

Wolfgang Vogl

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



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 228

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
Notation und physikalische Größen	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2 Robotereinsatz und -programmierung.....	7
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
3	Stand der Forschung und Technik	29
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
4	Anforderungsanalyse	61
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

5	Konzeption und Systementwurf.....	71
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 Geometrieerfassung.....	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
6	Umsetzung und Erprobung	117
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
7	Technische und wirtschaftliche Bewertung	147
7.1	Technische Bewertung	147
7.2	Wirtschaftliche Bewertung	149
8	Zusammenfassung und Ausblick	153
9	Literaturverzeichnis	157
10	Anhang	197
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 Anzeigegeräte	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 Geometrieermessung	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

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).

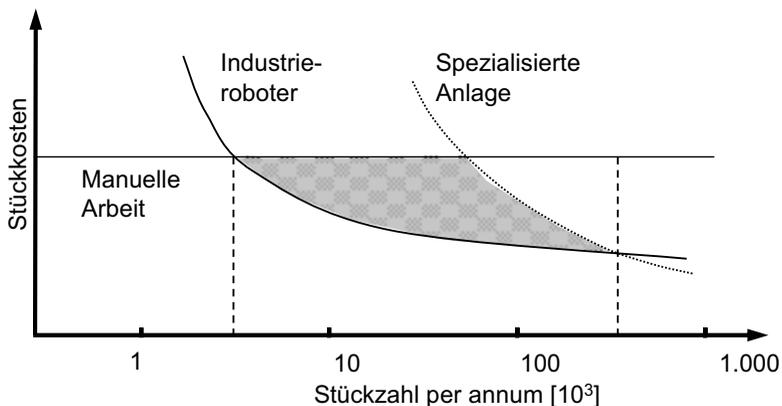


Abbildung 1 Wirtschaftlichkeit des Robotereinsatzes nach WTEC (2006)

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 Planungszintelligenz 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 (PETERSEN 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.

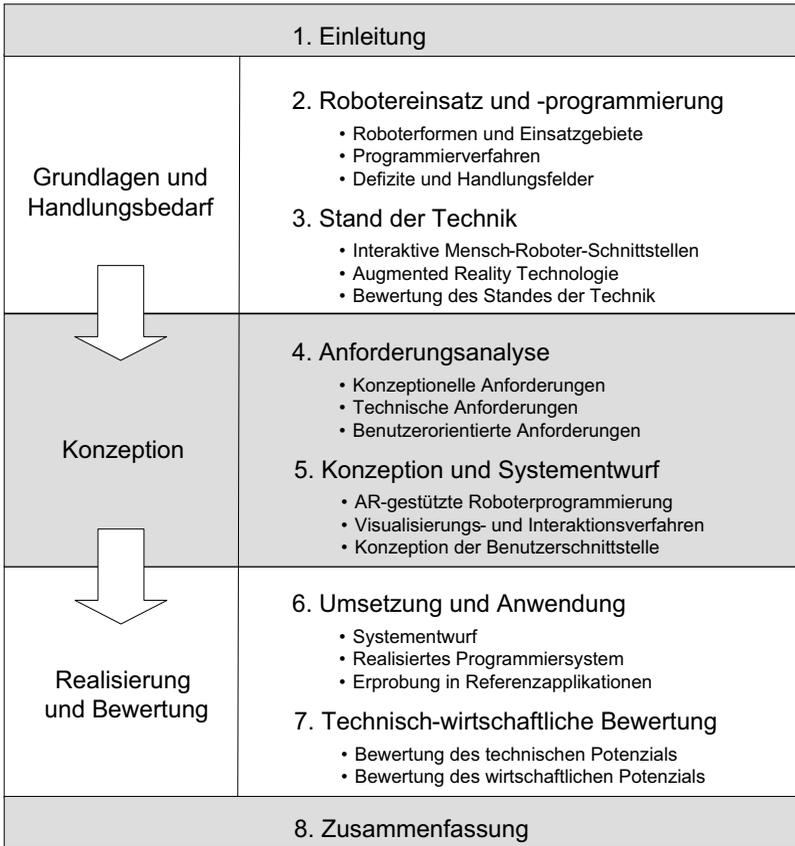


Abbildung 2 Aufbau der Arbeit

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 Roboter¹ 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.

¹ 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 sechsachsige 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.

