





Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
der Technischen Universität München

**Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme  
unter Einsatz von Telepräsenz**

**Johannes Schilp**

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

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

Prüfer der Dissertation:

1. Univ. Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ. Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lueth

Die Dissertation wurde am 16.11.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 20.12.2010 angenommen.



Johannes Schilp

**Adaptive Montagesysteme für hybride  
Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz**



Herbert Utz Verlag · München

**Forschungsberichte IWB**

Band 244

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2010

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2012

ISBN 978-3-8316-4063-8

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

## Geleitwort der Herausgeber

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



## Danksagung

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die sehr gute und vertrauliche Zusammenarbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart danke ich für die wohlwollende Förderung und Betreuung bzw. der großzügigen Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lueth, dem Leiter des Lehrstuhls für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates sehr herzlich bedanken. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die Übernahme des Prüfungsvorstandes.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für die Unterstützung und konstruktive Arbeitsatmosphäre, welche durch zahlreiche Diskussionen und vielfältige Anregungen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Insbesondere danke ich Herrn Dr.-Ing. Dirk Jacob, der durch seine Vorarbeiten am Institut meine Begeisterung für das Themenfeld Mikromontage geweckt hat, und Herrn Dr.-Ing. Michael Ehrenstraßer für die enge Zusammenarbeit. Ebenso danke ich den zahlreichen Studierenden und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus den Servicecentern des Instituts, welche durch ihre Unterstützung meine Arbeit erst ermöglicht haben.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und dadurch den Grundstein zu dieser Arbeit gelegt haben.

München, im Dezember 2010

*Johannes Schilp*



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Trends in der Mikroproduktionstechnik .....	1
1.2 Mikromontage im Spannungsfeld der Kleinserie .....	4
1.3 Motivation und Zielsetzung .....	8
1.4 Vorgehensweise .....	12
<b>2 Grundlagen und Basistechnologien.....</b>	<b>15</b>
2.1 Überblick.....	15
2.2 Mikromontage – eine Schlüsseltechnologie .....	15
2.2.1 Definition.....	15
2.2.2 Wirtschaftliche Herausforderungen .....	17
2.2.3 Technologische Herausforderungen.....	20
2.2.4 Analyse der Technologien für die flexible Mikromontage .....	23
2.3 Systemergonomie.....	26
2.3.1 Struktur eines Mensch-Maschine-Systems .....	26
2.3.2 Informationsverarbeitung im Systemelement Mensch.....	28
2.3.3 Informationsverarbeitung des Systemelements Maschine .....	31
2.3.4 Kombination der Fähigkeiten von Mensch und Maschine.....	33
2.4 Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie .....	36
2.4.1 Definition und Begriffe .....	36
2.4.2 Anwendungen von Telepräsenzsystemen .....	39

---

2.4.3 Nutzen der Telepräsenz in der Produktionstechnik .....	42
2.4.4 Analyse der Telepräsenztechnologie .....	45
2.5 Programmierverfahren.....	46
2.5.1 Überblick und Begrifflichkeiten .....	46
2.5.2 Analyse von Programmierverfahren .....	50
2.6 Anforderungsprofil und Bewertungsschema.....	52
<b>3 Stand der Forschung und Technik .....</b>	<b>55</b>
3.1 Überblick .....	55
3.2 Flexible Mikromontagesysteme .....	55
3.2.1 Manuelle Mikromontagesysteme .....	55
3.2.2 Teleoperierte Mikromontagesysteme.....	57
3.2.3 Automatisierte Mikromontagesysteme .....	62
3.2.4 Adaptive Ansätze .....	64
3.3 Auswertung des Stands der Technik .....	66
3.4 Präzisierung der Aufgabenstellung.....	68
<b>4 Entwurf eines adaptiven Mikromontagesystems.....</b>	<b>69</b>
4.1 Entwurf einer adaptiven Mikromontagestrategie .....	69
4.2 Anlagenarchitektur und Teilsysteme .....	72
<b>5 Baukasten für die Teleoperatorseite.....</b>	<b>75</b>
5.1 Kinematik und Teleoperatoren .....	75
5.2 Werkzeugsystem und Endeffektoren.....	76
5.3 Bauteilträger und Aktionsort .....	82
5.4 Multisensorsystem .....	82

---

5.4.1	Physikalische Sensorkomponenten für die Mikromontage .....	82
5.4.2	Vorgehensweise für die physikalische Sensorauswahl .....	85
5.4.3	Sensorentwurf nach dem Prinzip der logischen Sensoren .....	87
5.4.4	Implementierungsmodell logischer Sensoren .....	89
5.4.5	Baukasten logischer Sensoren .....	90
5.5	Steuerungssystem.....	96
5.5.1	Steuerungsarchitektur.....	96
5.5.2	Kombination unterschiedlicher Steuerungsfunktionen .....	99
<b>6</b>	<b>Baukasten für den Operatorarbeitsplatz.....</b>	<b>101</b>
6.1	Klassifikation von Bedienerschnittstellen .....	101
6.1.1	Konzeption von Darstellungs- und Wirkraum .....	103
6.1.2	Konzeption des Programmierraums .....	105
6.1.3	Grundkonzept eines integrierten Operatorarbeitsplatzes .....	107
6.2	Steuerungsstrategie .....	108
6.2.1	Kontinuierlicher Wechsel zwischen den Fertigungsarten.....	108
6.2.2	Telepräsenzmodus für die Einzelfertigung.....	110
6.2.3	Telepräsenz Programmieren .....	111
6.2.4	Automatikmodus für die Mittelserienfertigung.....	113
<b>7</b>	<b>Aufbau einer Pilotanlage.....</b>	<b>115</b>
7.1	Teleoperatorseite für die adaptive Mikromontage.....	115
7.1.1	Kinematiksystem und Mikromontagewerkzeuge.....	115
7.1.2	Sensorik und Bildverarbeitung .....	117
7.2	Bedienerschnittstelle .....	118

---

7.2.1 Haptische Eingabegeräte .....	118
7.2.2 Visualisierung und Kontrollfunktionen .....	119
7.3 Technisch-wirtschaftliche Bewertung .....	120
7.3.1 Technische Bewertung .....	120
7.3.2 Wirtschaftliche Bewertung .....	121
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>125</b>
8.1 Ergebnisse und ihre Bedeutung .....	125
8.2 Weiterer Handlungsbereiche .....	126
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>129</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>133</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

a	annum (Jahr)
AAA	agile-assembly-architecture
AFM	Atomic-Force-Microscope
Anm.	Anmerkung
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BioMEMS	biological-micro-electro-mechanical systems
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d	day (Tag)
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
e.V.	eingetragener Verein
engl.	englisch
et al.	et alii
etc.	et cetera
f	folgende
Fa.	Firma
ff	fortfolgende
i. A.	im Allgemeinen
i. d. R.	in der Regel

---

ggf.	gegebenfalls
LIGA	Lithographie-Galvanoformung-Abformung
MEMS	micro-electro-mechanical systems
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
MMS	Mensch-Maschine-System
MOEMS	micro-opto-electro-mechanical systems
ms	Millisekunde
MST	Mikrosystemtechnik
NEXUS	The Network of Excellence in Multifunctional Microsystems
REFA	REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.
S.	Seite
sog.	so genannte
s. o.	siehe oben
s. u.	siehe unten
u. a.	und andere
usw.	und so weiter
v. a.	vor allem
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Verf.	Verfasser
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

---

z. T.

zum Teil



# 1 Einleitung

## 1.1 Trends in der Mikroproduktionstechnik

Die Produktionstechnik steht im Bereich der Automatisierungstechnik vor einem Paradigmenwechsel, da sie sich in Zukunft mit dem Einsatz von Mikrosystemen und der sog. „technischen Intelligenz“ verstärkt auf die kognitiven Fähigkeiten des Menschen und dessen Integration in die Produktion stützen muss. Auf diese Weise entstehen intelligente und flexible Automatisierungslösungen, um den allgemeinen Markttrends der Kundenindividualisierung, der Steigerung der Produktkomplexität und der Verkürzung der Produktlebenszyklen entgegenzutreten (WESTKÄMPER 2000, WESTKÄMPER 2005). „People are the most flexible ressource a company may have. ... Being the so called process owner people take the responsibility of the production processes to optimize productivity and quality as well as to minimize production cost.“ Mit diesem Zitat schlagen BLEY ET AL. (2004) die kognitive Integration der Produktionsmitarbeiter und die intelligente und flexible Kombination von manuellen und automatisierten Tätigkeiten in einer Produktionskette vor, um trotz steigender Variantenvielfalt und sinkender Losgrößen die Reaktionsfähigkeit der Unternehmen auf Marktveränderungen in der Zukunft zu gewährleisten. Diese Rückbesinnung auf den Wert des Mitarbeiters bzw. auf den Wert seiner fachlichen Qualifikation stellt besonders auch in Hochlohnstandorten wie Deutschland einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil für das produzierende Gewerbe dar (ZÄH ET AL. 2006A, KINKEL & Lay 2004).

Diesen Paradigmenwechsel weg von vollständig automatisierten und damit starren Produktionskonzepten hin zu intelligenten und flexiblen Automatisierungslösungen unter sinnvoller Einbeziehung des Menschen belegt auch eine empirische Studie (LAY ET AL. 2001A), in der deutsche Unternehmen nach dem Erfolg ihrer in der Vergangenheit getätigten Investitionen zur Erhöhung des Automatisierungsgrads befragt wurden (siehe Abbildung 1 Mitte). Hohe Automatisierungsgrade widersprechen demnach z. B. der durch den Markt geforderten Losgrößenreduktion (65%) und der flexiblen Kapazitätsanpassung (57%).

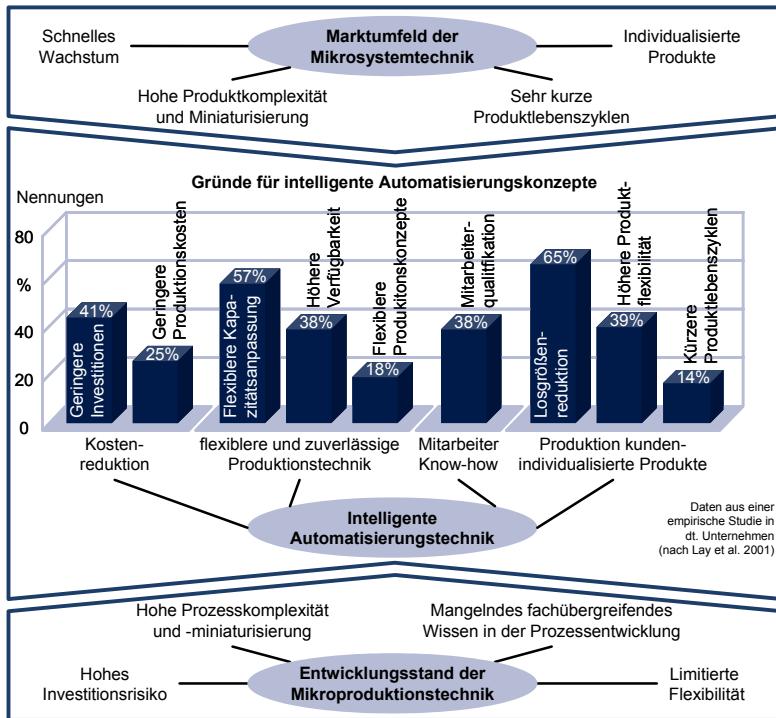


Abbildung 1: *Intelligente Automatisierungstechnik (Mitte) als Bindeglied zwischen den Marktumfeld der Mikrosystemtechnik (oben) und dem Entwicklungsstand der Mikroproduktionstechnik (unten)*

Das Potenzial dieses Paradigmenwechsels in der Automatisierungstechnik wird auch am Beispiel der Mikrosystemtechnik deutlich, welche als sog. Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts (BÜTTGENBACH 1998) hinsichtlich ihrer Marktentwicklung hoch gelobt wird, jedoch in einigen Bereichen hinter den Marktprognosen zurück bleibt. Für diese Betrachtung lassen sich die in der oben erwähnten Studie aufgeführten und teils vielschichtigen Gründe für intelligente Automatisierungslösungen in folgende vier Aspekte zusammenfassen (siehe Abbildung 1 Mitte):

- Kostenreduzierung bzw. niedriges Investitionsrisiko,
- flexiblere und zuverlässige Produktionstechnik,

- Nutzung des im Unternehmen vorhandenen Mitarbeiter Know-hows und
- Produktion kundenindividualisierter Produkte.

Diese vier Aspekte sind nahezu deckungsgleich mit den aktuellen Marktanforderungen der Mikrosystemtechnik, welche selbst

- durch ein schnelles aber schwankendes Marktwachstum mit damit verbundenem hohen Investitionsbedarf und -risiko,
- durch komplexer werdende und miniaturisierte Produkte und die dafür erforderlichen Fertigungs- und Montagetechnologien,
- durch sehr kurze Produktlebenszyklen und den dafür notwendigen Know-how-Transfer durch die Mitarbeiter für die Prozessentwicklung bzw.
- durch stark individualisierte Produkte

geprägt sind (abgeleitet aus ZINNER 2003, siehe Abbildung 1 oben). Durch den Einsatz von intelligenten Automatisierungslösungen sollten demnach sowohl die wirtschaftliche Produktion wie auch der Markterfolg mikrosystemtechnischer Produkte als sicher gestellt gelten.

Für die Mikrosystemtechnik wird auch insgesamt ein nachhaltiges Wachstum prognostiziert, welches sich zu ca. 80% auf Großserienprodukte mit einem eher moderaten aber steten Wachstum und derzeit zu ca. 20% auf innovative, sog. hybride Mikrosysteme (vgl. Abschnitt 2.2.1) mit einem sehr großen aber schwankenden Wachstum stützt (WICHT ET AL. 2001A, WECHSUNG 2002, WICHT & BOUCHAUD 2005). Aus einem Vergleich der zeitlich versetzten Studien zur Marktentwicklung der Mikrosystemtechnik (WECHSUNG 2002, WICHT & BOUCHAUD 2005) ergibt sich jedoch ein differenziertes Bild, da zahlreiche innovative Neuentwicklungen bei hybriden Mikrosystemen z. B. für die Medizintechnik oder für die optische Industrie mangels ausreichender Stückzahlen aktuell nur einen minimalen oder überhaupt keinen Markterfolg erzielen können. Als verantwortlich hierfür gilt nach HESSELBACH ET AL. (2003) der aktuelle Entwicklungsstand der Mikroproduktionstechnik (siehe Abbildung 1 unten), der durch

- ein hohes Investitionsrisiko wegen unsicherer Wachstumsprognosen,
- voranschreitende Komplexität und Miniaturisierung der Prozesstechnik,
- mangelndes fachübergreifendes Wissen in der Prozessentwicklung und
- limitierte Flexibilität der einsetzten Fertigungs- und Montagesysteme

gekennzeichnet und ökonomisch auf die Massenproduktion ausgerichtet ist.

Auch in diesen Umsetzungshemmnissen der Mikroproduktionstechnik spiegeln sich damit indirekt die vier Potenziale der intelligenten Automatisierung als Bindeglied zwischen den Markterfordernissen der Mikrosystemtechnik und dem Entwicklungsstand der Mikroproduktion wider (siehe Abbildung 1). Neben den aktuellen Entwicklungsansätzen von flexiblen, produktübergreifenden und durchgängigen Mikroproduktionsketten (BMBF 2004) können damit v. a. die flexible Integration des Menschen in die Prozessumgebung, die effiziente Kombination von manuellen und automatisierten Tätigkeiten und die Integration von technischer Intelligenz in die Anlagentechnik einen wichtigen Beitrag leisten, um die wirtschaftliche Produktion v. a. von hybriden Mikrosystemen zu ermöglichen und damit deren Wachstumsprognosen zu sichern.

### 1.2 Mikromontage im Spannungsfeld der Kleinserie

Für eine wirtschaftliche Serienfertigung hybrider Mikrosysteme müssen vorrangig Lösungen für den letzten Prozessschritt der Mikroproduktionskette – die sog. Mikromontage (vgl. auch Abschnitt 2.2.1) – erarbeitet werden. Ziel hierbei ist, die überdurchschnittlich hohen Montagekosten in der Mikrosystemtechnik mit einem Anteil von bis zu 80% der gesamten Produktionskosten zu reduzieren (KOELEMEIJER CHOLLET & JACOT 1999). Die in Abschnitt 1.1 aufgeführten Umsetzungshemmnissen der Mikroproduktionstechnik sind somit auch für die Mikromontage von besonderer Relevanz.

