diese Methode ist vergleichsweise langsam, da alle sechs Freiheitsgrade sequentiell eingestellt werden müssen. Die sensorgestützte Führung des Roboters in die gewünschte Stellung ist in dieser Hinsicht intuitiver und schneller, gerade größere Kinematiken sind jedoch für den Benutzer schwer zu handhaben. Beide Methoden sind zudem an den Roboter

gebunden. Der Einsatz einer Ersatzkinematik, sei es ein kraftrückkoppelndes Eingabegerät oder ein Koordinatenmessgerät in Form eines Messarms, stellt hierzu eine gleichwertige Alternative dar.

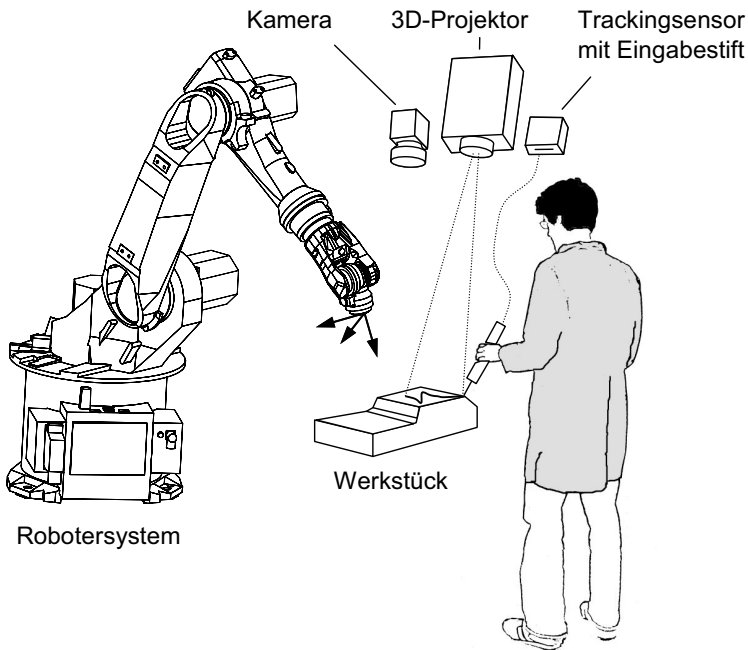
Alle bisher angeführten Verfahren verwenden eine durch den Benutzer geführte Kinematik, um damit 3D-Punkte anzuzeigen. Je nach Größe und Beweglichkeit der Kinematik ist der Bediener dabei in der Durchführung der Eingabe stark beschränkt. Demgegenüber ist der Benutzer bei Verfahren wie der Erkennung von Handgesten oder der 3D-Erfassung eines Laserpointers mit Methoden der Bildverarbeitung komplett frei in der Eingabe und kann sich ungehindert bewegen, so dass beispielsweise Zeigeoperationen schnell und einfach durchführbar sind. Allerdings sind sowohl Handgesten als auch Laserpointereingaben begrenzt bezüglich der erreichbaren Präzision und nur bedingt für Eingaben mit 6-Freiheitsgraden geeignet.

Eine sehr flexible und gleichzeitig genaue Möglichkeit der Interaktion mit 3D-Informationen bietet ein handgeführter Eingabestift, dessen Position und Orientierung von einem Trackingsystem erfasst werden. Der Benutzer kann damit schnell und zielgerichtet 3D-Eingaben tätigen und auch feinfühlig und präzise Interaktionen gut durchführen. Grundsätzlich eignen sich von den in Abschnitt 3.3 (vgl. Abbildung 16, S. 44) angeführten Trackingprinzipien zum einen magnetische, zum anderen optische, bildverarbeitende Verfahren für die Realisierung einer solchen stiftbasierten 3D-Eingabe.

Im direkten Vergleich bieten optische Verfahren eine höhere Messgenauigkeit und sind zudem, anders als magnetische Verfahren, störunempfindlich gegenüber metallischen Objekten. Andere Trackingverfahren wie etwa Laufzeitmessungen und Inertialsensoren kommen aufgrund der geringeren Genauigkeit nicht in Frage. Auch Lasertracker ermöglichen zwar hochgenaue Einzelmessungen von 3D-Punkten, sind aber für eine kontinuierliche 3D-Interaktion mit sechs Freiheitsgraden nicht zweckdienlich. Somit weisen optische, bildverarbeitende Trackingsysteme die beste Eignung zur Realisierung einer stiftbasierten Eingabe auf.

Die Verbindung dieser Eingabeform mit einer AR-Visualisierung ermöglicht intuitive Metaphern für die Benutzerinteraktion. Wird die AR-Darstellung in Echtzeit an die Aktionen des Menschen angepasst, so können damit Editiermechanismen, wie sie sonst in klassischen Bildschirmschnittstellen für CAD-Systeme oder Zeichenprogramme zur Anwendung kommen, unmittelbar in der realen Umgebung zur Verfügung gestellt werden. So kann der Programmierer bei-

spielsweise 3D-Trajektorien mit der Projektionsvisualisierung direkt auf Objekt-oberflächen skizzieren, wie dies in Abbildung 38 schematisch dargestellt ist.



*Abbildung 38 Konzept für die direkte Interaktion mit projizierten Inhalten*

Der für die räumliche Anzeige kalibrierte Projektor und der optisch erfasste Eingabestift bilden eine interaktive Mensch-Maschine-Schnittstelle, mit welcher bauteilbezogene 3D-Daten für Roboterprogramme auf intuitive und einfache Weise bearbeitet werden können. Basierend auf diesem Prinzip sind zahlreiche Interaktionsmetaphern darstellbar, welche nachfolgend anhand von Anwendungsbeispielen ausgeführt werden. Dies umfasst unter anderem die interaktive Manipulation von 3D-Trajektorien, die Erstellung und Bearbeitung von 3D-Modelldaten und die Anwendungssteuerung mit Hilfe projizierter Menüs. Wird zusätzlich ein Kamerasystem zur automatisierten Oberflächenvermessung (vgl. Abschnitt 5.5) verwendet, so sind neben der manuellen Eingabe von 3D-Koordinaten auch Mischformen möglich, welche eine unterstützende automatisierte Vermessung von relevanten geometrischen Objekteigenschaften vorsehen.

### 5.6.2 Manipulation von Trajektorien

Die geschilderte Mensch-Maschine-Schnittstelle eröffnet umfangreiche Möglichkeiten für die Eingabe und Bearbeitung von bauteilbezogenen Trajektorien. Heutige Verfahren der Online-Programmierung bieten, außer dem Abfahren mit dem Roboter, keinerlei Möglichkeit, die Programminhalte gesamthaft am realen Werkstück zu verifizieren. Demgegenüber kann der Benutzer durch die interaktive Projektionsschnittstelle Bearbeitungspfade direkt auf dem Bauteil betrachten und diese mit Hilfe des 3D-Eingabegerätes manipulieren, wie in Abbildung 39 dargestellt. Neue Geometrieinformationen für RC-Programme können damit aufwandsarm auf Basis der realen Werkstückgeometrie erstellt werden. Zudem können vorhandene Programme, etwa aus der Offline-Programmierung, im Fall von geometrischen Abweichungen schnell und zielgerichtet an die tatsächliche Bauteilgestalt angepasst werden (VOGL 2005).

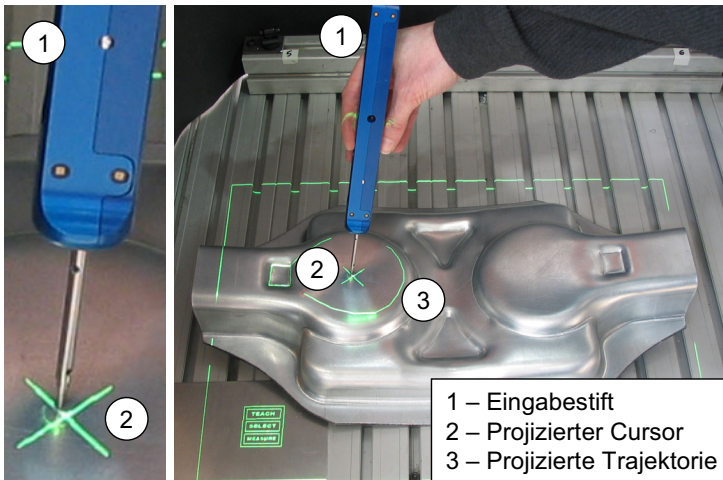


Abbildung 39 Manipulation von Trajektorien mittels interaktiver Projektion

Um eine wirkungsvolle Benutzerschnittstelle für die Bearbeitung von Trajektorien zu schaffen, ist ein geeignetes Zusammenwirken der Stifteingaben mit der AR-Visualisierung erforderlich. Das zentrale Element für die 3D-Interaktion bildet – in Analogie zu 2D-Bildschirmchnittstellen – ein an die Stiftspitze angehängter projizierter Cursor. Zudem stehen dem Benutzer mindestens zwei Tasten zur Verfügung. Diese dienen zur Bestätigung von Aktionen und zur Auswahl und

Änderung des Arbeitsmodus. Die Form des Cursors symbolisiert verschiedene Bearbeitungsmodi, etwa Einfügen oder Selektion von Punkten.

Indem Bahnelemente, also Segmente oder Einzelpunkte, bei Annäherung des Cursors ihre Farbe oder Gestalt verändern, werden dem Benutzer Selektionsmöglichkeiten signalisiert. Selektierte Elemente werden dann ebenfalls durch eine Farbcodierung angezeigt. Auf diese Weise kann der Benutzer denjenigen Teil der Bahnkurve, welchen er bearbeiten möchte, durch Antippen auswählen. An der jeweils selektierten Stelle der Trajektorie kann der Bediener durch die beiden Eingabetasten dann entweder neue Punkte hinzufügen oder auch vorhandene entfernen. Dabei wird die Visualisierung in einer interaktiven Geschwindigkeit, also mit einer Frequenz von mehr als 15 Hz angepasst, so dass für den Anwender der Eindruck entsteht, er zeichne die Trajektorie mit der Tastspitze auf das Bauteil.

Mit den geschilderten Funktionen wird der Programmierer befähigt, 3D-Trajektorien auf dem realen Bauteil zu editieren. Darüber hinaus bietet das interaktive Projektionssystem die Möglichkeit weiterführende, wirkungsvolle Interaktionsmetaphern zu realisieren. Als ein bekanntes Beispiel ist „Drag and Drop“ in Abbildung 40 dargestellt. Wie auch bei zweidimensionalen Bildschirmschnittstellen führt der Benutzer den Cursor in die Nähe eines zu manipulierenden Objekts. Dieses wird, sofern der Cursor nahe genug herangekommen ist, bei Betätigung einer Eingabetaste mit dem Cursor verbunden und kann daraufhin, solange die Taste gehalten wird, räumlich umpositioniert werden.

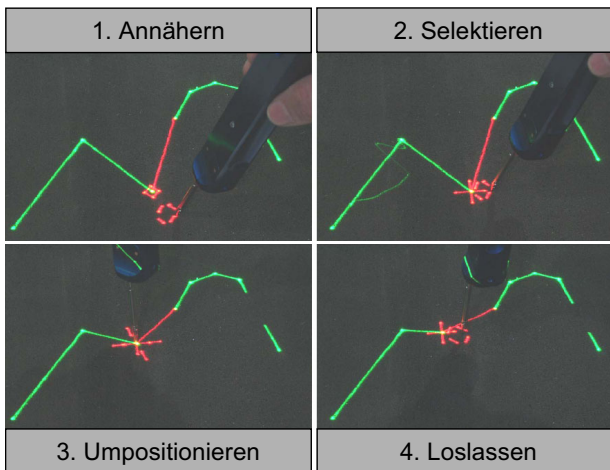






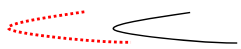





Abbildung 40 Drag-and-Drop-Metapher



Um eine präzise Bearbeitung zu gewährleisten, bedarf es weiterer Eingabemetaphern, welche den Benutzer über eine freihändige Manipulation hinausgehend unterstützen. Darunter fallen zum einen Funktionen zur Erzeugung von linearen und zirkularen Bahnelementen sowie von Splinekurven. Zum anderen ist es erforderlich, ganze Kurvenbereiche zu positionieren und zu skalieren. Somit können häufig auftretende Elemente (bspw. bestimmte Schnitt- oder Nahtmuster) als geometrische Makros hinterlegt werden und mit Hilfe der Projektionsschnittstelle auf dem realen Bauteil positioniert und eingepasst werden. Die nachfolgende Tabelle 7 gibt einen Überblick der realisierbaren Eingabemetaphern.

*Tabelle 7 Eingabemetaphern für die Bearbeitung von Bahnkurven*

Eingabemetapher		Beispielabbildung
Verbindung zweier Punkte	mittels einer PTP-Bewegung	
	über eine lineare Bewegung	
Splinekurve	durch Vorgabe mehrerer Stützpunkte	
Kreisbewegung	durch drei Punkte	
Bearbeitung vorhandener Bahnkurven	Verlängern bzw. Stutzen von Geraden und Kreissegmenten	
	Löschen von Stützpunkten	
	Parallelverschiebung von Kurven	
	Spiegeln von Kurven	
	Skalieren von Kurven	
	Anpassen von Kurven an die Bauteilgeometrie	

### 5.6.3 Interaktive Modellierung

Für die Programmierung komplexerer Bearbeitungsvorgänge ist es vorteilhaft, wenn ein exaktes 3D-Modell der Werkstücke zu Grunde gelegt werden kann. Modellbasierte Eingabemetaphern, wie sie in der Offline-Programmierung verwendet werden, reduzieren den manuellen Aufwand durch eine Synthese der Bedienereingaben mit bekannten Modellinformationen. Gibt ein Benutzer in einer 3D-Offlinesimulation beispielsweise Punkte auf einer Objektoberfläche vor, so werden zugehörige Oberflächennormalen oder dazwischen liegende Konturverläufe aus den Modelldaten automatisch entnommen. In der realen Umgebung sind derartige Verfahren bisher nicht bzw. nur sehr eingeschränkt nutzbar.

Die konzipierte AR-Benutzerschnittstelle bietet die Möglichkeit zur aufwandsarmen und zielgerichteten Akquisition von Modelldaten und vereint diese mit entsprechenden Anzeige- und Interaktionsverfahren, so dass eine modellbasierte Programmierung auch in der realen Umgebung ermöglicht wird. Die Abbildung 41 zeigt beispielhaft, wie durch manuelles Abtasten ein Flächenmodell einer Kontur erstellt werden kann. Der Benutzer tastet Oberflächenpunkte mit dem Eingabestift an. Parallel dazu wird ein Flächenmodell erstellt und interaktiv mit jedem hinzugefügten Punkt angepasst. Der Benutzer bekommt das resultierende Konturmodell als farbcodiertes Flächengitter angezeigt und kann dieses interaktiv bearbeiten bzw. verfeinern.

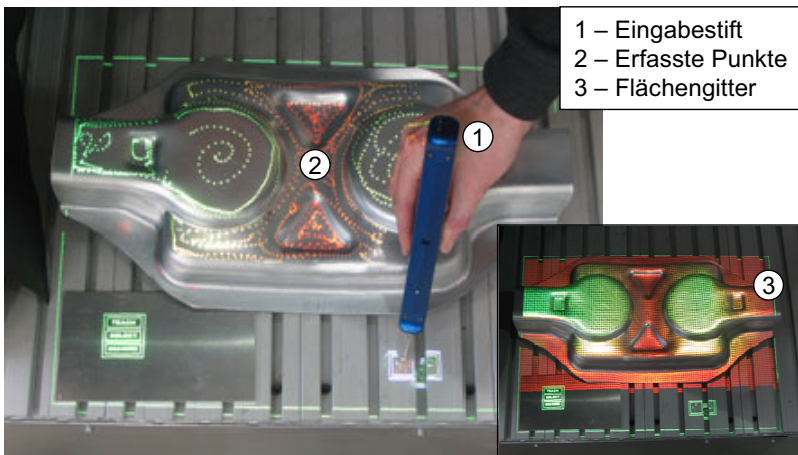


Abbildung 41 Manuelle Erstellung von Konturmodellen

Neben einer manuellen Erstellung von 3D-Modellinformationen kann die stiftbasierte Interaktion auch in Kombination mit automatisierten Messverfahren eingesetzt werden. In Abschnitt 5.5 wurden Scannerfunktionalitäten auf Basis eines Kamera-Projektor-Paares vorgestellt, welche Oberflächenpunkte durch Triangulation automatisiert erfassen. Die Abbildung 42 verdeutlicht, wie der Benutzer mit Hilfe des Eingabestiftes derartige Messfunktionen steuern kann. Zum einen können mit dem Stift relevante Bereiche definiert werden (links), innerhalb derer Oberflächenkonturen vermessen werden (Mitte). Ebenso können zu manuell definierten Positionen, durch Abscannen umgebender Punkte, die Oberflächennormalen automatisch bestimmt werden (rechts).

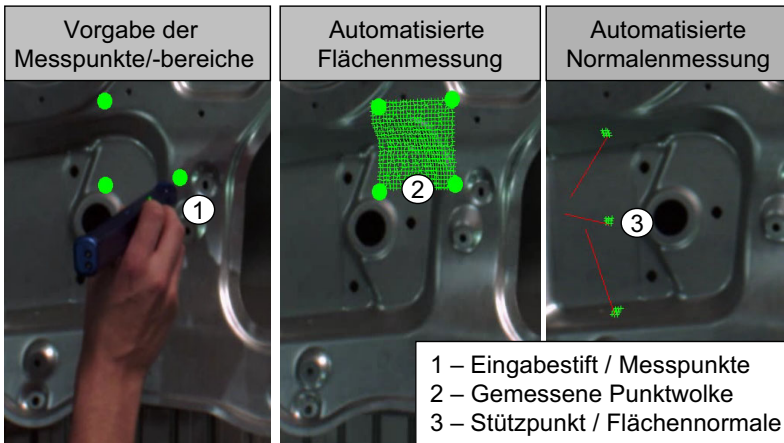


Abbildung 42 Interaktion mit den Scannerfunktionalitäten

Die Verbindung aus interaktiver Projektion und manueller räumlicher Eingabe erlaubt es zudem, anschauliche Metaphern für die manuelle Vermessung geometrischer Eigenschaften zu realisieren. Wird die relevante Messgröße, etwa eine Streckenlänge oder ein Radius (vgl. Abbildung 43), interaktiv angezeigt, so können damit leicht zu bedienende 3D-Messfunktionen für die manuelle Vermessung von Objekten realisiert werden. Diese Funktionen bilden gleichzeitig auch die Basis für eine exakte manuelle Eingabe und Modellierung relevanter Geometrieigenschaften von zu bearbeitenden Objekten.

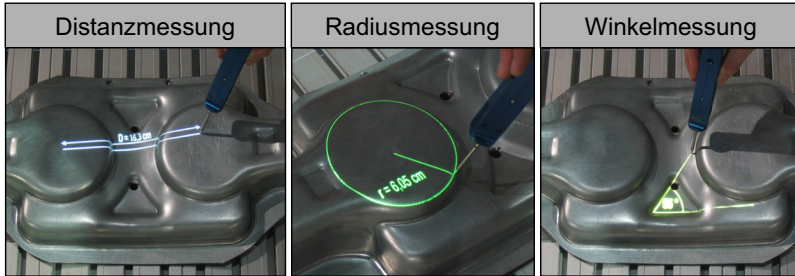


Abbildung 43 Metaphern für die interaktive Geometrievermessung

### 5.6.4 Weitere Interaktionsformen

#### 5.6.4.1 Anwendungssteuerung und sonstige Eingaben

Das projektionsbasierte Benutzerinterface ermöglicht eine schnelle und effektive 3D-Manipulation von Trajektorien und Modelldaten mit dem Eingabestift. Für eine vollständige Programmierung von Industrierobotern ist es jedoch erforderlich, weitere Eingabe- und Interaktionsmöglichkeiten bereitzustellen. Dies betrifft zum einen die Anwendungssteuerung, also beispielsweise die Auswahl des Arbeitsmodus oder den Zugriff auf weiterführende Funktionen. Zum anderen bedarf es der Möglichkeit, Parameter und Befehlssequenzen zu bearbeiten.

Einfache Menüdarstellungen sind, wie Abbildung 44 zeigt, grundsätzlich auch mit der projektionsbasierten Benutzerschnittstelle realisierbar. Verfügbare Auswahloptionen werden dabei auf bekannte ebene Flächen des Arbeitsraumes aufprojiziert und vom Benutzer mit Hilfe des Eingabestiftes selektiert. Für die Bearbeitung von Parametern oder von Befehlsabfolgen ist die interaktive Projektion jedoch nur bedingt geeignet. Vor allem Zahlen- und Texteingaben lassen sich damit nur schwer in geeigneter Form realisieren.

Derartige Eingaben sind hingegen gut mit konventionellen bildschirmbasierten Graphikoberflächen darstellbar. Mit Hilfe mobiler Eingabegeräte mit berührungsensitiven Bildschirmen können Menüs, Parametereingaben und sonstige Steuerungsfunktionen in geeigneter Weise unterstützt werden. Die Benutzerinteraktion mit dem Touchpanel stellt dabei eine komplementäre Ergänzung zu der räumlichen Projektionsschnittstelle dar.

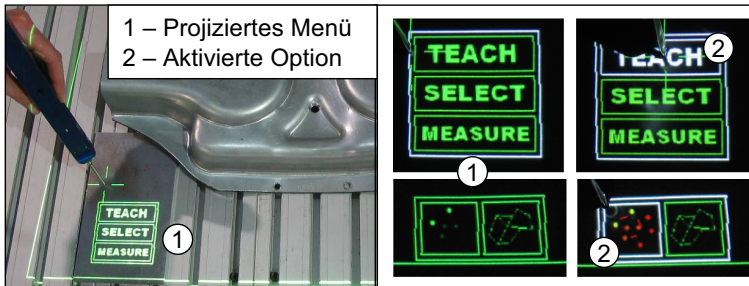


Abbildung 44 Projizierte Menüs

Während der Taststift und die Projektionsanzeige zur Bearbeitung von räumlichen Informationen in der realen Umgebung verwendet werden, sind klassische Editieraufgaben und die Anwendungssteuerung gut durch ein mobiles Eingabegerät darstellbar (vgl. Abbildung 45). Zugleich bildet ein solches Anzeigegerät in Verbindung mit einer Kamera die Basis für monitorbasierte AR-Visualisierung, welche dem Benutzer ohne wesentlichen Zusatzaufwand zur Verfügung gestellt werden kann.

3D-Projektion / Stifteingabe	Tablet-PC
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Räumliche Interaktion</li> <li>- Trajektorienmanipulation</li> <li>- Objektmodellierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anwendungssteuerung</li> <li>- Editierfunktionen</li> <li>- MAR und 3D-Visualisierung</li> </ul>

Abbildung 45 Aufteilung der Benutzerinteraktion

#### 5.6.4.2 Umgebungsmodellierung und Kinematiksimulation

Wie in Abschnitt 5.3 dargelegt, ist eine monitorbasierte AR-Visualisierung vorwiegend für die grobe Einschätzung und Überprüfung räumlicher Zusammenhänge hilfreich. Es ergeben sich die folgenden drei Anwendungsfelder, in wel-

chen eine MAR-Darstellung den Benutzer als Zusatzanzeige unterstützen kann (vgl. Tabelle 5):

- Verifizierung und Bearbeitung von Modellen der Roboterumgebung,
- Visualisierung von Trajektorien im freien Raum und
- Veranschaulichung des Bewegungsverhaltens des Roboters.

Da die MAR-Ansicht für sich alleine nur wenige räumliche Orientierung bietet, sind hierfür zusätzliche Hilfsfunktionen erforderlich, wie etwa virtuelle Orientierungsmerkmale oder auch geometrische Messfunktionen. Außerdem sollte ein fließender Wechsel von der AR-Darstellung, deren Perspektive durch die reale Kamera vorgegeben ist, und einer rein virtuellen Darstellung mit frei wählbarer Kameraperspektive ermöglicht werden.

Durch entsprechende Interaktionsmetaphern kann der Benutzer gleichfalls in die Lage versetzt werden, auf Basis der MAR-Darstellung mit den Modellinformationen zu interagieren. Eine Möglichkeit dazu bietet zunächst das 3D-Eingabegerät. So kann beispielsweise während des Editierens von Trajektorien die zu einer durch den Stift vorgegebenen Zielposition gehörende Roboterpose interaktiv visualisiert werden. Ebenso ist es denkbar, Zeigeoperationen mit dem 3D-Stift zur Positionierung von Modellen oder zur Vermessung heranzuziehen. Der Einsatz des 3D-Eingabegerätes kann darüber hinaus mit Konstruktionsmetaphern für Elementargeometrien verbunden werden. So kann der Benutzer signifikante 3D-Koordinaten, wie etwa Punkte auf einem Kreis oder den Umfang eines Rohres, mit Hilfe des Zeigers spezifizieren, während in der MAR-Ansicht sukzessiv das virtuelle Modell aktualisiert wird.

In der Praxis steht einer Verwendung des 3D-Eingabegerätes in Verbindung mit der MAR-Visualisierung jedoch entgegen, dass es sich für den Benutzer extrem schwierig gestaltet, seine Aufmerksamkeit zugleich auf das Eingabegerät und die reale Umgebung einerseits und den Monitor andererseits zu richten. Daher ist es sinnvoller, durch die Verwendung entsprechender Hilfsmittel, wie etwa virtueller Linien und Ebenen, die Benutzerinteraktion auf zwei oder weniger Freiheitsgrade zu reduzieren. Der Bediener kann so auf Basis von 2D-Interaktionsmetaphern, ähnlich wie in CAD-Programmen, wahlweise den Touchscreen, die Tastatur oder eine Maus für die Bearbeitung verwenden. Die nachfolgende Abbildung 46 zeigt drei Alternativen für die Positionierung eines virtuellen Objektes in der realen Umgebung bzw. in einer Hilfsebene.

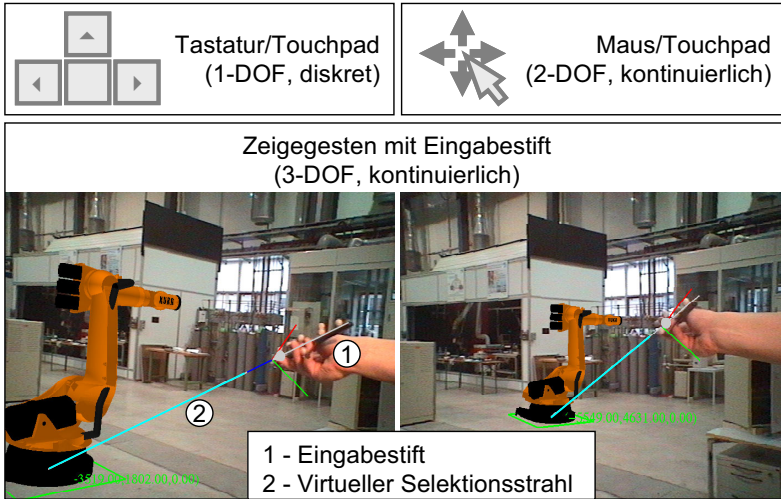


Abbildung 46 Interaktionsformen zur Positionierung virtueller Objekte

## 5.7 Zusammenfassung des Konzepts und der Teilverfahren

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Konzepte für eine AR-gestützte Programmierung von Industrierobotern erarbeitet. Es wurde ein Vorgehensmodell definiert, welches die Visualisierung und Bearbeitung von 3D-Modelldaten, die Erstellung und Manipulation von Trajektorien und die Simulation des Roboterhaltens als zentrale Anwendungsfelder vorsieht (vgl. Sektion 5.2.2). Für diese Felder wurden in den Abschnitten 5.3 bis 5.6 Verfahren und Subsysteme für die Visualisierung, die automatisierte Vermessung und die räumliche Benutzerinteraktion konzipiert. Dabei wurde insbesondere den methodischen Anforderungen für eine Unterstützung des Programmierprozesses (vgl. Abschnitt 4.3) Rechnung getragen. Die Tabelle 8 gibt einen Überblick der Teilbereiche sowie der Zuordnung der Verfahren zu den verschiedenen Anwendungsfeldern.

In Abschnitt 5.4 wurde ein Konzept für projektionsbasierte AR-Anzeigen und für deren Nutzung im Rahmen von Bedienerschnittstellen für Industrieroboter entwickelt. Dabei wurden die Leistungsanforderungen an Arbeitsraum, Präzision und Robustheit (vgl. Abschnitte 4.4.1) in den Vordergrund gestellt. Es wurden Videoprojektoren und scannende Laserprojektoren hinsichtlich ihrer Anzeigeeigenschaften und Einsatzmöglichkeiten bewertet, sowie entsprechende Ansätze

für die Kalibrierung und zur Skalierung des Arbeitsraumes erarbeitet. Zusätzlich wurde die Anwendung von Verfahren der Bildverarbeitung vorgesehen, um die Projektoren zu einer automatisierten Geometrieerfassung von Objekten im Anzeigebereich heranziehen zu können (vgl. Abschnitt 5.5).

