





Lehrstuhl für  
Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

# Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung

## **Christian Patron**

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

## Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

## genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

### Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
  2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier,  
Universität-Gesamthochschule Paderborn

Die Dissertation wurde am 20.09.2004 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 30.11.2004 angenommen.



# ***Forschungsberichte***



***Band 190***

*Christian Patron*

***Konzept für den Einsatz  
von Augmented Reality  
in der Montageplanung***

---

*herausgegeben von*  
*Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh*  
*Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart*

---

*Herbert Utz Verlag*



## **Forschungsberichte iwb**

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh  
Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart  
Technische Universität München  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte  
bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2004

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2005

ISBN 3-8316-0474-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 – [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



## **Vorwort**

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

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart dem Vorstand für Technik und Marketing der IWKA Aktiengesellschaft und Herrn Univ.- Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier dem Leiter für Rechnerintegrierte Produktion am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des *iwb* sowie allen Studentinnen und Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Bei Herrn Dipl.-Ing. Peter Meier und Herrn Dr.-Ing. Thomas Alt bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit im Bereich industrieller AR-Anwendungen.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Ulrich Roßgoderer, Herrn Dr.-Ing. Hubert Götte, Herrn Dr.-Ing. Volker Weber, meinem Bruder Florian Patron und seiner Frau Sinje Patron für die aufmerksame und kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Bei meiner Freundin Dipl.-Ing. Claudia Valyi bedanke ich mich für Ihre Geduld und ihre Unterstützung. Ihre fachliche Expertise aus dem Bereich der Arbeits- und Zeitwirtschaft hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Meinen Eltern Anna und Günter Patron danke ich für die stetige und großzügige Förderung meiner Ausbildung. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

München, Januar 2005

*Christian Patron*



<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Situationsanalyse .....</b>	<b>5</b>
2.1	Begriffsbestimmung.....	5
2.2	Aufgaben und Ablauf der Montageplanung.....	6
2.3	Rechnerunterstützung in der Montageplanung .....	9
2.3.1	Modellierung von Montagesystemen .....	12
2.3.2	3D-Simulationssysteme in der Montageplanung.....	14
2.3.3	Interaktive Benutzerschnittstellen in der Montageplanung.....	15
2.4	Defizite und Handlungsfelder .....	17
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Augmented-Reality-Technologie .....</b>	<b>19</b>
3.1	Abgrenzung VR und AR.....	19
3.2	Funktionsprinzip eines AR-Systems .....	21
3.3	Aufbau und Komponenten eines AR-Systems.....	22
3.3.1	Visualisierungsverfahren .....	23
3.3.2	Head Mounted Displays (HMD).....	25
3.3.3	Verfahren zur Positionserfassung im Raum .....	28
3.3.4	Haptische und akustische Geräte .....	30
3.4	Anwendungen von AR im industriellen Umfeld.....	32
3.4.1	Produktentwicklung.....	32
3.4.2	Produktionsplanung.....	34
3.4.3	Fertigung .....	35

3.4.4	Service und Training.....	36
3.4.5	Weitere Anwendungen.....	38
3.4.6	Übersicht der bestehenden Ansätze .....	39
3.5	Fazit.....	40
<b>4</b>	<b>Anforderungen für den Einsatz in der Montageplanung.....</b>	<b>41</b>
4.1	Methodische Anforderungen an eine AR-Unterstützung.....	41
4.2	Technische Anforderungen an ein AR-System für die Montageplanung	43
4.2.1	Laufzeitverhalten und Systemperformance.....	43
4.2.2	Anforderungen an die AR-Hardware.....	44
4.2.3	Integration in Planungswerkzeuge.....	45
4.2.4	Anforderungen an die Systemflexibilität.....	46
4.2.5	Sicherheitsaspekte.....	48
4.2.6	Zusammenfassung .....	49
<b>5</b>	<b>Konzeption und Systementwurf .....</b>	<b>51</b>
5.1	Übersicht.....	51
5.2	Nutzenpotenziale und Einsatzbereiche.....	52
5.3	Augmented Reality zur Unterstützung der räumlichen Planung.....	58
5.3.1	Grundprinzip der AR-unterstützten Planung .....	58
5.3.2	Einordnung der Planungsaufgaben .....	60
5.3.3	Prinzipielles Vorgehen für die räumliche AR-Planung .....	61
5.3.3.1	Vorbereitung und Modellierung.....	62
5.3.3.2	AR-Visualisierung und interaktive Gestaltung.....	65
5.3.3.3	Bewertung und Dokumentation der Planungsergebnisse .....	69

5.4	Informationstechnische Unterstützung des Montagemitarbeiters.....	72
5.4.1	Grundprinzip der AR-Mitarbeiterunterstützung.....	73
5.4.2	Vorgehensweise zur AR-unterstützten Arbeitsunterweisung.....	75
5.4.2.1	Analyse der Arbeitsaufgabe .....	76
5.4.2.2	Vorbereitung des AR-Einsatzes.....	78
5.4.2.3	Ausführung der Montage mit AR-Unterstützung.....	80
5.4.2.4	Ergebniskontrolle und Verbesserung der Unterlagen.....	80
5.5	Gestaltung modularer AR-Hardwarekomponenten.....	81
5.5.1	Bewertung visueller Ausgabegeräte.....	81
5.5.2	Analyse von Visualisierungsverfahren.....	82
5.5.3	Bewertung der Trackingtechnologie .....	84
5.5.4	Analyse von Trackingverfahren.....	85
5.5.5	Bewertung zusätzlicher Eingabemöglichkeiten.....	87
5.5.6	Synthese der Hardwarekomponenten.....	88
5.6	Zusammenfassung .....	90
6	<b>Umsetzung und beispielhafte Anwendung.....</b>	<b>91</b>
6.1	Übersicht .....	91
6.2	Gestaltung und Aufbau der Systemarchitektur .....	91
6.3	Teilsystem: Modellierung .....	93
6.4	Teilsystem: Verwaltung und Speicherung .....	95
6.5	Teilsystem: AR-Visualisierung .....	96
6.5.1	Trackingmodul .....	97
6.5.2	AR-Visualisierungskomponente .....	98

6.5.3	Anwendungsmodule .....	98
6.6	Realisierung des Hardwareaufbaus .....	100
6.6.1	Biokulares AR-System mit mobilem Outside-In Tracking .....	101
6.6.2	Monokulares AR-System mit Inside-Out Tracking .....	103
6.7	Exemplarische Anwendung .....	105
6.7.1	Layoutplanung mithilfe von Augmented Reality .....	106
6.7.2	AR-basierte Planung manueller Arbeitsplätze .....	108
6.7.3	Erstellung AR-unterstützter Arbeitsanweisungen .....	110
<b>7</b>	<b>Technisch-wirtschaftliche Bewertung .....</b>	<b>113</b>
7.1	Technologische Bewertung .....	113
7.2	Wirtschaftliche Bewertung .....	115
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>119</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>121</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>140</b>
<b>11</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>143</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Innovationen sind Schlüsselfaktoren für ein nachhaltiges Wachstum und somit für die Standort- und Zukunftssicherung in Deutschland (MILBERG 2003). Neue Produkte und neue Geschäftssysteme, die durch innovative Technologien ermöglicht werden, verschaffen Unternehmen signifikante Wettbewerbsvorteile und sichern so ein Überleben im turbulenten Unternehmensumfeld. Die Generierung und Umsetzung von Innovationen ist die Voraussetzung für eine reaktionsschnelle, flexible und wirtschaftliche Produktionstechnik. Unternehmen, die am Standort Deutschland produzieren, sind gezwungen, neue Technologien stetig auf ihre Eignung zu überprüfen und gegebenenfalls in ihre Prozesse zu integrieren. Besonders wichtig ist die Realisierung von Innovationen in Kernbereichen der industriellen Produktion.

Einen derartigen Kernbereich stellt die Montage dar, welcher eine herausragende Bedeutung für das verarbeitende Gewerbe in Europa zukommt (FELDMANN 1997). Kaum ein anderer Bereich der industriellen Produktion hat einen derartigen Einfluss auf Produktqualität und Liefertreue (REINHART 2000). Als letztes Glied der Wertschöpfungskette, in dem alle Einzelteile eines Produktes zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem zusammengefügt werden, steht die Montage in einem außerordentlichen Spannungsfeld. Zum einen ist die Montage ein komplexer Prozess, der kostenintensive Anlagen und kostbare menschliche Arbeitsleistung erfordert. Zum anderen wirken sich zahlreiche Einflüsse des Unternehmensumfeldes besonders stark auf die Montage aus. Die zunehmende Produktkomplexität und hohe Variantenzahlen müssen von der Montage in immer kürzerer Zeit und bei steigenden Anforderungen an die Qualität bewältigt werden. Seit 20 Jahren besteht zudem der Trend sinkender Seriengrößen und immer kürzerer Produktlebenszyklen (LOTTER 2002, S. 1). Den enormen Anstieg möglicher Varianten zeigt ein Beispiel aus der Automobilindustrie. So ergibt sich bei der aktuellen 7er Baureihe von BMW eine rechnerische Möglichkeit von  $10^{17}$  unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen (BAUSE U. A. 2002, S. 3).

Durch die steigende Variantenzahl und die Integration von immer mehr elektrischen und elektronischen Komponenten erhöhen sich die Anforderungen,

welche an die Montagemitarbeiter gestellt werden. Diese müssen eine zunehmende Zahl an Arbeitsabläufen und Arbeitsinhalten beherrschen. So muss der Werker heute Prüfvorgänge von Bauteilen oder Qualitätsuntersuchungen direkt am Montagearbeitsplatz durchführen. Dies kann er nur dann erfolgreich tun, wenn ihm die dafür notwendigen Informationen zur richtigen Zeit und in der richtigen Qualität zur Verfügung gestellt werden.

Neben den steigenden Anforderungen für den Betrieb von Montagesystemen verschärfen sich auch die Randbedingungen der Montageplanung. Kürzere Produktlebenszyklen und schnellere Entwicklungs- und Innovationszyklen bedingen häufigere Neu- und Umplanungen (ZÄH U. A. 2003A). Durch den Einsatz rechnergestützter Simulationssysteme konnten in den letzten Jahren wesentliche Verbesserungen des Planungsprozesses erreicht werden. Der Aufwand für den Simulationseinsatz ist aber immer noch sehr hoch. Während in modernen Produktentwicklungsprozessen nahezu alle Bestandteile eines Produktes in digitaler Form vorliegen, ist dies für produktionstechnische Komponenten nur selten der Fall. Der Grund liegt zum einen darin, dass zahlreiche Produktionsstätten weit vor der Einführung von CAD-Systemen geplant und gebaut wurden. Bei Umbaumaßnahmen müssen die benötigten Daten daher aufwändig rekonstruiert werden. Zum anderen ändert sich das Produktionsumfeld ständig z. B. durch Änderungen vor Ort.

Der Aufwand, ein komplettes Modell eines Montagesystems bestehend aus den Anlagen, der Montageumgebung und den Produktdaten aufzubauen und stetig zu aktualisieren, ist daher sehr hoch. Für die 3D-Montageplanung beträgt der Aufwand für die Modellerstellung und Validierung bis zu 80% der Gesamtzeit für die Durchführung einer Simulationsstudie (WENDEROTH 2002). Viele Unternehmen setzen die rechnerunterstützte Planung daher nur für die Neuplanung ein und verzichten z. B. bei Umbauplanungen auf den Einsatz der Simulationstechnologie. Dies birgt erhebliche Risiken der Fehlplanung.

Damit die Wettbewerbssituation produzierender Unternehmen verbessert werden kann, bedarf es innovativer Ansätze um die Planungszeiten von Montagesystemen zu verkürzen. Insbesondere sind Lösungen gefordert, die zu einer Verbesserung der rechnergestützten Simulation beitragen und den Simulationseinsatz auch für Umbau- und Änderungsplanungen wirtschaftlich machen. Weiterhin gilt es, die Montagemitarbeiter effizienter informationstechnisch zu integrieren. Ein Lösungsansatz ist hier der Einsatz moderner Informations- und Kommunikationssysteme (REINHART 2003).

Eine neue Technologie, die für diese Einsatzbereiche Innovationspotenzial bietet, ist Augmented Reality (AR)<sup>1</sup>. AR ist eine neue Form der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI), die es erlaubt, die menschliche Wahrnehmung mit computergenerierten Informationen anzureichern (FRIEDRICH 2000). Mit AR wird es möglich, die Vorteile moderner Rechnersysteme mit der Flexibilität und dem Problemlösungspotenzial des Menschen zu kombinieren (ZÄH 2002). Dies eröffnet neue Möglichkeiten für die Rechnerunterstützung in der Montageplanung. Es ist die Aufgabe der produktionstechnischen Forschung, hierfür die notwendigen methodischen und technischen Grundlagen zu erarbeiten. Die folgende Arbeit soll hierzu einen Beitrag leisten.

## 1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Der effektive Einsatz neuer Technologien in der Produktionstechnik erfordert neue Ansätze und Systemkonzepte. Dementsprechend ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, ein grundlegendes Konzept für den Einsatz der Augmented-Reality-Technologie in der Montageplanung zu entwickeln. Die Zielsetzung schließt dabei die Konzeption entsprechender Hard- und Softwarelösungen ebenso ein, wie die Definition von Vorgehensweisen für die methodische Integration von AR in der Montageplanung. Mit dem Konzept soll ein Beitrag geleistet werden, die Planungszeiten weiter zu verkürzen und dabei die Qualität der Montageplanung zu erhöhen. Zudem sollen virtuelle Planungsinformationen effizienter bei der Realisierung und dem Anlauf von Montagesystemen genutzt werden. Ein weiteres Ziel ist es, traditionelle Methoden der informationstechnischen Integration von Montagemitarbeitern zu ersetzen und die Montage damit produktiver und flexibler zu gestalten.

Die Vorgehensweise, um die Zielsetzung der Arbeit zu erreichen, gliedert sich in drei Hauptabschnitte. Abbildung 1-1 zeigt die Gliederung der Arbeit.

**Kapitel 2** der vorliegenden Arbeit dient der Analyse der Ausgangssituation und führt in den aktuellen Stand der Technik im Bereich der Planung und Gestaltung von Montagesystemen ein. Hierzu werden die notwendigen Begriffe definiert, die Grundlagen der Montageplanung vorgestellt und der aktuelle Stand der Rechnerunterstützung beleuchtet. Das Kapitel 2 schließt mit einer

---

<sup>1</sup> Vgl. Definition und Begriffsabgrenzung in Abschnitt 3.1

Zusammenfassung der aktuellen Handlungsfelder in der Montageplanung. Da sich das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept auf den Einsatz der Augmented-Reality-Technologie stützt, werden deren Grundlagen detailliert im **Kapitel 3** betrachtet. Nach der Begriffsdefinition und -abgrenzung werden der Aufbau, die Komponenten und die Einsatzbereiche von AR vorgestellt. Es folgt die Auswertung bestehender Ansätze in der wissenschaftlichen Literatur. Das Kapitel 3 endet mit einer Zusammenfassung der aktuellen Defizite bekannter AR-Anwendungen. Die Betrachtung der Grundlagen der AR-Technologie spannt den Bogen für das **Kapitel 4** auf, in welchem die Anforderungen für den Einsatz der AR-Technologie in der Montageplanung definiert werden. Auf Basis dieser Anforderungen erfolgen die Konzeption und der Systementwurf in **Kapitel 5**. Das konzipierte Rechnersystem wird im **Kapitel 6** prototypisch umgesetzt und an Anwendungsbeispielen erprobt. Das **Kapitel 7** widmet sich der technisch-wirtschaftlichen Bewertung des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes. Im abschließenden **Kapitel 8** erfolgt die Zusammenfassung der Erkenntnisse. Des Weiteren wird ein Ausblick auf weitergehene Forschungsaktivitäten gewährt.

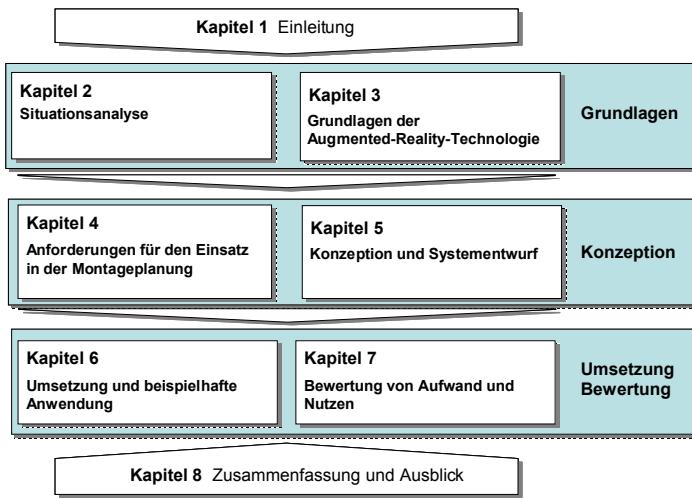


Abbildung 1-1: Gliederung der Arbeit

## 2 Situationsanalyse

Das folgende Kapitel dient der Analyse und Abgrenzung des betrachteten Anwendungsgebietes. Nach der Einführung in die wichtigsten Begriffe werden der Ablauf und die Aufgaben der Montageplanung vorgestellt. Den Schwerpunkt des Kapitels bildet die Betrachtung aktueller Ansätze der Rechnerunterstützung im Umfeld der Montageplanung. Abschließend werden die Defizite dieser Ansätze analysiert und der entsprechende Handlungsbedarf abgeleitet.

### 2.1 Begriffsbestimmung

Aufgabe der **Montage** ist der „Zusammenbau von Teilen oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen“ (VDI-2860, 1990). Die Montage umfasst somit alle Vorgänge, die notwendig sind, um ein in der Konstruktion definiertes Produkt aus entsprechenden Einzelteilen zusammenzubauen. Im Herstellungsprozess stellt die Montage den letzten Schritt vor der Auslieferung des Produktes an den Kunden dar.

Für die Montage eines Produktes müssen verschiedene Montagefunktionen durchgeführt werden. Diese können in **primäre und sekundäre Montagefunktionen** unterteilt werden. Synonym zu dem Begriff der Montagefunktion wird häufig auch der Begriff **Montageoperation** verwendet. Primäre Montagefunktionen tragen direkt zum Montagefortschritt und somit zur Wertschöpfung des Produktes bei. Hierzu zählen Funktionen, wie das Fügen von Bauteilen. Sekundäre Montagefunktionen sind zur Erfüllung der Montageaufgabe notwendig, dienen aber nicht direkt dem Montagefortschritt. Funktionen der Handhabung oder der Bauteilkontrolle können zu dieser Gruppe gezählt werden. Auch die Beschaffung von montagerelevanten Informationen kann als sekundäre Montagefunktion gewertet werden. Wird als Informationsmedium z. B. eine papierbasierte Arbeitsanweisung verwendet, muss sich der Mitarbeiter von der Montageaufgabe abwenden, die notwendigen Informationen nachschlagen und die Montageinformationen interpretieren (z. B. „Schraube M14 rechts anziehen“). Für eine derartige Arbeitsanweisung fallen daher unterschiedliche sekundäre Montagefunktionen an. Ziel einer wirtschaftlichen Montage ist eine größtmögliche Reduktion der sekundären Montagefunktionen. Abbildung 2-1 zeigt die hierarchische Gliederung der Montagefunktionen in Anlehnung an DIN 8593-3 (2003).

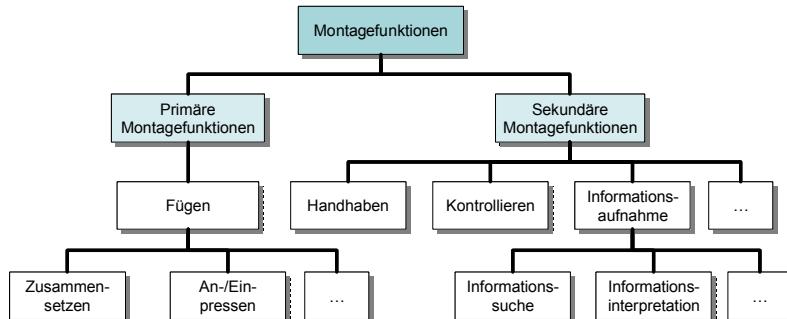


Abbildung 2-1: Gliederung der Montagefunktionen

Die Gesamtheit der einzelnen Montageoperationen, die für die Erfüllung der Montageaufgabe notwendig sind, definiert den **Montageablauf**. Einrichtungen zur Erfüllung der Montage werden als **Montageanlagen** bezeichnet. Nach JONAS (2000, S. 10) lassen sich Montageanlagen hierarchisch in Montagesysteme, Montagelinien, Montagezellen und Montagestationen gliedern.

## 2.2 Aufgaben und Ablauf der Montageplanung

Die **Montageplanung** hat die Aufgabe Montageanlagen und Montageabläufe zu entwerfen, mit denen die Montage eines Produktes möglich wird (GRUNWALD 2000, S. 11). Zusammen mit der Fertigungs- und Materialplanung bildet die Montageplanung einen Teilbereich der Arbeitsplanung (EVERSHEIM 1997). Die Arbeitsplanung umfasst alle Planungsaufgaben, die zur Fertigung eines Produktes erforderlich sind. Eine effiziente Montageplanung bedarf einer engen Kooperation mit der Produktentwicklung und zahlreichen anderen Unternehmensbereichen (u. a. Vertrieb, Personalwesen, Controlling, externe Zulieferer). Die Montageplanung ist daher über „ein kompliziertes Netz von Informationsflüssen in ihr Umfeld eingebunden“ (FELDMANN 1997, S. 6).

Aufgrund der Komplexität der Planungsaufgabe sind die Aufgaben der Montageplanung äußerst vielfältig. In der Literatur finden sich verschiedene Methoden, welche die Durchführung der Planungsaufgaben beschreiben. Bekannt sind hier u. a. Methoden nach BULLINGER (1986) oder REFA (1990), welche die Planung in sechs chronologische Phasen einteilen. Methoden, die eine stärkere Integration von Produktentwicklung und Montageplanung zum Ziel

haben, wurden u. a. von FELDMANN (1997), CUIPER (2000) und GRUNWALD (2000) vorgestellt. Eine Zusammenfassung der grundlegenden Arbeitsschritte und des prinzipiellen Vorgehens der Montageplanung ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen Planungsphasen nicht vollständig und auch nicht chronologisch durchlaufen werden müssen. Zudem gibt es Arbeitsaufgaben, die von der Montageplanung in regelmäßigen Abständen, d.h. auch unabhängig von aktuellen Planungsprojekten, durchgeführt werden. Hierzu zählen z. B. der kontinuierliche Verbesserungsprozess und die stetige Anpassung der Arbeitsunterlagen und der Betriebsmittel bei kleineren Produktänderungen.

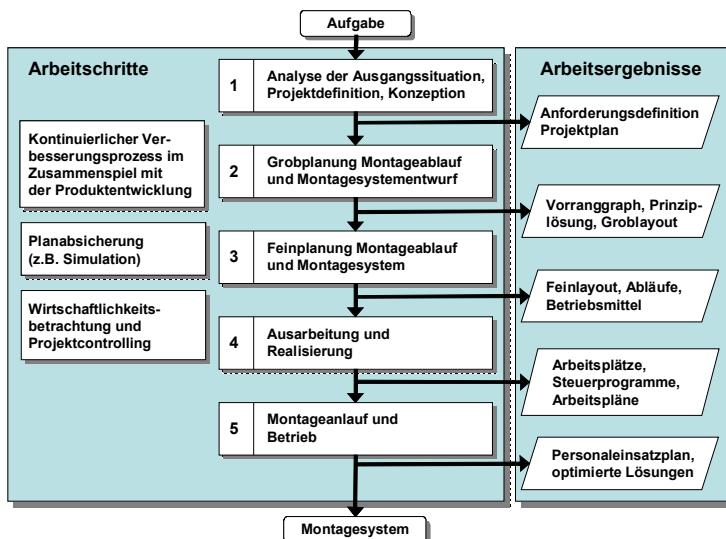


Abbildung 2-2: Vorgehen und Arbeitsschritte in der Montageplanung

### Analyse der Ausgangssituation

Bei der Analyse der Ausgangssituation werden die Rahmenbedingungen der Planung analysiert und lösungsneutral z. B. in einem Pflichtenheft festgehalten. Hierzu gilt es zunächst alle Eingangsinformationen der Montageplanung zu sammeln und zu strukturieren. Die Eingangsinformationen der Montageplanung sind äußerst umfangreich. Als Ausgangsbasis dienen Informationen über das zu montierende Produkt (z. B. Geometrie, Einzelteile, Stückzahl,

Fügeverbindungen), Informationen über bestehende Strukturen (z. B. Gebäude, Installationstechnik) und projektbezogene Informationen (z. B. Investitionsvolumen, Flexibilitätsbedarf, Zeitplan).

### **Grobplanung Montageablauf und Montagesystementwurf**

Bei der Grobplanung des Montageablaufes wird zunächst die Struktur des Montageablaufes erarbeitet. Die Struktur des Montageablaufes „verdeutlicht die Teilaufgaben der Montage und deren Aufeinanderfolge und dokumentiert, welche Freiheitsgrade bei der Montage eines Erzeugnisses vorliegen, also welche Teilaufgaben hintereinander ausgeführt werden müssen bzw. parallel ausführbar sind“ (BULLINGER 1986, S. 53). Die Montageablaufstruktur bildet die Basis für die Entwicklung von Entwürfen für die Gestaltung des Montagesystems. Teilschritt dieser Phase ist die Grobplanung des Montagelayouts. Unter dem Begriff **Layout** wird in diesem Zusammenhang die Anordnung anwendungsspezifischer Elemente in einem gegebenen Raum verstanden (HUCK 1990, S. 17). Die Planung des Montagelayouts umfasst demnach alle Aufgaben, die notwendig sind, um die für die Montage eines Produktes relevanten Komponenten unter Berücksichtigung der räumlichen Gegebenheiten anzutragen. Die Planung des Montagelayouts ist ein „komplexer aber auch kreativer Prozess“ (BULLINGER 1986, S. 187), bei dem der Planer zwischen zum Teil konkurrierenden Zielen abwählen muss. Eingangsinformationen der Layoutplanung sind z. B. Abmessungen von Maschinen, Informationen über den Materialfluss und Informationen über Gebäudeflächen und sonstige Restriktionen. Zielsetzung der Layoutplanung ist die Realisierung einer optimalen Raumaufteilung und die Sicherstellung eines günstigen Materialflusses.

### **Feinplanung des Montageablaufs und des Montagesystems**

In diesem Planungsschritt werden ausgewählte Betriebsmittel und andere Komponenten zu manuellen oder hybriden Montagestationen<sup>2</sup> zusammengestellt und der Montageablauf wird weiter detailliert. Hierbei sind auch ergonomische Fragestellungen zu berücksichtigen, wie z. B. die Einsehbarkeit des Montageortes, die leichte Erreichbarkeit von Montageteilen und eine möglichst geringe Belastung des Montagemitarbeiters. Für eine wirtschaftliche Montage

---

<sup>2</sup> Hybride Montagesysteme sind nur zum Teil automatisiert. Derartige Montagesysteme bestehen aus manuellen und automatisierten Komponenten (vgl. Lotter 1994, S. 195).

gilt es zudem, möglichst viele nicht wertschöpfende Tätigkeiten zu eliminieren. Weitere Kriterien einer günstigen Gestaltung sind minimale Greifwege, Griffgünstigkeit und Erreichbarkeit (BULLINGER 1986, S. 260). Weiterhin müssen Umfeldbelastungen wie Klima, Lärm, Licht, Staub oder Schwingungen bei der Planung berücksichtigt werden.

### **Ausarbeitung und Realisierung**

Ziel dieses Arbeitsschrittes ist die Erstellung aller Unterlagen und Programme zur Durchführung der Montage (JONAS 2000, S. 19). Hierzu zählen Arbeitsanweisungen, Steuerprogramme und Dokumente zur Störungsbehebung des Montagesystems. Ebenso müssen die Planungsergebnisse konstruktiv umgesetzt und aufgebaut werden.

### **Montageanlauf und Betrieb**

Die Phase des Montageanlaufs und des Betriebs bildet den Abschluss der Montageplanung und kennzeichnet den Übergang zum Serienbetrieb. Zielsetzung dieser Phase ist das möglichst schnelle Erreichen der geplanten Stückzahl und die umgehende Sicherstellung der Qualitätsanforderungen. Aufgrund der starken Turbulenzen im unternehmerischen Umfeld, kann heute keine scharfe Grenze mehr zwischen Serienbetreuung und Montageplanung gezogen werden. Häufige Produktänderungen und der starke Kostendruck führen zu einem stetigen Veränderungsprozess, bei dem alle Unternehmensbereiche kontinuierlich gefordert sind.

## **2.3 Rechnerunterstützung in der Montageplanung**

Rechnergestützte Werkzeuge können wesentlich zur Verbesserung von Entwicklungs- und Planungsprozessen beitragen (GAUSEMEIER U. A. 2000B). Durch den Einsatz rechnergestützter Planungswerkzeuge ist es möglich, unterschiedliche Planungsalternativen schneller zu erstellen und zu bewerten. Zudem werden Entwicklungs- und Planungstätigkeiten leichter verteilt- und verwaltbar. Weiterhin lässt sich die unternehmensinterne und -externe Zusammenarbeit deutlich verbessern.

Für die rechnergestützte Montageplanung lassen sich nach LOTTER (1994, S. 220) folgende Systeme unterscheiden:

- Montageplanerstellungs- und –verwaltungssysteme, z.B. Systeme zur Verwaltung von Produkt- und Betriebsmitteldaten.
- Auswahl- bzw. Beratungsprogramme, z.B. Katalogsysteme zur Auswahl von Handhabungsgeräten und Greifvorrichtungen.
- CAD-Systeme und CAD-ähnliche Programme, z.B. zur Konstruktion von Vorrichtungen oder zur Überprüfung einer montagegerechten Produktgestaltung.
- Berechnungs- und Simulationsprogramme, z.B. FEM-Programme zur Festigkeitsberechnung von Montagevorrichtungen oder 3D-Simulationssysteme zur Analyse komplexer Fügevorgänge.

Durch die zunehmende Parallelisierung von Entwicklungs- und Montageplanungstätigkeiten und die hierdurch bedingte stärkere Verknüpfung von Arbeitsprozessen sind zukünftig durchgängige Softwarelösungen für die rechnergestützte Produktionsplanung erforderlich. Diese werden aktuell unter Begriffen wie „**Digitale Fabrik**“ (LINNER U. A. 1999, GERHARD 2000, BLEY & FRANKE 2001, DOMBROWSKI U. A. 2001, WIENDAHL U. A. 2002, WESTKÄMPFER U. A. 2003) oder „**Virtuelle Produktion**“ diskutiert.

Nach REINHART U. A. (1999) bezeichnet die Virtuelle Produktion die durchgängige, experimentierfähige Abbildung von Produktionsprozessen und Fertigungsanlagen mithilfe digitaler Modelle. Ein **Modell** ist nach DIN 19226-1 (1994) die Projektion „eines Systems oder Prozesses in ein anderes begriffliches oder gegenständliches System, das aufgrund der Anwendung bekannter Gesetzmäßigkeiten, einer Identifikation oder auch getroffener Annahmen gewonnen wird und das System oder den Prozess bezüglich ausgewählter Fragestellungen hinreichend genau“ beschreibt. Als **Modellierung** wird der Prozess bezeichnet, der ein reales oder ein gedankliches System in ein Modell überführt. **Modellierungssysteme** dienen der Erstellung und Veränderung von Modellen und unterstützen so den Modellierungsprozess.

Modelle bilden die Grundlage für **Simulationssysteme**, welche es erlauben, die Eigenschaften komplexer Systeme vorherzusagen und zu analysieren. Als Entscheidungshilfe, Experimentierfeld und Dialogplattform (BERGBAUER 2002, S. 27) spielen Modelle eine herausragende Rolle in der rechnergestützten Planung. Damit der Anwender mit Modellierungs- und Simulationssystemen interagieren kann, ist eine **Bedienerschnittstelle** notwendig. Die bekannteste

Bedienerschnittstelle ist die eines herkömmlichen PCs mit Monitor, Maus, Tastatur und grafischer Benutzeroberfläche.

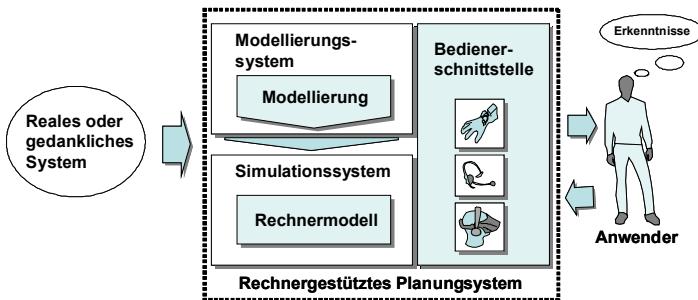


Abbildung 2-3: Modellierung und Simulation von Systemen

Abbildung 2-3 zeigt die Zusammenhänge beim Einsatz der rechnergestützten Simulation, wie sie dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Demnach wird ein gedankliches oder ein reales System mithilfe der Abstraktion vereinfacht und dann durch die Modellierung in ein Rechnermodell überführt. Um Simulationsexperimente durchzuführen, interagiert der Anwender ausschließlich mit dem Rechnermodell.

Alle gewonnenen Erkenntnisse sind daher von der Güte des Rechnermodells abhängig. Bildet das Rechnersystem die Eigenschaften des zu untersuchenden Systems nicht korrekt ab, sind auch resultierende Erkenntnisse wertlos. Falsche, ungenaue oder unvollständige Modelle führen zu Fehlplanungen und im Extremfall zur völligen Neuplanung von Produktionssystemen. Entscheidend für die Güte des Rechnermodells ist deswegen der Prozess der Modellierung.

Weiterhin kommt der Bedienerschnittstelle eine bedeutende Rolle zu, denn nur Eigenschaften eines Rechnermodells, welche dem Anwender auch über die Bedienerschnittstelle zugänglich sind, können zu entsprechenden Erkenntnissen führen.

Im Folgenden wird daher der Stand der Technik im Bereich der Modellierung von Montagesystemen und moderner Bedienerschnittstellen detaillierter betrachtet. Zudem wird beleuchtet, welche Funktionen von aktuell verfügbaren 3D-Simulationssystemen abgedeckt werden.

### 2.3.1 Modellierung von Montagesystemen

3D-Modelle beschreiben die geometrischen und kinematischen Verhältnisse eines Systems. Als „Basis für die Digitale Fabrik“ (WIENDAHL U. A. 2002) bilden 3D-Modelle die experimentierfähige Plattform für Studien der Raumverhältnisse und des Bewegungsverhaltens von Montageprozessen und –anlagen. Um ein Montagesystem vollständig zu beschreiben, müssen 3D-Modelle aller wesentlichen Teilkomponenten vorhanden sein. Teilmodelle sind hierbei:

- Modelle des Montageproduktes. Die Gestaltmodelle des Produktes werden in der Regel schon in der Produktentwicklung mithilfe von CAD-Systemen aufgebaut und können so für die Montageplanung übernommen werden.
- Modelle der Montageanlage, wie z. B. Handhabungsgeräte, Behälter, Fördertechnik und Arbeitsplätze. Die Bereitstellung dieser Modelle erfordert meist zusätzlichen Aufwand, da diese Modelle neu erstellt, oder aus Modellbibliotheken zusammengesetzt werden müssen.
- Modelle der Montageumgebung, wie z. B. Gebäudestrukturen, Versorgungstechnik oder angrenzende Anlagen. Diese Modelle müssen sehr aufwändig generiert oder nachkonstruiert werden. In der Regel liegen keine 3D-Modelle derartiger Strukturen vor. Zudem verändert sich die Produktionsumgebung ständig durch Umbaumaßnahmen, veränderte Anlieferwege oder Änderungen an der Versorgungstechnik.

Die Modellierung ist kein statischer Prozess. Ändern sich die Eigenschaften des Produktes, der geplanten Montageanlage oder der Montageumgebung, muss das entsprechende Modell aktualisiert werden. Für die Modellierung von Montagesystemen muss zudem eine Vielzahl von Informationen beschafft werden. So muss der Anwender für die Modellierung der Montageumgebung Daten über die Gebäude und die Versorgungstechnik von unterschiedlichsten Stellen einholen. Zum Teil müssen diese Informationen aber erst vor Ort erfasst werden. Dies bedeutet, dass bestehende Strukturen vermessen und dann mit CAD-Systemen nachkonstruiert werden. Es ist in der Praxis nicht unüblich, dass die mit einer Simulationsstudie beauftragten Planer zwischen dem Standort der zukünftigen Montageanlage und dem Planungsbüro pendeln, um Informationen vor Ort aufzunehmen.

Damit ein Modell aussagefähig ist, muss es ständig mit der Realität abgeglichen und gegebenenfalls korrigiert werden. Dies macht die Modellierung zu einem aufwändigen und komplexen Teilprozess, auf den in der Praxis der weitaus größte Zeitanteil entfällt. Abbildung 2-4 zeigt die Einordnung der Modellierung in den Ablauf der Simulationsdurchführung. Daraus ist ersichtlich, dass eine entscheidende Beschleunigung der Durchführung von Simulationsstudien dann erreicht werden kann, wenn es gelingt, den Regelkreis der Modellvalidierung zu verkürzen.

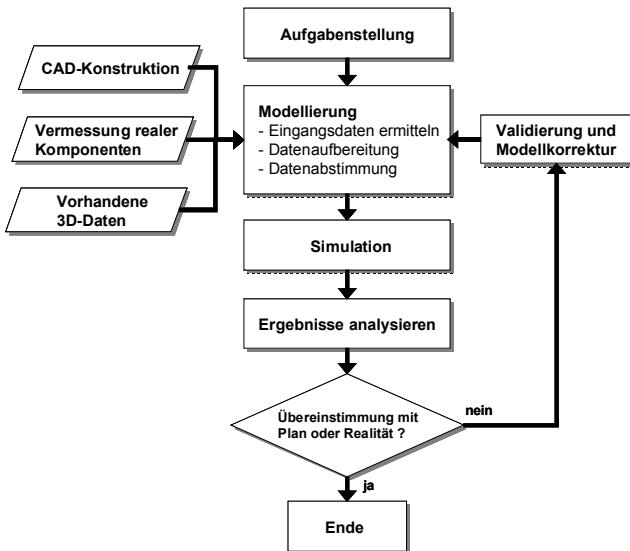


Abbildung 2-4: Einordnung der Modellierung in den Simulationsablauf

Für diese Problematik schlägt HEINZ (2001) den Einsatz eines Lasermesssystems zur Erfassung der realen Produktionsumgebung vor. Mithilfe eines Laserkopfes und eines rotierenden Spiegelsystems können mit dem vorgestellten Verfahren Millionen von Raumpunkten in wenigen Minuten erfasst werden. Die so gemessenen Punkte können als Punktewolke angezeigt und ausgegeben werden. Für die Rekonstruktion der entsprechenden 3D-Modelle ist aber ein sehr hoher Anteil manueller Nachbearbeitung notwenig (WESTKÄMPER U. A. 2001), da die automatische Generierung der Daten nur für einfache Flächen oder primitive Grundkörper durchgeführt werden kann. Das Verfahren vereinfacht aus diesem

Grund ausschließlich die manuelle Vermessung der realen Fertigungsumgebung. Die Modellierung im Sinne einer späteren Nutzung in 3D-Simulationssystemen wird nicht entscheidend beschleunigt.

### 2.3.2 3D-Simulationssysteme in der Montageplanung

3D-Simulationssysteme wie eM-Workplace, IGRIP, COSIMIR sind seit geraumer Zeit am Markt etabliert. Anwendungsgebiete der 3D-Simulation sind die Montage- und Demontagesimulationen, die Arbeitsplatzgestaltung, die Offline-Programmierung und die Layoutplanung. In aktuellen Forschungsarbeiten wird versucht, die Qualität der Simulationsergebnisse durch die Anbindung der 3D-Simulationssysteme an die Originalsteuerungssoftware oder an die reale Hardware-Steuerung (EHRENSTRÄBER U. A. 2002) zu verbessern. Von industrieller Seite wird die informationstechnische Integration der Simulationssysteme in den Planungsprozess vorangetrieben z. B. zur Kostenanalyse, zum Datenaustausch mit anderen Systemen und zur Dokumentation und Verwaltung von Prozessdaten. Die 3D-Simulationssysteme werden in der Montageplanung überwiegend für folgende Anwendungsgebiete eingesetzt:

- Kollisionsanalyse von Systemkomponenten (z. B. Kollisionen zwischen Betriebsmittel und Montageprodukt).
- Ermittlung des Raumbedarfs für Betriebsmittel, Montageprodukte, Menschen, Fördertechnik und Gebäudetechnik.
- Planung und Visualisierung des Anlagenlayouts.
- Gestaltung und Bewertung manueller Arbeitsplätze (Ergonomie, Einsehbarkeit, Unterstützung analytischer Bewertungsmethoden wie z. B. MTM).
- Visualisierung von Bewegungsabläufen, Anlagen und Gebäudetechnik.
- Offline-Programmierung von Robotern und anderen Handhabungseinrichtungen.
- Analyse und Bewertung von Montageabläufen (z. B. manuelle und automatische Fügevorgänge).

- Abstimmung und Gestaltung von Lösungsvarianten (z. B. Layoutvarianten).

Alle bekannten Anwendungen von 3D-Simulationssystemen setzen ein vollständiges 3D-Modell der Montageanlage voraus. Der Prozess der Modellierung wird lediglich durch die Bereitstellung geeigneter Importschnittstellen für CAD-Daten und Funktionen zur Platzierung und Veränderung von 3D-Geometrieobjekten unterstützt.