Die voranschreitende Komplexität und Miniaturisierung der Mikrosysteme wirft zunächst die Frage auf, wie diese – untergliedert in die Teilprozesse der Montage – grundsätzlich

- schonend zu handhaben,
- präzise zu positionieren,
- prozesssicher zu fügen bzw.
- hinsichtlich ihrer Funktion zu prüfen sind.

Die Forschungsaktivitäten in der Handhabungs- und Greiftechnik fokussieren sich auf das minimale und homogene Aufbringen von Greif- und Haltekräften, um die Oberflächen und fragilen Strukturen der Mikrosysteme so gering als möglich zu beladen (GRUTZECK 2000, EIJK ET AL. 2003, SCHILP 2006). Die Lösungen für die minimaltaktile bzw. vollständig berührungslose Handhabung kleiner Bauteile (SCHILP 2006), für den durchgängig berührungslosen Material-

fluss (ZÄH ET AL. 2003A) und für den industriellen Einsatz von berührungslosen Handhabungssystemen (BINDER 2004) zeigen die erfolgreiche, systemtechnische Umsetzung dieser Aufgabenstellung. Bei taktilen Handhabungs- und Greifsystemen sind für eine geringe Bauteilbelastung allerdings nachgiebige Greifstrukturen oder präzise Regelkreise zur sensorischen Überwachung und Nachjustierung der Greif- und Fügekräfte notwendig (ZÖPPIG 1998, SCHLICK & ZÜHLKE 2003). Durch Standardisierungs- und Modularisierungsansätze wie die Entwicklung eines modularen Greiferbaukastens (HOFMANN ET AL. 2002) existieren erste Ansätze, um diese teilweise komplexen Handhabungs- und Greiftechnologien auch in Mikromontagesysteme für kleine und mittlere Stückzahlen wirtschaftlich zu integrieren.

Aufbauend auf der Entwicklung von Positionierstrategien für die Mikromontage (HÖHN 2001, vgl. auch Abschnitt 2.2.3) wurden auf die jeweilige Strategie angepasste Werkzeugsysteme mit integrierten, optischen Sensorkomponenten entwickelt. Durch diese Systeme wird eine hochgenaue geregelte Relativpositionierung der Bauteile über dem Montageort erreicht (HÖHN & JACOB 2001, JACOB 2002). Die Montagegenauigkeit kann zudem durch die aktive Schwingungskompensation im Montagewerkzeug (REINHART & HÖHN 1999) und dem Einsatz von hochgenauen Algorithmen und Methoden der Bildverarbeitung (POTSAID ET AL. 2002) weiter gesteigert werden. Eine sensorbasierte und flexible Werkzeugarchitektur über automatisiert wechselbare Greiferschnittstellen (SCHILP ET AL. 2003) ermöglicht einen universellen und damit wirtschaftlichen Einsatz der meist sehr kostenintensiven Sensorkomponenten.

Die Mikrofügetechniken lassen sich analog zu den bekannten Fügeprozessen nach DIN 8593 TEIL 0 in die Hauptverfahren Kleben (Bonden), Löten und Schweißen einteilen. Exemplarische Schwerpunkte in der Entwicklung von Mikrofügeverfahren ist das Dosieren und Dispensieren von Klebstoffen und Lotmaterial (SCHILP 2001, DILTHEY UND MÖLLER 2001) und die Neuentwicklung bzw. Adaption von Schweißverfahren für die Mikrosystemtechnik (BROCKMANN ET AL. 2002, DILTHEY & DORFMÜLLER 2006, BAERTLE ET AL. 2006). Unabhängig von der eingesetzten Fügetechnologie steht jedoch die prozesstechnische Absicherung und damit einhergehend die Entwicklung von Messverfahren und deren technische Umsetzung im Fokus der aktuellen Forschungsaktivitäten (BMBF 2004, WEULE ET AL. 2001). Ziel ist es hierbei, die notwendigen Überwachungsparameter zunächst in ausreichender Qualität zu erfassen und geeignete Regelstrategien für die Fügeprozesse zu entwickeln.

Übergreifend über alle Teilprozesse verhindert die limitierte Flexibilität der teils sehr komplexen Anlagenkomponenten eine kostengünstige Montage in Klein- und Mittelserien. Schon mit Beginn des Wachstums der Mikrosystemtechnik wurde die eingeschränkte Produkt-, Stückzahl- und Prozessflexibilität der eingesetzten Mikromontageanlagen als Hemmnis für die erfolgreiche Marktdurchdringung von hybriden Mikrosystemen erkannt und dafür passende Lösungsansätze entwickelt (WESTKÄMPER 2003). Folgende zwei Entwicklungstendenzen sind hierbei zu unterscheiden:

- Flexible Automatisierungskonzepte für die Montage in kleinen Stückzahlen mit 2.000 Einheiten/a bis 50.000 Einheiten/a (10 Einheiten/d bis 250 Einheiten/d) und mittleren Stückzahlen mit 50.000 Einheiten/a bis 100.000 Einheiten/a (250 Einheiten/d bis 500 Einheiten/d) (Einteilung nach THOBEN 1999)
- Ergonomische, manuelle Mikromontagesysteme für die Einzelfertigung (kleiner 2.000 Einheiten/a entspricht kleiner 10 Einheiten/d)

Der Schwerpunkt in der Entwicklung von flexiblen, automatisierten Mikromontagesystemen liegt dabei in der Standardisierung und Modularisierung der Bauteilzuführung, von Montagewerkzeugen, von gesamten Anlagenkomponenten und der Steuerungstechnik (vgl. Abschnitt 2.2.2) (HOFMANN ET AL. 2003; DIN 32561). Die dadurch erreichte Austauschbarkeit von Modulen führt einerseits dazu, dass Mikromontagesysteme Stückzahl- und Variantenflexibel auf andere Produkte unter Beibehaltung der Prozesstechnik angepasst werden können. Andererseits können dadurch bei sog. hybriden Systemarchitekturen auch Montageanlagen prozessflexibel um zusätzliche Füge- und Fertigungstechnologien bis hin zu sog. durchgängigen Produktionsketten erweitert werden (KIM ET AL. 2002B). Neben diesen Modularisierungsansätzen gilt es zur weiteren Auslastungssteigerung von automatisierten Mikromontageanlagen, die Nebenzeiten für Rüst- und Inbetriebnahmeumfänge für das Nachfolgeprodukt durch geeignete Programmiermethoden und Einrichtverfahren zu reduzieren (QUAID & RIZZI 2000, BENGEL ET AL. 2003). Damit kann der wirtschaftlich rentable Stückzahlbereich für die automatisierte Mikromontage weiter in die Richtung kleiner Stückzahlen verschoben und damit der hohe Anteil manueller Montagetätigkeiten in der Industrie reduziert werden.

Die Entwicklung von manuellen Mikromontagearbeitsplätzen für die Einzelfertigung fokussiert sich hauptsächlich auf ergonomische Gesichtspunkte. Damit können trotz manueller Montagetätigkeit, welche vom Bediener höchste Kon-

zentration und Präzision abverlangt, längere Bedienzeiten der Anlage ermöglicht werden. Unterstützt werden die manuellen Montagevorgänge durch die Integration von speziellen Werkzeugen und Hilfssystemen am Montagearbeitsplatz, z. B. von Pinzetten oder Kinematiksystemen für die Handhabung von Mikrobauteilen oder von Stereomikroskopen für die Beobachtung des Montagevorgangs (FATIKOW 2000). Die Einbindung des Menschen in die Prozessumgebung der Mikrosystemtechnik stellt aber wegen der hohen Sauberkeits- und Genauigkeitsanforderungen weiterhin eine große Hürde dar. Aus den bei minimierten Bauteilgrößen geltenden Kraftverhältnissen, den sog. Scaling-effects (vgl. Abschnitt 2.2.3), ergeben sich wegen eines ungewohnten physikalischen Bauteilverhaltens in der Handhabung von Mikrobauteilen störende Einflüsse auf den Montageprozess. Zudem behindern Schutzmaßnahmen, wie die Kapselung der Prozessumgebung oder spezielle Schutzkleidung des Bedieners, eine direkte, manuelle Ausführung der Montageumfänge. Die Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie (vgl. Abschnitt 2.4) gilt hier als Erfolg versprechender Ansatz für die manuelle Mikromontage, da die strikte Trennung von Mensch und Prozesstechnik bei gleichzeitig realitätsnaher (Fern-)Bedienung der Montageanlage durch den Menschen technisch umsetzbar ist.

Die beiden dargestellten Entwicklungstendenzen fokussieren sich also darauf, eine wirtschaftliche Kleinserienmontage sowohl über Stückzahl-, varianten- und prozessflexible Montagesysteme bzw. -arbeitsplätze als auch über eine möglichst hohe Anlagen- bzw. Arbeitsplatzauslastung zu erreichen. Obwohl bereits einige dieser flexiblen, automatisierten Systemlösungen für den industriellen Einsatz am Markt erhältlich sind, ist der Anteil der manuellen Tätigkeiten in der Mikromontage in mittleren Stückzahlen immer noch sehr hoch (FATIKOW 2000). Ein Grund hierfür ist, dass das Wissen über eine effiziente Serienproduktion in den (meist) kleinen Mikrosystemtechnik-Unternehmen nicht oder nur unzureichend vorhanden ist (WALLRABE & Mohr 2003). Analog zum Trend in der Mikroproduktionstechnik können damit besonders auch in der Mikromontage weitere Kosteneinsparungen durch die effiziente Kombination von manuellen und automatisierten Tätigkeiten unter Einsatz von technischer Intelligenz in der Anlagentechnik erzielt werden.

### 1.3 Motivation und Zielsetzung

Weitere wichtige und bislang noch wenig betrachtete Herausforderungen für die kostengünstige Mikromontage stellen die unzureichende Planung und das mangelnde übergreifende Wissen in der Produkt- und Prozessentwicklung bei den meist kleinen Unternehmen in der Mikrosystemtechnik dar (WICHT ET AL. 2001B). Die Konzentration auf die reine Produktentwicklung, die mangelnde Kenntnis über serientauglichen Fertigungs- und Montagetechnologien und die mangelnde Berücksichtigung des Concurrent-Engineering-Gedankens behindern eine schnelle und erfolgreiche Umsetzung einer Produktidee in ein serienreifes und wirtschaftlich produzierbares Mikrosystem (BAZU 2004). Standardisierte Entwicklungs- und Konstruktionssysteme für miniaturisierte Komponenten (WESTKÄMPER 2001B) sollen hierzu systematisch ein mechatronisches Entwicklungsvorgehen (REINHART ET AL. 2001) unter Einbindung der speziellen Produktionsanforderungen unterstützen und zu einer kostengünstigen Fertigung führen.

Ein wichtiger Bestandteil des Produkterfolgs für ein Unternehmen stellt in diesem Zusammenhang die unternehmensinterne Know-how Sicherung der zur Produktherstellung notwendigen Fertigungs- und Montagetechnologien über alle Phasen des Produktlebenszyklus dar. Obwohl der Entwicklungsschwerpunkt und die Kernkompetenz bei den meisten MST-Unternehmen in der Produktgestaltung und -funktionalität liegt, wird bei jeder Neuentwicklung Prozesswissen in Fertigungs- und Montagetechnologien aufgebaut. Dies geschieht i. A. während der manuellen Herstellung der Prototypen, kann dann – einen Markterfolg des Produkts vorausgesetzt – aber nur unzureichend für die Entwicklung von Mikromontagesystemen für die Serienfertigung genutzt werden. Deutlich wird das Potenzial einer durchgängigen Sicherung und Nutzung des Prozesswissens bei einer detaillierten Betrachtung des Produktlebenszyklus eines hybriden Mikrosystems (siehe Abbildung 2), welcher sich allgemein in folgende Phasen (nach LINDEMANN 2005) gliedert:

Während der Entwicklungsphase des Mikrosystems werden durch den Prototypenaufbau erste Erfahrungen in der manuellen Herstellung gesammelt, welche auch in eine fertigungs- und montagegerechte Produkt- bzw. Montagearbeitsplatzgestaltung für die Serienfertigung einfließen sollten. Dies geschieht jedoch aktuell nur in einem unzureichenden Maß. Die manuellen Laborarbeitsplätze werden dann in der Einführungsphase i. d. R. für die Produktion in Einzelfertigung weiterverwendet, da eine Investition in eigene Produktionseinrichtungen wegen der geringen Stückzahlen mit Losgrößen kleiner 10 Einheiten/d (ent-

spricht 2.000 Einheiten/a) betriebsbedingt nicht notwendig und wegen des meist unsicheren Markterfolgs auch wirtschaftlich nicht vertretbar ist. Die Einführungsphase ist beendet, sobald bei stetig ansteigenden Stückzahlen der Break-Even erreicht wird, d. h. sobald das hybride Mikrosystem gewinnbringend hergestellt und vertrieben werden kann.

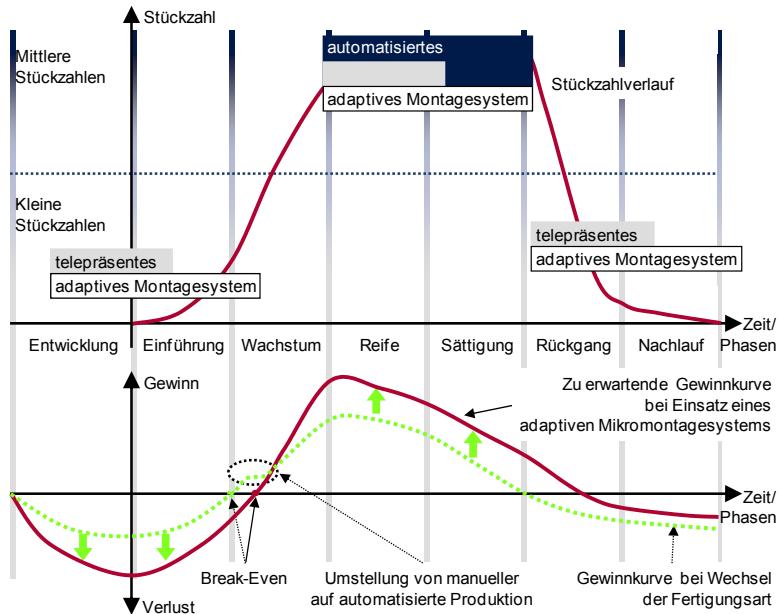


Abbildung 2: Zielsetzung: Entwicklung eines an die Phasen des Produktlebenszyklus anpassungsfähigen, adaptiven Mikromontagesystems auf Basis der Telepräsenztechnologie (oben) und die dadurch zu erwartende qualitative Veränderung des Gewinns (unten)

Als Kennzeichen der nachfolgenden Wachstumsphase gilt neben der Gewinnerzielung das progressive Wachstum der Stückzahl- und Umsatzkurve des Produkts. Ab einer produktabhängigen Grenzstückzahl muss zudem die Entscheidung gefällt werden, ob für die weiteren Produktphasen weiterhin auf manuellen oder auf teilautomatisierten bzw. automatisierten Anlagensystemen produziert wird. Sofern sich die Maximalstückzahl nicht weit oberhalb der Grenze der Einzelserie mit Losgrößen kleiner 10 Einheiten/d (entspricht

2.000 Einheiten/a) entwickelt, kann das Produkt auch in den folgenden Lebensphasen auf dem bereits vorhandenen Arbeitsplatz montiert werden. Fällt die Entscheidung jedoch für eine teilautomatisierte oder automatisierte Herstellung, werden weitere Investitionen in neue Anlagentechnik für die Klein- und Mittelserie notwendig, die den Gewinn zunächst reduzieren (siehe Gewinnkurve (gestrichelte Linie) in Abbildung 2). Zudem wird in dieser Phase i. d. R. die Entwicklung des Montagesystems an Fremdfirmen vergeben, da die Unternehmen der Mikrosystemtechnik meist auf reine Produktentwicklungsaufgaben ausgerichtet sind. Die Übertragung des Prozesswissens aus dem (manuellem) Laborbetrieb in die (automatisierte) Serienproduktion findet somit meist nur unzureichend statt und muss letztendlich für den Laborbetrieb und für die Serienfertigung doppelt aufgebaut werden.