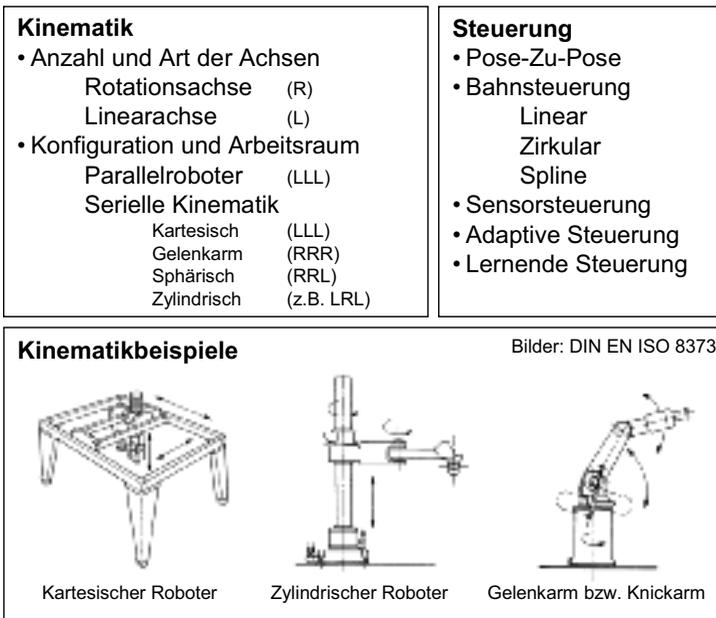


Abbildung 3 Einteilung von Industrierobotern

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.

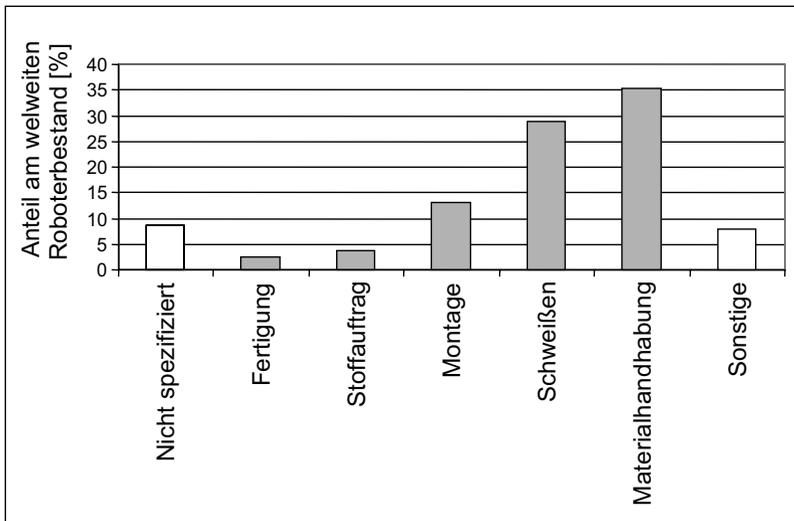


Abbildung 4 Verteilung auf Anwendungsklassen (IFR 2007, S. 41)

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 %.

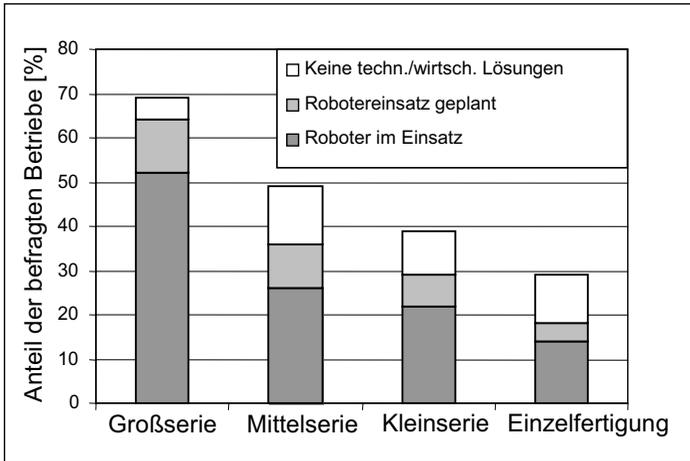


Abbildung 5 Robotereinsatz nach Losgröße (ARMBRUSTER et al. 2006a)

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-

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.

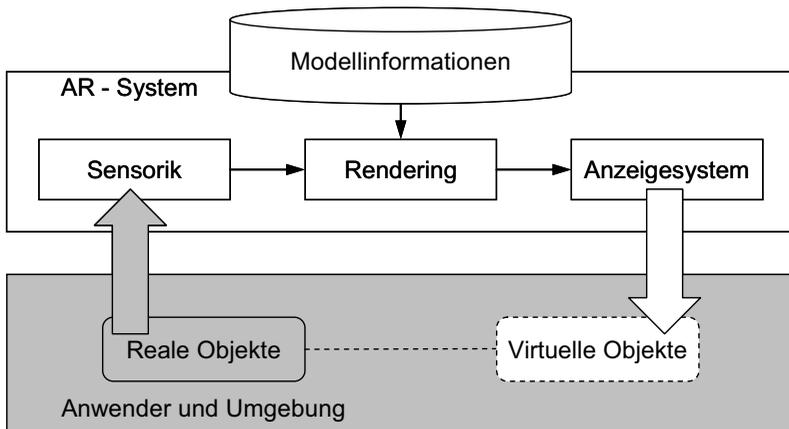


Abbildung 11 Funktionsprinzip von Augmented-Reality-Systemen

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 CAKMAKCI & 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.