Ausgehend von den Anzeigeverfahren wurde in Abschnitt 5.6 ein Konzept für die Benutzerinteraktion erarbeitet. Dieses berücksichtigt sowohl die funktionalen als auch die ergonomischen Anforderungen aus den Abschnitten 4.4 bzw. 4.5. In einer Analyse räumlicher Eingabeverfahren wurden optische Positionserfassungssysteme in Verbindung mit stiftartigen Eingabegeräten als besonders geeignete Eingabemöglichkeit ausgewählt. Durch die Verbindung von Projektionsanzeigen und der stiftbasierten Eingabe konnten neuartige Interaktionsmethoden für die Manipulation von Trajektorien und die interaktive Bearbeitung von 3D-Modelldaten im realen Umfeld entwickelt werden. Als Komplement dazu wird für die Bearbeitung von Parametern und die Anwendungssteuerung eine 2D-Benutzerschnittstelle auf einem Tablet-PC vorgeschlagen. Damit stehen zudem monitorbasierte AR-Visualisierungen zur Veranschaulichung des Roboterhaltens zur Verfügung.

Tabelle 8 Übersicht der Teilverfahren und ihrer Einsatzbereiche

		Einsatzbereiche gemäß Abschnitt 5.2 und 5.3		
Verfahren bzw. Teilsystem	Vgl. Abschnitt	Trajektorien-vorgabe	Interaktive 3D-Modellierung	Kinematik-simulation
Visualisierungstechnik	5.4	Projektions-AR (PAR)		Monitor-AR (MAR)
Anzeigegerät	5.5	Laserprojektor	Videoprojektor	Tablet-PC
Automatische Vermessung	5.6	Triangulation mit Kamera	-	-
Interaktion und Eingabe	5.7	3D-Eingabestift		Touchbedienung
Positions-erfassung		Optisch, aktiv		Optisch, passiv

Die Abbildung 47 zeigt die Synthese der Teilverfahren und der Komponenten in einem integrierten Konzept einer interaktiven AR-gestützten Benutzerschnittstelle zur Roboterprogrammierung. Dieses Konzept wird im Folgenden in Form eines modularen Systems, bestehend aus variabel konfigurierbaren Hardwaremodulen und einer zentralen Softwareanwendung umgesetzt. Dabei wird eine hohe Flexibilität (vgl. Abschnitt 4.4.2) und eine zweckmäßige datentechnische Anbin-



derung des Systems an Robotersteuerungen und an Planungs- und Simulationswerkzeuge (vgl. Abschnitt 4.4.3) berücksichtigt.

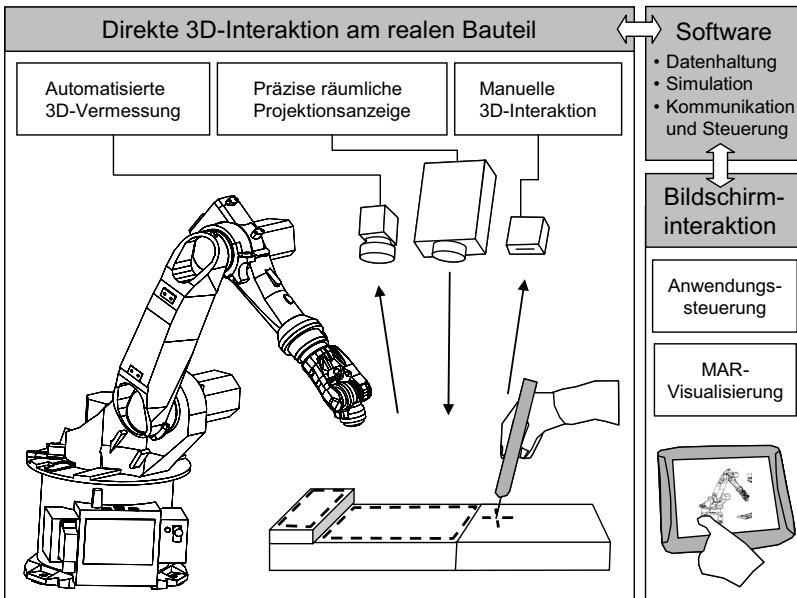


Abbildung 47 Übersicht des gesamten Systemkonzepts

---

## **6 Umsetzung und Erprobung**

### **6.1 Übersicht**

In diesem Kapitel wird das vorangehend erarbeitete Konzept in einen detaillierten Systementwurf überführt, sowie dessen prototypische Implementierung geschildert. In Abschnitt 6.2 werden die gewählte Systemarchitektur, deren Subsysteme sowie ein integriertes Vorgehen zur Systemkalibrierung vorgestellt. Darauf folgt eine zusammenfassende Beschreibung des realisierten Hardwareaufbaus in Abschnitt 6.3. Den Abschluss des Kapitels bildet die Erprobung des Prototyps im Rahmen zweier exemplarischer Anwendungen in Sektion 6.4. Diese Erprobung stellt gleichzeitig die Ausgangsbasis für eine technisch-wirtschaftliche Bewertung im nachfolgenden Kapitel 7 dar.

### **6.2 Systemgestaltung und Implementierung**

#### **6.2.1 Systemaufbau**

Für die Umsetzung des AR-Systems, welches im vorangegangenen Kapitel konzipiert wurde, ist eine leistungsfähige und erweiterbare Architektur zu entwickeln. Es handelt sich dabei um ein interaktives System, welches mehrere alternative Interaktionsmodalitäten sowie eine hohe Anzahl an Geräten und sensorischen Schnittstellen zur Umgebung vorsieht. Da die Interaktion mit dem Benutzer über mehrere Visualisierungs- und Eingabegeräte erfolgt, ist es von zentraler Bedeutung, die Konsistenz der Systemzustände und der zugrunde liegenden Daten zu allen Zeitpunkten zu gewährleisten.

Gleichzeitig besteht die Herausforderung, trotz des hohen Anteils nebenläufiger Prozesse und mehrerer Subsysteme ein möglichst leistungsfähiges und reaktives System zu entwerfen. Insbesondere die räumliche Interaktion in der realen Umgebung kann nur dann effektiv erfolgen, wenn das System diesbezüglich echtzeitfähig ist. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass alle Verarbeitungsschritte – von der sensorischen Erfassung einer Benutzeraktion über die Anpassung der zugrunde liegenden Modelldaten bis hin zu deren visuellen Darstellung – deterministisch innerhalb einer Maximalzeit ablaufen müssen. Diese zeitliche Ober-

grenze ist so zu bemessen, dass für den Benutzer keine merkliche Verzögerung im Systemverhalten spürbar ist.

Der Entwurf der projektionsbasierten Benutzerschnittstelle wurde ausgehend von den Methoden des objektorientierten Software-Engineering (OOSE) durchgeführt. Dabei wurde das im Englischen als Model-View-Controller (MVC) bezeichnete Entwurfsmuster zu Grunde gelegt. Dieses sieht eine Trennung der Modelldaten eines Softwaresystems von deren Repräsentation für den Benutzer sowie separat anzulegende Steuerungsmechanismen zur Verarbeitung der Benutzeraktionen vor (BRUEGGE & DUTOIT 2000). Durch diese Entkopplung können Modelldaten und Benutzerschnittstelle weitgehend unabhängig voneinander ausgestaltet werden.

In Abbildung 48 ist ein Überblick des Systementwurfs als ein vereinfachtes Klassendiagramm dargestellt. Dieser beinhaltet die folgenden Teilbereiche, welche im Anschluss detailliert erörtert werden:

- **Projektionsanzeige:** In diesem Modul sind für die beiden Projektionsarten, Laserprojektion und Videoprojektion, spezifische Mechanismen der Datenaufbereitung zur Anzeige gemeinsam mit den notwendigen Verfahren zur Kalibrierung hinterlegt.
- **Eingabe und Sensorik:** In diesen Bereich fallen alle Elemente des Systems, welche entweder eine Eingabeschnittstelle zum Benutzer oder eine sensorische Anbindung an die Umgebung beinhalten. Dies betrifft die graphische Benutzeroberfläche des Systems sowie die Teilmodule für die Positionserfassung und die Bildverarbeitung.
- **Steuerungsmechanismen:** Die Steuerungslogik aller angeführten Einzel-elemente, also der Anzeige, der Eingabe und der Sensorik, sind in jeweils eigenen Klassen gekapselt. Hinzu kommen Klassen für die zentrale Koordination der Benutzerinteraktion, die Steuerung der Projektionsanzeige sowie zur Abstimmung des Zugriffs auf Modelldaten.
- **Datenmodell und Simulation:** Das Datenmodell zur Verwaltung der roboterspezifischen Programminformationen, der Steuerungs- und Kinematikdaten sowie für die Kommunikation mit dem Roboter ist in einem Teilmodul gekapselt. Das Zellenmodell enthält neben einem Modell des Roboters und geometrischen Modellen seiner Umgebung eine generische Programmrepräsentation und, sofern diese für die Applikation definiert

wurden, aufgabenorientierte Prozessbeschreibungen. Zu den Modelldaten kommen Berechnungsfunktionalitäten hinzu, welche in einem eigenen Modul für die 3D-Simulation hinterlegt sind. Über die Kinematiksimulation hinaus kann hier ein Bahnplanungssystem eingebunden werden.

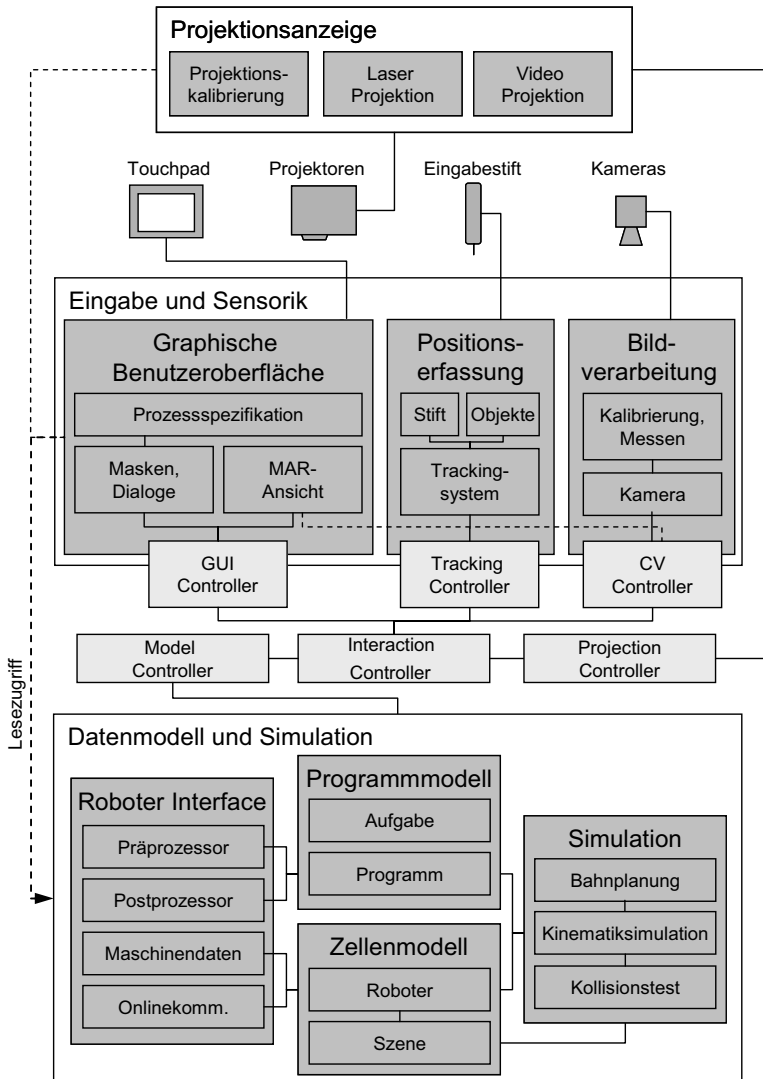


Abbildung 48 Übersicht des Systemaufbaus

Dieser Systementwurf wurde als Multi-Thread-Anwendung in der Programmiersprache C++ implementiert, wofür auf die Klassenbibliothek Qt (TROLLTECH 2007) zurückgegriffen wurde. Als Plattform wurde ausschließlich Microsoft Windows verwendet, wenngleich Qt auch eine Portierung auf andere Betriebssysteme zuließe. Nachfolgend werden die Module im Detail beschrieben.

### 6.2.2 Basissystem und graphische Benutzerschnittstelle

Die graphische Benutzerschnittstelle (GUI) ist im zentralen Thread des Systems angelegt. Sie beinhaltet alle Eingabemasken und Dialogelemente, welche zur Konfiguration und Steuerung des Systems benötigt werden. Die Elemente des Datenmodells, insbesondere das Zellenmodell und die Simulationsfunktionen, sind darin vollständig abgebildet. Die Oberfläche enthält einen Bereich zur Einrichtung und Kalibrierung des Systems und seiner Komponenten. Ein weiterer Bereich beinhaltet Funktionen zur konventionellen Editierung von Programmen. Dieser ist direkt verknüpft mit einer 3D-Simulationsumgebung, welche von ihrer Bedienung wie eine Offline-Simulation angelegt ist, aber zusätzlich monitorbasierte AR-Ansichten des Roboters unterstützt (siehe Abbildung 49).

Zur Realisierung einer monitorbasierten AR-Ansicht wurden die Bibliotheken ARToolkit (Version 2.65) und OpenVRML (Version 0.14.3) in die Oberfläche integriert. ARToolkit verfügt über Funktionen zur Videoaufnahme, zur Positionsortung von Kameras über optische Referenzmarken und zur lagegerechten Einblendung von 3D-Computergraphik. OpenVRML unterstützt das Einlesen und das Rendering von 3D-Modellen im Standard Virtual Reality Markup Language (VRML Version 2.0, auch: VRML97, vgl. ISO 14772-1:1997). Dieses Format unterstützt die Abbildung von Kinematiken und kann von zahlreichen CAD-Systemen und Offline-Simulationen importiert und exportiert werden.

Um dem Benutzer eine mobile Bedienung zu ermöglichen, wird das GUI auf einem Tablet-PC angezeigt. Diese Geräte verfügen über einen berührungssensitiven Bildschirm und sind für die Bedienung mit einem Stift oder mittels Fingergesten ausgelegt. Alle Steuerelemente des GUI müssen dafür mindestens so groß gewählt sein, dass sie vom Benutzer über den Touchscreen angewählt werden können. Ebenso sind Menüstrukturen und Dialoge entsprechend einfach zu gestalten. Als Tablet-PC wurde im vorliegenden Fall ein gemäß IP54 (DIN EN 60529) zertifiziertes stoßfestes, staub- und spritzwassergeschütztes Gerät ausgewählt (hier: Hersteller Panasonic, Modell Toughbook CF 30).

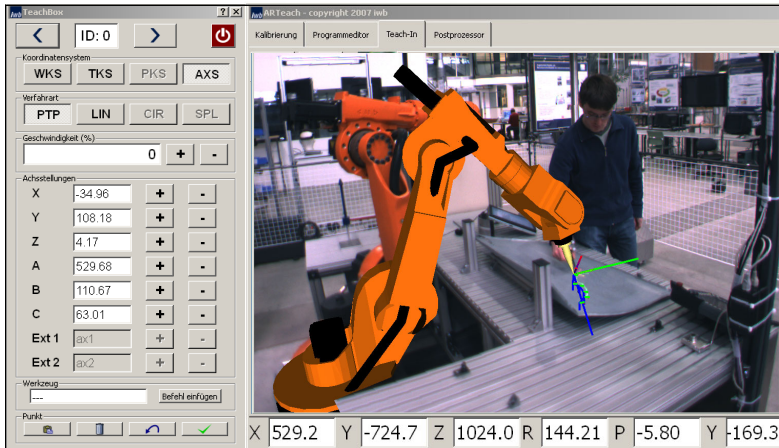


Abbildung 49 Graphische Bedienoberfläche und MAR-Ansicht

Die eigentliche Applikation wird auf einem zentralen Basisrechner ausgeführt, an dem alle Hardwarekomponenten angeschlossen sind, während der Tablet-PC über eine Remotedesktopverbindung basierend auf dem Remote Desktop Protocol (RDP) des Herstellers Microsoft angebunden ist. So kann das System von dem Tablet-PC aus wie eine Terminalanwendung bedient werden. Wie in Abbildung 50 dargestellt, ist es mittels einer drahtlosen Netzwerkverbindung möglich, ohne Kabelanbindung zu arbeiten. Die MAR-Ansicht muss bei einer drahtlosen Anbindung jedoch aufgrund der beschränkten Bandbreite der Verbindung teilweise verkleinert werden, um eine flüssige Darstellung zu erhalten.

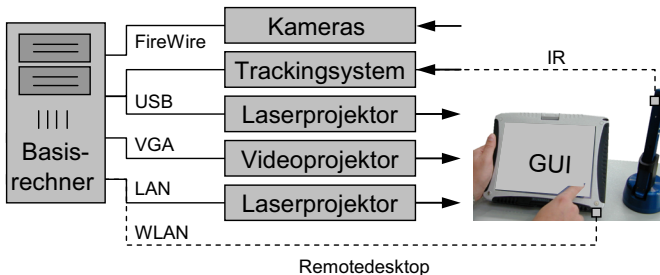


Abbildung 50 Anbindung der Geräte an das Basissystem

### 6.2.3 Projektionsanzeige

Für die projektionsbasierte AR-Visualisierung sind grundsätzlich zwei Klassen von Geräten zu unterscheiden: Videoprojektoren einerseits, scannende Laserprojektoren andererseits. Beide Geräteklassen können mit analogen Verfahren kalibriert werden, unterscheiden sich aber maßgeblich in ihren Anzeigeeigenschaften. Während mit Laserprojektoren ausschließlich Polygonlinien und Trajektorien angezeigt werden können, sind mit Videoprojektoren zusätzlich flächenhafte, farbcodierte Darstellungen und Textanzeigen möglich. Beide Projektorarten wurden in das entworfene System so integriert, dass auch mehrere verschiedene Geräte gleichzeitig betrieben werden können. Die Steuerung der Projektion sorgt dabei für eine konsistente Darstellung der Daten. Für den Sonderfall zweier Laserprojektoren wurde außerdem das in Abschnitt 5.4.3.1 geschilderte heuristische Verfahren zur Aufteilung des Arbeitsraumes implementiert.

Als Videoprojektor kam ein gewöhnliches Gerät zur Anzeige von Präsentationen zum Einsatz (Hersteller Sharp Corp., Modell Notevision PG-M17X). Die Erzeugung des 2D-Computergraphikbildes wird über die Bibliothek OpenGL (OPENGL 2008) vorgenommen. Die dazu benötigte gerätespezifische OpenGL-Projektionsmatrix kann anhand des in Abschnitt 5.4.1.3 geschilderten Kalibriervorgehens unmittelbar bestimmt werden. So werden 3D-Objekte, wie etwa Trajektorien, Raumpunkte oder Flächenverläufe in die Anzeigeebene des Projektors projiziert. Das entstandene 2D-Bild wird über den VGA-Ausgang einer Graphikkarte an den Videoprojektor gesendet.

Als Laserprojektor wurde ein integriertes, mehrfarbiges Anzeigesystem (Hersteller LAP Laser GmbH, Modell CAD-PRO 3D) verwendet, wie es heute vor allem als Positionierhilfe in der Montage eingesetzt wird. Das Gerät wird über eine Netzwerkverbindung auf Basis eines herstellerspezifischen Protokolls für Polygondaten angesteuert. Das System muss die Trajektorien dem Protokoll entsprechend aufbereiten und an das Projektionsgerät senden. Dieses interpretiert die Daten und generiert daraus Steuerbefehle für den Galvanometerscanner. Das Gerät verfügt zudem über einen Mechanismus zur Kalibrierung mittels retro-reflektierender Referenzmarken. Der Laserprojektor und der Videoprojektor sowie die damit erzielten Leistungsmerkmale sind in Abbildung 51 dargestellt.





Videoprojektor	Laserprojektor
Winkel: 29° x 23° Schärfentiefe: 0,33m in 2m Entfernung Farben: 16,7 Millionen (Echtfarben) Linienlänge: beliebig Genauigkeit: ± 1mm in 2m Entfernung Liniendicke: 1mm in 2m Entfernung Sichtbarkeit: gut in abgedunkelter Umgebung	Winkel: 80° x 80° Schärfentiefe: unbegrenzt Farben: 3 (rot, grün, gelb) Linienlänge: ca. 3m (flimmerfrei) Genauigkeit: ± 0,5mm in 4m Entfernung Liniendicke: 1mm in 4m Entfernung Sichtbarkeit: gut bei allen Lichtverhältnissen
	

Abbildung 51 Eingesetzte Projektionsgeräte und deren Leistungsmerkmale

Integrierte Laserprojektorensysteme sind komfortabel in der Anwendung, bieten aber nur eingeschränkte Schnittstellen an. Für die Realisierung der in Abschnitt 5.5 geschilderten automatisierten Geometrieerfassung ist es jedoch notwendig, möglichst direkten Zugriff auf den Galvanometerscanner zu erhalten. Deshalb wurde hierfür ein 2D-Scankopf (Hersteller Nutfield Inc., Modell XLR8-10) ausgewählt, der über eine USB-Interface-Karte (Hersteller SCAPS GmbH, Modell USC-1) direkt angesteuert werden kann. Diese Systeme sind vorwiegend für Laserbearbeitungsaufgaben, etwa Gravieren, ausgelegt. Der Nutfield-Scankopf wurde mit einem Helium-Neon-Laser (rot) in das Versuchssystem integriert und für die Implementierung und Erprobung der Geometrieerfassung verwendet.

#### 6.2.4 Positionserfassung und 3D-Eingabe

Für die Ortung des 3D-Eingabegerätes ist ein optisches Trackingsystem vorgesehen. Das Modul für die Positionserfassung ist so gestaltet, dass mittels einer Adapter-Klasse jedes Trackingsystem mit einem oder mehreren Sensoren und einem oder mehreren zu ortenden Objekten integriert werden kann.

Zunächst wurde ein passives System für VR/AR-Anwendungen (Firma ART Tracking GmbH, Modell SmARTrack) angebunden und evaluiert, welches retro-reflektierende Kugeln durch zwei Flächensensoren lokalisiert. Dieses System

zeichnete sich durch kontinuierliches, weitgehend orientierungsunabhängiges Tracking der Eingabegeräte mit einer hohen Updaterate von 60 Hz aus. Im praktischen Einsatz wurden jedoch eine Störlichtempfindlichkeit gegenüber direktem Tageslicht und verhältnismäßig hohe Messabweichungen ( $>0.5$  mm) beobachtet.

Stattdessen wurde daher ein aktives System mit Zeilenkameras (Hersteller Boulder Innovation Group Inc., Modell 3DCreator) verwendet. Dieses lokalisiert am Eingabegerät angebrachte Infrarot-Leuchtdioden (IR-LED) mittels dreier Zeilen Sensoren. Bei diesem Geräteprinzip ist eine Stromversorgung am Eingabegerät erforderlich und die Anzahl der gleichzeitig lokalisierbaren Objekte sowie die Messrate sind deutlich beschränkt. Dafür kann mit dieser Systemklasse bei vergleichbaren Arbeitsräumen eine höhere Genauigkeit und Robustheit bei wechselnden Lichtverhältnissen erreicht werden. Das Sensorsystem selbst ist kompakt gestaltet, so dass es gut umpositioniert werden kann, um den Arbeitsbereich zu verlagern bzw. um Verdeckungen zu umgehen. Es ist zudem der parallele Einsatz zweier Sensorbalken in einem System möglich. Das Positionserfassungssystem und seine Komponenten sind nachfolgend in Abbildung 52 dargestellt.

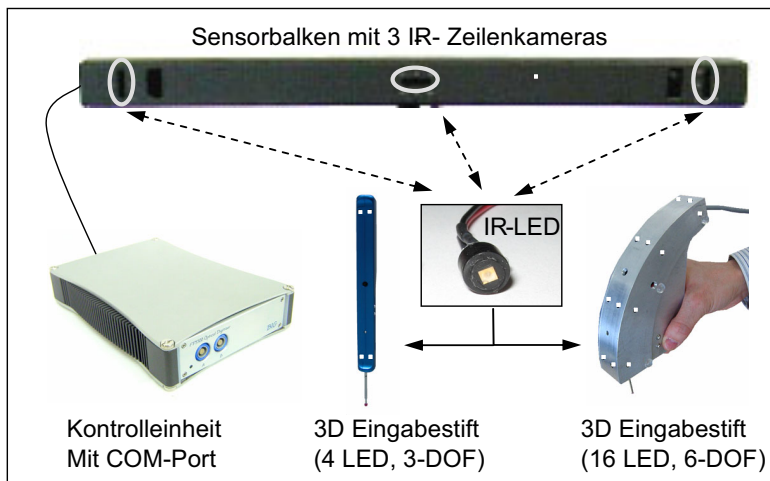


Abbildung 52 Komponenten des verwendeten Positionserfassungssystems

Das mitgelieferte Eingabegerät des Herstellers (vgl. Abbildung 52, unten Mitte) ist für 3D-Koordinatenmessungen ausgelegt und trägt nur vier, in einer Ebene liegende Leuchtdioden. Es kann nur erfasst werden, wenn alle LED zum Kamerasystem hin ausgerichtet sind, so dass die Bewegungsfreiheit des Anwenders merklich eingeschränkt ist. Daher wurde in Zusammenarbeit mit dem Geräteher-

steller ein neues Eingabegerät entworfen und prototypisch realisiert (REINHART et al. 2007). Bei diesem sind insgesamt 16 LED auf drei Gehäuseseiten verteilt, so dass es wesentlich besser kontinuierlich erfasst werden kann (vgl. Abbildung 52, unten rechts). Beide Geräte verfügen über je zwei Eingabetasten und tragen Gewindebuchsen zur Anbringung von Standard-Messspitzen. Eine weitere Option stellt die Verwendung eines Modells des Roboterwerkzeuges als Eingabegerät dar. Hierzu muss eine Nachbildung der Werkzeuggeometrie – etwa eines Schweißbrenners – erstellt und mit LED ausgestattet werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass Kollisionsgefahren bereits bei der Programmerstellung offenkundig werden.

## **6.2.5 Bildverarbeitung**

### **6.2.5.1 Bildaufnahme und Kamerakalibrierung**

In dem Gesamtsystem sind zwei unterschiedliche Einsatzbereiche von Kameras vorgesehen. Zum einen werden Videokameras zur Aufnahme des Arbeitsraumes verwendet, in deren Bild die Roboterkinematik und andere Modelldaten in einer MAR-Ansicht eingeblendet werden. Zum anderen kommen monochrome Kameras für die automatisierte Erfassung projizierter Laserpunkte zum Einsatz. Diese sind mit telezentrischen, zur optischen Vermessung geeigneten Objektiven ausgestattet. Alle Kameras sind dabei durch einen IEEE 1394b-Bus („Firewire“) mit dem System verbunden und werden über die DirectShow-Software des Herstellers Microsoft angesprochen.

Das System muss für beide Klassen von Kameras sowohl deren intrinsische als auch deren extrinsische Parameter bestimmen können. Die intrinsischen Parameter einer Kamera beschreiben das Abbildungsverhalten, die extrinsischen charakterisieren die Lage des Gerätes im Raum. Die Bestimmung dieser Parameter erfolgt über optische Referenzmarken bekannter Geometrie. Diese werden aus verschiedenen Perspektiven im Bild aufgenommen und ausgewertet, so dass aus der Korrespondenz von Bild- und Weltkoordinaten die Parameter der Kamera bestimmt werden können.

Die für die Videomischung und die Erstellung der MAR-Ansicht verwendete Softwarebibliothek ARTToolkit (Version 2.65) bietet zu diesem Zweck ein einfaches zweistufiges Verfahren an, bei dem zunächst einmalig die intrinsischen Kameraparameter bestimmt werden. Anschließend kann die Kamerapose in Be-

zug zu im Bild aufgenommenen geometrischen Mustern zur Laufzeit bestimmt werden. Dieses Verfahren wird zum Tracking der Kameras für die MAR-Ansicht verwendet.

Eine vom Prinzip analoge Methode wird von der kommerziellen Softwarebibliothek Halcon (Hersteller MVTec GmbH, Version 7.1.3, vgl. STEGER et al. 2007) zur Verfügung gestellt. Diese Bibliothek wurde zur Implementierung der automatisierten Geometrieerfassung in das System integriert. Der Kamerakalibrierung liegt ein aufwändigeres, aber dafür genaueres Kameramodel zu Grunde, welches mehr Berechnungszeit benötigt. Das Verfahren ist daher für eine kontinuierliche Positionserfassung zur Laufzeit nur bedingt einsetzbar, eignet sich jedoch gut für eine präzise Bestimmung der Kameraparameter für Messzwecke.