Die Reifephase als die profitabelste Phase des Produktlebenszyklus ist geprägt durch eine anhaltende aber degressive Stückzahl- und Umsatzsteigerung, gefolgt von der sog. Sättigungsphase, sobald das Marktwachstum stagniert. In diesen Phasen steigt die Anlagenauslastung zunächst stetig an bzw. bleibt konstant. Durch eine marktbedingte degressive Preispolitik schrumpfen allerdings die erzielten Gewinne. Am Ende der Sättigungsphase werden i. d. R. durch eine Produktoptimierung bzw. -neupositionierung neue Kunden bzw. Anwendungsfelder erschlossen. Sofern die Montageeinrichtungen varianten- und Stückzahlflexibel ausgelegt sind, könnten die neuen Produktvarianten parallel zu den bisherigen kostengünstig auf dem gleichen System hergestellt werden. Dies würde die Gewinnentwicklung nachhaltig positiv beeinflussen (nicht dargestellt in Abbildung 2).

Die nachfolgende Rückgangsphase ist geprägt durch einen stark negativen Stückzahl-, Umsatz- und Gewinnentwicklung, verursacht durch geringere Einnahmen pro Produkt und gebundenes Kapital in Anlagentechnik und Beständen. Bei einer automatisierten Serienherstellung von Mikrosystemen erfolgt in dieser Phase die Umstellung auf manuelle Montagevorgänge, da die Rüst- und Inbetriebnahmeaufwände der automatisierten Anlage verglichen mit den nun produzierten Stückzahlen bzw. der geringeren Anlagenauslastung i. A. nicht mehr rentabel sind. Nach der Einstellung des Produkts fällt in der Nachlaufphase die Stückzahl dann sehr langsam ab. Für die Ersatzteilversorgung müssen hier noch kleinste Mengen produziert werden. Der monetäre Gesamterfolg des Produkts muss in dieser Phase noch weiter nach unten korrigiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine Anlagenarchitektur zu entwickeln, welche die bekannten Flexibilitätsmerkmale bzgl. Varianten, Produkttypen und Stückzahlen aufweist und an die Phasen des Produktlebenszyklus adaptierbar ist. Für diese Anpassung an den Produktlebenszyklus muss das Anlagensystem systemtechnisch auf die Betriebsarten:

- manuell und
- automatisiert.

und auf einen einfachen und schnellen Wechsel zwischen diesen Betriebsarten ausgelegt sein. Das Mikromontagesystem umfasst dabei die Bestandteile für die Teilprozesse Bauteilversorgung, Handhabung (nach VDI 2860), Fügen (nach DIN 8580, DIN 8593 Teil 0) und Qualitätssicherung. Für jeden Betriebsmodus existieren bereits Systemlösungen (vgl. Kapitel 3), die jedoch unterschiedliche Anforderungscharakteristiken aufweisen. Ausgehend von einer allgemeinen Entwicklungssystematik und systemergonomischen Gesichtspunkten sind diese Methoden und Technologien auf ein anpassungsfähiges Mensch-Maschine-System auf Basis der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie (vgl. Abschnitt 2.4) zu adaptieren.

Mit dem zu entwickelnden adaptiven Mikromontagesystem kann im Vergleich zu herkömmlichen Montagestrategien von Mikrosystemen, wie z. B. durch einem Wechsel des Anlagensystems während der Wachstumsphase, eine Ertragsmaximierung über den Produktlebenszyklus hinweg erzielt werden. Zwar wird die Gewinnkurve in der Entwicklungsphase durch die größeren Investitionen in das intelligente Mensch-Maschine-System für den manuellen Laborbetrieb zunächst absinken und der Break-Even sich verzögern (siehe durchgezogene Linie bei Gewinnkurve in Abbildung 2). Durch den „gewinnbringenden“ Wissenstransfer in die Produktion und die erreichte Flexibilität des Anlagensystems wird die Gewinnkurve in der Wachstumsphase umso stärker ansteigen. Aufgrund der neuen Betriebsflexibilität und Reaktionsfähigkeit des Anlagensystems fällt die Gewinnkurve in den letzten beiden Phasen den PLCs durch Skalierungseffekte und Migrationsstrategien weniger stark ab. D. h., die relativen Produktionskosten fallen durch die dann mögliche Auslastung des Anlagensystems mit Nachfolge- oder Neuprodukten und durch die Wahl eines optimalen Betriebsmodus geringer aus.

### 1.4 Vorgehensweise

Im Sinne einer detaillierten Aufgabenanalyse werden ausgehend von der oben beschriebenen Ausgangssituation und Zielsetzung im Folgenden die Grundlagen und verwendeten Basistechnologien für die Aufgabenerfüllung detailliert. Anschließend erfolgt eine Vorstellung und Bewertung analoger oder konkurrierender Entwicklungsansätze im Stand der Forschung und Technik. In der Konzeption und Entwicklungsphase der Arbeit werden dann die erarbeiteten Methoden und Lösungen vorgestellt, durch welche die Zielstellung dieser Arbeit erreicht wird. Eine exemplarische Umsetzung und Verifikation der Einsatztauglichkeit der erarbeiteten Lösungen runden die Arbeit ab (vgl. Abbildung 3).

Zunächst werden dazu in Kapitel 2 die relevanten allgemeinen Grundlagen und Technologien beschrieben und hinsichtlich der Aufgabenstellung bewertet. Neben einem einheitlichen Verständnis über die notwendigen Begrifflichkeiten soll hier das Leistungspotenzial und die Einsatzfähigkeit der beschriebenen Basistechnologien aufgezeigt werden. Die Ergebnisse dieses Kapitels werden in einem Anforderungskatalog und einem Bewertungsschema für adaptive Mikromontagesysteme zusammengefasst.

Kapitel 3 befasst sich mit der Beschreibung und Analyse bestehender Anlagensysteme für die Mikromontage. Auf Basis dieser Bewertungsergebnisse wird der detaillierte Handlungsbedarf abgeleitet und die Aufgabenstellung und Zielsetzung präzisiert.

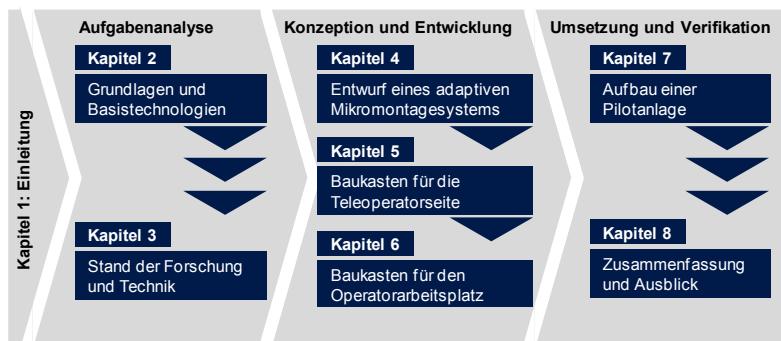


Abbildung 3: Struktur der Arbeit

Im ersten Schritt der Konzeptions- und Entwicklungsphase werden in Kapitel 4 die Grundfunktionen eines adaptiven Mikromontagesystems erarbeitet und bewertet. Ziel dieser Phase ist die Entwicklung einer anpassungsfähigen Montagestrategie. Hier werden die notwendigen Grundmodule eines adaptiven Anlagenkonzepts und die unterschiedlichen Betriebszustände bzw. die Überführung von einem Zustand in den nächsten festgelegt. Abschließend soll auch die Mensch-Maschine-Interaktion während der Bedienung eines adaptiven Montagesystems konzeptioniert werden.

Auf Basis der vorgestellten Grundfunktionen des Mikromontagesystems werden in Kapitel 5 Gestaltungsrichtlinien für anpassungsfähige Funktionsmodule der Teleoperatorseite und in Kapitel 6 diejenigen der Operatorseite festgelegt. Diese sind so zu definieren, dass neue Anlagenmodule, welche nach diesen Richtlinien entwickelt wurden, einfach in das Anlagensystem zu integrieren sind.

In Kapitel 7 werden anhand dieser Gestaltungsrichtlinien entwickelte Funktionsmodule umgesetzt und in eine Pilotanlage integriert. In exemplarischen Montageanwendungen werden die Anlagenmodule und das Gesamtsystem nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und Überprüfung der Zielerreichung in Kapitel 8 und zeigt weiteres Forschungs- und Entwicklungspotenzial auf.



## 2 Grundlagen und Basistechnologien

### 2.1 Überblick

Für die Entwicklung einer adaptiven Mikromontage-Anlagenarchitektur, welche neben den herkömmlichen Flexibilitätsmerkmalen bzgl. Varianten, Produkttypen und Stückzahlen auch eine Anpassbarkeit an die Phasen des Produktlebenszyklus eines Mikrosystems aufweisen soll, werden in Kapitel 2 die verwendeten Grundlagen und Basistechnologien zusammengefasst und analysiert. In einer detaillierteren Betrachtung der angewandten Methoden und Technologien in der Montage hybrider Mikrosysteme als Anwendungsgebiet dieser Arbeit sind zunächst die Defizite bisheriger Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bzw. zukünftige Handlungsfelder für die Mikromontage zu erkennen. Da die angestrebte Systemanpassungsfähigkeit auf einer intensiven Mensch-Maschine-Interaktion basiert, werden darauf aufbauend grundlegende systemergonomische Anforderungen für die Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen und für die intelligente Automatisierungstechnik abgeleitet. Eine spezielle Form der Mensch-Maschine-Interaktion stellt die Telepräsenz- und Teleaktion dar, welche als technologische Basis der adaptiven Mikromontagearchitektur detailliert beschrieben wird. Da speziell der Wissenstransfer vom Bediener auf das Maschinensystem und umgekehrt als ein wichtiger Bestandteil der Montagestrategie gilt, folgt eine Analyse der Programmier- und Inbetriebnahmeverfahren von Montageanlagen und -kinematiken. Aus der Analyse der Basistechnologien werden als Ergebnis des Kapitels 2 abschließend die Anforderungen und ein Bewertungsschema für adaptive Mikromontagesysteme abgeleitet.

### 2.2 Mikromontage – eine Schlüsseltechnologie

#### 2.2.1 Definition

Durch das enorme Potenzial der Miniaturisierung und Funktionsintegration als Kerncharakteristikum zukunftsweisender, innovativer Produkte gilt die Mikrosystemtechnik als Zukunftstechnologie. Sowohl der Markterfolg von Mikrosystemen und als auch deren kostengünstige Fertigung und Montage beeinflussen dabei die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in immer größeren Maße (vgl. Kapitel 1, BMBF 2004). Anhand der eingesetzten Materialien und der dadurch

notwendigen Produktionstechnologien lassen sich Mikrosysteme in zwei Gruppen unterteilen:

Mit Fertigungsverfahren aus der Mikromechanik und Mikroelektronik werden monolithische Mikrosysteme hergestellt, die meist aus dem Grundwerkstoff Silizium bestehen und eine dreidimensionale Schichtstruktur aufweisen (MENZ & Mohr 1997). Die am weitest verbreitete Gruppe monolithischer Mikrosysteme sind sog. „**micro-electro-mechanical systems**“ (MEMS) (BRYCEK ET AL. 1994). Die Herstellung im Batch, d. h. die parallele Bearbeitung von mehreren Mikrosystemen auf einem Bauteilträger, ermöglicht eine wirtschaftliche Fertigung in großen Stückzahlen (FISCHER 2000, S. 120). Die Verwendung neuer Materialien in monolithischen Mikrosystemen bedingt einerseits eine höhere Anzahl von Bearbeitungsschritten und andererseits neue, zusätzliche Sonderprozesse in der Produktionskette (KERGEL ET AL. 1995). Montageaspekte in der Herstellung von monolithischen Mikrosystemen beschränken sich meist auf das Einhauen und elektrische Kontaktieren des fertigen Mikrobauteils (HACKE 1987).

Das eigentliche Potenzial der Miniaturisierung und Funktionsintegration wird jedoch erst durch die Kombination von einzelnen Komponenten zu einem hybriden Mikrosystem erreicht. Die Komponenten sind dabei sowohl hinsichtlich des Materials als auch der Form spezifisch an die jeweilige Teifunktion des Gesamtsystems angepasst. Neben den aktuell am stärksten wachsenden Markt der BioMEMS mit integrierten mikrofluidischen Funktionen (MOUNIER & PROVENCE 2002; DUCRÉ & ZENGERLE 2002), sind hier z. B. sog. „**micro-opto-electro-mechanical systems**“ (MOEMS) zu nennen, in denen neben elektrischen und mechanischen auch optische Funktionen, wie Strahlführung und Strahlformung, integriert sind (GERLACH ET AL. 2001). Durch die Verwendung von funktionsoptimierten Materialien in hybriden Mikrosystemen wurden neben neuen Fertigungstechnologien für die Massenfertigung wie die LIGA-Technik (EHRFELD ET AL. 2001), das Mikroheißprägen (GERLACH ET AL. 2001) sowie das Mikrospritzgießen (MICHAELI 1998) auch zunehmend flexible Verfahren zur Fertigung in kleinen und mittleren Stückzahlen notwendig. Exemplarisch sind hier die Mikrostereolithographie (TILLE ET AL. 1999), die Laserstrukturierung (GILLNER 2000) sowie die spanende Mikrobearbeitung (WEINERT ET AL. 1998) zu nennen. Der entscheidende Prozessschritt ist jedoch die abschließende Montage des Gesamtsystems aus den mit unterschiedlichen Verfahren hergestellten Subkomponenten. Hierbei lassen sich serielle Positionier- und Fügeprozesse, welche auch unter dem Begriff Mikromontage zusammengefasst werden, und parallele Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik bei halbleiterbasierten, hybriden Mikrosyste-

men unterscheiden. Die Abgrenzung der Mikromontage zur Aufbau- und Verbindungstechnik verläuft aber fließend (NIENHAUS 1999, siehe Abbildung 4) und ist damit nicht eindeutig bestimmt. Analog zu dieser Einordnung und den einschlägigen Normen entsprechend (vgl. DIN 32564-2; VDI 2860; DIN 8580; DIN 8593 TEIL 0) werden in dieser Arbeit unter dem Begriff Mikromontage alle Handhabungs- und Fügeprozesse für die serielle Fertigung von hybriden Mikrosystemen verstanden.

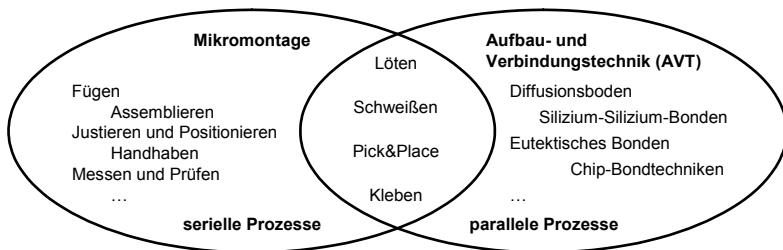


Abbildung 4: Abgrenzung der Mikromontage gegenüber den Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT) (nach Nienhaus 1999)

## 2.2.2 Wirtschaftliche Herausforderungen

Als Kerntechnologie für die Herstellung hybrider Mikrosysteme steht die Mikromontage vor einer Vielfalt von wirtschaftlichen und technologischen Herausforderungen. Diese sind in den besonderen Marktbedingungen der hybriden Mikrosysteme (vgl. Abschnitt 1.2) und in der steigenden Komplexität bei gleichzeitig voranschreitender Miniaturisierung der Produkte begründet und führen zu einer Reihe von spezifischen Anforderungen, Methoden und Technologien für die Mikromontage, die im Folgenden dargestellt werden:

In wirtschaftlicher Hinsicht wurde die Mikromontage besonders für den Bereich kleiner Stückzahlen (2.000 Einheiten/a bis 50.000 Einheiten/a) und mittlerer Stückzahlen (50.000 Einheiten/a bis 100.000 Einheiten/a) schon frühzeitig als Barriere erkannt (vgl. Abschnitt 1.2), welche einen durchschlagenden Markterfolg der hybriden Mikrosysteme mangels ausreichend flexibler Produktionseinrichtungen im industriellen Einsatz verhindert (WICHT 1999; WESTKÄMPFER 2003). Um die anteilig hohen Kosten der Montage an der Produktion von hybriden Mikrosystemen zu senken, wurden und werden hierbei produkt- wie produk-

tionsseitig Normierungs- bzw. Modularisierungsansätze verfolgt (GENGENBACH ET AL. 2003).