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 Usability³ 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

³ 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.

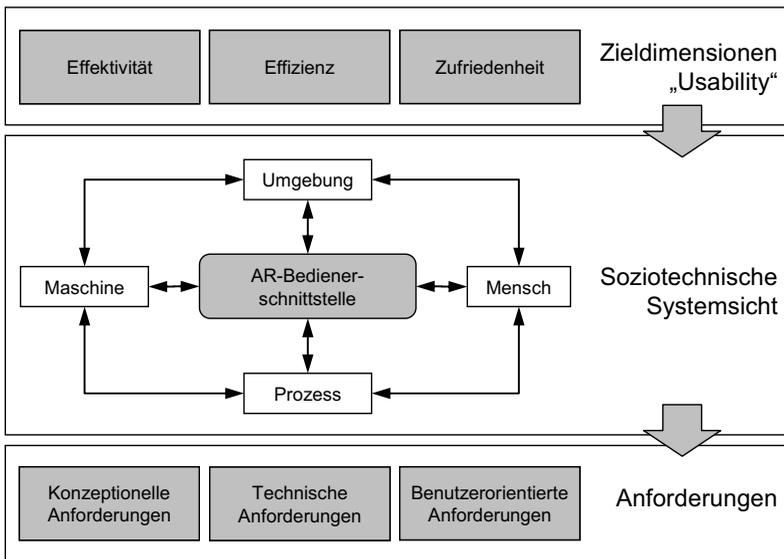


Abbildung 19 Zieldimensionen, Systemstruktur und Anforderungen

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.

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.

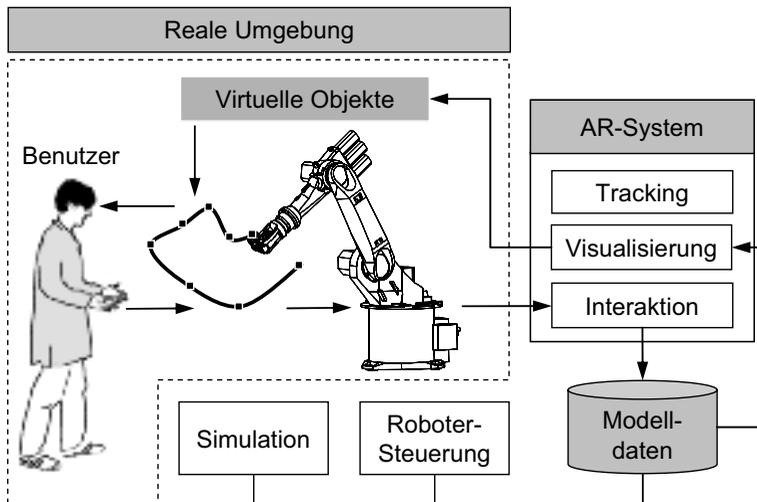


Abbildung 21 Prinzip der AR-gestützten Programmierung und Simulation

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.

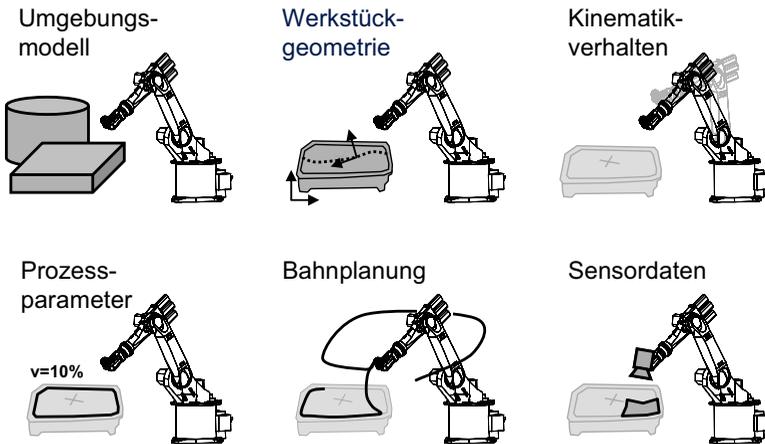


Abbildung 22 Überblick der mit AR visualisierbaren Informationen

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

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.