### 6.2.5.2 Vorgehen zur Erkennung von Laserpunkten

Für die automatisierte Vermessung von Objekten werden Laserpunkte aufprojiziert und mit dem Kamerasystem aufgenommen, so dass daraus 3D-Koordinaten berechnet werden können (vgl. Abschnitt 5.5.1). Hierzu ist es notwendig, die Laserpunkte im Kamerabild exakt und zuverlässig zu identifizieren. Dies erfolgt mittels der Differenzbild-Methode, bei welcher im Wechsel jeweils ein Bild mit Projektion und eines ohne Projektion aufgenommen wird. Durch eine pixelweise Subtraktion der beiden Bilder kann das Umgebungslicht weitgehend herausgerechnet werden, so dass nur die projizierten Lichtpunkte auf nahezu schwarzem Hintergrund verbleiben. Das resultierende Bild wird anhand eines Helligkeitsschwellwertes segmentiert und zusammenhängende Bereiche werden geschlossen. Es erfolgt eine Größenbestimmung, bei welcher zu kleine oder zu große Pixelbereiche verworfen werden. Erfüllt der verbleibende Bereich die Größenkriterien, so gilt der Laserpunkt als erkannt und der Grauwert-Schwerpunkt der Region stellt den Mittelpunkt dar. Aus den Bildkoordinaten des Laserpunktes kann anschließend durch einen Schnitt der Sehstrahlen von Projektor und Kamera (vgl. Abschnitt 5.5.1) die Lage des Laserpunktes im Raum bestimmt werden.

### 6.2.5.3 Charakterisierung der Messgenauigkeit

Mit diesem einfachen Vorgehen konnten im Versuchsaufbau Laserpunkte mit einer Genauigkeit von 0,12 Pixel und einer Zuverlässigkeit von über 99 % erkannt werden. Bei einer Kameraauflösung des verwendeten Systems von 1024 x 768 Bildpunkten, einer Chipgröße von 1/3 Zoll bzw. 8,38 mm und einer

Brennweite von 6 mm, ergibt sich nach dem Strahlensatz eine Pixelgröße auf dem Chip von  $3\text{ }\mu\text{m}$ , was in 1 m Abstand einer Größe von 0,5 mm entspricht (vgl. Abbildung 30, S. 90). Für die gemessene Auflösung von 0,12 Pixel bedeutet dies, dass ein projizierter Laserpunkt auf dem Kamerachip mit  $\Delta d_{\text{Kamera}} = 3\text{ }\mu\text{m} * 0,12 = 0,36\text{ }\mu\text{m}$  aufgelöst werden kann, was in einem Meter Abstand einer lateralen Auflösung von  $\Delta x_{\text{Kamera}} = 0,5\text{ mm} * 0,12 = 0,06\text{ mm}$  entspricht.

Die maximale Auflösung eines Stereosystems in z-Richtung kann nach MVTEC (2008, S. 99) mit der folgenden Formel berechnet werden, in welche neben den bisher genannten Größen auch der Basisabstand  $b$  der Geräte eingeht:

$$\Delta z = \frac{\Delta d}{f \cdot b} \cdot z^2. \quad (6-1)$$

Die Winkelwiederholgenauigkeit des für die Messung verwendeten Scannerkopfes liegt bei  $8,0\text{ }\mu\text{rad}$ , was in einer Distanz von einem Meter einer Größe von  $\Delta x_{\text{Laser}} = 0,45\text{ mm}$  bzw. einem Wert von  $\Delta d_{\text{Laser}} = 2,7\text{ }\mu\text{m}$  entspricht. Die Auflösung des Lasers in der Bildebene  $\Delta d_{\text{Laser}}$  ist eine Größenordnung schlechter als die der Kamera  $\Delta d_{\text{Kamera}}$ , so dass für die Auflösung des Gesamtsystems der Laser-scanner maßgeblich ist und folglich  $\Delta d_{\text{Gesamt}} = \Delta d_{\text{Laser}}$  angenommen werden kann. Mit einem Basisabstand von  $b = 0,30\text{ m}$  zwischen Kamera und Laserprojektor ergibt sich eine maximale Auflösung des Gesamtsystems in z-Richtung von  $\Delta z_{\text{Kamera}} = 0,9\text{ mm}$ .

Mit dem vorliegenden System wurde in Versuchsmessungen mit einem durchschnittlichen Abstand von  $z = 1,5\text{ m}$  eine Auflösung von  $\Delta x_{\text{Gesamt}} = 0,5\text{ mm}$  und  $\Delta z_{\text{Gesamt}} = 2,5\text{ mm}$  festgestellt. Die große Diskrepanz zu den theoretisch ermittelten Werten erklärt sich vor allem durch eine systematische Abweichung der Positioniergenauigkeit des Scannkopfes, welche an dieser Stelle nicht weitergehend adressiert wurde. Für eine Einbindung der Messdaten in Bearbeitungsprogramme muss die Genauigkeit daher noch maßgeblich optimiert werden bzw. auf kleinere Arbeitsbereiche zurückgegriffen werden. Demgegenüber reicht die Genauigkeit für eine Erfassung der Geometrie von kollisionsgefährdeten Körpern gut aus.

## 6.2.6 Interaktionssteuerung

Das Verhalten des Gesamtsystems gegenüber dem Anwender bzw. der Umgebung wird durch die Interaktionssteuerung definiert. Sie koordiniert Eingaben in das System über die verschiedenen Modalitäten (Touchscreen, 3D-Eingabestift, Bildverarbeitung), die konsistente Visualisierung der zu Grunde liegenden Mo-

delldaten durch die Anzeigesysteme (2D-GUI, 3D-MAR-Ansicht, räumliche Projektion) sowie die Transformation der Daten im Zuge von Benutzeraktionen.

Für die Bearbeitung von Trajektorien und 3D-Modellinformationen stellt die Interaktionssteuerung die in Abschnitt 5.6 ausgeführten Metaphern auf Basis der verfügbaren Eingabe- und Anzeigemodalitäten zur Verfügung. Die Synchronisation der Eingabemodalitäten erfolgt über die Vergabe eines exklusiven Fokus, welcher bei Betätigung eines Eingabeelementes auf dieses wechselt. Zudem sind mehrere Eingabemodi vorgesehen, welche dem Benutzer durch unterschiedliche Cursorformen visualisiert werden.

Die Interaktionssteuerung kanalisiert und interpretiert Benutzereingaben in Abhängigkeit des aktuellen Eingabekontextes bzw. der verwendeten Eingabemetapher. Sie fragt relevante Werte des Datenmodells ab und stößt benötigte Berechnungsalgorithmen, etwa zur Überprüfung der Erreichbarkeit durch den Roboter und zur Erkennung von Kollisionsgefahren an. Ist eine zulässige Manipulation erfolgt, so wird das Datenmodell angepasst und eine entsprechende Veränderung der Visualisierung ausgelöst. Zusätzlich wurde eine auditive Rückmeldung implementiert, welche dem Benutzer Ereignisse, wie die Betätigung der Tasten des 3D-Eingabestiftes bestätigt.

### 6.2.7 Datenmodell und Simulation

Für die Datenhaltung wurde ein Konzept entwickelt, welches vier wesentliche Aufgaben erfüllt und sich dementsprechend in folgende Teilbereiche gliedert:

- die Anbindung an das reale Robotersystem durch das „**Robot Interface**“,
- die Beschreibung des Programms in dem „**Programmmodell**“,
- die Abbildung des Roboters und der Umgebung in dem „**Zellenmodell**“
- und die Vorhaltung von Simulations- und Berechnungsfunktionen im Modul „**3D Simulation**“.

#### 6.2.7.1 Roboterschnittstelle

Das Modul „Robot Interface“ beinhaltet eine abstrakte Schnittstelle für die Steuerung von Industrierobotern durch das System. Diese Schnittstellendefinition bildet die Grundlage für die Kommunikation mit der Robotersteuerung. Weiter-

hin sind darin die zentralen Parameter der Kinematik und der Steuerung, die sogenannten Maschinendaten, hinterlegt. Für die Kommunikation und den Datenaustausch mit der Robotersteuerung sind Mindestumfänge wie der bidirektionale Transfer von Programmen (Download zum Roboter bzw. Upload von der Steuerung) sowie die Abfrage und Definition von zentralen Steuerungsparametern vorgesehen. Darüber hinaus kann je nach verfügbaren proprietären Schnittstellen des Robotersystems ein weitergehender Zugriff auf die Funktionen der RC-Steuerung realisiert werden. Für Roboter des Herstellers Kuka wurde beispielsweise lediglich ein auf einer Netzwerkverbindung basierender FTP-Transfer (File Transfer Protocol, FTP) von Programmdateien implementiert. Für Maschinen der Firma Motoman (Yaskawa Electric Corp.) wurde mit der Kommunikationsbibliothek MotoCom32 (Version 4.4.1) ein umfassender Remote-Zugriff auf Basis einer Ethernetverbindung realisiert.

In dem Programmmodell des AR-Systems wird eine generische, herstellerunabhängige Darstellung der Roboteraktionen genutzt. Damit die erstellten Programme von Robotersteuerungen ausgeführt werden können, bedarf es geeigneter Export- bzw. Importfunktionen. So ist es möglich, den Robotercode über die herstellerspezifischen Derivate der Industrial Robot Language (DIN 66312) zu beschreiben. Dieser Code beinhaltet standardisierte Verfähr-, Steuerungs- und Kommunikationsbefehle welche zur Laufzeit interpretiert werden. Die Transformation der generischen Programmbeschreibung in eine herstellerspezifische Form erfolgt über einen sogenannten Postprozessor, welcher für den jeweiligen Robotertyp zu implementieren ist. Analog ist für den Import von bestehenden Programmen in das System ein herstellerabhängiger Parser bzw. Präprozessor zu erstellen. Postprozessoren wurden zur Erprobung beispielhaft für die Sprachen „Kuka Robot Language“ (Hersteller Kuka) und „INFORM II“ (Hersteller Motoman) implementiert und eingesetzt.

### **6.2.7.2 Programm- und Aufgabenmodell**

Die Programminhalte werden innerhalb des AR-Systems durch ein generisches Datenmodell verwaltet. Dieses stellt eine hierarchische Struktur zur Modellierung von Roboterbewegungen und der damit synchronisierten Kommunikations- und Steuerungsbefehle bereit. Ein Programm besteht dabei aus Unterprogrammen, welche wiederum aus einzelnen Programmelementen aufgebaut sind. Diese Einzelelemente sind entweder anzufahrende Bahnpunkte bzw. Achswinkelstellungen oder aufzurufende Steuerungsbefehle, die mit den erforderlichen Parametern

tern wie Referenzsystem, Verfahrenart, Geschwindigkeit oder Werkzeugeinstellungen hinterlegt werden. Die von der IRL abgeleiteten herstellerspezifischen Sprachen sind in diesem Modell direkt darstellbar und können mit den zuvor beschriebenen Prä- bzw. Postprozessoren sowohl eingelesen als auch erzeugt werden. Das System bietet damit die Möglichkeit, konventionelle Roboterprogramme unter Verwendung der AR-Funktionalitäten sowohl neu zu erstellen, als auch bereits vorhandene Programme anzupassen und zu editieren. Das aktuelle Programmmodell kann zudem in einem dafür definierten Datenformat auf Basis der Extensible Markup Language (XML) zu jedem Zeitpunkt gespeichert und erneut geladen werden.

Neben der Emulation konventioneller Programmeditierung unterstützt das System auch die Erstellung anwendungsspezifischer Aufgabenbeschreibungen, welche Prozesse unabhängig von der Roboterbewegung charakterisieren. Beispielsweise wurde für Schweißaufgaben ein hierarchisch gegliedertes Modell der gesamten Aufgabe mit Unterelementen in Form einzelner Schweißnähte und deren Parametrierung definiert. Im Einsatz erstellt der Benutzer dann mit Hilfe des Systems lediglich eine Beschreibung der Schweißaufgabe, indem er alle Nähte auf dem Bauteil definiert und die zugehörigen Parameter festlegt.

Für einfache Prozesse kann die Überführung der Aufgabenbeschreibung in ausführbaren Programmcode auf Basis vorbereiteter, parametrierbarer Unterprogramme bzw. Makros erfolgen. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn zahlreiche Unteraufgaben auftreten, deren Aktionsfolgen weitgehend identisch sind, während die Bahngeometrien durch Skalierung bzw. einfache Manipulation ineinander überführt werden können. In der nachfolgend ausgeführten Beispielanwendung des robotergestützten Laserhärtens ist dies für mehrere geometrische Bauteilmerkmale der Fall. Mit einem derartigen Vorgehen kann in einfachen Fällen eine automatisierte Erzeugung der Programmgerüste erreicht werden. Der Test und die Optimierung der Bewegungsabläufe müssen jedoch auf konventionellem Weg, also durch Editieren des RC-Programms, durch den Benutzer erfolgen.

Eine vollständig implizite Programmierung, bei welcher der Benutzer ausschließlich mit der Erstellung der Aufgabenbeschreibung betraut ist, kann erst durch die Verbindung des AR-Systems mit einem domänenspezifischen, aufgabenorientierten Planungswerkzeug erreicht werden. Das AR-System wird dabei zur intuitiven und schnellen Definition der Aufgabe des Robotersystems verwendet. Ergebnis der Bearbeitung ist wiederum eine Aufgabenbeschreibung, auf Basis derer die zugehörigen Roboterbewegungen und Steuerungsaktionen dann von einem rech-



nergestützten Planungswerkzeug automatisiert erstellt werden. Dieses Vorgehen wurde exemplarisch im Zusammenspiel mit einem aufgabenorientierten Planungssystem für das Remote-Lasertrahl-Schweißen (ZÄH & MUNZERT 2008) erprobt. Abbildung 53 gibt einen Überblick zu dem Programm- und Aufgabenmodell sowie der alternativen Vorgehensweisen zur Bearbeitung.

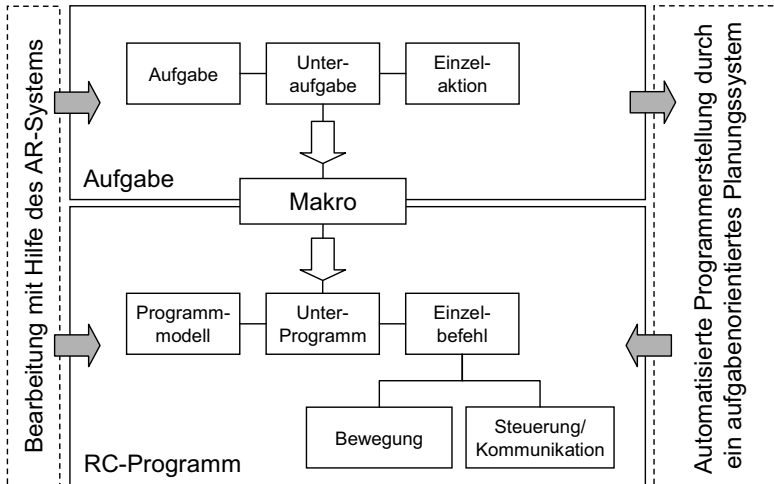


Abbildung 53 Modellierung des Programms und der Aufgabe

### 6.2.7.3 Zellenmodell

Der Teilbereich des Zellenmodells dient zunächst dazu, die anfänglich verfügbaren Geometrieinformationen des zu programmierenden Robotersystems zu hinterlegen. Diese können dann zum einen im Sinne einer modellgestützten Programmierung in den Programmerstellungsprozess einbezogen werden. Zum anderen können die Geometriemodelle durch den Benutzer im Verlauf der Systemanwendung interaktiv modifiziert und erweitert werden. Das Zellenmodell wird in einer hierarchischen Baumstruktur, einem sogenannten Szenegraphen, vorgehalten. Diese kann zur Laufzeit modifiziert und für Berechnungen herangezogen werden. Als Format wird die Virtual Reality Markup Language genutzt.

Die minimal notwendige Voraussetzung zum Einsatz des Systems bilden Modelle der verwendeten Kinematiken. Zu deren Einbindung steht eine Importfunktion für VRML-Dateien zur Verfügung. Geometrische Robotermodelle sind in der Regel von den Herstellern in CAD-Formaten verfügbar, welche direkt in das

VRML-Format konvertiert werden können. Darüber hinaus können relevante Objekte, wie Werkstücke und Vorrichtungen sowie Strukturen des Umfeldes in dem Zellenmodell berücksichtigt werden. Diese werden entweder durch die CAD-Importfunktionen geladen oder interaktiv – auf Basis realer Objekte der Umgebung – mit dem AR-System erzeugt. Die interaktive Generierung umfasst zum einen die manuelle Modellierung von Objekten mit dem Eingabestift (vgl. Abschnitt 5.6.3) und zum anderen die Vermessung von Objekten mittels der 3D-Scanfunktionen (vgl. Abschnitt 5.5). Das Zellenmodell kann dadurch im Verlauf der Systembenutzung zielgerichtet verfeinert und angepasst werden, so dass sowohl für die Programmerstellung als auch für die Simulation geeignete Modell-daten zur Verfügung stehen.

### 6.2.7.4 Berechnung und Simulation

Das Datenmodell hält Simulationsfunktionen vor, welche zum einen den Betrieb des Programmiersystems unabhängig von dem realen Roboter und dessen Steuerungssystem ermöglichen. Zum anderen unterstützen diese den Benutzer bei der Programmierung, indem vorhandene Modelldaten in den Programmerstellungsprozess einbezogen werden. Es wurden dafür die folgenden drei Funktionsbereiche vorgesehen:

- **Kinematikberechnung:** Kinematische Ketten werden vom Benutzer in dem System nach der Konvention von DENAVIT & HARTENBERG (1955) hinterlegt. Die Lösung des inversen kinematischen Problems erfolgt – sofern keine explizite Lösung hinterlegt wurde – mit Hilfe eines numerischen Verfahrens. Die notwendigen Berechnungen wurden auf Basis der Robotik-Bibliothek ROBOOP (GOURDEAU 2007) im Zusammenspiel mit einer dafür implementierten Matrix-Bibliothek realisiert. Alternativ kann der Benutzer für den jeweiligen Robotertyp eine geschlossene, analytische Lösung hinterlegen.
- **Virtueller Roboter:** Durch das Zusammenwirken der Kinematikberechnung und der 3D-Visualisierung bzw. der Monitor-AR-Ansicht steht dem Benutzer ein virtuelles Robotermodell zur Verfügung. Damit wird zum einen die Erreichbarkeit von Zielpositionen überprüft. Zum anderen kann der virtuelle Roboter analog zum realen System mit einem virtuellen Teachpanel bedient werden und das Interpolationsverhalten kann angenähert simuliert werden (vgl. Abbildung 49, S. 121).

- **Kollisionsrechnung:** Das virtuelle Robotermodell und die im Zellenmodell hinterlegten Objekte werden auf Kollisionsgefahren hin analysiert. Bisher wird dazu lediglich eine paarweise Überprüfung zwischen zuvor definierten Objekten des VRML-Szenegraphen, etwa zwischen Werkstück und dem Werkzeug, durchgeführt. In Zukunft sollte an dieser Stelle ein leistungsfähiger, separater Mechanismus zur Kollisionsprüfung integriert werden, welcher die gesamte Szene berücksichtigt und neben der Visualisierung in Echtzeit ausgeführt wird. Eine sinnvolle Erweiterung stellt in diesem Zuge die Einbindung einer Kombination aus Kollisionsrechnung und generischem Bahnplaner dar, wie dies beispielsweise von LATOMBE et al. (2006) im Rahmen der Bibliothek „Motion Planning Kit“ realisiert worden ist.
- **Einbindung von Bauteilmodellen:** Für die Programmierung am realen Bauteil findet eine Synthese der vorhandenen Modelldaten des Werkstücks mit den interaktiven Eingaben, welche der Benutzer mit dem Taststift tätigt, statt. Informationen der Bauteilgeometrie, wie etwa Oberflächennormalen, werden dabei den aktuellen Positionswerten des 3D-Eingabegerätes zugeordnet und für die Programmerstellung herangezogen. Dies kann zukünftig auch auf Konturverläufe zur Bestimmung von Stützpunkten ausgedehnt werden. Diese Art der Synthese von Modelldaten und interaktiven Benutzereingaben ist vor allem für die Einbindung von durch Scanning erfassten Messdaten viel versprechend.

Die in diesem Bereich ausgeführten Berechnungs- und Simulationsfunktionen ähneln zum Teil den Funktionsumfängen heutiger CAD-gestützter Offline-Programmiersysteme. Durch das AR-System stehen diese dem Benutzer jedoch unter Einbeziehung der Realgeometrien auch im realen Umfeld zur Verfügung.

### 6.2.8 Kalibrierung und Referenzierung des Gesamtsystems

#### 6.2.8.1 Interne Kalibrierung der Einzelgeräte

Unter Kalibrierung versteht DIN 1319-1 das „Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Messwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine betrachtete Messeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen“. Im vorliegenden Fall ist darunter die exakte Bestimmung der Abbildungsparameter zu

verstehen, welche die internen Größen eines Systems (z. B. Bildposition in einem Kamerabild) in Weltpositionen des Gerätearbeitsraumes überführen. Dies betrifft sowohl die Projektoren (vgl. Abschnitte 5.4.1.3 und 5.4.2.2) als auch die Kameras (siehe Sektion 6.2.5.1) sowie das Trackingsystem und die Roboterkinematik. Eine „interne Kalibrierung“ wird bei erstmaliger Verwendung des jeweiligen Gerätes durchgeführt und ist im späteren Betrieb nur bei Veränderungen des jeweiligen Teilsystems nötig. Bei dem vorliegenden Prototypen wird die interne Kalibrierung teilweise durch selbst implementierte Mechanismen (z. B. für die Videoprojektoren und den Laserprojektor der Fa. Nutfield) und teils durch proprietäre Verfahren der Gerätehersteller abgedeckt (z. B. Laserprojektor der Fa. LAP, Trackingsystem der Fa. Revxperts).

### 6.2.8.2 Lokalisierung und Referenzierung der Geräte

Um die zuvor intern kalibrierten Geräte in einem Gesamtsystem nutzen zu können, ist es erforderlich, den räumlichen Bezug der Geräte zueinander zu bestimmen. Es müssen also die Transformationen zwischen den Gerätekoordinatensystemen ermittelt werden. Im vorliegenden Fall wird dazu für zwei Geräte eine ausreichende Anzahl von Referenzpunkten  $\mathbf{a}_i^{KOS1} \leftrightarrow \mathbf{b}_i^{KOS2}$  vermessen. Dabei seien  $\mathbf{a}_i$  und  $\mathbf{b}_i$  jeweils identische Punkte, wobei  $\mathbf{a}_i$  im Koordinatensystem des einen Gerätes und  $\mathbf{b}_i$  im Koordinatensystem des anderen Gerätes gemessen wird. Mit Hilfe dieser Paare von korrespondierenden Punkten kann eine  $4 \times 4$ -Transformationsmatrix berechnet werden, die  $\mathbf{b}_i$  in  $\mathbf{a}_i$  überführt:

$$\mathbf{T}\mathbf{b}_i^{KOS2} = \mathbf{a}_i^{KOS1}. \quad (6-2)$$

Dabei seien die Punkte in homogenen Koordinaten dargestellt:  $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i, w_i)^T$ . Für die Matrix  $\mathbf{T}$  kommen drei wesentliche Klassen von Transformationen in Frage:

- **Starre Transformation:** Die Koordinatensysteme lassen sich durch eine geeignete Verschiebung und Rotation in Deckung bringen, bleiben jedoch in Form und Größe unverändert. Diese Transformation hat insgesamt sechs Freiheitsgrade, drei für die Verschiebung und drei für die Rotation.
- **Affine Transformation:** Neben Rotationen und Verschiebungen werden auch Skalierungen und Scherungen der Koordinatensysteme berücksichtigt, wofür insgesamt 12 Freiheitsgrade zur Verfügung stehen.

- **Projektive Transformation:** Zusätzlich zu Abbildungen der affinen Transformation werden auch perspektivische Verzerrungen in den 15 Freiheitsgraden der Matrix berücksichtigt.

Welche Klasse von **T** die besten Resultate erzielt, hängt stark von physikalischen Eigenschaften der Einzelsysteme ab. Dies muss im Einzelfall auf Basis des Wissens um das Systemverhalten und durch praktische Versuche ermittelt werden.

Für die Bestimmung der benötigten Punktepaare ist es zweckmäßig, auf Referenzobjekte zurückzugreifen, deren Lage in dem gewünschten Bezugssystem bekannt ist. Diese werden in der Umgebung platziert und absolut vermessen. Als Referenzen kommen geometrische Muster und Bildmerkmale für die Kameras, Antastpunkte für den Roboter und das Trackingsystem sowie im Fall der Laserprojektoren, retroreflektierende Spiegelemente zum Einsatz. Die Abbildung 54 gibt einen Überblick der im vorliegenden System verwendeten Referenzierungen.

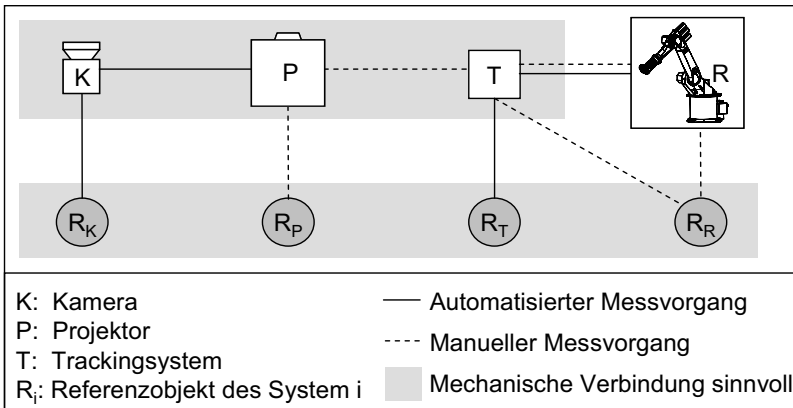


Abbildung 54 Übersicht der verwendeten Messreferenzen

Neben einer Lokalisierung der Einzelgeräte in Bezug zu Referenzobjekten ist zudem eine direkte Referenzierung der Geräte untereinander möglich. Die Abbildung 55 zeigt Beispiele für die Bestimmung der Relativtransformationen zwischen den Geräten. Je nach Systemkonfiguration können sowohl die Referenzobjekte als auch die Geräte wechselseitig miteinander verbunden werden, so dass eine Vermessung nur einmalig notwendig ist.

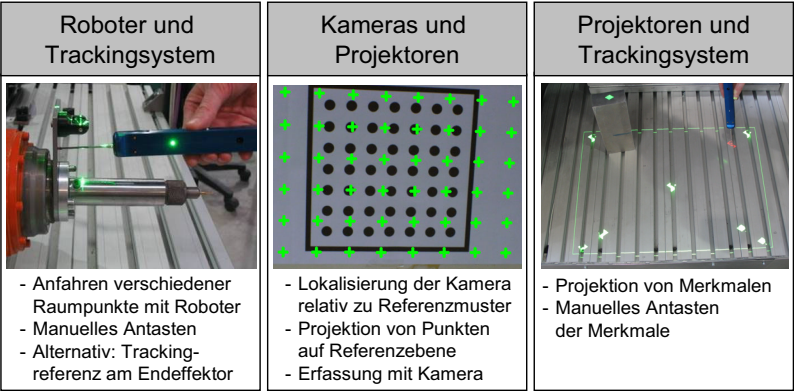


Abbildung 55 Bestimmung der Relativtransformation zwischen Geräten

Ein wesentlicher Faktor für die praktische Einsetzbarkeit des Systems liegt in einer aufwandsarmen, schnellen und zuverlässigen Referenzierung. Es wird daher – wo immer dies die Systemkonfiguration zulässt – auf automatisierte Messvorgänge zurückgegriffen. Zudem wird der Benutzer durch eine angepasste Dialogführung unterstützt. Abbildung 56 stellt die zugehörige Bildschirmansicht dar.