Produktseitig stand in den vergangenen Jahren die Entwicklung und Umsetzung eines modularen Baukastensystems für Mikrosysteme im Vordergrund, in dem sich die Gesamtfunktionalität eines hybriden Mikrosystems aus der flexiblen Kombination von unterschiedlichen Funktionsbausteinen in einer standardisierten Verpackung (einem sog. Package) ergibt (AZADEH ET AL. 2002, SCHÜLE ET AL. 2001, PAHLKE 2001). Die Kosteneinsparung in der Fertigung und Montage hybrider Mikrosysteme ergibt sich damit aus der Reduzierung der Anzahl unterschiedlicher Komponenten bzw. Varianten und aus der Standardisierung von Füge- und Montageprozessen in der Montage der Packages zu einem Gesamtsystem.

Die modulare Gestaltung der Fertigungs- und Montagesysteme bzw. ihrer Teilsysteme wird als zweiter Ansatz bereits seit einigen Jahren intensiv bei der Entwicklung von Mikromontagesystemen in unterschiedliche Richtungen verfolgt. Ziel hierbei ist, eine möglichst hohe Anlagenflexibilität und -verfügbarkeit bei gleichzeitig wirtschaftlich darstellbaren Investitionskosten zu erzielen (VDI/VDE-IT 1999). Zu unterscheiden sind hier folgende methodische und technologische Ansätze zur Steigerung der Produkt- bzw. Variantenflexibilität, der Stückzahlflexibilität und der Prozessflexibilität der Anlagensysteme (vgl. Abschnitt 1.2):

- Eine Vielzahl von Forschungstätigkeiten fokussiert sich dabei methodisch auf die Modularisierung von Teifunktionen bzw. von Teilsystemen einer Mikromontageanlage und deren Kombination über standardisierte Schnittstellen. Für den produkt- und variantenflexiblen Einsatz von modularen Werkzeugsystemen für die Mikromontage wurde in Anlehnung an die bekannten Werkzeugwechselsysteme von Industrierobotern eine modulare Greiferschnittstelle normiert (DIN 32565) und bereits in einem industriell einsetzbaren System umgesetzt (HOCH 2003). Auf Basis von Montageszenarien und Positionierstrategien (s. u.) schlägt HÖHN (2001) unterschiedliche modulare Konzepte für sensorbasierte Werkzeugsysteme zur automatisierten Mikromontage vor. Zielsetzung dieser Modularisierungsstrategie hierbei ist die universelle Verwendung von kostenintensiven Sensor- und Aktorkomponenten für stückzahlflexible bzw. produkt- und variantenflexible Montageprozesse. Neben den Werkzeugsystemen wurde auch die Materialversorgung über die Normierung von Werkstückträgern

(DIN 32561) standardisiert, um die Materialbereitstellungs- und Beschickungssysteme für unterschiedliche Fertigungs- und Montageprozesse zu vereinheitlichen.

- Erste Ideen zur Modularisierung von Mikromontagesystemen sind aus dem Gebiet der Feinwerktechnik von DIERSELHUIS & KOLKMAN (1999) und aus der „agile assembly architecture“ von RIZZI ET AL. (1997) bzw. dem „rekonfigurierbaren Mikromontagesystem“ von GAUGEL et al. (2004) bekannt. Im Vordergrund dieser Entwicklungen steht eine schneller Wechsel zwischen unterschiedlichen Prozesstechnologien für die Montage verschiedener hybrider Mikrosysteme bei kurzen Rüstzeiten der Anlage. Neben der flexiblen Hardwarearchitektur der Anlagen, welche durch die einfache Austauschbarkeit von kompletten Teilsystemen wie Werkzeugsystemen und Sensor- und Aktorkomponenten gekennzeichnet ist, steht besonders auch die einfache und schnelle Programmierung und Inbetriebnahme der Mikromontageanlage im Fokus der Entwicklung (vgl. auch Abschnitt 2.5, QUAID & Rizzi 2000, BENGEL ET AL. 2003). Diese Anlagensysteme stellen die technische Basis für die aktuelle Entwicklung sog. Mikroproduktionsnetzwerke dar, in denen kleine Firmen aus der Mikrosystemtechnik ihre Produkte zentral auf einem flexibel konfigurierbaren Mikromontagesystem fremdfertigen können (DICKERHOF & Gengenbach 2006).
- Ein aktueller technologischer Ansatz zur Steigerung der Prozessflexibilität ist die Entwicklung von durchgängigen Mikroproduktionsketten und deren Abbildung in integrierten Anlagensystemen mit niedrigen Investitionskosten. Eine dieser integrierenden Technologien stellt die Kombination von spezialisierten aber modularen Fertigungs- und Montagesystemen zu sog. Mikroproduktionsclustern dar. Mit diesem Analogon zur Halbleiterindustrie wird eine flexible Fertigungs- und Montageprozessverkettung ermöglicht, welche auf produktabhängige Veränderungen wie auch auf Neuentwicklungen in der Prozesstechnik reagieren kann (WESTKÄMPER 2001A). Eine andere Technologie ist die Entwicklung von universell einsetzbaren Mikroproduktionszentren, in denen unterschiedliche Produktionsketten durch eine Kombination von verschiedenen Fertigungs- und Montageprozessen in einer Anlage integriert werden (ZÄH & Franzkowiak 2006).

- Adaptive Lösungsansätze, um Anlagensysteme oder spezielle Teilkomponenten für ein hybrides Mikrosystem flexibel über einen gesamten Produktlebenszyklus einzusetzen, sind derzeit nur für Teilsysteme vorhanden. So entwickelte JACOB (2002) ein hochspezialisiertes Optiksystem für die automatisierte Flip-chip-Montage in kleinen und mittleren Stückzahlen, welches auch für den Laborbetrieb in Einzelfertigung eingesetzt werden kann.

### 2.2.3 Technologische Herausforderungen

Die steigende Produktkomplexität und die voranschreitende Miniaturisierung der Mikrosysteme führen zu erheblichen technologischen Herausforderungen in der Mikromontage. Die Kernproblematik vor allem für die manuelle, aber auch für die automatisierte Montage von hybriden Mikrosystemen stellt die hochgenaue Positionierung der Montagepartner mit Montagetoleranzen von kleiner 25 µm und minimalen Bauteilgrößen von bis zu 0,1 mm dar (HÖHN 2001). Sowohl die erforderliche Präzision als auch die geringen Bauteilabmessungen erfordern daher sehr genaue Greif- und Positioniertechniken und eine sehr fein abgestimmte Dosierung der Greif- und Fügekräfte, um die zulässigen, mechanischen Bauteilbelastungen und Flächenpressungen der Mikrobauteile nicht zu überschreiten und die vorgegebenen Prozessgenauigkeiten und -parameter einzuhalten.

Die Ausrichtung der Mikrobauteile erfolgt dabei über Referenzmarken wie die Teileaußenkanten bzw. Funktionsstrukturen auf den Bauteilen oder aber über spezielle Positioniermarken, die eigens zur Positionsdetektierung der Bauteile aufgebracht wurden. (VIKRAMADITYA & NELSON 1997). Anhand der Position bzw. der Sichtbarkeit der Referenzmarken während des Montageprozesses definiert HÖHN (2001, S. 41 ff) drei unterschiedliche Montageszenarien, in die sich alle Montagekonstellationen einordnen lassen (siehe Abbildung 5).

Die Positionsbestimmung und Ausrichtung der Referenzmarken zueinander erfolgt für jedes Montageszenario entweder über direkte oder über indirekte Relativmessverfahren in einem geregelten Feinpositionierprozess über dem Fügeort. Bei der direkten Relativmessung werden die Referenzstrukturen beider Fügepartner in der Justageposition gleichzeitig aufgenommen.

Für das Montageszenario 1. und 2. Art ist daher für die direkte Messung die geometrische Höhendifferenz  $\Delta z$  der Fügepartner zueinander, maximal auf die Höhe der Schärfentiefe  $\Delta \zeta$  der Kamera begrenzt. Die geometrische Höhendiffe-

renz  $\Delta z$  ist als Summe aus der Bauteilhöhe  $\Delta h$  und der Länge der Fügebewegung  $\Delta l$  und die Schärfentiefe  $\Delta \zeta$  als Längendifferenz definiert, in welcher Objekte scharf abgebildet werden. Diese Beschränkung der Höhendifferenz der Fügepartner  $\Delta z$  gilt für die indirekte Relativmessung nicht, da die Referenzstrukturen von Bauteil und Substrat getrennt voneinander gemessen werden. I. d. R. übersteigt auch schon die aus Sicherheitsgründen vorgegebene Länge der Fügebewegung  $\Delta l$  die systembedingt geringe Schärfentiefe  $\Delta \zeta$  des Optiksystems. Damit ist i. A. bei der indirekten Lagemessung ein Ausgleich der Höhendifferenz durch eine korrespondierende Umfokussierbewegung der Kamera erforderlich.

Für jede Kombination aus Montageszenario und Messverfahren ergeben sich nach HÖHN (2001, S. 46 ff) mehrere Positionierstrategien, die sich über die Kriterien

- Messfolge der Fügepartner bzw.
- geregelte oder gesteuerte Relativpositionierung

differenzieren (siehe Abbildung 5: exemplarische Darstellung für das Montageszenario 1. Art und die indirekte Relativmessung). Die Auswahl der Positionierstrategie hängt damit zunächst von dem i. d. R. produktseitig festgelegten Montageszenario ab. Sie wird aber auch stark durch das in der Montageanlage vorhandene Equipment wie der indirekt oder direkt messenden Sensorik und der Aktorik für notwendige Relativbewegungen beeinflusst. Abgeleitet von den Montageszenarien und Positionierstrategien wurden für die automatisierte Mikromontage Gestaltungsrichtlinien für sensorbasierte und varianten- und produktflexible Werkzeugsysteme und Funktionsmodule definiert (HÖHN 2001, JACOB 2002).

Obwohl zunächst für automatisierte Anwendungen definiert, gelten die Positionierstrategien analog für manuelle Mikromontageprozesse. Die begrenzten feinmotorischen Fähigkeiten des Menschen (TAN ET AL. 1994) sowie das für die Positionsdetektierung der Referenzmarken meist unzureichende Auflösungsvermögen des menschlichen Auges (LINDNER 1999) erfordern allerdings spezielle Hilfsmittel und Vorrichtungen für die Integration des Menschen in den Steuer- bzw. Regelkreis bei manuellen Mikromontageprozessen. Für die manuelle Mikrohandhabung werden i. d. R. präzise mechanische Positionier- und Greifsysteme verwendet, wenn einfache Pinzetten oder manuelle Mikrogreifwerkzeuge nicht mehr ausreichen. Zur Visualisierung des Montageszenarios werden einfache Luppen oder Stereomikroskope mit geeigneter Visualisierungssoftware

verwendet. Allerdings ist die Arbeitsbelastung des Bedieners eines manuellen Mikromontagearbeitsplatzes aus ergonomischer Sicht trotz dieser Hilfsmittel sehr hoch, da physikalische Grenzen wie eine geringe Tiefenschärfe und ein eingeschränktes Blickfeld der stark vergrößernden optischen Instrumente zu einem ungewohnten Sinneseindruck und einer Beeinträchtigung der Hand-Augen-Koordination führen.

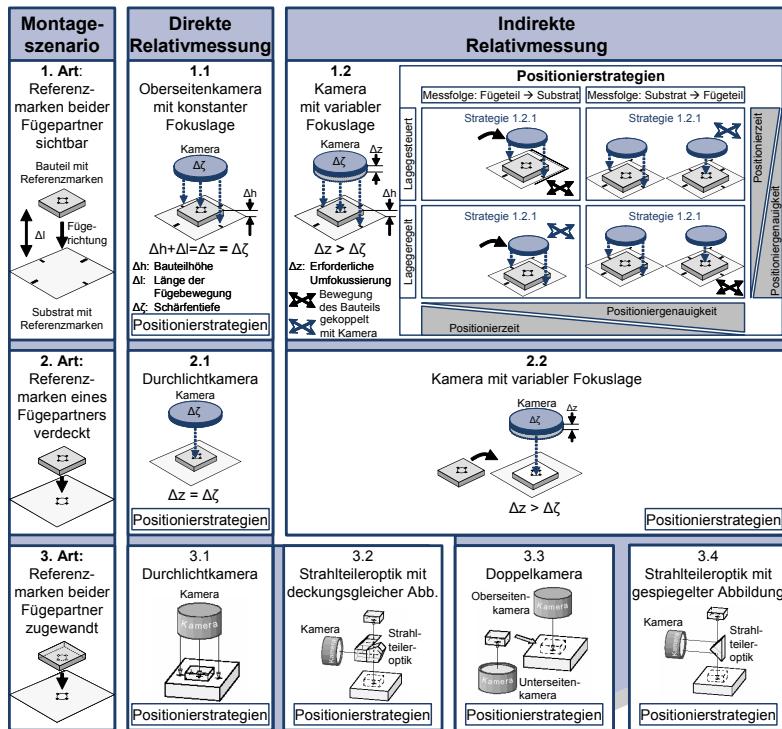


Abbildung 5: Einordnung der Positionierstrategien in Abhängigkeit von der Klassifizierung der Montageszenarien nach der Sichtbarkeit der Referenzstrukturen (linke Spalte) und in Abhängigkeit von direkten (mittlere Spalte) oder indirekten Relativmessverfahren (rechte Spalte) (nach HÖHN 2001 und JACOB 2002)

Zusätzlich zur geforderten Präzision in der Mikromontage erschweren sog. Skalierungseffekte die Handhabungs- und Montagevorgänge von Mikrobauteilen, da Bauteile mit geringen Abmessungen im Vergleich zu Bauteilen mit

großen Abmessungen ein verändertes physikalisches Verhalten aufweisen (EJK ET AL. 2003). Der Grund hierfür liegt in der relativen Zunahme der flächenbezogenen Kräfte gegenüber den volumenbezogenen Kräften bei kleiner werdenden Bauteilabmessungen (GRUTZECK & KIESEWETTER 2002). Deutlich wird das veränderte Bauteilverhalten durch einen Vergleich der dimensionellen Abhängigkeit der volumenabhängigen Trägheitskraft und der flächenbezogenen Elastizitäts- bzw. Viskositätskraft sowie der elektrostatischen Kraft. Die Miniaturisierung der Bauteilabmessungen beeinflusst die Flächenkräfte daher weniger als die Volumenkräfte (YOKOKOHJI ET AL. 1994). Obwohl Skalierungseffekte auch gezielt für die Handhabung von Mikrobauteilen über Adhäsionsgreifmechanismen genutzt werden (HENSCHKE 1994), wirkt sich das veränderte Bauteilverhalten meist störend auf den Montageablauf aus, da Mikrobauteile bereits auf sehr kleine Kräfte wie elektrostatische Kräfte reagieren, oder auch häufig an den Greifmedien haften bleiben.

Nicht nur die oben beschriebene relative Abhängigkeit sondern auch die – absolut gesehen – geringe Dimension der Volumen- und Flächenkräfte stellt für die Messtechnik und deren Integration in die automatisierten Mikromontageanlagen einen erheblichen technischen Aufwand dar (HANKES 1997). Sowohl an die Messdatenaufnahme als auch an die Datenaufbereitung werden hier spezielle Anforderungen bzgl. der erforderlichen Auflösung und der erlaubten Toleranz gestellt (HESSELBACH ET AL. 2006). Ein speziell für die manuell telepräsente Mikromontage entwickelter Sensorbaukasten unterstützt methodisch die Auswahl und Integration von Sensorik in telepräsenten Mikromontageanlagen (SCHILP ET AL. 2004).

Mehr noch als die Komponenten der Mikrosysteme selbst reagieren die filigranen Bauteilstrukturen sehr empfindlich auf Veränderungen der Produktionsumgebung (wie Temperaturschwankungen) und auf Verunreinigungen durch Schmutz oder kleinste Staubpartikel. Die Montage hybrider Mikrosysteme erfolgt daher i. d. R. unter Reinraumbedingungen und mit speziellen an die Reinraumumgebung angepassten Handhabungssystemen (GEIßINGER 1989).

### 2.2.4 Analyse der Technologien für die flexible Mikromontage

Die in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 aufgezeigten Methoden und Technologien für die flexible und kostengünstige Mikromontage werden im Folgenden anhand eines Vorgehensmodells analysiert. Hierbei ist ein flexibles Montagesystem auf Basis eines Portfolios von zu produzierenden Mikrosystemen zu konfigurieren

(siehe Abbildung 6). In einer detaillierten Produkt- bzw. Prozessanalyse werden für jedes einzelne Mikrosystem aus der Produktstruktur und dem daraus abgeleiteten Montagevorranggraphen die notwendigen Montageprozesse wie Bereitstellen, Handhaben, Fügen und Prüfen und die Montageszenarien (vgl. Abschnitt 2.2.3) abgeleitet. Aus der Prognose der Stückzahlentwicklung bzw. der Losgrößen ergeben sich für jedes Mikrosystem unterschiedliche Fertigungsarten von der Einzel- über die Klein- bis zur Mittelserie.