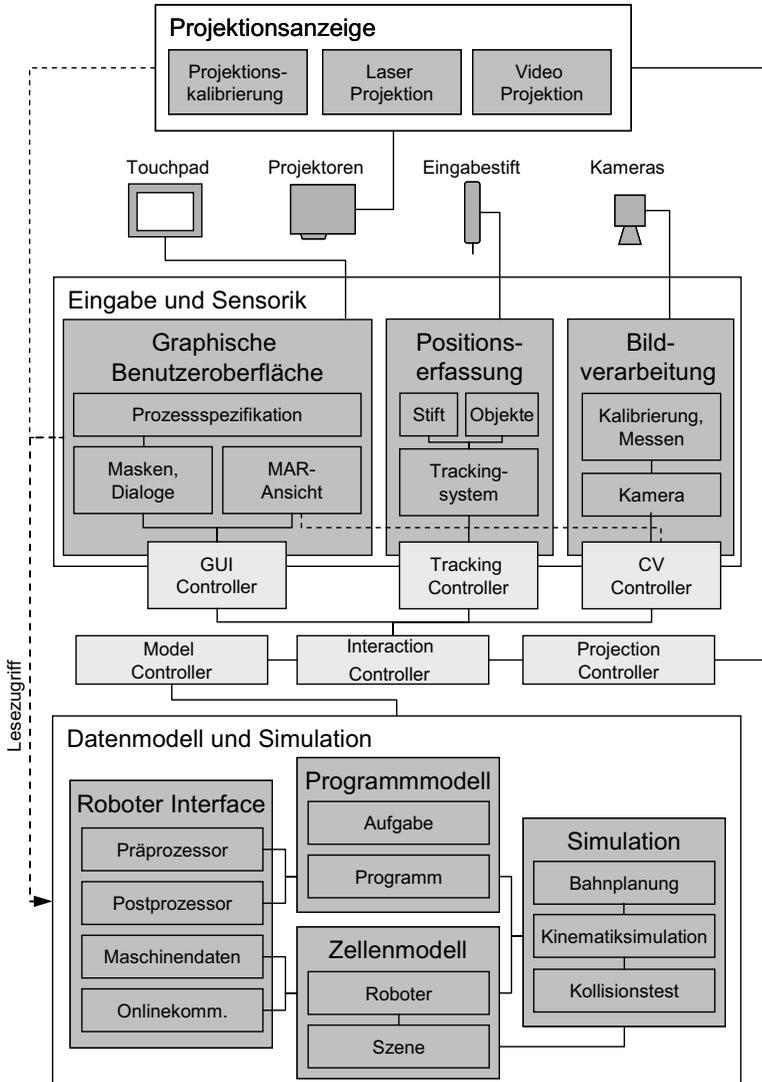


Abbildung 48 Übersicht des Systemaufbaus

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 Positionierung 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 ausgewählt 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 gesucht (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.

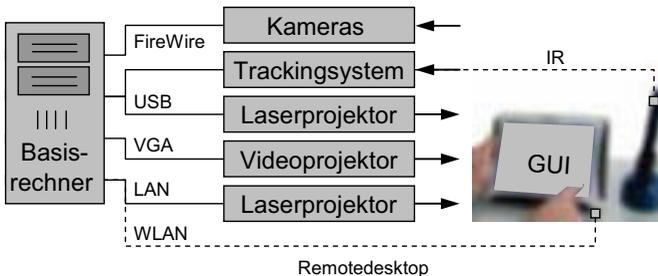


Abbildung 50 Anbindung der Geräte an das Basissystem

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 Programmdateien. 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 Modelldateien durchführbar. Reale Gegebenheiten können schnell und zielgerichtet im realen Umfeld modelliert werden können. Vorhandene Modell- und Programmdateien werden vor dem realen Umfeld verifiziert und angepasst, sowie im Sinne einer modellgestützten Programmierung in den Programmierstellungsprozess einbezogen. Dadurch entfällt ein maßgeblicher Teil des Aufwandes zur Erstellung und Anpassung von virtuellen Modellen und die Qualität der Modelldateien 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.

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-

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 Werkstatttechnik 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,

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), Bürumgebungen (WELLNER et al. 1993), Chirurgie (LORENSEN et al. 1993) und Telerobotik (MILGRAM et al. 1993) verfolgten.

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 Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderierte 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.*
Klippsmontage 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 *Saverer, 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 *Wrbn, 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 *Tuzcek, H.*
Inspektion von Karosserieteilen 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 3-540-54078-8
- 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 Programmabkaskens 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.*
Prozuntersuchungen 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 rationellen 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 Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glas, 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 *Bamm, 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 *Strohmayr, 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 Simulationwerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes
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 *Lindl, 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 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzner, 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 Produktionssystemen
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 *Rackland, 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 Ähnlichkeitsuche 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 *Koehler, J.*
Präzeorientierte 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.*
Erfahrungsgleitetete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, 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 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ins Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 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 Dichtungsmontage 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 **Lasert 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 - Flexibler 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 Modellbildung, 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 Kapselfür 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 Partnerverbänden
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 Sprengel, 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 Fahrer
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 Schraubverbindungen 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 telepräsenster 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-Gribsch
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 Schlickerrieder
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 Verfahrbewegungen
 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 Wünsch
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