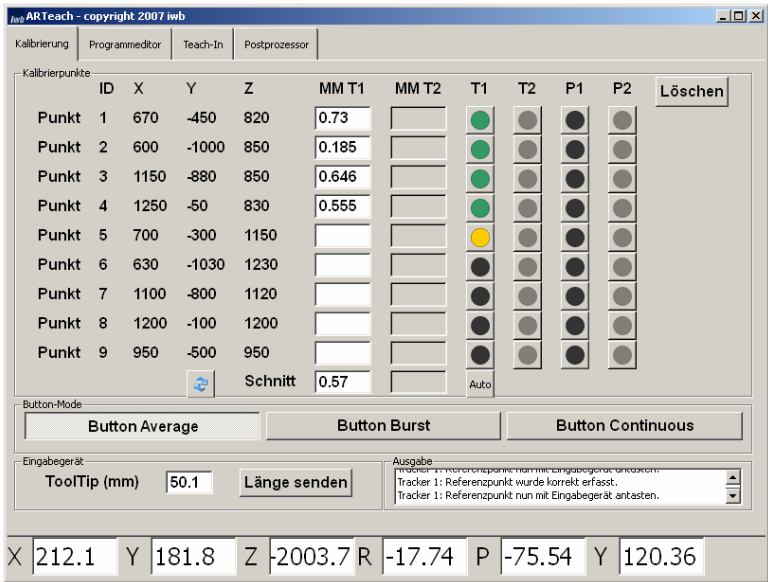


Abbildung 56 Dialog für die Kalibrierung

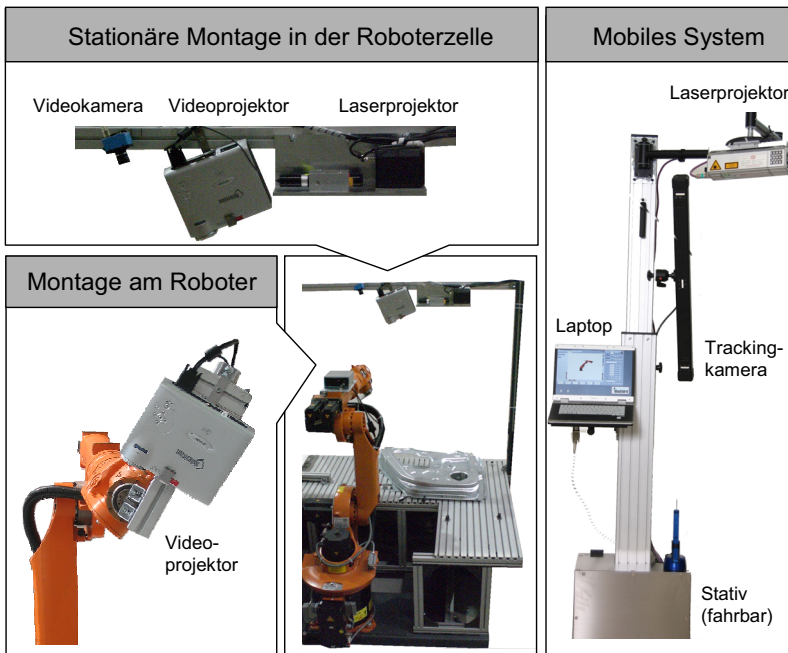
Die erforderlichen manuellen Benutzeraktionen werden durch Dialoganweisungen sukzessiv eingefordert. Gleichzeitig erhält der Nutzer eine Rückmeldung über die Qualität der gesamten Kalibrierung wie auch der einzelnen Messpunkte und kann Einzelmessungen nach Bedarf jederzeit verwerfen bzw. wiederholen. Mit diesem Vorgehen kann eine Kalibrierung des Gesamtsystems in kurzer Zeit (< 10 Minuten) durchgeführt werden.

### 6.3 Systemkonfigurationen und realisierter Aufbau

Für die Ausgestaltung des Gesamtsystems lassen sich drei wesentliche Klassen von Konfigurationen identifizieren, welche – abhängig von den Erfordernissen der Anwendung – auch in Kombination miteinander verwendet werden können:

- **Stationäre Anbringung:** Die Einzelgeräte sind im Umfeld des Robotersystems starr angebracht. Die Anbringung der Geräte legt dabei den Arbeitsraum des Systems fest. Der Kalibrieraufwand ist gering, da das System abgesehen von der Ersteinrichtung nur selten, etwa vor der ersten Benutzung des Tages, kalibriert werden muss. Diese Konfiguration eignet sich für den Einbau in Roboterzellen, welche häufig umprogrammiert werden müssen.
- **Mobiler Aufbau:** Die Einzelgeräte sind auf einem fahrbaren Stativ angebracht. Dadurch kann das System an verschiedenen Roboterstationen eingesetzt werden. Ebenso ist der Arbeitsraum durch Verfahren des Stativs veränderbar. Dies erfordert allerdings eine erneute Referenzierung des AR-Systems in Bezug auf den Roboter. In Verbindung mit stationär im Arbeitsraum des Roboters angebrachten Messreferenzen kann der Aufwand hierfür jedoch auf wenige Minuten beschränkt werden. Diese Konfiguration stellt die flexibelste Variante dar.
- **Anbringung am Roboter:** Das AR-System ist als kompakte Einheit realisiert, welche am Endeffektor des Roboters montiert wird. Dies stellt hohe Anforderungen an die konstruktive Gestaltung im Hinblick auf die Baugröße und die Verkabelung der Subsysteme. Diese Variante ermöglicht ebenfalls den Einsatz an mehreren Roboterstationen und eröffnet einen großen Arbeitsraum, da das AR-System durch den Roboter flexibel positioniert werden kann. Zudem wird die Positionierungsgenauigkeit des Robotersystems in den Programmiervorgang einbezogen.

In Abbildung 57 sind die verschiedenen Konfigurationen des am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften aufgebauten Versuchssystems dargestellt. In diesem Umfeld wurden alle drei Varianten prototypisch realisiert und im Verbund miteinander erprobt. Die stationäre Anbringung und der Aufbau auf einem Stativ wurden vollständig implementiert. Auch für die Variante der Anbringung am Endeffektor des Roboters wurde ein Funktionsnachweis erbracht. Dieser wurde allerdings auf die Anbringung der Projektionsgeräte am Werkzeugflansch des Roboters beschränkt.



*Abbildung 57 Übersicht des Versuchssystems und seiner Konfigurationen*

Für die mobile Systemkonfiguration wurde eine kompakte Integration aller notwendigen Geräte in einen robusten, gleichzeitig zerlegbaren und transportablen Stativwagen angestrebt. Die Anbringung des Projektionsgeräts erfolgte an einem flexiblen Schwenkarm. Die Abbildung 58 zeigt das mobile Programmiersystem im Einsatz. Dieses erwies sich im Rahmen der nachfolgend geschilderten Erprobungen als die vielseitigste und zweckdienlichste Systemkonfiguration.



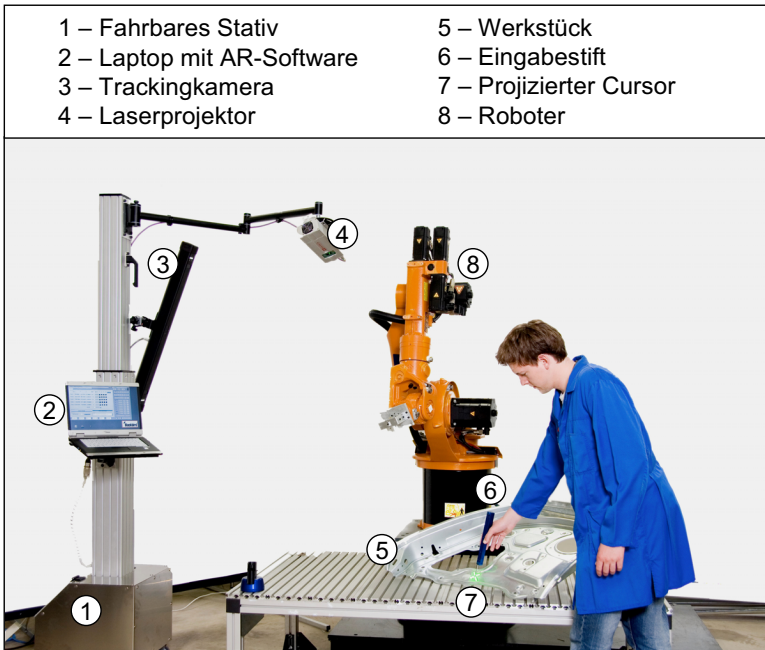


Abbildung 58 Einsatz des mobilen Programmiersystems

## 6.4 Erprobung und Anwendung des Systems

### 6.4.1 Grundlegende Erprobung im Labor

Die im Rahmen der Arbeit konzipierten Verfahren und das dafür realisierte Gesamtsystem wurden zunächst in Laborversuchen hinsichtlich ihrer Funktionalität validiert. Dabei konnte das Funktionsprinzip nachgewiesen werden und es wurden erste Einschätzungen der zu erwartenden Nutzenpotenziale im Hinblick auf eine Vereinfachung und Beschleunigung der RC-Programmierung gewonnen (ZÄH & VOGL 2006). In einem ersten Versuch wurde Testpersonen eine einfache Aufgabe der Bahnprogrammierung gestellt (vgl. Abbildung 59), welche diese einmal mit Hilfe des AR-Systems und einmal mit dem konventionellen Teach-In-Verfahren lösen mussten. Es handelte sich um einen Bewegungsablauf, bestehend aus mindestens 14 Stützpunkten, welcher mit den Verfahrenarten „Linear“ und „PTP“ erstellt werden sollte.

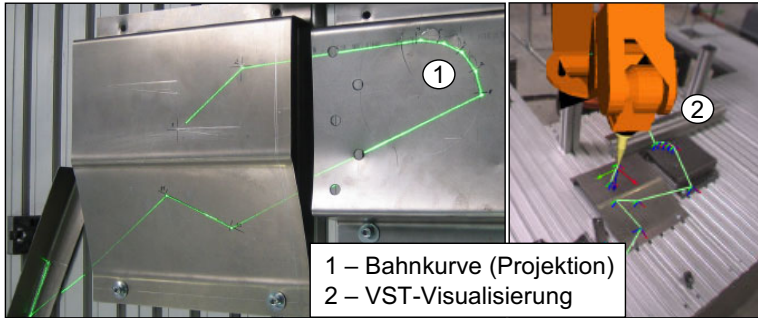


Abbildung 59 Versuchsaufgabe (links) und VST-Visualisierung (rechts)

Die 6 Testpersonen, welche alle über vergleichbare Grundkenntnisse im Umgang mit Industrierobotern verfügten, lösten die Programmieraufgabe nach kurzer Einweisung mit dem AR-System in durchschnittlich weniger als 20 % der Zeit, welche sie für die Teach-In-Programmierung benötigten. Die jeweiligen Einzelzeiten sind in Abbildung 60 vergleichend gegenübergestellt.

Die zeitlichen Durchschnittswerte sind in Anbetracht der geringen Probandenzahl und der einfachen Aufgabe nicht als repräsentativ anzusehen. Eine aussagekräftige, übertragbare Quantifizierung ist ohnehin – selbst mit ausgedehnten Versuchsreihen – kaum darstellbar, da die Zeiteinsparung in hohem Maße von der Programmieraufgabe, dem Prozess und der Werkstückgeometrie abhängt. Indessen zeigt der Versuch, dass im Einzelfall eine drastische Reduzierung der Programmierzeit von über 80 % erreicht werden kann und belegt zudem, dass selbst Erstnutzer mit dem AR-System umgehend Programme erstellen können.

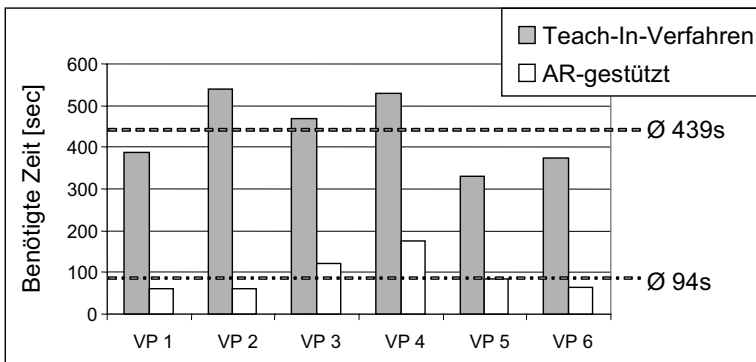


Abbildung 60 Programmierzeiten der Versuchspersonen

### 6.4.2 Programmierung einer robotergestützten Laserhärteanlage

Nach dem erfolgreichen Abschluss der ersten Laborversuche wurde der Prototyp weiterentwickelt und in industriellem Umfeld erprobt. Dies erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma BMW AG in München. Im Bereich Prototypenteilefertigung wurde dort für die Herstellung und Aufbereitung von Umformwerkzeugen der Prozess des Laserhärtens eingesetzt. Die Durchführung erfolgte mit Hilfe eines Industrierobotersystems der Firma Motoman Robotec GmbH. Ein Knickarm-Roboter des Typs SK16 wurde dabei, wie in Abbildung 61 dargestellt, durch ein zweiachsiges Portal über einem Bearbeitungstisch positioniert. Der Roboter führte eine Laseroptik in einem festen Fokusabstand entlang der gewünschten Härtespur über das Bauteil.

Da nicht immer vollständige und korrekte Modelldaten der Werkstücke vorlagen und sich damit die Registrierung und Anpassung offline erstellter Programme als sehr aufwändig darstellte, wurde das System durchgehend online mit Hilfe des Teach-In-Verfahrens programmiert. Dies war aufgrund des nicht sichtbaren Werkzeuges „Laserstrahl“ nur mit einer Hilfskonstruktion aus zwei Pilotlasern zu bewältigen und gestaltete sich sehr mühevoll. Das Laserhärten kann in diesem Rahmen stellvertretend für eine Klasse von bahnorientierten Prozessen gesehen werden, die aus Anwendersicht extrem schwierig zu programmieren sind, da der Wirkpunkt des Prozesses in größerer Entfernung von dem Werkzeugflansch des Roboters lokalisiert und nicht unmittelbar sichtbar ist (REICHLÉ 2007).

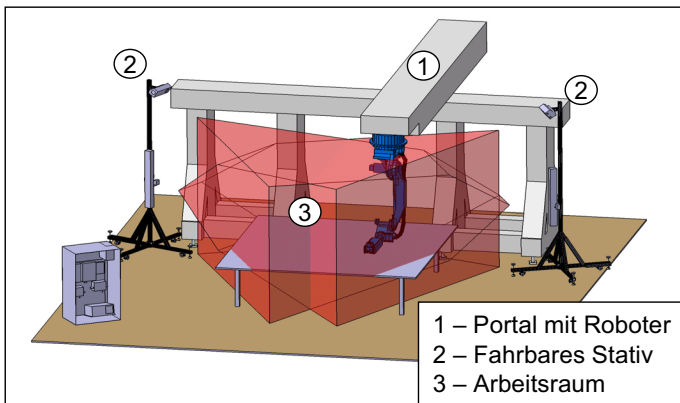


Abbildung 61 Robotersystem für das Laserhärten von Umformwerkzeugen

Für die Erprobung wurde eine Systemkonfiguration bestehend aus zwei mobilen Stativen realisiert, so dass damit der in Abbildung 61 dargestellte Arbeitsraum abgedeckt werden konnte.

Es wurde ein Musterbauteil entworfen, welches die am häufigsten auftretenden Härtefiguren exemplarisch enthielt. Dieses wurde so auf dem Arbeitstisch fixiert, dass die Laseroptik von allen Seiten durch den Roboter herangeführt werden konnte (siehe Abbildung 62, links). Die Aufgabe der Testpersonen bestand darin, die Roboterbewegungen für die auf dem Probebauteil angebrachten Figuren mit Hilfe des 3D-Eingabestiftes und der Laserprojektion zu erstellen. Das korrespondierende Bewegungsverhalten der Roboterkinematik wurde als VST-Visualisierung (siehe Abbildung 62, rechts) auf einem Tablet-PC angezeigt.

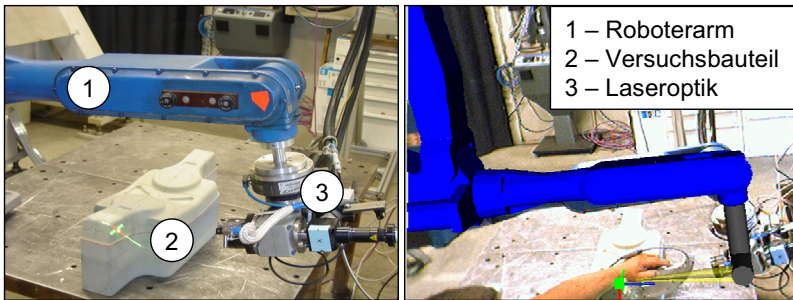


Abbildung 62 Arbeitsplatz und zugehörige VST-Visualisierung

Auf dem Probebauteil wurden beispielhafte Härtespuren von unterschiedlicher geometrischer Komplexität (zwei- und dreidimensional) und verschiedenen Umfangs angezeichnet. Die Abbildung 63 zeigt zwei derartige Figuren zusammen mit den jeweils resultierenden Laserprojektionen.

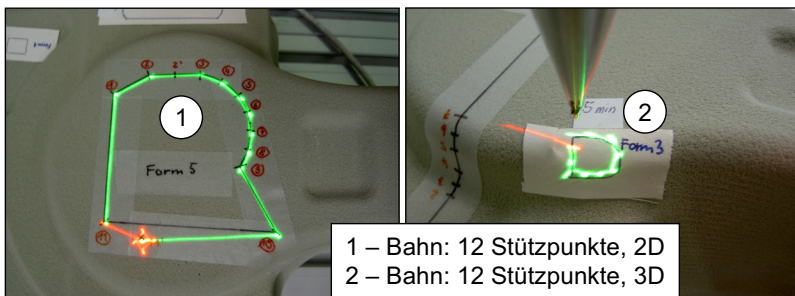


Abbildung 63 Zu programmierende exemplarische Härtespuren

Insgesamt wurden 12 verschiedene solcher Musteraufgaben von zwei Testpersonen – einem erfahrenen RC-Programmierer der BMW AG und einer Studentin ohne Programmierkenntnisse – gelöst. Dabei wurde wiederum einerseits mit dem AR-System, andererseits mit dem konventionellen Teach-In-Verfahren als Referenz gearbeitet. Bei diesen Tests konnten zahlreiche Erkenntnisse hinsichtlich der Einsetzbarkeit des Systems und der notwendigen, weiteren Entwicklungsschritte gewonnen werden:

- Die Programmierung der Versuchsaufgaben mit dem AR-System konnte von den Versuchspersonen gut bewältigt werden. Die grundsätzliche Einsetzbarkeit des Systems in einem industriellen Umfeld ist gegeben.
- Das AR-System erwies sich als äußerst effektiv in Bezug auf eine einfache und exakte Vorgabe der zu bearbeitenden Fertigungsaufgaben. Auch eine Person ohne Vorkenntnisse der Roboterprogrammierung konnte damit ähnlich schnell programmieren wie ein erfahrener Programmierer.
- Insgesamt konnten jedoch die erhofften Zeiteinsparpotenziale nicht realisiert werden, da die Benutzer sehr lange mit der detaillierten Vorgabe der Roboterbewegung beschäftigt waren. Vor allem die Vermeidung von Kollisionen und die Umgehung von Achswinkelbegrenzungen erforderten zeitaufwändige Nachbearbeitungen der Programme.
- Zusätzlicher Entwicklungsaufwand ist zudem zur Steigerung der Gesamtgenauigkeit des Systems notwendig. Das Trackingsystem und der Laserprojektor können zwar mit einer maximalen Abweichung von weniger als 0,5 mm aufeinander kalibriert werden. Durch das nicht absolut vermessene Robotersystem mit Portalanbringung traten jedoch Abweichungen bis zu 1,5 mm auf. Folglich muss entweder auf absolut vermessene Roboter zurückgegriffen werden oder es muss ein Modell der Ungenauigkeiten der Kinematik in die Kalibrierung des AR-Systems einbezogen werden.

Das AR-System konnte demzufolge erfolgreich im Kontext einer industriellen Roboterumgebung eingesetzt werden. Der Hauptnutzen einer einfachen und intuitiven Definition von Fertigungsaufgaben konnte ebenfalls nachgewiesen werden. Die Beobachtungen der Versuche legten jedoch nahe, dass eine Ergänzung um eine Bahnplanungskomponente die Effizienz des Gesamtsystems deutlich steigern würde. Damit könnte die detaillierte Definition und die Nachbearbeitung der Roboterbewegung nahezu vollständig entfallen, so dass der Benutzer sich

ausschließlich auf die Definition der Fertigungsaufgabe konzentriert, während die detaillierte Bewegungsplanung automatisiert abläuft.

### 6.4.3 Programmierung einer Remote-Laserstrahlschweißanlage

Ausgehend von den Erfahrungen des vorangegangenen Versuchs wurde eine prototypische Verbindung des AR-Systems mit einem von ZÄH & MUNZERT (2008) entwickelten, automatisierten Bahnplanungssystem für das Remote-Laserstrahlschweißen (RLS) realisiert. Neuartige Laserquellen wie der Scheiben- oder Faserlaser ermöglichen dieses Verfahren, bei dem der Laserstrahl mit einem Arbeitsabstand von bis zu einem Meter und mehr fokussiert wird. Die Strahlablenkung erfolgt durch einen Manipulator, im vorliegenden Fall einen Industrieroboter, welcher um optische Strahlablenkungsmechanismen, wie Zoom- oder Scanneroptiken, erweitert ist, so dass das Gesamtsystem mehr als sechs Freiheitsgrade aufweist. Die Abbildung 64 verdeutlicht das Prinzip des robotergestützten RLS.

Die Programmierung einer solchen Applikation stellt eine komplexe Optimierungsaufgabe dar: Der Ort und die Form der Naht sind dabei ebenso wie die Schweißgeschwindigkeit und die Laserleistung als feste Parameter vorgegeben. Daneben existieren zahlreiche variable Parameter des Lösungsraumes, innerhalb dessen die geforderte Qualität der Verschweißung erreichbar ist. Dazu zählen beispielsweise die Einstrahlwinkel, die Schweißreihenfolge oder die Orientierung des Strahls bei punktsymmetrischen Fokussen. Diese müssen durch entsprechende Versuche oder aus Simulationen von Prozessexperten ermittelt werden. Für das Roboterprogramm stehen somit unendlich viele Lösungsmöglichkeiten zur Auswahl, unter denen eine optimale Lösung auszuwählen ist.

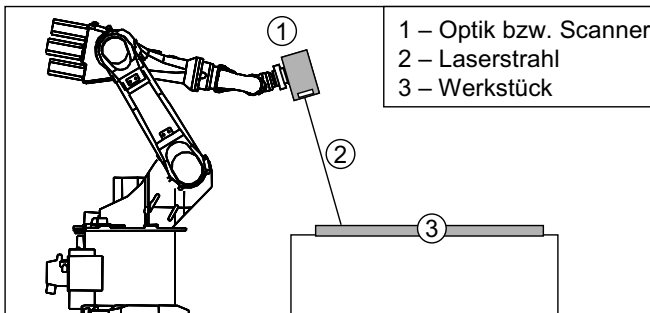


Abbildung 64 Grundprinzip des RLS-Verfahrens.

Im Hinblick auf diese Problematik wurde von ZÄH & MUNZERT (2008) ein aufgabenorientiertes System zur Bahnplanung und Optimierung von robotergestützten RLS-Prozessen konzipiert und umgesetzt. Dieses generiert ausgehend von einer maschinenneutralen Beschreibung der Schweißaufgaben eine optimierte Folge von Roboteraktionen. Mit diesem Bahnoptimierungssystem, welches selbst nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, wurde das AR-System prototypisch verbunden. Die Beschreibung der Schweißaufgabe – das heißt der Nahtgeometrie, der Prozessparameter und der Prozessfreiheitsgrade – konnte so mit Hilfe des AR-Systems am realen Bauteil erfolgen, während die Berechnung und die Optimierung von dem Bahnplanungssystem automatisiert durchgeführt wurden.

In den Versuchen wurde für einen Roboter mit Zoomoptik an drei verschiedenen Bauteilen zunächst jeweils eine konventionelle Programmierung mittels Teach-In von einem Experten der Firma Kuka Systems durchgeführt. Anschließend wurden dieselben Aufgaben mit Hilfe des Verbundsystems aus AR-Interaktion und automatisierter Bahnoptimierung programmiert. Dabei wurden jeweils die Programmierzeiten und die Ergebnisqualität dokumentiert. Der in Tabelle 9 dargestellte Vergleich ergibt folgende Aussagen (REINHART et al. 2008):

- Die zur Programmierung benötigte Zeit konnte durch die AR-gestützte Interaktion und die Bahnberechnung im schlechtesten Fall um 29 %, im besten Fall um 69 % reduziert werden.
- Die von dem Bahnoptimierungssystem berechneten Bewegungen weisen gegenüber den manuell erstellten Lösungen Taktzeitverkürzungen zwischen 28 % und 38 % auf.

*Tabelle 9 Eckdaten der durchgeführten Programmerversuche*

Kriterium	Ebenes Blech (2d)		Fahrzeugteil 1 (3d)		Fahrzeugteil 2 (3d)	
	T	PS	T	PS	T	PS
Anzahl der Nähte [-]	30		75		117	
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	6,0		7,0		7,8	
Programmierungsmethode	T	PS	T	PS	T	PS
Programmierzeit [min]	45	-	60	-	90	-
Zeit zur Aufgabendefinition [min]	-	6	-	12	-	20
Zeit zur Bahnberechnung [min]	-	8	-	20	-	35
Gesamtprogrammierzeit [min]	45	14	60	22	90	55
Gesamtprogrammierzeit [%]	100	31	100	37	100	61
Lasernutzungsgrad [%]	32	53	35	56	35	50,6
Taktzeit [s]	18,3	11,5	40,0	24,9	59,0	42,5
Taktzeit[%]	100	63	100	62	100	72

T...Teach-In-Verfahren PS...Programmerstellung mit AR-System und automatisierter Bahnplanung

---



## 7 Technische und wirtschaftliche Bewertung

Die zuvor beschriebene Umsetzung und die exemplarischen Anwendungen bilden die Grundlage für eine technische und wirtschaftliche Bewertung der in dieser Arbeit entworfenen Konzepte und Verfahren. Ausgehend von den bei der Erprobung gesammelten Erkenntnissen wird der Ansatz der interaktiven, AR-gestützten Roboterprogrammierung und der projektionsbasierten Visualisierung zunächst in Abschnitt 7.1 hinsichtlich technischer Kriterien bewertet. In Abschnitt 7.2 wird schließlich eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Dabei erfolgt eine Gegenüberstellung der Nutzeneffekte und der erforderlichen Aufwände.

### 7.1 Technische Bewertung

Mit dem vorgestellten Ansatz werden im Vergleich zu den bisher verfügbaren Methoden der Roboterprogrammierung folgende Vorteile erzielt:

- Das zentrale Potenzial der AR-Technologie – ein stufenloser Übergang und ein effizienter Abgleich zwischen virtuellen Modellen und den realen Gegebenheiten – wird durch einen praxistauglichen, industriell einsetzbaren Systementwurf erschlossen. Dadurch wird eine intuitive 3D-Interaktion mit virtuellen Daten am realen Bauteil möglich.
- Die AR-gestützte Interaktion ermöglicht eine schnelle und effektive Bearbeitung von Programmdaten. Räumliche Bezüge zwischen Trajektorien und der Umgebung werden unmittelbar verdeutlicht und können aufwandsarm editiert und angepasst werden. Je nach Ausprägung der Aufgabe ist eine Zeiteinsparung von bis zu 80 %, im Mittel von 30 - 40 %, gegenüber der Teach-In-Programmierung zu erwarten.
- Eine Programmierung ist mit diesem Ansatz grundsätzlich ohne Modelldaten durchführbar. Reale Gegebenheiten können schnell und zielgerichtet im realen Umfeld modelliert werden können. Vorhandene Modell- und Programmdaten werden vor dem realen Umfeld verifiziert und angepasst, sowie im Sinne einer modellgestützten Programmierung in den Programmerstellungsprozess einbezogen. Dadurch entfällt ein maßgeblicher Teil des Aufwandes zur Erstellung und Anpassung von virtuellen Modellen und die Qualität der Modelldaten steigt an.

- Ein weiterer Vorteil des Ansatzes besteht darin, dass die Programmierung auch abseits des realen Robotersystems durchführbar ist, da lediglich die realen Bauteile und gegebenenfalls die Spannvorrichtungen benötigt werden. In Verbindung mit einfachen Wechseltischvorrichtungen ist die Programmierung offline, parallel zum Betrieb der Anlage möglich.
- Durch die modulare Konzeption und eine schnelle Kalibrierung mit einer Dauer von wenigen Minuten kann das System mobil an mehreren Roboterzellen eingesetzt werden. So wird eine maximale Ausnutzung der Investition erzielt.
- Die visuelle Unterstützung und die intuitiven 3D-Eingabeverfahren eröffnen eine einfach erlernbare Form der Programmierung. Auch Bediener ohne Kenntnisse der Roboterprogrammierung können damit nach einer kurzen Einweisungsphase von weniger als einer Stunde eigenständig Programme erstellen. Somit können beispielsweise Werker dazu befähigt werden, selbständig Robotersysteme zu programmieren.