### 2.3.3 Interaktive Benutzerschnittstellen in der Montageplanung

Im Gegensatz zu herkömmlichen 3D-Simulationssystemen bieten Virtual-Reality-Systeme erweiterte Ein- bzw. Ausgabemöglichkeiten mit dem Ziel, den Anwender vollständig in eine computergenerierte Welt zu integrieren.

Wertet man die bestehenden Definitionen (FOLEY U. A. 1990, BURDEA & COIFFET 1994, BICKEL 1998, WEBER 1998, BARFIELD U. A. 1995, ZACHMANN 2000, RÖBLER 2001) aus, können als VR-System diejenigen Systeme bezeichnet werden, die einen Menschen in eine dynamische, computergenerierte Umgebung versetzen. Die drei Hauptmerkmale **Immersion**, **Interaktion** und **Simulation** lassen sich identifizieren. Der Grad der Immersion beschreibt das „Eintauchen“ des Benutzers in die synthetische Welt (BAUER 1997, S. 55). Die Interaktion erfolgt bei VR-Systemen im virtuellen Raum, d.h. in drei Dimensionen.

Durch die Unterstützung mehrerer Sinneswahrnehmungen des Menschen, z. B. der visuellen Wahrnehmung und des Tastsinns, kann die Immersion entscheidend gesteigert werden. Mithilfe der Simulation wird das dynamische Verhalten der virtuellen Welt abgebildet.

Den Charakter der Simulation beinhaltet sowohl die Virtuelle Realität wie auch die 3D-Simulation. VR-Systeme sind heute nicht mehr nur Gegenstand der Forschung. Es gibt bereits kommerzielle Systeme wie LIGHTNING, VirtualDesign 2, COVISE und Invision, die überwiegend in der Automobil- und Flugzeugindustrie eingesetzt werden. In der Literatur findet man eine Anzahl weiterer Systeme für folgende Bereiche:

- Konstruktion und Entwicklung (GAUSEMEIER U. A. 1998, ZIMMERMANN U. A. 1998, DEISINGER U. A. 2000)

- Montage (GOMES DE SÁ & BAACKE 1998, ZACHMANN 2000, JUNG U. A 2002, ROBGODERER 2002, ZÄH U. A 2003B)
- Teilefertigung (WEINERT U. A. 1998)
- Fabrik- und Anlagenplanung (GAUSEMEIER U. A. 2000A, BRACHT & FAHLBUSCH 2001)

Durch die verbesserten Ein- und Ausgabemöglichkeiten von VR-Systemen gegenüber herkömmlichen 3D-Systemen ergeben sich einige Vorteile für die Montageplanung. Zum einen ist es möglich, die Definition komplexer Bewegungsabläufe z. B. manueller Montagevorgänge schneller und realitätsnäher in ein Rechnermodell zu überführen. Entsprechende Ansätze wurden u. a. von HEGER (1998) und REINHART & ROBGODERER (1998) vorgestellt. Zudem werden durch die Immersion die Kommunikation und das Problemlösungspotenzial der Planungsbeteiligten unterstützt.

Durch eine multimediale Präsentation der virtuellen Umgebung, d.h. die Unterstützung mehrerer Sinne der menschlichen Wahrnehmung, ist auch eine VR-Unterstützung für die Unterweisung der Montagemitarbeiter in einer virtuellen Umgebung denkbar. Neben dem visuellen Sinn, muss hierfür insbesondere der Tastsinn des Menschen berücksichtigt werden. Als möglichen Lösungsansatz beschreibt KRAUSE U. A. (2002) ein VR-System zur Montage- bzw. Demontagesimulation. Die Interaktion wird durch haptische Geräte vom Typ PHANToM 3.0 unterstützt. Das von STEFFEN & KUHLEN (2001) vorgestellte VR-System MAESTRO (Multimodal Interaction Techniques for Assembly Simulation in Virtual Environments) dient zur interaktiven Montagesimulation. Für eine Kraftrückkopplung unterstützt dieses System ein haptisches Gerät vom Typ PHANToM 1.5. Mithilfe physikalischer Modelle und spezieller Interaktionseffekte, wie z. B. virtuellem Magnetismus, soll der Benutzer bei der Ausführung der Montageoperation im virtuellen Raum unterstützt werden.

Die Ansätze in der wissenschaftlichen Literatur zeigen, dass durch eine haptische Rückkopplung die Interaktion mit virtuellen Umgebungen verbessert werden kann. Es existiert allerdings kein Ansatz, welcher eine Rückkopplung von Kräften und Momenten an allen Stellen des menschlichen Bewegungsapparates zulassen würde. Eine realistische Unterweisung von Montagemitarbeitern, bei der auch die Fertigkeiten des Menschen berücksichtigt werden, ist demnach nicht möglich.

## **2.4 Defizite und Handlungsfelder**

Die Montageplanung ist ein komplexer Prozess, der das Zusammenwirken einer Vielzahl von Beteiligten und geeigneter Planungshilfsmittel bedarf. Ein leistungsfähiges Planungshilfsmittel ist die rechnergestützte Simulation. Allerdings können folgende Defizite bestehender Ansätze aufgezeigt werden:

### **Hoher Aufwand für die 3D-Modellierung von Montagesystemen**

Der Einsatz räumlicher Modelle in der Montageplanung ist nur dann wirtschaftlich, wenn der Aufwand für die Erstellung möglichst gering ist. Aktuelle Ansätze der Rechnerunterstützung erfordern eine vollständige 3D-Modellierung zu planender Montageanlagen. Für eine weitere Beschleunigung der Planung müssen Verfahren bereitgestellt werden, die entweder die Modellierung beschleunigen oder eine vollständige Modellierung vermeiden.

### **Mangelnder Abgleich zwischen Realität und Modell**

Die Aussagekraft von Simulationsmodellen hängt entscheidend von deren Aktualität ab. Da sich das Montageumfeld ständig ändert, ist der Aufwand für die Aktualisierung sehr hoch. Durch neue Verfahren oder Systeme für einen effizienten Abgleich von Planungsmodellen mit der Realität könnte die Planungsqualität verbessert und die Planungszeit verkürzt werden.

### **Unzureichende Bedienerschnittstellen zur Integration der Montagemitarbeiter in die Montageplanung**

Zwar kann die VR-Technologie als leistungsfähige Bedienerschnittstelle für die Montageplaner angesehen werden, für die notwendige Integration von Montagemitarbeitern in die Montageplanung ist sie aber nur bedingt geeignet. Insbesondere können bestehende Ansätze von VR-Umgebungen nicht im direkten Produktionsumfeld eingesetzt werden. Es besteht daher Handlungsbedarf, neuartige Bedienerschnittstellen bereitzustellen, die auch das Montagepersonal umfassend in den Informationsfluss der Montageplanung integrieren.

Um die genannten Handlungsfelder zu verbessern, bietet Augmented Reality (AR) hohes Einsatzpotenzial. Zum weiteren Verständnis der vorliegenden Arbeit werden im folgenden Kapitel die Grundlagen der Augmented-Reality-Technologie betrachtet.



### 3 Grundlagen der Augmented-Reality-Technologie

Die „erweiterte Realität“ (engl. Augmented Reality) ist eine neue Form der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI). Im folgenden Kapitel wird der Begriff Augmented Reality (AR) definiert und von dem Begriff der Virtuellen Realität (engl. Virtual Reality) abgegrenzt. Es folgt die Beschreibung des Funktionsprinzips und der Hauptkomponenten eines AR-Systems. Aufbauend auf der Darstellung der technischen Grundlagen werden anschließend bestehende Ansätze aus der wissenschaftlichen Literatur analysiert.

#### 3.1 Abgrenzung VR und AR

Der Begriff Augmented Reality wird in der wissenschaftlichen Literatur unterschiedlich definiert. Weit gefasste Definitionen bezeichnen mit Augmented Reality jegliche Überlagerung menschlicher Sinneswahrnehmungen mit computergenerierten Informationen (MILGRAM & COLQUHOUN 1999, TANG U. A. 2002). Diese Definition schließt sowohl die Überlagerung von visuellen, wie auch akustischen und haptischen Informationen ein. Ein AR-System ist demnach ein System, welches unterschiedliche Sinneskanäle aufnehmen, überlagern und wiedergeben kann. Nach AZUMA (1997) kann ein AR-System als solches bezeichnet werden, wenn es die folgenden Merkmale aufweist.

##### **Kombination von realer und virtueller Welt**

Der Anwender eines AR-Systems befindet sich in einer realen Umgebung und bekommt dort virtuelle Informationen situationsgerecht zur Verfügung gestellt. Dem Anwender wird so eine Kombination von realer und virtueller Welt präsentiert.

##### **Interaktivität und Echtzeitfähigkeit**

Die Interaktivität beinhaltet die Forderung, dass der Benutzer eines AR-Systems möglichst natürlich mit der AR-Umgebung interagieren kann, d.h. er ist in der Lage sowohl auf die dargestellten virtuellen Objekte wie auch auf die reale Umgebung einzuwirken. Um diese Forderung zu erfüllen, müssen AR-Systeme den Anwender stetig sensorisch erfassen z. B. seine Kopfbewegungen. AZUMA (1997) fordert zudem die Echtzeitfähigkeit von AR-Systemen, d.h. das

System muss auf Änderungen der Eingangsinformationen in einer definierten und möglichst kurzen Zeit reagieren.

#### Registrierung in drei Dimensionen

Als Registrierung wird in diesem Zusammenhang die Synchronisation zwischen virtuellen Objekten und Realität bezeichnet, um z. B. ein virtuelles Bauteil in der Einbaurage an einer realen Komponente zu visualisieren. Hierbei besteht die Forderung, dass virtuelle 3D-Objekte exakt und perspektivisch korrekt positioniert werden. Die 2D-Darstellung von Text innerhalb eines Videobildes stellt nach dieser Definition keine AR-Anwendung mehr dar.

AR und VR haben technologisch starke Ähnlichkeit, da beide Technologien Mensch-Maschine-Schnittstellen darstellen und auf verwandte Basistechnologien zurückgreifen. Der wesentliche Unterschied liegt in der Einbeziehung der Realität. Während das Ziel von VR die vollständige Nachbildung der Realität durch eine computergenerierte Welt ist, zielt AR auf die Integration von virtuellen Informationen in die Realität ab. Es besteht daher ein fließender Übergang von einer realen Umgebung bis zu einer rein virtuellen Umgebung. MILGRAM & COLQUHOUN (1999) bezeichnen diesen Bereich als Reality-Virtuality Continuum. Abbildung 3-1 zeigt schematisch das Reality-Virtuality-Continuum.

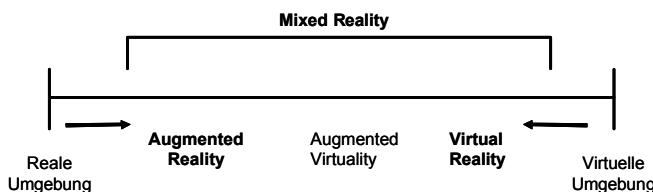


Abbildung 3-1: Abgrenzung von Augmented Reality nach MILGRAM

Überträgt man MILGRAMS Vorstellung eines Reality-Virtuality-Continuums auf die Produktionstechnik, so lässt sich eine grobe Zuordnung der VR und AR-Technologie zu dem Lebenszyklus eines Produktionssystems finden (REINHART & PATRON 2003). Die VR-Technologie kann demnach in Bereichen eingesetzt werden, in denen noch kein reales Produktionssystem existiert, z. B. in sehr frühen Phasen einer Neuplanung. AR hingegen lässt sich überwiegend Phasen zuordnen, in denen Teile der Anlage oder der Produkte real existieren.

## 3.2 Funktionsprinzip eines AR-Systems

Die Aufgabe eines AR-Systems ist es, die reale Umgebung mit computergenerierten Informationen anzureichern und auf diese Art die Wahrnehmung des Menschen zu „erweitern“ (FRIEDRICH 2004, S. 13). Der Anwender kann so Informationen aufnehmen, die sonst ausserhalb seiner sensorischen Fähigkeiten liegen würden (SZALAVÁRI 1999, S. 1). Um Informationen mit der Realität zu überlagern, muss die reale Umgebung zunächst erfasst und analysiert werden. Für die Erfassung wird überwiegend technische Sensorik eingesetzt, z. B. eine Videokamera. Damit Informationen situations- und lagegerecht überlagert werden können, erfolgt anschließend eine Analyse der gewonnenen Daten der realen Umgebung, z. B. wird die räumliche Lage eines Objektes aufgrund der Analyse zuvor erfasster Videodaten ermittelt. Die Analyseinformationen können weiterhin genutzt werden, um die computergenerierten Informationen vor der Mischung anzupassen. Bei einer Überlagerung von 3D-Objekten wird die Blickrichtung des grafischen Modells derart angepasst, dass die Daten perspektivisch dem realen Bild entsprechen. Anschließend erfolgt die Mischung von realen und virtuellen Informationen. In einem letzten Schritt werden die überlagerten Informationen dem Benutzer präsentiert. Der Benutzer kann durch seine Interaktion sowohl auf die reale Umgebung wie auch auf die computergenerierten Informationen einwirken. Abbildung 3-2 zeigt das allgemeine Funktionsprinzip eines AR-Systems.

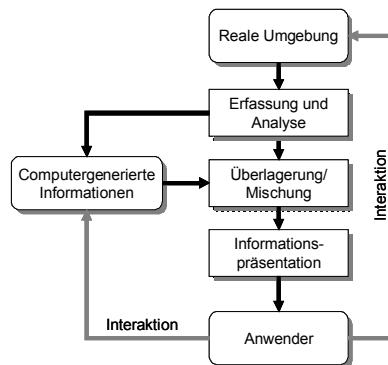


Abbildung 3-2: Funktionsprinzip eines Augmented-Reality-Systems

### 3.3 Aufbau und Komponenten eines AR-Systems

Damit AR-Systeme ihre Funktion erfüllen können, sind unterschiedliche technische Komponenten erforderlich. Es können folgende Hauptkomponenten eines AR-Systems identifiziert werden: Aufnahmegeräte, ein Datenhaltungssystem, ein Positionserfassungssystem (engl. Trackingsystem), der Renderer<sup>3</sup>, der Mischer und Ausgabegeräte. Abbildung 3-3 zeigt den Aufbau und die Hauptkomponenten eines AR-Systems.

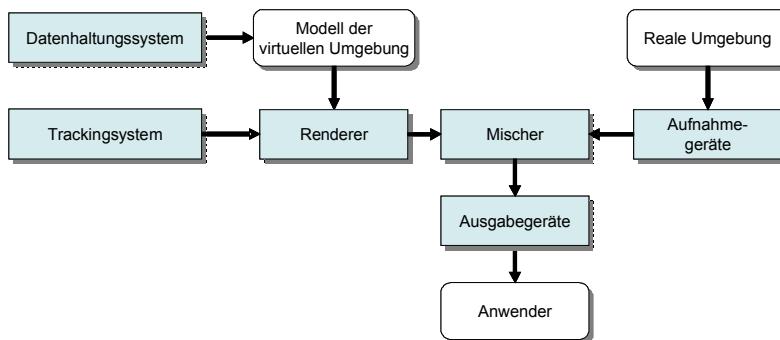


Abbildung 3-3: Aufbau und Komponenten eines AR-Systems

Die Aufnahmegeräte haben die Aufgabe die reale Umgebung mithilfe technischer Sensorik zu erfassen. Für visuelle AR-Systeme werden hierzu überwiegend Kamerasysteme eingesetzt. Für die Erzeugung der computergenerierten Informationen wird weiterhin ein Datenhaltungssystem benötigt, welches relevante Informationen (z. B. Geometriedaten von Objekten) zur Verfügung stellt. Auf Basis dieser Eingangsdaten wird ein Modell einer virtuellen Umgebung aufgebaut. Das Modell bildet die grafischen Eigenschaften der virtuellen Objekte ab, z. B. Lage und Orientierung, Verhalten, Farbe und Oberflächen. Der Renderer erzeugt auf Basis der Modelldaten ein perspektivisches Bild der virtuellen Umgebung. Als Eingangsinformation benötigt der Renderer die Daten des Trackingsystems. Das Trackingsystem liefert Informationen über die Lage des Anwenders im Raum oder im Bezug zu

---

<sup>3</sup> Als grafisches Rendering wird der Prozess bezeichnet, der auf Basis eines Geometrie- und Beleuchtungsmodells ein 2D-Pixelbild erzeugt (vgl. Banerjee 2001, S.46).

realen Objekten. Mithilfe der Trackinginformationen kann der Renderer ein lagegerechtes Bild der virtuellen Umgebung erzeugen. Der Mischer fügt das reale Bild und das erzeugte virtuelle Bild zusammen. Das so generierte AR-Bild wird über Ausgabegeräte, wie z. B. eine Datenbrille angezeigt.

Die Hauptkomponenten können je nach Anwendungsfall durch verschiedene technische Systeme realisiert werden. Es ist aber auch möglich, dass ein technisches System die Funktionen unterschiedlicher Hauptkomponenten realisiert. Bei vielen AR-Systemen werden beispielsweise der Renderer und der Mischer als gemeinsames Softwaresystem umgesetzt. Eine Funktionsintegration stellt auch die Verwendung einer halb durchlässigen Datenbrille dar. Hier wird der Mischer in das Ausgabegerät integriert. Ein Aufnahmegerät entfällt hierbei. Einige AR-Systeme nutzen die von den Aufnahmegeräten gelieferten Daten als Eingangsinformation für die Positionserfassung. In diesem Fall ist das Trackingsystem eine Softwarekomponente, die z. B. ein aufgenommenes Videobild als Eingangsinformation verarbeitet.

Aufgrund der vielfältigen Kombinations- und Integrationsmöglichkeiten der Einzelkomponenten werden die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen technischen Grundlagen im Folgenden aus funktionaler Sicht strukturiert und vorgestellt. Die Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2 widmen sich dabei der AR-Visualisierung. Hierzu werden im Abschnitt 3.3.1 die unterschiedlichen Visualisierungsverfahren vorgestellt. Der Abschnitt 3.3.2 erläutert anschließend die technischen Aspekte kopfgetragener Anzeigegeräte, sogenannter Head Mounted Displays (HMDs). Eine wichtige Funktion eines AR-Systems ist die Positionserfassung. Entsprechende Verfahren hierzu werden im Abschnitt 3.3.3 vorgestellt. Für die Interaktion mit dem AR-System sind zusätzliche Ein- und Ausgabegeräte erforderlich. Im Abschnitt 3.3.4 werden aus diesem Grund die Möglichkeiten einer haptischen und akustischen Ein- bzw. Ausgabe näher beleuchtet.

#### 3.3.1 Visualisierungsverfahren

Um virtuelle Objekte in eine reale Umgebung einzublenden, sind unterschiedliche Systemkonfigurationen denkbar. Die am häufigsten verwendeten Verfahren sind Video See-Through (VST), Optical See-Through (OST), Projective-AR (PAR) und Monitorbasierte Systeme (MAR) (vgl. Abbildung 3-4).

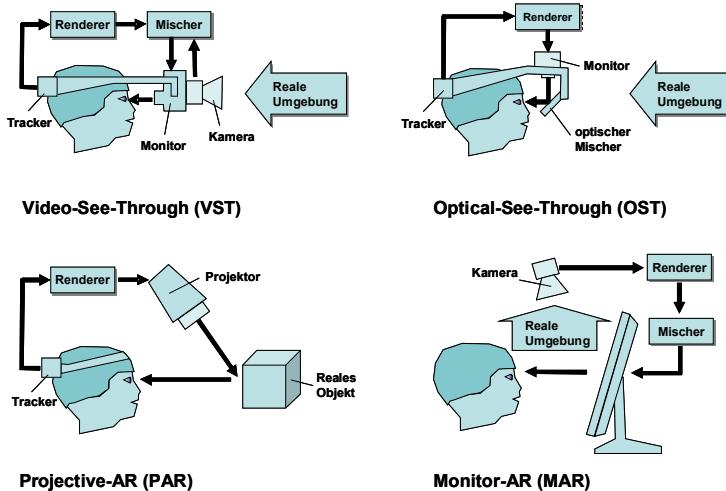


Abbildung 3-4: Verfahren zur visuellen Überlagerung von Informationen

Das einfachste Verfahren ist das MAR-Verfahren. Eine Videokamera nimmt hierzu kontinuierlich Bilder der realen Umgebung auf. Über eine digitale Mischung werden die Bilddaten mit Informationen angereichert und das Bild anschließend auf einem Computermonitor angezeigt. Derartige Systeme sind einfach und kostengünstig zu realisieren. Allerdings ist die Auflösung des Systems durch die Videokamera und den Monitor beschränkt. Die größte Einschränkung monitorbasierter Systeme ist die fehlende Immersion, da die reale Welt über eine vergleichsweise kleine Visualisierungsfläche betrachtet wird und die Blickrichtung des Betrachters nicht dynamisch an die Richtung der Kamera und die Ausrichtung des Bildschirms angepasst wird. Um die Immersion zu verbessern, eignen sich kopfgetragene Anzeigegeräte, so genannte Head mounted Displays (HMD), welche bereits 1968 von SUTHERLAND (1968) vorgestellt wurden. Das VST und OST-Verfahren verwenden Head-Mounted Displays zur Visualisierung. Beim VST-Verfahren wird die reale Umgebung über eine oder zwei Kameras, die am HMD befestigt sind, aufgenommen und über das HMD angezeigt. Sowohl beim MAR wie auch beim VST-Verfahren besteht ein Zeitverzug zwischen der Aufnahme des Videobildes, der Verarbeitung der Videodaten und der Anzeige. Optical See-Through-Systeme weisen diesen Nachteil nicht auf. Bei OST-Systemen wird ein halb durchlässiges HMD verwendet. Die reale Umgebung wird daher ohne Zeitverzug und ohne

Einschränkungen bei der Auflösung wahrgenommen. Die digitalen Informationen werden in das halb durchlässige HMD eingeblendet und überlagern so die Realität. Die Auflösung und Visualisierungsgeschwindigkeit der virtuellen Objekte hängen allerdings nach wie vor von der Geschwindigkeit des Rechnersystems ab. Daher besteht bei OST-Systemen eine Latenzzeit, d.h. ein Zeitverzug zwischen dem realen und dem virtuellen Bild.

Bei dem Projective-AR (PAR) Verfahren werden die digitalen Informationen direkt auf die Oberfläche realer Objekte projiziert. IBM's „everyday display projector“ (ED-Projector) stellt einen derartigen Ansatz dar (PINHANEZ 2001). Bei dem ED-Projector wird die digitale Information über einen Projektor und einen verstellbaren Spiegel auf reale Oberflächen projiziert. Nachteilig ist bei dem PAR-Verfahren der sehr hohe Aufwand für die Realisierung einer unverzerrten Darstellung in einem großen Arbeitsbereich. Zusätzlich besteht das Problem, dass der Projektionsstrahl vom Anwender selbst verdeckt wird. Der größte Vorteil des Verfahrens liegt in dem Entfall kopfgetragener Visualisierungsgeräte.

#### 3.3.2 Head Mounted Displays (HMD)

HMDs sind die häufigsten visuellen Ausgabegeräte für AR-Anwendungen. Das besondere Merkmal von HMDs ist, dass sich die Bildquelle direkt vor dem Auge des Anwenders befindet und über eine tragbare Vorrichtung am Kopf fixiert wird. Hierdurch bleibt die Bildquelle auch bei Bewegungen des Kopfes im Sichtfeld des Anwenders.

Je nach ihrem optischen Aufbau können verschiedene Grundtypen von HMDs unterschieden werden (vgl. Abbildung 3-5). Monokulare Head Mounted Displays besitzen eine Bildquelle, welche sich im Sichtfeld eines Auges befindet. Durch die Verwendung einer Bildquelle sind monokulare Displays in der Regel sehr leicht. Zudem wird über das zweite Auge die reale Umgebung mit der vollen Sehschärfe wahrgenommen. Biokulare HMDs haben ebenfalls nur eine Bildquelle, diese deckt aber das Sichtfeld beider Augen ab. Durch die Verwendung von nur einer Bildquelle kann mit normalen biokularen Displays keine räumliche Visualisierung erzielt werden. Biokulare Displays mit integrierten Shutter-Gläsern gleichen diesen Nachteil aus. Bei dieser Bauform wird das vom Renderer erzeugte Bild sequenziell dargestellt. Die Shutter-Gläser verdunkeln abwechselnd das linke und das rechte Auge, sodass ein räumliches

Sehen ermöglicht wird. Binokulare HMDs verfügen über je eine Bildquelle für das rechte und linke Auge. Durch die Verwendung von zwei Bildquellen sind diese HMDs in der Regel deutlich schwerer. Um diesen Nachteil auszugleichen, sind bei einigen binokularen HMDs die Bildquellen in einer separaten Einheit untergebracht, die nicht am Kopf getragen wird. Das Bild wird in diesem Fall über Lichtleiter zu einer kopfgetragenen Einheit transportiert.

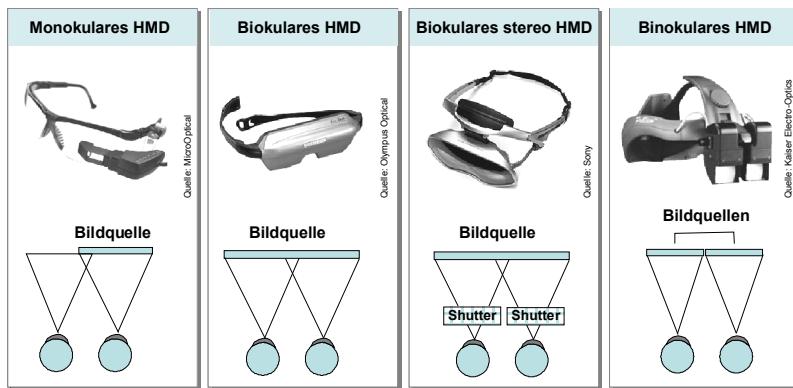


Abbildung 3-5: Bauformen von Head Mounted Displays (HMD)

Neben der Bauform können HMDs durch zahlreiche weitere technische Merkmale klassifiziert und bewertet werden. Im Folgenden werden die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit relevanten Kriterien von AR-Anzeigegeräten beschrieben. Eine vertiefende Darstellung der Gestaltungsaspekte liefert die entsprechende Fachliteratur (z. B. MELZER & MOFFIT 1997).

Durch Anzeigegeräte können visuelle Informationen in einem bestimmten Sichtfeld (engl. **Field of view, FOV**) dargestellt werden. Beschreibende Parameter des Sichtfeldes sind der horizontale und vertikale Winkel in Grad, welche den entsprechenden Sichtbereich aufspannen. Ein großes Sichtfeld erfordert weniger Kopfbewegungen des Anwenders und verbessert so die visuelle Wahrnehmung bei einer geringeren Ermüdung. Für produktionstechnische Anwendungen ist ein sehr großes FOV anzustreben, da Gefahrensituationen besser erkannt werden können, eine geringere Ermüdung des Anwenders auftritt und die räumliche Expertise des Anwenders unterstützt

wird. Zur Realisierung eines möglichst großen FOV ist bei der Konzeption von AR-Systemen auf eine entsprechende konstruktive Gestaltung zu achten, damit am HMD angebrachte Geräte oder Bauteile des HMDs das FOV nicht einschränken.

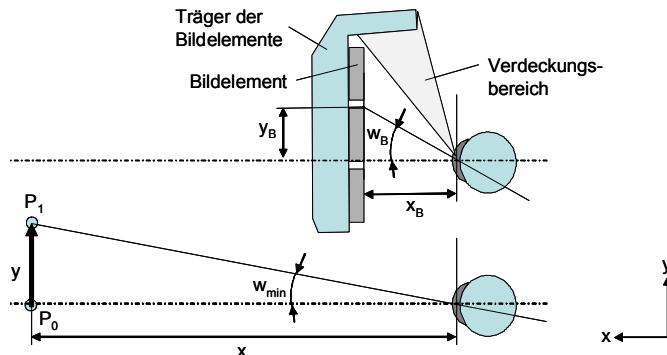


Abbildung 3-6: Grundlagen der Bildentstehung

Eines der wichtigsten Kriterien für die Bewertung von AR-Anzeigegeräten ist die **Auflösung**. Die Auflösung beschreibt die Zahl der unterscheidbaren Bildelemente pro Längenmaß. Für LCD-Elemente wird diese Zahl z. B. mit Pixel/Zoll (dots/inch, dpi) angegeben. Die Auflösung eines AR-Anzeigegerätes muss so hoch sein, dass der Anwender die entsprechenden Bildelemente des Displays nicht mehr einzeln unterscheiden kann. Der Sehwinkel, unter dem die Elemente wahrgenommen werden, muss demnach unter dem minimalen Sehwinkel  $w_{\min}$  des menschlichen Auges liegen. Als minimaler Sehwinkel  $w_{\min}$  wird der Winkel bezeichnet, dessen Scheitel am Auge des Betrachters liegt und dessen Schenkel zwei gerade noch zu unterscheidende Punkte berühren (vgl. Abbildung 3-6). Für einen Menschen ohne Sehfehler liegt  $w_{\min}$  bei einer Winkelminute. Da sich bei einem größeren FOV der Sehwinkel vergrößert, muss ein Display über mehr unterscheidbare Bildelemente verfügen, damit die optimale Auflösung erhalten bleibt. Für ein Gesichtsfeld von 150° horizontal und 60° vertikal ergibt sich eine geforderte Bildauflösung von 9000x3600 Bildpunkten, als Zielwert für AR und VR-Systeme (DEISINGER & RIEDEL 1995). Obwohl in der Praxis nur eine maximale Auflösung von 1024x768 erreicht wird, bleibt die Anforderung, dass alle an der Bildentstehung beteiligten AR-

Hardwarekomponenten (Aufnahmegeräte, Videoverarbeitung, Renderer und Anzeigegeräte) diesen Zielwert anstreben.

#### 3.3.3 Verfahren zur Positionserfassung im Raum

Für eine kontextabhängige Informationsdarstellung muss die Position und Orientierung des Benutzers im Raum bekannt sein. Positionserfassungssysteme ermitteln die Position und Orientierung eines Anwenders im Bezug zu einem raumfesten Referenzsystem. Eine allgemeine Einteilung von Systemen zur Bestimmung von Bewegungen und Positionen von Menschen im Raum kann in Inside-In, Inside-Out und Outside-In Systeme erfolgen (FERRIN 1991). Abbildung 3-7 zeigt die drei verschiedenen Prinzipien von Positionserfassungssystemen, die sich aus der Anbringung von Sensoren und gemessener Referenz ergeben.

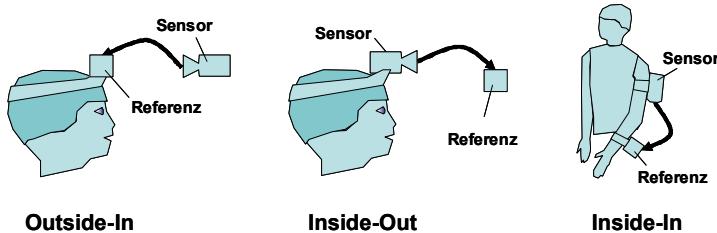


Abbildung 3-7: Klassifizierung von Verfahren zur Positionserfassung

Bei Inside-In Systemen befinden sich die Sensoren und die zu messende Referenz am Körper des Benutzers. Ein bekanntes Beispiel für ein Inside-In System ist ein Datenhandschuh der mithilfe von Dehnmessstreifen die Bewegungen der Finger eines Benutzers erfasst. Inside-In Systeme haben für den Fall, dass sie über eine unabhängige Stromversorgung und Datenübertragung verfügen, eine unbegrenzte Reichweite, liefern aber keine Information über die Position des Benutzers im Raum. Inside-Out Systeme haben Sensoren am Körper des Benutzers. Die zu messende Referenz befindet sich im Raum. Bekannte Beispiele derartiger Systeme sind optische Messsysteme, bei denen eine Kamera am Kopf des Betrachters angebracht ist, und eine optische Referenzmarke in der Umgebung erfasst wird. Outside-In Systeme arbeiten mit Sensoren im Raum, die spezielle Referenzen auf dem Körper des Benutzers erfassen. Bekannte Systeme

sind magnetische Messsysteme, bei denen über einen ortsfesten Sensor die Lage eines Senders am Körper des Benutzers ermittelt wird.

Positionserfassungssysteme lassen sich weiterhin nach ihrem physikalischen Wirkprinzip in **mechanische, akustische, elektromagnetische, inertiale und optische** Systeme unterscheiden (ALLEN U. A. 2001). Mechanische Systeme zur Positionserfassung bestehen aus einer Kombination unterschiedlicher Ausleger und Gelenke, an denen ähnlich wie bei einem Industrieroboter Winkel- und Wegmesser angebracht sind. Mechanische Verfahren erreichen eine hohe Genauigkeit der Messung. Die Reichweite der Systeme ist konstruktionsbedingt sehr eingeschränkt. Akustische Messsysteme ermitteln die Position des Anwenders durch die Messung der Laufzeiten verschiedener Schallquellen. Die Systeme weisen eine hohe Genauigkeit auf, können aber durch Schallreflexion und Nebengeräusche gestört werden. Bei der elektromagnetischen Positionsmessung wird die Feldstärke und Feldorientierung eines Senders ermittelt und daraus die Position des Senders berechnet. Diese Systeme sind sehr robust, haben eine gute Genauigkeit und geringe Latenzzeiten. Nachteile sind die Störanfälligkeit gegenüber Gegenständen aus Metall. Inertiale Messverfahren arbeiten mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungssensoren. Die Position kann durch eine mehrfache Integration des Messergebnisses gewonnen werden. Inertiale Systeme haben einen großen Arbeitsbereich und sind robust in der Anwendung.

Optische Trackingverfahren arbeiten auf Basis digitaler Kameras. Mithilfe von Bilderkennungsalgorithmen wird die Position und Orientierung durch die Auswertung eines Videobildes ermittelt. An der zu messenden Referenz sind hierzu reflektierende oder farbige Markierungen angebracht. Die Markierungen können zum einen aktiv Licht aussenden, z. B. durch Light-Emitting-Diodes (LED), oder sie bestehen aus reflektierenden Materialien. Der Vorteil optischer Verfahren liegt in der berührungslosen Messwertaufnahme und der sehr hohen Genauigkeit der Positionsbestimmung. Ein großer Vorteil für AR-Anwendungen ist die Möglichkeit, die aufgenommenen Bilddaten für die Gewinnung zusätzlicher Informationen zu nutzen. So kann ein aufgenommenes Videobild für die Anzeige in einem VST-System oder zur Objekterkennung verwendet werden. Problematisch sind hingegen Verdeckungen, d.h. Unterbrechungen der Messstrecke durch Hindernisse. Zudem können optische Verfahren durch externe Beleuchtungseinflüsse gestört werden.

### 3.3.4 Haptische und akustische Geräte

Nach der visuellen Wahrnehmung spielen die Haptik und die akustische Wahrnehmung eine bedeutende Rolle bei der Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen. Die Haptik beinhaltet die Kinästhetik und die Taktilität. Die Kinästhetik bezeichnet die Kraftrückkopplung an den Bediener, z. B. um Gewichtskräfte eines Objektes wahrzunehmen. Taktilität bezeichnet den Tastsinn, wie er zum Erfühlen von Oberflächenstrukturen notwendig ist.

Der Aufbau von haptischen Geräten unterscheidet sich sehr stark. Je nach Bauart können haptische Geräte Kräfte oder taktile Reize an unterschiedliche Stellen des menschlichen Körpers übertragen. Einfache haptische Geräte, wie z. B. Force-Feedback Mäuse ermöglichen die Übertragung von Kräften in einer Raumebene an die Hand des Benutzers. Komplexere Systeme, wie z. B. ein Kraft reflektierender Handschuh, können Kräfte an alle Finger einer Hand des Bedieners übertragen.

Zur Klassifizierung und Bewertung haptischer Geräte existieren in der wissenschaftlichen Literatur unterschiedliche Kriterien (FISCHER U. A. 1990, LAWRENCE U. A. 1996, CHEN 1999). Eine Bewertung haptischer Geräte kann nach technischen, wirtschaftlichen und ergonomischen Kriterien erfolgen. Konstruktive bzw. technische Bewertungsgrößen charakterisieren ein haptisches Gerät nach der Anzahl seiner Freiheitsgrade (Motion-DOF<sup>4</sup>, Tracking-DOF<sup>5</sup> und Force Feedback-DOF<sup>6</sup>), aktiver oder passiver Rückkopplung, der Gerät-Operator-Schnittstelle (z. B. Kontaktflächen), dem Bewegungsbereich, der maximalen Kraftausgabe, dynamischen Eigenschaften (Dämpfung, Massenträgheit, max. Beschleunigung), der Bandbreite und Auflösung des Systems, dem Gewicht und der Baugröße. Ergonomische Bewertungskriterien erlauben es, haptische Geräte unter Gesichtspunkten wie Geräuschentwicklung, Tragekomfort, Arbeitsbeanspruchung des Operators (visuell, mental und physisch) und der Sicherheit für den Bediener zu bewerten. Wirtschaftliche Bewertungsgrößen sind z. B. die Anschaffungskosten, die Betriebskosten oder Kosten für die Integration der Systeme in bestehende Anwendungen. Eine

---

<sup>4</sup> Freiheitsgrade (engl. Degrees of Freedom DOF), in denen eine freie Bewegung des Gerätes möglich ist.

<sup>5</sup> Freiheitsgrade, deren Bewegungsbereich sensorisch erfasst wird.

<sup>6</sup> Freiheitsgrade, in denen Kräfte bzw. Momente rückgekoppelt werden.

detaillierte Beschreibung der Bewertungskriterien und eine Auflistung am Markt verfügbarer Geräte liefert die Fachliteratur (ZÄH U. A. 2002, JOOSTEN & SOFARIU 2003).

Haptische Geräte sind Ein- und Ausgabegeräte. Als Eingabe dient entweder eine Positionserfassung oder eine Kraftmessung. Da die Geräte einen geschlossenen Regelkreis mit dem Bediener bilden, müssen sie je nach ihrem dynamischen Verhalten mit sehr hohen Ansteuerungsraten von ca. 1000 Hz betrieben werden, um ein instabiles Verhalten zu vermeiden. Dies stellt hohe Anforderungen an die Software, die in weniger als 1 ms die Schritte Kollisionserkennung (zwischen Objekten), Kontakt situation berechnen (z. B. Kontakt normale, Eindringtiefe), sowie die Berechnung der Kräfte und Momente ausführen muss. Der Prozess der modellbasierten Kraftberechnung wird als „haptisches Rendering“ bezeichnet. In der Literatur sind unterschiedliche Ansätze für das haptische Rendering dokumentiert (NEELY U. A. 1999, GREGORY U. A. 2000). Für den Einsatz von haptischen Geräten in AR und VR-Anwendungen ergibt sich die Besonderheit, dass der Anwender stets in physikalischen Kontakt mit dem haptischen Gerät stehen muss (YE U. A. 2003). Dies schränkt bei nahezu allen Geräten die Bewegungsfreiheit des Anwenders stark ein.

Neben der Haptik ist die auditive Wahrnehmung ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt bei der Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen. Über auditive Geräte werden Informationen in Form von Schallwellen ausgetauscht. Technische Geräte zur Ein- und Ausgabe auditiver Informationen sind Mikrofone und Lautsprecher. Die Eingabe auf Basis von akustischen Informationen erfolgt bei Systemen im technischen Umfeld überwiegend durch Sprache. Mit Hilfe von Spracherkennungssystemen kann eine akustische Information in einen Steuerungsbefehl einer Anwendung umgesetzt werden. Eine nonverbale akustische Benutzereingabe z. B. durch Händeklatschen wird aufgrund der eingeschränkten Varianten nur selten eingesetzt. Eine auditive Eingabe bietet sich überall dort an, wo die sensomotorische Koordination eines Bedieners eingeschränkt ist, beispielsweise bei beidhändigen Montagevorgängen oder bei räumlicher Enge.

## 3.4 Anwendungen von AR im industriellen Umfeld

Die Möglichkeit virtuelle Informationen im Kontext einer realen Umgebung darzustellen, kann für eine Vielzahl von Anwendungen genutzt werden. Im Folgenden werden die aus der Literatur bekannten Anwendungen von Augmented Reality aus dem Bereich der Produktentwicklung, der Fertigung und den Bereichen Wartung und Service vorgestellt.

### 3.4.1 Produktentwicklung

Ein wesentlicher Vorteil der AR-Technologie in der Produktentwicklung liegt in der visuellen Überlagerung von realen Produktprototypen mit virtuellen Produktmodellen oder Simulationsdaten. Obwohl der Einsatz physischer Prototypen in den letzten Jahren stark reduziert werden konnte, gibt es Anwendungen, bei denen eine Kombination aus realen Produktdaten und virtuellen Modellen schneller zu den erforderlichen Aussagen führt. Bekannte Beispiele sind Fahrsimulatoren, bei denen Teile eines Fahrzeugs real existieren und die Umgebung über entsprechende Projektionstechnik abgebildet wird. Eine Weiterentwicklung derartiger Mixed-Mock-Up Anwendungen stellt LEWIN u. a. (2000) für die Automobilentwicklung vor. Mithilfe des von LEWIN u. a. (2000) umgesetzten AR-Prototypen können virtuelle Objekte, z. B. Teile der Instrumententafel lagegerecht in einer realen „Sitzkiste“ dargestellt werden. Einen weiteren Anwendungsfall beschreibt POUPYREV u. a. (2001) mit dem System TILES, das für die effiziente Gestaltung und Bewertung unterschiedlicher Cockpitvarianten im Flugzeugbau entwickelt wurde. TILES stellt eine intuitive Umgebung zur Anordnung von 3D-Objekten mithilfe speziell markierter, realer Objekte dar. Hierzu lassen sich 3D-Modelle von Cockpitinstrumenten bestimmten Tafeln mit 2D-Markierungen zuordnen. Die Tafeln werden dann auf einer weiteren Fläche angeordnet und mit 3D-Objekten der Instrumente überlagert. Anwender können mit dem System in einer realen Sitzkiste Platz nehmen und unterschiedliche Anordnungen von Instrumenten, die über eine Datenbrille in das reale Cockpit eingeblendet werden, bewerten. Das von PERSIANI u. a. (2001) vorgestellte System AR-CTR wurde ebenfalls für die Gestaltung von Flugzeugcockpits entwickelt. Im Gegensatz zum System TILES

wurde das System aber mit einem magnetischen Positionserfassungssystem realisiert.