Nach der Klassifizierung der gesamten Montageaufgabe in die einzelnen Montageoperationen, Fertigungsarten und Montageszenarien wird zunächst der für jedes Mikrosystem optimale Automatisierungsgrad festgelegt. Als Auswahlkriterium gilt hier hauptsächlich die Fertigungsart. Aber auch besondere Randbedingungen der Montageoperationen wie z. B. hohe Montagegenauigkeiten und Handhabungsprobleme spielen in dieser Auswahl eine Rolle.

Da die Verteilung der Fertigungsarten im Produktpotfolio wegen unterschiedlicher Lebensphasen und Markterfolge der Mikrosysteme meist stark heterogen ausfällt, erfolgt deren Produktion getrennt an einem manuellen Arbeitsplatz für die Kleinserie und einem automatisierten Anlagensystem für die Mittelserie (vgl. auch Abschnitt 1.3). Die Konfiguration beider Systeme wird zunächst durch die Basistechnologien

- Prozessverkettung und -technologien und
- Positionierstrategien

weiter beeinflusst, welche direkt aus den Montageprozessen bzw. Montageszenarien abgeleitet werden können. Durch die in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 aufgezeigten Basismethoden

- Modularisierung,
- Standardisierung,
- Inbetriebnahmestrategien und
- Implementierung

wird dabei das Anwendungsfeld des automatisierten Systems in einer Art Topdown-Ansatz durch eine Erweiterung der kurzfristigen Flexibilitätsmerkmale Produkt-, Prozess- und Mengenflexibilität soweit ausgedehnt, dass auch Kleinserienprodukte auf diesem flexiblen Anlagensystem gefertigt werden können.

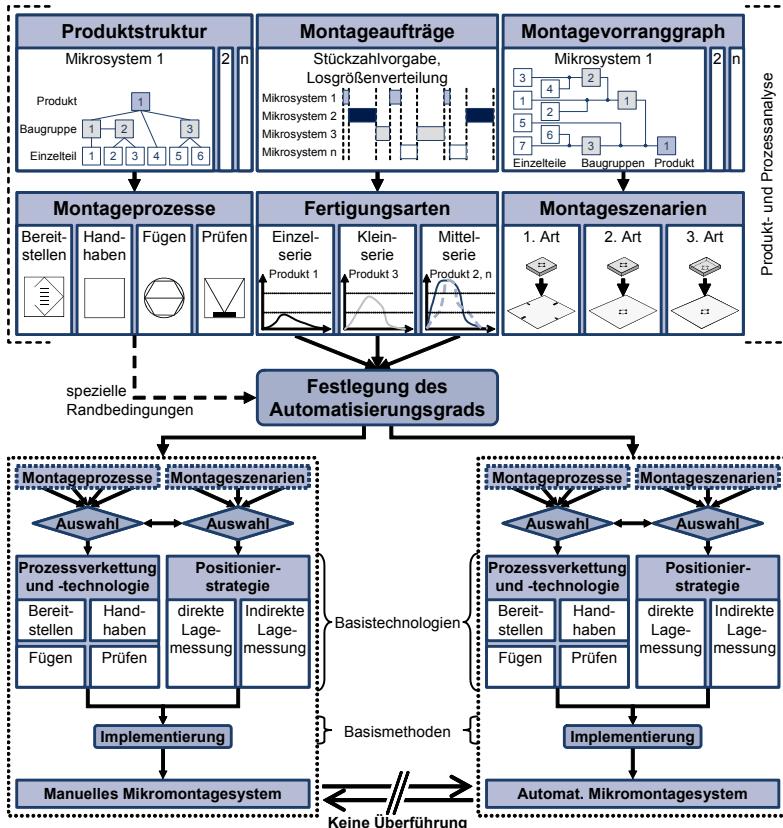


Abbildung 6: Vorgehensmodell für die Planung und Konfiguration flexibler manueller bzw. automatisierter Mikromontagesysteme

Es zeigt sich aber auch, dass ein einfacher Wechsel zwischen manueller und automatisierter Systemtechnik nicht oder nur eingeschränkt möglich ist, da die Konfiguration des Anlagensystems auf der Grundlage von neuen oder modifizierten Ausgangsdaten von vorne beginnen müsste. Eine direkte Übertragung des Prozesswissens ist bislang nicht möglich. Durch die frühe Festlegung des Automatisierungsgrads und der damit getrennten Konfiguration der Anlagentechnik fehlen langfristige Flexibilitätsmerkmale wie die Einsatz- bzw. Umrüstflexibilität und die Erweiterungs- bzw. Änderungsflexibilität. Alle bislang entwickelten Basismethoden schaffen es hier nur unzureichend, das Anwendungsgebiet eines Anlagensystems soweit zu erweitern, dass für alle Fertigungsarten nur ein Anla-

gensystem angewandt werden kann. Es fehlt hier ein durchgängiges Montagekonzept, durch das die Funktionsbausteine aufgrund einer wissenbasierten Planung von der Klein- bis zu Mittelserie umkonfiguriert werden können.

### 2.3 Systemergonomie

#### 2.3.1 Struktur eines Mensch-Maschine-Systems

Einen zentralen Bestandteil der oben beschriebenen adaptiven Mikromontageanlage (vgl. Abschnitt 1.3) stellt die Entwicklung und Auslegung eines leistungsfähigen und zuverlässigen Mensch-Maschine-Systems (kurz MMS) dar. Die methodischen und ergonomischen Ansätze in der Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen werden in der sog. Systemergonomie zusammengefasst (BUBB & Schmidtke 1993, S. 305). Diese Ansätze werden im Folgenden anhand der grundsätzlichen Struktur eines MMS, der Informationsverarbeitung innerhalb der Systemelemente Mensch bzw. Maschine und der Kombination der Fähigkeiten von Mensch und Maschine über die Mensch-Maschine-Interaktion näher erläutert.

Als Mensch-Maschine-System wird formal die Verknüpfung der Subsysteme Mensch und Maschine zu einem geschlossenen Regelkreis verstanden (BUBB & Schmidtke 1993, S. 308). Ausgehend von einer vorgegebenen Aufgabenstellung wird anhand eines Strukturbilds der Informationsfluss über die Systemelemente bis hin zur Aufgabenerfüllung dargestellt. Diese wird abschließend mit der Aufgabenstellung abgeglichen (siehe Abbildung 7).

Das Subsystem Mensch ist in die Funktionselemente Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung unterteilt (BUBB 1993a, S. 333). Über die menschlichen Sinnesorgane werden die Informationen aus der Umwelt aufgenommen und zur Informationsverarbeitung weitergeleitet. Neben den bereits von Aristoteles (384 v. Chr. bis 322 v. Chr.) definierten fünf Sinnen:

- Geschmackssinn (gustatorische Wahrnehmung),
- Geruchssinn (olfaktorische Wahrnehmung),
- Gesichtssinn (visuelle Wahrnehmung),
- Hörsinn (akustische Wahrnehmung) und
- Tastsinn (haptische Wahrnehmung)

erfolgt die Reizaufnahme des Menschen nach moderner Physiologie (KLINKE ET AL. 2005) auch über

- den Gleichgewichtssinn (vestibuläre Wahrnehmung) und
- die trigeminale Wahrnehmung, d. h. das taktile Empfinden im Gesicht.

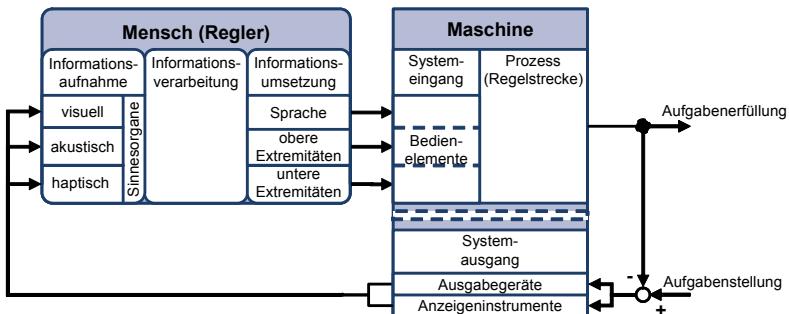


Abbildung 7: Strukturbild eines technischen Mensch-Maschine System mit den informationsverarbeitenden Systemelementen Mensch und Maschine am Beispiel einer Kompensationsaufgabe und einer aktiven Aufgabenart (nach BUBB & Schmidke 1993, S. 308 und BUBB 1993A, S. 333, PETZOLD 2008, S 82)

In (produktions)technischen Anwendungen von Mensch-Maschine-Systemen spielen i. d. R. nur die visuelle, die akustische und Teile der haptischen Wahrnehmung eine Rolle.

Als Sammelbegriff umfasst die haptische Wahrnehmung (auch Haptik genannt) sowohl die Kinästhetik als auch die Taktilität (MEYERS 1995). Unter Kinästhetik werden die propriozeptive Sinneswahrnehmungen der Lage und Bewegung des eigenen Körpers und der auf den Körper wirkende Kräfte zusammengefasst. Die Taktilität umfasst die Wahrnehmung von Druck, Vibrationen und Temperaturereinflüssen über die Rezeptoren in den verschiedenen Hautschichten. Da die Taktilität in den meisten Anwendungsfällen von Mensch-Maschine-Systemen eine untergeordnete Rolle spielt, wird der Begriff Haptik konform zur allgemeinen Literatur (vgl. MILBERG & Petzold 2005) auch in dieser Arbeit stellvertretend für die Kinästhetik verwendet. Nach der Informationsverarbeitung (siehe Abschnitt 2.3.2), in welcher aus den aufgenommenen Informationen beabsichtigte Handlungen abgeleitet werden, können diese über die motorischen Fähigkeiten

des Menschen mit Hilfe der Sprache und der oberen und unteren Extremitäten umgesetzt werden.

Das Subsystem Maschine besteht aus den drei Funktionselementen Systemeingang, Prozess und Systemausgang (nach BUBB & Schmidtke 1993, S. 308 und BUBB 1993A, S. 365). Im Systemeingang werden die durch den Menschen ausgeführten Handlungen mit geeigneten Bedienelementen (Tasten, Schalter, Hebel, haptische Eingabegeräte (vgl. Abschnitt 2.4.1) in Informationen umgewandelt. Diese beeinflussen dann die Prozessführung abhängig von der Aufgabenart entweder aktiv durch direkten Prozesseingriff bei manuellen Tätigkeiten oder monitiv durch passive Beobachtung bei automatisierten Tätigkeiten (nach BUBB 1993B S. 410). Das Funktionselement Prozess wird in der systemergonomischen Betrachtung nur als informationswandelndes Element und damit unabhängig vom real stattfindenden physikalischen Prozess definiert BUBB & SCHMIDTKE 1993, S. 308). Die Ausgangsinformation des Prozesses definiert sich daher allgemein als Aufgabenerfüllung, welche dem Systemelement Mensch direkt über die reale Wahnehmung oder indirekt über technische Anzeigenelemente zurückgemeldet wird. Werden über die Anzeigen oder Ausgabegeräte sowohl die Aufgabenstellung als auch die -erfüllung parallel dargestellt, muss der Mensch in dieser sog. Folgeaufgabe den Vergleich beider Informationen selbst bewerten. Im Gegensatz zu dieser Darstellungsart werden in Kompensationsaufgaben die beiden Informationen in Relation zueinander als eine Informationseinheit über den Systemausgang der Maschine vermittelt (BUBB 1993B S. 407).

### 2.3.2 Informationsverarbeitung im Systemelement Mensch

Die effektive Informationsverarbeitung im Systemelement Mensch beeinflusst im Wesentlichen die Geschicklichkeit und Intelligenz, mit der die technische Aufgabe über das Systemelement Maschine erfüllt wird (nach KUNSTMANN 1999). Folgende Verarbeitungsschritte lassen sich unterscheiden (nach BUBB 1993A, S. 341ff, siehe Abbildung 8):

- Als Informationsspeicherung im Gedächtnis gilt das Erlernen und Einordnen von neuen Informationen in vorhandene generalisierte Strukturen und Schemata. Dies stellt die Grundlage für die Fähigkeit des Menschen dar, ein an die Umwelteinrücke angepasstes Verhalten zu äußern.
- Auf der Basis dieses erlernten deklarativen Wissens werden in unterschiedlichen Entscheidungsmechanismen neu aufgenommene Informationen zunächst mit der vorhandenen Erfahrung (sog. inneren Modellen)

verglichen. Aus einer optimalen Analogie von Realität und innerem Modell werden darauf aufbauend entsprechende Handlungen abgeleitet.

- Ist kein gelerntes Vorwissen vorhanden bzw. sind (noch) keine inneren Vergleichsmodelle vorhanden, besitzt der Mensch durch sein sog. prozedurales Wissen ein Problemlösungsverhalten. Dieses ist durch ein zielorientiertes Vorgehen, d. h. durch die Ableitung von Teilzielen bzw. die Definition von Zwischenzuständen, und die Auswahl von sog. mentalen Handlungsschritten charakterisiert.

Als Grundlage der Weiterverarbeitung erfolgt die Speicherung von Informationen dabei jeweils nicht passiv in Form reiner Datensicherung, sondern aktiv analysierend und generalisierend. Damit können neue Informationen abstrakt in ein vorhandenes Konzept eingeordnet werden. Die Informationen werden somit hinsichtlich ihrer abstrakten Bedeutung auf eigenschaftszuordnende, klassen- bzw. beispielbildende Merkmale zu sog. inneren Modelle reduziert. Dieser Vorgang wird auch als Lernmodell bezeichnet. Die Informationsspeicherung erfolgt stufenweise und mit unterschiedlichen Zielsetzungen in folgenden vier Gedächtnistypen (LINDSAY & NORMAN 1972, SCHMIDT 1976, BUBB 1993A, S. 341ff, siehe Abbildung 8):

- Die Informationen werden zunächst bereits während der Informationsaufnahme automatisch im sog. sensorischen Gedächtnis zwischengespeichert. Dieses kann Informationen allerdings bei einer Vergessenskurve mit einer Zeitkonstante von ca. 150 ms nur zur Weiterverarbeitung vorhalten.
- Sofern die aufgenommene Information einen dauerhaften Reiz auslöst bzw. „bewußt“ wahrgenommen wird, bleibt diese im sog. Kurzzeitgedächtnis (auch primäres Gedächtnis oder aktives Bewusstsein) für eine Zeitspanne von 3 bis 4 Sekunden gespeichert. In Analogie zur Computer-technologie wird das Kurzzeitgedächtnis auch als Arbeitsgedächtnis bezeichnet und kann sehr schnell ausgelesen werden. Es besitzt allerdings nur eine beschränkte Speicherkapazität.
- Bei Wiederholung (Anlernen) der Informationen im primären Gedächtnis kommt es zu einer andauernden Speicherung der Informationen in Form eines inneren Modells der Realität im sog. Langzeitgedächtnis (auch sekundäres Gedächtnis). Die Wiederholungsdauer darf hierbei allerdings nicht größer sein als die Vergessenskurve des Langzeitgedächtnisses. Die gespeicherten, erlernten Informationen sind nur langsam abrufbar.
- Als besonderer Teil des Langzeitgedächtnisses wird das tertiäre Gedächtnis bezeichnet, in dem Informationen und Fähigkeiten gespeichert werden,

welche durch jahrelanges Üben nicht mehr vergessen werden können. Der Zugriff auf dieses Erfahrungswissen erfolgt sehr schnell.