Den angeführten Nutzeneffekten stehen die folgenden Aufwände bzw. Einschränkungen gegenüber:

- Es ist insgesamt ein hoher gerätetechnischer Aufwand erforderlich. Insbesondere die konstruktive Integration von Projektoren, Trackingsystemen und Rechneinheiten sowie die robuste und präzise Kalibrierung des entstehenden Gesamtsystems sind weiter voranzutreiben.
- Der vorliegende Ansatz ist zum einen durch die Zugänglichkeit der Roboterzelle, zum anderen durch die Reichweite des menschlichen Bedieners beschränkt. Sowohl Projektoren als auch Trackingsysteme erfordern eine ununterbrochene Sichtlinie zu allen relevanten Punkten des Arbeitsraumes. Ebenso müssen alle diese Orte für den Bediener mit dem Eingabestift erreichbar sein.
- Die Projektionsanzeige ist oberflächengebunden. Die Vorteile des Systems kommen daher in der Hauptsache bei bahnorientierten, werkstückbezogenen Prozessen zum Tragen. Darunter fallen beispielsweise Schweißen, Schneiden, Kleben und Härten. Demgegenüber weist das System für die Programmierung von Handhabungsvorgängen, bei denen vorwiegend frei im Raum verlaufende Trajektorien zu definieren sind, lediglich einen geringen Nutzen auf.

## 7.2 Wirtschaftliche Bewertung

Um eine quantitative Einschätzung des wirtschaftlichen Nutzenpotenzials zu erhalten, wird nachfolgend eine beispielhafte Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt. Dazu werden die Kosten- und Nutzeneffekte wie folgt angenommen:

- Die Anschaffungskosten für das AR-System belaufen sich auf 34.000 EUR. Die Nutzungsdauer des Systems wird mit fünf Jahren bei einem Zinssatz von 9 % und bei jährlichen Kosten für Wartung und Schulung in Höhe von 2.000 EUR angesetzt.
- Ein RC-Programmierer kann mit diesem System in dem vorliegenden Fall um durchschnittlich 35 % schneller als mit konventionellen Methoden arbeiten. Der Aufwand einer Stunde konventioneller Programmierung kann somit in nur 0,65 h = 39 min bewältigt werden bzw. entspricht eine Stunde AR-gestützter Programmierung konventionellem Programmieraufwand von  $1 / 0,65 \text{ h} = 1,54 \text{ h}$ .
- Bei einer jährlichen Nutzung des AR-Systems im Umfang von 1000 h können somit 540 h Programmieraufwand eingespart werden. Verrechnet mit den Arbeitskosten eines Roboterprogrammierers in Höhe von 40 EUR/h ergibt sich eine jährliche Einsparung von 21.600 EUR.

Die Tabelle 10 stellt die wirtschaftliche Situation für dieses exemplarische Beispiel dar. Jährlichen Kosten in Höhe von 10.330 EUR stehen Nutzeneffekte von insgesamt 21.600 EUR pro Kalenderjahr gegenüber. Damit wird in diesem exemplarischen Fall eine Amortisationsdauer von unter zwei Jahren erreicht.

Wie aus den vorangegangenen Versuchen ersichtlich wurde, variiert die erreichbare Effizienzsteigerung je nach Anwendung. Zudem ist der Gesamtnutzen von der jährlichen Einsatzdauer des AR-Systems abhängig. Eine allgemeinere Einschätzung der Wirtschaftlichkeit ergibt sich daher aus der Betrachtung des Zusammenhangs der Effizienzsteigerung  $e$  und der jährlichen Nutzungsdauer  $N$  des Systems. Die Abbildung 65 stellt hierzu diejenigen Punkte als Kurve dar, bei denen die Effizienzsteigerung und die Nutzungsdauer jeweils so ausgeprägt sind, dass die jährlichen Nutzeneffekte  $S$  exakt die Kosten des Systems  $F$  aufwiegen (vgl. Punkte  $x_2$  und  $x_4$ ). Für Punkte unterhalb dieser Kurve gestaltet sich die Nutzung des Systems nicht wirtschaftlich (vgl. Punkt  $x_1$ ), während Punkte oberhalb dieser Kurve wirtschaftliche Anwendungen des Systems darstellen (vgl. Punkt  $x_3$ , dieser repräsentiert zugleich das Beispiel aus Tabelle 10).

Tabelle 10 Beispielhafte Wirtschaftlichkeitsrechnung

Investitionskosten für ein AR-gestütztes Programmiersystem		
Trackingsystem mit Eingabegerät		13.000 €
Anzeigegeräte (1 Laserprojektor + 1 Videoprojektor)		9.000 €
Zentrale Rechereinheit		2.000 €
Peripherie und Tablet-PC		2.000 €
AR-Software		8.000 €
Gesamtinvest	I	34.000 €

Jährliche Kosten		
Investitionskosten	I	34.000 €
Nutzungsdauer	T	5 a
Kalkulatorische Abschreibung	$A = I / T$	6.800 €/a
Zinssatz	Z	9 %
Kalkulatorischer Zinssatz	$K = Z \times I / 2$	1.530 €/a
Wartungskosten	W	2.000 €/a
Gesamtkosten pro Jahr	$F = A + K + W$	10.330 €/a

Jährliche Nutzeneffekte		
Personalkosten RC-Programmierer	P	40 €/h
Prozentuale Zeiteinsparung	e	35 %
Zeiteinsparfaktor bei Einsatz des AR-Systems	$E = 1 / (1 - e)$	0,54 h/h
Nutzungsdauer des AR-Systems	N	1.000 h/a
Kostenvorteil durch Zeiteinsparungen pro Jahr	$S = P \times E \times N$	21.600 €/a

Amortisation		
Amortisationszeit (statisch)	$D = I / (S - F + A)$	1,88 a

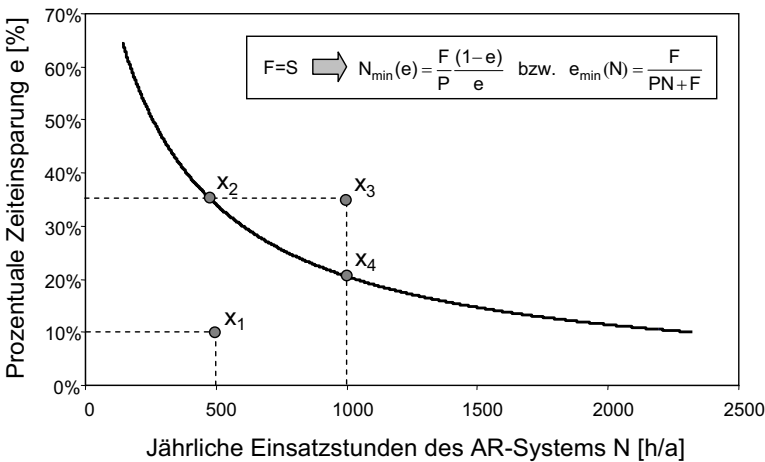


Abbildung 65 Wirtschaftlichkeitsgrenze bei der Nutzung des AR-Systems

Neben den bisher quantifizierten Effekten weist der Ansatz weitere ökonomische Potenziale auf. Mit dem AR-System kann auch ohne aufwendige Offline-Simulation produktionsbegleitend programmiert werden. Zum einen werden dadurch die Rüstzeiten minimiert und die Produktivität der Maschine gesteigert. Zum anderen entfallen Aufwände für den Abgleich von Modelldaten mit der Realität. Von zentraler Bedeutung ist zudem die Perspektive, Personen ohne Programmierkenntnisse zur eigenständigen Programmierung zu befähigen.

Bisher haben die mit der Arbeitsvorbereitung und Programmierung der Roboter verbundenen Overheadkosten für RC-Spezialisten dazu geführt, dass gerade von kleinen Unternehmen zumeist erst ab einem Einsatzpotenzial von drei bis fünf Maschinen auch tatsächlich Roboter eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.2.2 bzw. COLESTOCK 2004, S. 26). Diese Grenze wird durch den vorliegenden Ansatz weiter herabgesetzt, da eine eigenständige Umprogrammierung durch Werker auch ohne betriebseigene RC-Programmierer oder Simulationsexperten in greifbare Nähe rückt. Überdies kann das System Prozessexperten im Bereich der Planung und des Prototypenbaus bei der RC-Programmierung unterstützen, so dass Studien und Prozessabsicherungen in kürzerer Zeit realisiert werden können.

---

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Einer Ausdehnung der robotergestützten Automatisierung auf die flexible Fertigung mittlerer und kleiner Losgrößen steht heute ein hoher Aufwand für die Roboterprogrammierung entgegen. Derartige neue Anwendungsbereiche können nur dann erschlossen werden, wenn es gelingt, die Bedienung und die Programmierung von Robotern signifikant einfacher und effizienter zu gestalten. Hierzu bietet die Augmented-Reality-Technologie ein großes Potenzial: Sie reichert die visuelle Wahrnehmung des Menschen mit virtuellen räumlichen Informationen an und ermöglicht eine anschauliche Visualisierung und Interaktion mit 3D-Daten in der realen Umgebung. Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, dieses Potenzial für eine Verbesserung der Programmierung von Industrierobotern zu erschließen und in der betrieblichen Praxis nutzbar zu machen.

Die bisherigen Ansätze zur Anwendung der AR-Technologie in der Robotik konzentrierten sich auf den Einsatz von Head-Mounted-Displays. Diese Visualisierungssysteme weisen schwerwiegende technische und ergonomische Einschränkungen auf, welche einen Einsatz in der industriellen Praxis ausschließen. In dieser Arbeit wurde daher ein alternativer Visualisierungsansatz verfolgt, der Projektoren als interaktive 3D-Anzeigegegeräte nutzt. Die projektionsgestützte erweiterte Realität integriert die Anzeigegegeräte in die Umgebung, so dass störende körpergebundene Apparaturen entfallen. Dies eröffnet die Möglichkeit, AR-gestützte Benutzerschnittstellen zu schaffen, welche den hohen Anforderungen der Programmierung von Industrierobotern – insbesondere im Hinblick auf die zentralen Kriterien Präzision, Robustheit und Ergonomie – gerecht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein integriertes Konzept entwickelt, welches ein methodisches Vorgehen, angepasste Verfahren der Interaktion und ein entsprechendes System beinhaltet. Ausgehend von einer Anforderungsanalyse wurde zunächst ein durchgängiges Vorgehen für eine AR-gestützte Programmierung und Simulation erarbeitet. Darauf aufbauend wurden Teilkonzepte für die projektionsbasierte Visualisierung, die automatisierte Erfassung von Geometrieinformationen und die interaktive 3D-Eingabe entwickelt. In einer Synthese wurden diese Teilkonzepte zu einem durchgängigen Verfahrens- und Systemkonzept vereinigt, welches auch Gegenstand eines erteilten Patents ist (VOGL 2007).

Die entwickelten Interaktionsverfahren erlauben es, Trajektorien und Modelldaten für die Roboterprogrammierung in effizienter Weise in der realen Umgebung zu bearbeiten. Die geometrischen Eigenschaften vorhandener Objekte, wie Bau-

teile oder Vorrichtungen, werden dabei unmittelbar in einen modellgestützten Programmierprozess einbezogen. Der Benutzer wird zudem durch umfangreiche Hilfsmittel für die Erstellung, die Bearbeitung und den Realitätsabgleich von Modelldaten unterstützt. Damit werden Interaktionsformen, wie sie sonst nur in rein virtuellen Simulationswerkzeugen möglich sind, in der realen Produktionsumgebung nutzbar.

Das Konzept wurde prototypisch in einem modular konfigurierbaren, mobilen Hardwaresystem umgesetzt. Dabei wurde für alle Teilverfahren ein Funktionsnachweis erbracht. Eine Erprobung in Laborversuchen bestätigte ein hohes Potenzial zur Beschleunigung und Vereinfachung der RC-Programmierung. Die Anwendbarkeit in industriellem Umfeld wurde in einem Feldversuch zur Programmierung einer robotergestützten Laserhärteanlage nachgewiesen. Darüber hinaus wurde das System mehrfach erfolgreich bei Industrieunternehmen zur Programmierung von Laserschweißanlagen eingesetzt. Damit wurde erstmalig eine produktive Nutzung der AR-Technologie in der industriellen Praxis der Roboterprogrammierung realisiert.

Die technisch-wirtschaftliche Betrachtung zeigt, dass der Ansatz vor allem für bahnorientierte, bauteilbezogene Anwendungen eine hohe wirtschaftliche Relevanz aufweist. Mit Hilfe des entwickelten, interaktiven Programmiersystems sind hohe Zeiteinsparungen gegenüber konventionellen Methoden, wie Teach-In, realisierbar. Zudem entfällt im Vergleich zu simulationsgestützten Methoden der Aufwand für Modellerstellung und –anpassung, während die Programmierung trotzdem fernab der realen Anlage an Bauteilmustern durchgeführt werden kann. Durch die einfache und intuitive Bedienung können zukünftig auch Personen ohne RC-Programmierkenntnisse – etwa Werker, aber auch Prozessexperten – dazu befähigt werden, Robotersysteme eigenständig zu programmieren.

Die Ergebnisse der Arbeit belegen stichhaltig, dass interaktive Projektionssysteme als Benutzerschnittstelle für die intuitive und präzise Manipulation von umgebungsbezogenen 3D-Informationen ein hohes Nutzenpotenzial aufweisen. Der Entwurf und die Ausgestaltung sind im Rahmen der Arbeit auf Anwendungen der Industrierobotik ausgerichtet. Der Ansatz selbst weist jedoch eine hohe Übertragbarkeit auf. So kann diese Form der Mensch-Computer-Interaktion künftig auch in anderen Domänen, welche eine präzise und robuste Synthese real vorhandener Geometrie mit dreidimensionalen Modelldaten erfordern, zur Anwendung kommen. Hierbei sind neben der Servicerobotik die Produktentwicklung,



die Produktionsplanung, die Qualitätssicherung und die Installationsplanung zu nennen.

Die Entwicklung der Projektionsgeräte schreitet weiter voran und wird durch den Einsatz in Konsumgütern, wie Notebooks und Mobiltelefonen, zusätzlichen Vortrieb erhalten. Die Verfügbarkeit günstiger, miniaturisierter und leistungsfähiger Projektoren erscheint absehbar. Ebenso führt eine fortschreitende Entwicklung auf dem Gebiet der Bildverarbeitung und -erkennung einerseits zu neuen, robusten Methoden der Benutzereingabe, andererseits zu verbesserten Sensorsystemen, welche geometrische Randbedingungen präzise erfassen und durch eine Führung des Roboters den Programmieraufwand reduzieren.

Während in dieser Arbeit also noch ein vergleichsweise hoher gerätetechnischer Aufwand für eine präzise und robuste Visualisierung und Interaktion erforderlich war, erscheint es zukünftig möglich, diesen auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Ein Ziel der Entwicklung kann ein günstiges, kompaktes und leistungsfähiges Projektor-Kamera-System sein, welches am Roboter befestigt ist und sowohl die Führung des Roboters im Prozess als auch die Interaktion mit dem Bediener sicherstellt. Zu diesem Zweck ist insbesondere die Synthese von unscharfer, gestenbasierter Benutzerinteraktion mit technischer Sensorik zur präzisen Geometrierfassung und mit Verfahren der Bilderkennung voranzutreiben. Ebenso sollte das Zusammenwirken der interaktiven Bedienerchnittstelle mit automatisierten Bahnplanungssystemen weiter ausgebaut werden.

---

## 9 Literaturverzeichnis

ABB 2005

ABB Group: RobotStudio 5

<<http://www.robotstudio.com/rs5/kampanj.html>> - 13.07.2007.

ALEOTTI et al. 2004

Aleotti, J.; Casellia, S.; Reggiana, M.: Leveraging on a virtual environment for robot programming by demonstration. Robotics and Autonomous Systems 47 (2004) 2-3, S. 153-161.

ALT 2003

Alt, T.: Augmented Reality in der Produktion. Diss. Universität Magdeburg (2002). München: Utz 2003. ISBN: 3-8316-0226-3.

ARMBRUSTER et al. 2006a

Armbruster, H.; Kirner, E.; Kinkel, S.: Neue Kundengruppen für Industrieroboter. Mitteilungen aus der Produktionserhebung 38, Fraunhofer ISI, Karlsruhe (2006a).

ARMBRUSTER et al. 2006b

Armbruster, H.; Kirner, E.; Kinkel, S.: Neue Nutzungspotentiale für Industrieroboter: Ergebnisse einer Betriebsbefragung. wt Werkstattstechnik online 96 (2006b) 9, S. 631-636.

ART 2007

ART GmbH: Stereo Camera System smARTtrack1 <<http://www.ar-tracking.de/smARTtrack.49.0.html>> - 12.07.2008.

ASCENSION 2007

Ascension Technology Corporation: Flock of Birds

<<http://www.ascension-tech.com/products/flockofbirds.php>> - 18.05.2007.

ASSENMACHER et al. 2006

Assenmacher, I.; Röttgen, C.; Stewering, J.; Kuhlen, T.: Virtual Reality zur interaktiven Konfiguration von Doppelschneckenextrudern. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Tagungsband zum 5. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn,

31.05.2006. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2006, S. 103-116. ISBN: 978-3-939350-07-1.

### AZUMA 1993

Azuma, R.: Tracking requirements for augmented reality. Communications of the ACM: Special issue on computer augmented environments: back to the real world 36 (1993) 7, S. 50-51.

### AZUMA 1997

Azuma, R.: A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6 (1997) 4, S. 355-385.

### AZUMA et al. 2001

Azuma, R.; Baillot, Y.; Behringer, R.; Feiner, S.; Julier, S.; MacIntyre, B.: Recent Advances in Augmented Reality. IEEE Computer Graphics and Applications 21 (2001) 6, S. 34-47.

### AZUMA 2004

Azuma, R.: Overview of augmented reality. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2004) Course Notes. Los Angeles, CA / USA, 10.08.-12.08.2004.

### BAGNALL 2002

Bagnall, B.: Core LEGO Mindstorms Programming. Upper Saddle River, NJ / USA: Prentice Hall PTR 2002. ISBN: 0-13-009364-5.

### BAUER et al. 2006

Bauer, M.; Schlegel, M.; Pustka, D.; Navab, N.; Klinker, G.: Predicting and Estimating the Accuracy of n-ocular Optical Tracking Systems. 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2006). Santa Barbara, CA / USA, 22.10.-25.10.2006, S. 43 - 51.

### BDI 2005

BDI (Hrsg.): Intelligenter produzieren - 32 Thesen zur Forschung für die Zukunft der industriellen Produktion. Berlin: 2005.

### BERGER 2006

Berger, R.: Deutschland im Wandel - Staat und Unternehmen im globalen Wettbewerb. In: Hoffmann, H. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium Tagungsband. München: Utz 2006, S. 51-53.

### BERNHARDT et al. 2000

Bernhardt, R.; Schreck, G.; Willnow, C.: The Virtual Robot Controller Interface (VRC). Proceedings of the 32nd International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA 2000). Dublin / Irland, 25.09.-27.09.2000, S. 89-93.

### BEYER 2005

Beyer, L.: Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern, insbesondere mit Parallelkinematik. Diss. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg (2005). Aachen: Shaker 2005. ISBN: 3-8322-3681-3. (Forschungsberichte aus dem Laboratorium Fertigungstechnik 1).

### BIGGS & MACDONALD 2003

Biggs, G.; MacDonald, B.: A survey of robot programming systems. In: Roberts, J. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2003 Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2003). Brisbane / Australien, 01.12.-03.12.2003. ARAA 2003. ISBN: 0-9587583-5-2.

### BILLINGHURST et al. 2000

Billinghurst, M.; Imamoto, K.; Kato, H.; Tachibana, K.: Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment. Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000). München, 05.10-06.10.2000, S. 111-119.

### BIMBER 2002

Bimber, O.: Interactive Rendering for Projection-Based Augmented Reality Displays. Diss. TU Darmstadt, Fachbereich Informatik (2002).

### BIMBER et al. 2005a

Bimber, O.; Emmerling, A.; Klemmerer, T.: Embedded Entertainment with Smart Projectors. IEEE Computer 38 (2005a) 1, S. 48-55.

BIMBER et al. 2005b

Bimber, O.; Wetzstein, G.; Emmerling, A.; Nitschke, C.: Enabling View-Dependent Stereoscopic Projection in Real Environments. The 4th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2005). Wien, 05.10-08.10.2005, S. 14-23.

BIMBER & EMMERLING 2006

Bimber, O.; Emmerling, A.: Multifocal Projection: A Multiprojector Technique for Increasing Focal Depth. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 12 (2006) 4, S. 658-667.

BIMBER & RASKAR 2006

Bimber, O.; Raskar, R.: Spatial Augmented Reality Merging Real and Virtual Worlds. Wellesley, MA / USA: A K Peters 2006. ISBN: 978-1-56881-230-4.

BIOCCA & ROLLAND 1998

Biocca, F. A.; Rolland, J. P.: Virtual Eyes Can Rearrange Your Body: Adaptation to Visual Displacement in See-Through, Head-Mounted Displays. Presence - Teleoperators and Virtual Environments 7 (1998) 3, S. 262-277.

BISCHOFF et al. 2002

Bischoff, R.; Kazi, A.; Seyfarth, M.: The MORPHA style guide for icon-based programming. Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN 2002). Berlin, 25.09.-27.09.2002, S. 482-487.

BISCHOFF & KAZI 2004a

Bischoff, R.; Kazi, A.: Einsatzmöglichkeiten von Augmented Reality in der Industrierobotik. In: Tagungsband zur Fachtagung Robotik 2004. München, 17.06 - 18.06.2004. München: VDI 2004a. ISBN: 3-18-091841-1. (VDI-Berichte 1841).

BISCHOFF & KAZI 2004b

Bischoff, R.; Kazi, A.: Perspectives on Augmented Reality Based Human-Robot Interaction with Industrial Robots. Proceedings of 2004 IEEE/RSJ

International Conference on Intelligent Robotics and Systems (IROS 2004). Sendai / Japan, 28.09-02.10.2004, S. 3226-3231.

BISCHOFF & KURTH 2006

Bischoff, R.; Kurth, J.: Concepts, Tools and Devices for Facilitating Human-Robot Interaction with Industrial Robots through Augmented Reality. 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2006), Workshop: Industrial Augmented Reality. Santa Barbara, CA / USA, 22.10.-25.10.2006. <<http://www.ismar06.org/data/2a-KUKA.pdf>> - 06.01.2009.

BISHOP et al. 2001

Bishop, G.; Welch, G.; Allen, G. D.: Course 11 - Tracking: Beyond 15 minutes of thought. Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2001). Los Angeles, CA / USA, 12.08.-17.08.2001.

BORKOWSKI et al. 2004

Borkowski, S.; Sabry, S.; Crowley, J. L.: Projector-camera pair: an universal IO device for Human Machine Interaction. The 8th Polish National Robotics Conference (KKR VIII). Zdrój / Polen, 23.09.-25.09.2004.

BOWMAN & HODGES 1997

Bowman, D. A.; Hodges, L.: An Evaluation of Techniques for Grabbing and Manipulating Remote Objects in Immersive Virtual Environments. Proceedings of the 1997 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D '97). Providence, RI / United States, 27.04.-30.04.1997, S. 35-38.

BOWMAN et al. 1998

Bowman, D. A.; Kruijff, E.; La Viola, J. J.; Poupyrev, I.: The Virtual Venue: User-Computer Interaction in Information-Rich Virtual Environments. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 7 (1998) 5, S. 478-493.

BOWMAN et al. 1999

Bowman, D. A.; Johnson, D.; Hodges, L.: Testbed Evaluation of VE Interaction Techniques. Proceedings of the 1999 ACM Symposium on Vir-

tual Reality Software and Technology (VRST 1999). London, 20.12.-22.12.1999, S. 26-33.

BOWMAN et al. 2005

Bowman, D. A.; Kruijff, E.; LaViola, J.; Poupyrev, I.: 3D User Interfaces - Theory and Practice. Boston, MA / USA: Addison-Wesley 2005. ISBN: 0-201-75867-9.

BREAZEAL et al. 2004

Breazeal, C.; Brooks, A.; Gray, J.; Hoffman, G.; Kidd, C.; Lee, H.; Lieberman, J.; Lockerd, A.; Chilongo, D.: Tutelage and collaboration for humanoid robots. International Journal of Humanoid Robotics and Autonomous Systems 1 (2004) 2, S. 315–348.

BRIDGES & CHARITOS 1997

Bridges, A.; Charitos, D.: On architectural design in virtual environments. Design Studies 18 (1997) 2, S. 143-154.

BROOKS 1996

Brooks, F.: The computer scientist as Toolsmith II. Communications of the ACM 39 (1996) 3, S. 61-68.

BROOKS & STEIN 1995

Brooks, R.; Stein, L. A.: Building brains for bodies. Autonomous Robots 1 (1995) 1, S. 7-25.

BRUEGGE & DUTOIT 2000

Bruegge, B.; Dutoit, A.: Object-Oriented Software Engineering: Conquering Complex and Changing Systems. Upper Saddle River, NJ / USA: Prentice Hall 2000. ISBN: 0-13-047110-0.

BURDEA & COIFFET 2003

Burdea, G.; Coiffet, P.: Virtual Reality Technology. 2 Aufl. New York: Wiley 2003. ISBN: 0471360899.

CAKMAKCI & ROLLAND 2006

Cakmakci, O.; Rolland, J. P.: Head Worn Displays: A Review. Journal of Display Technology 2 (2006) 3, S. 199-216.



CALCAGNO et al. 2006

Calcagno, R.; Rusina, F.; Deregibus, F.; Vincentelli, A. S.; Bonivento, A.: Application of Wireless Technologies in Automotive Production Systems. In: Proceedings of the Joint Conference on Robotics, 37th International Symposium on Robotics and 4th German Conference on Robotics (ISR/ROBOTIK 2006). München, 15.05.-17.05.2006. Düsseldorf: VDI 2006, S. 95-105. ISBN: 3-18-091956-6. (VDI-Berichte 1956).

CAUDELL & MIZELL 1992

Caudell, T. P.; Mizell, D. W.: Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. Proceedings of 25th IEEE Hawaii International Conference on Systems Sciences, Bd 2. Kauai / Hawaii, 07.01.-10.01.1992, S. 659-669.

CHELLALI 1998

Chellali, R.: Visual feedback enhancement for telerobotics applications. In: Verly, J. G. (Hrsg.): Proceedings of the SPIE, Vol. 3364: Enhanced and Synthetic Vision. Orlando, FL / USA, 13.04.-14.04.1998. Bellingham, WA / USA: SPIE 1998, S. 256-262.

CHONG et al. 2005

Chong, J. W. S.; Nee, A. Y. C.; Youcef-Toumi, K.; Ong, S. K.: An Application of Augmented Reality (AR) in the Teaching of an Arc Welding Robot. Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST) (2005) Jan-2005.

CLARON TECHNOLOGY 2007

Claron Technology Inc.: MicronTracker2  
<[http://www.clarontech.com/measurement\\_products.php](http://www.clarontech.com/measurement_products.php)> - 12.07.2008.

COBZAS & JAGERSAND 2005

Cobzas, D.; Jagersand, M.: Tracking and Predictive Display for a Remote Operated Robot using Uncalibrated Video. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2005). Barcelona, 18.04.-22.04.2005, S. 1847-1852.

COHEN et al. 1993

Cohen, M.; Aoki, S.; Koizumi, N.: Augmented audio reality: Telepresence/VR hybrid acoustic environments. Proceedings of the 2nd

IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN 1993). Tokyo / Japan, 03.11.-05.11.1993, S. 361-364.

COLESTOCK 2004

Colestock, H.: Industrial Robotics: Selection, Design and Maintenance. New York, NY / USA: McGraw-Hill 2004. ISBN: 0071440526.

CRUZ-NEIRA et al. 1992

Cruz-Neira, C.; Sandin, D. J.; DeFanti, T. A.; Keynon, R. V.; Hart, J. C.: The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. Communications of the ACM 35 (1992) 6, S. 64-72.

CURCIO et al. 1990

Curcio, C. A.; Sloan, K. R.; Kalina, R. E.; Hendrickson, A. E.: Human photoreceptor topography. Journal of Comparative Neurology 292 (1990) 4, S. 497-523.

DAI & KAMPKER 2000

Dai, W.; Kampker, M.: User oriented integration of sensor operations in a offline programming system for welding robots. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2000), Bd 2. San Francisco, CA / USA, 24.04.-28.04.2000, S. 1563-1567.

DAILY et al. 2003

Daily, M.; Cho, Y.; Martin, K.; Payton, D.: World Embedded Interfaces for Human-Robot Interaction. Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2003). Big Island, Hawaii, 03.01.-06.01.2003, S. 6.

DE AMICIS et al. 2002

De Amicis, R.; Fiorentino, M.; Santos, P.; Stork, A.: SketchAR – Sketching in Mixed Realities. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn, 14.05.2002. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2002, S. 145-156. ISBN: 978-3-935433-16-7.

### DeCURTINS & KREMERS 1987

DeCurtins, J.; Kremers, J.: Sketch: A simple-to-use programming system for visually guided robotic arc welding. Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1987), Bd 4. Raleigh, NC / USA, 31.03.-03.04.1987, S. 625- 630.

### DEISINGER 2002

Deisinger, J.: Immersives Modellieren. wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 1/2, S. 16-18.

### DELMIA 2007

Delmia - IGRIP

<[http://www.delmia.com/gallery/pdf/DELMIA\\_IGRIP.pdf](http://www.delmia.com/gallery/pdf/DELMIA_IGRIP.pdf)> - 17.03.2007.