Einen Hauptvorteil der Anwendung sieht PERSIANI U. A. (2001) in Einsparungen im Bereich der 3D-Modellierung und in der Einbindung von Endanwendern in den Gestaltungsprozess.

Ansätze zur Interaktion zwischen virtuellen Menschmodellen und realen Personen oder Produktprototypen wurden vom Computer Graphics Laboratory (LIG) in Lausanne präsentiert (BALCISOY U. A. 2000, TORRE U. A. 2000). Am LIG wurde eine AR-Umgebung umgesetzt, die eine Evaluierung von realen Produktprototypen mithilfe von AR erlaubt. So können Bedienkonzepte an einem realen Produktprototyp mit einem virtuellen Menschmodell analysiert werden. Eine methodische und technische Integration des Systems in den Entwicklungsprozess wird nicht beschrieben.

Ein weiterer Vorteil der AR-Technologie im Bereich der Produktentwicklung ist die Möglichkeit neue Visualisierungstechniken umzusetzen. Das von REGENBRECHT U. A. (2001) entwickelte System MagicDesk erweitert die Möglichkeiten eines herkömmlichen Rechnerarbeitsplatzes. So werden CAD-Modelle auf einer realen Arbeitsfläche eingeblendet. Das System soll zukünftige CAD-Arbeitsplätze produktiver machen und unterschiedliche Medien, z. B. VR, 2D-Anwendungen und AR vereinen. MagicDesk dient überwiegend zur Visualisierung. Einen Schritt weiter geht die Anwendung SketchAR, die von Wissenschaftlern am Fraunhofer Institut für Grafische Datenverarbeitung (IGD) entwickelt wurde (AMICIS U. A. 2002). SketchAR ist eine Forschungsanwendung, die das Skizzieren in einer AR-Umgebung ermöglichen soll. Mithilfe eines optischen Trackingsystems wird hierzu die Lage eines Eingabestiftes im Raum erfasst. Der Anwender kann so Linien oder Flächen zeichnen, die überlagert mit der Realität dargestellt werden.

Die Überlagerung von Simulationsergebnissen mit realen Objekten ist eine weitere Anwendung der AR-Technologie in der Produktentwicklung. Ein Beispiel hierfür stellt REGENBRECHT & JACOBSEN (2002) für die Visualisierung von simulierten Strömungen im Innenraum eines Flugzeuges vor. Die Strömungsdaten werden hierzu als verschiedenfarbige Zonen dreidimensional eingeblendet. Erste Versuche für die Überlagerung von simulierten Crashdaten mit realen Crashfahrzeugen wurden von der Volkswagen AG durchgeführt (ALT & NÖLLE 2001). Durch die gemeinsame Betrachtung von

Berechnungsergebnissen und realem Fahrzeug sollen Abweichungen oder Fehler in der Simulation einfacher erkannt werden.

#### 3.4.2 Produktionsplanung

Für den Einsatz von AR in der Produktionsplanung sind nur wenige Anwendungen bekannt. Ein Verfahren zur Unterstützung der Produktionsplanung mit Augmented Reality beschreibt ALT (2001A). Mithilfe eines AR-Systems können virtuelle Anlagenmodelle mit einem realen Rapid-Prototyping-Modell einer Fertigungshalle überlagert werden. Der beschriebene Ansatz sieht allerdings keine Anbindung an rechnergestützte Planungssysteme vor und beschränkt sich zudem auf die Überlagerung von realen und virtuellen Modellen.

Ein weiteres Beispiel aus der Literatur findet sich bei GAUSEMEIER U. A. (2002). Zur flexiblen Gestaltung von Layoutvarianten kann ein Anwender bei dieser Anwendung 3D-Modelle von Anlagen aus einem Katalog auswählen und diese speziellen Markierungen zuordnen. Mithilfe einer AR-Anwendung werden die 3D-Anlagenkomponenten lagegerecht auf den Markierungen dargestellt. Durch die Verschiebung der Markierungen kann die Lage der 3D-Objekte im Raum intuitiv geändert werden. Die von GAUSEMEIER U. A. (2002) beschriebene Anwendung basiert auf der Anwendung „Magic-Book“ von BILLINGHURST U. A. (2000), bei der Möbelstücke interaktiv in einem Raum platziert werden können. Ein Einsatz des Systems im realen Fertigungsumfeld wird nicht beschrieben.

Für die Analyse und Visualisierung von Montageoperationen mit AR entwickelte MOLINEROS U. A. (1999) das System AREAS (Augmented Reality for Evaluating Assembly Sequences). AREAS ermöglicht es, Montageoperationen, die ein Mitarbeiter ausführt, aufzuzeichnen. Hierdurch soll dem Montageplaner eine Analyse einer geplanten Montagefolge möglich werden. Das AREAS-System ist auf die Planung von Montageabläufen beschränkt. Bereiche der Montageplanung wie die Layoutplanung oder die Arbeitsunterweisung, werden nicht abgedeckt.

Am Beispiel der Planung einer Zuführeinrichtung zeigt HUANG U. A. (2000), wie AR-Technologie eingesetzt werden kann, um ein Simulationsmodell mit der Realität abzulegen. HUANG U. A. (2000) nutzt für seine Anwendung eine Bilderkennung um Zustandsinformationen wie Geschwindigkeit und Position von realen Bauteilen zu ermitteln. Diese Daten werden als Eingangsinformation

für eine Dynamiksimulation verwendet. Die Arbeiten fokussieren sich auf die Analyse des dynamischen Verhaltens von Bauteilen innerhalb von Zuführeinrichtungen und decken so nur einen sehr geringen Teil an Planungsaufgaben ab.

#### 3.4.3 Fertigung

Eine der bekanntesten Anwendungen von AR im Bereich der Fertigung wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes bei Boeing durchgeführt. Beginnend mit den Arbeiten von CAUDELL & MIZELL (1992) wurde der Einsatz von AR für die manuelle Montage von Kabelbäumen über mehrere Jahre erforscht (CAUDELL & MIZELL 1992, JANIN U. A. 1993, SOWIZRAL & BARNES 1993, CURTIS U. A. 1999, MIZELL 2001). Ein Ziel des AR-Einsatzes bei Boing war es, die kostenintensive Lagerung von Baubrettern für die Kabelbaummontage zu ersetzen. Hierzu wurden 2D-Linien auf ein universell einsetzbares Baubrett eingeblendet, um den Mitarbeitern die Lage der zu montierenden Kabel anzugeben. Das System arbeitete mit einem hybriden Positionserfassungssystem (Ultraschall und Beschleunigungssensoren) und einem Optical-See-Through Display.

Eine weitere Anwendung aus dem Bereich der Montage in der Flugzeugindustrie stellen NEUMANN & CHO (1996) vor. Mit dem umgesetzten System sollen Montagemitarbeiter bei der Ausführung von Bohrlöchern an Flugzeugbauteilen unterstützt werden. Neumann weist in seinen Arbeiten auf das Problem der Bereitstellung von AR-Inhalten hin. Zur Lösung dieser Aufgabenstellung schlägt er in seinen folgenden Arbeiten (NEUMANN & MAJOROS 1998) eine AR media language (ARML) vor. In ARML soll der Inhalt einer VR-Darstellung beschrieben werden. Basis hierfür bilden Daten aus CAD-Systemen und Informationen aus den Prozessbeschreibungen. Eine konkrete Umsetzung von ARML ist nicht bekannt.

Eine Beispielanwendung für AR aus dem Bereich der Automobilindustrie untersuchten Mitarbeiter des Fraunhofer Instituts für Grafische Datenverarbeitung IGD (REINERS U. A. 1999) für die Montage eines Türschlosses. Mithilfe einer markerbasierten optischen Bilderkennung wurde die Lage einer zu montierenden Autotür erfasst, und die zu montierenden Objekte als 3D-Modell in das Sichtfeld eingeblendet. Das System konnte im Optical-See-Through und Video-See-Through Modus betrieben werden. Die Aufbereitung der AR-Information erfolgte manuell auf Basis der CAD-Daten. AR-Szenarien für

die Montage von Einzel- und Kleinserienprodukten beschreibt EVERSHIM U. A. (2001). Am Beispiel einer Getriebemontage werden die Anforderungen für ein AR-System und mögliche Workflows definiert. Als wichtiges Kriterium für ein AR-System wird die Integration in die IV-Landschaft des Unternehmens, z. B. PDM und BDE-Systeme genannt.

ALT & SCHREIBER (2001) beschreiben Anwendungen von AR in der Qualitätssicherung am Beispiel der Automobilindustrie. In verschiedenen Szenarien wurden die Potenziale von AR in der Qualitätssicherung von Cockpitmodulen bei der Volkswagen AG untersucht. Bei dem eingesetzten AR-System kommen ein markerbasiertes Positionserfassungssystem und ein HMD zum Einsatz. Eine Beschreibung der Aufbereitung der Informationen für AR oder die daten- und softwaretechnische Integration wird von ALT (2001a) nicht betrachtet.

Neben der Montage sind auch Anwendungen für AR-gestützte Prüfvorgänge in der Fertigung dokumentiert. Zur Überprüfung von Längenmaßen von Bauteilen wurden erste Versuche von CHUNG U. A. (1999) durchgeführt und ein entsprechendes System umgesetzt. Mit der AR-Unterstützung konnte bei dieser Anwendung eine Zeiteinsparung für die Messvorgänge von ca. 60% nachgewiesen werden. Ein weiteres AR-System für die Prüfung elektronischer Komponenten beschreibt SATO U. A. (1999). Ziel der Anwendung ist in diesem Fall die Reduktion von Fehlern bei Prüfvorgängen und die Unterstützung von ungelernten Arbeitern. Über ein angebundenes Arbeitsverwaltungssystem wird der Anwender bei der Durchführung von Prüfvorgängen unterstützt. Die Visualisierung relevanter Informationen erfolgt entweder über ein stationäres AR-System mit zwei Kameras und einem halb durchlässigen Spiegel oder durch ein mobiles AR-System, bei dem das Rechnersystem in einem Rucksack untergebracht ist. In seinen Arbeiten weist SATO U. A. (1999) besonders auf die Herausforderung mobiler AR-Systeme hin, bei denen das hohe Gewicht und die ausgeprägte Baugröße die Anwendbarkeit stark einschränken.

#### 3.4.4 Service und Training

Eines der ersten AR-Beispiele im Bereich der Wartung wurde von FEINER U. A. (1993) am Beispiel eines Laserdruckers präsentiert. Durch die Überlagerung des realen Blickfeldes mit einfachen Drahtgittermodellen sollte bei dieser Anwendung eine schnellere Wartung von komplexen Produkten erzielt werden. Das von Feiner vorgestellte System KARMA (Knowledge-based

Augmented Reality for Maintenance Assistance) benutzte ein Ultraschall Positionserfassungssystem und ein monoskopes HMD. Einen ersten Ansatz für ein AR-System zur Wartung von Kernkraftanlagen stellt das System STARS (DUTOIT U. A. 2001) dar. STARS wurde entwickelt, um papierbasierte Arbeitsanweisungen und Checklisten durch AR-Technik zu ersetzen. Entwicklungsschwerpunkte von STARS waren die Netzwerkanbindung und ein multimodales<sup>7</sup> User Interface (UI). Im Projekt STARMATE (System using Augmented Reality for Maintenance, Assembly, Training and Education) soll ein AR-System zur Unterstützung der Wartung komplexer Produkte entwickelt werden (SCHWALD U. A. 2001). Eine Unterstützung der Montageplanung ist im Rahmen des STARMATE Projektes nicht vorgesehen.

Eine kollaborative Augmented-Reality-Anwendung für das industrielle Training wurde von einer Forschergruppe der University of Ottawa entwickelt (ZHONG U. A. 2003, S. 7). Zielsetzung der Forschungsarbeiten war es, Benutzer an entfernten Standorten AR-unterstützt in Trainingsaufgaben zu integrieren. Eine Besonderheit des Systems ist die verteilte Architektur der Anwendung. Das von einer kopfgetragenen Kamera aufgenommene Bild wird mithilfe eines mobilen Rechners und einer Netzwerkverbindung an einen lokalen Rechner übertragen und dort anhand einer Bilderkennung ausgewertet. Die so berechnete Kameraposition wird anschließend zurück zum mobilen Rechner übertragen. Mit diesem Prinzip soll eine Verlagerung rechenintensiver Aufgaben auf lokale Rechnersysteme erreicht werden. Das von ZHONG U. A. (2003, S. 17) vorgestellte System erreicht eine maximale Visualisierungsgeschwindigkeit von ca. 15 Bildern pro Sekunde bei einer Auflösung von 160x120 Pixel.

In der Literatur finden sich weitere Anwendungen für die kontextabhängige Anzeige von Wartungsinformationen an unterschiedlichen Beispielprodukten (VGL. MÜLLER 2001). Viele Autoren betonen die Notwendigkeit einer Unterstützung des Anwenders bei der Erzeugung der AR-Informationen und sehen hier große Defizite bei aktuellen AR-Ansätzen. Einen sehr pragmatischen Lösungsweg stellen HARINGER & REGENBRECHT (2002) vor. Die Autoren nutzen die Office-Software Powerpoint in Verbindung mit dem Werkzeug „PowerSpace“ zur Erzeugung von AR-basierten Wartungsanleitungen. Dieser Ansatz ist sehr gut geeignet, um AR-Demonstratoren aufzubauen. Für komplexe

---

<sup>7</sup> Mit dem Begriff multimodal werden Benutzerschnittstellen bezeichnet, bei denen „eine Interaktion über mehrere Wahrnehmungskanäle des Menschen“ erfolgt (HEDICKE 2000, S. 204).

Szenarien gestaltet sich der Ansatz aber sehr aufwändig, da er keine direkte Integration in den Planungsprozess darstellt. So werden z. B. keine Daten direkt aus CAx-Systemen übernommen. AR-Informationen können auch nicht dynamisch angepasst werden, da keine Datenbankintegration vorhanden ist.

#### **3.4.5 Weitere Anwendungen**

Neben Anwendungen in der Produktentwicklung und Produktion sind Entwicklungen von AR in den Bereichen der Unterhaltungsindustrie, der Militärtechnik (TAPPERT U. A. 2001), der Medizin und der Architektur bekannt. Im Verbundprojekt AR-PDA wird z. B. ein Hard- und Softwaresystem für einen AR-fähigen mobilen digitalen Assistenten entwickelt (FRÜND U. A. 2001). Das Funktionsprinzip des AR-PDA beruht auf einer Client Server-Lösung. Die Videodaten werden von einer Kamera, die auf einem mobilen Gerät (z. B. PDA) montiert ist, aufgenommen und über eine Funkstrecke zu einem AR-Server übertragen. Ein erstes Anwendungsbeispiel des AR-PDA präsentiert GEIGER U. A. (2001) in Form eines AR-Fußballspiels. Ähnliche Ansätze wie der AR-PDA stellen die Arbeiten von FITZMAURICE (1993), das System UbiCom von PASMAN & JANSEN (2001), das mobile AR-System mPARD von REGENBRECHT & SPRECHT (2000) und „NaviCam“ von REKIMOTO (2000) dar.

### 3.4.6 Übersicht der bestehenden Ansätze

Die nachfolgende Abbildung 3-8 gibt einen Überblick der bestehenden Ansätze aus der wissenschaftlichen Literatur. Die Bewertung der Ansätze erfolgt aus Sicht der Fragestellungen der vorliegenden Arbeit und stellt keine generelle Bewertung der Qualität der jeweiligen Ansätze dar.

Kriterien	Technik	Anwendungsbereiche				Eigenschaften	Bereiche	
		Produktentwicklung	Produktionsplanung	Fertigung	Service u. Training			
<b>Ansatz/Quelle</b>		Visualisierungsverfahren	Trackingverfahren					
Alt 2001a	VST	OM	○	●	●	○	○	●
Amicis u. a. 2002	VST	OA	●	○	○	○	●	●
Balcisoy u. a. 2000	VST	OA	●	○	○	○	○	●
Billinghurst u. a. 2000	VST	OM	○	○	○	●	○	●
Caudell & Mizell 1992	OST	OA	○	○	●	○	●	○
Chung u. a. 1999	OST	OA	○	○	●	○	●	○
Dutoit u. a. 2001	VST	OM	○	○	○	●	○	●
Eversheim u. a. 2001	VST	OM	○	●	○	○	●	●
Fitzmaurice 1993	VST	OM	○	○	○	●	○	○
Fründ u. a. 2001	VST	OM	○	○	○	●	○	●
Gausemeier u. a. 2002	VST	OM	○	●	○	○	●	○
Geiger u. a. 2001	VST	OM	○	○	○	●	○	●
Haringer & Regenbrecht 2002	VST	OM	○	○	●	○	●	●
Huang u. a. 2000	VST	OA	○	●	○	○	●	●
Lewin u. a. 2000	VST	OM	●	○	○	○	●	○
Molineros u. a. 1999	VST	OM	○	●	○	○	●	○
Neumann & Cho 1996	VST	OA	○	○	●	○	●	○
Poupyrev u. a. 2001	VST	OM	●	○	○	○	●	●
Regenbrecht & Jacobsen 2002	VST	OM	●	○	○	○	●	○
Regenbrecht u. a. 2001	VST	OM	●	○	○	○	●	○
Reiners u. a. 1999	VST	OM	○	○	●	○	●	○
Rekimoto 2000	VST	OM	○	○	○	●	●	○
Schwald u. a. 2001	VST	OM	○	○	●	○	●	○
Zhong u. a. 2003	VST	OA	○	○	○	●	○	○

VST = Video See-Through   OM = Optisches Markertracking
● = gut erfüllt

OST = Optical See-Through   OA = Optisches Tracking (andere Verfahren)
○ = teilweise erfüllt

○ = nicht erfüllt

Abbildung 3-8: Übersicht über Anwendungen der AR-Technologie

### 3.5 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Augmented-Reality-System aus einer Vielzahl verschiedener Komponenten aufgebaut ist. Es sind so je nach Anwendungsfall unterschiedlichste Ausprägungen möglich. Zum einen können verschiedene Verfahren zur Mischung der Realität mit den virtuellen Informationen eingesetzt werden, zum anderen sind eine Reihe von Verfahren zur Positionsbestimmung des Anwenders im Raum möglich.

Analysiert man die Augmented-Reality-Technologie hinsichtlich eines Einsatzes in der Montageplanung, ergeben sich folgende Defizite aktueller Ansätze:

#### **Fehlende Flexibilität der AR-Systeme für den Einsatz in der Montageplanung**

Die meisten in der Literatur aufgeführten AR-Systeme sind Forschungsprototypen, die für spezielle Anwendungen umgesetzt wurden. Die Berücksichtigung produktionstechnischer Aspekte bei der Umsetzung der AR-Systeme ist nur in wenigen Fällen gegeben. Der Aufbau der Systeme ist daher meist unflexibel und nur mit hohem Aufwand an unterschiedliche produktionstechnische Szenarien anpassbar. Dies betrifft sowohl die Gestaltung der Software wie auch der Hardwarekomponenten.

#### **Unzureichende Integration der AR-Technologie in Planungswerkzeuge**

Um die AR-Technologie wirtschaftlich in der industriellen Praxis einzusetzen, muss der Aufwand für die Erzeugung, Verwaltung und Änderung der AR-Informationen auf ein Minimum reduziert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, muss das AR-System umfassend in bestehende Planungs- und Modellierungswerkzeuge integriert sein.

#### **Fehlende methodische Integration in den Planungsprozess**

In der Literatur finden sich überwiegend technische Umsetzungen von AR-Systemen. Für den erfolgreichen Einsatz in der Montageplanung besteht die Anforderung, den Planer möglichst gut methodisch zu unterstützen. Nur so kann sichergestellt werden, dass der Montageplaner die AR-Technologie zukünftig effizient nutzen kann.

## 4 Anforderungen für den Einsatz in der Montageplanung

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Grundlagen der Augmented-Reality-Technologie dargestellt und der bestehende Handlungsbedarf aus einer Analyse bisheriger Forschungsansätze abgeleitet. Darauf aufbauend werden im folgenden Kapitel die Anforderungen für den Einsatz der AR-Technologie in der Montageplanung beschrieben. Diese Anforderungen gliedern sich in Anforderungen an eine methodische Unterstützung und in technische Anforderungen, die als Basis für die Konzeption eines entsprechenden Rechnerwerkzeuges dienen.

### 4.1 Methodische Anforderungen an eine AR-Unterstützung

Die Zielsetzung einer Unterstützung durch Rechnerwerkzeuge muss es sein, die Flexibilität, Reaktionsfähigkeit, Transparenz und Effizienz von Planungsprozessen zu unterstützen. Dies kann nur erreicht werden, wenn ein **strukturierter Planungsablauf** für den Einsatz der AR-Technologie in der Montageplanung definiert ist. Wie aus der Analyse des Standes der Technik hervorgeht, weisen bestehende Ansätze in der Literatur hier erhebliche Defizite auf. Gerade bei neuen Technologien hat die methodische Unterstützung der zukünftigen Anwender aber einen signifikanten Stellenwert. Nur wenn Vorgehensweisen existieren, die dem Benutzer eine praktische Hilfestellung für den Einsatz der AR-Technologie bieten, wird diese neue Technologie von den Anwendern akzeptiert und nutzenorientiert eingesetzt werden. Ihr volles Potenzial entfaltet die AR-Technologie zudem nur im Zusammenspiel mit anderen rechnergestützten Planungssystemen. Ein strukturiertes Vorgehen stellt sicher, dass die erforderlichen Planungsaufgaben auch mit den jeweils angemessenen Rechnerwerkzeugen bearbeitet werden.

Wie aus dem Abschnitt 2.2 hervorgeht, ist die Montageplanung ein komplexer, mehrstufiger Prozess, bei dem von der Analyse der Ausgangssituation über die Grob- und Feinplanung (z.B. Layoutplanung) bis hin zur Bereitstellung der Arbeitsunterlagen eine Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben zu bearbeiten sind. Eine Reduzierung der Planungszeit und eine Verbesserung der Planungsqualität kann daher nur durch eine gesamtheitliche Betrachtung realisiert werden

(SPITZNAGEL 1999, S.40). Daraus ergibt sich die Anforderung einer **durchgängigen Unterstützung** des Planers. Die Durchgängigkeit wird dabei zum einen über die einzelnen Phasen der Montageplanung gefordert. So können Ergebnisse aus vorangegangenen Planungsaufgaben wieder- bzw. weiterverwendet werden. Zum anderen muss auch die Anwendung des AR-Systems durchgängig unterstützt werden, d.h. der Anwender muss methodisch durch alle Stufen der Anwendung von der Datenaufbereitung bis zur AR-Visualisierung geleitet werden.

Jedes Planungshilfsmittel erfordert einen gewissen Aufwand in der Anwendung. So müssen beispielsweise für die 3D-Simulation einer Montageanlage die notwendigen 3D-Daten von Anlagen und der Gebäudetechnik zur Verfügung gestellt werden. Ein möglichst **geringer Aufwand** für die Anwendung erhöht daher die Wirtschaftlichkeit eines rechnergestützten Planungswerkzeuges. Auch für die AR-unterstützte Montageplanung wird ein möglichst geringer Aufwand gefordert. Sowohl das Rechnersystem wie auch die Anwendungsmethoden müssen daher leicht erlernbar und anwendungsorientiert sein.

Eine weitere Anforderung an die methodische Unterstützung ergibt sich aus der stetigen Verkürzung der Planungszyklen. Unter den aktuellen Randbedingungen können Planungsprozesse nicht mehr alleine von einer zentralen Stelle bewältigt werden. Planungs- und Entwicklungsprozesse müssen daher kooperativ und partizipativ, d.h. unter aktiver Beteiligung aller Mitarbeiter in interdisziplinären Planungsteams durchgeführt werden (BERGBAUER 2002, S. 18). Eine AR-unterstützte Planung muss aus diesem Grund eine **kooperative Planung** ermöglichen und diese gezielt unterstützen.

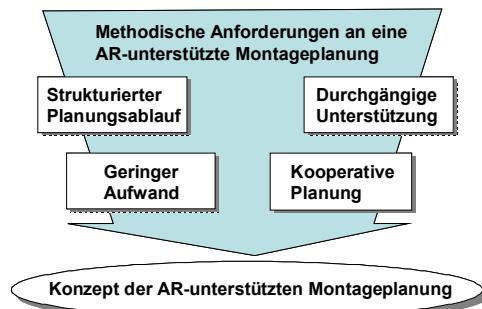


Abbildung 4-1: Methodische Anforderungen für eine AR-Unterstützung

## 4.2 Technische Anforderungen an ein AR-System für die Montageplanung

Die Festlegung der Systemanforderungen ist entscheidend für die Aufgabenangemessenheit und Produktivität eines rechnergestützten Hilfsmittels. Im Folgenden werden Anforderungen definiert, die für die technische Konzeption und Umsetzung eines AR-Systems für die Montageplanung zu erfüllen sind.

### 4.2.1 Laufzeitverhalten und Systemperformance

Die Leistungsfähigkeit eines AR-Systems wird im Wesentlichen durch die Güte bestimmt, mit der das System virtuelle Objekte in einer realen Umgebung darstellen kann. Besondere Bedeutung hat dabei die Latenzzeit. Die Latenzzeit beschreibt die Zeitdifferenz zwischen der Aufnahme sensorischer Informationen und der Anzeige des generierten AR-Bildes. Bei einer zu hohen Latenzzeit nimmt der Anwender ein „Nachschleppen“ der dargestellten virtuellen Objekte wahr. Eine hohe Latenzzeit wirft daher nicht nur ergonomische Probleme auf, sie kann auch ein produktives Arbeiten mit dem System vollständig verhindern. Die Latenzzeit wird im Wesentlichen durch die Verarbeitungszeiten des Trackingsystems, des Aufnahmegerätes, des Renderes, des Mischers und den Signallaufzeiten zwischen diesen Komponenten bestimmt.

Für ein AR-System besteht die Anforderung, dass die Latenzzeit so gering ist, dass sie vom Anwender nicht wahrgenommen wird. Alle Teilsysteme müssen daher eine möglichst geringe Verarbeitungszeit aufweisen. Für AR-Systeme, die ortsungebunden eingesetzt werden, ergibt sich daraus eine besondere Herausforderung, da nur die beschränkte Rechenleistung mobiler PCs zur Verfügung steht. Als Richtwert für die maximal zulässige Latenz kann ein Wert von 30 ms angegeben werden. Wird dieser Wert überschritten, so können Zeitverzögerungen Auswirkungen auf das Wohlbefinden des Anwenders haben. Für den produktionstechnischen Einsatz ist eine minimale Latenzzeit insbesondere des Trackingsystems essenziell. Die typischen Kopfbewegungen des Menschen liegen bei der Benutzung interaktiver 3D-Systeme im Bereich zwischen 10-50 cm/sec und 20-50 °/sec (ZACHMANN 2001). Bei einer Latenzzeit von 30 ms und einer mittleren Kopfbewegung von 30 °/sec würde ein Winkelfehler von 0,09° auftreten. Bei einer angenommenen Objektweite von 1 m vom Betrachter würde sich hierdurch ein translatorischer Fehler von mehr als

17 mm ergeben, welcher vom Benutzer als störend wahrgenommen wird. Untersuchungen für VR-Umgebungen haben gezeigt, dass Anwender eine Vergrößerung der relativen Bewegungen eher tolerieren, als ein durch Latenz verursachtes „Nachschleppen“ der Bewegung (JAEKL U. A. 2002).

### 4.2.2 Anforderungen an die AR-Hardware

Die wesentlichen Hardwarekomponenten eines AR-Systems sind die Rechnereinheit, das Anzeigegerät, das Trackingsystem, technische Sensorik zur Aufnahme der realen Umgebung (z. B. eine Videokamera) und weitere Peripheriegeräte. Je nach Anwendungsfall müssen diese Teilkomponenten unterschiedlich kombiniert und zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem zusammengesetzt werden. Diese Konfiguration erfordert Expertenwissen im Bereich der AR-Technologie und sollte daher nicht vom Montageplaner vorgenommen werden, da dieser mit der Erfüllung der eigentlichen Planungsaufgaben vollständig ausgelastet ist.

Für den Einsatz in der Montageplanung ist es wichtig, dass die unterschiedlichen Hardwarekomponenten zu anwendungsspezifischen Modulen kombiniert werden. Die Bereitstellung vordefinierter Hardwarekonfigurationen für die unterschiedlichen Einsatzbereiche innerhalb der Montageplanung erleichtert dem zuständigen Planer die Verwendung der Technologie.

Es besteht daher die Anforderung, definierte Hardwarekonfigurationen für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche in der Montageplanung bereitzustellen und so den Planer, bei dem kein fundiertes VR oder AR-Wissen vorausgesetzt werden kann, bei der Einführung der Technologie zu unterstützen.

Eine weitere Anforderung an die AR-Hardware ergibt sich aus dem mobilen Charakter von AR-Systemen. Im Gegensatz zu VR-Anwendungen agiert der Anwender nicht in einer vollständig virtuellen Umgebung, z. B. vor einer Projektionsfläche, sondern in der realen Produktionsumgebung. Diese Mobilität muss von der AR-Hardware unterstützt werden. Folgende Anforderung lässt sich daraus ableiten:

Die AR-Hardware sollte den Anwender möglichst wenig körperlich belasten oder in seiner Bewegungsfreiheit einschränken. Alle AR-Hardwarekomponenten, die am Körper des Anwenders getragen werden, sollten eine kompakte Bauform, ein geringes Gewicht und eine möglichst ergonomische Gestaltung aufweisen.

Neben diesen allgemeinen Anforderungen an die AR-Hardware existieren zahlreiche spezielle Anforderungen, insbesondere an die Trackingtechnologie und die Anzeigegeräte. Für die Anwendung in der Montageplanung muss das Trackingsystem in der Lage sein, die Position und Orientierung mindestens eines Anwenders in einem möglichst großen Arbeitsbereich zu erfassen. Trackingsysteme für AR-Anwendungen sollten äußerst genau arbeiten. Durch die Überlagerung von virtueller und realer Welt werden auch sehr kleine Positions- oder Winkelfehler vom Anwender wahrgenommen.

Damit Trackingsysteme im direkten Produktionsumfeld eingesetzt werden können, ist es erforderlich, dass die Systeme robust sind und auch unter Umgebungseinflüssen wie Staub, Lärm oder elektromagnetischen Einflüssen zuverlässig arbeiten. Dies gilt ebenfalls für die AR-Anzeigegeräte, für die zusätzlich die Anforderung einer möglichst hohen Auflösung und eines großen Sichtfeldes berücksichtigt werden muss.

### **4.2.3 Integration in Planungswerkzeuge**

Die Montageplanung ist ein Prozess, an dem eine Vielzahl unterschiedlicher Personen beteiligt sind. Durch die hohe Komplexität und die Vielschichtigkeit der Aufgabenstellungen kommen im Planungsprozess zahlreiche Rechnerwerkzeuge zum Einsatz. Zudem besteht der Trend einer starken Parallelisierung der Tätigkeiten, insbesondere in der Produktionsplanung und der Produktentwicklung. Aufgrund dieser Randbedingungen muss ein AR-System für die Produktionsplanung eine Vielzahl von Schnittstellen zu unterschiedlichsten Systemen aufweisen. Das System muss auch in der Lage sein, interaktive und kooperative Planungsprozesse zu unterstützen. Einen hohen Stellenwert hat dabei die konsistente Generierung, Verwaltung und Speicherung von planungsrelevanten Daten. Im Folgenden sind die Anforderungen formuliert, die sich aus Sicht der datentechnischen Integration für ein AR-System ergeben:

- Für die Unterstützung von Planungsprozessen muss das System alle planungsrelevanten Daten konsistent in einer gemeinsamen Datenbasis verwalten. Zudem ergibt sich die Anforderung, die grundlegenden Planungsobjekte Produkt, Prozess und Ressourcen flexibel miteinander verknüpfen zu können.

- Neben den direkt für die Planung benötigten Daten müssen auch AR-relevante Informationen, z. B. Benutzerdaten oder Daten für die Systemkonfiguration, verwaltet und gespeichert werden. Zur strukturierten Verwaltung dieser Daten besteht die Anforderung, die einheitliche Planungsbasis entsprechend zu erweitern.
- Damit das System auch in heterogene Systemumgebungen integriert werden kann, muss es in der Lage sein, standardisierte Datenformate (z. B. CAD-Daten, Arbeitspläne, 2D-Zeichnungen) zu verarbeiten. Zur Übernahme dieser Daten ist die direkte Anbindung an PDM und ERP-Systeme notwendig.
- Für den Einsatzbereich der Layoutplanung ist die Abbildung kinematischer Strukturen, z. B. von Robotern oder anderen Fertigungseinrichtungen, erforderlich. Das AR-System muss daher in der Lage sein, derartige Modelle abzubilden und darzustellen. Um Schnittstellenprobleme zu vermeiden und den Aufwand für die Datenaufbereitung zu reduzieren, ist eine direkte Kopplung des AR-Systems zu vorhandenen 3D-Simulationssystemen vorzusehen.
- Zur Realisierung einer durchgängigen und homogenen datentechnischen Infrastruktur muss das zu konzipierende System auf einer offenen Kommunikationsschnittstelle aufbauen. Das System soll dabei mit bereits existierenden Anwendungen kompatibel sein und möglichst herstellerunabhängige Schnittstellen aufweisen.

### 4.2.4 Anforderungen an die Systemflexibilität

Um Informationen lagegerecht in das Sichtfeld des Anwenders einzublenden, muss die räumliche Lage der jeweiligen Objekte bestimmt werden. Die Lage der Objekte kann durch unterschiedliche Transformationen zusammengesetzt werden, die z. B. dynamisch mit Trackingsystemen ermittelt werden. Abbildung 4-2 zeigt schematisch ein Inside-Out System, bei dem die Lage einer Referenzmarkierung  $P_B$ , die z. B. auf ein Betriebsmittel B aufgebracht ist, mit einer Bildverarbeitung erkannt wird. Mithilfe der Transformation  $M_{BA}$  kann die Lage des Objektes A berechnet werden. Im produktionstechnischen Umfeld besteht die Randbedingung, dass sich die Umgebungsbedingungen ständig ändern können, z. B. die Gestalt oder die Lage von Bauteilen und

Betriebsmitteln. Ändert sich z. B. die Gestalt des Betriebsmittels B in Abbildung 4-2, so muss die Referenzmarkierung des Trackings neu platziert werden. Dies führt zur neuen Transformation  $M_{BAII}$ . Weist ein AR-System die geforderte Flexibilität nicht auf, kann dies zu einem sehr hohen Aufwand für die Bereitstellung der AR-Informationen führen, da bei jeder Gestaltänderung der Betriebsmittel neue Daten für die AR-Visualisierung erzeugt werden müssten.

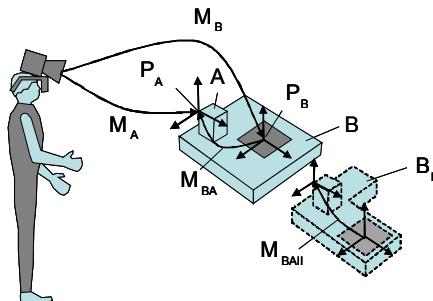


Abbildung 4-2: Positionsbestimmung mit einem Inside-Out System

Die Abbildung 4-3 veranschaulicht den Flexibilitätsbedarf bei der Lageänderung eines Betriebsmittels D. Die Lage des Bauteils E auf dem Betriebsmittel D wird durch die Transformationen  $M_C$ ,  $M_D$  und  $M_{DE}$  bestimmt. Ändert sich die Lage des Betriebsmittels durch eine Umplanung oder wird das Betriebsmittel über eine Förderanlage transportiert, muss zusätzlich die Relativlage  $M_T$  berücksichtigt werden.

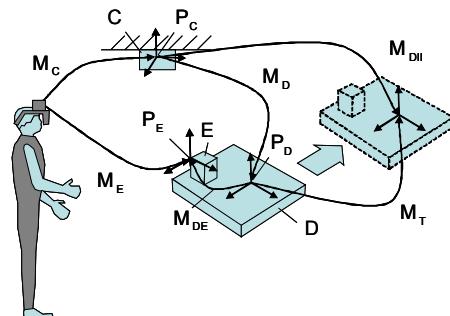


Abbildung 4-3: Änderung der Lage von Betriebsmitteln

Aus den genannten Beispielen ergeben sich folgende Anforderungen an die Flexibilität eines AR-Systems hinsichtlich der Verwaltung von Tracking-informationen:

- Das System muss es ermöglichen, die unterschiedlichen Transformationen flexibel zu verknüpfen. Zur effizienten Nutzung müssen Informationen aus CAD und Simulationssystemen automatisch übernommen werden. Verknüpfungen zwischen den grundlegenden Planungsobjekten Produkt, Betriebsmittel und Operationen sollen zur effizienten Konfiguration des AR-Systems genutzt werden.
- Sensorische Informationen des Produktionssystems sollen, wenn möglich, für das AR-Tracking integriert werden können. Wird z. B. das Betriebsmittel D in Abbildung 4-3 durch ein Fördersystem bewegt, kann diese Information zur Lagebestimmung genutzt werden.
- Das AR-System soll eine einfache Konfiguration von zusätzlichen Trackinginformationen, wie z. B. 2D-Markern, ermöglichen.

Neben der Flexibilität in Bezug auf das AR-Tracking muss die gesamte Systemarchitektur so konzipiert sein, dass unterschiedliche Hardwarekomponenten flexibel integriert werden können. So kann bei der Verwendung verschiedener AR-Anzeigegeräte eine Anpassung der grafischen Benutzeroberfläche notwendig sein, da z. B. ein monochromes Display mit einer geringen Auflösung eine andere Gestaltung grafischer Symbole und Texte erfordert als ein hochauflösendes Farbdisplay. Das AR-System muss hier die Möglichkeit einer einfachen Konfiguration bieten.

### 4.2.5 Sicherheitsaspekte

Beim Einsatz von AR-Systemen in direkten Bereichen der Produktion ist auf Sicherheitsrisiken durch die verminderte Wahrnehmung der Arbeitsumgebung zu achten. Je nach systemtechnischer Ausprägung sind diese Risiken unterschiedlich hoch. Zur Strukturierung der Sicherheitsaspekte können diese in aktive und passive Aspekte unterteilt werden. Mit aktiven Sicherheitsaspekten werden Kriterien bezeichnet, welche vom AR-System direkt auf den Benutzer einwirken. Hierzu zählen gesundheitliche Risiken, die durch die verwendete AR-Hardware entstehen können. Indirekte Sicherheitsaspekte bezeichnen Kriterien, die aus dem veränderten Verhalten des Anwenders entstehen. So können Sicherheitsrisiken

entstehen, wenn der Benutzer durch die Bedienung des AR-Systems abgelenkt wird und so Gefahrensituationen nicht rechtzeitig erkennt. Aus den genannten Sicherheitsaspekten lassen sich folgende Anforderungen definieren:

- Bei der Konzeption eines AR-System ist auf eine maximale gesundheitliche Verträglichkeit zu achten.
- Das AR-System muss so gestaltet sein, dass Gefahrensituationen sicher wahrgenommen werden können. Zudem ist das System so zu konzipieren, dass das Auftreten sicherheitskritischer Situationen bei Ausfall oder bei Störungen verhindert wird.

### 4.2.6 Zusammenfassung

AR-Systeme weisen eine hohe Komplexität auf und bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Hard- und Softwarekomponenten. Entsprechend umfangreich sind die Anforderungen, die zur Umsetzung eines AR-Systems erfüllt werden müssen. Abbildung 4-4 zeigt eine Übersicht der technischen Anforderungen. Die größte Bedeutung bei der Konzeption eines AR-Systems für die Montageplanung kommt der Integration in die bestehende Systemlandschaft und der Umsetzung modularer Hardwarekomponenten für die unterschiedlichen Phasen der Montageplanung zu.

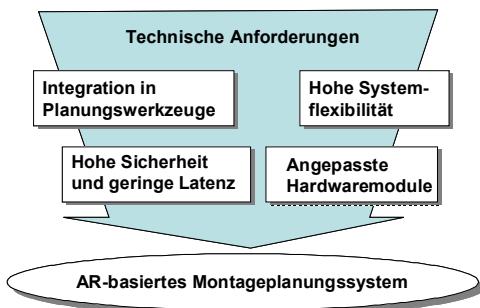


Abbildung 4-4: Technische Anforderungen an ein AR-System



## 5 Konzeption und Systementwurf

### 5.1 Übersicht

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Anforderungen für den Einsatz der Augmented-Reality-Technologie in der Montageplanung spezifiziert. Auf Basis dieser Anforderungen wird im folgenden Kapitel das Rahmenkonzept für die methodische und technische Integration von AR in der Montageplanung vorgestellt.