Nach der Aufnahme von neuen Informationen können Entscheidungen auf Basis der so erzielten inneren Gedächtnismodelle abgeleitet werden, welche reale Situationen, Vorstellung und Bilder repräsentieren. In einer Modellvorstellung der menschlichen Informationsverarbeitung werden folgende Handlungsmaximen definiert. Diese unterscheiden sich nach dem Grad der Nutzung von a priori festgelegten Handlungsschemata und Wissen und nach dem Grad der kognitiven Inanspruchnahme des Menschen (RASMUSSEN 1999):

- Lassen sich die neu aufgenommenen Informationen nach der Merkmalsbildung vollständig in die bereits vorhandenen Modelle integrieren, erfolgt die Informationsumsetzung automatisch und willkürlich ohne bewussten Entscheidungsprozess i. d. R. über das tertiäre Gedächtnis und über erlernte sensomotorische Verhaltensweisen. Unter diesem sog. verhaltensbasierten Handeln werden damit alle hochgeübten Tätigkeiten zusammengefasst.
- Das regelbasiertes Handeln beschreibt alle Tätigkeiten, die auf Basis von erlernten Regeln aus dem Langzeitgedächtnis in einem bewussten Entscheidungsprozess abgeleitet werden. Über den sog. Ähnlichkeitseffekt wird hierbei die aufgenommenen Information mit der Vielzahl von inneren Modellen abgeglichen und das günstigste Modell ausgewählt.
- Das wissenbasierte Handeln repräsentiert die zielgerichtete Entscheidungsfähigkeit des Menschen, sofern noch keine oder nur wenige vorgefertigten Handlungsschemata existieren. Es gilt als Grundlage für das Problemlösungsverhalten des Menschen. Durch den Abgleich der Teilziele mit dem vorhandenen inneren Modellen werden durch Analogien häufig bereits vorhandenen und erfolgreichen Problemlösungsstrategien auf neue unbekannte Situationen übertragen.

Das menschliche Problemlösungsverhalten ähnelt damit einem Suchvorgang, der sich aus einer Kombination von Heuristiken zusammensetzt. Heuristiken existieren in folgenden Formen:

- Durch die Methode der Unterschiedsreduktion, welche eher bei unbekannten Problemstellungen angewandt wird, soll nach dem Ähnlichkeitsprinzip der Unterschied vom bereits erreichten Zwischenzustand zum Zielzustand soweit als möglich minimiert werden.

- In der Mittel-Ziel-Analyse wird das Problem in eine Sequenz von Unterschieden zwischen den Zwischenzuständen aufgeteilt und die Unterschiede in hierarchischer Reihenfolge (meist top-down) eliminiert.
- Während der Rückwärtssuche werden ausgehend vom Zielzustand rückwärts bis zur Ausgangssituation Zwischenzustände definiert, die eine Lösung des gesamten Problems implizieren.
- Das Problemlösen durch Analogien verfolgt den Ansatz, die Lösung einer unbekannten Aufgabenstellung aus bereits bekannten Lösungsstrukturen eines anderen Problems zu finden.

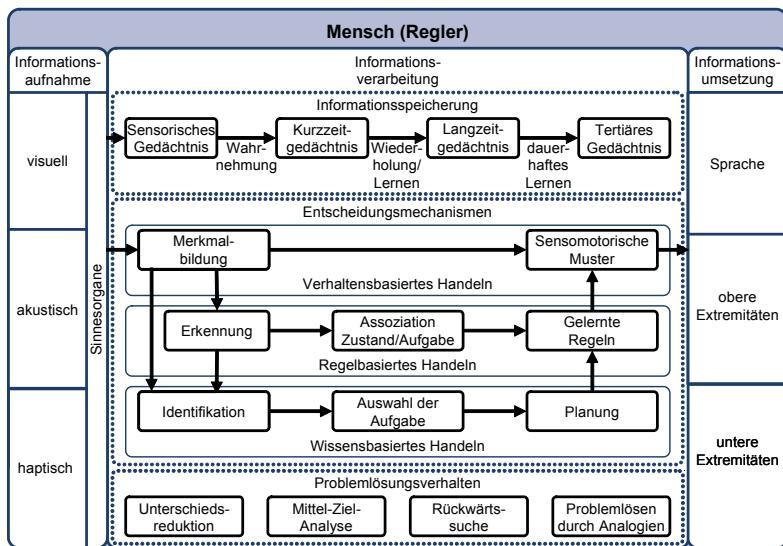


Abbildung 8: Vereinfachtes Modell der Informationsverarbeitung innerhalb des Systemelements Mensch (nach BUBB 1993A, S. 341ff) unterteilt in die Elemente Informationsspeicherung (oben), Entscheidungsmechanismen (Mitte) und Problemlösungsverhalten (unten)

### 2.3.3 Informationsverarbeitung des Systemelements Maschine

Übergreifend über die unterschiedlichen Eingriffsmöglichkeiten des Menschen in ein Mensch-Maschine-System erstreckt sich das Einsatzgebiet des Systemelements Maschine

- von der reinen Unterstützung der Informationsaufbereitung für den Bediener bei rein manueller Tätigkeit z. B. über geeignete Visualisierungssysteme
- über die technischen Umsetzung der Eingabesignale des Menschen in eine Prozessveränderung z. B. in Bewegungen bei ferngesteuerten Anlagen
- bis hin zur Übernahme der autonomen Regeltätigkeit des Prozesses an Stelle des Menschen im automatisierten Betrieb (siehe Abbildung 9, nach BUBB 1993B, S. 412).

Diese breite Spanne vom aktiven, direkten (vgl. Abbildung 7) bis hin zum passiv-monitiven Eingriff des Menschen in die Maschine (siehe Abbildung 9) führt zu unterschiedlichen Anforderungen an die Anlagensteuerung, welche alle Eingriffsmöglichkeiten im adaptiven Mikromontagesystem abbilden müssen. Obwohl auch in bekannten flexiblen Mikromontageanlagen unterschiedliche Teilsysteme mit einer Vielzahl von Aktoren und Sensoren informations- und steuerungstechnisch zu kombinieren sind, existieren bislang nur wenige anpassungsfähige Ansätze in zentralen (CODOUREY & HONEGGER 2002) oder dezentralen, agentenbasierten Steuerungsarchitekturen (CHEN ET AL. 2000, GAUGEL ET AL. 2002). Der Entwicklungsfokus lag hier bisher hauptsächlich auf der flexiblen mechanischen Anlagenauslegung (vgl. Abschnitt 2.2.4).

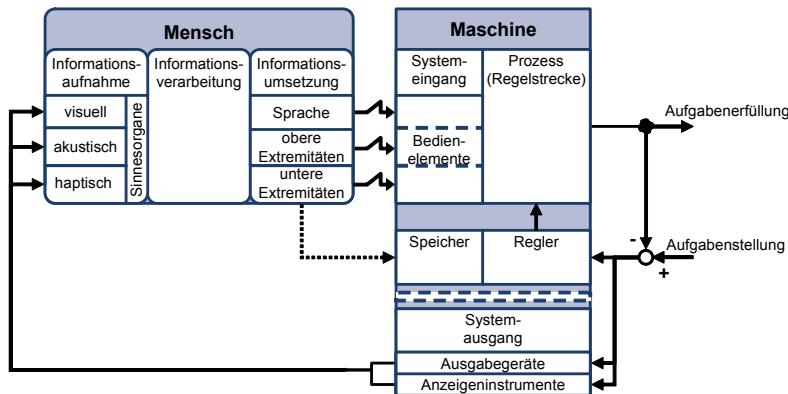


Abbildung 9: Strukturbild eines Mensch-Maschine System am Beispiel einer Kompensationsaufgabe und einer passiv-monitiven Aufgabenart (nach BUBB 1993B, S. 407)

Abgeleitet von einem Vorschlag von CODOUREY & HONEGGER (2002) für flexible und hybride Mikrofertigungsanlagen stellt eine kombinierte Architektur aus zentralen Steuerungskernen für die Hauptfunktionen des Systemelements Maschine und aus verteilten Steuerungselementen für die informationstechnische Integration der Komponenten des Mensch-Maschine-Systems eine kosteneffiziente und flexible Lösungen für das hier vorgeschlagene adaptive Mikromontagesystem dar. Durch einen streng modularen Aufbau und der strikten Einhaltung von vorab definierten Schnittstellen gewährleisten sog. Softwareframeworks die prozessabhängige Austausch- und Wiederverwendbarkeit von bestehenden Softwarekomponenten und die einfache Erweiterbarkeit der Steuerungsfunktionen auf neue Anwendungsfälle. Unter einem Framework versteht man eine „Menge von zusammenarbeitenden Klassen (Anm. des Verf.: entspricht erweiterten Datentypen), welche einen wiederverwendbaren Entwurf für einen bestimmten Anwendungsbereich implementieren“ (BALZERT 1999).

Bei steigendem Automatisierungsgrad in Mensch-Maschine-Systemen wird die Informationsverarbeitung des Menschen (vgl. Abschnitt 2.3.2) damit ganz oder teilweise auf die Maschinensteuerung verlagert (BUBB 1993B, S. 412). Übertragen auf das adaptive Mikromontagesystem muss daher die gesamte Montageaufgabe in Teilaufgaben zerlegt werden, deren zeitliche und logische Reihenfolge eindeutig determiniert und durch eine autonome Steuerung ausführbar ist. Sowohl diese entsprechende Aneinanderreihung der Teilprozesse wie auch die autonome Regelung der Teilprozesse selbst führen damit zu einem autonomen Ablauf von komplexen Prozessabfolgen. In Analogie zur menschlichen Entscheidungsfähigkeit erfordert dies einfache, klar unterscheidbare und austauschbare Prozessmodelle. Diese müssen mit den jeweiligen Prozessparametern nach einem geeigneten Einricht- und Programmierverfahren für den automatisierten Betrieb in einem speziellen Informationsspeicher in der Maschine vorgehalten werden.

### 2.3.4 Kombination der Fähigkeiten von Mensch und Maschine

Durch die sog. Mensch-Maschine-Interaktion, in der die Systemelemente Mensch und Maschine in ihrem Handeln und Aktionen sich gegenseitig beeinflussen und über verschiedene Modalitäten kommunizieren (CHARWAT 1994, WÖSCH 2002), werden die unterschiedlichen Fähigkeiten von Mensch und Maschine zu einem leistungsfähigen System kombiniert. Die Systemelemente

eines (produktions)technischen Mensch-Maschine-Systems können allgemein anhand der Eigenschaftsmerkmale bzw. Fähigkeiten

- Arbeitsleistung und Leistungsverhalten,
- Handhabung und Manipulation,
- Informationsverarbeitung und
- Informationsaufnahme

charakterisiert und miteinander verglichen werden (nach BUBB 1993B, S. 411, siehe Abbildung 10). Abgestimmt auf die unterschiedlichen Eigenschaften und Fähigkeiten der Systemelemente sind die ergonomische Anforderungen und Bewertungskriterien für technische Mensch-Maschine-Systeme in einer system-ergonomischen Analyse der Produktionsaufgabe zu detaillieren. Diese Analyse beruht auf den drei systemergonomischen Gestaltungsmaximen

- Funktionsanalyse,
- Informationsrückmeldung und
- Kompatibilität

und sollte unabhängig von bestehenden oder angedachten technischen Systemen erfolgen (nach BUBB & Schmidtke 1993, S. 391ff).

In der Funktionsanalyse werden sowohl der vorgegebene Aufgabeninhalt in seiner Komplexität und Schwierigkeit als auch die Auslegung der Systemstruktur näher beschrieben. Für die Auslegung der Systemstruktur sind zum einen die Darstellungsart von Aufgabenstellung und Aufgabenerfüllung (vgl. Abschnitt 2.3.1) und zum anderen die Aufgabenart, d. h. die Eingriffsmöglichkeiten des Menschen in den manuellen bzw. automatisierten Mikromontageprozess zu unterscheiden. Ziel der Funktionsanalyse ist daher die umfassende Beschreibung aller notwendigen Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und Maschine sowohl im manuellen als auch im automatisierten Betriebsmodus sowie in den dafür notwendigen Einricht- und Programmierprozessen des adaptiven Anlagen-systems.

Anhand der notwendigen Informationsrückmeldung in einem Mensch-Maschine-System werden Richtlinien für die Art und Anzahl der Sinneskanäle abgeleitet und die maximal erlaubte Zeitverzögerung zwischen Informationsumsetzung und -rückmeldung definiert. Diese Parameter sind hauptsächlich für die aktive, direkte Steuerung des manuellen Betriebsmodus der Montageanlage von Bedeutung.

Die Kompatibilität beschreibt die Sinnfälligkeit und das Aufnahmevermögen bzw. Verständnis unterschiedlicher Informationen, welche durch den Menschen generiert oder über die Maschine an ihn vermittelt werden. In der Konzeption des adaptiven Mikromontagesystems (vgl. Kapitel 4) wird die Informationsrückmeldung für jeden Betriebsmodus in Bezug auf die Kompatibilität bewertet.

	Maschine	Mensch
<b>Arbeitsleistung und Leistungsverhalten</b>		
Mechanische Leistungsgrenzen	beliebig skalierbar	4,4 kW bis 10 s 0,7 kW einige Minuten 0,2 kW für 8 h (Dauerleistung)
Geschwindigkeit	technologisch begrenzt	physiologisch begrenzt
Konstanz	groß	gering; abhängig von Umwelt
Zuverlässigkeit	Ausfall	Regeneration
Lernfähigkeit	keine	groß
<b>Handhabung und Manipulation</b>		
Manipulative Leistung	spezifisch konstruiert	vielseitig und flexibel
<b>Informationsverarbeitung</b>		
Algorithmenverarbeitung	exakt; schlechte Fehlerkorrektur	ungenau; gute Fehlerkorrektur
Strategiebildung	fest programmiert	wählbar; optimierbar
Verarbeitungsprinzip	mehrkanalig (parallel)	meist einkanalig (seriell)
Verarbeitungsart	knapp	weitschweifig (redundant)
Speicherung	kleine bis mittlere Kapazität	große Kapazität
Zugriffszeit	kurz	teilsweise lang
Extrapolation (Vorausschau)	spezifisch festgelegt	zielorientiert im Kontext
<b>Informationsaufnahme</b>		
Art (Modalität)	Begrenzt durch Messbarkeit	abhängig von Sinnesorganen
Bereich (Intensität)	klein (linear)	groß (logarithmisch)
Störabstand (Empfindlichkeit)	wählbar	verhaltensabhängig
Erkennung	syntaktisch (Zeichen)	Semantisch (Form); pragmatisch (Bedeutung)

*Abbildung 10: Gegenüberstellung der unterschiedliche Fähigkeiten von Mensch und Maschine (nach BUBB 1993B, S. 411)*

Durch die sich ergänzenden Kombinationsmöglichkeiten der meist gegenläufigen Fähigkeiten von Mensch und Maschine stellt ein intelligentes Mensch-Maschine-System die technische Basis für eine anpassungsfähige Anlagenarchitektur für die Montage vom hybriden Mikrosystem dar. Dieses System wird durch BULLINGER & FÄHNRICH (1984) auch als „symbiotisches Mensch-Maschine-System“ bezeichnet. Neben der Übertragung von Teilen der menschlichen Fähigkeiten und des Prozesswissens auf eine autonome Anlagensteuerung gewährleistet die Symbiose der unterschiedlichen Fähigkeiten von Mensch und Maschine eine anpassungsfähige und leistungsfähige Mensch-Maschine-

Interaktion in den unterschiedlichen Betriebsmodi der Montageanlage. Durch die effiziente Kopplung der Anlagensysteme werden damit neue Anwendungsbereiche und Leistungsklassen sowohl für den Menschen als auch für die Maschine erschlossen.

### 2.4 Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie

#### 2.4.1 Definition und Begriffe

Im Einklang mit der wachsenden Bedeutung der intelligenten Automatisierungs-technik in Produktionssystemen (WESTKÄMPER 2005) und der effizienten Kopp-lung von Mensch und Maschine (vgl. Abschnitt 2.3), weist die sog. Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie, als eine spezielle Form der Mensch-Maschine-Interaktion, erhebliches Potenzial auf. Nach einer genauen Definition der Tech-nologie und der Festlegung der Begrifflichkeiten werden in den folgenden Abschnitten die Anwendungsbereiche der Telepräsenz- und Teleaktionstechno-logie genau aufgezeigt und daraus das Potenzial für den Einsatz in adaptiven Mikromontageanlagen abgeleitet.