### DEML et al. 2003

Deml, B.; Egermeier, H.; Petzold, B.: Are Two Hands Always Better Than One? A Study on Bimanual Input Control. 3rd International Conference on Humanoid Robots. Karlsruhe / München, 03.10.2003, S. S. 71-82 (CD-ROM).

### DENAVIT & HARTENBERG 1955

Denavit, J.; Hartenberg, R. S.: A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. ASME Journal of Applied Mechanics 22 (1955), S. 215-222.

### DENKENA et al. 2005

Denkena, B.; Wörn, H.; Apitz, R.; Bischoff, R.; Hein, B.; Kowalski, P.; Mages, D.; Schuler, H.: Roboterprogrammierung in der Fertigung. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 9, S. 656-661.

### DESTATIS 2006

Deutschland, S. B.: Löhne und Geälter - Niveau und Entwicklung der Arbeitskosten je geleistete Stunde im Produzierenden Gewerbe und im Dienstleistungsbereich  
<<http://www.destatis.de/basis/d/logh/loghtab13.php>> - 22.12.2006.

DIEHL et al. 2004

Diehl, H.; Müller, F.; Lindemann, U.: From raw 3D-Sketches to exact CAD product models – Concept for an assistant-system.  
EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling.  
Grenoble / Frankreich, 30.08.2004, S. 137-141.

DILLMANN et al. 1999

Dillmann, R.; Rogalla, O.; Ehrenmann, M.; Zöllner, R.; Bordegoni, M.: Learning Robot Behaviour and Skills based on Human Demonstration and Advice: the Machine Learning Paradigm. Proceedings of 9th International Symposium of Robotics Research (ISRR 1999). Snowbird, UT / USA, 09.10-12.10.1999, S. 229–238.

DILLMANN & ZÖLLNER 2006

Dillmann, R.; Zöllner, R.: Interactive and Cooperative Robot Assistants.  
In: Kraiss, K. F. (Hrsg.): Advanced Man-Machine Interaction. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-30618-8.

DILLMANN 2006

Dillmann, R.: Robotik 2 - Programmieren von Robotersystemen. Vorlesungsskriptum, Universität Karlsruhe, Karlsruhe (2006).  
<<http://www.iain.ira.uka.de/Teaching/VorlesungRobotikII/>> - 12.07.2008.

DILTHEY 2005

Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1. Berlin u. a.: Springer 2005. ISBN: 3-540-21673-1.

DIN 1319-1

DIN 1319-1: Grundlagen der Messtechnik - Grundbegriffe. Berlin: Beuth 1995.

DIN 66312

DIN 66312: Industrieroboter - Industrial Robot Language (IRL). Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V. 1996.

DIN EN 60529

DIN EN 60529: Schutzarten durch Gehäuse. Berlin: Beuth 2000.

**DIN EN ISO 8373**

DIN EN ISO 8373: Industrieroboter - Wörterbuch. Berlin: Beuth 1996.

**DIN EN ISO 9241**

DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Berlin: Beuth 2006.

**DIN EN ISO 15187**

DIN EN ISO 15187: Industrieroboter für die Handhabung - Grafische Anwenderschnittstelle für die Programmierung und den Betrieb von Robotern (GUI-R). Berlin: Beuth 2003.

**DRASIC & MILGRAM 1996**

Drasic, D.; Milgram, P.: Perceptual Issues in Augmented Reality. In: Fisher, S. S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the SPIE, Vol. 2653: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III. San Jose, CA / USA, 30.01.-02.02.1996. Bellingham, WA / USA: SPIE 1996, S. 123-134. ISBN: 0-8194-2027-1.

**EBBESMEYER et al. 2002**

Ebbesmeyer, P.; Fründ, J.; Matysczok, C.: AR-PDA - A Personal Digital Assistant for VR/AR Content. Proceedings of the ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2002). Montreal / Kanada, 29.09.-02.10.2002. (CD-ROM, ISBN: 0-7918-3603-7)

**ECHTLER et al. 2003**

Echtler, F.; Sturm, F.; Kindermann, K.; Klinker, G.; Stilla, J.; Trilk, J.; Najafi, H.: The Intelligent Welding Gun: Augmented Reality for Experimental Vehicle Construction. In: Ong, S. K. et al. (Hrsg.): Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing. Berlin: Springer 2003, S. 323-351. ISBN: 978-1-85233-796-4.

**EMERY & TRIST 1960**

Emery, F. E.; Trist, E. L.: Socio-technical systems. In: Churchman, C. W. et al. (Hrsg.): Management Science Models and Techniques, Proceedings of the Sixth International Meeting of the Institute of Management Science. Oxford / England: Pergamon Press 1960, S. 83-97.

### EN ISO 10218

EN ISO 10218: Roboter für Industrieumgebung - Sicherheit. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V. 2006.

### ESTABLE et al. 2002

Estable, S.; Ahrns, I.; Backhaus, H. G.; El Zubi, O.; Münstermann, R.: Intuitive Teaching and Surveillance for Production Assistants. Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on Robot-Human Interactive Communication (ROMAN 2002). Berlin, 25.09.-27.09.2002, S. 474 - 481.

### ExPLAY 2007

ExPlay Ltd.: ExPlay Nano-Projectors <<http://www.explay.co.il/>> - 06.06.2008.

### FARO 2007a

FARO EUROPE GmbH & Co. KG: Faro Deutschland - Produkte - Faro-Arm <<http://www.faro.com/content.aspx?ct=ge&content=pro&item=2>> - 18.05.2008.

### FARO 2007b

FARO EUROPE GmbH & Co. KG: Faro Deutschland - Produkte - Laser Tracker <http://www.faro.com/content.aspx?ct=ge&content=pro&item=3> - 18.05.2008.

### FEINER & MACINTYRE 1993

Feiner, S.; MacIntyre, B.: Knowledge-based augmented reality. Communications of the ACM 36 (1993) 7, S. 52-62.

### FIorentino et al. 2004a

Fiorentino, M.; Monno, G.; Uva, A. E.: SmartSnap: addressing 3D pointing anisotropy in Virtual Reality CAD application. In: Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon). Moskau, 06.09.-10.09.2004. Moskau: 2004a, S. 188-192. ISBN: 5-317-01112-4.

FIorentino et al. 2004b

Florentino, M.; Monno, G.; Uva, A. E.: Smart tools for virtual reality based CAD. In: Proceedings of Convegno Nazionale XIV ADM - XXXIII AIAS. Bari / Italien, 31.08.-02.09.2004. 2004b. ISBN: 88-900637-2-6.

FISCHER 2006

Fischer, J.: Rendering Methods for Augmented Reality. Diss. Eberhard-Karls-Universität, Tübingen (2006).

FISHER MASON 2004

Fisher Mason, K.: Laser projection systems improve composite ply placement. High-Performance Composites 12 (2004) 3.

FITZPATRICK et al. 2006

Fitzpatrick, R. C.; Butler, J. E.; Day, B. L.: Resolving Head Rotation for Human Bipedalism. Current Biology 16 (2006) 15, S. 1509-1514.

FONG et al. 2006

Fong, T.; Kunz, C.; Hiatt, L. M.; Bugajska, M.: The human-robot interaction operating system. In: Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction (HRI 2006). Salt Lake City, UT / USA, 02.03.-04.03.2006. New York, NY / USA: ACM 2006, S. 41-48. ISBN: 1-59593-294-1.

FOSTER et al. 2006

Foster, M. E.; By, T.; Rickert, M.; Knoll, A.: Human-Robot Dialogue for Joint Construction Tasks. In: Proceedings of 8th International Conference on Multimodal Interfaces (ICMI 2006). Banff / Kanada, 02.11.-04.11.2006. New York, NY / USA: ACM 2006, S. 68-71. ISBN: 1-59593-541-X.

FRIEDRICH & WOLGEMUTH 2004

Friedrich, W.; Wolgemuth, W.: Das Leitprojekt ARVIKA - Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service. Erlangen: Publicis Corporate Publishing 2004. ISBN: 3-89578-239-4.

GERKEY et al. 2003

Gerkey, B.; Vaughan, R. T.; Howard, A.: The Player/Stage Project: Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems. Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003). Coimbra / Portugal, 30.06-03.07.2003, S. 317-323.

GIESLER et al. 2004a

Giesler, B.; Salb, T.; Steinhaus, P.; Dillmann, R.: Using Augmented Reality to Interact with an Autonomous Mobile Plattform. Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004). New Orleans, LA / USA, 26.04.-01.05.2004, S. 1009-1014.

GIESLER et al. 2004b

Giesler, B.; Steinhaus, P.; Walther, M.; Dillmann, R.: Sharing Skills: Using Augmented Reality for Human-Robot Collaboration. In: Woods, A. M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the SPIE, Vol. 5291: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI. San Diego, CA / USA, 14.02.2004. Bellingham, WA / USA: SPIE 2004b, S. 446-454. ISBN: 0-8194-5194-0.

GIESLER 2006

Giesler, B.: Brillenbasierte Erweiterte Realität zur Unterstützung der kommandierenden und kommentierenden Zusammenarbeit mit Servicerobotern. Diss. Universität Karlsruhe (2005). Waabs: GCA 2006. ISBN: 3898632180.

GLOSSOP et al. 2004

Glossop, N.; Wedlake, C.; Moore, J.; Peters, T.: Augmented reality laser projection device for surgery. In: Westwood, J. D. (Hrsg.): Studies in Health Technology and Informatics, Bd 98. Amsterdam / Niederlande, 14.01.-17.01.2004. Amsterdam: IOS Press 2004, S. 104-110. ISBN: 1-58603-404-9.

GOTTSCHALD 2001

Gottschald, J.: Place&Play-Roboter. Diss. RWTH Aachen (2001). Aachen: Shaker 2001. ISBN: 3-8265-9275-1. (Berichte aus der Produktionstechnik 22/2001).



GOURDEAU 2007

Gourdeau, R.: ROBOOP - A Robotics oriented C++ package  
<<http://www.cours.polymtl.ca/roboop/>> - 12.07.2008.

GRIBNAU & HENNESSEY 1998

Gribnau, M. W.; Hennessey, J. M.: Comparing single- and two-handed 3D input for a 3D object assembly task. In: ACM (Hrsg.): Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 1998). Los Angeles, CA / USA, 18.04.- 23.04.1998. New York, NY / USA: ACM Press 1998, S. 233-234. ISBN: 1-58113-028-7.

GRUNWALD et al. 2003

Grunwald, G.; Schreiber, G.; Albu-Schäffer, A.; Hirzinger, G.: Programming by Touch: The Different Way of Human-Robot Interaction. IEEE Transactions on Industrial Electronics 50 (2003) 4, S. 659 - 666.

HÄGELE et al. 2002

Hägele, M.; Schaaf, W.; Helms, E.: Robot Assistants at Manual Workplaces: Effective Co-operation and Safety Aspects. Proceedings of the 33rd International Symposium on Robotics (ISR 2002). Stockholm / Schweden, 07.10.-11.10.2002. (CD-ROM)

HALLER et al. 2006

Haller, M.; Billinghurst, M.; Thomas, M.: Emerging Technologies of Augmented Reality: Interfaces and Design. Hershey, PA / USA: Idea Group 2006. ISBN: 1-59904-066-2.

HALME et al. 1999

Halme, S.; Suomela, J.; Savela, M.: Applying telepresence and augmented reality to teleoperate field robots. Robotics and Autonomous Systems 26 (1999) 2-3, S. 117-124.

HAMFELD 2002

Hamfeld, H.: Aktive Stereoskopie - Neue Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten. Diss. Universität Kaiserslautern 2002. ISBN: 3925178899.

HARTLEY & ZISSERMAN 2004

Hartley, R. I.; Zisserman, A.: Multiple View Geometry in Computer Vision. Upper Saddle River, NJ / USA: Addison Wesley 2004. ISBN: 0521-54051-8.

HEGER 1998

Heger, R.: Entwicklung eines Systems zur interaktiven Gestaltung und Auswertung von manuellen Montagetätigkeiten in der virtuellen Realität. Diss. Universität Stuttgart (1998). Berlin: Springer 1998. ISBN: 3-540-65039-3. (IPA-IAO Forschung und Praxis 273).

HEILIG 1960

Heilig, M.: Patent US 2955156 "Stereoscopic-Television Apparatus for Indivisual Use" (Prioritätsdatum 04.10.1960).

HOFF & VINCENT 2000

Hoff, W.; Vincent, T.: Analysis of Head Pose Accuracy in Augmented Reality. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 6 (2000) 4, S. 319 - 334.

HUA et al. 2000

Hua, H.; Girardot, A.; Gao, C.; Rolland, J. P.: Engineering of Head-Mounted Projective Displays. Applied Optics 39 (2000) 22, S. 3814-3824.

HUDAK et al. 2003

Hudak, P.; Courtney, A.; Nilsson, H.; Peterson, J.: Arrows, robots and functional reactive programming. In: Jeuring, J. et al. (Hrsg.): Advanced Functional Programming, 4th International School. Berlin u. a.: Springer 2003, S. 159-187. ISBN: 3-540-40132-6. (Lecture Notes in Computer Science 2638).

IFR 2006

IFR: World Robotics 2006 - Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment. Frankfurt: VDMA Robotik und Automation 2006.

### IFR 2007

IFR: World Robotics 2007 - Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment. Frankfurt: VDMA Robotik und Automation 2007.

### IMMERSION 2007

Immersion Corporation: 3D Digitizing, Measurement, and Inspection  
<<http://www.immersion.com/digitizer/>> - 18.05.2008.

### INAMI et al. 2000

Inami, M.; Kawakami, N.; Sekiguchi, D.; Yanagida, Y.; Maeda, T.; Tachi, S.: Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector. Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2000 Conference. Los Alamitos, CA / USA, S. 233-240.

### INTERSENSE 2007a

InterSense Inc.: 6-DOF Tracking Solutions  
<<http://www.isense.com/products.aspx?id=45>> - 18.05.2008.

### INTERSENSE 2007b

InterSense Inc.: 3-DOF Tracking (InertiaCube Product Family)  
<<http://www.isense.com/products.aspx?id=44>> - 18.05.2008.

### ISO/IEC 14772-1:1997 1997

WebD Consortim - VRML97 and Related Specifications

### JENOPTIK 2006

Jenoptik (Hrsg.): Laser Projection Systems for Brilliant Images. Jena: 2006. <[http://www.jenoptik-laserdisplay.de/cps/rde/xbcr/SID-26EE34DB-D3DB99B5/ldt/Technical\\_Datasheet\(1\).pdf](http://www.jenoptik-laserdisplay.de/cps/rde/xbcr/SID-26EE34DB-D3DB99B5/ldt/Technical_Datasheet(1).pdf)> - 06.05.2008.

### JONAS 2000

Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Diss. TU München (2000). München: Utz 2000. ISBN: 3-89675-870-5. (Forschungsberichte iwb 145).

KAHRS et al. 2006

Kahrs, L. A.; Raczkowski, J.; Wörn, H.: Aufbau eines miniaturisierten Laserprojektors für die Erweiterte Realität in der Chirurgie. Tagungsband der Gemeinsamen Jahrestagung der Deutschen, Österreichischen und Schweizerischen Gesellschaft für Biomedizinische Technik. Zürich, 06.09.-09.09.2006, S. 1-2.

KALAWSKY 2004

Kalawsky, R.: The Science of Virtual Reality and Virtual Environments. 2. Aufl. Wokingham / England: Addison-Wesley 2004. ISBN: 0201427737.

KATO & BILLINGHURST 1999

Kato, H.; Billinghurst, M.: Marker Tracking and HMD Calibration for a video-based Augmented Reality Conferencing System. Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality (IWAR). San Francisco, CA / USA, 20.10.-21.10.1999, S. 85-94.

KAZI & BISCHOFF 2003

Kazi, A.; Bischoff, R.: Patentanmeldung DE 103 05 384 A1 "Verfahren und Vorrichtung zur Visualisierung rechnergestützter Informationen" (Deutsches Prioritätsdatum: 11.02.2003). Anmelder: Kuka Roboter GmbH.

KAZI et al. 2005

Kazi, A.; Bunsendal, J.; Haag, D.; Baum, R.; Bischoff, R.: Next Generation Teach Pendants for Industrial Robots. In: Prassler, E. et al. (Hrsg.): Advances in Human-Robot Interaction. Berlin: Springer 2005, S. 47-66. ISBN: 3-540-23211-7. (Springer Tracts in Advanced Robotics 14).

KAZI & BISCHOFF 2005

Kazi, A.; Bischoff, R. Patentanmeldung JP002005106825AA "Method and apparatus for determining the position and orientation of an image receiving device" (Prioritätsdatum 01.10.2003). Anmelder: Kuka Roboter GmbH.

KEIBEL 2003

Keibel, A.: Konzeption und Realisierung eines integrierten Moduls zur Simulation und Steuerung von Kinematiksystemen. Diss. Universität Dortmund (2003).

KLINKER et al. 1997

Klinker, G.; Ahlers, K.; Breen, D. E.; Chevalier, P. Y.; Crampton, C.; Greer, D. S.; Koller, D.; Karamer, A.; Rose, E.; Tuceryan, M.; Whitaker, R. T.: Confluence of Computer Vision and Interactive Graphics for Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6 (1997) 4, S. 433-451.

KNOLL 2003a

Knoll, A.: Robotik. In: Görz, G. et al. (Hrsg.): Handbuch der künstlichen Intelligenz. München: Oldenbourg 2003a. ISBN: 3-486-27212-8.

KNOLL 2003b

Knoll, A.: A basic system for multimodal robot instruction. In: Kühnlein, P. et al. (Hrsg.): Perspectives on Dialogue in the New Millennium. Amsterdam: John Benjamins 2003b, S. 215–228. (Pragmatics & Beyond New 114).

KÖLSCH et al. 2006

Kölsch, M.; Bane, R.; Höllerer, T.; Turk, M.: Multimodal Interaction with a Wearable Augmented Reality System. IEEE Computer Graphics and Applications 26 (2006) 3, S. 62-71.

KRAISS 2006

Kraiss, K.-F.: Introduction. In: Kraiss, K. F. (Hrsg.): Advanced Man-Machine Interaction. Berlin: Springer 2006, S. 1-6. ISBN: 3-540-30618-8.

KUGELMANN 1999

Kugelmann, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. Diss. TU München (2002). München: Utz 1999. ISBN: 3-8316-0154-2. (Forschungsberichte iw 127).

KUKA 1997

KUKA (Hrsg.): Offline-Programmierung: KR C1 Office / PC-Simulation:  
KR SIM (Produktbeschreibung). KUKA Roboter GmbH, Augsburg: 1997.

KUKA 2006

KUKA Roboter GmbH: Handgeführter KUKA Roboter automatisiert den  
Gießprozess im Prototypen-, Vorserien- und Kleinserienbau  
<[http://www.kuka.com/se/pressevents/news/NN\\_060515\\_Automatica\\_07.htm](http://www.kuka.com/se/pressevents/news/NN_060515_Automatica_07.htm)> - 17.07.2008.

KUKA 2007

KUKA Roboter GmbH: Simulation (KUKA.Sim)  
<[http://www.kuka.com/germany/de/products/software/kuka\\_sim/](http://www.kuka.com/germany/de/products/software/kuka_sim/)> -  
13.07.2008.

KULAS et al. 2004

Kulas, C.; Sandor, C.; Klinker, G.: Towards a Development Methodology  
for Augmented Reality User Interfaces. In: Proceedings of the Interna-  
tional Workshop exploring the Design and Engineering of Mixed Reality  
Systems (MIXER 2004). Madeira / Portugal, 13.01.2004. 2004. (CEUR  
Workshop Proceedings 91).

LADIKOS et al. 2007

Ladikos, A.; Benhimane, S.; Navab, N.: A Real-Time Tracking System  
Combining Template-Based and Feature-Based Approaches. Proceedings  
of the 2nd International Conference on Computer Vision Theory and Ap-  
plications. Barcelona / Spanien, 08.03.-11.03.2007, S. 317-324.

LATOMBE et al. 2006

Latombe, J. C. et al.: MPK - Motion Planning Kit  
<<http://robotics.stanford.edu/~mitul/mpk/>> - 04.07.2008.

LAWSON et al. 2002

Lawson, S.; Pretlove, J.; Wheeler, A.; Parker, G.: Augmented Reality As a  
Tool to Aid the Telerobotic Exploration and Characterization of Remote  
Environments. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 11  
(2002) 4, S. 352-367.

**LEICA 2007**

Leica Geosystems AG: Laser Trackers - Leica Geosystems

<[http://www.leicageosystems.com/corporate/de/products/laser\\_tracker/lgs\\_35317.htm](http://www.leicageosystems.com/corporate/de/products/laser_tracker/lgs_35317.htm)> - 18.05.2008.

**LEPETIT & FUA 2005**

Lepetit, V.; Fua, P.: Monocular Model-Based 3D Tracking of Rigid Objects: A Survey. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision 1 (2005) 1, S. 1–89.

**LIGHT BLUE OPTICS 2007**

Light Blue Optics Ltd.: Technology - Holographic Laser Projection

<<http://www.lightblueoptics.com/technology.htm>> - 06.05.2008.

**LINDEMANN et al. 2004**

Lindemann, U.; Ponn, J.; Müller, F.; Diehl, H.: Sketching in early conceptual phases of product design: guidelines and tools. In: Hughes, J. F. et al. (Hrsg.): The European Association for Computer Graphics 25th Annual Conference (EUROGRAPHICS 2004). Grenoble / France, 30.08.-31.08.2004. Aire-la-Ville: Eurographics Association 2004, S. 27-32.

**LORENSEN et al. 1993**

Lorensen, W. E.; Cline, H.; Nafis, C.; Kikinis, R.; Altobelli, D.; Gleason, L.: Enhancing Reality in the Operating Room. Proceedings of the 4th IEEE Conference on Visualization. San Jose, CA / USA, 25.-29.10.1993, S. 410-415.

**LOW et al. 2001**

Low, K.; Welch, G.; Lastra, A.; Fuchs, H.: Life-Sized Projector-Based Dioramas. Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 2001). Banff / Kanada, 15.11.-17.11.2001, S. 161-168.

**MELTZER & MOFFIT 1997**

Meltzer, J. E.; Moffit, K.: HMD design - Putting the user first. In: Meltzer, J. E. et al. (Hrsg.): Head-Mounted Displays. Columbus, OH / USA: McGraw-Hill 1997, S. 1-16.

MICROSOFT 2007

Corporation, M.: Microsoft Robotics Studio  
<<http://msdn.microsoft.com/robotics/>> - 06.05.2008.

MICROVISION 2007

Microvision Inc.: Projection Displays  
<<http://www.microvision.com/proj.html>> - 06.05.2008.

MILGRAM et al. 1991

Milgram, P.; Drascic, D.; Grodski, J. J.: Enhancement of 3-D video displays by means of superimposed stereographics. Proceedings of Human Factors Society 35th Annual Meeting. San Francisco, CA / USA, 01.09.-02.09.1991, S. 1457-1461.

MILGRAM et al. 1993

Milgram, P.; Drasic, D.; Zhai, S.: Applications of Augmented Reality in Human-Robot Communication. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 1993). Yokohama / Japan, 26.07-30.07.1993, S. 1467-1472.

MILGRAM et al. 1994

Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.: Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum. In: Das, H. (Hrsg.): Proceedings of the SPIE, Vol. 2351: Telem manipulators and Telepresence Technologies. 01.02.1994, Boston, MA / USA. Bellingham, WA / USA: SPIE 1994, S. 282-292.

MILGRAM & KISHINO 1994

Milgram, P.; Kishino, F.: A taxonomy of mixed reality visual displays. IEICE Transactions on Information Systems E77-D (1994) 12, S. 1321-1329.

MITCHELL et al. 1986

Mitchell, T. M.; Keller, R. M.; Kedar-Cabelli, S. T.: Explanation-based generalization: A unifying view. Machine Learning 1 (1986) 1, S. 47-80.



### MOEHRING et al. 2004

Moehring, M.; Lessig, C.; Bimber, O.: Video See-Through AR on Consumer Cell Phones. Proceedings of the 3rd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004). Arlington, VA / USA, 02.11.-05.11.2004, S. 253-254.

### MVTEC 2008

MVTec Software GmbH: Solution Guide II-F 3D Machine Vision  
<<http://www.mvtec.com/download/documentation/pdf-8.0/3DMachineVision.pdf>> - 31.07.2008.

### NAUMANN et al. 2006

Naumann, M.; Wegener, K.; Schraft, R. D.; Lachello, L.: Robot Cell Integration by means of application P'n'P. In: Proceedings of the Joint Conference on Robotics, 37th International Symposium on Robotics and 4th German Conference on Robotics (ISR/ROBOTIK 2006). München, 15.05.-17.05.2006. Düsseldorf: VDI 2006, S. 95-105. ISBN: 3-18-091956-6. (VDI-Berichte 1956).

### NDI 2007

Northern Digital Inc.: NDI Certus e-type Optical Measurement System  
<<http://www.ndigital.com/medical/certus.php>> - 18.05.2008.

### NEUGEBAUER 1997

Neugebauer, J. G.: Einsatz neuer Mensch-Maschine-Schnittstellen für Robotersimulation und -programmierung. Diss. Universität Stuttgart (1997). Berlin: Springer 1997. ISBN: 3-540-63568-8. (IPA-IAO - Forschung und Praxis 256).

### NIKU 2001

Niku, S. B.: Introduction to Robotics. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall 2001. ISBN: 0-13-061309-6.

### NOGUCHI & MAEHARA 2005

Noguchi, Y.; Maehara, S.: Robot Simulator MotoSim EG. Yaskawa Technical Review 69 (2005) 3, S. 135-139.

NUNEZ et al. 2006

Nunez, P.; Bandera, J. P.; Perez-Lorenzo, J. M.; Sandoval, F.: A Human-Robot Interaction System for Navigation Supervision based on Augmented Reality. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2006). Malaga / Spanien, 16.05.-19.05.2006, S. 441-444.

OKA et al. 2002

Oka, K.; Sato, Y.; Koike, H.: Real-Time Fingertip Tracking and Gesture Recognition. IEEE Computer Graphics and Applications 22 (2002) 6, S. 64-71.

ONG et al. 2006

Ong, S. K.; Chong, J. W. S.; Nee, A. Y. C.: Methodologies for immersive robot programming in an augmented reality environment. In: Lee, Y. T. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 4th international conference on computer graphics and interactive techniques in Australasia and Southeast Asia (GRAPHITE 2006). Kuala Lumpur / Malaysia, 29.11-02.12.2006. ACM 2006, S. 237 - 244. ISBN: 1-59593-564-9.

OPENGL 2008

SGI Corporation: OpenGL - The Industry Standard for High Performance Graphics <[www.opengl.org](http://www.opengl.org)> -

OPTITRACK 2007

NaturalPoint Inc.: OptiTrack - Optical Motion Capture and Tracking <<http://www.naturalpoint.com/optitrack/>> - 18.05.2007.

PASMAN et al. 2004

Pasman, W.; Woodward, C.; Hakkarainen, M.; Honkamaa, P.; Hyv  kk  , J.: Augmented reality with large 3D models on a PDA: implementation, performance and use experiences. In: Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry (VRCIA 2004). Singapur, 16.06.-18.06.2004. ACM 2004, S. 344-351. ISBN: 1-58113-884-9.

### PATRON 2005

Patron, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Diss. TU München (2004). München: Utz 2005. ISBN: 3-8316-0474-6. (Forschungsberichte iwb 190).

### PATTERSON et al. 2006

Patterson, R.; Winterbottom, M. D.; Pierce, B. J.: Perceptual Issues in the Use of Head-Mounted Visual Displays. *Human Factors* 48 (2006) 3, S. 555-573.

### PETERSON et al. 2001

Peterson, J.; Hager, G.; Serjentov, A.: Composable robot controllers. Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA 2001). Banff / Kanada, 29.07.-01.08.2001, S. 149-154.

### PETTERSEN et al. 2004

Pettersen, T.; Skourup, C.; Engedal, T.: Users regain control of industrial robots. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference Mechatronics and Robotics (MECHROB 2004). Aachen / Germany, 13.09.-15.09. 2004.

### PETZOLD et al. 2004

Petzold, B.; Zäh, M. F.; Kron, A.; Schmidt, G.; Deml, B.; Färber, B.: How to design a haptic telepresence system for the disposal of explosive ordnances. Proc. of the IARP Workshop on Robots for Humanitarian Demining (HUDEM 2003). Brüssel, 16.-18.07.2004. (CD-ROM)

### PHILIPS 2006

Koninklijke Philips Electronics N.V.: The Simplicity Event  
<<http://www.simplicityevent.com/about.html>> - 15.05.2008.

### PINHANEZ 2001

Pinhanez, C.: The Everywhere Displays Projector: A Device to Create Ubiquitous Graphical Interfaces. In: Proceedings of Ubicomp 2001: Ubiquitous Computing: Third International Conference. Atlanta, GA / USA, 30.09.-02.10.2001. Berlin: Springer 2001, S. 315-331. (Lecture Notes in Computer Science 2201).