Ziel des beschriebenen Konzeptes ist es, die in Kapitel 2 analysierten Defizite der rechnergestützten Montageplanung zu beseitigen. Für die frühen Phasen der Montageplanung besteht die Zielsetzung in einer signifikanten Verbesserung von Planungsprozessen auf Basis von 3D-Daten. Durch die Konzeption eines Systems, welches es ermöglicht, räumliche Planungsdaten lagegerecht in der realen Produktionsumgebung darzustellen, soll die Planungsqualität erhöht, der Planungsaufwand reduziert und die Planungszeit verkürzt werden. In den Planungsphasen der Realisierung und des Betriebs zielt das Konzept auf eine verbesserte informationstechnische Integration der Montagemitarbeiter ab. Die Zielsetzung ist es, die „knappe Ressource Arbeitszeit“ (MATERN 2002, S. 2) so effizient wie möglich zu nutzen. Dabei soll eine durchgängige digitale Prozesskette zwischen der Planung und dem operativen Betrieb des Montagesystems entstehen, um die zuvor in der Planung generierten digitalen Informationen zur Unterstützung der Montagemitarbeiter vor Ort verwenden zu können.

Als Grundlage für die Konzeption werden im Abschnitt 5.2 die Einsatzmöglichkeiten und Nutzenpotenziale der AR-Technologie für die Phasen der räumlichen Planung<sup>8</sup> und der Realisierung analysiert. Diese Analyse bildet die Basis für die Abschnitte 5.3 und 5.4, in denen Konzepte und Vorgehensweisen für die Unterstützung dieser Planungsphasen vorgestellt werden. Die entwickelten Ansätze und die im Abschnitt 4.2 definierten Anforderungen bilden die Grundlage für die Gestaltung des Hard- und

---

<sup>8</sup> Mit dem Begriff räumlich Planung werden im Rahmen dieser Arbeit Planungsprozesse auf Basis von 3D-Daten bezeichnet. Hierzu zählen z. B. die Layoutplanung und die Arbeitsplatzgestaltung.

Softwaresystems. Hierzu werden im Abschnitt 5.5 modulare Hardwaremodule konzipiert. Die Konzeption der Hardwaremodule erfolgt durch eine Dekomposition des Gesamtsystems in Teilsysteme, die aus Sicht der unterschiedlichen Einsatzbereiche bewertet und anschließend zu funktionsfähigen Modulen zusammengefügt werden. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse.

### 5.2 Nutzenpotenziale und Einsatzbereiche

Mithilfe eines AR-Systems werden die Stärken des Menschen, wie z. B. sein Problemlösungspotenzial, seine Urteilsfähigkeit und seine Kreativität mit den Vorteilen technischer Sensorik und industrieller Datenverarbeitung vereint (ZÄH U. A 2003A). Ein AR-System ermöglicht es dem Anwender zusätzlich, digitale Informationen ortsgebunden und kontextbezogen abzurufen und zu speichern. Einzelne Wahrnehmungskanäle können sensorisch aufgenommen, verstärkt oder angereichert und wiedergegeben werden. Der Hauptvorteil gegenüber anderen technischen Systemen besteht darin, dass die natürliche Aktionsfähigkeit des Menschen bei der Anwendung des AR-Systems erhalten bleibt. Der Benutzer kann reale Gegenstände greifen, sich frei bewegen und uneingeschränkt mit anderen Personen kommunizieren. Damit diese technologischen Merkmale in wettbewerbsrelevante Vorteile für ein Produktionsunternehmen umgesetzt werden können, ist es notwendig, die Einsatzbereiche der AR-Unterstützung innerhalb der Montageplanung genauer zu spezifizieren. Da man die AR-Technologie als Weiterentwicklung der VR-Technologie sehen kann, liegt es nahe, dass sich Nutzenpotenziale im Bereich der Layoutplanung (räumliche Anordnung von Montagearbeitsplätzen, Fördertechnik und Lagerflächen) und der Arbeitsplatzgestaltung (Ergonomieuntersuchungen, Kollisionsanalysen, Ermittlung des Platzbedarfes) realisieren lassen.

Für diesen Planungsbereich können neben 3D-Simulations- oder VR-Systemen auch Gestaltungshilfsmittel wie Schablonen, Zeichnungen oder reale 3D-Modelle<sup>9</sup> eingesetzt werden. Eine sehr aufwändige und teure Variante ist der

---

<sup>9</sup> Als reale 3D-Modelle werden perspektivisch verkleinerte, physikalische Modelle der Montageanlagen bezeichnet. Diese Modelle werden in der Regel aus leicht formbaren Materialien (z.B. Kunststoff) hergestellt.

Aufbau eines realen Prototypen des Montagesystems. Diese Variante bietet zwar die zuverlässigsten Aussagen, da das aufgebaute System den Eigenschaften des späteren Montagesystems exakt entspricht, der finanzielle und zeitliche Aufwand ist jedoch enorm hoch. Zudem ist ein realer Prototyp eines Montagesystems nur bedingt experimentierfähig. Unterschiedliche Layoutvarianten lassen sich auf diese Art nur mit einem unvertretbar hohen Aufwand realisieren. Der Aufbau eines realen Prototypen in der späteren Montageumgebung wird in der Praxis aus diesen Gründen äußerst selten als Gestaltungsmittel eingesetzt. Schablonen oder reale 3D-Modelle sind sehr einfach in der Handhabung und können auch von Personen verwendet werden, die nicht über fundierte EDV-Kenntnisse verfügen. Als Gestaltungshilfsmittel haben sie den Nachteil, dass die Ergebnisse der Planung nur schwer zu dokumentieren sind und die erstellten Layoutvarianten nicht mit anderen digitalen Dokumenten verknüpft werden können. Dieses Defizit versuchen so genannte Planungstische (vgl. WESTKÄMPER U. A. 2002) auszugleichen. Bei diesen Gestaltungshilfsmitteln werden reale 3D-Modelle (z. B. Klötze) auf einer ebenen Oberfläche erfasst und die Layoutdaten werden in ein Rechnersystem übertragen. Dies vereinfacht zwar die manuelle Eingabe der Layoutinformation in den Rechner, dem Planer fehlt aber die realistische, räumliche Vorstellung der geplanten Montageanlage. VR-Systeme können diese Vorstellung liefern, hierzu ist aber ein sehr hoher 3D-Modellierungsaufwand erforderlich. Zudem können VR-Systeme nicht im realen Produktionsumfeld eingesetzt werden, was die Einbeziehung von Produktionspersonal in die Planung erschwert. Abbildung 5-1 zeigt eine Bewertung der genannten Gestaltungshilfsmittel für die Layoutplanung. Die Bewertung orientiert sich an den von BULLINGER (1986, S. 191) definierten Merkmalen für entsprechende Gestaltungshilfsmittel.

Gesichtspunkte für die Bewertung	Gestaltungshilfsmittel					
	2D-Zeichnung Schablonen	3D-Modell physikalisch (verkleinert)	3D-Modell physikalisch (1:1)	Planungstisch	VR-System	AR-System
Aufwand für die Erstellung	hoch	mittel bis hoch	extrem hoch	mittel	hoch	gering bis mittel, da reale Umgebung nicht modelliert werden muss
Anschaulichkeit	nur für Experten geeignet	gut	sehr gut	gut, es fehlt aber der räumliche Eindruck	sehr gut	sehr gut, zudem kann die reale Montageumgebung wahrgenommen werden
Platzbedarf	gering	mittel bis hoch	sehr hoch	mittel	mittel bis hoch	gering
Änderungsaufwand	mittel	hoch	sehr hoch	gering	mittel	gering
Verteilbarkeit der Ergebnisse	möglich, Aufwand aber hoch	möglich, Aufwand aber hoch	nicht möglich	möglich, Aufwand gering	möglich, Aufwand gering	möglich, Aufwand gering
Vollständigkeit der Darstellung	gering	gering bis mittel	sehr gut	gut	gut, je nach Modellaufwand	sehr gut, reale Montageumgebung wird unverfälscht wahrgenommen

Abbildung 5-1: Bewertung von Hilfsmitteln für die Layoutplanung

Fasst man die aus Abbildung 5-1 ersichtlichen Merkmale der unterschiedlichen Planungshilfsmittel zusammen, sind durch den Einsatz von AR bei der Layoutplanung und Arbeitsplatzgestaltung folgende Nutzenpotenziale zu erwarten:

- Der Aufwand für die 3D-Modellierung des Montagesystems wird reduziert, da nur die neu zu planenden Komponenten modelliert werden müssen. Durch die AR-Visualisierung im realen Montageumfeld muss z. B. die bestehende Gebäudestruktur nicht vollständig dreidimensional erfasst werden.
- Eine AR-basierte räumliche Planung erlaubt einen direkten Abgleich der Realität mit Simulationsdaten. Durch die Überlagerung eines 3D-Anlagenlayouts mit der realen Montageumgebung kann z. B. überprüft werden, ob alle Ressourcen korrekt erfasst wurden und in der richtigen räumlichen Anordnung abgebildet sind.
- Die AR-basierte räumliche Planung kann direkt im realen Montagebereich durchgeführt werden. Dies erlaubt die einfache Integration von Produktionspersonal bei der Planung.

- Durch den direkten Abgleich der Simulationsdaten mit der Realität wird die Planungsqualität verbessert, da Planungsfehler aufgrund ungenauer Eingangsinformation reduziert werden.

Zur Vereinfachung wird der oben genannte Einsatzbereich der Layoutplanung und Arbeitsplatzgestaltung im Folgenden als **Planungsbereich P 1** bezeichnet.

Neben der Gestaltung der Montagesysteme ist es die Aufgabe der Montageplanung, die Arbeitsunterlagen für die Montagesysteme zur Verfügung zu stellen. Als Arbeitsunterlagen gelten z. B. Stücklisten, Arbeitspläne und Zeichnungen. Diese Unterlagen liegen heute überwiegend in Papierform vor. Die stetig abnehmenden Stückzahlen und die zum Teil sehr hohe Variantenzahl lassen diese Form der Arbeitsunterlagen zukünftig als immer weniger geeignet erscheinen. Zum einen besteht ein hoher Aufwand, um die entsprechenden Dokumente auf dem aktuellen Stand zu halten, zum anderen entstehen hohe Suchzeiten nach Informationen innerhalb der Montage. In den letzten Jahren wurde daher verstärkt versucht, Multimediainformationssysteme (vgl. NEUSCHWINGER 2003) im Bereich der Montage einzusetzen. Diese Systeme erlauben die Darstellung von montagerelevanten Informationen in digitaler Form. Üblicherweise arbeiten diese Anwendungen mit einem Computermonitor als Ausgabegerät. Der Montagemitarbeiter kann so Montageinformationen, wie z. B. Zeichnungen, direkt digital abrufen. Multimediainformationssysteme bieten zwar eine Verbesserung der Informationsversorgung des Montagemitarbeiters, haben aber den wesentlichen Nachteil, dass der Mitarbeiter sich für die Informationsaufnahme von der Montageaufgabe abwenden muss. Dies resultiert in zusätzlichen nicht wertschöpfenden Operationen während der Montage. Mit Multimediainformationssystemen ist es zudem nur bedingt möglich, Informationen aktiv an den Mitarbeiter zu übertragen. Soll der Montagemitarbeiter z. B. Informationen zu einer bestimmten Variante angezeigt bekommen, ist dies zwar möglich, es ist aber nicht sichergestellt, dass der Benutzer die Informationen auch wahrnimmt, da er den Blick nicht auf den Monitor gerichtet hat. Im montagenahen Bereich der Kommissionierung werden aus diesem Grund häufig so genannte Pick-to-Light Systeme verwendet. Bei Pick-to-Light Systemen leuchten verschiedene Lampen z. B. über Behältern oder Regalen, die dem Mitarbeiter anzeigen, welche Bauteile er für die aktuelle Montageaufgabe verwenden muss. Diese Systeme erhöhen zwar die Produktivität des Arbeitsplatzes, sie eignen sich aber nur für die Visualisierung einfacher Informationen. Da die Systeme einen fest installierten Hardwareaufbau voraussetzen, sind sie sehr unflexibel und benötigen einen hohen

Änderungsaufwand bei Umgestaltungen des Arbeitssystems. Die Abbildung 5-2 zeigt eine vergleichende Bewertung der möglichen Informationssysteme.

Informationssysteme				
Gesichtspunkte für die Bewertung	papierbasierte Arbeitsanweisung	Multimedia-informations-system	Pick-to-Light	AR-System
Aufwand für die Erstellung	mittel	mittel bis hoch	sehr hoch	mittel
Verbesserung der Produktivität	gering	mittel	hoch	sehr hoch, da weniger sekundäre Montageoperationen
Platzbedarf	gering	mittel, da Monitor und Tastatur am Arbeitsplatz	mittel bis hoch	gering, da kein fest installiertes Visualisierungssystem
Änderungsaufwand	mittel	gering	sehr hoch	gering
Mögliche Informationsdichte	gering bis mittel	hoch, da auch Video und Ton Dokumente möglich	gering, nur Lichtzeichen möglich	hoch, 3D-Daten, Ton, Bild und Video möglich

Abbildung 5-2: Bewertung von Informationssystemen in der Montage

Aus der Gegenüberstellung der unterschiedlichen Informationssysteme können folgende Nutzenpotenziale für den AR-Einsatz abgeleitet werden:

- Reduzierung nicht wertschöpfender Tätigkeiten durch die Kopplung von Informationsaufnahme und primärer Montageoperation.
- Reduzierung von Suchzeiten nach Informationen durch die lagegerechte Anzeige von Daten im Bezug zu realen Montageobjekten.
- Höhere Produktivität durch bessere informationstechnische Versorgung.
- Durchgängige digitale Prozesskette von der Planung bis zum operativen Betrieb.
- Reduzierung von Einarbeitungszeiten und Verbesserung der Anlaufkurve manueller Montagesysteme.

Die Anwendung der AR-Technologie in den direkten Bereichen der Montage, d.h. an der Schnittstelle zwischen Montageplanung und operativem Betrieb des Montagesystems, wird im weiteren Verlauf der Arbeit mit **Planungsbereich P 2**

bezeichnet. Die Abbildung 5-3 zeigt die Zuordnung der identifizierten Anwendungsbereiche der AR-Technologie in der Montageplanung.

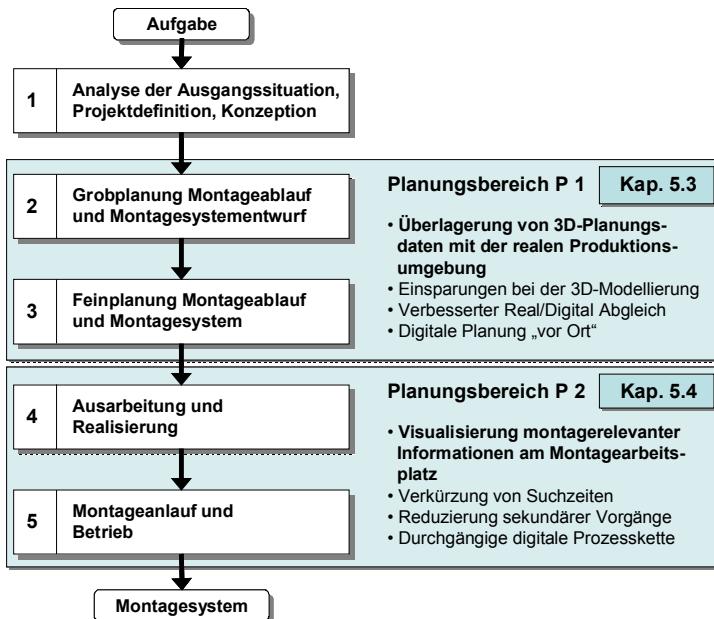


Abbildung 5-3: Bereich des AR-Einsatzes in der Montageplanung

## 5.3 Augmented Reality zur Unterstützung der räumlichen Planung

### 5.3.1 Grundprinzip der AR-unterstützten Planung

Der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Ansatz der AR-unterstützten räumlichen Planung vereint die Vorteile interaktiver Simulationstechnologie mit den Vorteilen, die die Beobachtung eines realen Systems bietet. Mit Hilfe von AR werden virtuelle Planungsinformationen derart mit der realen Montageumgebung überlagert, dass der Planer das Gefühl hat, die virtuellen Objekte würden sich in der vorhandenen Montageumgebung befinden. Dieser Ansatz eignet sich überwiegend für Planungsvorhaben, bei denen eine neue Montageanlage in einer bestehenden Montageumgebung umgesetzt werden soll.

Das Funktionsprinzip dieses Ansatzes zeigt die Abbildung 5-4. Mit Hilfe eines Positionserfassungssystems wird kontinuierlich die räumliche Lage des Anwenders in der realen Produktionsumgebung ermittelt.

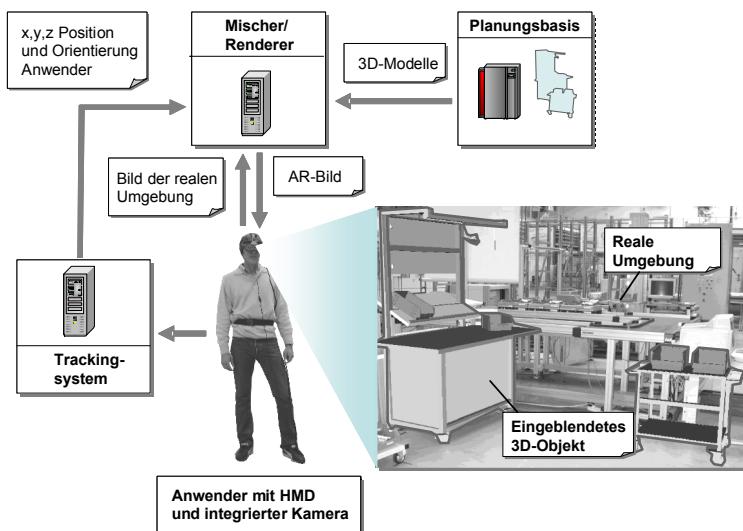


Abbildung 5-4: Prinzip der AR- unterstützten räumlichen Planung

Virtuelle Planungsobjekte wie z. B. 3D-Modelle von Handhabungsgeräten werden aus einer digitalen Planungsbasis entnommen und mithilfe der Informationen des Positionserfassungssystems so dargestellt, dass sie der Perspektive des realen Blickes des Planers auf die Montageumgebung entsprechen. Der Planer befindet sich während der AR-unterstützten Planung im realen Montageumfeld. Über eine kopfgetragene Kamera wird die reale Umgebung aufgenommen. Die Visualisierung des AR-Bildes erfolgt mithilfe eines HMDs.

Mit dem beschriebenen Ansatz lässt sich ein geschlossener Regelkreis zwischen der virtuellen Planung eines Montagesystems und der Verifizierung bzw. des Abgleichs der Planungsdaten mit der Realität umsetzen. Abbildung 5-5 zeigt diesen Regelkreis. In einem ersten Schritt wird mithilfe bekannter virtueller Methoden (z. B. 3D-Simulation) ein erster Planungsentwurf (z. B. Ideallayout) erstellt. Hierbei muss nur das zu planende Montagesystem digital modelliert werden. Die Modellierung der Montageumgebung entfällt, da diese real vorhanden ist, und somit durch das AR-System dargestellt wird. Nachdem ein erster 3D-Anlagenentwurf erstellt wurde, wird dieser mithilfe des AR-Systems in der realen Montageumgebung visualisiert. Der Planer kann nun durch den visuellen Abgleich der Planungsdaten mit der Realität feststellen, ob die Simulationsdaten den Verhältnissen der realen Umgebung entsprechen und welche Randbedingungen bei der Realisierung zu beachten sind.

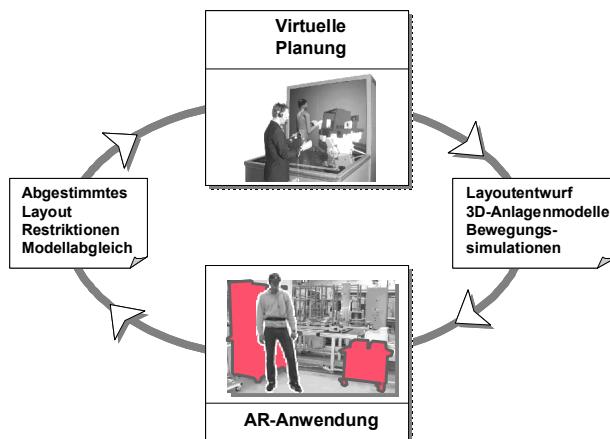


Abbildung 5-5: Regelkreis der AR-unterstützten räumlichen Planung

Durch die Interaktivität des AR-Systems besteht weiterhin die Möglichkeit die virtuellen Planungsdaten vor Ort an die bestehenden Randbedingungen anzupassen. So kann z. B. das Montagelayout durch die Umplatzierung von Komponenten interaktiv verändert werden. Die so verifizierten und geänderten Planungsdaten stehen anschließend wieder für herkömmliche virtuelle Planungsaufgaben zur Verfügung (z. B. für Simulationsläufe).

### 5.3.2 Einordnung der Planungsaufgaben

Die Einführung der AR-unterstützten Planung erfordert eine neue Zuordnung der verschiedenen Planungsaufgaben zwischen Prozessplanungswerkzeugen, 3D-Simulationssystemen bzw. VR-Anwendungen und dem AR-System. Dies ist erforderlich, um die Vorteile der einzelnen Technologien optimal zu nutzen. So eignen sich sowohl AR wie auch VR-Anwendungen für die 3D-Layoutplanung, die einzelnen Werkzeuge verfügen für diesen Planungsbereich aber über unterschiedliche Vor- und Nachteile. In der VR-Umgebung arbeitet der Planer abgeschirmt vom realen Fertigungsumfeld. Er wird daher nicht durch Umgebungseinflüsse wie Lärm, Klima oder andere Personen abgelenkt. Aufwändige Analyseschritte, wie z. B. die 3D-Planung von Fügeprozessen oder die Programmierung von manuellen Bewegungsabläufen, können hier effektiver durchgeführt werden. Der Vorteil von AR liegt in der Analyse bestehender Strukturen und deren Abgleich bzw. Anpassung an den aktuellen Planungsstand. Zudem befindet sich der Planer im realen Produktionsumfeld, d.h. am späteren Standort des Montagesystems. Er kann daher Beteiligte vor Ort, z. B. Serienplaner, Instandhaltungstechniker oder Montagemitarbeiter, in die Planung integrieren.

Prozessplanungswerkzeuge werden überwiegend für erste Strukturentwürfe, die Montageablaufplanung und Kostenanalysen eingesetzt. Bei der operativen Durchführung derartiger Planungsaufgaben ist mit keiner Verbesserung durch ein AR-System zu rechnen. Das AR-Planungssystem kann aber wichtige Eingangsinformationen für diese Planungsschritte liefern, z. B. über den zur Verfügung stehenden Platzbedarf. Abbildung 5-6 zeigt die neue Zuordnung der Planungsaufgaben zu den verschiedenen Planungswerkzeugen.

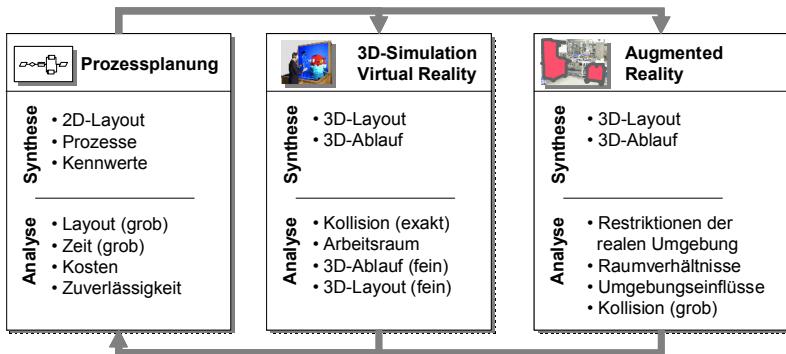


Abbildung 5-6: Einordnung der Planungsaufgaben

### 5.3.3 Prinzipielles Vorgehen für die räumliche AR-Planung

Die Anwendung der Augmented-Reality-Technologie in der räumlichen Planung ist ein neuer Ansatz der Rechnerunterstützung. Um das Nutzenpotenzial dieser Technologie vollständig freizusetzen, ist eine methodische Unterstützung des Anwenders erforderlich. Im Prinzip werden für die Anwendung drei grundlegende Phasen durchlaufen, welche in der Abbildung 5-7 dargestellt sind. In der Vorbereitungsphase werden die notwendigen Daten für die AR-Visualisierung aufbereitet. Hierzu zählt die Übernahme von 3D-Daten aus Simulationsanwendungen und CAD-Systemen. Auf Basis dieser Daten wird die AR-Szene aufgebaut. Ein wichtiger Teilschritt ist hierbei die Kalibrierung der AR-Szene, d.h. die Anpassung der Szenenskalierung und die Ausrichtung der Szene im Hallenbezugssystem. In der zweiten Phase erfolgt die eigentliche Anwendung des AR-Systems. Die AR-Szene wird hier in der realen Produktionsumgebung angezeigt und kann vom Anwender interaktiv verändert werden. Zudem kann die Szene um weitere Planungsobjekte erweitert und der Detaillierungsgrad angepasst werden. Die letzte Phase dient der Dokumentation der Planungsergebnisse.

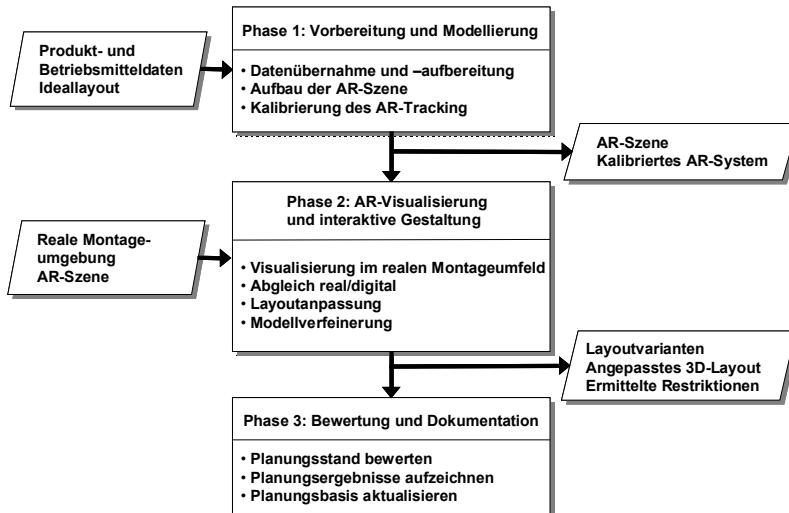


Abbildung 5-7: Phasen der AR-unterstützten räumlichen Montageplanung

### 5.3.3.1 Vorbereitung und Modellierung

Die Phase der Vorbereitung und Modellierung beginnt mit der Erstellung eines ersten Entwurfes der räumlichen Anordnung des Montagesystems. Basis dieses Entwurfes sind die in den vorangegangenen Montageplanungsphasen gewonnenen Erkenntnisse über die mögliche Struktur der zukünftigen Montageanlage. Der Aufbau erster Layoutentwürfe erfolgt hierarchisch, d.h. das Layout des Montagesystems wird in verschiedene Bereiche unterteilt, die in sich strukturelle bzw. organisatorische Einheiten bilden. So können einer Montagehalle unterschiedliche Bereiche, z. B. Vormontage, Endmontage und Lager zugeordnet werden. Die unterschiedlichen Einheiten enthalten wiederum die einzelnen Planungsressourcen, z. B. Roboter, Vorrichtungen oder manuelle Montagearbeitsplätze. Da zu den einzelnen Montagebereichen verschiedene Planungsalternativen existieren können, müssen diese im Modell mit abgebildet bzw. als Platzhalter vorgesehen werden.

Bei herkömmlichen virtuellen Planungsmethoden wird die real existierende Montageumgebung in ein räumliches Modell überführt und zusammen mit den geplanten Objekten abgebildet. Die AR-Anwendung sieht vor, reale Strukturen

erst dann in ein Modell zu überführen, wenn sich daraus Restriktionen für die Planung ergeben, z. B. mögliche Kollisionen. Dieses Vorgehen ermöglicht eine kontinuierliche Detaillierung des Modells und spart so Aufwand für die Modellierung. Bei einer AR-Szene muss daher zwischen Modellen real existierender Komponenten und Modellen geplanter Komponenten unterschieden werden. Abbildung 5-8 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer derartigen Szene.

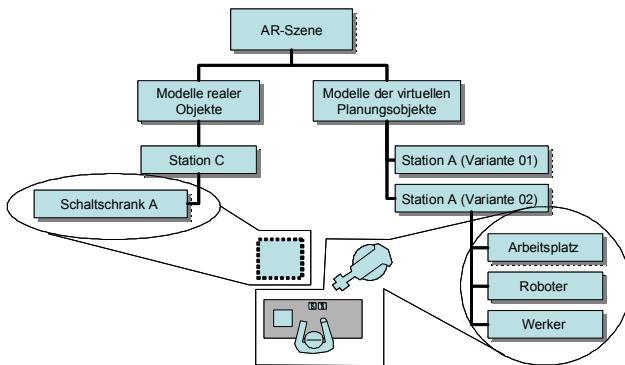


Abbildung 5-8: Prinzipieller Aufbau einer AR-Szene für die räumliche Planung

Die Modelle der realen Komponenten werden bei der AR-Visualisierung nicht angezeigt. Sie können aber genutzt werden, um Verdeckungen zwischen realen und virtuellen Objekten zu berechnen.

Zur Visualisierung der 3D-Daten bietet sich die Beschreibung der Objekte als Flächenmodelle an. Diese Datenform kann von grafischen Rechnersystemen am schnellsten verarbeitet werden. Um 3D-Daten aus CAD-Systemen in eine AR-Szene zu übernehmen, müssen die Daten konvertiert werden. Entsprechende Schnittstellen werden von zahlreichen CAD-Werkzeugen zur Verfügung gestellt. Als Format für den Datenaustausch kommen verschiedene Geometrieformate in Frage. Besonders geeignet scheint der internationale Standard VRML97<sup>10</sup>. Dieses Format wurde zwar speziell für Internetanwendungen entwickelt, ist aber aufgrund seiner Plattformunabhängigkeit und der Möglichkeit, dynamische Abläufe zu beschreiben (z. B. Bewegungsanimationen), auch im industriellen

<sup>10</sup> Die Virtual Reality Modeling Language (VRML) wurde für den Austausch von 3D-Informationen im Internet entwickelt. Sie ermöglicht die Beschreibung von 3D-Objekten, Raumklang, Oberflächeneigenschaften, Animationen und Interaktionen (vgl. VRML97 2003).

Bereich sehr verbreitet. Ein weiterer Vorteil für AR-Anwendungen ist, das VRML einen hierarchischen Szenenaufbau in Form eines Szenengraphen ermöglicht.

Ein wichtiger Prozessschritt der Vorbereitungsphase ist die Kalibrierung der AR-Szene. Damit virtuelle Planungsobjekte perspektivisch korrekt mit der realen Umgebung überlagert werden können, muss die Kopfposition und Blickrichtung des Anwenders im Bezug zu einem ortsfesten Referenzsystem der realen Montagehalle bekannt sein. Die virtuellen Objekte, die in der AR-Szene abgebildet werden, müssen sich ebenfalls auf dieses Referenzsystem beziehen. Im Idealfall würde auch das Trackingsystem der AR-Anwendung die Position des Anwenders bezogen auf das Hallenbezugssystem liefern. Dies würde aber ein Trackingsystem voraussetzen, welches fest in der Montagehalle installiert und auf das Hallenbezugssystem kalibriert ist. Da ein derartiges System extrem teuer und technisch sehr aufwändig ist, bietet sich die Umsetzung eines variablen Kalibrierungsprozesses an. Hierzu werden verschiedene Kalibriermarken in der realen Halle definiert, deren Lage bezogen auf das Hallenbezugssystem bekannt ist. Die Kalibriermarken werden anschließend mit einer Referenznummer versehen und in einer Datenbank abgelegt. Bei der Anwendung des AR-Systems wird das Trackingsystem bezogen auf die Kalibriermarken eingerichtet, d.h. das Referenzsystem des Trackings wird in die Kalibriermarken verschoben. Abbildung 5-9 zeigt die Zusammenhänge bei der Kalibrierung. Ein mobiles Trackingsystem wird hierbei derart in der Montagehalle platziert, dass mindestens eine Kalibriermarke im Arbeitsbereich liegt.

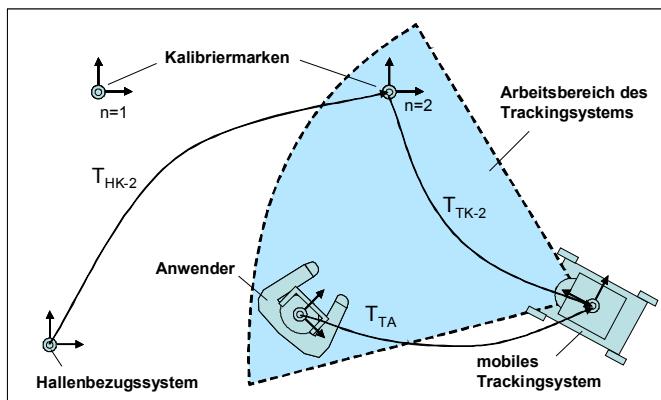


Abbildung 5-9: Kalibrierung eines mobilen AR-Trackings

Nachdem das Trackingsystem lokal fixiert wurde, kann mittels der Kalibriermarke die Transformation  $T_{TK-2}$  berechnet werden. Mithilfe der in der Datenbank hinterlegten Position  $T_{HK-2}$  der Kalibriermarke kann nun die Position relativ zum Hallenkoordinatensystem berechnet werden. Dieser Prozess muss nur einmalig, vor der Anwendung, durchgeführt werden. Wird das Trackingsystem während der Planung verschoben oder ändert sich seine Lage stetig, muss die Transformation  $T_{TK-2}$  kontinuierlich erfasst werden.

### 5.3.3.2 AR-Visualisierung und interaktive Gestaltung

In Phase 2 erfolgt die Visualisierung der zuvor aufbereiteten 3D-Modelle bzw. Layoutvarianten in der realen Montageumgebung. Ziel dieser Planungsphase ist es, die zuvor erzeugten Layoutvarianten weiter zu detaillieren und an die Randbedingungen (Hallenform, Transportwege, Lagerflächen, Stützeneinteilung, Versorgungstechnik und weitere Aspekte) der späteren Montageumgebung anzugeleichen. Aufgrund der gemeinsamen Visualisierung von virtuellen Planungsobjekten und der realen Produktionsumgebung können verschiedene Anordnungsvarianten und Planungsalternativen mit sehr geringem Aufwand erstellt und überprüft werden. Die AR-basierte Planung unterstützt daher die Anforderung einer Verkürzung der Planungszeit.

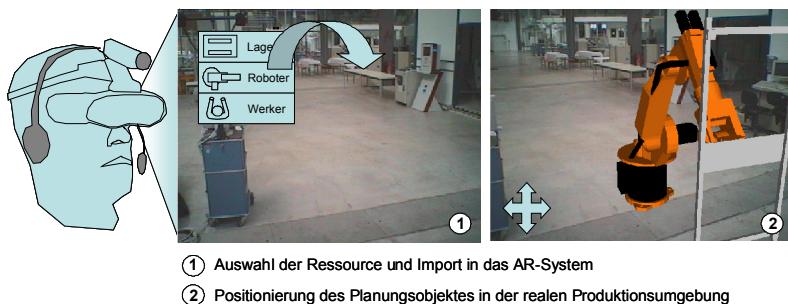


Abbildung 5-10: Vorgehen bei der AR-Layoutplanung

Der Planer importiert zunächst die vorbereiteten 3D-Modelle der einzelnen Ressourcen (z. B. manuelle Arbeitsplätze, Handhabungsmittel, Fördertechnik) in das AR-System. Anschließend kann eine grobe Positionierung auf der Fertigungsfläche vorgenommen werden. Abbildung 5-10 zeigt diese

Vorgehensschritte. Durch die AR-Visualisierung kann der Planer Restriktionen mit bestehenden Strukturen, z. B. Versorgungstechnik, sofort erkennen und die notwendigen Änderungen, z. B. Umplatzierung eines Handhabungsgerätes, vornehmen.

Die Visualisierung und Platzierung von 3D-Modellen in einer AR-Umgebung kann aus technischer Sicht auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Im Folgenden werden diese Möglichkeiten bezüglich ihrer Eignung für die räumliche Planung von Montagesystemen betrachtet. Ein AR-System bietet für die Visualisierung drei prinzipielle Möglichkeiten der Darstellung.

Zum einen können die 3D-Daten in einem VR-Modus ohne Bezug zur realen Umgebung dargestellt werden, d.h. die 3D-Daten werden nicht mit einem realen Bild „gemischt“. Das AR-System verhält sich in diesem Fall wie eine VR-Anwendung und präsentiert dem Anwender eine komplett virtuelle Darstellung. Der Vorteil im Gegensatz zu einem klassischen VR-System liegt in der mobilen Präsentationsmöglichkeit. Planungsbeteiligte sparen sich so den Weg in ein VR-Labor, zudem kann interaktiv zwischen VR-Welt und realer Umgebung gewechselt werden.

Eine zweite Möglichkeit ist die Darstellung von virtuellen Objekten in der realen Montageumgebung, ohne dass die virtuellen Objekte lage- und proportionsgerecht in die reale Umgebung integriert sind. So kann ein 3D-Layout einer Montageanlage verkleinert auf einem realen Hallenplan dargestellt werden (vgl. Abbildung 5-11, rechts). Diese Form der Visualisierung kann besonders effizient genutzt werden, wenn die virtuellen Objekte im Bezug zu einem vom Anwender manipulierbaren realen Objekt (z. B. ein 2D-Referenzmarker) dargestellt werden (vgl. Abbildung 5-11, links).

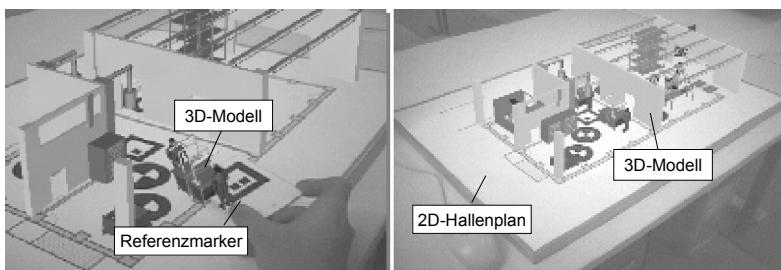


Abbildung 5-11: AR-Visualisierung in verkleinertem Maßstab

Durch diese Visualisierungsform kann der Anwender sehr einfach ein räumliches Objekt aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten. Die dritte Möglichkeit der Darstellung ist die lage- und proportionsgerechte Darstellung der 3D-Modelle in der realen Montageumgebung. In diesem Fall werden die virtuellen Planungsobjekte in Realgröße dargestellt, so als würden sie sich in der realen Montageumgebung befinden. Durch diese Visualisierungsart kann der Planer mögliche Einschränkungen des Platzbedarfes oder Restriktionen durch bestehende Strukturen direkt beurteilen. Die Blickrichtung des Anwenders auf die virtuellen Objekte ist dabei dieselbe wie auf die reale Umgebung. Damit der Planer die eingeblendeten Objekte von unterschiedlichen Seiten betrachten kann, muss er daher seinen Standpunkt in der realen Montageumgebung verändern.

Für die Unterstützung der räumlichen Montageplanung hat der AR-Modus, bei dem die virtuellen Planungsobjekte in Realgröße visualisiert werden, die größte Bedeutung. Mithilfe dieser Visualisierungsform ergeben sich neue Bewertungsmöglichkeiten. So kann der Planer zunächst die Qualität des Simulationsmodells überprüfen. Er kann z. B. feststellen, ob alle relevanten Komponenten erfasst wurden und an den entsprechenden Positionen abgebildet sind. Zudem kann die räumliche Planungssituation sehr schnell beurteilt werden, d.h. der Planer kann feststellen, ob sich die geplante Anlage unter den gegebenen Randbedingungen realisieren lässt. Der größte Vorteil der AR-Darstellung ist aber, dass virtuelle Montagelayouts interaktiv in der zukünftigen Produktionsumgebung gestaltet werden können. Der Planer kann so das zukünftige Montagelayout direkt an bestehende Randbedingungen anpassen.

Um dem Planer diese Funktionalität bereitzustellen, muss er in der Lage sein virtuelle Planungsobjekte in der AR-Umgebung zu positionieren. Hierzu sind zwei grundlegende Interaktionsformen realisierbar. Zum einen kann der Benutzer ein reales Objekt in der AR-Umgebung platzieren, welches wiederum die räumliche Referenz für ein eingeblendetes 3D-Objekt bildet. Diese Interaktionsform ermöglicht z. B. die Platzierung von virtuellen Objekten in Bezug zu realen Gegenständen in der erweiterten Realität. Eine zweite Interaktionsmöglichkeit besteht in der indirekten Platzierung der eingeblendeten Objekte, z. B. durch die numerische oder grafische Eingabe der Objektposition. Die Abbildung 5-12 zeigt die beiden möglichen Interaktionsformen.