Durch die Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie können v. a. dann neue produktionstechnische Anwendungen erschlossen werden, wenn Operationsort und Bediener physisch getrennt werden müssen und eine einfache und intuitive Mensch-Maschine-Interaktion gefordert wird. Unter Telepräsenz wird dabei das Gefühl eines menschlichen Operators verstanden, sich in einer entfernten Remote-Umgebung präsent zu fühlen. Durch die natürliche, wirklichkeitsnahe Präsen-tation der sensorisch erfassten Prozessinformationen kann eine totale Immersion, d. h. ein vollständiges Eintauchen des Bedieners mit all seinen sensorischen Fähigkeiten, in die Remote-Umgebung erzielt werden. In dieser sog. idealen Telepräsenz kann der Operator nicht mehr zwischen sensorischen Eindrücken und Rückmeldungen aus der direkten Wechselwirkung mit der realen Umwelt oder mit technischen Hilfsmitteln unterscheiden. Neben der Informationswieder-gabe hängt das Präsenzempfinden dabei stark von der sensorischen Reichholtig-keit und dem Grad der Interaktion ab (STEUER 1995). Über das passive Präsenzgefühl hinaus erlaubt die Teleaktion (auch Teleoperation genannt) durch die Erweiterung der sensorischen um manipulatorische Fähigkeiten einer Person das aktive, physikalische Eingreifen des Operators in der Remote-Umgebung. Über geeignete Eingabeschnittstellen initiiert, regelt der Operator Aktionen,

welche dann über passende Aktorsysteme zeitlich direkt und kontinuierlich ausgeführt werden. Da ein hinreichendes Präsenzempfinden meist auch ein realitätsnahes Interagieren mit der Remote-Umgebung beinhaltet, werden die Begriffe Telepräsenz, Teleaktion und Teleoperation in der Literatur meist synonym behandelt. Davon abgegrenzt versteht man unter dem Begriff Telemomanipulation nur die Veränderung der Remote-Umgebung ohne Nutzung der sensorischen oder manipulatorischen Fähigkeiten des menschlichen Bedieners.

Die Telepräsenztechnologie ist jedoch nicht mit der bekannten Tele-X Technologie gleichzusetzen, da diese dem Bediener nur ausschnittsweise Eindrücke aus der entfernten Umgebung vermittelt. Beispiele hierfür sind Videobilder im Falle der Television oder akustische Informationen bei der Telekommunikation (LORIA 2002, MAEYAMA ET AL. 2003). Wenn überhaupt lassen Tele-X Systeme nur eine stark eingeschränkte Interaktion mit dieser Remote-Umgebung meist in Form von reiner Datenübermittlung bzw. Änderungen in Steuerungs- und Softwarekonfigurationen zu (ZIEGNER 2002). Tele-X Anwendungen dienen deshalb meist der reinen Überwachung und Fernwartung von Anlagen und Prozessen.

Anhand des Aufbaus und der Funktionsweise eines Telepräsenzsystems (siehe Abbildung 11) wird im Folgenden die wesentliche Fachterminologie der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie erklärt (vgl. SHERIDAN 1992A, FÄRBER 1998, UHL 2000). Als Telepräsenzsystem werden alle notwendigen Hard- und Softwarekomponenten bezeichnet, um eine telepräsenz Aufgabe durchführen zu können. Der menschliche Bediener (Operator) und der Prozess bzw. die produktionstechnische Aufgabe sind per Definition nicht Teil des Telepräsenzsystems, werden aber in dieser Arbeit immer mitbetrachtet.

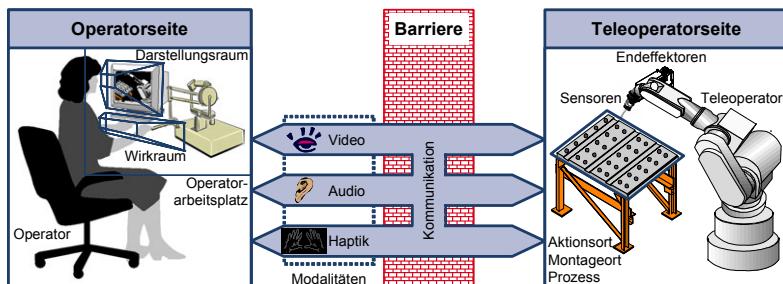


Abbildung 11: Aufbau eines Telepräsenzsystems

Die Operatorseite (auch Master-Seite) umfasst den Operatorarbeitsplatz und den Bediener des Telepräsenzsystems. Im Operatorarbeitsplatz sind im Darstellungsräum alle Ausgabegeräte zur Präsentation der Informationen aus der Remote-Umgebung und im Wirkraum alle Eingabegeräte zur telepräsenten Interaktion mit derselben integriert. Eingabegeräte übernehmen bei der Mensch-Maschine Interaktion die Aufgabe, menschliches Handeln in für den Teleoperator lesbare, digitale Signale umzuwandeln. Für die realitätsnahe Interaktion werden kraftrückkoppelnde Eingabegeräte verwendet, welche neben dieser Steuerungsfunktion auch Informationen in Form von Kräften und Momenten an den Bediener zurückmelden. Diese Eingabesysteme werden auch Force-Feedback-Geräte oder haptische Ein-/Ausgabegeräte genannt.

Die Telepräsenzbarriere stellt das Hindernis zwischen Mensch und Maschine dar, welches mit Hilfe eines Telepräsenzsystems kompensiert werden soll. Nach ANTON (2002) kann diese Barriere durch Distanz-, Zeit- und Größenunterschiede hervorgerufen werden (siehe auch Abschnitt 2.4.2). Zur Überwindung der Telepräsenzbarriere müssen Steuersignale von der Operatorseite aus und Informationen in Form von Sensordaten von der Teleoperatorseite aus transferiert werden. Die Informationen aus der Remote-Umgebung müssen dabei auf die Sinne des Bedieners abgestimmt und damit vor der Vermittlung aufbereitet werden. In Zusammenhang mit Telepräsenzsystemen werden die unterstützten Sinne auch Modalitäten genannt. Analog zu Mensch-Maschine-Systemen werden von den menschlichen Sinneswahrnehmungen (vgl. Abschnitt 2.3.1) in Telepräsenz anwendungen i. d. R. nur die Modalitäten Video (visuelle Wahrnehmung), Audio (akustische Wahrnehmung) und Haptik (haptische Wahrnehmung) unterstützt. Für die Vermittlung eines realitätsnahen Umgebungseindrucks aus der Teleoperatorumgebung ist eine synchrone und konsistente Stimulation verschiedener Modalitäten, die sog. Multimodalität, notwendig.

Die i. A. für den Operator unzugängliche Teleoperatorseite (Remote-Umgebung) beschreibt die komplette Arbeitsumgebung der telepräsent zu steuernden Prozesse. Dies beinhaltet den Teleoperator selbst einschließlich aller notwendigen Zusatzkomponenten wie Sensoren, Werkzeuge, Vorrichtungen und Objekte im Arbeitsraum des Teleoperators. Der Teleoperator, auch Manipulator genannt, ist dabei das Handhabungsgerät, dessen Positionen während der Telepräsenzaufgabe vom Operator vorgegeben werden. Deshalb wird der Teleoperator in der Literatur auch als „Slave“ bezeichnet. Der telepräsent auszuführende Handhabungs- bzw. Montageprozess findet am Aktionsort (Montageort) statt. Hierunter werden

aber nur die handzuhabenden Objekte ohne umgebende Vorrichtungen verstanden.

#### **2.4.2 Anwendungen von Telepräsenzsystemen**

Die Anwendungsgebiete der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie können anhand der Kategorien der Telepräsenzbarriere Distanz, Dimension und Zeit (nach ANTON 2002) klassifiziert werden. Auf Technologien und Anwendungen aus dem Bereich der Produktionstechnik wird gesondert in Abschnitt 2.4.3 eingegangen.

Bei distanzkompensierenden Telepräsenz- und Teleaktionssystemen – die ersten Anwendungsbeispiele der Telepräsenztechnologie – steht die Überbrückung der räumlichen Entfernung zwischen Operator und dem Aktionsort im Vordergrund, welche entweder sicherheitstechnisch zwingend erforderlich oder geographisch notwendig ist (SHERIDAN 1992B, YABUSHITA ET AL. 2004). Durch die Entwicklung des ersten Telepräsenzsystems für die Nuklearforschung wurde dadurch z. B. die Gefährdung des Menschen bei der Handhabung radioaktiver Stoffe vermieden (GOERTZ & Thompson 1954, siehe Abbildung 12). Mechanisch über eine Stangenkinematik gekoppelt, konnte der Operator den hinter einer Bleiglasscheibe strahlungsgeschützt positionierten Teleoperator bedienen (siehe Abbildung 12 rechts). Ein weiteres Einsatzgebiet im Bereich der Handhabung radioaktiver Objekte stellt die Demontage von atomar verseuchten Anlagen dar (MANOCHA ET AL. 2001). Bei friedenssichernden oder militärischen Maßnahmen geht ein erhebliches Gefahrenpotenzial für den Menschen von verteilten Sprengsätzen oder Landminen aus. Kommerziell erhältliche Telepräsenzsysteme werden hier bereits im erheblichen Umgang zur Entschärfung und Räumung dieser Gefahrenquellen eingesetzt (TELEROB 2006, REMOTEC 2006, ESI 2006, siehe Abbildung 12 rechts).

Neben der Handhabung gefährdender oder gefährlicher Objekte ist die Explorations von unbekannten, entfernten oder für den Menschen unzugänglichen Gebieten ein weiteres Anwendungsgebiet distanzkompensierender Telepräsenzsysteme. Besonders in der Weltraumforschung spielt die Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie eine tragende Rolle, seitdem z. B. die ersten Fahrzeuge auf den Planeten Mars oder weitere Teleoperatoren für Versuchs-, Reparatur- oder Erkundungszwecke von den Bodenstationen auf der Erde gesteuert und geführt werden (NASA 2006A, (GEIGER ET AL. 2010, STOLL ET AL 2009, NASA 2006B, REINTSEMA ET AL. 2004, HIRZINGER ET AL. 2004). Im Zuge der immer bedeut-

sameren Klimaforschung aber auch als Trainingsgebiet für die Weltraumforschung nimmt die Bedeutung der Erkundung der Unterwasserwelt z. B. durch telepräsent gesteuerte U-Boote oder durch Telepräsenzsysteme für Reparaturarbeiten unter Wasser erheblich zu (GRIFFITHS 2000, O'BRIAN & LANE 2001). Prinzipiell ergeben sich hier die gleichen Anforderungen an Telepräsenzsysteme wie im Weltraum. Auch im medizinischen Bereich werden distanzkompensierende Telepräsenzsysteme in der Chirurgie entwickelt und eingesetzt (MAIER ET AL. 2010, ECKL ET AL. 2010, Kuebler et al. 2009). Durch die Freiheit, sich von Spezialisten behandeln bzw. operieren zu lassen, ohne dass Spezialisten oder Patienten über große Distanzen transportiert werden müssen, ergeben sich durch den Einsatz von Telepräsenztechnologien neue Anwendungspotenziale in der medizinischen Versorgung.

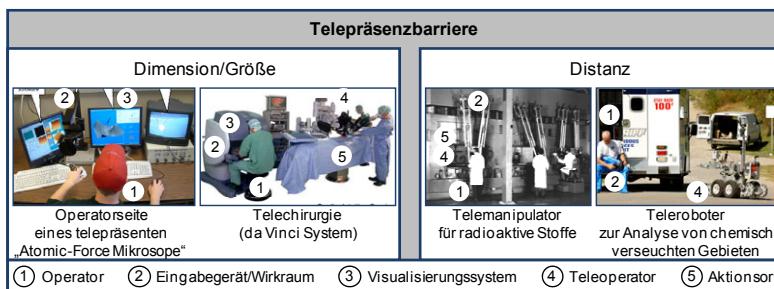


Abbildung 12: Exemplarische Telepräsenzanwendungen außerhalb der Produktionstechnik, klassifiziert nach der Art der Telepräsenzbarriere Dimension/Größe (links) und Distanz (rechts)

Dimensionskompensierende Telepräsenz- und Teleaktionssysteme gleichen die dimensionale Barriere, d. h. die Größenverhältnisse zwischen der Operator- und der Teleoperatorseite aus. Hierbei werden vielfältige Anwendungsgebiete unterschieden. In der Handhabung und Bearbeitung überdimensionaler Bauteile wird durch Telepräsenz die erheblich größere Arbeitskraft von Robotern bzw. Handhabungssystemen mit der Intelligenz und dem Entscheidungsvermögen des Menschen gekoppelt. Kommerziell nutzbare Telepräsenzsysteme werden z. B. für die Bearbeitung von schweren Komponenten von Schiffsmotoren eingesetzt (TELEROB 2006). In der Medizintechnik können durch telepräsente Chirugieroboter mit endoskopischen Werkzeugen minimalinvasive Eingriffe auf kleinstem Raum durchgeführt werden (MANZEY ET AL. 2009, BAUERNSCHMITT ET AL 2009, MAIER ET AL. 2008, INTUITIVE SURGICAL 2005,

DEML ET AL. 2004, siehe Abbildung 12 links). Im Vergleich zu konventionellen Operationstechniken sinken sowohl die Belastungen des Patienten während des Eingriffs als auch die Kosten und Dauer des Heilungsprozesses und der Nachbehandlung. Mit der Entwicklung der Mikrosystemtechnik (vgl. Abschnitt 1.1) weist die Telepräsenztechnologie dort in unterschiedlichen Anwendungen ebenfalls ein erhebliches Potenzial auf (siehe Abschnitt 2.4.3). Neue Verfahren zur Mikro- bzw. Nanomanipulation von Molekülen, DNS-Ketten und Viren bzw. Antikörpern in der pharmazeutischen Forschung und Biologie werden erst durch größtenkompensierende Telepräsenzsysteme technisch umsetzbar. Ein Beispiel hierfür ist das bekannte „3D Magnetic Force Microscope“ des „Centers for Computer Integrated Systems for Microscopy and Manipulation“ in North Carolina, USA (GUTHOLD ET AL. 2004, DWYER ET AL. 2002, STILWELL ET AL. 2003). Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Handhabung kleiner Bauteile zur Untersuchung von mikrostrukturierten Oberflächen. Bei diesen Oberflächenuntersuchungen besteht die Teleoperatorseite aus einem „Atomic-Force Mikroskop“ (AFM) (SITTI & Hashimoto 2003) bzw. einem Elektronenstrahlmikroskop (FAHLBUSCH ET AL. 2002). Aus der Kombination der Mikroskopeigenschaften mit einer adäquaten Darstellung der Prozessinformation mit VR und AR Technologien auf der Operatorseite entstehen leistungsfähige Telepräsenzsysteme (VOGL ET AL. 2004, siehe Abbildung 12 links).

Durch die Verbreitung der Telepräsenztechnologie wächst auch der Bedarf an zeitkompensierenden Telepräsenz- und Teleaktionssystemen. Durch diese kann eine einmal aufgezeichnete Aktion beliebig oft und realitätsnah wiederholt und erlebt werden. Mit der Möglichkeit der Übertragung individueller Fertigkeiten liegt die Hauptaufgabe dieser Systeme in der Aus- und Weiterbildung im Umgang mit der Telepräsenztechnologie. Derzeit realisierte Systeme werden hauptsächlich zu Trainingszwecken angehender Chirurgen eingesetzt, indem diese die von einem Experten ausgeführten Operationsschritte realitätsnah miterleben können (CAVUSOGLU 2000). Einen weiteren Anwendungsfall der zeitkompensierenden Systeme stellt die realitätsnahe VR-Simulation von komplexen Systemen anhand virtueller Prototypen in der Entwicklungsphase dar (GAUSEMEIER ET AL. 2000). Da Eigenschaften des Systems bereits zu einem Zeitpunkt intuitiv untersucht und erlebt werden können, an dem der reale Systemaufbau noch nicht existiert, wird somit der Zeitspanne der Umsetzung überbrückt.

### 2.4.3 Nutzen der Telepräsenz in der Produktionstechnik

Die Telepräsenzsysteme im Umfeld der Produktionstechnik stellen i. A. Kombinationen von distanz-, dimensions- und zeitkompensierender Telepräsenztechnik dar. Durch den noch jungen technologischen Entwicklungsstand und den noch relativ geringen Bekanntheitsgrad dieser Technologie existieren derzeit allerdings nur Konzepte oder vereinzelte Lösungen für den produktionstechnischen Einsatz. Das Potenzial von Telepräsenztechnologien wird dabei in den folgenden Anwendungsbereichen deutlich:

- in Aufgaben, welche der Produktion nachgelagert sind (After-Sales Markt),
- in Trainings- und Schulungsmaßnahmen bzw. in der Anlagenprogrammierung und
- in direkt wertschöpfende Produktionsprozessen.