PINHANEZ et al. 2003

Pinhanez, C.; Kjeldsen, R.; Levas, A.; Pingali, G.; Podlaseck, M.; Sukaviriya, N.: Applications of Steerable Projector-Camera Systems. Proceedings of IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS 2003). Nizza / Frankreich, 12.10.2003.

PIRES 2005

Pires, N. P.: Robot-by-voice: Experiments on commanding an industrial robot using the human voice. Industrial Robot 32 (2005) 6, S. 505-511.

POH et al. 2005

Poh, Y. L.; Nee, A. Y. C.; Youcef-Toumi, K.; Ong, S. K.: Facilitating Mechanical Design with Augmented Reality. Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST). Januar 2005.  
<<http://hdl.handle.net/1721.1/7448>> - 06.01.2009.

POLHEMUS 2007

Polhemus Inc.: Polhemus FASTRAK: The Motion Tracking Industry Standard <[http://www.polhemus.com/?page=Motion\\_Fastrak](http://www.polhemus.com/?page=Motion_Fastrak)> - 18.05.2008.

POUPYREV et al. 1998

Poupyrev, I.; Weghorst, S.; Billinghurst, M.; Ichikawa, T.: Egocentric Object Manipulation in Virtual Environments: Empirical Evaluation of Interaction Techniques. Proceedings of the 19th Annual Conference of the European Association for Computer Graphics (EUROGRAPHICS 1998). Lissabon / Portugal, 31.08.-04.09.1998, S. 41-52.

PRASSLER et al. 2005

Prassler, E.; Lawitzky, G.; Grundwald, G.; Hägele, M.; Dillmann, R.; Iosifidis, I.: Advances in Human-Robot Interaction. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-540-23211-7. (Springer tracts in advanced robotics 14).

PRETLOVE 1998

Pretlove, J.: Augmenting Reality for Telerobotics: Unifying Real and Virtual Worlds. Industrial Robot: An International Journal 25 (1998) 6, S. 401-407.

PRITSCHOW et al. 2005

Pritschow, G.; Kremer, M.; Röck, S.: Virtual Setup of Reconfigurable Manufacturing Systems using Hardware in the Loop Simulation. CIRP-sponsored 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing, University of Michigan, Ann Arbor / USA, 10.05-12.05.2005.

PRITSCHOW & GRUHLER 1986

Pritschow, G.; Gruhler, G.: Selbstprogrammierung von Industrierobotern durch Führung im geschlossenen Sensorregelkreis. VDI/VDE Fachtagung Steuerung und Regelung von Robotern. Langen b. Frankfurt, 12.05.-13.05.1986. (VDI Berichte 598)

RAPP et al. 2004

Rapp, S.; Michelitsch, G.; Osen, M.; Williams, J.; Barbisch, M.; Bohan, R.; Valsen, Z.; Emele, M.: Spotlight Navigation: Interaction with a hand-held projection device. In Proceedings of the Second IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM 2004). Linz / Österreich, 18.04.-23.04.2004.

RASKAR et al. 1998

Raskar, R.; Welch, G.; Fuchs, H.: Spatially Augmented Reality. Proceedings of First International Workshop on Augmented Reality (IWAR 1998). Los Alamitos, CA / USA, 01.11.1998, S. 63-72.

RASKAR et al. 2002

Raskar, R.; Baar, J.; Chai, J. X.: A Low-Cost Projector Mosaic with Fast Registration. Proceedings of the 5th Asian Conference on Computer Vision (ACCV2002). Melbourne / Australien, 23.01.-25.01.2008.

RASKAR et al. 2004

Raskar, R.; Beardsley, P.; Baar, J.; Wang, Y.; Dietz, P.; Lee, H.; Leigh, D.; Willwacher, T.: RFIG Lamps: Interacting with a Self-Describing World via Photosensing Wireless Tags and Projectors. ACM Transactions on Graphics (TOG, SIGGRAPH) 23 (2004) 3, S. 406-415.

RAYMAEKERS & CONINX 2001

Raymaekers, C.; Coninx, K.: Menu Interactions in a Desktop Haptic Environment. In: Eurohaptics. Birmingham, England: 2001, S. 49-53.

REGENBRECHT et al. 2005

Regenbrecht, H.; Baratoff, G.; Wilke, W.: Augmented Reality Projects in the Automotive and Aerospace Industries. IEEE Computer Graphics and Applications 25 (2005) 6, S. 48-56.

REICHLE 2007

Reichle, R.: Roboterprogrammierung durch Anlagenhersteller und Endkunden: Erfahrungen und Wünsche. Tagungsband zum Workshop "Industrieroboter schneller und einfacher programmieren". Stuttgart, 05.12.2007. (Fraunhofer IPA Workshop F 157)

REINHART & ROßGODERER 1998

Reinhart, G.; Roßgoderer, U.: Spatial Planning of Manual and Automated Work Stations Utilising Mathematic Algorithms and Virtual Reality Devices. Proceedings of the European Simulation Congress (EUROSIM 1998). Helsinki / Finnland, 14.04.-15.04.1998, S. 499-505.

REINHART et al. 1999

Reinhart, G.; Cuiper, R.; Roßgoderer, U.: Concurrent Design of Assembly Systems within a Shared Virtual Environment. Proceedings of 32nd ISATA - advances in automotive and transportation technologies and practice for the 21st century. Wien, 14.06.-18.06.1999, S. 173-180.

REINHART & PATRON 2003

Reinhart, G.; Patron, C.: Integrating Augmented Reality in the Assembly Domain - Benefits and Applications. CIRP Annals - Manufacturing Technology 52 (2003) 1, S. 5-8.

REINHART et al. 2007

Reinhart, G.; Hörwick, M.; Vogl, W.: Projektions-AR zur Roboterprogrammierung. wt - Werkstatttechnik online 97 (2007) 9, S. 707-712.

REINHART et al. 2008

Reinhart, G.; Munzert, U.; Vogl, W.: A Programming system for Robot-based Remote-Laser-Welding with Conventional Optics. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 1, S. 37-40.

REITMAYR & DRUMMOND 2006

Reitmayr, G.; Drummond, T.: Going out: Robust Model-based Tracking for Outdoor Augmented Reality. 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). Santa Barbara, CA / USA, 22.10.-25.10.2006, S. 109-118.

REVXPERS 2008

GmbH, R.: RevXperts | 3D Creator Systemfamilie  
<<http://www.revxperts.de/index.php?id=64>> - 18.05.2008.

ROEBER et al. 2003

Roeber, H.; Bacus, J.; Tomasi, C.: Typing in Thin Air: The Canesta Projection Keyboard – A New Method of Interaction with Electronic Devices. Proceedings of the 2003 Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2003). Fort Lauderdale, FL / USA, 05.04.-10.04.2003, S. 712-713.

ROLLAND et al. 1995

Rolland, J. P.; Holloway, R. L.; Fuchs, H.: Comparison of optical and video see-through, head-mounted displays. In: Das, H. (Hrsg.): Proceedings of SPIE, Vol. 2351: Telemanipulator and Telepresence Technologies, Bd 2351. Boston, MA / USA, 01.11.1994. Bellingham, WA / USA: SPIE 1995, S. 293-307.

ROLLAND et al. 2000

Rolland, J. P.; Krueger, M. W.; Goon, A.: Multifocal Planes Head-Mounted Displays. Applied Optics 39 (2000) 19, S. 3209-3215.

ROLLAND et al. 2001

Rolland, J. P.; Davis, L.; Baillot, Y.: A survey of tracking technology for virtual environments. In: Barfield, W. et al. (Hrsg.): Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. Mahwah, NJ / USA: Lawrence Erlbaum Associates 2001, S. 67–112. ISBN: 0-8058-2901-6.

ROLLAND et al. 2002

Rolland, J. P.; Meyer, C.; Arthur, K.; Rinalducci, E.: Method of Adjustments versus Method of Constant Stimuli in the Quantification of Accu-

racy and Precision of Rendered Depth in Head-Mounted Displays. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 11 (2002) 6, S. 610-625.

### ROLLAND & CAKMAKCI 2005

Rolland, J. P.; Cakmakci, O.: The past, present, and future of head-mounted display designs. In: Wang, Y. et al. (Hrsg.): Proceedings of the SPIE, Vol. 5638: Optical Design and Testing II. Beijing / China, 08.11.-12.11.2004. Bellingham, WA / USA: SPIE 2005, S. 368-377. ISBN: 9780819455932.

### ROßGODERER 2002

Roßgoderer, U.: System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen. Diss. TU München (2002). München: Utz 2002. ISBN: 3-8316-0154-2. (Forschungsberichte iw b 168).

### RUSSELL & NORVIG 2002

Russell, S.; Norvig, P.: Artificial Intelligence: A Modern Approach. 2 Aufl. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall 2002. ISBN: 0-13-790395-2.

### SANDOR 2005

Sandor, C.: A Software Toolkit and Authoring Tools for User Interfaces in Ubiquitous Augmented Reality. Diss. TU München (2005).

### SATO & SAKANE 2000

Sato, S.; Sakane, S.: A Human-Robot Interface Using an Interactive Hand Pointer that projects a Mark in the Real Work Space. Proceedings of the 2000 IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA 2000). San Francisco, CA / USA, 24.04.-28.04.2000, S. 589-595.

### SCANLAB AG 2005

Scanlab AG (Hrsg.): RTC4 PC-Interfacekarte für die Scan-Kopf- und Lasersteuerung in Echtzeit. Puchheim: 2005.

### SCHÄFER 2007

Schäfer, T.: Verfahren zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter. Diss. Univ. Stuttgart (2007). Heimsheim: Jost-Jetter 2007. ISBN: 978-3-939890-05-8. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 452).



SCHOWENGERDT et al. 2003

Schowengerdt, B.; Seibel, E. J.; Kelly, J. P.; Silverman, N. L.; Furness, T. A.: Binocular retinal scanning laser displays with integrated focus cues for ocular accomodtion. In: Proceedings of the SPIE, Vol. 5006: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems X. Santa Clara, CA / USA, 21.01.-23.01.2003. Bellingham, WA / USA: SPIE 2003, S. 1-9. ISBN: 0-8194-4806-0.

SCHRAFT & MEYER 2006a

Schraft, R. D.; Meyer, C.: The need for an intuitive teaching method for small and medium enterprises. In: Proceedings of the Joint Conference on Robotics, 37th International Symposium on Robotics and 4th German Conference on Robotics (ISR/ROBOTIK 2006). München, 15.05.-17.05.2006. Düsseldorf: VDI 2006a, S. 95-105. ISBN: 3-18-091956-6. (VDI-Berichte 1956).

SCHRAFT & MEYER 2006b

Schraft, R. D.; Meyer, C.: Assistenzroboter in der Produktion. Industrie-Management 22 (2006b) 2, S. 17-20.

SCHRECK 1998

Schreck, G.: Advanced man-machine interfaces for robot system applications. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 1998), Bd 4. Aachen, 31.08.-04.09.1998, S. 1914-1917.

SCHRÖDER 2005

Schröder, C.: Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich. IW-Trends – Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln 32 (2005) 5, S. 3-20.

SENSABLE 2008

Sensible Technologies Inc.: Haptic Devices - Sensable  
<<http://www.sensable.com/products-haptic-devices.htm>> - 18.05.2008.

SHAHEEN et al. 2000

Shaheen, M.; Mallem, M.; Chavand, F.: Visual command of a robot using 3D-scene reconstruction in an augmented reality system. Control Engineering Practice 9 (2000) 4, S. 375-385.

SIEGERT & BOCIONEK 1996

Siegert, H. J.; Bocionek, S.: Robotik: Programmierung intelligenter Roboter. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-540-60665-3.

SIEMENS 2008

Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. (vormals: UGS Corporation): eM-Workplace PC (Robcad) - Digitale Fertigung für robotergesteuerte Arbeitszellen <[http://www.ugsplm.de/produkte/tecnomatix/assembly\\_planning/em\\_workplace\\_pc.shtml](http://www.ugsplm.de/produkte/tecnomatix/assembly_planning/em_workplace_pc.shtml)> - 20.07.2008.

SMART 2008

Smart Technologies Inc.: SMART Board interactive whiteboards <[www.smarttech.com/smartboard/](http://www.smarttech.com/smartboard/)> - 15.05.2008.

SMEROBOT 2006

Hägele, M.: Roboter für KmU: Realisierte Visionen <[http://www.smerobot.org/download/datasheets/IPA\\_Roboter-fuer-kmU\\_DE.pdf](http://www.smerobot.org/download/datasheets/IPA_Roboter-fuer-kmU_DE.pdf)> - 15.07.2008.

SOM 2007

Som, F.: Robotersteuerung mit neuartigen Bedien- und Programmierfunktionen. Tagungsband zum Workshop "Industrieroboter schneller und einfacher programmieren". Stuttgart, 05.12.2007. (Fraunhofer IPA Workshop F 157)

SPUR & UHLMAN 2005

Spur, G.; Uhlman, E.: Industrieroboter. In: Grote, K. H. (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. 21 Aufl. Berlin: Springer 2005.

STEFFAN & KUHLEN 2001

Steffan, R.; Kuhlen, T.: MAESTRO - a tool for interactive assembly simulation in virtual environments. In: Fröhlich, B. et al. (Hrsg.): Immersive

Projection Technology and Virtual Environments. Stuttgart, 16.05.-  
18.05.2001. Wien: Springer 2001, S. 141-152. ISBN: 3-211-83671-3.

STEGER et al. 2007

Steger, C.; Ulrich, M.; Wiedemann, C.: Machine Vision Algorithms and  
Applications. Berlin: Wiley-VCH 2007. ISBN: 978-3-527-40734-7.

SUOMELA 2004

Suomela, J.: From Teleoperation to the Cognitive Human-Robot Interface.  
Diss. Helsinki University of Technology, Espoo / Finnland (2004).

SUTHERLAND 1968

Sutherland, I.: A head-mounted three-dimensional display. In: AFIPS Fall  
Joint Computer Conference. San Francisco, CA / USA, 01.12.1968. Wash-  
ington, DC / USA: Thompson Books 1968, S. 757-764.

SYMBOL 2007

Motorola Inc. (vormals: Symbol Technologies Inc.): Symbol laser projec-  
tion display (LPD): A miniature, high resolution projection engine  
28.02.2007.

TERASHIMA & SAKANE 1999

Terashima, M.; Sakane, S.: A Human-Robot Interface Using an Extended  
Digital Desk. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on  
Robotics and Automation (ICRA 1999). Detroit, MI / USA, 10.05.-  
15.05.1999, S. 2874-2880.

TOSHIBA 2006

Toshiba (Hrsg.): Mobile Presentations Move Into A New Dimension –  
Toshiba Presents New LED Projector. Neuss: März 2006.  
<[http://www.toshiba.de/projektoren/resources/pdf/press\\_ffl\\_e.pdf](http://www.toshiba.de/projektoren/resources/pdf/press_ffl_e.pdf)> -  
06.01.2009.

TRIMBLE 2008

Trimble Navigation Ltd.: Trimble - GPS for Precision Agriculture  
<[http://www.trimble.com/ag\\_gps.shtml](http://www.trimble.com/ag_gps.shtml)> - 18.05.2008.

TROLLTECH 2007

Trolltech ASA: qt43 - Whitepaper <<http://trolltech.com/pdf/qt43-whitepaper-a4.pdf>> - 12.07.2007.

TUCERYAN et al. 2002

Tuceryan, M.; Genc, Y.; Navab, N.: Single-Point active alignment method (SPAAM) for optical see-through HMD calibration for augmented reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 11 (2002) 3, S. 259-276.

ULLMER & ISHII 2001

Ullmer, B.; Ishii, H.: Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces. In: Carrol, J. M. (Hrsg.): Human-Computer Interaction in the New Millennium. Upper Saddle River, NJ / USA: Addison Wesley 2001, S. 579-601. ISBN: 0-201-70447-1.

UNECE/IFR 2003

UNECE/IFR: World Robotics 2003 - Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment. Genf: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) and International Federation of Robotics (IFR) 2003. ISBN: 92-1-101059-4.

UNECE/IFR 2005

UNECE/IFR: World Robotics 2005 - Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment. Genf: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) and International Federation of Robotics (IFR) 2005. ISBN: 92-1-101100-0.

UREY 2003

Urey, H.: Retinal Scanning Displays. In: Driggers, R. G. (Hrsg.): Encyclopedia of Optical Engineering. New York, NY / USA: Dekker 2003, S. 2445-2457. ISBN: 0-8247-0940-3.

VDI 2860

VDI 2860: Richtlinie Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth 1990.

VELGER 1998

Velger, M.: *Helmet-Mounted Displays and Sights*. Norwood, MA / USA: Artech House 1998. ISBN: 0-89006-822-4.

VERL et al. 2007

Verl, A.; Hägele, M.; Schaeffer, C.; Graf, B.: Von der Fabrik ins Wohnzimmer - Roboter auf dem Weg in den Alltag. Tagungsband des Internationalen Forum Mechatronik. 2007. Winterthur, 12.09-13.09.2007, S. 21 ff.

VERL & NAUMANN 2008

Verl, A.; Naumann, M.: Plug'n'Produce-Steuerungsarchitektur für Roboterzellen. *wt Werkstattstechnik online* 98 (2008) 5, S. 384-390.

VOGL et al. 2004

Vogl, W.; Sitti, M.; Zäh, M.: Nanomanipulation with 3D Visual and Force Feedback. *Proceedings of 4th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO 2004)*. München, 16.08.-19.08.2004, S. 349- 351.

VOGL 2005

Vogl, W. Verfahren und Vorrichtung zum Einrichten einer Bahnkurve einer Robotervorrichtung (20.12.2005). DPMA. Pr.: DE102005060967B4. Verfahren und Vorrichtung zum Einrichten einer Bahnkurve einer Robotervorrichtung.

VOGL et al. 2006

Vogl, W.; Sitti, M.; Kai-Lam Ma, B.: Augmented Reality User Interface for an Atomic Force Microscope-Based Nanorobotic System. *IEEE Transactions on Nanotechnology* 5 (2006) 4, S. 397-406.

VOGL 2007

Vogl, W.: Patent DE102005060967B4 "Verfahren und Vorrichtung zum Einrichten einer Bahnkurve einer Robotervorrichtung" (Deutsches Prioritätsdatum 20.12.2005). Anmelder: Technische Universität München.

WAGNER & SCHMALSTIEG 2006

Wagner, D.; Schmalstieg, D.: Handheld Augmented Reality Displays. *Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality (VR 2006)*. Alexandria, VA / USA, 25.03.-29.03.2006, S. 321.

WAGNER 2005

Wagner, M.: Tracking with Multiple Sensors. Diss. TU München (2005).

WAKITA et al. 1998

Wakita, Y.; Hirai, S.; Hori, T.; Takada, R.; Kakikura, M.: Robot teaching using projection function. Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 1998), Bd 3. Victoria, BC / USA, 13.10.-17.10.1998, S. 1444 - 1449.

WAKITA et al. 1999

Wakita, Y.; Hirai, S.; Suehiro, T.: Request from Robot to Person in Information Sharing. Proceedings of the 8th IEEE Workshop on Robot and Human Interaction (RO-MAN 1999). Pisa, 27.09.-29.09.1999, S. 231-236.

WECK & DAMMERTZ 1997

Weck, M.; Dammertz, R.: Graphical Robot Programming and generation of application specific programming interfaces. Annals of the German Academic Society for Production Engineering, WGP-Annals IV (1997) 1, S. 87-91.

WECK & BRECHER 2006

Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen - Automatisierung von Maschinen und Anlagen. 6 Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-22507-2.

WEISER 1991

Weiser, M.: The Computer for the 21st Century. Scientific American 265 (1991) 3, S. 94-104.

WELLNER et al. 1993

Wellner, P.; Mackay, W.; Gold, R.: Special issue on computer augmented environments: back to the real world. Communications of the ACM 36 (1993) 7, S. 24-27.

WELLNER 1993

Wellner, P.: Interacting with Paper on the DigitalDesk. Communications of the ACM 36 (1993) 7, S. 87-96.

WÖRN et al. 2005

Wörn, H.; Aschke, M.; Kahrs, L.: New augmented reality and robotic based methods for head surgery. International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 1 (2005) 3, S. 49-56.

WTEC 2006

World Technology Evaluation Center Inc. (WTEC): WTEC Panel on Assessment of International Research and Development in Robotics - Final Report <[www.wtec.org/robotics/](http://www.wtec.org/robotics/)> - 20.01.2006.

XSENS 2008

Xsens Technologies B.V.: MTI - Miniature attitude and heading reference system <[http://www.xsens.com/en/products/machine\\_motion/mti.php](http://www.xsens.com/en/products/machine_motion/mti.php)> - 17.07.2008.

YAMASHITA & SAKANE 2001

Yamashita, M.; Sakane, S.: Adaptive Annotation Using a Human-Robot Interface System PARTNER. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2001). Seoul / Korea, 21.05.-26.05.2001, S. 2661-2667.

YOUNG & SHARLIN 2006

Young, J. E.; Sharlin, E.: Sharing Spaces with Robots: an Integrated Environment for Human-Robot Interaction. Proceedings of the 1st International Symposium on Intelligent Environments (ISIE 2006). Cambridge / England, 05-07.04.2006, S. 103-110.

ZÄH & MUNZERT 2008

Zäh, M.; Munzert, U.: A path planning system for remote-laser-welding. Production Engineering – Research and Development in Germany, Annals of the German Academic Society for Production Engineering (WGP) XV (2008) 4. (in Druck)

ZÄH et al. 2004a

Zäh, M. F.; Vogl, W.; Munzert, U.: Beschleunigte Programmierung von Industrierobotern: Augmented-Reality-Einsatz zur intuitiven Mensch-Maschine-Interaktion. wt Werkstattstechnik online 94 (2004) 9, S. 438-441.

ZÄH et al. 2004b

Zäh, M. F.; Munzert, U.; Vogl, W.: Augmented Reality - Einsatz zur intuitiven RC-Programmierung. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Tagungsband zum 3. Paderborner Workshop Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn, 17.-18.06.2004. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2004, S. 244-255. ISBN: 3-935433-58-1. (HNI-Verlagsschriftenreihe 149).

ZÄH et al. 2004c

Zäh, M. F.; Vogl, W.; Wunsch, G.; Munzert, U.: Virtuelle Inbetriebnahme im Regelkreis des Fabriklebenszyklus. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik. München, 23.09.2004. München: Utz 2004, S. 1-21. ISBN: 3-89675-074-7. (iwb Seminarberichte 74).

ZÄH et al. 2005a

Zäh, M. F.; Spitzweg, M.; Munzert, U.; Vogl, W.: Hardware-in-the-loop-Simulation in Virtual-Reality-Umgebungen. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn, 09.06.-10.06.2005. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2005, S. 221-236. ISBN: 0-387-25744-6. (HNI-Verlagsschriftenreihe 169).

ZÄH et al. 2005b

Zäh, M. F.; Vogl, W.; Munzert, U.; Spitzweg, M.: Augmented Reality - Benutzerschnittstelle für Industrieroboter. atp - Automatisierungstechnische Praxis 47 (2005) 11, S. 38-44.

ZÄH et al. 2005c

Zäh, M. F.; Vogl, W.; Patron, C.: Interaktive Planung von Produktionssystemen mittels Augmented Reality. wt Werkstatttechnik online 95 (2005) 9, S. 615-619.

ZÄH et al. 2005d

Zäh, M. F.; Spitzweg, M.; Munzert, U.; Vogl, W.: Realistic machine behaviour in virtual reality. Proceedings of Virtual Concept 2005. Biarritz / Frankreich, 08.11.-10.11.2005.



ZÄH et al. 2006

Zäh, M. F.; Vogl, W.; Patron, C.: Interaktive Laserprojektion zur Programmierung von Industrierobotern. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Tagungsband zum 5. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn, 31.05.-01.06.2006. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2006, S. 241-254. ISBN: 3-939350-07-9. (HNI-Verlagsschriftenreihe 188).

ZÄH & VOGL 2006

Zäh, M. F.; Vogl, W.: Interactive Laser Projection for Programming Industrial Robots. Proceedings of the 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2006). Santa Barbara, CA / USA, 22.10.-25.10.2006, S. 125-128.

ZAUNER et al. 2003

Zauner, J.; Haller, M.; Brandl, A.; Hartmann, W.: Authoring of a Mixed Reality Assembly Instructor for Hierarchical Structures. Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2003). Tokyo, 07.10.-10.10.2003, S. 237-246.

ZHAI et al. 1997

Zhai, S.; Milgram, P.; Rastogi, A.: Anisotropic Human Performance in Six Degree-of-Freedom Tracking: Evaluation of Three-Dimensional Display and Control Interfaces. Man and Cybernetics 27 (1997) 4, S. 518-528.

ZHANG & SUN 2005

Zhang, F.; Sun, H.: Dynamic labeling management in virtual and augmented environments. Proceedings of the 9th International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics (CAD-CG 2005). Hong Kong, 07.12.-10.12.2005, S. 397-402.

ZÖLLNER et al. 2005

Zöllner, R.; Rogalla, O.; Ehrenmann, M.; Dillmann, R.: Mapping Complex Tasks to Robots: Programming by Demonstration in Real-World Environments. In: Prassler, E. et al. (Hrsg.): Advances in Human-Robot Interaction. Berlin: Springer 2005, S. 119-136. ISBN: 3-540-23211-7. (Springer tracts in advanced robotics 14).

---

## 10 Anhang

### 10.1 Entwicklung der AR-Forschung

Die grundlegenden Ideen zu Augmented Reality gehen zurück auf die Arbeiten von Morton Heilig und Ivan Sutherland. HEILIG (1960) patentierte das Konzept einer am Gesicht angebrachten Anzeigemaske. SUTHERLAND (1968) griff diese Arbeiten auf und entwickelte das erste am Kopf getragene Anzeigesystem (engl.: Head-Mounted Display, HMD) für virtuelle, dreidimensionale Graphikobjekte. Durch eine halbdurchlässige optische Gestaltung konnten gleichzeitig sowohl das reale Umfeld, als auch eingeblendete, virtuelle Objekte betrachtet werden. Diese Arbeiten lieferten wesentliche Impulse für die Entstehung der Virtual-Reality-Technologie. Sie legten mit der Idee einer Verschmelzung von Realität und virtuellen Informationen auch die Grundlagen zur Entwicklung von Head-Up Displays für Piloten und für die spätere AR-Technologie (KALAWSKY 2004).

Weitere wichtige technologische und konzeptionelle Grundlagen für die Entwicklung der AR-Technologie lieferten die Forschungsarbeiten im Bereich virtueller Umgebungen (BURDEA & COIFFET 2003), der Telepräsenz (MILGRAM & KISHINO 1994) und der Bildverarbeitung (KLINKER et al. 1997). Das gleichzeitig zunehmend an Bedeutung gewinnende Paradigma des Ubiquitous Computing (WEISER 1991) verfolgte das Ziel einer nicht mehr nur auf Bildschirmarbeitsplätze beschränkten, sondern allgegenwärtigen, verschiedenste Lebensbereiche durchziehenden Informationsverarbeitung. Vor diesem Hintergrund entstand der Gedanke, eine situationsorientierte Informationsdarstellung in die reale Umgebung einzubetten.

Der Ausdruck „Augmented Reality“ selbst wurde durch Thomas P. Caudell und David W. Mizell geprägt, die bei der Firma Boeing den Einsatz von HMD zur interaktiven Führung von Werkern bei Montageaufgaben untersuchten (CAUDELL & MIZELL 1992). So entstanden in der ersten Hälfte der 1990er Jahre zahlreiche Arbeiten, die mit dem Einsatz von AR eine weiterführende Computerunterstützung für verschiedenste Domänen wie Montage (CAUDELL & MIZELL 1992), Wartung (FEINER & MACINTYRE 1993), Büroumgebungen (WELLNER et al. 1993), Chirurgie (LORENSEN et al. 1993) und Telerobotik (MILGRAM et al. 1993) verfolgten.

AZUMA (1997) gibt in einer weithin beachteten Literaturstudie und in dem darauf aufbauenden Komplement (AZUMA et al. 2001, AZUMA 2004) einen umfassenden Überblick über die Entwicklung des interdisziplinären Forschungsfeldes Augmented Reality, seiner technologischen Grundlagen und seiner Anwendungen. Neuere Kompendien fassen die technologischen Entwicklungen von AR-Bedienerschnittstellen im Allgemeinen (HALLER et al. 2006) und für projektionsbasierte Anzeigesysteme im Speziellen zusammen (BIMBER & RASKAR 2006).

Das bis Ende der 1990er stark akademisch geprägte Forschungsfeld Augmented Reality erfuhr in den vergangenen Jahren zunehmende Aufmerksamkeit im Hinblick auf industrielle Anwendungen. Der technische Stand von AR-Anwendungen für industrielle Domänen wie Produktion und Service wird aus Beiträgen von ALT (2003), FRIEDRICH & WOLGEMUTH (2004), REGENBRECHT et al. (2005) und PATRON (2005) ersichtlich.