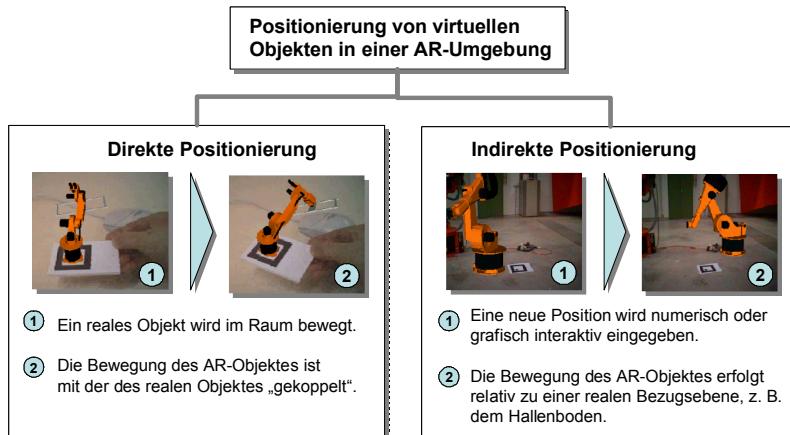


Abbildung 5-12: Positionierung von AR-Objekten

Für den Einsatz in der räumlichen Montageplanung ergeben sich unterschiedliche Kombinationen der Visualisierungsmodi und der Positionierungsarten. Die direkte Positionierung eignet sich nur für Anwendungen, bei denen die realen Referenzobjekte im Greifraum des Anwenders positioniert und im verkleinerten AR-Modus dargestellt werden. Im AR-Modus, bei dem die virtuellen Planungsobjekte in Realgröße dargestellt werden, ist die Platzierung von realen Referenzobjekten aufgrund der langen Wegstrecken zu zeitaufwändig. Abbildung 5-13 gibt eine Übersicht über die Kombinationsmöglichkeiten und Eignung von Visualisierungs- und Positionierungsarten.

Positionierung \ Visualisierung	VR-Modus	AR-Modus verkleinert	AR-Modus Realgröße
direkt	○	●	○
indirekt	●	○	●
<span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">●</span> geeignet <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">○</span> bedingt geeignet <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">○</span> nicht geeignet			

Abbildung 5-13: Eignung von Visualisierungs- und Positionierungsarten

Aus der Abbildung 5-13 wird deutlich, dass ein AR-System im Gegensatz zu einer VR-Anwendung unterschiedliche Positionierungsarten für die verschiedenen Visualisierungsmodi bereitstellen muss.

### 5.3.3.3 Bewertung und Dokumentation der Planungsergebnisse

Ein wichtiger und abschließender Prozessschritt der AR-unterstützten Planung ist die Bewertung und Dokumentation der Planungsergebnisse. Im Gegensatz zu einer klassischen 3D-Simulation ergeben sich bei einer AR-unterstützten Planung neue Bewertungsmöglichkeiten für den Anwender, da die Vorteile der „realen Beobachtung“ und der Simulationstechnik vereint werden.

Abbildung 5-14 zeigt die wesentlichen Erkenntnisse bzw. Aussagen, die auf Basis einer AR-Visualisierung getroffen werden können.

Erkenntnisse bzw. Aussagen	V erfahren
① Abstände zwischen virtuellen Objekten	Berechnung auf Basis des 3D-Modells
② Abstände zwischen virtuellen und realen Objekten	Berechnung durch Addition der virtuellen und realen Strecke im Bezug zu einer gemeinsamen Referenz
③ Kollisionen (grob) bzw. Einschränkungen	Visualisierung
④ Bewegungsbereich bzw. Freiräume	Visualisierung

Abbildung 5-14: Bewertung eines Planungsstandes mit AR

Zur Beurteilung der Raumsituation muss der Planer im Wesentlichen Aussagen über Abstände bzw. Freiräume gewinnen. Abstände und Kollisionen zwischen virtuellen Objekten können dabei direkt auf Basis der 3D-Modelle berechnet werden. Abstände zwischen realen Objekten und virtuellen Objekten lassen sich durch die Addition der realen und virtuellen Strecke im Bezug auf eine gemeinsame Referenz gewinnen. Die Strecke zwischen dem realen Objekt und der Messreferenz  $S_R$  (vgl. Abbildung 5-15) kann beispielsweise mit einem Laser-Abstandsmesser oder einer Messeinrichtung eines Trackingsystems ermittelt werden. Die „virtuelle Verlängerung“ der Messtrecke  $S_V$  (vgl. Abbildung 5-15) lässt sich auf Basis des 3D-Modells berechnen.

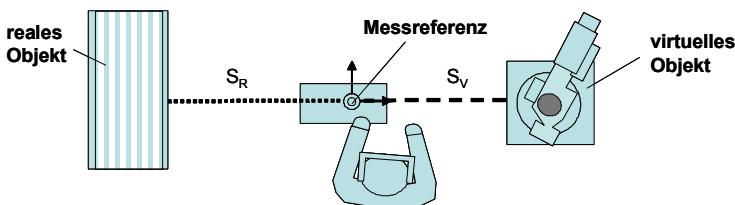


Abbildung 5-15: Erfassung von Abständen zwischen virtuellen und realen Objekten

Mit dem geschilderten Verfahren können neben Abständen auch mögliche Kollisionen und räumliche Bewegungsbereiche, z. B. von Handhabungsgeräten, analysiert werden. In sehr frühen Phasen der Planung sind hierfür oft nur grobe Abschätzungen der Raumverhältnisse erforderlich. Die AR-unterstützte Planung eignet sich in diesem Fall besonders gut, da nicht alle Planungsobjekte dreidimensional modelliert werden müssen. Die AR-Planung unterstützt so einen kontinuierlichen Planungsprozess vom „groben zum feinen“. Neben den genannten Bewertungsmöglichkeiten ist es mit AR auch möglich, virtuelle Greifräume, Sicherheitsbereiche oder Logistikwege in der AR-Umgebung anzuzeigen und zu analysieren.

Einen besonderen Stellenwert bei der AR-Planung hat die Nachvollziehbarkeit der Planungsergebnisse. Nur so kann bei Änderungen nachverfolgt werden, auf welcher Basis bestimmte Planungsentscheidungen getroffen wurden. Auch aus Haftungsgründen ist eine sorgfältige Dokumentation der einzelnen Planungsschritte erforderlich. Zudem bildet die Dokumentation die

Eingangsinformation für nachgelagerte Planungsschritte, z. B. die Auswahl von Handhabungssystemen.

Die AR-unterstützte Layoutplanung basiert auf der Kombination von interaktiver 3D-Simulationstechnik und der Wahrnehmung der realen Montageumgebung. Folgende Informationen müssen daher festgehalten werden:

- Alle digitalen Informationen auf deren Basis die Planung stattgefunden hat (z. B. 3D-Modelle, Layoutinformationen, Bewegungssimulationen).
- Eingangsinformationen der realen Montageumgebung (z. B. Bild der realen Umgebung).
- Informationen über analysierte Probleme (z. B. mögliche Kollisionen, Einschränkungen des Platzbedarfs).
- Organisatorische Informationen (z. B. verantwortliche Planer, Datum, Planungsstand).

Die digitalen Eingangs- und Ausgangsinformationen der AR-unterstützten Planung werden für die Dokumentation in einer gemeinsamen Datenbasis gespeichert. 3D-Geometriedaten lassen sich in Form von Standardformaten sichern. Mit Hilfe des VRML-Standards können neben den 3D-Informationen auch Bewegungsanimationen in Dateiform abgelegt werden. Digitale Planungsinformationen, wie 3D-Modelle und Bewegungsbahnen, lassen sich unabhängig von der technischen Ausprägung des AR-Systems speichern und verwalten. Eingangsinformationen aus der realen Umgebung stehen hingegen nur bei AR-Systemen zur Verfügung, die diese Daten auch digital verarbeiten. Beim VST-Verfahren wird die reale Umgebung mit einer Videokamera aufgenommen und die 3D-Daten werden in das Videobild gezeichnet (vgl. Abschnitt 3.3.1). Das AR-Bild, welches der Anwender wahrnimmt, kann in diesem Fall direkt aufgezeichnet werden. Neben der Aufzeichnung des Videobildes müssen auch die Position des Anwenders in der Montageumgebung und relevante Parameter des AR-Systems (z. B. Kalibrierungsinformationen) gespeichert werden. So kann die Planung nach einer Unterbrechung wieder an der ursprünglichen Stelle fortgesetzt werden.

Für die Dokumentation der analysierten Planungsprobleme und die Ablage organisatorischer Informationen können zum Teil vorhandene, betriebliche Anwendungen, z. B. internetbasierte Berichtssysteme genutzt werden. Da in der industriellen Praxis aber keine Systeme existieren, welche das einfache Einfügen

von grafischen Hinweisen und Textinformationen in Bild- und Videodokumente ermöglichen, müssen derartige Systeme für die AR-unterstützte Layoutplanung zur Verfügung gestellt werden.

### 5.4 Informationstechnische Unterstützung des Montagemitarbeiters

Nachdem das Montagelayout, die Montageabläufe und alle Betriebsmittel festgelegt wurden, beginnt die Montageplanungsphase der Realisierung. In diese Planungsphase fallen alle Aktivitäten, die für den Montagesystemaufbau und -anlauf notwendig sind. Gegebenenfalls ist in dieser Phase auch noch eine Umzugsplanung durchzuführen (BULLINGER 1986, S. 326).

Ein besonderer Aspekt beim Montagesystemaufbau und -anlauf ist die Bereitstellung notwendiger Arbeitsunterlagen (Arbeitspläne, Prüfpläne, Arbeitsfolgenkarten usw.). Neben der Bereitstellung der Arbeitsunterlagen hat die Arbeitsunterweisung der Montagemitarbeiter einen besonders hohen Stellenwert, da die sachgemäße Unterweisung die Voraussetzung für ein optimales Anlaufverhalten des gesamten Montagesystems ist. Den Montagemitarbeitern müssen hierzu nicht nur die einzelnen Montageaufgaben (Vorgangfolge, Prüfinformationen) bekannt sein, sie müssen auch über die Bedienung von Betriebsmitteln und das Verhalten bei Störungen unterwiesen werden.

Nach dem aktuellen Stand der Technik werden zur Arbeitsunterweisung überwiegend papierbasierte Hilfsmittel eingesetzt. Die Komplexität der zu vermittelnden Inhalte, welche durch die zunehmende Produktkomplexität und die steigenden Variantenzahlen bei gleichzeitig sinkenden Stückzahlen bedingt ist, erfordert zukünftig neue Hilfsmittel zur Unterweisung des Montagepersonals. Hinzu kommt, dass Montageanlagen heute zwar mit virtuellen Methoden geplant werden, die Informationen aber nicht effizient für die Arbeitsunterweisung der Werker genutzt werden. Die Gründe hierfür liegen überwiegend darin, dass keine geeigneten Methoden und Werkzeuge zur Verfügung stehen, um virtuelle Planungsinformationen (z. B. Bewegungssimulationen, CAD-Daten) für die Darstellung am Montagearbeitsplatz aufzubereiten. Auch die Visualisierung vor Ort ist eine besondere Herausforderung, da durch zusätzliche Einrichtungen wie visuelle Anzeigegeräte oder Interaktionsgeräte wie Maus und Tastatur, wertvoller

Arbeitsraum des Montagearbeitsplatzes belegt wird und sich der Montagemitarbeiter für den Abruf der Montageinformationen von seiner Montageaufgabe abwenden muss.

Der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Ansatz nutzt die AR-Technologie, um die Vorteile der interaktiven, visuellen Darstellung komplexer Sachverhalte am realen Montagearbeitsplatz zu ermöglichen. Der Montagemitarbeiter hat so die realistische haptische Rückmeldung realer Montagebauteile und bekommt zusätzlich visuelle Informationen zur Unterstützung eingeblendet.

### **5.4.1 Grundprinzip der AR-Mitarbeiterunterstützung**

Der wesentliche Vorteil des Einsatzes der AR-Technologie für die Unterweisung von Montagemitarbeitern liegt in der Möglichkeit, montagerelevante Informationen lage- und situationsgerecht anzuzeigen. Dies bedeutet zum einen, dass Montageinformationen direkt im Sichtfeld des Mitarbeiters, z. B. neben bestimmten Bauteilen angezeigt werden. Neben der Reduzierung von Kopf- und Blickbewegungen kann so auch die Aufmerksamkeit des Mitarbeiters gesteigert werden. Zum anderen werden sensorische Eingangsinformationen genutzt, um die Montageanweisungen an die jeweilige Montagesituation anzupassen. Durch die Auswertung von Bilddaten mithilfe einer Bilderkennung können auf diese Art z. B. Montagevarianten identifiziert und die entsprechenden Montageanweisungen angezeigt werden.

Eine Teilkomponente eines AR-Systems für die Arbeitsunterweisung ist ein Head-Mounted Display mit integrierter Kamera. Die Kamera dient zur Aufnahme der realen Montagesituation und liefert die Eingangsdaten für ein Bildverarbeitungssystem. Mithilfe der Bildverarbeitung wird die räumliche Lage von Montageobjekten ermittelt und es werden bestimmte Montageobjekte identifiziert. Die anhand der Bildverarbeitung gewonnenen Informationen werden genutzt, um die in einer Datenbank abgelegten Montageinformationen auszuwählen. So werden z. B. Informationen zu einem Montageobjekt angezeigt, welches sich im Arbeitsraum des Anwenders befindet. In diesem Fall werden Montageinformationen automatisch abgerufen, wenn sich das betreffende Bauteil im Sichtfeld des Mitarbeiters befindet.

AR-Informationen können auch zu Objekten angezeigt werden, die sich nicht im Sichtfeld des Anwenders befinden. Dies ist für Montagevorgänge wichtig, bei

denen Montageteile „blind“ gegriffen“ werden. Die Auswahl der Informationen wird in diesem Fall nicht über die Bilderkennung gesteuert. Die Daten werden entweder direkt vom Mitarbeiter abgerufen oder durch andere Eingangssignale aktiviert (z. B. Sensorschalter am Arbeitsplatz).

Abbildung 5-16 zeigt das Grundprinzip eines AR-Systems zur informationstechnischen Unterstützung des Montagemitarbeiters.

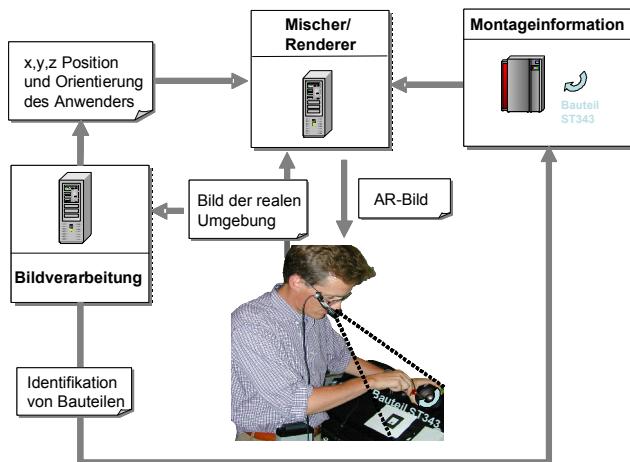


Abbildung 5-16: Grundprinzip der AR-basierten Arbeitsunterweisung

Mithilfe der AR-Technologie kann im Umfeld der Arbeitsunterweisung ein geschlossener Regelkreis zwischen der Montageplanung und den Montagemitarbeitern realisiert werden. So wird es möglich, die Arbeitsunterlagen während der Anlaufphase eines Montagesystems an die Bedürfnisse der Mitarbeiter anzupassen und auftretende Restriktionen reaktionsschnell in entsprechende Anweisungen umzusetzen. Abbildung 5-17 zeigt diesen neuen Regelkreis zwischen Montageplaner und Werker. Der Planer ist für die Analyse der Arbeitsaufgabe, die Bereitstellung der AR-basierten Arbeitsunterlagen und die Ergebniskontrolle zuständig. Die AR-basierten Arbeitsanweisungen können anschließend vom Montagemitarbeiter abgerufen werden. Dieser führt die Montageaufgabe durch und wird dabei durch das AR-System unterstützt. Auftretende Montageprobleme, z. B. Qualitätsprobleme, werden vom Werker direkt an den Montageplaner rückgemeldet. Dieser kann

dann entscheiden, ob sich die Probleme durch eine zusätzliche informationstechnische Unterstützung (z. B. besondere Montagehinweise) beheben lassen und ergänzt im Bedarfsfall die Arbeitsunterlagen. Durch den Einsatz der AR-Technologie in der Realisierungsphase steigt so nicht nur die Produktivität des Montagemitarbeiters, sondern es findet eine enge informationstechnische Verzahnung zwischen operativem Betrieb und Montageplanung statt.

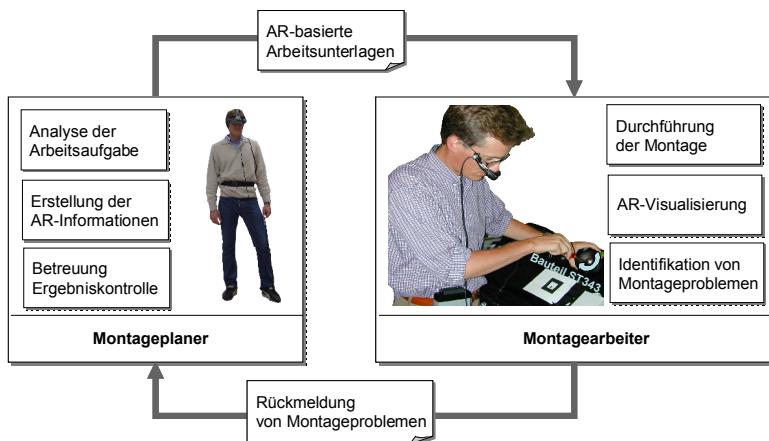


Abbildung 5-17: Regelkreis der AR-Arbeitsunterweisung

#### 5.4.2 Vorgehensweise zur AR-unterstützten Arbeitsunterweisung

Um die AR-Technologie für die Arbeitsunterweisung von Montagemitarbeitern einzusetzen, sind zahlreiche neue Aufgaben, insbesondere vonseiten der Montageplanung durchzuführen. So müssen nicht nur digitale Montageinformationen definiert bzw. aufbereitet werden, es sind auch zusätzliche Tätigkeiten für den Einsatz des AR-Systems zu bearbeiten, z. B. die Definition von Referenzmarken für das AR-Tracking. Da es keine bekannten Verfahren für die Arbeitsunterweisung mithilfe von AR gibt, wird im Folgenden eine Vorgehensweise beschrieben, die diesen Prozess unterstützt.

Abbildung 5-18 zeigt die definierten Teilschritte der Vorgehensweise, die sich in insgesamt vier Phasen gliedert. In der ersten Phase werden die Arbeitsaufgabe

und die entsprechenden Arbeitsmethoden analysiert. Hier wird im Wesentlichen festgelegt, welche Arbeitsschritte informationstechnisch unterstützt werden sollen und welche Ausgangsinformationen hierfür vorliegen. In der zweiten Phase erfolgt die Erstellung der AR-Arbeitsanweisungen. Hierfür werden die digitalen Montageinformationen mit AR-spezifischen Daten verknüpft und der Einsatz des AR-Systems wird vorbereitet. In dritten Phase erfolgt die Unterweisung mithilfe des AR-Systems. Die letzte Phase dient der Betreuung des Montagemitarbeiters und der Kontrolle der Lern- und Leistungsergebnisse. Im Bedarfsfall erfolgt in dieser Phase eine Anpassung der AR-Arbeitsunterlagen.

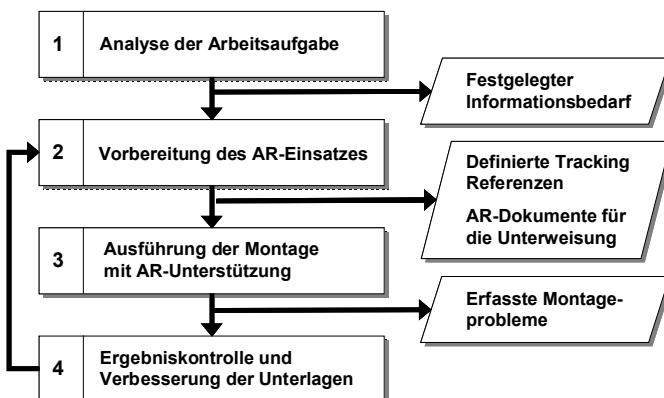


Abbildung 5-18: Vorgehensweise für die AR-unterstützte Arbeitsunterweisung

In den folgenden Teilkapiteln werden die einzelnen Phasen, die in Abbildung 5-18 aufgezeigten Vorgehensweise, detaillierter beschrieben.

### 5.4.2.1 Analyse der Arbeitsaufgabe

Die erste Phase beim Einsatz der AR-Technologie für die Arbeitsunterweisung dient der Bestimmung des Informationsbedarfs und der Festlegung derjenigen Informationen, die mithilfe des AR-Systems angezeigt werden sollen. Ein generalisiertes Vorgehen kann für diese Phase nur schwer formuliert werden, da die Entscheidung, welche Informationen relevant sind und in welcher Form diese dargestellt werden sollen, von zahlreichen innerbetrieblichen Faktoren (z. B. Qualifikationsniveau der Mitarbeiter, Produktkomplexität, Variantenzahl,

Unterscheidbarkeit der Montageteile usw.) abhängig ist. Zur Unterstützung des Planers können aber grundsätzliche AR-Informationsklassen und Richtlinien zur Auswahl der unterschiedlichen Klassen formuliert werden.

Die erste Klasse bilden alle Informationen, die nicht in direktem räumlichem Kontext (kontextunabhängig) zur Verfügung gestellt werden müssen. Hierzu zählen z. B. Angaben zum Montageauftrag wie Losgrößen, Lieferantenangaben oder Auftragsnummern. Die zweite Klasse bilden Informationen, die in räumlichem zweidimensionalem Bezug (kontextabhängig 2D) zur Montageaufgabe benötigt werden. Hierzu zählen z. B. Prüfinformationen in Textform, die neben einem realen Montagebauteil eingeblendet werden. Eine dritte Klasse bilden Informationen, die in räumlichem dreidimensionalem Bezug (kontextabhängig 3D) zu den Montageobjekten stehen, z. B. 3D-Animationen von Fügevorgängen oder andere lagegerecht eingeblendete 3D-Objekte. Abbildung 5-19 zeigt die unterschiedlichen Arten der Informationsdarstellung in einer AR-Umgebung.

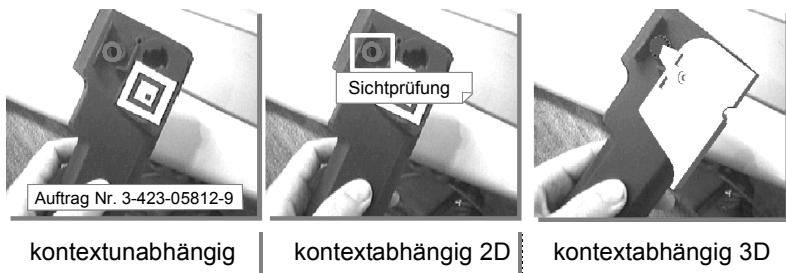


Abbildung 5-19: Arten der Informationsdarstellung mit AR

Je nach Informationsart entsteht ein unterschiedlicher Aufwand bei der Informationsbereitstellung und ein bestimmter zu erwartender Nutzen bei der Visualisierung der Informationen. Bei Informationen, die im Bezug zu realen Montageobjekten dargestellt werden, ist z. B. ein höherer Erstellungsaufwand zu erwarten, da sie mit räumlichen Daten verknüpft werden müssen. Bei der Visualisierung dieser kontextabhängigen Daten spart sich der Mitarbeiter aber sekundäre Montagebewegungen, die z. B. durch den wechselnden Blick zwischen Arbeitsunterlagen und realer Montageumgebung auftreten. Da kontextunabhängige Informationen außer der Konvertierung in geeignete Darstellungsformate keiner weiteren Behandlung bedürfen, muss der Planer

vielfach abwägen, welche Daten kontextabhängig dargestellt werden sollen. Folgende Richtlinien können hierfür definiert werden:

- Alle Montageinformationen, die eine erhöhte Aufmerksamkeit des Montagemitarbeiters zum Ziel haben und variantenbezogen sind (z. B. Prüfanweisungen für bestimmte Bauteile), sollten kontextabhängig angezeigt werden.
- Komplexe Fügebewegungen schwer unterscheidbarer Montageteile sollten ebenfalls kontextabhängig dargestellt werden. Der Mitarbeiter benötigt so wesentlich weniger Zeit um die Montagebewegung nachzuvollziehen. Zudem werden Fehler vermieden.
- Auswahlvorgänge innerhalb der Montage, die durch sehr hohe Variantenzahlen gekennzeichnet sind, lassen sich effektiver durch eine kontextabhängige Informationsdarstellung unterstützen.

### 5.4.2.2 Vorbereitung des AR-Einsatzes

Nachdem die Arbeitsaufgabe analysiert wurde und feststeht, welche Informationen kontextabhängig und welche kontextunabhängig dargestellt werden, können die wesentlichen Vorbereitungen für den Einsatz des AR-Systems vorgenommen werden. Die wichtigsten Arbeitsinhalte dieser Phase sind die Definition von Referenzmarken für das AR-Tracking, die Erstellung der AR-basierten Arbeitsdokumente und die Anpassung des AR-Systems an die Umgebungsbedingungen des Montagearbeitsplatzes.

Die Vorbereitung beginnt mit der Festlegung der Referenzmarken für das AR-Tracking. Wie aus dem Kapitel 4 hervorgeht, eignen sich für diesen Einsatzbereich optische Trackingsysteme, bei denen die Sensorik (z. B. ein Kamerasytem) am Anwender angebracht ist und die Referenzen sich in der Umgebung befinden. Als Trackingreferenzen dienen überwiegend zweidimensionale Markierungen oder andere markante Merkmale in der Umgebung. Wesentliche Voraussetzung für ein zuverlässiges Tracking ist, dass sich die Markierungen im Sichtfeld der Kamera befinden. Da die Aufnahmerichtung der Kamera der Blickrichtung des Benutzers entspricht, kann der Aufnahmebereich der Kamera durch das Blickfeld des Anwenders angenähert werden. Aufgabe des Planers ist es, die Referenzmarken so am Montagearbeitsplatz anzutragen, dass sie für Tätigkeiten, die durch AR-

Informationen unterstützt werden sollen, im Blickfeld des Anwenders liegen. Bei der Anordnung der Referenzmarken muss besonders auf eine freie Sichtstrecke zwischen Kamera und Trackingreferenz geachtet werden. Zudem sollten die Referenzmarken, soweit möglich, nur auf Ressourcen angebracht werden. Die Anbringung von Marken an Produktteilen ist wesentlich aufwändiger, da jedes Bauteil gekennzeichnet werden müsste. Dieser Aufwand lohnt sich nur, wenn sich die Referenzmarken in bestehende Auszeichnungen, wie z. B. einen Barcode, integrieren lassen.

Um die Aufgabe der Markeranordnung effizient zu bearbeiten, eignet sich besonders der Einsatz der 3D-Simulation. Der Planer kann die Referenzmarken hiermit zunächst in einem 3D-Layout des Montagearbeitsplatzes platzieren. Durch die Bewegungssimulation des Montagevorgangs kann auch der vom Werker überstrichene Sichtbereich erfasst werden. Mithilfe des 3D-Simulationsmodells kann sehr schnell die Anordnung der Referenzmarken ermittelt und optimiert werden. Die Basis für die Simulation liefert das 3D-Modell des Montagearbeitsplatzes, welches in der Phase der Layoutplanung bereits aufgebaut und mit der Realität abgeglichen wurde. Der Aufnahmebereich der Kamera lässt sich durch ein räumliches Modell des Kamerablickfeldes analysieren. Basis für das Kameramodell sind die Kameraparameter der realen Kamera des AR-Systems (z. B. Field of View, Fokus). Durch die kinematische Kopplung des Kameramodells an das virtuelle Menschmodell der 3D-Simulationen wird der Aufnahmebereich des AR-Systems ermittelt.

Nachdem die Anordnung der Referenzmarken festgelegt wurde, werden die Referenzen mit einer eindeutigen Schlüsselnummer benannt und in der Ressourcendatenbank der Planungsbasis abgelegt. Zu jeder Referenz wird zusätzlich die Relativtransformation zwischen dem Koordinatensystem der Referenz und einem definierten Bezugssystem des Montagearbeitsplatzes abgelegt. Dies erleichtert die spätere relative Zuordnung der AR-Informationen. Wird als Bezugssystem z. B. das Basissystem einer Montagebaugruppe gewählt, müssen 3D-Daten, die aus CAD-Systemen übernommen werden, nur im Bezug zu diesem Koordinatensystem exportiert werden. Mithilfe der abgespeicherten Relativtransformationen und der vom Trackingsystem ermittelten Lage der Trackingreferenz kann somit das 3D-Objekt lagegerecht visualisiert werden.

Der zweite wesentliche Teilschritt ist die Zusammenstellung der Informationen aus den jeweiligen Erzeugersystemen (z. B. CAD, ERP und 3D-Simulationssystemen) die Konvertierung der Daten in Formate die vom AR-

System verarbeitet werden können und die Zuordnung der Trackingreferenzen zu den einzelnen Montageoperationen. Bei einer detaillierten Planung kann davon ausgegangen werden, dass die Informationstiefe der Planungsbasis für die Erstellung der Arbeitsanweisungen ausreicht (JONAS 2000, S. 147). Bei einer AR-basierten Arbeitsunterweisung hat der Planer daher lediglich die Aufgabe, die Montageinformationen (z. B. verwendete Ressourcen, Beschreibung des Arbeitsvorgangs) mit AR-spezifischen Daten zu verknüpfen. Hierzu ordnet der Planer jedem Montagevorgang die entsprechende Trackingreferenz zu und wählt die Informationen aus, die angezeigt werden sollen. Bei Textinformationen oder Annotationen ist zusätzlich die Definition einer weiteren Relativtransformation nötig, welche die Verschiebung zwischen dem Bezugssystem des Arbeitsplatzes und der gewünschten Visualisierungslage angibt.

### **5.4.2.3 Ausführung der Montage mit AR-Unterstützung**

Nachdem die AR-Arbeitsanweisungen vom Planer erstellt wurden, kann der Montagemitarbeiter mit AR-Unterstützung arbeiten. Hierzu muss der Werker im Bedarfsfall zunächst mit der Funktionsweise des AR-Systems vertraut gemacht werden. Insbesondere muss der Werker darüber informiert werden, welche Informationen ihm zur Verfügung gestellt werden und wie er weitere Informationen abrufen kann. Dem Planer kommt weiterhin die Aufgabe zu, das AR-System an die Umgebungsbedingungen der Montagestation anzupassen (z. B. die Lichtverhältnisse) und den Werker bei den ersten Montagearbeiten zu betreuen.

### **5.4.2.4 Ergebniskontrolle und Verbesserung der Unterlagen**

Nach einem definierten Zeitraum sollte eine Ergebniskontrolle der AR-basierten Arbeitsunterweisung stattfinden. Ziel dieser Phase ist die Kontrolle der Leistungsergebnisse und die Verbesserung der Arbeitsanweisungen. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Anpassung der AR-Dokumente an den Leistungsgrad des Montagemitarbeiters. Hierzu kann zum einen der Montagemitarbeiter befragt werden, zum anderen lässt sich der notwendige Verbesserungsbedarf aus einer Analyse der Arbeitsergebnisse (z. B. Fehlteile, Stückzahlunterschreitung) ableiten.

## 5.5 Gestaltung modularer AR-Hardwarekomponenten

Entsprechend der Zielsetzung soll in dieser Arbeit ein Konzept für den Einsatz der AR-Technologie in der Montageplanung entwickelt werden. Neben der methodischen Unterstützung und der Umsetzung eines Softwaresystems sind hierzu auch geeignete Hardwaresysteme zu entwerfen. Aufgrund der im Abschnitt 5.2 aufgezeigten unterschiedlichen Planungsbereiche ist ein sinnvoller Ansatz die konsequente Modularisierung in bereichsspezifische Lösungen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Gestaltungsaspekte eines AR-Hardwaresystems isoliert betrachtet, hinsichtlich der Anforderungen der einzelnen Planungsbereiche bewertet und zu anwendungsspezifischen Lösungen ausgearbeitet.

### 5.5.1 Bewertung visueller Ausgabegeräte

Eine wesentliche Komponente eines AR-Systems ist das visuelle Anzeigegerät. Für die definierten Planungsbereiche innerhalb der Montageplanung ist eine hohe Mobilität des Anwenders gefordert. So muss sich dieser im Planungsbereich P 1 frei in einer realen Fertigungsumgebung bewegen können. Ein zweites Kriterium ist die durch das Anzeigegerät mögliche Immersion. Für den Planungsbereich P 1, in welchem die AR-Technologie für die Layoutplanung eingesetzt wird, ist eine hohe Immersion des Anwenders erforderlich. Der Anwender soll hier das Gefühl haben, die virtuellen Planungsobjekte würden sich aktuell im realen Montageumfeld befinden. Durch die Immersion wird bei dieser Anwendung die Vorstellungskraft und somit die Kreativität des Planers unterstützt. Im Gegensatz dazu ist für den Planungsbereich P 2 nur eine mittlere bis geringe Immersion erforderlich. Der Anwender soll in diesem Fall Zusatzinformationen für die Montage bestimmter Produkte erhalten. Hierfür reicht die Fähigkeit aus, einfache Objekte, z. B. Text, 2D-Daten oder 3D-Objekte geringer Komplexität zu visualisieren. Mithilfe der Bewertungskriterien der Immersion und der Mobilität kann eine erste Auswahl in Frage kommender Anzeigegeräte vorgenommen werden. Die Abbildung 5-20 zeigt eine entsprechende Grobklassifizierung.

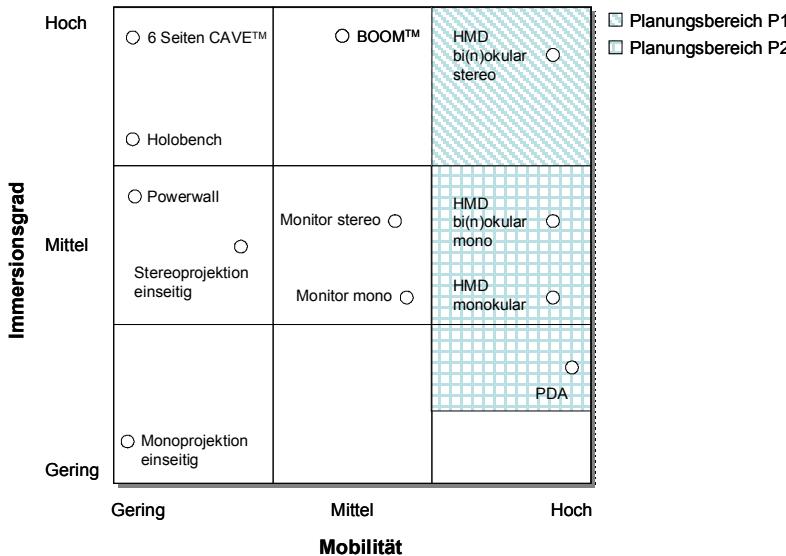


Abbildung 5-20: Einordnung von Visualisierungsgeräten

Aus der Grobklassifizierung in Abbildung 5-20 lässt sich erkennen, dass großflächige Projektionssysteme, wie sie z. B. bei VR-Anwendungen in der Automobilentwicklung eingesetzt werden, für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten AR-Anwendungen nicht geeignet sind. Die Geräte bieten zwar einen hohen Immersionsgrad, sind aber völlig immobil. Für die Planungsbereiche P 1 und P 2 kommen daher nur kopfgetragene Anzeigegeräte in Frage. Für den Planungsbereich P 2 sind leichte monokulare Displays geeignet. Binokulare und biokulare Displays eignen sich überwiegend für den Planungsbereich P 2.

### 5.5.2 Analyse von Visualisierungsverfahren

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt eine erste Einordnung der visuellen Anzeigegeräte vorgenommen wurde, soll nun analysiert werden, welches Visualisierungsverfahren für die betrachteten Einsatzbereiche am sinnvollsten erscheint. Kopfgetragene Anzeigegeräte können je nach Bauart im OST oder VST-Verfahren (vgl. Abschnitt 3.3.1) betrieben werden.

Systembedingt ergeben sich unterschiedliche Merkmale der Verfahren, die in der Abbildung 5-21 zusammengefasst sind.

Verfahren Merkmal	Video See-Through (VST)	Optical See-Through (OST)
<b>Latenz</b>	Keine Latenz zwischen Videobild und überlagerter Information.	Latenz zwischen realem und virtuellem Bild.
<b>Auflösung und Bildverzerrung</b>	Auflösung durch Videobild und HMD-Auflösung beschränkt.	Reale Welt wird mit maximaler Auflösung wahrgenommen. Die Auflösung der überlagerten Informationen hängt von der HMD-Auflösung ab.
<b>Integrationsfähigkeit</b>	Das VST-Verfahren liefert Videodaten als zusätzliche Informationen, z.B. für das Tracking.	Funktionsintegration von Mischer und Visualisierungsgerät.
<b>Sicherheit</b>	Kein automatisches Fail-Save Prinzip.	Reale Welt wird auch bei einem Systemausfall wahrgenommen.
<b>Komplexität</b>	Mittlere Komplexität.	Hohe Komplexität, da meist Laserprojektion.
<b>Kosten</b>	Geringe Kosten, zusätzliche Kamera erforderlich.	Hohe Kosten für Anzeigegerät.
<b>Verdeckung</b>	Visualisierung von Verdeckungen ist möglich.	Ohne zusätzliche Hardware werden virtuelle Informationen immer im Vordergrund dargestellt.

Abbildung 5-21: Merkmale des VST und OST-Verfahrens

Die Zusammenfassung in Abbildung 5-21 zeigt, dass der Hauptvorteil des Video See-Through Verfahrens darin besteht, dass keine Latenz zwischen dem aufgenommenen Videobild und den eingeblendeten 3D-Daten besteht. Zudem liefert das VST-Verfahren durch die Verwendung einer Videokamera zusätzliche Eingangsinformationen, die z. B. für die Generierung von Trackinginformationen oder für eine Objekterkennung verwendet werden können. Ein Hauptvorteil des OST-Verfahrens ist, dass die reale Umgebung direkt wahrgenommen wird. Es bleibt daher die volle Sehschärfe des Benutzers erhalten.

Verfahren Merkmal	Video See-Through			Optical See-Through		
	monokular	biokular	binokular	monokular	biokular	binokular
Planungsbereich P1	●	●	●	○	●	●
Planungsbereich P2	●	○	○	●	●	○
<input checked="" type="radio"/> geeignet <input type="radio"/> weniger geeignet <input type="radio"/> ungeeignet						

Abbildung 5-22: Eignung von VST und OST-Verfahren

Berücksichtigt man die besonderen Merkmale des OST und des VST-Verfahrens und kombiniert die Verfahren mit den unterschiedlichen Bauformen der kopfgetragenen Anzeigegeräte, ergibt sich das in Abbildung 5-22 dargestellte Eignungsprofil für die jeweiligen Einsatzbereiche in der Montageplanung. Es zeigt sich, dass für den Planungsbereich P 1 überwiegend biokulare und binokulare HMDs im VST-Betrieb in Frage kommen. Das OST-Verfahren ist für diesen Anwendungsbereich weniger geeignet, da sich die Latenz zwischen realem Bild und eingeblendeten Informationen bei räumlichen Planungsaufgaben äußerst negativ auswirkt. Für den Planungsbereich P 2 ist sowohl das VST wie auch das OST-Verfahren geeignet. Ungeeignet ist z. B. das VST-Verfahren in Kombination mit einem biokularen oder binokularen Display, da der Anwender aufgrund der eingeschränkten Auflösung bei der Ausführung von Montagetätigkeiten sehr stark beeinträchtigt wird.

### 5.5.3 Bewertung der Trackingtechnologie

Neben den Anzeigegeräten stellen die Trackingsysteme eine zentrale Komponente eines AR-Systems dar. Die Informationen eines Trackingsystems werden benötigt, um virtuelle Objekte lagegerecht in das Sichtfeld eines Benutzers einzublenden. Wird zur Visualisierung der AR-Informationen ein Head-Mounted Display verwendet, muss hierfür die Kopfposition des Anwenders kontinuierlich in einem ortsfesten Raum bestimmt werden. Im Regelfall ist der Anwender mobil und die Umgebung statisch. Im Produktionseinsatz kann aber auch der Fall eintreten, dass virtuelle Objekte lagegerecht an einem beweglichen Objekt dargestellt werden müssen. Dies gilt insbesondere für den Planungsbereich P 2, z. B. zur Einblendung von Textinformationen an einem geöffneten Montageobjekt. In diesem Fall muss neben der Kopfposition auch die Lage des beweglichen Objektes in einem ortsfesten Raum ermittelt werden. Die Ermittlung der Lage eines beweglichen Objektes im Raum kann auch notwendig sein, wenn dieses Objekt vor einem virtuellen Objekt dargestellt werden soll. In diesem Fall ist die Position des realen Objektes erforderlich, um die Überschneidungen zwischen virtuellem und realem Objekt zu berechnen.

Um Trackingsysteme für den Einsatz in der Montageplanung zu bewerten, wurden im Kapitel 4 entsprechende Anforderungen definiert. Auf Basis dieser Anforderungen lässt sich eine erste Bewertung bekannter physikalischer Trackingprinzipien vornehmen. Abbildung 5-23 fasst diese Bewertung

zusammen. Es zeigt sich, dass optische Messprinzipien für Anwendungen im Bereich der Montageplanung besonders geeignet erscheinen. Optische Systeme arbeiten äußerst genau und ermöglichen eine hohe Mobilität des Anwenders. Zudem weisen optische Trackingsysteme eine geringe Latenzzeit auf und sind je nach Ausführung (z. B. Markertracking mit einer Kamera) sehr kostengünstig. Mechanische Messsysteme scheiden aufgrund der eingeschränkten Bewegungsfreiheit des Anwenders und der ungünstigen Bauform aus. Magnetische Verfahren können wegen ihrer Störanfälligkeit im Produktionsumfeld ebenfalls nicht eingesetzt werden.