## 10.2 Head-Mounted Displays (HMD)

### 10.2.1 Grundlagen und Bauarten

HMD können monoskopisch mit einer Bildquelle für ein Auge, biokular mit ebenfalls einer Bildquelle jedoch für zwei Augen sowie binokular mit zwei getrennten Bildquellen für je ein Auge ausgelegt sein (MELTZER & MOFFIT 1997). Bei biokularen HMD kann eine stereoskopische Darstellung mit zusätzlichen Mechanismen wie abwechselnder Abdunklung eines Auges (engl.: Shuttering) erreicht werden (PATRON 2005, S. 25), bei binokularen ist diese von Grund auf möglich.

Die optische Darstellung kann entweder mittels einer Vergrößerungsoptik erfolgen, welche ein Mikrodisplay in das Auge des Betrachters abbildet oder durch Projektion des Bildes auf eine halbdurchlässige Oberfläche vor dem Auge. Der Abstand der virtuellen Bildebene liegt dabei je nach Optik bis zu 1 m vom Auge des Betrachters für Anzeigen im Nahbereich und weiter bzw. unendlich entfernt für Anzeigen im Fernbereich (CAKMAKCI & ROLLAND 2006). Scannende Systeme wie das Retinal Projection Display projizieren ein Bild direkt auf die Retina des Menschen (UREY 2003).

Als Lichtquellen werden bei Mikrodisplays vor allem LED verwendet, bei scannenden Systemen Laserdioden und Laser. Realisierbare Leuchtdichten liegen im

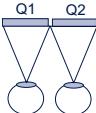
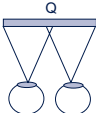
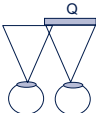
Bereich von 100-1000 cd/m<sup>2</sup> bei LED-Displays und circa 3000 cd/m<sup>2</sup> bei Displays mit Laserdioden. Im Vergleich dazu liegt die Leuchtdichte im Außenbereich bei 7000 – 40000 cd/m<sup>2</sup> (VELGER 1998).

Die absolute Auflösung von farbigen Mikrodisplays, das heißt die Anzahl der darstellbaren Bildpunkte liegt heute zwischen VGA-Standard bei normalen Geräten und XGA bei hochwertigen (ROLLAND & CAKMAKCI 2005). Das menschliche Auge kann physiologisch gesehen zwei Punkte bis hin zu einem minimalen Sehwinkelunterschied von 0.5 Bogenminuten als getrennt wahrnehmen (CURCIO et al. 1990), so dass Bildelemente eigentlich kleiner als diese Größe zu gestalten wären. In der Praxis der HMD-Gestaltung hat sich jedoch der etwas höhere Wert von einem Bildpunkt pro Bogenminute als ausreichend für die relative Auflösung bewährt (CAKMAKCI & ROLLAND 2006).

Das Field-of-View (FOV) beschreibt das Sichtfeld, welches ein Display über dem Auge des Betrachters aufspannt. Es wird durch dessen horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel charakterisiert. So misst das natürliche Sichtfeld des Menschen 200° in horizontaler und 150° in vertikaler Richtung (VELGER 1998, S. 50). CAKMAKCI & ROLLAND (2006) führen zahlreiche mobile AR-Anwendungen an, in denen HMD mit kleinem FOV bis 40° eingesetzt werden. Mittlere FOV liegen demnach bei 40° bis 60° und werden vorwiegend für Schulung und medizinische Anwendungen eingesetzt. Für Simulationsanwendungen, die eine hohe Immersion benötigen, sind FOV bis hin zu 120° realisierbar.

Es muss allerdings immer ein geeigneter Kompromiss zwischen Auflösung und FOV gefunden werden, da sich mit höherem FOV auch die Sehwinkel der einzelnen Bildpunkte vergrößern (PATRON 2005, S. 27). So erforderte ein Display, welches das gesamte Sichtfeld des Menschen (200°x150°) vollständig, mit einer hinreichenden relativen Auflösung von einem Bildpunkt pro Bogenminute abdeckt, 12000 x 9000 Bildpunkte. Die wichtigsten Eigenschaften heutiger HMD sind in der nachfolgenden Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11 Eigenschaften von Head-Mounted Displays

Charakteristika	Mögliche Ausprägungen
Lichtquelle	LED   Laserdioden   Laser
Umgebungssicht	Video See Through   Optical See-Through   reine Videobrille
Auflösung	VGA (640x480)   SVGA (800x600)   XGA (1280 x 1024)
Field of View (FOV)	niedrig (<40°)   mittel (40°-60°)   hoch (>60°)
Helligkeit	15 ... 5100 cd/m²
Virtuelle Bildebene	1m (Nahbereich) ... ∞ (Fernbereich)
Optisches System	Vergrößerungsoptik   Projektion
Bildquellenanordnung	<div>Monoskopisch   Biokular   Binokular</div> <div></div>
Gewicht	50 g ... 2.5 kg

10.2.2 Bewertung HMD-basierter AR-Ansätze

Bis heute sind HMD die wichtigsten Anzeigegeräte der AR-Technologie (BIMBER 2002, S. 1). Allerdings haben sie sich im Vergleich zu den ersten Geräten in den vergangenen 20 Jahren nur wenig weiterentwickelt (BIMBER 2002, S. 2). Sie weisen immer noch eine Vielzahl schwerwiegender technischer und ergonomischer Einschränkungen auf, die einen breiten, produktiven Einsatz weitgehend verhindern.

Das Tragen von HMD verändert die Sicht des Menschen auf seine Umgebung und schränkt deren Qualität, nach dem heutigen technischen Stand, merklich ein. Dies verursacht eine **unnatürliche Wahrnehmungssituation** für den Menschen und kann je nach Displaysystem zu Kopfschmerzen, Augenschmerzen, Schwindel und Übelkeit führen (PATTERSON et al. 2006). Hinsichtlich der Größe des Blickfeldes, der absoluten Auflösung und der Variabilität der Tiefendarstellung sind HMD-basierte Anzeigesysteme weit davon entfernt, ein äquivalentes Gegenstück zur Leistungsfähigkeit des menschlichen Sehens zu werden.

Videobrillen ersetzen die Sicht des Menschen vollständig durch synthetische, mit einer Kamera aufgenommene Bilder. Diese sind zum einen im Blickfeld beschränkt und deutlich niedriger aufgelöst als die natürliche Sicht, zum anderen sind sie aus einer abweichenden Perspektive aufgenommen, da die natürliche Blickposition des Auges immer von der des verwendeten Kamerasystems abweichen wird (CAKMAKCI & ROLLAND 2006). Dies beeinträchtigt die sensormotorischen Fähigkeiten, insbesondere die Hand-Auge-Koordination des Menschen, zum Teil sogar zeitlich über das eigentliche Tragen des HMD hinaus. Manipulationsaufgaben können damit nur langsamer und ungenauer ausgeführt werden. BIOCCA & ROLLAND (1998) haben in einer Studie Verlangsamungen um 44 % und mehr als 10 mm Ungenauigkeit festgestellt, wobei ein Teil der Effekte auch nach Ablegen des HMD noch nachweisbar war. Gerade eine exakte räumliche Feinmanipulation virtueller Objekte ist insofern nur schwer möglich (GIESLER et al. 2004a). Weiterhin weist PATRON (2005, S. 48) für den Einsatz in Produktionsumgebungen außerdem auf die verminderte Wahrnehmung von Gefahrenquellen hin. Optisch durchlässige HMD zeigen diesen Nachteil weniger stark, da die Sicht auf die reale Umgebung erhalten bleibt. Jedoch kann diese teilweise durch die halbtransparenten Anzeigeelemente vermindert oder durch Gehäuse verdeckt sein.

Für die Tiefenwahrnehmung des Menschen spielen mehrere, eng mit einander verzahnte Mechanismen ineinander (SCHOWENGERDT et al. 2003). Wenn der Mensch seinen Blick auf ein entferntes Objekt richtet, werden beide Augen so zueinander gedreht, dass das Bild eines fixierten Objektes bei beiden Augen in der Fovea, der höchstauflösenden Stelle der Netzhaut gesehen wird. Dieser Prozess heißt Konvergenz. Er gibt dem Gehirn über den Grad der Drehung der Augen zueinander einen Hinweis auf die Distanz des Objektes. Um das Bild eines betrachteten Gegenstandes auch scharf auf die Netzhaut abbilden zu können, verändern Muskeln im Auge zudem die Brennweite des Linsensystems. Dieser Prozess wird Akkomodation genannt und liefert über die Muskelspannung ebenfalls Informationen über den Abstand des fokussierten Objektes.

Akkomodation und Konvergenz sind direkt miteinander verbunden und sind bei natürlichem Sehen nicht voneinander zu trennen (SCHOWENGERDT et al. 2003). Die Bewegung des einen Mechanismus löst immer auch unmittelbar gleichgerichtet den anderen aus. Beim Blick durch ein HMD jedoch fokussiert der Betrachter auf die 2D-Anzeigefläche, das heißt die Akkomodation richtet sich auf den Abstand der virtuellen Bildebene hin aus. Gleichzeitig beinhaltet aber die, in den unterschiedlichen Bildern für das linke und rechte Auge enthaltene

Stereoinformation einen anderen, weiter oder näher entfernten Ort für die Ausrichtung der Augen durch Konvergenz. Die beiden Mechanismen liefern unterschiedliche Informationen, so dass eine Diskrepanz zwischen Konvergenz und Akkomodation auftritt (DRASIC & MILGRAM 1996). Dieser Effekt, von dem alle stereofähigen HMD betroffen sind, ist in Abbildung 66 dargestellt.

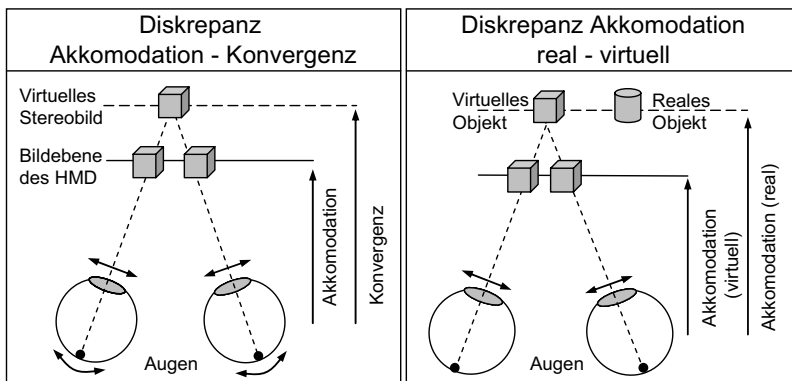


Abbildung 66 Tiefenwahrnehmung in HMD (DRASIC & MILGRAM 1996)

Zusätzlich tritt bei optisch durchlässigen Displays eine weitere Diskrepanz der Sehmechanismen auf, da sich die Akkomodation auf den tatsächlichen Abstand der fokussierten realen Objekte einstellt, gleichzeitig aber die virtuellen Objekte in einer festen Bildebene dargestellt werden. Dadurch können Größe, Tiefe und Distanz virtueller Objekte unter Umständen nicht korrekt wahrgenommen werden, und es kann zu Augenschmerzen und Unwohlsein kommen (PATTERSON et al. 2006). Eine Studie von ROLLAND et al. (2002) unterstreicht das Problem, dass virtuelle und reale Objekte trotz gleicher Distanz zum Betrachter in unterschiedlichen Abständen wahrgenommen werden. Gerade für Aufgaben, bei denen manuelle Manipulationen erforderlich sind, also Objekte in Armdistanz betrachtet werden, wären HMD mit variablen Fokusebenen notwendig (ROLLAND et al. 2000). Diese sind allerdings noch Gegenstand der Forschung und erfordern aufwändige optische Apparaturen und Tracking der Augen. Es gibt daher heute noch kein HMD, das Akkomodation und Konvergenz wie bei natürlichem Sehen unterstützt (CAKMAKCI & ROLLAND 2006).

Ein weiterer wichtiger Punkt für korrekte Tiefenwahrnehmung ist die wechselseitige Verdeckung virtueller und realer Objekte (Okklusion). VST-Verfahren können diese, sofern geometrische Modelle der realen Objekte im Sichtfeld vorhan-



den sind, pixelweise durch Einsatz von Tiefenkarten auflösen. Für OST-Displays ist dies weitaus schwieriger, so dass noch kein einsetzbares HMD existiert, das Okklusionen vollständig korrekt darstellen kann (ROLLAND & ÇAKMAKCI 2005).

Um die virtuellen Objekte räumlich registriert in das Blickfeld des Betrachters einblenden zu können, ist ein Tracking der Kopfposition notwendig (SUTHERLAND 1968). VELGER (1998) empfiehlt dafür Abstraten von mindestens 120 Hz und weist darauf hin, dass bei OST-Displays auch die Blickrichtung erfasst werden sollte, was sich innerhalb eines HMD als extrem schwierig darstellt (PATTERSON et al. 2006). Durch die bewegungsabhängige Darstellung können bereits sehr kleine Ungenauigkeiten des Trackings  $dX_{\text{HMD}}$  zu großen Abweichungen  $dX_{\text{Display}}$  in der Registrierung virtueller Objekt in der realen Umgebung führen (ECHTLER et al. 2003). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 67 dargestellt. HOFF & VINCENT (2000) stellten hierzu eine Methode zur Ermittlung des Fehlerzusammenhangs zwischen Tracking und Registrierung vor.

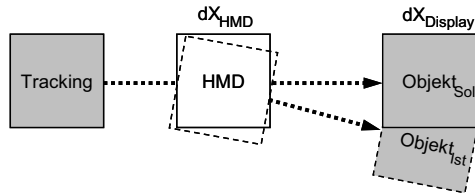


Abbildung 67 Zusammenhang von Trackingungenauigkeit und Registrierung

Um eine korrekte Überlagerung realer und virtueller Bilder zu erreichen, müssen neben den räumlichen Positionen auch die Abbildungseigenschaften der realen und der virtuellen Kamera möglichst genau einander angenähert werden. Dies ist bei VST-Displays vergleichsweise einfach durch Methoden der Bildverarbeitung möglich (KATO & BILLINGHURST 1999). Bei OST-Displays stellt das menschliche Auge die reale Kamera dar, so dass eine benutzerabhängige Kalibrierung notwendig ist (TUCERYAN et al. 2002), welche wiederum hohen Aufwand mit sich bringt (BIMBER & RASKAR 2006, S. 75).

Insgesamt sind HMD derzeit aus ergonomischen Gesichtspunkten als äußerst ungünstig zu beurteilen. Über die Einschränkung der Sicht hinaus ist auch der Tragekomfort durch das Gewicht der Displays und zusätzliche Verkabelungen als niedrig einzustufen, so dass der Benutzer durch das körpergebundene Anzeigerät in seiner Bewegungsfreiheit eingeschränkt ist (BIMBER 2002, S.33).

HMD stellen heute für die mobile textorientierte Datenanzeige, beispielsweise in der Logistik, eine Alternative zu Monitoren dar. Ebenso können sie für stationäre, hochanspruchsvolle Visualisierungsaufgaben bei kontrollierten Umgebungsbedingungen – wie in der computergestützten Chirurgie – erfolgreich eingesetzt werden. Für die Programmierung von Robotern müssen jedoch komplexe räumliche Informationen mit hoher Präzision dargestellt werden. Gleichzeitig sind durch den Einsatz in der Produktion hohe Anforderungen an Präzision, Robustheit, Ergonomie und Sicherheit zu erfüllen. Es ist dabei erforderlich, dass die AR-Technologie sich trotz stark variierender Umgebungsbedingungen robust und flexibel einsetzen lässt. Ein produktiver HMD-Einsatz im Umfeld der Industrierobotik erscheint deshalb auch in Zukunft nicht absehbar (ZÄH & VOGL 2006).

### 10.3 Verfahren der Positionserfassung

Trackingverfahren wurden in den vergangenen 30 Jahren vor allem im Bereich der Virtual Reality und in jüngerer Vergangenheit auch zunehmend für AR-Anwendungen entwickelt. Daneben wurde für Motion-Capture-Anwendungen in Film und Sportmedizin, in der industriellen Messtechnik und im militärischen Bereich an Trackingverfahren und -systemen gearbeitet. Ein Überblick der wesentlichen Trackingtechnologien für AR-Anwendungen wird von ROLLAND et al. (2001), BISHOP et al. (2001) und WAGNER (2005) gegeben. Die Verfahren der Positionserfassung sind in Abbildung 16 (siehe S. 44) nach ihrem Funktionsprinzip gegliedert. Die Einzelverfahren werden nachfolgend charakterisiert:

**Mechanische Positionserfassung** erfolgt über kinematische Strukturen, mit translatorischen und rotatorischen Gelenken, die mit Weg- und Winkelsensoren ausgestattet sind (SUTHERLAND 1968). Mechanisches Tracking ist robust, präzise und weist hohe Abtastraten auf. Gleichzeitig ist die Reichweite jedoch stark beschränkt. Beispiele finden sich in Eingabegeräten zur haptischen Interaktion (SENSABLE 2008) und zur manuellen Digitalisierung (IMMERSION 2007, FARO 2007a). Auch Industrieroboter können in diesem Sinne als mechanische Trackingsysteme verwendet werden (KAZI & BISCHOFF 2005).

Bei der **Laufzeitmessung** wird die Distanz zwischen einem Sender und einem Empfänger anhand der Zeit bestimmt, welche ein Signal bekannter Geschwindigkeit zum Zurücklegen der zu messenden Strecke benötigt. Durch Triangulation kann bei mehreren Sendern bzw. Empfängern eine räumliche Ortung erzielt werden. Akustische Ultraschalltracker (INTERSENSE 2007a) erzielen mit diesem

Prinzip eine relativ hohe Genauigkeit, im Bereich weniger Millimeter, und große Trackingräume. Sie sind jedoch zum Teil stöempfindlich gegen Umgebungsschall und begrenzt in ihrer Abtastrate (WAGNER 2005, S.25). Auch das satellitengestützte Global Positioning System (GPS) basiert auf einem analogen Prinzip, ist jedoch in der erzielbaren Positionsauflösung auch bei speziellen Verfahren wie Differential und Real-Time Kinematic GPS auf maximal mehrere Zentimeter begrenzt (TRIMBLE 2008).

Die **Massenträgheit** nutzen Trackingsysteme mit gyroskopischen Drehratensensoren (XSSENS 2008) und Beschleunigungssensoren (INTERSENSE 2007b) zur Messung von Beschleunigungen und ermitteln durch Integration daraus Orientierungs- bzw. Positionsänderungen. Sie ermöglichen eine hohe Auflösung und können durch Mikrosystemtechnik sehr kompakt gebaut werden. Das Fehlen einer absoluten Referenz führt allerdings über die Zeit zu kontinuierlichen Abweichungen der Messwerte (engl.: Drift), weshalb diese Sensoren vorwiegend in Kombination mit magnetischen oder optischen Systemen zur schnellen Erfassung von Lageänderungen eingesetzt werden.

**Elektromagnetische Systeme** messen die Feldstärke eines dafür erzeugten magnetischen Feldes und leiten daraus die Position des Sensors im Feld ab (ASCENSION 2007, POLHEMUS 2007). Damit können Genauigkeiten bis hin zu wenigen Millimetern, bei hohen Abtastraten erzielt werden. Als Einschränkungen sind der begrenzte Arbeitsraum dieser Systeme zu nennen und, im Hinblick auf einen Einsatz in industriellen Arbeitsumgebungen, die hohe Stöempfindlichkeit gegenüber metallischen Objekten (PATRON 2005, S. 29). Neben den genannten Systemen existieren noch Magnetsensoren, die analog zu Kompassen, die Orientierung in Bezug auf das Erdmagnetfeld ermitteln. Sie werden oft in Kombination mit Inertialsensoren (XSSENS 2008) eingesetzt.

**Bildverarbeitende Systeme** verwenden Kameras und Methoden der Bildverarbeitung, um die räumliche Beziehung zwischen Objekten der Umgebung und einer oder mehreren Kameras zu ermitteln (WAGNER 2005, S. 27). Dabei werden in der Regel an bekannten Positionen der Umgebung bzw. an den zu verfolgenden Objekten Referenzmarken (engl.: Marker) angebracht. Dies können entweder passive Marker sein, wie geometrische Muster (KATO & BILLINGHURST 1999, CLARON TECHNOLOGY 2007) und retroreflektierende Kugeln (ART 2007, OPTITRACK 2007) oder aktiv Licht aussendende Referenzmarken, wie LEDs (NDI 2007, REVXPERS 2008).

Aktive Systeme weisen, im Vergleich zu passiven, eine höhere Unempfindlichkeit gegenüber schwankenden Beleuchtungsverhältnissen auf, erfordern gleichzeitig aber eine Energieversorgung am zu lokalisierenden Objekt. Neben markerbasierten Verfahren werden auch modellbasierte Ansätze in zunehmender Robustheit und Geschwindigkeit verfügbar (LEPETIT & FUA 2005, REITMAYR & DRUMMOND 2006, LADIKOS et al. 2007). Diese bestimmen die räumliche Lage von Objekten nicht durch Marker, sondern über natürliche Merkmale, wie im Bild sichtbare Kanten.

Mittels theoretischer Modelle kann überdies die Genauigkeit optischer Systeme vorhergesagt und während der Messung beobachtet werden (BAUER et al. 2006). Gleichzeitig bieten sie für AR-Anwendungen die Möglichkeit, die aufgenommenen Bildinformationen für weitere Auswertungen und zur Visualisierung zu nutzen (KLINKER et al. 1997).

Bildverarbeitende Verfahren erlauben sehr hohe Genauigkeiten, zum Teil im Submillimeterbereich, bei skalierbaren Arbeitsräumen und hoher Mobilität. Einschränkungen durch Verdeckungen und Beleuchtungsschwankungen können durch eine geeignete Systemauslegung kompensiert werden. Optische Systeme haben sich daher in der industriellen Messtechnik weitgehend durchgesetzt und sind je nach System verhältnismäßig günstig realisierbar. In zahlreichen AR-Anwendungen, die für den Einsatz in der industriellen Produktion gedacht sind, sprechen sich verschiedene Autoren deshalb in Analysen für optische Trackingsysteme aus (REINHART & PATRON 2003, BISCHOFF & KAZI 2004a, ECHTLER et al. 2003, ZÄH et al. 2004b).

Sogenannte **Lasertracker** (LEICA 2007, FARO 2007b) verfolgen über Servomotoren mit einem Laserstrahl ein reflektierendes Messobjekt und bestimmen durch die Phasenverschiebung zwischen dem emittiertem und dem reflektierten Strahl den Abstand des Objektes von der Laserquelle. Durch die Stellungen der Servomotoren und den gemessenen Abstand können sie die Position des Messobjektes im Raum mit höchster Genauigkeit von wenigen Mikrometern auch über sehr große Entfernungen bis hin zu 70 m bestimmen. Zusätzlich können Interferometer zur Steigerung der Messgenauigkeit zum Einsatz kommen (FARO 2007b). Diese Klasse von Geräten wird vorwiegend in der industriellen Messtechnik eingesetzt und ist mit hohen Kosten verbunden. Die Verfolgung des Messobjektes erfordert eine permanente Sichtlinie bzw. durchgehende Ausrichtung des Messobjektes zum Basisgerät, so dass Lasertracker für den Einsatz als Eingabegerät in interaktiven Anwendungen eher ungeeignet sind.

**Hybride Trackingsysteme** schließlich kombinieren verschiedene Trackingverfahren und aggregieren die Messwerte der einzelnen Systeme durch Verfahren der Sensorfusion (WAGNER 2005, S. 29). Dabei werden entweder komplementäre Messungen kombiniert, redundante Messungen zur Überwachung des Messergebnisses genutzt oder ein enges Zusammenwirken der Sensoren angestrebt, um leistungsfähigere Gesamtsysteme zu erhalten. Der Ansatz der Sensorfusion wird vor allem für mobile AR-Anwendungen intensiv verfolgt.



# iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*  
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel  
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*  
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen  
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*  
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern  
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*  
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen  
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*  
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen  
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*  
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelmachbearbeitung  
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*  
Schneiderodierte Oberflächen  
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*  
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen  
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*  
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung  
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*  
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen  
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*  
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse  
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*  
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze  
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*  
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion  
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*  
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*  
Klipsmontage mit Industrierobotern  
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*  
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung  
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*  
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems  
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*  
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung  
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*  
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*  
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*  
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen  
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*  
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung  
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*  
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems  
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*  
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage  
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wiba, P.*  
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*  
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung  
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*  
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie  
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*  
**Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**  
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*  
**Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**  
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*  
**Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**  
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*  
**Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*  
**Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*  
**Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*  
**Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten**  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*  
**3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*  
**Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente**  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*  
**Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen**  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*  
**Dynamisches Verhalten von Kreissägen**  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*  
**Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile**  
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*  
**3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung · ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung**  
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*  
**Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme**  
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*  
**Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**  
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*  
**Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen**  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*  
**Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse**  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*  
**Integrierte Diagnose in Produktionszellen**  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*  
**Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*  
**Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schröder, N.*  
**Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*  
**Methoden zur rationalen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*  
**Laserbearbeitung mit Robotern**  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*  
**Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe**  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*  
**Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*  
**Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*  
**Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*  
**Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*  
**Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*  
**Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*  
**Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*  
**Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5



- 60 *Strohmayer, R.*  
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeinrichtungen**  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware**  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56689-5
- 62 *Stetter, R.*  
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboteinsatzes**  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*  
**Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*  
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen**  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*  
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung**  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*  
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme**  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*  
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
**Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
**Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen**  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
**Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*  
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*  
**Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion**  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindt, M.*  
**Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung**  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*  
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer flexiblen Fertigung**  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*  
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung**  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*  
**Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation**  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zah, M. F.*  
**Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen**  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*  
**Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung**  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*  
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen**  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen**  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung**  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen**  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement**  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
**Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen**  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen**  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*  
**Konzept einer integrierten Produktentwicklung**  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*  
**Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme**  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*  
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen**  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*  
**Recyclingintegrierte Produktentwicklung**  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*  
**Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte**  
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
**Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen**  
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
**Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren**  
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
**Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme**  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
**Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen**  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
**Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme**  
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*  
**Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie**  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
**Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**  
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
**Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten**  
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Kähler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten**  
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
**Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung**  
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
**Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem**  
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*  
**Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe**  
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
**Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen**  
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung**  
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
**Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service**  
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*  
**Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion**  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
**Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen**  
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
**Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung**  
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
**Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz**  
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
**Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse**  
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehrer, J.*  
**Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung**  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*  
**Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen**  
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*  
**Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung**  
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*  
**Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen**  
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*  
**Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen**  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
**Erfahrungsgleite Planung von Laseranlagen**  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

Seminarberichte iw b sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utz.de](mailto:info@utz.de)

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung  
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungs montage und zum Dichtmittelauftrag  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibel und schneller mit modernen Kooperationen  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Mod-  
ellbildung, Applikationsfelder  
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 Mechatronik · Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen  
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement  
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche  
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder  
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement  
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen  
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?  
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau  
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand  
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik · Vorsprung durch Simulation  
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten  
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

# Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprenzel, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
 2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian  
**Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen**  
 2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich  
**Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen**  
 2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof  
**Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss**  
 2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank  
**Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen**  
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael  
**Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme**  
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn  
**Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung**  
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert  
**Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben**  
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt  
**Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion**  
 2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich  
**Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung**  
 2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer  
**Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsender Montagesysteme**  
2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingner  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer  
**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**  
2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger  
**Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme**  
2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl  
**Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing**  
2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch  
**Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie**  
2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3



- 189 Thomas Mosandl  
**Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme**  
 2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron  
**Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung**  
 2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek  
**Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen**  
 2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer  
**Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen**  
 2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke  
**Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung**  
 2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried  
**Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern**  
 2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner  
**Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion**  
 2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich  
**Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen**  
 2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl  
**Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern**  
 2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann  
**Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge**  
 2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp  
**Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage**  
 2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz  
**Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme**  
 2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner  
**Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding**  
 2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein  
**Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation**  
 2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren  
**Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse**  
 2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf  
**Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie**  
 2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch  
**Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia**  
 2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer  
**Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage**  
 2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack  
**Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik**  
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff  
**Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion**  
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller  
**Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen**  
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler  
**Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme**  
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickenrieder  
**Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile**  
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller  
**Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme**  
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl  
**Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfabrbewegungen**  
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge  
**Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen**  
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wunsch  
**Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme**  
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli  
**Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben**  
2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold  
**Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage**  
2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis  
**Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains**  
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl  
**Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung**  
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig  
**Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten**  
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck  
**Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie**  
2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier  
**Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen**  
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl  
**Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns**  
2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller  
**Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets**  
2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner  
**Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie**  
2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann  
**Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen**  
2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy  
**Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry**  
2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl  
**Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern**  
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl  
**Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess**  
2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann  
**Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels**  
2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise  
**Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models**  
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht  
**Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten**  
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg  
**Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen**  
2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4