Trackingprinzip	Freiheitsgrade DOF	Anzahl Objekte	Genauigkeit	Latenz	Arbeitsraum	Robustheit	Kosten	Zuverlässigkeit	Gewicht	Bauform	Mobilität
Magnetisch	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	○
Mechanisch	●	○	●	●	○	●	●	●	○	○	○
Optisch	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Intertial	●	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Ultraschall	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●
GPS	●	○	○	○	●	●	●	●	●	○	●

● voll erfüllt
● bedingt erfüllt
○ nicht erfüllt

Abbildung 5-23: Bewertung von Trackingsystemen

#### 5.5.4 Analyse von Trackingverfahren

Mit optischen Positionserfassungssystemen können verschiedene Trackingverfahren umgesetzt werden. Zum einen ist die Umsetzung eines Inside-Out Trackings möglich. Bei diesem Verfahren wird die Sensorik (z. B. eine am HMD angebrachte Videokamera) vom Anwender getragen. Die zu messende Referenz befindet sich im Arbeitsraum des Trackingsystems. Zum anderen kann ein Outside-In System realisiert werden. Die Kameras zur Erfassung der Messreferenz sind hierzu ortsfest, z. B. an der Decke des Arbeitsraumes angebracht und die zu messende Referenz wird vom Anwender getragen. Je nach

Trackingverfahren ergeben sich hierdurch wiederum unterschiedliche Merkmale der Systeme. Um die unterschiedlichen Trackingverfahren zu bewerten, werden im Folgenden besondere Anforderungen der einzelnen Einsatzbereiche mit einbezogen. Für den Planungsbereich P 1 muss z. B. eine Rundumsicht des Anwenders möglich sein, wenn der Planer ein eingeblendetes virtuelles Planungsobjekt beispielsweise von mehreren Seiten betrachten will. Ein Inside-Out Tracking ist hier weniger geeignet, da der Anwender in diesem Fall seinen Blick stets auf die Trackingreferenz richten muss. Weitere Aspekte sind die Kalibrierung bezüglich des Raumkoordinatensystems und die Möglichkeit, Messungen zwischen zwei ortsfesten Punkten zu unterstützen. Eine Zusammenfassung der Bewertung für den Planungsbereich P 1 liefert die Abbildung 5-24. Aus der Abbildung 5-24 geht hervor, dass sich für den Planungsbereich P 1 überwiegend das Outside-In Verfahren eignet.

Bereich	Planungsbereich P1		
	Einfache Kalibrierung bzgl. Raum	Positionserfassung für Rundumsicht	Messung zwischen zwei ortsfesten Punkten
Inside-Out	○	○	◐
Outside-In	●	◐	●
<span>● geeignet</span> <span>◐ weniger geeignet</span> <span>○ ungeeignet</span>			

Abbildung 5-24: Bewertung der Trackingverfahren

Für den Planungsbereich P 2 ist die einfache Möglichkeit der Kalibrierung im Bezug zu bestimmten bewegten Objekten, z. B. Montageteilen, erforderlich. Dies ergibt sich unter anderem aus dem im Abschnitt 4.2.4 dargestellten Flexibilitätsbedarf. Soll z. B. eine Einbauinformation derart eingeblendet werden, dass Sie neben einem Montagebauteil erscheint, ist hierzu die Lageinformation des Bauteils im Bezug zum Kopf des Anwenders notwendig. Diese Information kann zwar mit beiden Trackingverfahren ermittelt werden, beim Outside-In Verfahren muss hierbei aber die Relativtransformation der ortsfesten Kameras zum Montageobjekt berücksichtigt werden. Das Verfahren ist daher für diesen Anwendungsfall wesentlich unflexibler, da bei Änderungen am Montagesystem (z. B. Lageränderung der Kamera) eine erneute Kalibrierung der Szene erforderlich ist. Das Inside-Out Verfahren hat hier den Vorteil, dass es durch die am Kopf getragene Kamera direkt die Position und Orientierung des Bauteils im

Bezug zum Benutzer ermittelt. Ein weiterer Vorteil ist der geringere Platzbedarf, da ortsfeste Kameras entfallen. Zudem ist das durch das optische Messverfahren bedingte Problem von Verdeckungen beim Inside-Out Verfahren weniger gravierend. Da davon ausgegangen werden kann, dass beim Planungsbereich P 2 die Messreferenzen auf Montagevorrichtungen oder Montagebauteilen angebracht sind, treten Verdeckungen des Trackingsystems weniger häufig auf, da der Montagearbeiter eine Aufgabe in der Regel nur dann durchführt, wenn er selbst freie Sicht auf den Montagegegenstand hat. Abbildung 5-25 zeigt die zusammenfassende Bewertung für den Planungsbereich P 2.

Verfahren	Planungsbereich P2		
	Bereich	Einfache Kalibrierung bzgl. bewegter Objekte	Positionserfassung bei Verdeckung
Inside-Out	●	●	●
Outside-In	○	○	○

● geeignet    ● weniger geeignet    ○ ungeeignet

Abbildung 5-25: Bewertung der Trackingverfahren

### 5.5.5 Bewertung zusätzlicher Eingabemöglichkeiten

Neben den Hauptkomponenten Visualisierung und Tracking muss ein AR-System je nach Anwendungsfall über weitere Peripheriegeräte verfügen. Diese Geräte werden insbesondere für die Interaktion mit dem AR-System benötigt. Um mögliche Eingabegeräte für ein AR-basiertes Planungssystem zu analysieren, müssen zunächst die Randbedingungen der AR-Eingabe beleuchtet werden. Zu den Randbedingungen zählt z. B. die erforderliche Mobilität des Eingabegerätes. Geräte, die eine ortsfeste Unterlage benötigen, wie z. B. eine Computermaus, sind für AR-Anwendungen weniger geeignet. Durch die geforderte Mobilität des Eingabegerätes können zudem nicht alle VR-Eingabegeräte (z. B. Geräte zur räumlichen Eingabe) für AR-Anwendungen eingesetzt werden. Eine weitere Randbedingung für AR-Eingabegeräte ergibt sich aus der Tatsache, dass AR-Systeme dem Anwender eine „Mischwelt“ präsentieren, d.h. der Anwender nimmt sowohl virtuelle Objekte als auch die reale Umgebung wahr. Eingabegeräte die umfangreiche visuelle Rückmeldung

voraussetzen, z. B. eine Computermaus in Verbindung mit einer grafischen Bedienoberfläche, können nur bedingt eingesetzt werden, da der Blick des Anwenders auf die reale Umgebung durch diese Interaktionsform stark beeinträchtigt wird. Die Abbildung 5-26 gibt einen Überblick über verschiedene verfügbare Eingabegeräte und deren Eignung für unterschiedliche AR-Eingabemöglichkeiten.

Kriterien	Tastatur	Mikrofon	Videokamera (Gestenerkennung)	3D-Joystick	Force-Feedback Gerät	Datenhandschuh	3D-Interaktionsstift (optisch erfasst)	3D-Interaktionsstift (magnetisch erfasst)	Körperaufsichtsklett	Spacemouse	Blickverfolgungsgerät
Operationen bestätigen (ja/nein)	●	●	●	●	●	○	●	●	○	●	○
Auswahl von Menüs	●	●	○	●	●	○	●	●	○	●	●
textuelle Eingabe	●	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○
2D-Eingabe	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
3D-Eingabe	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○
Eignung für AR	○	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●

● geeignet
● bedingt geeignet
○ nicht geeignet

Abbildung 5-26: Bewertung von Eingabegeräten

Wie aus der Abbildung 5-26 hervorgeht, kommen für AR-Anwendungen überwiegend Eingabegeräte wie Mikrofon und Videokamera in Frage. Bei der Umsetzung des Softwaresystems ist daher zu berücksichtigen, dass die Interaktion vorzugsweise mithilfe einer Sprach- und Gestenerkennung erfolgt.

### 5.5.6 Synthese der Hardwarekomponenten

Für den effizienten Einsatz der Augmented-Reality-Technologie in der Montageplanung müssen modulare Hardwaremodule zur Verfügung gestellt werden. Hierzu wurden in den vorangegangenen Abschnitten die entsprechenden Gestaltungsaspekte für die Visualisierung und das Tracking unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Einsatzbereiche analysiert und bewertet. Auf dieser Basis können die Subsysteme nun zu modularen AR-

Hardwaremodulen integriert werden. Für die Unterstützung der räumlichen Planung in der Phase der Grob- bzw. Feinplanung (Planungsbereich P 1) ergibt sich ein System mit einem biokularen HMD, welches im VST-Verfahren berrieben wird. Die Positionserfassung erfolgt bei dieser Konfiguration mit einem Outside-In Tracking. Für die Erstellung bzw. Visualisierung von AR-basierten Arbeitsanweisungen in der Realisierungsphase (Planungsbereich P 2) weist das entsprechende Hardwaremodul ein monokulares Display und ein optisches Inside-Out Tracking auf. Die Abbildung 5-27 zeigt die zwei so entstehenden Module.

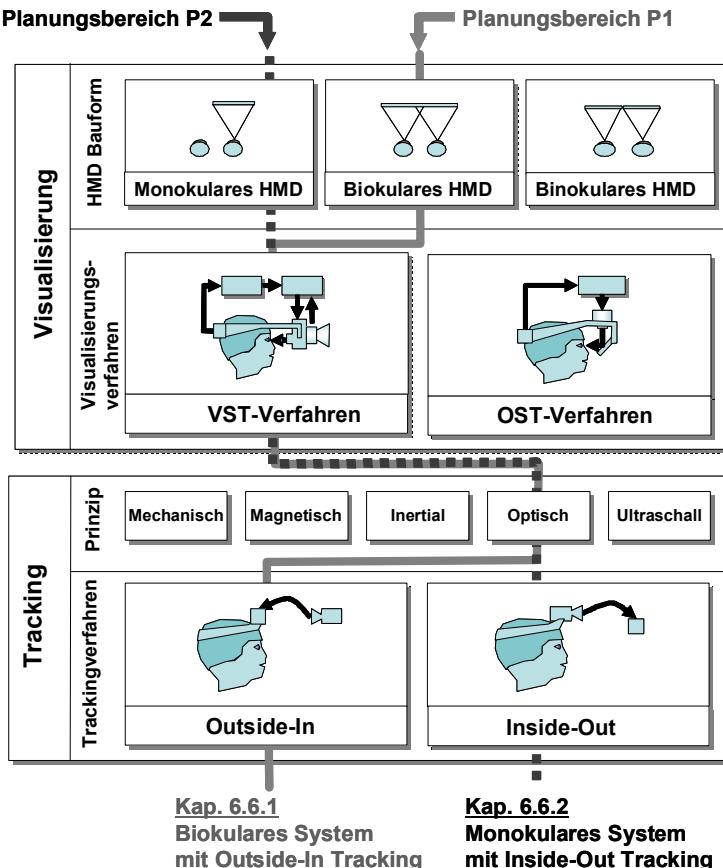


Abbildung 5-27: Zusammensetzung der Hardwaremodule aus den Subsystemen

## 5.6 Zusammenfassung

Das in diesem Kapitel beschriebene Konzept ermöglicht einen durchgängigen Einsatz der Augmented-Reality-Technologie innerhalb der Montageplanung. Hierbei werden insbesondere die Layoutplanung in der Phase der Grob- bzw. Feinplanung und die Arbeitsunterweisung in der Realisierungsphase unterstützt. Durch den Einsatz von AR in der Layoutplanung wird erreicht, dass sich die Planungszeit verkürzt, der Planungsaufwand reduziert und die Planungsqualität verbessert. Für die einzelnen Phasen innerhalb der Layoutplanung wurde ein neues Vorgehen für den Einsatz der AR-Technologie definiert. Dieses hat unter anderem die kontinuierliche Detaillierung räumlicher Modelle und die frühzeitige Identifikation von Restriktionen die sich aus der Montageumgebung ergeben zum Ziel.

Ein weiterer Schwerpunkt des Konzeptes ist die Unterstützung der Arbeitsunterweisung in der Montageplanung. Durch den Einsatz der AR-Technologie wird hier eine durchgängige digitale Prozesskette zwischen Planung und operativem Betrieb realisiert. Der Montagewerker wird effizienter mit relevanten Montageinformationen versorgt und muss weniger nicht wertschöpfende Tätigkeiten bei der Informationsaufnahme durchführen. Hiermit wird das Anlaufverhalten manueller Arbeitsplätze eines Montagesystems verbessert. Um die Erstellung der hierfür notwendigen AR-Arbeitsanweisungen zu gewährleisten, wurde ein entsprechendes Vorgehen definiert.

Um das vorgestellte Konzept umzusetzen, muss der Montageplaner durch ein geeignetes Rechnersystem unterstützt werden. Das Rechnersystem soll für eine möglichst umfassende Entlastung des Planers sorgen und die in Kapitel 4 diskutierten Gestaltungsaspekte berücksichtigen, sowie die für den Einsatz der AR-Technologie notwendigen Funktionen realisieren.

## 6 Umsetzung und beispielhafte Anwendung

### 6.1 Übersicht

Das Kapitel 6 befasst sich mit der Umsetzung des in Kapitel 5 beschriebenen Konzeptes der AR-unterstützten Planung. Zunächst wird die Systemarchitektur des entwickelten Prototyps beschrieben. Es folgt die Darstellung der Hauptkomponenten des Planungssystems, der Teilsysteme und der entsprechenden Schnittstellen.

Darauf aufbauend wird die prototypische Umsetzung des Hardwareaufbaus auf Basis der im Abschnitt 5.5 konzipierten Hardwaremodule beschrieben. Zur vollständigen Evaluierung des entwickelten Konzeptes werden die Hardwaremodule sowohl für den Planungsbereich P 1 als auch für den Planungsbereich P 2 umgesetzt.

Die Funktionen des Planungssystems werden abschließend an Anwendungsbeispielen demonstriert. Dazu wird der prinzipielle Ablauf der AR-unterstützten Planung von Montagesystemen an einem Beispiel der Automobilzulieferindustrie vorgestellt. Das Anwendungsbeispiel liefert die Grundlage für die technische und wirtschaftliche Bewertung des Konzeptes in Kapitel 7.

### 6.2 Gestaltung und Aufbau der Systemarchitektur

Bei der Umsetzung des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Konzeptes ist besonders darauf zu achten, dass sich die entwickelten Prototypen am aktuellen Stand der Informationstechnik orientieren. Dies ermöglicht eine einfachere Einführung des Konzeptes in der industriellen Praxis und erhöht die Akzeptanz bei den Anwendern. Für die prototypische Umsetzung wurden daher, soweit möglich, ausgereifte kommerzielle Softwarekomponenten integriert. Die neu entwickelten Softwaremodule wurden auf Basis aktueller Methoden der Softwareentwicklung realisiert. Für die Umsetzung der Kommunikation und des Datenaustauschs zwischen den Teilsystemen wurde besonders auf die Verwendung von Standards geachtet, um die Integrationsfähigkeit und die

Offenheit des Prototypen zu erhöhen. Um die Anforderung eines möglichst geringen Planungsaufwandes zu erfüllen, sieht die Systemarchitektur die Integration eines Prozessplanungswerkzeuges vor. Hierdurch wird die Mehrfacheingabe von Daten verhindert und Prozessinformationen, wie z. B. der Montageablauf, können direkt für die Generierung AR-basierter Arbeitsunterweisungen weiterverwendet werden. Abbildung 6-1 zeigt den Systemaufbau der realisierten Software.

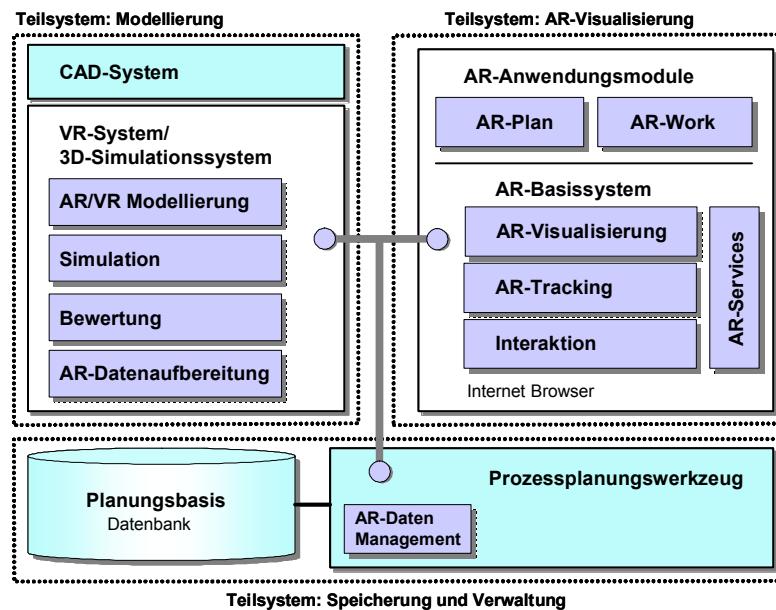


Abbildung 6-1: Aufbau des Systems zur AR-unterstützten Montageplanung

Die wesentlichen Teilsysteme des AR-Planungssystems bilden:

- Ein Teilsystem für die **Modellierung**, welches zur Konstruktion von Fertigungsmitteln, zum Aufbau der Anlagenlayouts und zur Bewertung (Kollisionsrechnung, Ergonomie) eingesetzt wird. Das Teilsystem besteht aus einem CAD-System und einem 3D-Simulations bzw. VR-System.
- Ein weiteres Teilsystem dient der **Speicherung und Verwaltung** von Planungsdaten. Es besteht aus einem Prozessplanungswerkzeug mit

objektorientiertem Datenmodell und einem Modul zur Verwaltung von AR-spezifischen Daten (z. B. Relativtransformationen).

- Das Teilsystem **AR-Visualisierung** beinhaltet alle Komponenten für die interaktive Darstellung von AR-Szenen. Das AR-Basisystem stellt dabei Komponenten bereit, die für alle AR-Anwendungen benötigt werden. Aus diesen Basiskomponenten lassen sich wiederum anwendungsspezifische Softwaremodule zusammenstellen.

Die einzelnen Teilsysteme sind über eine Kommunikationsplattform miteinander verbunden. Der Informationsaustausch erfolgt auf Basis der Standards COM/DCOM<sup>11</sup> und CORBA<sup>12</sup>.

### 6.3 Teilsystem: Modellierung

Den Ausgangspunkt der AR-unterstützten Montageplanung bildet die Modellierung eines ersten 3D-Anlagenentwurfs. Die Basis hierfür bilden CAD-Systeme, 3D-Simulationssysteme und VR-Anwendungen. Diese sind notwendig, um 3D-Modelle auf Basis von CAD-Daten aufzubauen, kinematische Strukturen zu definieren und Bewegungsanimationen zu programmieren. Eine wichtige Grundlage bilden diese Systeme für die Bewertung unterschiedlicher Varianten, z. B. von Layoutentwürfen. Wie aus der Beschreibung des Standes der Technik hervorgeht, gibt es zahlreiche unterschiedliche VR- und 3D-Simulationssysteme. Einen leistungsfähigen Ansatz stellen dabei Systeme dar, die die Vorteile der immersiven VR-Interaktion mit dem Funktionsumfang klassischer 3D-Simulationssysteme kombinieren. Ein derartiger Ansatz wurde von ROBGODERER (2002) entwickelt und am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (IWB) umgesetzt. Da mit dem von ROBGODERER (2002) vorgestellten System alle wesentlichen Grundfunktionen der räumlichen Anlagenplanung unterstützt werden, wurde das VR-System als Basis für das Teilsystem Modellierung ausgewählt. Für die leistungsfähige Integration des VR-Systems wurden zahlreiche Erweiterungen umgesetzt. Die Interaktion wurde

---

<sup>11</sup> Das Distributed Component Object Model (DCOM) ist eine von der Firma Microsoft entwickelte Technologie für die Entwicklung von Client-Server-Anwendungen.

<sup>12</sup> Die Common Object Request Broker Architecture (CORBA) dient der plattform- und sprachenunabhängigen Entwicklung von Client-Server-Anwendungen (vgl. OMG 2003).

durch die Integration haptischer Geräte verbessert, Funktionen für den Export von AR-Daten integriert und die Schnittstellen für die Online-Kopplung<sup>13</sup> des Systems mit dem AR-System umgesetzt.

In dem im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Gesamtsystem bildet das VR-System die Grundlage für die 3D-Modellierung. Eine Herausforderung besteht hier in der einfachen Modellierung von Bewegungsabläufen. Diese Modelle werden z. B. für die AR-Visualisierung von Einbauvorgängen benötigt. Um komplexe räumliche Bewegungen einfacher zu programmieren, wurden neben den bekannten Interaktionsgeräten wie 3D-Datenstift und Datenhandschuhen die Möglichkeiten einer haptischen Interaktion vorgesehen. Hierzu wurde ein haptisches Gerät vom Typ „PHANTOM 6DOF“ der Firma Sensable integriert. Das Gerät verfügt über drei translatorische und drei rotatorische Force-Feedback-Freiheitsgrade und ebenso viele Tracking-Freiheitsgrade. Mit dem PHANTOM 6DOF können Kräfte bis 22 N und Momente bis 0.67 Nm ausgegeben werden. Um die für haptische Geräte erforderlichen hohen Ansteuerungsraten zu erreichen, wird beim Laden eines Anlagenlayouts parallel zur grafischen Repräsentation ein haptisches Modell der Szene aufgebaut. In einem eigenen Prozess erfolgt dann das haptische Rendering für die Berechnung der Kräfte und Momente. Haptisches und grafisches Modell werden zur Laufzeit synchronisiert. Neben der Rückkopplung von Punkt-Objekt Kollisionen können spezielle Kraftfelder definiert werden, um z. B. fertigungstechnische Restriktionen, wie die Einhaltung bestimmter Gestaltungsfreiraume, haptisch auszugeben.

Für die Definition komplexer Bewegungsabläufe können unterschiedliche Kinematiken, z. B. von Industrierobotern, mit dem PHANTOM gekoppelt werden. Zur Offline-Programmierung eines Roboters ist es möglich, Zwischenpositionen durch einen Schalter am Eingabestift des PHANTOM abzuspeichern. Das haptische Gerät kann ebenfalls für die Programmierung manueller Vorgänge verwendet werden. Für die Aufbereitung von AR-Szenen wurde ein spezieller AR-Export umgesetzt. Dieses Modul stellt Funktionen zur Verfügung, um die 3D-Simulationsdaten für die Nutzung in dem entwickelten AR-System aufzubereiten. Abbildung 6-2 zeigt den Einsatz des VR-Systems zur Erstellung eines ersten Layoutentwurfes.

---

<sup>13</sup> Als Online-Kopplung wird in diesem Zusammenhang der bidirektionale Informationsaustausch zwischen VR und AR-Anwendung über ein Netzwerk bezeichnet.



Abbildung 6-2: Modellierung manueller Bewegungsabläufe mit dem VR-System

## 6.4 Teilsystem: Verwaltung und Speicherung

Nachdem die notwendigen AR-Geometrieinformationen mithilfe des Teilsystems Modellierung aufbereitet wurden, müssen sie für eine konsistente Datenhaltung entsprechend gespeichert und verwaltet werden. Für die AR-Visualisierung müssen die erzeugten Geometrieinformationen zusätzlich mit Trackingdaten verknüpft werden. Wird z. B. ein Tracking mit 2D-Markern verwendet, muss festgelegt werden, welche Geometrieinformation welchem Marker zugeordnet sind. Diese Verknüpfungen hängen in hohem Maße von Montagestrukturinformationen, z. B. der Montagereihenfolge ab. Derartige Informationen werden in modernen Planungsprozessen in Werkzeugen für die integrierte Prozessplanung verarbeitet.

Die integrierte Prozessplanung stellt heute den „Dreh- und Angelpunkt der virtuellen Planung“ (ZUBER 2001, S. 310) dar und hat Schnittstellen zur Bauteil- und Fertigungsmittelkonstruktion, der Ablaufsimulation, der Layoutplanung, der 3D-Simulation und zu Stücklisten-Systemen. Eine Schnittstelle zu integrierten Prozessplanungswerkzeugen hat daher hohe Bedeutung für den leistungsfähigen Einsatz der AR-Technologie in der Produktionsplanung. Wie aus dem Stand der Technik hervorgeht, gibt es bereits kommerzielle Produkte für die integrierte Prozessplanung. Diese ermöglichen den konsistenten Zugriff mehrerer Benutzer auf eine gemeinsame Planungsbasis und erlauben die einfache Verknüpfung von Produkt-, Ressourcen- und Prozessdaten. Für die Umsetzung im Rahmen dieser Arbeit wurde das Prozessplanungswerkzeug eM-Planner<sup>TM</sup> der Firma

Tecnomatix angebunden. Das System arbeitet mit einem objektorientierten Datenmodell und ist auf Windows Betriebssystemen lauffähig. Der eM-Planner™ verfügt über eine COM/DCOM-Schnittstelle und erlaubt eine benutzerspezifische Anpassung der Planungsobjekte. Für die Integration des AR-Systems wurde neben der Umsetzung der Datenschnittstelle eine Erweiterung der grafischen Benutzerschnittstelle (GUI) des Prozessplanungswerkzeuges realisiert. Ein Bildschirmfoto dieser GUI-Komponente ist in Abbildung 6-3 dargestellt.

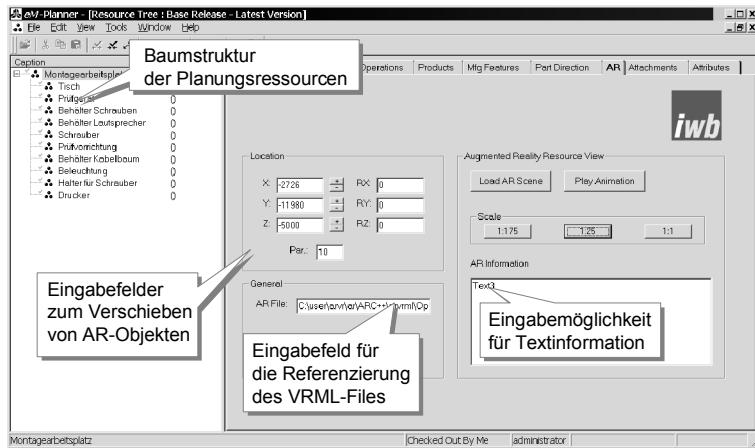


Abbildung 6-3: GUI-Komponente des Prozessplanungswerkzeuges

Mithilfe dieser erweiterten GUI-Komponenten können zusätzliche AR-Informationen, wie z. B. Parameter für das AR-Tracking oder Textinformationen direkt eingegeben werden. Die GUI-Komponenten erlauben auch die direkte Manipulation der AR-Szene zur Laufzeit des Systems, z. B. um Anlagenkomponenten während der Planung zu verschieben.

### 6.5 Teilsystem: AR-Visualisierung

Das AR-System bildet das wesentliche Teilsystem der umgesetzten Systemarchitektur. Es verarbeitet die eingehenden Informationen des Trackingsystems, Interaktionen des Benutzers und sorgt für die lagegerechte

Visualisierung der 3D-Daten. Zur flexiblen Nutzung des AR-Systems wurde dieses auf Basis der Internet Technologie umgesetzt. Neben den gängigen Standards wie HTML<sup>14</sup>, XML<sup>15</sup>, Javascript, Java<sup>16</sup> und VRML kann auch die von Microsoft entwickelte ActiveX-Technologie genutzt werden. Der große Vorteil dieser Technologien liegt in der einfachen Realisierung spezifischer Anwendungen. Programmteile, die für unterschiedliche Anwendungen angepasst werden müssen, sind dabei mit Skriptsprachen wie Javascript und VBScript<sup>17</sup> umgesetzt. Grafische User Interface (GUI) Komponenten können mit Standard HTML-Editoren generiert und eingebunden werden. Alle Komponenten, die nicht von einer anwendungsspezifischen Anpassung betroffen sind, oder hohe Laufzeitanforderungen erfüllen müssen, wurden in der Programmiersprache C++ implementiert und als ActiveX-Komponenten ausgeführt.

### 6.5.1 Trackingmodul

Das Trackingmodul hat die Aufgabe, die Position und Orientierung von Objekten im Raum zu bestimmen. Wie aus der Auswertung der Tracking-Anforderungen hervorgeht, haben optische Verfahren entscheidende Vorteile für den Produktionseinsatz. Um diese Vorteile zu nutzen, wurden für das Tracking zwei optische Verfahren der Positionsbestimmung integriert, mit denen sich ein großer Anwendungsbereich für den AR-Einsatz in der Produktion abdecken lässt. Zum einen wurde das optische Tracking ARToolKit (vgl. KATO & BILLINGHURST 1999) in der Version 2.65 eingebunden. Die Positionsbestimmung erfolgt in diesem Fall durch die Berechnung der internen und externen Kameraparameter auf Basis des 2D-Videobildes. Als zweite Trackingtechnologie wird ein kommerzielles Outside-In Tracking mit 3D-Markern verwendet. Das System der Firma AR-Tracking arbeitet mit mindestens zwei Infrarotkameras, mit deren Hilfe 3D-Marker lokalisiert werden, die aus mehreren reflektierenden Kugeln aufgebaut sind. Die beiden Trackingverfahren können mithilfe eines XML-Files konfiguriert werden.

---

<sup>14</sup> Hypertext Markup Language (HTML) ist eine Beschreibungssprache für Internetseiten.

<sup>15</sup> Extensible Markup Language (XML) ist eine Auszeichnungssprache für den plattformunabhängigen Austausch hierarchisch strukturierter Informationen.

<sup>16</sup> Java ist eine plattformunabhängige objektorientierte Programmiersprache.

<sup>17</sup> VBScript ist eine Skriptsprache der Firma Microsoft, die für Internetanwendungen entwickelt wurde.

### 6.5.2 AR-Visualisierungskomponente

Eine Hauptkomponente des AR-Systems ist die Visualisierung. Die Visualisierungskomponente realisiert folgende Funktionen:

- Verarbeitung des Videobildes und Mischung des Videobildes mit den 2D- und 3D-Informationen.
- Verwaltung und dynamische Aktualisierung von 3D-Modellen und 2D-Informationen. Hierzu zählen Funktionen wie das Laden oder Löschen von Objekten oder die Veränderung von Attributen wie Lage, Form oder Material von Objekten.
- Verwaltung und dynamische Aktualisierung von 3D-Modellen der realen Umgebung. Diese werden z. B. benötigt um Verdeckungen zwischen realen und virtuellen Objekten automatisch zu berechnen.
- Funktionen zur Simulation von räumlichen Bewegungen von Objekten.
- Realisierung der grafischen Anzeige (Rendering) des AR-Bildes.

Die Visualisierungskomponente wurde als ActiveX-Control ausgeführt und kann so als grafisches Element in eine Standard-Internetseite eingefügt werden. Zur Verwaltung der 3D-Modelldaten wird die Softwarebibliothek OpenVRML (OPENVRML 2003) eingesetzt, die auf dem 3D-Internetstandard VRML97 basiert. 3D-Modelle können mithilfe dieser API<sup>18</sup> als VRML-File geladen werden. Das grafische Rendering der Modelldaten und die digitale Mischung der 3D-Informationen mit dem Videobild basiert auf der Grafik API OpenGL (OPENGL 2003).

### 6.5.3 Anwendungsmodule

Die zuvor beschriebenen Basiskomponenten für die Visualisierung, die Interaktion und das Tracking lassen sich zu anwendungsspezifischen Modulen integrieren. Die technologische Basis für die Integration der Module bildet die von der Firma Microsoft entwickelte ActiveX-Technologie. Das Grundgerüst einer AR-Anwendung wird bei dem realisierten System durch eine HTML-Seite

---

<sup>18</sup> Mit Application Programming Interface (API) werden Softwareschnittstellen bezeichnet, die für Entwickler zur Verfügung gestellt werden.

beschrieben, in welche die Basiskomponenten z. B. für die AR-Visualisierung als ActiveX-Objekte eingefügt werden. Die HTML-Seite definiert das grafische Layout der Anwendung und dient als Bindeglied zwischen den Layoutelementen und dem eingebetteten Programmcode der Anwendungslogik. Die Umsetzung der Anwendungsmodule als interaktive Internetanwendungen hat den weiteren Vorteil, dass andere betriebliche Informationssysteme nahtlos integriert werden können. Ein bestehendes Regelwerk für die Montageplanung, welches z. B. im Intranet der Firma abgelegt ist, kann so durch einen einfachen HTML-Verweis abgerufen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zwei Anwendungsmodule umgesetzt. Das Modul AR-Plan dient der Anwendung der Augmented-Reality-Technologie in der Planungsphase und implementiert die hierfür notwendigen Funktionen. Anwendungsbereiche des Moduls AR-Plan sind die Layout- und Arbeitsplatzgestaltung. Zu den realisierten Funktionen gehört die Visualisierung und interaktive Platzierung von virtuellen Anlagenmodellen mithilfe von Augmented Reality.



Abbildung 6-4: Bildschirmansicht des Anwendungsmodules AR-Plan

Zur Dokumentation der Ergebnisse können Bilder und Filme der Planungsszenarien aufgenommen und gespeichert werden. Änderungen des 3D-Layouts werden durch die Kopplung mit dem Prozessplanungswerkzeug direkt in die Planungsdatenbank übernommen. Weitere Funktionen stehen für die Visualisierung von Bewegungsabläufen in der AR-Umgebung zur Verfügung. So kann z. B. die Wiedergabe von 3D-Bewegungsanimationen gesteuert werden. Die wesentlichen Funktionen des Moduls AR-Plan können über eine Sprachsteuerung ausgeführt werden. Für den realisierten Prototyp wurde das Softwarepaket Microsoft™ Speech SDK verwendet. Auf Basis dieses Softwarepaketes wurde eine Sprachkomponente für AR-Anwendungen als ActiveX-Control realisiert.

Das zweite im Rahmen der Arbeit realisierte Anwendungsmodul AR-Work, dient der AR-Visualisierung von Montagevorgängen an realen Bauteilen. Es kann zum einen eingesetzt werden, um Montagefolgen für Planungsaufgaben zu visualisieren, zum anderen kann es verwendet werden, um digitale Planungsdaten für die Unterweisung von Montagemitarbeitern einzusetzen. Das Modul AR-Work kann auch ohne die Online-Anbindung an das Prozessplanungswerkzeug ausgeführt werden. Montagevorgänge können hierzu in Form einer XML-Datei beschrieben und in das Modul eingelesen werden. Die XML-Datei beinhaltet die Beschreibung der Montageschritte, die Referenzen auf die notwendigen Geometriedaten, Zusatzinformationen, wie z. B. Qualitätssicherungshinweise, und die Referenzierung der notwendigen AR-Markierungen. Wie das Modul AR-Plan kann auch das Modul AR-Work über eine Sprachsteuerung bedient werden.

### 6.6 Realisierung des Hardwareaufbaus

Die Analyse der produktionstechnischen Anforderungen hat gezeigt, dass sich die meisten Anwendungen in der Montageplanung von zwei Systemkonfigurationen abdecken lassen. Einem biokularen AR-System mit einem Outside-In Trackingverfahren und einem monokularen System mit Inside-Out Tracking. Als Basis für die Evaluierung wurden daher diese zwei Hardwarekonfigurationen prototypisch umgesetzt. Als Rechnerhardware wird in beiden Fällen eine stationäre Hochleistungsgrafikworkstation vom Typ Siemens Celsius mit zwei Prozessoren (2.8 Ghz) verwendet. Die Grafikworkstation verfügt über eine Grafikkarte vom Typ Wildcat und eine separate Videograbberkarte. Eine Verwendung mobiler Rechner ist aufgrund der

unzureichenden Rechen- und Grafikleistung nicht möglich. Um dem Anwender trotzdem eine maximale Mobilität zu ermöglichen, wurde eine Funkübertragung des Videobildes zum Anwender umgesetzt. Diesem Ansatz liegt die Überlegung zugrunde, die Rechenleistung eines stationären Rechners für die anspruchsvollen Rechenoperationen der AR-Software zu nutzen und nur das Anzeigegerät mobil bereitzustellen. Das aufgenommene Bild der Videokamera wird dabei mithilfe einer Sender- und Empfängereinheit an den stationären Rechner übertragen. Das auf dem Rechner installierte AR-System wertet die Bilddaten aus und reichert das Videobild mit AR-Informationen an. Das AR-Bild wird anschließend über die Sender- und Empfängereinheit zum Anwender übertragen und im Datendisplay angezeigt. Der Anwender kann sich so in einem Umkreis von ca. 20 m von der stationären Einheit frei bewegen.

### 6.6.1 Biokulares AR-System mit mobilem Outside-In Tracking

Hauptanwendungsgebiet des Hardwareaufbaus mit biokularem HMD ist die Visualisierung von 3D-Anlagenmodellen im realen Fertigungsumfeld. Hierfür ist eine hoch genaue Positionserfassung und eine hohe Immersion des Anwenders notwendig. Zudem soll der Anwender sich frei im Planungsraum bewegen können, ohne den Blick auf bestimmte Markierungen im Raum richten zu müssen. Zur Erfüllung dieser Anforderung wird bei dieser Hardwarekonfiguration ein optisches Positionserfassungssystem mit reflektierenden 3D-Markierungen verwendet. Das verwendete System smARTtrack1™ der Firma AR-Tracking (ART 2003) besteht aus einem Messbalkensystem mit zwei Trackingkameras und hat eine Positionsgenauigkeit von ca. 0.5 mm. Für den ortsungebundenen Einsatz wurden die Kameras in ca. 180 cm Höhe auf einer mobilen Einheit angebracht. Die mobile Einheit beinhaltet zusätzlich den Grafikrechner, einen Steuerrechner für das Trackingsystem, eine Videoweiche und diverse Peripheriekomponenten. Die Kamerasysteme des Trackingsystems sind über ein internes Netzwerk mit dem Steuerrechner und dem Grafikrechner verbunden. Abbildung 6-5 gibt einen Systemüberblick.

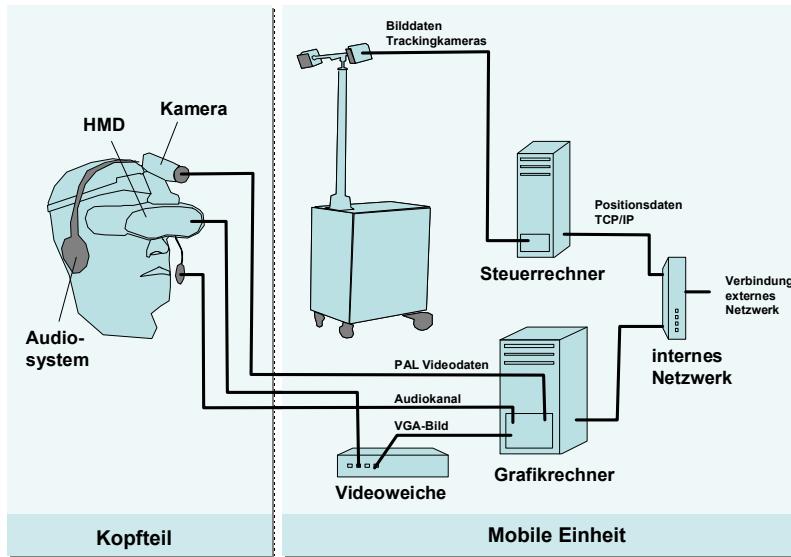


Abbildung 6-5: Systemaufbau für den Planungsbereich P 1

Der Steuerrechner und der Grafikrechner verfügen über eine Anbindung an das Firmennetzwerk und sind so z. B. mit dem Datenbankserver des Prozessplanungswerkzeuges oder der VR-Anwendung verbunden. Als Videobrille dient ein Sony Glasstron HMD, welches eine maximale Auflösung von 800x600 Pixel ermöglicht. Auf dem Display sind die kugelförmigen 3D-Marker für das Tracking-System und eine Videokamera der Firma Sony mit einem Field-of-View (FOV) von 50° angebracht. Der komplette Hardwareaufbau des Systems ist in Abbildung 6-6 dargestellt.

Das System ist als VST-System umgesetzt. Die kopfgetragene Kamera liefert hierbei das Videobild für die Anzeige im Datendisplay. Die auf der mobilen Einheit angebrachten Infrarotkameras dienen der Positionsbestimmung des Anwenders und liefern keine Videodaten für das AR-System.

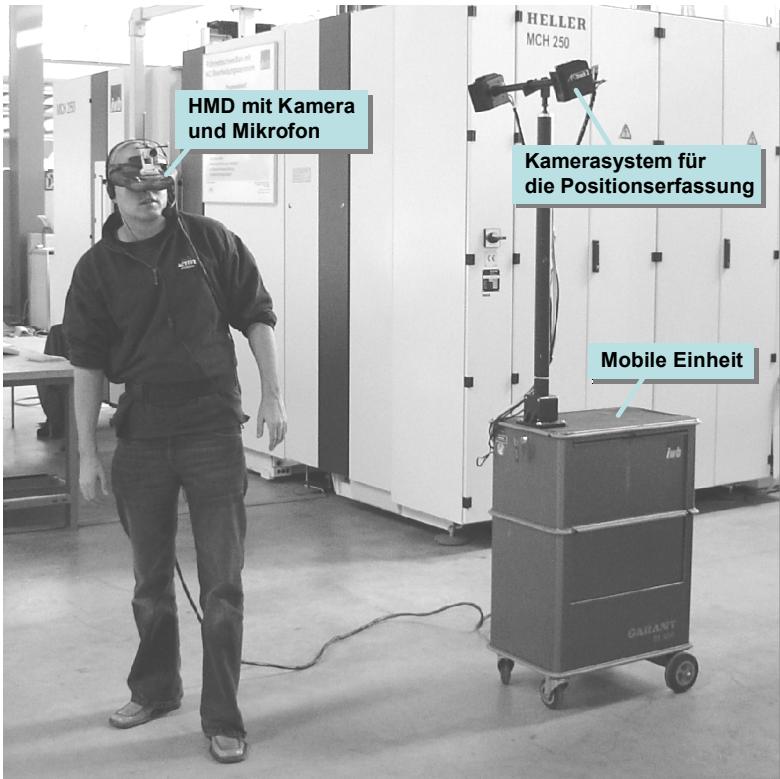


Abbildung 6-6: Hardwareaufbau für den Planungsbereich P 1

## 6.6.2 Monokulares AR-System mit Inside-Out Tracking

Der Hardwareaufbau des monokularen AR-Systems eignet sich überwiegend für die Analyse von Montagereihenfolgen in der Planung und für die Unterstützung manueller Prozesse in der Fertigung. Da für diese Anwendungen höhere Sicherheitsanforderungen zu erfüllen sind, und der Mitarbeiter für die Durchführung seiner Tätigkeit die maximale Sehschärfe benötigt, wird bei dieser Hardwarekonfiguration ein monokulares Display verwendet. Als Display wurde das Produkt CV-3 Video Viewer™ der Firma MicroOptical ausgewählt. Das Display zeichnet sich durch sein geringes Gewicht von 35 g aus und bietet eine Auflösung von 640x480 Pixel bei einer Farbtiefe von 18-Bit.

Bei dem realisierten Hardwareprototyp nimmt der Anwender die AR-Szene nur über ein Auge wahr, daher bleibt für das zweite Auge die volle Sehschärfe erhalten. Das Sichtfeld des zweiten Auges wird nur zum Teil vom Display verdeckt, sodass zusätzlich eine günstige Reflexwahrnehmung des Mitarbeiters erhalten bleibt. Das Bild im Display wird im VST-Verfahren angezeigt. Zur Aufnahme des Videobildes ist eine Kamera mittig auf einem kopfgetragenen Funktionsträger aus der Medizintechnik angebracht. Als Kamera wurde das Modell VCK-795 von der Firma Santec ausgewählt. Diese Kamera ist leicht, hat eine sehr gute Auflösung und ist preisgünstig. Da das monokulare Display bei Kollisionen mit Gegenständen verkippen und so unter Umständen Verletzungen hervorrufen könnte, dient der Funktionsträger zur Aufnahme der Kamera gleichzeitig als Schutzsystem für die Augen des Benutzers. Abbildung 6-7 zeigt diesen Hardwareaufbau. Für Anwender, die eine Sehhilfe tragen müssen, ist es auch denkbar das Display und die Kamera am Brillengestell zu montieren.

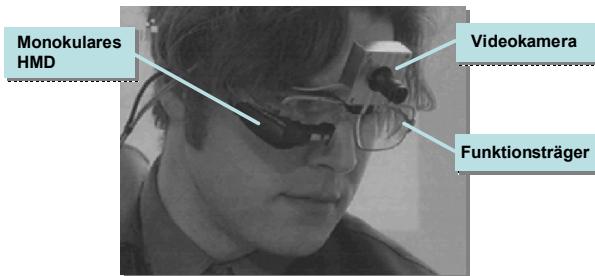


Abbildung 6-7: Hardwareaufbau mit monokularer Kamera

Um eine hohe Mobilität des Anwenders zu ermöglichen, wird das Videobild der Kamera über eine Funkstrecke an den stationären PC übertragen. Das berechnete AR-Bild wird über eine weitere Funkverbindung zurück an die mobile Displayeinheit übertragen. Für die Übertragung sind Konvertierungsvorgänge (z. B. PAL nach NTSC) zwischen den einzelnen Geräten notwendig, da diese über unterschiedliche Ein- und Ausgangsformate verfügen. Die Stromversorgung von Display, Sender, Empfänger und Peripheriegeräten erfolgt über Akkus, die in ein spezielles Tragesystem integriert sind. Das System ermöglicht einen Aktionsradius des Anwenders von ca. 50 m um die Empfängereinheit der Funkübertragung herum. Den Systemaufbau zeigt Abbildung 6-8.

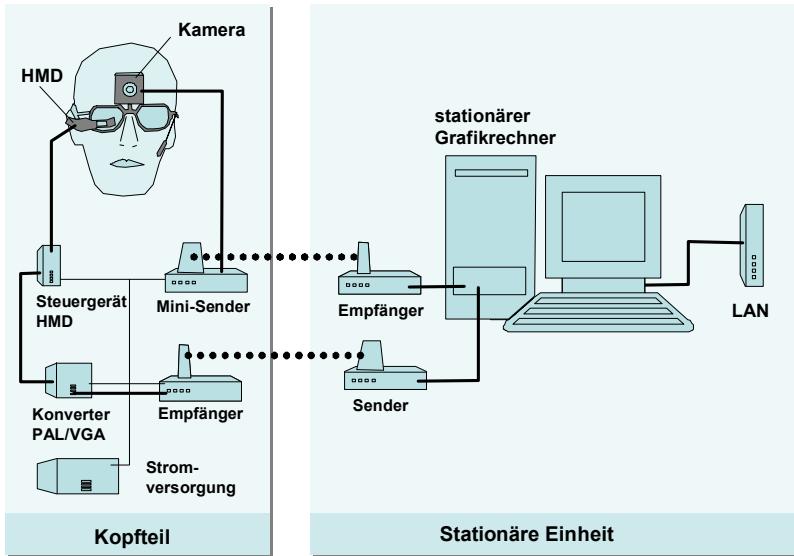


Abbildung 6-8: Systemaufbau für den Planungsbereich P 2

## 6.7 Exemplarische Anwendung

Um das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Konzept der AR unterstützten Montageplanung exemplarisch anzuwenden und die entwickelten Hardwareprototypen zu evaluieren, wurde ein Anwendungsbeispiel aus der Automobilzulieferindustrie ausgewählt.

Die Automobilzulieferindustrie steht durch die stetig zunehmende Komplexität der Produkte, die extrem hohe Variantenzahl, den hohen Anforderungen an die Produktqualität und die gleichzeitig abnehmenden Stückzahlen vor großen Herausforderungen in der Montageplanung. Hinzu kommt, dass Montagesysteme in der Automobilzulieferindustrie oft unter hohem Zeitdruck geplant werden müssen. In den meisten Fällen handelt es sich bei diesen Planungen um Umbauplanungen. Da Automobilzulieferer oft über mehrere weltweit verteilte Standorte verfügen, müssen bei der Planung die Randbedingungen zahlreicher bestehender Fabrik- und Gebäudestrukturen berücksichtigt werden.

Als Beispielprodukt der Automobilzulieferindustrie dient eine Türinnenkomponente eines PKW der Luxusklasse. Die Türkomponente ist das Verbindungsstück zwischen Türinnenverkleidung und Türaußenhaut und dient als Funktionsträger für Airbag, Lichtmodule, Verkabelung, Lautsprecher, Steuergeräte und Sensoren. Das Beispielprodukt stellt ein komplexes und variantenreiches Produkt dar, welches in geringen Stückzahlen vom Automobilhersteller abgerufen wird. Anhand des Anwendungsbeispiels soll die Anwendung der Augmented-Reality-Technologie innerhalb der Montageplanung aufgezeigt werden. Es werden daher im Folgenden die Planungsphasen beschrieben, in denen das AR-basierte Planungssystem eingesetzt werden kann.

### 6.7.1 Layoutplanung mithilfe von Augmented Reality

Ziel der Layoutplanung ist die Umsetzung einer möglichst optimalen Anordnung der benötigten Systemelemente, wie z. B. Maschinen, Fördertechnik, manuelle Arbeitsplätze und Lagerflächen. Der Prozess der Layoutplanung beginnt mit der Entwicklung unterschiedlicher Layoutvarianten, die auf Basis eines idealen Layouts generiert werden. Eine besondere Herausforderung ist die Anpassung der Ideallayouts an die vorherrschenden betrieblichen Randbedingungen. Hierzu zählen z. B. das vorhandene Raumangebot, Randbedingungen der Gebäudetechnik oder der Arbeitsplatzumgebung und Einschränkungen zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit. Durch das im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagene Konzept lassen sich diese Randbedingungen früher und mit geringerem Aufwand evaluieren. Zusätzlich können Mitarbeiter vor Ort, z. B. Instandhaltungstechniker oder Montagemitarbeiter, partizipativ in die Planung integriert werden.

Die Basis für die AR-unterstützte Layoutplanung bildet ein erster Layoutentwurf des Montagesystems, der mit dem Teilsystem für die Modellierung erzeugt wird. Hierzu wird ein 2D-Layoutprogramm in Verbindung mit dem Prozessplanungswerkzeug eingesetzt. Mithilfe des 2D-Layoutprogramms können einzelne Komponenten ausgewählt und als 2D-Symbole dargestellt und platziert werden. Durch die Anbindung des 2D-Programms an das Prozessplanungswerkzeug besteht eine Verknüpfung der zweidimensionalen räumlichen Lage der Komponenten mit den 3D-Daten der Planungsbasis. In der Planungsbasis müssen dabei nur die 3D-Daten für die neu zu gestaltenden Teile des Montagesystems vorhanden sein. Gebäudestrukturen wie Belüftung,

Schalschränke, Leitungen oder bestehende Vorrichtungen werden zunächst nicht als 3D-Modell umgesetzt.

Die so erzeugten Layoutvarianten können nun in die AR-Umgebung geladen werden. Dieser Planungsschritt dient der Überprüfung und Anpassung des Layouts an bestehende Strukturen. Bevor das AR-System in der realen Fertigungsumgebung eingesetzt werden kann, muss die Hardwareumgebung kalibriert werden. Die Kalibrierung ist notwendig, da das verwendete Trackingsystem nur einen Bereich von ca. 4x4 m abdeckt. Um das System an einem beliebigen Ort einer Fabrikhalle einzusetzen, muss die Lage des Systems im Bezug zum Hallenkoordinatensystem festgelegt werden. Dieser Prozess kann durch feste Referenzmarken in der Halle vereinfacht werden. Nach der Kalibrierung kann das System AR-Plan zur Visualisierung des Layoutentwurfes in der realen Fertigungsumgebung verwendet werden. Mithilfe des Systems AR-Plan wird das 3D-Layout lagegerecht in der realen Umgebung dargestellt. Abbildung 6-9 zeigt das AR-Bild, welches dem Planer im Head-Mounted Displays angezeigt wird.

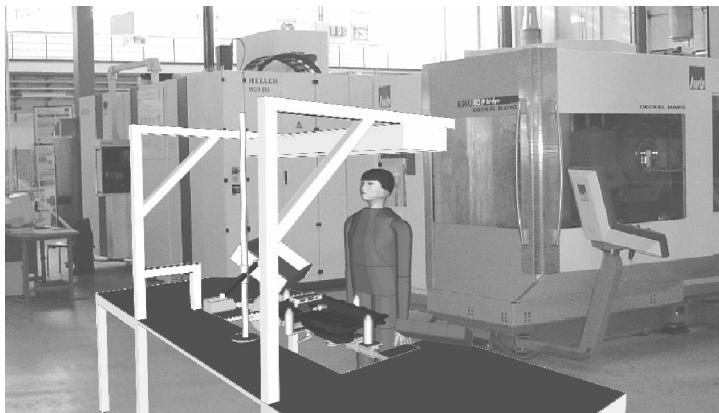


Abbildung 6-9: AR-Visualisierung eines manuellen Arbeitsplatzes

Das AR-Bild wird gleichzeitig auf einem Kontrollmonitor dargestellt, sodass weitere Personen an der Planung partizipieren können. Die AR-Visualisierung ermöglicht dem Planer eine effiziente Beurteilung der räumlichen Situation. So kann z. B. festgestellt werden, ob für den geplanten Layoutentwurf ausreichend

Flächen zur Verfügung stehen und ob die Gefahr von Kollisionen mit vorhandenen Komponenten besteht.

Das System ermöglicht es zudem, 3D-Objekte in der realen Fertigungsumgebung zu positionieren. Der Planer kann so Änderungen an dem Layoutentwurf direkt in der AR-Umgebung vornehmen. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System bietet den zusätzlichen Vorteil, dass Fehler des 3D-Modells (z. B. fehlende oder falsch angeordnete Komponenten) sofort erkannt, sowie effizient und schnell beseitigt werden können. Wird mithilfe der AR-Visualisierung erkannt, dass ein Schaltschrank in der Realität an einer anderen Stelle steht, kann dieser anhand des AR-Systems interaktiv an die aktuelle Position angepasst werden. Dies erhöht die Planungsqualität und vermeidet so Planungsfehler aufgrund falscher oder ungenauer Simulationsmodelle. Abbildung 6-10 zeigt unterschiedliche Layoutanordnungen, die im AR-System erzeugt und visualisiert wurden.

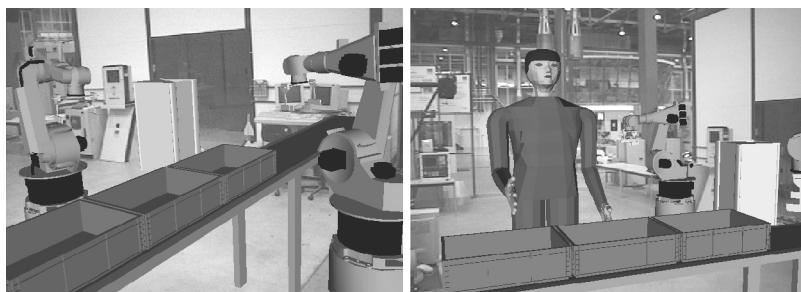


Abbildung 6-10: Interaktive Layoutgestaltung in der AR-Umgebung

Durch die Kopplung des AR-Systems mit dem Prozessplanungswerkzeug besteht ein direkter Rückfluss von Informationen in den Planungsprozess. Alle in der AR-Umgebung vorgenommenen Veränderungen des Montagelayouts stehen so konsistent allen Planungsbeteiligten zur Verfügung.

### 6.7.2 AR-basierte Planung manueller Arbeitsplätze

Im Anschluss an die Layoutplanung erfolgt die Feinplanung der einzelnen Montagestationen. Aufgrund der Variantenvielzahl, der geringen Stückzahl und des hohen Aufwands für eine Automatisierung (u.a. durch die Handhabung

biegeweicher Bauteile wie Kabel und Dichtungen) wird das Beispielprodukt ausschließlich manuell montiert. Der Ansatz der AR-basierten Planung kann für diesen Planungsabschnitt besonders effizient eingesetzt werden. So kann überprüft werden, ob das neue Produkt an einem bestehenden manuellen Arbeitsplatz montiert werden kann, und welche Änderungen des manuellen Arbeitsplatzes hierfür notwenig sind. Durch das Konzept der AR-basierten Planung kann dieser Planungsschritt sehr schnell und einfach von einem Serienplaner vor Ort durchgeführt werden. Mithilfe des AR-Systems werden hierzu die Montagebauteile, die benötigten Werkzeuge und weitere Ressourcen an einem bestehenden manuellen Arbeitsplatz visualisiert. Durch die Positionierung eines virtuellen Menschmodells in der AR-Umgebung und die Visualisierung von Greifräumen kann zum einen der bestehende manuelle Arbeitsplatz hinsichtlich der Arbeitsräume optimiert werden. Zum anderen kann der Serienplaner eine detaillierte Rückmeldung liefern, ob das neue Produkt an dem bestehenden manuellen Arbeitsplatz montiert werden kann. Abbildung 6-11 zeigt einen realen manuellen Arbeitsplatz, an dem mithilfe des realisierten Systems Greifbereiche und benötigte Ressourcen eingeblendet werden.

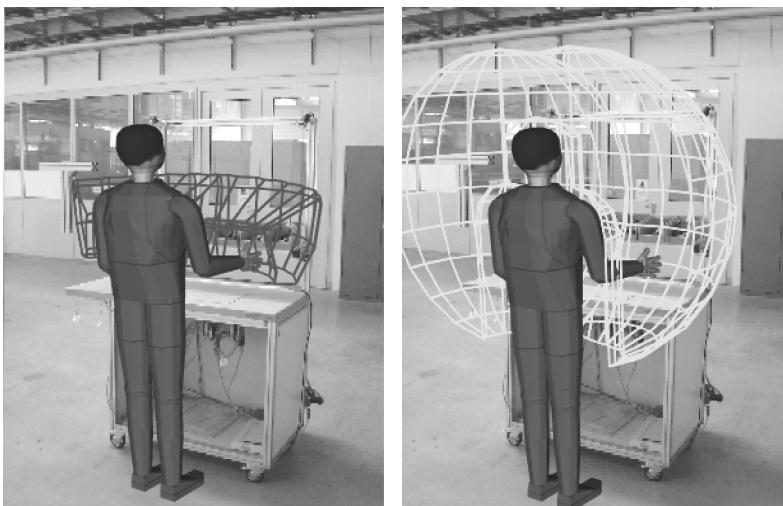


Abbildung 6-11: Optimierung manueller Arbeitsplätze mit dem System AR-Plan

### 6.7.3 Erstellung AR-unterstützter Arbeitsanweisungen

Ein Ziel des Konzeptes der AR-unterstützten Montageplanung ist die Realisierung einer durchgängigen digitalen Prozesskette von der digitalen Planung bis zur Erstellung der Arbeitsunterlagen und der Einarbeitung der Montagemitarbeiter. Für die informationstechnische Unterstützung von Montagemitarbeitern ist der Einsatz der AR-Technologie überall dort sinnvoll, wo ein hoher Anteil an Suchzeiten nach Informationen zu erwarten ist, Sekundäroperationen für die Informationsaufnahme bestehen oder Montagehinweise kurzfristig und bezogen auf bestimmte Bauteile angezeigt werden müssen. Damit relevante Informationen mithilfe der AR-Technologie im Sichtfeld des Anwenders angezeigt werden können, müssen diese zunächst aufbereitet werden. Die Basis hierfür liefert der Montageablauf, wie er im Prozessplanungswerkzeug hinterlegt ist. Der Montageplaner entscheidet dann, welche Teiloperationen mithilfe der AR-Technologie unterstützt werden sollen. Anschließend müssen die notwendigen AR-Informationen erzeugt und mit dem Montageablauf verknüpft werden. Abbildung 6-12 zeigt die Zuordnung der AR-Daten zum Montageablauf.

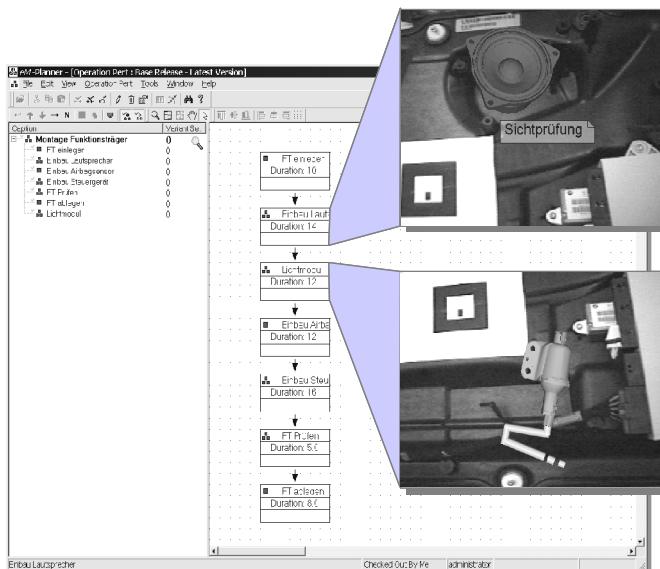


Abbildung 6-12: Zuordnung der AR-Daten im Prozessplanungswerkzeug

Der Montageplaner kann jeder Montageoperation AR-Informationen zuordnen. Die wichtigsten Informationen sind Textinformationen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Informationssystemen werden die Textinformationen bei AR-Systemen aber mit Lageinformationen verknüpft. Dies ermöglicht es, die Informationen während der Montage im Bezug zu den realen Montagebauteilen darzustellen. Die Textinformationen können durch Hinweispfeile oder grafische Symbole ergänzt werden. Weiterhin ist es mit dem realisierten System möglich, komplett Bewegungsanimationen z. B. von Fügevorgängen, im Sichtfeld des Montagemitarbeiters anzuzeigen. Der Montageablauf und die zusätzlich definierten AR-Daten können über einen direkten Zugriff auf die Planungsdatenbank abgerufen werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, den Montageablauf zusammen mit den Zusatzinformationen als XML-Daten zu exportieren.

Die Visualisierung der AR-Daten erfolgt mithilfe des Moduls AR-Work. Das Modul AR-Work verfügt hierzu über Funktionen, um die entsprechenden Daten einzulesen und zu verarbeiten. Zusätzlich kann anhand einer Sprachsteuerung innerhalb des Montageablaufes frei navigiert werden. Abbildung 6-13 zeigt die lagegerechte AR-Visualisierung eines 3D-Montagebauteils an dem realen Türmodul.

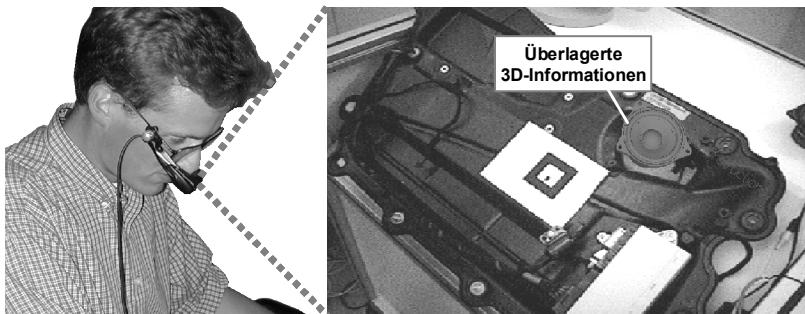


Abbildung 6-13: Visualisierung von Zusatzinformationen mit AR-Work



## 7 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Umsetzung und beispielhafte Anwendung des AR-gestützten Planungssystems beschrieben wurde, soll in diesem Kapitel eine Bewertung des technologischen und wirtschaftlichen Nutzens des vorgestellten Konzeptes vorgenommen werden. Zuerst wird eine technologische Bewertung durchgeführt. Diese beruht auf den Erkenntnissen der prototypischen Anwendung des entwickelten Planungssystems. Die Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens erfolgt für den Planungsbereich P 1 durch eine Gegenüberstellung der monetären Aspekte im Vergleich zu einer herkömmlichen rechnergestützten Planung. Für den Planungsbereich P 2 wird ein theoretischer Vergleichsprozess definiert und mithilfe von Methoden der Arbeitswirtschaft bewertet.

### 7.1 Technologische Bewertung

Aus technologischer Sicht weist das System zur AR-unterstützten Planung mehrere Vorteile gegenüber bekannten Ansätzen auf:

- Der erste Vorteil liegt in dem reduzierten Aufwand für die 3D-Modellierung, da real existierende Strukturen nicht aufwändig nachmodelliert werden müssen.
- Das System realisiert eine durchgängige digitale Prozesskette von der Planung bis zum Betrieb eines Montagesystems. Nebenzeiten oder Fehler bei der Informationsweitergabe können hierdurch vermieden werden. Zudem ergibt sich eine einheitliche und reproduzierbare Dokumentation des Informationsflusses.
- Das System liefert zusätzliche Informationen, die von herkömmlichen Planungssystemen nicht erzeugt werden. Durch die Verwendung räumlicher Positionserfassungssysteme kann das System auch planungsrelevante Daten wie Abstandsmaße oder eine Abschätzung von räumlichen Freiräumen liefern. Bei herkömmlichen Ansätzen müssen diese Informationen erst aufwändig erzeugt (z. B. mit Laserscansystemen) und anschließend in die Planungsbasis integriert werden.

- Ein weiterer technologischer Vorteil ist die Möglichkeit des mobilen, standortunabhängigen Einsatzes. Hierdurch ergibt sich zum einen die Möglichkeit, Mitarbeitern „vor Ort“ in die Planung mit einzubeziehen. Zum anderen kann das System flexibel in unterschiedlichen Planungsprozessen genutzt werden.
- Durch die kontextabhängige und lagegerechte Visualisierung von Informationen ergibt sich ein technologischer Vorteil bei der Präsentation relevanter Informationen. Der Benutzer muss weniger nicht wertschöpfende Bewegungen durchführen, die Aufmerksamkeit wird gesteigert und Suchzeiten nach Informationen können reduziert werden.

Neben den genannten technologischen Vorteilen müssen auch Aspekte betrachtet werden, die einen zusätzlichen technologischen Aufwand erfordern. Im Folgenden sind die technologischen Aufwände aufgeführt:

- Um die Lage und Orientierung des Anwenders im Raum zu erfassen, müssen entsprechende Tracking-Verfahren eingesetzt werden. Zur Nutzung des Trackings ist es notwendig, die Relativtransformationen und zusätzliche Kalibrierungsdaten zu verwalten. Aufgrund neuartiger robuster Trackingverfahren, wie sie auch bei der prototypischen Umsetzung im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, ist dieser technologische Aspekt aber sicher zu beherrschen. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansätze zur Verwaltung der Trackinginformationen und die Integration in den Planungsprozess bewirken eine zusätzliche Reduktion dieser technologisch bedingten Aufwände.
- Für den Einsatz des Systems sind tragbare, meist kopfgetragene Anzeigegeräte notwendig. Zudem bestehen technologisch bedingt höhere Anforderungen an die Rechnerhardware als bei herkömmlichen Planungssystemen. Zum aktuellen Zeitpunkt sind AR-Anzeigegeräte und entsprechende Rechnersysteme vergleichbaren stationären Systemen unterlegen. Da die AR-Technologie aber durch den Massenmarkt mobiler Informations- und Kommunikationstechnologie (z. B. PDAs, Spieleindustrie) angetrieben wird, ist in naher Zukunft mit leistungsfähigeren Systemen zu rechnen.

## 7.2 Wirtschaftliche Bewertung

Eine wirtschaftliche Bewertung des entwickelten Konzeptes ist exemplarisch für die Layout- und Arbeitsplatzgestaltung (Planungsbereich P 1) und für die informationstechnische Unterstützung von Montagearbeitern (Planungsbereich P 2) möglich. Da sich der exakte wirtschaftliche Nutzen nur bei Kenntnis unternehmensinterner Kostenstrukturen ermitteln lässt, werden im Folgenden Beispielrechnungen durchgeführt, die dem Leser einen Überblick über die monetären Aspekte des AR-Einsatzes in der Montageplanung liefern sollen.

Für die wirtschaftliche Bewertung des AR-Einsatzes im Bereich der Layoutplanung können die Aufwände und der Nutzen für ein Planungsprojekt mit und ohne AR-Unterstützung betrachtet werden. In Abbildung 7-1 sind die entstehenden Kosten für die Anschaffung eines AR-Systems aufgestellt. Zusätzlich zu den dargestellten Fixkosten fallen variable Kosten für die Schulung der Montageplaner an. Die variablen Kosten werden im Folgenden vernachlässigt, da davon ausgegangen werden kann, dass die Schulungskosten für den AR-Einsatz nicht höher sind als die eines vergleichbaren rechnerunterstützten Planungsprozesses.

<b>Abschätzung der Fixkosten pro Jahr zur Anschaffung eines AR-Systems</b>		
<b>Invest</b>		
<b>Anschaffungskosten Hard-/und Software zur Ausstattung eines AR-Arbeitsplatzes</b>		
Trackingsystem		24.000 €
Rechnereinheit		2.000 €
Datendisplay		5.000 €
Peripherie		5.000 €
AR-Software		6.000 €
<b>Gesamtinvest zur Anschaffung des AR-Systems</b>		<b>42.000 €</b>
Investitionskosten	I	42.000 [€]
Nutzungsdauer	Tn	3 [Jahre]
Kalkulatorische Abschreibung	AB = I/Tn	14.000 [€/Jahr]
Zinssatz	Z	10 [%]
Kalkulatorischer Zinssatz	KZ = Z x I/2	2.100 [€/Jahr]
Instandhaltungskosten	W	3.000 [€/Jahr]
<b>Fixkosten (Invest) pro Jahr</b>	<b>F = AB+KZ+W</b>	<b>19.100 [€/Jahr]</b>

Abbildung 7-1: Kosten eines AR-Systems

Im Gegensatz zu dem Aufwand für den AR-Einsatz in der Layoutplanung kann der monetäre Nutzen nur grob abgeschätzt werden, da die Einsparungen sehr stark von dem entsprechenden Planungsprojekt und den Kostenstrukturen des Unternehmens abhängen. Nimmt man ein durchschnittliches Planungsprojekt mit einer Projektstärke von 10 Planern und einer Laufzeit von 6 Monaten an, erscheinen die in Abbildung 7-2 aufgelisteten Einsparungen realistisch.

Nutzen durch den AR-Einsatz in der Layoutplanung	Eingesparte Kosten pro Projekt
<b>Nutzen durch direkte Zeitverkürzung der Planungsphase</b>	
Sinkende Einarbeitungszeiten der Planer durch höheren Detaillierungsgrad (10 x 10h).	5.000 €
Entfall der automatischer bzw. teilautomatischen 3D-Vermessung (Einsparung des Vergleichsprozesses Laserscannen, Kosten je nach Umfang 30.000 – 40.000 €).	35.000 €
Entfall der Nachbearbeitung und Plausibilitätsprüfung der erfassten 3D-Informationen. Reduzierung der 3D-Modellierung bereits vorhandener Fertigungsmittel und Hallenstrukturen (3D-Modellierungszeit ca. 220h).	12.000 €
Reduktion des Änderungsaufwandes während des Planungsprozesses (Zeitverbesserung um 60 %, im vorliegenden Beispiel von 60 h auf 24 h).	1.800 €
Schnelleres Aufzeigen von Prozessalternativen (pro Alternative muss herkömmlich mit einer Mehrarbeit von 3h gerechnet werden, diese verkürzt sich um 70% auf 1h, es wird pauschal pro Planungsprojekt von 5 Alternativen ausgegangen).	500 €
<b>Nutzen durch Effizienzsteigerung</b>	
Reduktion der Abstimmgespräche. Abbau von Kommunikationsbarrieren und höhere Wertschätzung der Ergebnisse durch Unterstützung von Besprechungen „vor Ort“ (Einsparung von 2h pro Woche bei ca. 50% der Mitarbeiter).	6.600 €
<b>Nutzen durch höhere Prozesssicherheit</b>	
Frühzeitige Erkennung von Fehlern und Engpässen (Effekt bei 80 % der Mitarbeiter, Verkürzung der Gesamtzeit um 10%).	6.400 €
<b>Gesamtnutzen bei Einführung und Anwendung der AR-Technologie in einem Projekt</b>	<b>67.300 €</b>

Abbildung 7-2: Abschätzung der Kosteneinsparungen für die Layoutplanung

Die Aufstellung der Aufwände und der Einsparungen durch den Einsatz der AR-Technologie zeigt deutlich, dass ein großes Einsparungspotenzial für die Montagelayoutplanung existiert. Selbst wenn sich nur die Hälfte der in Abbildung 7-2 aufgelisteten Einsparungen im Unternehmen realisieren lassen und das System bei nur einem Planungsprojekt pro Jahr verwendet würde, liegt die Amortisierungszeit unter 2 Jahren.

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit im Bereich der AR-unterstützten Arbeitsunterweisung können Bewertungsmethoden aus der Arbeitswirtschaft herangezogen werden. Um eine möglichst breite Übertragbarkeit der Ergebnisse

auf unterschiedliche Anwendungsfälle zu ermöglichen, soll die Bewertung auf Basis eines theoretischen Vergleichsprozesses erfolgen. Als Vergleichsprozess dient ein durch ein Multimediasystem unterstützter Arbeitsschritt, bei dem der Mitarbeiter eine bauteilbezogene Montageinformation abrufen und verarbeiten muss. Der Werker nimmt hierzu ein Montagebauteil, erfasst dieses mit einem Lesegerät (z. B. Scanner), liest anschließend die Bauteilinformation ab und legt das Bauteil in einen Ablagebehälter. Abbildung 7-3 zeigt die Anordnung des Vergleichsprozesses.

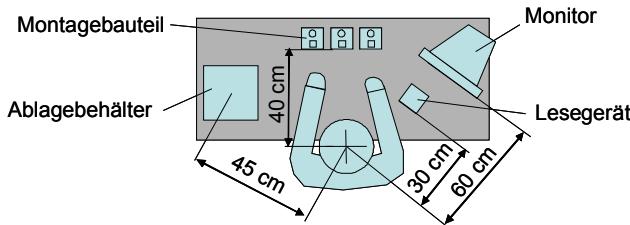


Abbildung 7-3: Anordnung des Vergleichsprozesses

Die in Abbildung 7-4 dargestellte MTM-Analyse zeigt die benötigten Zeiten zur Durchführung des Vergleichsprozesses. Insgesamt ergibt sich eine Bearbeitungszeit von 5,3 Sekunden für den Vergleichsprozess.

Durch den Einsatz der AR-Technologie entfallen wesentliche Teilschritte des Vergleichsprozesses. So kann der Teilvergäng der Informationsaufnahme, welcher im Vergleichsprozess mithilfe eines Scanners durchgeführt wird, durch den Einsatz des AR-Systems substituiert werden (z. B. durch die Analyse des aufgenommenen Videobildes des AR-Systems). Zusätzlich entfallen Nebentätigkeiten wie Kopfbewegungen und Greifbewegungen.

Im Wesentlichen entfallen also die Teilschritte 2 (Bauteil scannen) und 3 (Information vom Monitor ablesen). Für den theoretischen AR-Prozess ergibt sich demnach eine Bearbeitungszeit von 2,41 Sekunden, woraus ein Einsparungspotenzial von ca. 40 % resultiert. Das Einsparungspotenzial und damit die Amortisationszeit des AR-Systems hängen von der Gestaltung der Montageprozesse des jeweiligen Unternehmens ab.

		Bewertungsbogen - MTM							
		Ausführungsanalyse							
Nr.	Beschreibung	A	H	Kode	TMU	Kode	A	H	Beschreibung
<b>1. Bauteil und Scanner in den Arbeitsbereich</b>									
1.1	zum Gegenstand			R40C	16	8 (R-A)			zum Scanner
1.2	Bauteil greifen			G4A	7	3 (G1A)			Scanner zeitgleich greifen
1.3	Bauteil in den Arbeitsbereich			M28B	12	8 (M-B)			Scanner in den Arbeitsbereich
		Summe:		36	9				
<b>2. Bauteil scannen</b>									
2.1	Bauteil loslassen			RL1	2	0			
2.2	Prüfen, ob Barcode lesbar			EF	7	3			
2.3	erneut hinlangen			R2A	2	0			
2.4	Bauteil greifen			G1A	2	0			
2.5	Bauteil drehen			S30	2	8			
2.6	Bauteil loslassen			RL1	2	0			
2.7	hinlangen			R2A	2	0			
2.8	Bauteil greifen			G1A	2	0			
2.9	Bauteil und Scanner fügen			M10B	6	8 (M-A)			Scanner zum Gegenstand
					4	5 M2C			Scanner positionieren
					9	0 M4C			Scanner bewegen und Prozesszeit
					6	8 M10B			Scanner ablegen
		Summe:		49	2				
<b>3. Information vom Monitor</b>									
3.1	Blick zum Bildschirm			ET	10	0			
3.2	2 Wörter lesen			EF	10	1			
3.3	Blick auf Bauteil			ET	10	0			
		Summe:		30	1				
<b>4. Bauteil prüfen und ablegen</b>									
4.1	Gewinde prüfen	2	EF	14	6				
4.2	Bauteil zur Kiste			M28C	14	4			
4.3	Bauteil loslassen			RL1	2	0			
		Summe:		31	0				

Abbildung 7-4: MTM-Bewertung eines Vergleichsprozesses

Die Analyse auf Basis eines theoretischen Vergleichsprozesses zeigt aber, dass die Einsparungen dann besonders hoch sind, wenn bauteilbezogene Suchzeiten nach Informationen in der Montage auftreten. Sehr hohe Variantenzahlen begünstigen demnach den Einsatz der AR-Technologie. Neben den reinen Zeiteinsparungen ergibt sich zudem der Vorteil einer durchgängigen digitalen Prozesskette von der Planung bis zum Betrieb des Montagesystems.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Turbulente Randbedingungen führen zu einem starken Zeit-, Qualitäts- und Kostendruck in allen Bereichen produzierender Unternehmen. In einem besonderen Spannungsfeld befindet sich dabei die Montageplanung. Deren Aufgabe ist es, in enger Abstimmung mit der Entwicklung und einer Vielzahl weiterer Partner wirtschaftliche, flexible und qualitätsoptimierte Montagesysteme unter Berücksichtigung vielfältiger Randbedingungen zu planen. Um diese Aufgabe zu bewältigen, wurden die Planungsaufgaben in den letzten Jahren stärker dezentralisiert und es wurden zunehmend Rechnerwerkzeuge zur Unterstützung der Planung eingesetzt. Besonderen Stellenwert hat dabei die Computersimulation gewonnen. Mithilfe digitaler Modelle zukünftiger Produktionssysteme und interaktiver Techniken zur experimentellen Analyse dieser Modelle konnten hier erhebliche Zeiteinsparungen realisiert werden. Es hat sich aber gezeigt, dass eine weitere Verkürzung der Planungszeiten bei einer zusätzlichen Erhöhung der Planungsqualität nur dann möglich wird, wenn es gelingt, den Aufwand für den Einsatz interaktiver Simulationstechnik weiter zu reduzieren, den Abgleich mit der Realität zu verbessern und das Erfahrungswissen aller Beteiligter effizienter einzubeziehen.

Der Einsatz der Augmented-Reality-Technologie stellt hier einen neuen Lösungsansatz für die Montageplanung dar. Augmented Reality ist eine innovative Form der Mensch-Maschine-Interaktion, welche es ermöglicht; virtuelle Informationen lage- und situationsgerecht mit der Realität zu überlagern. Das Potenzial dieser Technologie liegt in den frühen Phasen der Planung in der Visualisierung komplexer Montageanlagen im zukünftigen realen Fertigungsumfeld. Die Rekonstruktion der komplexen Fertigungsumgebung wird dabei eingespart. Zudem kann ein direkter Abgleich von Planungsrestriktionen mit der Realität erfolgen. Zusätzlich schließt die AR-Technologie die Brücke zwischen digitaler Planung und realem Montagesystem. Durch die Einblendung von digitalen Montageinformationen aus der Planung können Mitarbeiter schneller und effizienter angelernt werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Informationssystemen bekommen die Montagearbeiter dabei relevante Informationen im Bezug zu den realen Montageobjekten angezeigt, z. B. durch die Einblendung virtueller Montagepfade. Suchzeiten nach Informationen werden so eingespart und es wird eine vollständige digitale Prozesskette von der Planung bis zum Betrieb des Montagesystems realisiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept für den Einsatz der Augmented-Reality-Technologie im Bereich der Montageplanung entwickelt. Das Konzept gliedert sich in ein Vorgehensmodell, welches den Montageplaner bei der Anwendung der AR-Technologie unterstützt, und in ein Planungssystem, welches den flexiblen Einsatz der Technologie in der Montage ermöglicht und dabei bestehende rechnerbasierte Planungshilfsmittel integriert. Die Vorgehensweise basiert auf etablierten Methoden der Montageplanung, die um spezielle Vorgehensmodelle für den AR-Einsatz erweitert wurden. Das System gliedert sich in Teilsysteme für die Modellierung, die AR-Visualisierung und die Speicherung bzw. Verwaltung von Planungsdaten. Die Teilsysteme sind über eine offene Kommunikationsplattform miteinander verbunden.

Das in dieser Arbeit konzipierte und im Rahmen einer Pilotanlage umgesetzte AR-unterstützte Planungssystem ermöglicht den durchgängigen Einsatz der AR-Technologie über mehrere Planungsphasen. Hierzu war die Konzeption einer flexiblen Systemarchitektur und entsprechender Hardwaremodule erforderlich. Das System selbst wurde sowohl aus kommerziellen Anwendungen, wie auch aus neu entwickelten Komponenten aufgebaut. Das entwickelte Konzept wurde im Rahmen unterschiedlicher exemplarischer Anwendungsfälle evaluiert. Dabei konnte die praktische Einsatzfähigkeit nachgewiesen werden. Des Weiteren konnten die durch den Einsatz des Konzeptes erwarteten Ziele, nämlich eine Reduzierung des Modellierungsaufwandes, eine Steigerung der Planungsqualität, eine verstärkte Integration der Planungsbeteiligten und eine nachhaltige Nutzung digitaler Planungsdaten, zur informationstechnischen Unterstützung von Montagemitarbeitern bestätigt werden. Die Arbeit leistet somit einen Beitrag, die technologische Innovation der AR-Technologie für die industrielle Praxis zu qualifizieren.

Aufgrund der hohen Nutzenpotenziale des Konzeptes und der möglichen Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Unternehmensbereiche, wie z. B. die Fertigungsplanung, sollte der Ansatz der AR-basierten Planung in der Forschung und industriellen Anwendung auf weitere Anwendungsfelder ausgeweitet werden. Hierbei ist es primär erforderlich, eine interdisziplinäre Entwicklung von AR-Hardwarekomponenten voranzutreiben. Besonders interessant erscheint zukünftig die Möglichkeit, nicht nur die Visualisierung und interaktive Gestaltung in der erweiterten Realität durchzuführen, sondern auch die Modellierung. Der Planer könnte so den gesamten Planungsprozess in einer AR-Umgebung durchführen.

## 9 Literaturverzeichnis

ALLEN U. A. 2001

Allen, B.; Bishop, G.; Welch, G.: Tracking: Beyond 15 Minutes of Thought. In: Proceedings of SIGGRAPH 2001, University of North Carolina at Chapel Hill. Chapel Hill: SIGGRAPH 2001, Course 11.

ALT 2001A

Alt, T.: Anwendungen der Augmented Reality in der Produktion. München: Herbert Utz 2000. (iwb Seminarberichte 54).

ALT 2001B

Schutzrecht DE 101 28 016 Patentanmeldung (2001-08-06). Thomas Alt. Pr.: DE 101 28 016 2001-12-20. - Verfahren und System zum Planen einer veränderten Produktionsumgebung, insbesondere einer Fertigungsanlage für Fahrzeugkomponenten.

ALT & NÖLLE 2001

Alt, T.; Nölle, S.: Augmented Reality in der Automobilindustrie. IX – Magazin für professionelle Datenverarbeitung 13 (2001) 5, S. 142.

ALT & SCHREIBER 2001

Alt, T.; Schreiber, W.: Qualitätssicherung mit AR-Technologien in der Automobilmontage. CAD-CAM Report 20 (2001) 11, S. 86-88.

AMICIS U. A. 2002

Amicis, R.; Santos, P.; Stork, A.; Fiorentino, M.: SketchAR - Sketching in Mixed Realities. In: Gausemeier, Jürgen (Hrsg.) u.a.: Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, 2002, S. 145-156 (HNI-Verlagsschriftenreihe 107).

ART 2003

AR-Tracking GmbH 2003: <<http://www.ar-tracking.de>>

AZUMA U. A. 1994

Azuma, R. u.a.: Improving Static and Dynamic Registration in an Optical See-Through HMD. In: Proceedings of SIGGRAPH '94, Computer Graphics, Orlando, 1994, S. 197-204.

AZUMA 1997

Azuma, R.: A Survey of Augmented Reality. Teleoperators and Virtual Environments. Malibu: Hughes Research Laboratories, 1997.

BALCISOY U. A. 2000

Balcisoy, S.; Fua, P.; Kallmann, M.; Thalmann, D.: A framework for rapid evaluation of prototypes with Augmented Reality. In: *Proceedings of ACM VRST*. Seoul: 2000.

BANERJEE 2001

Banerjee, P. (Hrsg.): Virtual Manufacturing. New York: John Wiley & Sons, 2001.

BARFIELD U. A. 1995

Barfield, W. (Hrsg.); Furness, T.-A. (Hrsg.): Virtual Environments and Advanced Interface Design. Oxford: Oxford University Press, 1995.

BARFIELD U. A. 2001

Barfield, W.; Baird, K.; Shewchuk, J.; and Ioannou, G.: Applications of Wearable Computers and Augmented Reality to Manufacturing. In: Barfield, W.; Caudell T. (Hrsg.): Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2001, S. 695 – 714.

BAUER 1997

Bauer, W.: Entwicklung eines Systems zur virtuellen ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung. Berlin: Springer 1997. (IPA-IAO Forschung und Praxis 257).

BAUSE U. A. 2002

Bause, J.; Fenzl, W.; Knau, J.: Nachhaltige Montagestrukturen. In: Tagungsband 17. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie, 2002.

BERGBAUER 2002

Bergbauer, J.: Entwicklung eines Systems zur interaktiven Simulation von Produktionssystemen in einer Virtuellen Umgebung. Aachen: Shaker 2002. (Innovationen der Fabrikplanung und –organisation 8).

BICKEL 1998

Bickel, D.: 3D Realtime Simulation and VR-Tools in the Manufacturing Industry. In: F. Dai. (Hrsg.): *Virtual Reality for Industrial Applications*. Berlin: Springer 1998, S. 123.

BILLINGHURST U. A. 2000

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

BULLINGER 1986

Bullinger, H.-J.: *Systematische Montageplanung*. München: Carl Hanser, 1986.

BULLINGER 2002

Bullinger, H.-J.: Mit Virtual Engineering kundennah entwickeln. *wt Werkstattstechnik* 92 (2002) 1/2, S. 10.

BLEY & FRANKE 2001

Bley, H.; Franke, C.: Integration von Produkt- und Produktionsmodell mithilfe der Digitalen Fabrik. *wt Werkstattstechnik* 91 (2001) 4, S. 214-220.

BRACHT & FAHLBUSCH 2001

Bracht, U.; Fahlbusch, M.: Einsatz von Virtual Reality Systemen in der Fabrik- und Anlagenplanung. *ZWF* 96 (2001) 6, S. 342-344.

BURDEA & COIFFET 1994

Burdea, G.; Coiffet, P.: *Virtual Reality Technology*. New York: John Wiley & Sons, 1994.

CAUDELL & MIZELL 1992

Caudell, T.; Mizell, D.: Augmented Reality – An Application of Heads-Up Display Technology to Manual Manufacturing Processes. In: *Proceedings of Hawaii International Conference on Systems Sciences*, Kauai. Hawaii: IEEE Press, 1992, S. 659-669.

CHUNG U. A. 1999

Chung, K.; Shewchuk, J.; Williges, R.: An Application of Augmented Reality Thickness Inspection. In: Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, Vol. 9 (1999) 4, S. 311-342.

CHEN 1999

Chen, E.: Six Degree-of-Freedom Haptic System For Desktop Virtual Prototyping Applications. In: Proceedings of the First International Workshop on Virtual Reality and Prototyping. Laval: 1999, S. 97-106.

CUIPER 2000

Cuiper, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. München: Herbert Utz 2000, S. 92 (iwb Forschungsberichte 143).

CURTIS U. A. 1999

Curtis, D.; Mizell, D.; Gruenbaum, P.; Janin, A.: Several Devils in the Details: Making an AR Application Work in the Airplane Factory. In: Behringer, R.; Klinker, G.; Mizell, D. (Hrsg): Augmented Reality – Placing Artificial Objects in Real Scenes. Natick, MA: A K Peters, 1999, S. 47-60.

DEISINGER & RIEDEL 1995

Deisinger, J.; Riedel, O.: Displays für Virtual Reality. In: Proceedings of the 10. Electronic Displays 95. Hagenburg: Network GmbH, 1995.

DEISINGER U. A. 2000

Deisinger, J.; Blach, R.; Wesche, G.; Breininger, R.; Simon, A.: Towards Immersive Modeling – Challenges and Recommendations. In: Mulder, R.; van Liere (Hrsg.): Proceedings of the 6<sup>th</sup> Eurographics Workshop on Virtual Environments, Amsterdam. Wien: Springer 2000.

DIN 19226-1

DIN 19226-1: Leittechnik, Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Allgemeine Grundbegriffe. Berlin: Beuth, 1994.

DIN 8593-3

DIN 8593-3: Fertigungsverfahren Fügen: Anpressen, Einpressen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth, 2003.

DOMBROWSKI U. A. 2001

Dombrowski, U.; Bothe, T.; Tiedemann, H.: Auf dem Weg zur Digitalen Fabrik. Braunschweig: Forschungsmagazin der TU Braunschweig, 2001, S. 44-50 (Forschungsmagazin der TU Braunschweig, Sonderheft).

DUTOIT U. A. 2001

Dutoit, A.; Creighton, O.; Klinker, G.; Kobylinski, R.; Vilsmeier, C.; Bruegge, B.: Architectural Issues in Mobile Augmented Reality Systems: A Prototype Case Study. In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC 2001), Macau. New York: IEEE Press, 2001.

EHRENSTRABER U. A. 2002

Ehrenstraßer, M.; Pörnbacher, C.; Wünsch, G.: Virtuelle Werkzeugmaschine für die Simulation – 3D-Visualisierung von HIL-Simulationen. *wt Werkstattstechnik* 92 (2002) 5, S. 205-209.

EVERSHEIM 1997

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik, Band 3. Düsseldorf: VDI, 1997.

EVERSHEIM U. A. 2001

Eversheim, W.; Weck, M.; Jahn, D.; Koschig, M.; Fricker, I.: Augmented Reality-Technologie unterstützt manuelle Montage. *VDI-Z* 143 (2001) 9, S. 90- 93.

FEINER U. A. 1993

Feiner, S.; MacIntyre, B.; Seligmann, D.: Knowledge-Based Augmented Reality. *Communications of the ACM*, Vol. 36 (1993) 7, S. 52-62.

FELDMANN 1997

Feldmann, Ch.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Berlin: Springer 1997. (iwb Forschungsberichte Nr. 104).

FERRIN 1991

Ferrin, F.: Survey of Helmet Tracking Technologies. In: Proceedings of SPIE Vol. 1456 Large-Screen Projection, Avionic, and Helmet-Mounted Displays. New York: SPIE Vol. 1456, 1991, S. 86-94.

FISCHER U. A. 1990

Fischer, P.; Daniel, R.; Siva, K. V.: Specifications and Design of Input Devices for Teleoperation. Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington: IEEE Press, 1990, S. 540-545.

FITZMAURICE 1993

Fitzmaurice, G. W.: Situated information spaces and spatially aware palmtop computers. Communications of the ACM 36 (1993) 7, S. 38-49.

FOLEY U. A. 1990

Foley, J.D.; van Dam, A.; Feiner, S.K.; Hughes, J.F.: Computer Graphics: Principles and Practice. New York: Addison-Wesley, 1990.

FRIEDRICH 2000

Friedrich, W.: ARVIKA Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service. In: Krause, F.-L., u. a. (Hrsg): Innovationsforum Virtuelle Produktentstehung, Berlin. Berlin: Fraunhofer-IPK 2000, S. 93.

FRIEDRICH 2004

Friedrich, W.; Wohlgemuth, W.: Das Leitprojekt ARVIKA. In: Friedrich, W. (Hrsg): ARVIKA – Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service. Erlangen: Publicis Corporate Publishing 2004, S. 13.

FRÜND U. A. 2001

Fründ, J.; Geiger, C.; Gafe, M.; Kleinnjohann, B.: AR-PDA – Ein mobiles Produktinformationssystem für den Massenmarkt. ZWF 96 (2001) 5, S. 270.

GERHARDT 2000

Gerhardt, A.; Lanza, M.: Das Potential der Digitalen Fabrik für die produzierende Industrie. In: Krause, F.-L., u. a. (Hrsg): Innovationsforum Virtuelle Produktentstehung, Berlin. Berlin: Fraunhofer-IPK 2000, S. 43.

GAUSEMEIER U. A. 1998

Gausemeier, J.; Lemke, J.; Riepe, B.: Integriertes Prototyping zur durchgängigen Unterstützung der Produktentwicklung. Industrie Management 14 (1998) 5, S. 13-19.

GAUSEMEIER U. A. 2000A

Gausemeier, J.; Grafe, M.; Ebelsmeyer, P.: Nutzenpotenziale von Virtual Reality in der Fabrik- und Anlagenplanung. *wt Werkstattstechnik* 90 (2000) 7/8, S. 282-286.

GAUSEMEIER U. A. 2000B

Gausemeier, J.; Lindemann, U.; Reinhart, G.; Wiendahl, H.-P.: Kooperatives Produktengineering – Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2000 (Band 79).

GAUSEMEIER U. A. 2002

Gausemeier, J.; Freund, J.; Matysczok, C.: AR-Planning Tool – Designing Flexible Manufacturing Systems with Augmented Reality. In: Proceedings of Eighth Eurographics Workshop on Virtual Environments, Barcelona. Aire-la-Ville: Eurographics Association, 2002.

GEIGER U. A. 2001

Geiger, C.; Kleinjohann, B.; Reinmann, C.; Stichling, D.: Mobile AR4ALL. In: Proceedings of International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2001). New York: IEEE Press, 2001, S. 182.

GOMES DE SÁ & BAACKE

Gomes de Sá, A.; Baacke, P.: Experiences with Virtual Reality Techniques in the Prototyping Process at BMW. In: Dai, F. (Hrsg.): Virtual Reality for Industrial Applications. Berlin: Springer 1998, S. 151-158.

GREGORY U. A. 2000

Gregory, A.; Mascarenhas, A.; Ehmann, S.; Lin M.; Manocha, D.: 6-DOF Haptic Display of Polygonal Models. In: Proceedings of IEEE Visualization Conference, Salt Lake City. New York: IEEE Press, 2000.

GRUNWALD 2000

Grunwald, S.: Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung. München: Herbert Utz 2000. (iwb Forschungsberichte Nr. 159).

HARINGER & REGENBRECHT 2002

Haringer, M.; Regenbrecht, H.: A Pragmatic Approach to Augmented Reality Authoring. In: Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Darmstadt: ISMAR, 2002, S. 237.

HEDICKE 2000

Hedicke, V.: Multimodalität in Mensch-Maschine-Schnittstellen. Timpe, K.-P., u. a. (Hrsg.): Mensch-Maschine-Systemtechnik. Düsseldorf: Symposion Publishing GmbH, 2000, S. 204.

HEGER 1998

Heger, R.: Entwicklung eines Systems zur interaktiven Gestaltung und Auswertung von manuellen Montagetätigkeiten in der virtuellen Realität. Berlin: Springer, 1998 (IPA-IOA Forschung und Praxis 273).

HEINZ U. A. 2001

Heinz, I.; Härtl, F.; Fröhlich, C.: Semi - Automatic 3D CAD Model Generation of As - Built Conditions of Real Environments using a Visual Laser Radar. In: Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on Robot-Human Interactive Communication. Paris: IEEE Press, 2001.

HUANG U. A. 2000

Huang, C.P.; Agarwal, S.; Liou, F.W.: The Development of Augmented Reality Environment – A Case Study on the Parts Feeding Systems. In: Proceedings of DETC'00. Baltimore: ASME, 2000, S. 1-8.

HUCK 1990

Huck, M.: Prouktorientierte Montageablauf- und Layoutplanung für die Robotermontage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.

JANIN U. A. 1993

Janin, A.; Mizell, D.; Caudell, T.: Calibration of Head-Mounted Displays for Augmented Reality Applications. In: Proceedings of Virtual Reality Annual International Symposium. Seattle: IEEE Press, 1993, S. 246-255.

JÄGER 1991

Jäger, A.: Systematische Planung komplexer Produktionssysteme. Berlin: Springer 1991. (iwb-Forschungsberichte Nr. 31).

JAEKL U. A. 2002

Jaekl, P. M.; Allison, R. S.; Harris, L. R.; Jasiobedzka, U. T.; Jenkin, H. L.; Jenkin, M. R.; Zacher, J. E.; Zikovitz, D. C.: Perceptual stability during head movement in virtual reality. In: Proceedings of VR 2002. Orlando: IEEE Press, 2002.

JONAS 2000

Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. München: Utz 2000. (iwb-Forschungsberichte Nr. 145).

JOOSTEN & SOFARIU 2003

Joosten, H.; Sofariu, S.: Werkzeuge für die virtuelle Umgebung – Geometrische Werkzeuge zur Untersuchung der Montierbarkeit virtueller Prototypen. *wt Werkstattstechnik* 93 (2003) 1/2, S. 12-16.

JUNG U.A. 2002

Jung, B.; Latoschik, M.; Biermann, E.; Wachsmuth, I.: Virtuelle Werkstatt. In: Gausemeier, J.; Gafe, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn: HNI 2002, S. 185-195 (HNI-Verlagsschriftreihe 107).

KATO & BILLINGHURST 1999

Kato, H.; Billinghurst, M.: Marker Tracking and HMD Collaboration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System. In: Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality '99. San Franciso: IEEE Press, 1999.

KOCH 2001

Koch, M.: Integration von Karosserieentwicklung und Rohbauplanung mittels Simulation und VR. In: Reinhart (Hrsg.): Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen. München: Utz, 2001 (iwb Seminarberichte 75).

KRAUSE U. A. 1999

Krause, F.-L.; Schumann, G.; Ziebeil, P.: iViP - Innovative Technologien und Systeme für die integrierte, virtuelle Produktentstehung. *wt Werkstattstechnik* 89 (1999) 2, S. 23.

### KRAUSE U. A. 2002

Krause, F.-L.; Rothenburg, U.; Schultz, R.; Striepe, A.; Neumann, J.: Potenziale der VR-Technik für die Produktentwicklung. CAD-CAM Report 21 (2002) 2, S. 50-56.

### KUBA 1997

Kuba, R.: Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion. Berlin: Springer, 1997, S. 6 (iwb Forschungsberichte 110).

### LAWRENCE U. A. 1996

Lawrence, D. A.; Pao, L. Y.; Salada, M. A.; Dougherty, A. M.: Quantitative experimental analysis of transparency and stability in haptic interfaces. In: Proceedings of the fifth Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Atlanta. New York: IEEE Press 1996.

### LEWIN U. A. 2000

Lewin, M.; Bowden, R.; Sarhadi, M.: Automotive Prototyping Using Augmented Reality. In: Proceedings of the 7th UK VR-SIG Conference. Glasgow: 2000, S. 11-20.

### LINNER U. A. 1999

Linner, S.; Geyer, M.; Wunsch, A.: Optimierte Prozesse durch Digital Factory Tools. VDI Bericht 1489. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1999, S.187-198.

### LIVINGSTON 1998

Livingston, M.: Vision-based tracking with dynamic structured light for video see through Augmented Reality. Chapel Hill, USA: University of North Carolina, Department of computer science, Diss.,1998, S. 26.

### LOTTER 1994

Lotter, B.: Manuelle Montage. Düsseldorf: VDI, 1994.

### LOTTER 2002

Lotter, B.: Der wirtschaftlich angepasste Automatisierungsgrad. In: Tagungsband 17. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie, 2002.

MATERN 2002

Matern, M.: Flexible Arbeitszeit in der Montage. In: Tagungsband 17. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie, 2002, S. 2.

MELZER & MOFFIT 1997

Melzer, J. E.; Moffit, K.: Head Mounted Displays – Designing for the User. New York: McGraw-Hill, 1997.

MILBERG 2003

Milberg, J.: Begrüßungsrede von acatech-Präsident Prof. Dr.-Ing. Joachim Milberg. Berlin, acatech, 30. September 2003.

MILGRAM & COLQUHOUM 1999

Milgram, P.; Colquhoun, H.: A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration. In: Y. Ohta, H. Tamura (Hrsg.): Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds. Berlin: Springer, 1999.

MIZELL 2001

Mizell, D.: Boeing's Wire Bundle Assembly Project. In: Barfield, W.; Caudell, C. (Hrsg.): Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2001, S. 447 – 467.

MOLINEROS U. A. 1999

Molineros, J.; Raghavan, V.; Sharma, R.: AREAS: Augmented Reality for Evaluating Assembly Sequences. In: Behringer, R.; Klinker, G.; Mizell, D. (Hrsg.): Augmented Reality – Placing Artificial Objects in Real Scenes. Natick: A K Peters, 1999, S. 47-60.

MÜLLER 2001

Müller, S.: Augmented Reality: Monteure mit Durchblick. *wt Werkstattstechnik* 91 (2001) 8, S. 498-499.

NEELY U. A. 1999

Neely, W.; Puterbaugh, K.; Troy, J.: Six degree-of-freedom haptic rendering using voxel sampling. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH. Los Angeles: 1999, S. 401-408.

NEUMANN & CHO 1996

Neumann, U.; Cho, Y.: A self-tracking augmented reality system. In: Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality and Applications. New York: IEEE Press 1996, S. 109–115.

NEUMANN & MAJOROS 1998

Neumann, U.; Majoros, A.: Cognitive, Performance, and Systems Issues for Augmented Reality Applications in Manufacturing and Maintenance. In: Proceedings. of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium. New York: IEEE Press, 1998, S. 4-11.

NEUSCHWINGER 2003

Neuschwinger, A.: Multimediales, Informationsmodellbasiertes Arbeitsplatzkommunikationssystem. Aachen: Shaker, 2003.

OMG 2003

OMG 2003: <http://www.omg.org>

OPENGL 2003

OpenGL 2003: <http://www.opengl.org/documentation/index.html>

OPENVRML 2003

OpenVRML 2003: <http://www.openvrml.org>

PASMAN & JANSEN 2001

Pasman, W.; Jansen, F. W.: Distributed Low-Latency Rendering for Mobile AR. In: Proceedings of International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2001). New York: IEEE Press, 2001, S. 107-112.

PERSIANI U. A. 2001

Persiani, F.; Liverani, A.; De Crescenzo, F.: Augmented Reality Approach to Vehicle Prototyping. In: Proceeding of First International Industrial Engineering Conference (IIEC 2001). Amman, Jordan: IIEC 2001, S. 457-462.

PILLER 2002

Piller, F.: Integrierte Wertschöpfungsnetzwerke für Mass Customization. In: Haasis, H. D. (Hrsg.): Wertschöpfungsnetzwerke im Electronic Business. Berlin: Springer, 2002.

PINHANEZ 2001

Pinhanez, C.: Augmenting Reality with Projected Interactive Displays. In: Proceedings of the International Symposium on Virtual and Augmented Architecture, Dublin. New York: IEEE Press, 2001.

POUPYREV U. A. 2001

Poupyrev, I.; Tan, D.; Billinghurst, M.; Kato, H.; Regenbrecht, H.; Tetsutani, N.: Tiles: A Mixed Reality Authoring Interface. In: Proceedings of INTERACT 2001, Yokohama. New York: IEEE Press, 2001.

REFA 1990

REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.): Planung und Betrieb komplexer Produktionssysteme. München: Hanser, 1990. S. 89.

REGENBRECHT & SPRECHT 2000

Regenbrecht, H.-T.; Sprecht, R.: A mobile Passive Augmented Reality Device – mPARD. In: Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality 2000. München: IEEE Press, 2000, S. 81-84.

REGENBRECHT U. A. 2001

Regenbrecht, H.; Baratoff, G.; Wagner, M.: A tangible AR Desktop Environment. Computers & Graphics 25 (2001) 5, S. 755-763.

REGENBRECHT & JACOBSEN 2002

Regenbrecht, H.; Jacobsen, S.: Augmentation of Volumetric Data in an Airplane Cabin. In: Demonstration short paper in proceedings of ISMAR 2002. New York: IEEE Press, 2002.

REINERS U. A. 1999

Reiners, D.; Stricker, S.; Klinker, G.; Müller, S.: Augmented Reality for Construction Tasks: Doorlock Assembly. In: Behringer, R.; Klinker, G.; Mizell, D. (Hrsg.): Augmented Reality – Placing Artificial Objects in Real Scenes. Natick, MA: A K Peters, 1999, S. 47-60.

REINHART & ROßGODERER 1998

Reinhart, G.; Roßgoderer, U.: Spatial Planning of Manual and Automated Work Stations Utilising Mathematic Algorithms and Virtual Reality Devices. In: Justin, K. (Hrsg.): In: Proceedings of the Eurosim '98 Simulation Congress, Helsinki. 1998, Vol. 3, S. 499-505.

REINHART U. A. 1999

Reinhart, G.; Grunwald, S.; Rick, F.: Virtuelle Produktion – Technologie für die Zukunft. VDI-Z Special: C-Techniken, (1999), S. 26 – 29.

REINHART 2000

Reinhart, G.: Deutschland ist Montageland. wt Werkstattstechnik 90 (2000) 9, S. 336.

REINHART U. A. 2000

Reinhart, G.; Baudisch, T.; Patron, C.: Perspektiven und Lösungsansätze für die integrierte virtuelle Produktentstehung. wt Werkstattstechnik 90 (2000) 7, S. 278-281.

REINHART U. A. 2001

Reinhart, G.; Patron, C., Weber, V.: Augmented Reality in der Produktion. wt Werkstattstechnik 91 (2001) 6, S. 325-327.

REINHART U. A. 2002A

Reinhart, G.; Berlak, J.; Effert, C.; Selke, C.: Wandlungsfähige Fabrikgestaltung. ZWF 97 (2002) 1-2, S. 18.

REINHART U. A. 2002B

Reinhart, G.; Patron, C.; Meier, P.: Virtual- und Augmented Reality in der Montage - Durchgängiger Einsatz von Virtual und Augmented Reality im Bereich der manuellen Montage. wt Werkstattstechnik 92 (2002) 1/2, S. 12-15.

REINHART 2003

Reinhart, G.: Wirtschaftliche Montage – Herausforderung für den Mittelstand. *wt Werkstattstechnik online* 93 (2003) 9, S. 570.

REINHART & PATRON 2003

Reinhart, G.; Patron, C.: Integrating Augmented Reality in the Assembly Domain - Fundamentals, Benefits and Applications. In: *Annals of CIRP* Vol. 52/1 2003, S. 5-8.

REKIMOTO 2001

Rekimoto, J.: NaviCam: A Palmtop Device Approach to Augmented Reality. In: Barfield, W.; Caudell T. (Hrsg.): *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2001, S. 353 – 378.

ROßGODERER 2002

Roßgoderer, U.: System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montagesystemen. München: Herbert Utz 2002, (iwb Forschungsberichte 168).

RÖßLER 2001

Rößler, A.: Ein System für die Entwicklung räumlicher Benutzungsschnittstellen. Westkämper, E. (Hrsg.): Heimsheim, 2001 (IPA-IAO Forschung und Praxis 334)

SATO U. A. 1999

Sato, K.; Ban, Y.; Chihara, K.: MR Aided Engineering: Inspection Support Systems Integrating Virtual Instruments and Process Control. In: Ohta, Y. (Hrsg.): *Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds*. Berlin: Springer, 1999, S. 347-361.

SCHAUB 2001

Schaub, H.: Irren ist menschlich. In: 16. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie, 2001, S. 17.

SCHWALD U. A. 2001

Schwald, B.; Figue, J.; Chauvineau, E.; Vu-Hong, F.; Robert, A.; Arbolino, M.; Schnaider, M.; De Laval, B.; Dumas de Rauly, F.; Anez, F.-G.; Baldo, O.; Santos, J.-M.: STARMATE: Using Augmented Reality technology for computer guided maintenance of complex mechanical elements. In: Proceedings of the 2001 - eBusiness and eWork Conference, Venedig, 2001.

SOWIZRAL & BARNES 1993

Sowizral, H.; Barnes, J.: Tracking Position and Orientation in a Large Volume. In: Proceedings of Virtual Reality Annual International Symposium. Seattle: IEEE Press, 1993, S. 132-139.

SPITZNAGEL 1999

Spitznagel, J.: Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen. Berlin: Springer, 1999 (iwb-Forschungsberichte Nr. 121).

STEFFEN & KUHLEN 2001

Steffan, R.; Kuhlen, T.: MAESTRO - a tool for interactive assembly simulation in virtual environments. In: Fröhlich, B.; Deisinger, J.; Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Immersive Projection Technology and Virtual Environments. Wien: Springer, 2001, S. 141 – 152.

SUTHERLAND 1968

Sutherland, I.: A Head-Mounted Three Dimensional Display. In: Proceedings of Fall Joint Computer Conference. 33, S. 757-764.

SZALAVÁRI 1999

Szalavári, Z.: The Personal Interaction Panel a two-handed Interface for Augmented Reality. Wien: Technische Universität Wien, Diss., 1999, S. 2

TANG U. A. 2002

Tang, A.; Owen, C.; Biocca, F.; Mou, W.: Experimental Evaluation of Augmented Reality in Object Assembly Task. In: Proceedings of ISMAP 2002, IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Germany. New York: IEEE Press, 2002.

TAPPERT U. A. 2001

Tappert, C.; Ruocco, A.; Langdorf, K.; Mabry, F.; Heinemann, K.; Brick, T.; Cross, D.; Pellisier, S.: Military applications of wearable computers and augmented reality. In: Barfield, W.; Caudell, T. (Hrsg.): Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. Mahwah: Lawrence Earlbaum Associates, 2001, S. 625-647.

TORRE U. A. 2000

Torre, R.; Balcisoy, S.; Fua, F.; Ponder, M.; Thalmann, D.: Interaction Between Real and Virtual Humans: Playing Checkers. Eurographics Workshop on Virtual Environments, Amsterdam, 2000.

VDI 2860

VDI Richtline 2860: Montage- und Handhabungstechnik Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.

VRML97 2003

VRML97 2003: [http://www.web3d.org/technicalinfo/specifications/ISO\\_I\\_EC\\_14772-All/index.html](http://www.web3d.org/technicalinfo/specifications/ISO_I_EC_14772-All/index.html)

WEBER 1998

Weber, J.: Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien. Karlsruhe: Schnelldruck Ernst Grässer, 1998.

WEINERT U. A. 1998

Weinert, K.; Albersmann, F.; Zabel, A.; Damm, P.: Virtual Reality in Design und Anwendung – Einsatz von virtueller Realität von frühen Designphasen bis hin zur Fertigung. VDI-Z 98 (1998) 9.

WENDEROTH 2002

Wenderoth, A.: Herausforderung globale Massenproduktion. In: Tagungsband 17. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie, 2002.

WESTKÄMPER U. A. 2001

Westkämper, E.; Bischoff, R. von Briel; Dürr, M.: Fabrikdigitalisierung – Ein angepasster Ansatz für die digitale Fabrikplanung in bestehenden Fabriken und Gebäuden. wt Werkstattstechnik 91 (2001) 6, S. 304-307.

### WESTKÄMPER U. A. 2002

Westkämper, E.; von Briel, R.; Dürr, M.: Methoden und Werkzeuge für eine zukünftige Planung von Fabriken und Produktionssystemen. In: Gausemeier, J.; Gafe, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn: HNI 2002, S. 286-288 (HNI-Verlagsschrifreihe 107).

### WESTKÄMPER U. A. 2003

Westkämper, E.; Bierschenk, S.; Kuhlmann, T.: Digitale Fabrik – nur was für die Großen?. In: Werkstattstechnik 93 (2003) 1/2, S. 22-26.

### WIENDAHL U. A. 2002

Wiendahl, H.-P.; Harms, T.; Heger, C.: Kontextsensitiver Einsatz von Virtual Reality im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: Gausemeier, J.; Gafe, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn: HNI, 2002 (HNI-Verlagsschrifreihe 107).

### YE U. A. 2003

Ye, G.; Corso, J.-J.; Burschka, D.; Hager, G.-D.: Augmented Reality Combining Haptics and Vision. In: CIR Lab Technischer Bericht. Department of Computer Science. John Hopkins University, 2003.

### ZACHMANN 2000

Zachmann, G.: Virtual Reality in Assembly Simulation – Collision Detection, Simulation Algorithms and Interaction Techniques. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2000.

### ZACHMANN 2001

Zachmann, G.: How to calibrate a CAVE. In: Proceedings of CAVE Programming Workshop, Oktober 2001. Stockholm: Eurographics Portuguese Chapter, 2001.

### ZÄH 2002

Zäh, M. F.: Augmented Reality - Grundlagen, Nutzenpotenziale und Umsetzung. In: 17. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie, 2002. S. 11.

ZÄH U. A. 2002

Zäh, M. F.; Reinhart, G.; Petzold, B.; Patron, C.: Force-Feedback in VR/AR-Anwendungen – Grundlagen, Bewertungsgrößen und technische Integration. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn: HNI 2002, S. 56-65 (HNI-Verlagsschriftreihe 107).

ZÄH U. A. 2003A

Zäh, M. F.; Patron, C.; Weber, V.: Informationstechnische Integration von Mitarbeitern in der Produktion - Nutzenpotenziale und Anwendungen von Multimedia, Augmented Vision und Augmented Reality. Industrie Management 19 (2003) 6, S. 14.

ZÄH U. A. 2003B

Zäh, M. F.; Egermeier, H.; Eursch, A.; Petzold, B.: Effiziente Interaktion mit virtuellen Prototypen – Interaktion durch haptische Eingabegeräte verbessern. wt Werkstattstechnik 93 (2003) 9, S. 619-623.

ZHONG U. A. 2003

Zhong, X.; Liu, P.; Georganas, N.; Boulanger, P.: Designing a Vision-based Collaborative Augmented Reality Application for Industrial Training. Information Technology 45 (2003) 1, S. 7-18.

ZIMMERMANN U.A. 1998

Zimmermann, P.; Purschke, P.; Rabätle, R.; Schulze, M.; Starke, A.; Symietz, M.: Virtual Reality (VR) – New Methods for Improving and Accelerating Vehicle Development. In: Dai, F. (Hrsg.): Virtual Reality for Industrial Applications. Berlin: Springer 1998, S. 105-121.

ZUBER 2001

Zuber, E.; Kress, M.; Wagner, W.: Virtuelle Produktion – Partner der digitalen Produktentwicklung. wt Werkstattstechnik online 91 (2001) 6, S. 310.

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Gliederung der Arbeit .....	4
Abbildung 2-1: Gliederung der Montagefunktionen .....	6
Abbildung 2-2: Vorgehen und Arbeitsschritte in der Montageplanung .....	7
Abbildung 2-3: Modellierung und Simulation von Systemen .....	11
Abbildung 2-4: Einordnung der Modellierung in den Simulationsablauf .....	13
Abbildung 3-1: Abgrenzung von Augmented Reality nach MILGRAM .....	20
Abbildung 3-2: Funktionsprinzip eines Augmented-Reality-Systems .....	21
Abbildung 3-3: Aufbau und Komponenten eines AR-Systems .....	22
Abbildung 3-4: Verfahren zur visuellen Überlagerung von Informationen .....	24
Abbildung 3-5: Bauformen von Head Mounted Displays (HMD) .....	26
Abbildung 3-6: Grundlagen der Bildentstehung .....	27
Abbildung 3-7: Klassifizierung von Verfahren zur Positionserfassung .....	28
Abbildung 3-8: Übersicht über Anwendungen der AR-Technologie .....	39
Abbildung 4-1: Methodische Anforderungen für eine AR-Unterstützung .....	42
Abbildung 4-2: Positionsbestimmung mit einem Inside-Out System .....	47
Abbildung 4-3: Änderung der Lage von Betriebsmitteln .....	47
Abbildung 4-4: Technische Anforderungen an ein AR-System .....	49
Abbildung 5-1: Bewertung von Hilfsmitteln für die Layoutplanung .....	54
Abbildung 5-2: Bewertung von Informationssystemen in der Montage .....	56
Abbildung 5-3: Bereich des AR-Einsatzes in der Montageplanung .....	57
Abbildung 5-4: Prinzip der AR- unterstützten räumlichen Planung .....	58
Abbildung 5-5: Regelkreis der AR-unterstützten räumlichen Planung .....	59
Abbildung 5-6: Einordnung der Planungsaufgaben .....	61
Abbildung 5-7: Phasen der AR-unterstützten räumlichen Montageplanung .....	62
Abbildung 5-8: Prinzipieller Aufbau einer AR-Szene für die räumliche Planung .....	63

Abbildung 5-9: Kalibrierung eines mobilen AR-Trackings .....	64
Abbildung 5-10: Vorgehen bei der AR-Layoutplanung.....	65
Abbildung 5-11: AR-Visualisierung in verkleinertem Maßstab.....	66
Abbildung 5-12: Positionierung von AR-Objekten .....	68
Abbildung 5-13: Eignung von Visualisierungs- und Positionierungsarten .....	68
Abbildung 5-14: Bewertung eines Planungsstandes mit AR.....	69
Abbildung 5-15: Erfassung von Abständen zwischen virtuellen und realen Objekten...	70
Abbildung 5-16: Grundprinzip der AR-basierten Arbeitsunterweisung .....	74
Abbildung 5-17: Regelkreis der AR-Arbeitsunterweisung .....	75
Abbildung 5-18: Vorgehensweise für die AR-unterstützte Arbeitsunterweisung .....	76
Abbildung 5-19: Arten der Informationsdarstellung mit AR .....	77
Abbildung 5-20: Einordnung von Visualisierungsgeräten .....	82
Abbildung 5-21: Merkmale des VST und OST-Verfahrens.....	83
Abbildung 5-22: Eignung von VST und OST-Verfahren .....	83
Abbildung 5-23: Bewertung von Trackingsystemen .....	85
Abbildung 5-24: Bewertung der Trackingverfahren.....	86
Abbildung 5-25: Bewertung der Trackingverfahren.....	87
Abbildung 5-26: Bewertung von Eingabegeräten.....	88
Abbildung 5-27: Zusammensetzung der Hardwaremodule aus den Subsystemen .....	89
Abbildung 6-1: Aufbau des Systems zur AR-unterstützten Montageplanung .....	92
Abbildung 6-2: Modellierung manueller Bewegungsabläufe mit dem VR-System .....	95
Abbildung 6-3: GUI-Komponente des Prozessplanungswerkzeuges .....	96
Abbildung 6-4: Bildschirmansicht des Anwendungsmodule AR-Plan .....	99
Abbildung 6-5: Systemaufbau für den Planungsbereich P 1 .....	102
Abbildung 6-6: Hardwareaufbau für den Planungsbereich P 1 .....	103
Abbildung 6-7: Hardwareaufbau mit monokularer Kamera.....	104
Abbildung 6-8: Systemaufbau für den Planungsbereich P 2 .....	105

## 10 Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 6-9: AR-Visualisierung eines manuellen Arbeitsplatzes .....	107
Abbildung 6-10: Interaktive Layoutgestaltung in der AR-Umgebung.....	108
Abbildung 6-11: Optimierung manueller Arbeitsplätze mit dem System AR-Plan....	109
Abbildung 6-12: Zuordnung der AR-Daten im Prozessplanungswerkzeug .....	110
Abbildung 6-13: Visualisierung von Zusatzinformationen mit AR-Work.....	111
Abbildung 7-1: Kosten eines AR-Systems .....	115
Abbildung 7-2: Abschätzung der Kosteneinsparungen für die Layoutplanung.....	116
Abbildung 7-3: Anordnung des Vergleichsprozesses .....	117
Abbildung 7-4: MTM-Bewertung eines Vergleichsprozesses.....	118

## 11 Glossar

Abk.	Bedeutung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AR	Augmented Reality
BDE	Betriebsdatenerfassung
CAD	Computer Aided Design
CAPE	Computer Aided Production Engineering
COM	Component Object Model
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
DMU	Digital Mock-up
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ERP	Enterprise Ressource Planning
GUI	Graphical User Interface (Grafische Benutzerschnittstelle)
HTML	Hypertext Markup Language
LED	Light-Emitting-Diode
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MTM	Method of Time Measurement
OMG	Object Management Group
PDM	Product Data Management
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
VR	Virtual Reality
VRML	Virtual Reality Modeling Language

# 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 *Meier, 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, J.*  
Schneideroderte 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 Leitungssäte  
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 *Groh, 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.*  
Mobilier 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 *Heuser, H.-J.*  
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*  
Ermittlung modularer Parameter aus Übertragungsfrequenzängen  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*  
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen  
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*  
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung  
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*  
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems  
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*  
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage  
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wrbá, 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 Karosserierechteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*  
Planungsstrategien zur störmungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*  
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*  
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*  
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*  
Dynamisches Verhalten von Kreissägen  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*  
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile  
1991 · 88 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 Programmabaukastens für robotergeführte Klebeprozesse  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*  
Integrierte Diagnose in Produktionszellen  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*  
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*  
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schräfer, N.*  
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wissbacher, J.*  
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Gernic, F.*  
Laserbearbeitung mit Robotern  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*  
Digitale Zustanderegelung elektrischer Vorschubantriebe  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*  
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Heilm, H.J.*  
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*  
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*  
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*  
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*  
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*  
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*  
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strahmayer, R.*  
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringereinrichtungen  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Gles, J.*  
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*  
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*  
Roboter systeme 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 Produktionsystemen  
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 Produktionsystemen  
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 *Raith, 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 *Zwanzer, N.*  
Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*  
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflussteuerungen  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
Flexibilisierung der automatischen Teilebereitstellung 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 *Deutschle, 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 varianteureiche 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 *Fichtmöller, 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**  
1995 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszeilen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Motezuma 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 *Pischetsrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen varianteureichen 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 · 98 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wegner, M.*  
**Steuerungsintegrierte 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 *Krämer, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung**  
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
**Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service**  
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*  
**Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion**  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
**Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen**  
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
**Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung**  
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
**Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz**  
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
**Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse**  
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64868-8
- 116 *Koehler, J.*  
**Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung**  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuler, 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.*  
**Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen**  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, 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, [utz@utzverlag.com](mailto:utz@utzverlag.com)

- 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 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leitechnik 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
- 23 EDM Engineering Data Management  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 24 Rationale Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauflauf  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Modern Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung 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 Mikrobauteilen  
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 3-98675-069-0
- 70 **Mechatronik** · Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik** · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 · erscheint 12/04
- 72 **Fabrikplanung 2004** · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 · erscheint 12/04
- 73 **Rapid Manufacturing** · Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen  
ISBN 3-89675-073-9 · erscheint 12/04
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung** · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
ISBN 3-89675-074-7 · erscheint 12/04
- 75 **Nicht erschienen** – wird nicht erscheinen
- 76 **Berührungslose Handhabung** · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
ISBN 3-89675-076-3 · erscheint 12/04
- 77 **ERP-Systeme** · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
ISBN 3-89675-077-7 · erscheint 03/05
- 78 **Mechatronik** · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
ISBN 3-89675-078-X · erscheint 04/05

# Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, 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, [utz@utzverlag.de](mailto:utz@utzverlag.de)

- 122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Spreznel, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian  
**Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen**  
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich  
**Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen**  
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof  
**Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss**  
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank  
**Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen**  
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael  
**Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme**  
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn  
**Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung**  
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert  
**Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben**  
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt  
**Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion**  
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich  
**Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung**  
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer  
**Ganzheitliche 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 Höpner  
**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 Weissenberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter 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 Breitinger  
**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
- 192 Carsten Selke  
**Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung**  
2005 · 145 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9