Die Neupositionierung der Investitionsgüterindustrie hin zu Servicedienstleistern zeigt, dass erhebliches Wettbewerbspotenzial in integrierten Service- und Wartungsaufgaben an komplexen Investitionsgütern steckt. Diese Anwendungen lassen sich i. A. in die Störungsdiagnose und in die Fehlerbehebung unterteilen. Um insgesamt die Personalkosten zu senken, wird die Störungsdiagnose bereits in vielen Bereichen mit Tele-X-Anwendungen (vgl. Abschnitt 2.4.1) unterstützt (HUEDTZ & HARNISCHFEGER 1997, JASCHINSKI & LIESTMANN 1997, DREHER ET AL. 1997, MAßBERG 1998). Derzeit beschränken sich diese Anwendungen aber meist auf die wechselseitige Übertragung von Informationen, auf die Überwachung von Signalen durch den Bediener und auf eine stark reduzierte Interaktion mit der Remote-Umgebung z. B. durch die Modifikation von Steuerungsprogrammen und Maschinenparametern (GÖHRINGER 2001, LICHTENEGGER 1998). Arbeiten zur Fehlerbehebung werden derzeit noch direkt vor Ort und mit erheblichem Zeitaufwand und damit verbunden Kosten ausgeführt. Hierin liegt aber das eigentliche Potenzial der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie. Durch ein verbessertes Präsenzgefühl und die Immersion des Operators in den aktuellen Anlagenzustand kann das für die Störungsbehebung notwendige Verständnis des Servicetechnikers für das Gesamtsystem gefördert werden (WAGNER 1996).

Ein weiteres Anwendungsfeld von Telepräsenz und Teleaktion besteht in Unternehmensnetzwerken mit unterschiedlichen Produktionsstandorten. Durch die Nutzung eines globalen Telepräsenznetzwerks können erhebliche Kosteneinsparungen bei Trainings- und Schulungsmaßnahmen von Produktionspersonal erzielt

werden, wenn Trainer und Mitarbeiter nicht mehr gemeinsam vor Ort sein müssen und die Maßnahmen flexibel an die freie Zeiten der Mitarbeiter und den Produktionsablauf angepasst werden können. Indem der Trainer die Aufgaben telepräsenz demonstriert und die Mitarbeiter diese realitätskonform miterleben, als ob sie diese selber durchführen würden, können neue Produktionsprozesse gemeinsam erarbeiten werden (FÄRBER 2004). Diese Vermittlung von Wissen über den Einsatz von Telepräsenztechnologien kann auch für die Inbetriebnahme von teil- bzw. vollautomatischen Produktionsanlagen genutzt werden. Durch das telepräsente Ausführen einer Produktionsabfolge kann eine neue Anlage bzw. eine modifizierte Produktionsabfolge in Betrieb genommen werden, ohne dass das Fachpersonal vor Ort sein muss. Da sich dieses sog. telepräsente Teach-in Verfahren auf das einfache Durchführen der Aufgabe beschränkt, sind keine Programmierfachkräfte oder Steuerungstechniker mehr erforderlich. Hierzu sind derzeit für den produktionstechnischen Einsatz noch keine umgesetzten Lösungen bekannt.

Die Telepräsenztechnologie gewinnt auch für wertschöpfende Prozesse der Produktionstechnik an Bedeutung, allerdings auch hier zunächst nur in Forschungsansätzen. Als Anwendungsschwerpunkt gilt hier die Montage von Bauteilen. Die einzelnen Forschungsziele der Arbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung von Telepräsenzsystemen mit den Schwerpunkten

- ergonomische Gestaltung der Operatorseite (PEER & Buss 2008, UNTERHINNINGHOFEN ET AL. 2008, MILBERG & PETZOLD 2005, ZAEH & Petzold 2005),
- Entwicklung von Eingabegeräten u. a. zur beidhändigen Interaktion (ZAEH ET AL. 2004B),
- multimodale Kommunikation zwischen Operator und Teleoperator über große Entfernung (HIRCHE ET AL. 2004, ANTON 2002, PREUSCHE & HIRZINGER 2000) bzw.
- produktionsgerechte und flexible Gestaltung der Teleoperatorseite (RADI ET AL. 2010B, REINHART ET AL. 2009A, REINHART ET AL. 2009B, KIM ET AL. 2001, CHANG ET AL. 1999, REINHART ET AL. 2000) und
- Entwicklung von Telepräsenzanwendungen für die Montage mit Industrierobotern (RADI ET AL 2010A, REINHART & RADI 2009, RADI & REINHART 2009, REINHART ET AL. 2008B),

Durch die demografische Entwicklung in den Industrienationen entsteht in Zukunft ein weiteres Einsatzfeld der Telepräsenz und Teleaktion. Da dann

erheblich mehr ältere Menschen mit reduzierten visuellen und sensomotorischen Fähigkeiten im produzierendem Sektor arbeiten werden als bisher (vgl. ZÄH ET AL. 2003B, LIPPERT 2000), können die Produktionssysteme durch den Einsatz von Telepräsenztechnologien den geänderten Bedienereigenschaften entsprechend angepasst werden. Am deutlichsten wird der Nutzen von Telepräsenzsystemen allerdings für die manuelle Mikromontage durch die Überwindung der offensichtlichen Telepräsenzbarriere zwischen der Makrowelt des Operators und der Mikrowelt des Teleoperators.

Der wohl entscheidende Unterschied zwischen den Montagevorgängen in der gewohnten, natürlichen Arbeitsumgebung des Operators und den Montagevorgängen in der Mikrosystemtechnik auf der Teleoperatorseite basiert auf den sog. Skalierungseffekten (engl. „scaling effects“, FEARING 1995). Diese beeinflussen alle Wechselwirkungen zwischen Handhabungs- und Fügewerkzeugen und den Mikrobauteilen und rufen für den Benutzer ein ungewohntes und unvorhersehbare Bauteilverhalten hervor (vgl. auch Abschnitt 2.2.3). Durch die Dominanz der Oberflächenkräfte gegenüber den Volumenkräften folgen Bauteile z. B. beim Öffnen eines Greifers nicht, wie für den Operator gewohnt, der Gravitation, sondern weisen Adhäsionskräfte mit den umgebenden Medien bzw. zufällige Ablöseerscheinungen von Oberflächen auf. Um diesen Skalierungseffekten entgegen zu wirken und die telepräsenten Montagevorgänge intuitiv bedienen zu können, spielt hier die Größenkompensation von Telepräsenzsystemen eine entscheidende Rolle. Aufgrund der Trennung der Operator- von der Teleoperatorseite können Prozesskräfte gezielt auf die unterschiedlichen, physikalischen Verhältnisse in der Makro- und Mikrowelt adaptiert werden. Neben der Repräsentation von ausgewählten, skalierten Prozessinformationen aus der Remote-Umgebung ist zudem eine realitätsnahe Überlagerung von den in der Makrowelt bekannten Volumenkräften möglich (YOKOKOSHIJI 1994, PETZOLD ET AL. 2004).

In der Mikromontage werden hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit, enge Toleranzfelder der Prozessparameter und eine sensible Handhabung der Mikrobauteile gefordert (vgl. Abschnitt 2.2.3.), welche i. d. R. die sensomotorischen Fähigkeiten des Bedieners übersteigen. Auf der Teleoperatorseite kommen deshalb am Aktionsort präzise Kinematiksysteme mit hohem Auflösungsvermögen und spezielle Werkzeuge für den Transport- und Positionierungsvorgang der meist oberflächensensitiven Mikrobauteile zum Einsatz. Die notwendigen Prozessinformationen aus der Remote-Umgebung, wie Fügekräfte, Greifkräfte und Abstandsinformationen müssen entsprechend den sensomotorischen Fähigkeiten des Bedieners aufbereitet, den Modalitäten ange-

passt und über geeignete Medien präsentiert werden. Durch diese mit Telepräsenz mögliche Größenkompensation können manuelle Mikromontageprozesse erheblich ergonomischer und effizienter gestaltet werden, wie erste Untersuchungen aufzeigen (ZÄH ET AL.2002).

Am offensichtlichsten wird der Nutzen von Telepräsenz in der Mikromontage jedoch durch die notwendige Kapselung von Mikromontageprozessen in Reinräumen und damit durch die räumliche Telepräsenzbarriere. Während der Handhabung und Prozessierung von Mikrosystemen sind erhebliche Anforderungen an die Prozessumgebung hinsichtlich Reinheit, Temperatur und Luftfeuchtigkeit notwendig, da bereit kleinste Verunreinigungen und Veränderungen der Prozessparameter zu Produktfehlfunktionen bzw. zu erheblichen Beeinträchtigungen der Montageprozesse führen können (GEIßINGER 1989). Daher ist jede Störung der Reinraumbedingungen durch die Anwesenheit eines Menschen zu vermeiden oder durch geeignete Maßnahmen wie spezielle Reinraumkleidung und Verhaltensanweisungen zu minimieren. Dies führt jedoch zu erheblichen Einschränkungen hinsichtlich der Arbeitsergonomie und letztendlich zu einer sinkenden Arbeitsleistung des Bedieners. Durch die distanzkompensierende Telepräsenz über die Reinraumgrenze kann die Arbeitsumgebung an einen ergonomisch gestalteten Operatorarbeitsplatz erheblich angenehmer gestaltet und damit die Arbeitsleistung des Operators gesteigert werden (ZÄH ET AL. 2006B).

#### 2.4.4 Analyse der Telepräsenztechnologie

Für die Montage hybrider Mikrosysteme wird das Potenzial eines Telepräsenzsystems als technische Basis einer anpassungsfähigen Anlagenarchitektur in folgenden technologischen und steuerungstechnischen Aspekten deutlich:

- Durch die Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie können manuelle Mikromontagevorgänge ergonomisch und flexibel gestalten werden (vgl. Abschnitt 2.4.3). Das in der Zielsetzung dieser Arbeit angedachte Mensch-Maschine-System für die Montage hybrider Mikrosysteme (vgl. Abschnitt 1.3) muss daher in seiner Grundstruktur einem Telepräsenzsystem gleichen. Für manuelle Tätigkeiten können so v. a. die sensormotorischen Anforderungen aus den präzisen und ungewohnten Mikromontageprozessen und die ergonomischen Anforderungen bzgl. der Mensch-Maschine-Interaktion erfüllt werden.
- Übergreifen über die Betriebsmodi eines adaptiven Anlagensystems werden durch ein Telepräsenzsystem alle Formen der Mensch-Maschine-

Interaktion von der aktiven Aufgabenart für den manuellen, telepräsenten Betriebsmodus bis zur passiv-monitiven Aufgabenart für den Automatikmodus ermöglicht. Somit ist die Basis geschaffen, die Anlage mengen- bzw. stückzahlflexibel und wirtschaftlich im optimalen Betriebsmodus zu betreiben.

- Im Hinblick auf die informationstechnische Einbindung der Sensorik- und Aktorikkomponenten auf der Teleoperatorseite stellt die flexible Steuerungsarchitektur eines Telepräsenzsystems die Grundlage dar, um auch autonome Funktionen für den automatisierten Betriebsmodus zu ermöglichen.

Neben diesen technologischen und steuerungstechnischen Gesichtspunkten bietet die Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie auch noch die Möglichkeit, die Anlage durch einfaches und intuitives telepräsenztes Vorführen der Prozessabläufe und damit ohne große Zusatzaufwände für Programmierung oder Parametrierung für den automatisierten Betrieb einzurichten. Die Voraussetzung dieser besonderen Form der impliziten Programmierung (vgl. Abschnitt 2.5.1) sind dabei die nicht unbedingt identischen, aber doch zumindest sehr ähnlichen Prozessabläufe im telepräsenten und automatisierten Betrieb. Die Einrichtung eines automatisierten Prozesses kann damit über die einmalige telepräsente Ausführung des Prozesses erfolgen.

## 2.5 Programmierverfahren

### 2.5.1 Überblick und Begrifflichkeiten

Für die wirtschaftliche Montage hybrider Mikrosysteme stellt neben dem flexiblen Einsatz von Hard- und Softwarekomponenten (vgl. auch Abschnitt 2.2.4, 2.3.4 und 2.4.4) v. a. die schnelle, einfache und standardisierte Programmierung der Montageabläufe eine entscheidende Grundlage dar. Durch die Programmierverfahren werden zum einen die Bahnplanungsparameter der Kinematiksysteme und zum anderen auch der Gesamtlauf der Handhabungs- und Fügeprozesse einschließlich aller Prozessparameter festgelegt. Abgeleitet vom Anlagenzustand während des Programmievorgangs werden die Programmiermethoden klassisch in die Online- und Offline-Verfahren unterteilen (SCHUMACHER 1991, S. 25). Während in der Online-Programmierung Benutzereingaben direkt über das Steuerungssystem im laufenden Betrieb erfolgen, werden Bewegungsprogramme

in der Offline-Programmierung an einem vom Kinematiksystem getrennten Rechner erstellt. Damit kann während des laufenden Anlagenbetriebs eine neue Montageaufgabe programmiert und in die Steuerung eingespielt werden (WECK 2001).

In der Analyse und Diskussion des Informationsaustauschs in Mensch-Maschine Systemen steht die Interaktion von Mensch und Maschine im Vordergrund. Daher werden die Verfahren in dieser Arbeit entsprechend dem Benutzerdialog während der Programmierung

- in explizite Programmierverfahren und
- in implizite Programmierverfahren

klassifiziert (siehe Abbildung 13). Explizite Verfahren, in denen der Steuerungscode über Befehlssätze strukturiert und sequentiell vorgegeben ist, werden weiter in textbasierte, grafische-strukturierte und grafisch-interaktive Programmierverfahren unterteilt. Implizite Programmiermethoden werden in vorführende, aufgabenorientierte und lernende Programmierung gegliedert:

Mit der weitesten Verbreitung in der Industrie ermöglicht die textbasierte Programmierung eine zeilenorientierte Darstellung der Befehlssätze des Roboterprogramms. Dieses beinhaltet neben den Basisbefehlen, Schleifen und Berechnungsalgorithmen der Bahnplanung auch technologiebezogene Funktionen wie Parametrier- und Kalibrierbefehle für bestimmte Prozessvorgaben. Trotz einer internationalen Normungsinitiative mit dem ursprünglichen Ziel einer einheitlichen Robotersprache IRL (Industrial Robot Language) existieren jedoch herstellerspezifisch eigene Programmiersprachen (z. B.: KLR der Fa. Kuka, BAPSplus der Fa. Bosch, V+ der Fa. Adept/Stäubli) mit individuellen Befehlssätzen für unterschiedliche Kinematiken. Ein flexibler Austausch von standardisierten Anlagenkomponenten ist damit immer mit zusätzlichem Programmieraufwand verbunden (BIGGS & MACDONALD 2003).

Die graphisch-strukturierte Programmierung ist eine übersichtliche und bedienerfreundliche Programmiermethode, in welcher die Programmerstellung unabhängig von der Syntax des herstellerspezifischen Roboterprogramms mit strukturierten Ablaufplänen erfolgt (DAMMERTZ 1996). Komplexe Programmstrukturen lassen sich somit auch für ungeübte Anwender leichter nachvollziehen und um neue Befehlssätze erweitern. Der eigentliche Programmcode wird während der Programmerstellung automatisch generiert. Trotz der sehr übersichtlichen Darstellung dieser logischen Ablaufpläne fehlt dem Benutzer das

Vorstellungsvermögen über die teils komplexen Kinematikbewegungen und Montageabläufe (GOTTSCHALD 2001).

In der graphisch-interaktiven Programmierung wird deshalb ein virtuelles Modell der Prozessumgebung einschließlich der Roboterkinematik verwendet, das die notwendigen Geometriedaten, die kinematischen Struktureigenschaften und die Steuerung abbildet (WESTKÄMPER 1994). Das Roboterprogramm wird dabei aus diesem Simulationsmodell abgeleitet und zunächst in einer simulierten Prozessumgebung visualisiert. Durch multimodale Interaktion und Kommunikation mit der Simulationsumgebung soll das Programmierverfahren weiter vereinfacht werden (DENKENA ET AL. 2005, LAY ET AL. 2001B). Markergetraktete Eingabegeräte ermöglichen über immersive, AR-unterstützte Verfahren zudem die intuitive Bedienbarkeit und die effiziente Erzeugung eines Programmcodes (GIESLER & DILLMANN 2003). Die direkte Übertragung des offline erzeugten Programmcodes auf die Realität setzt hierbei jedoch einen detailgetreuen und sehr aufwändigen Abgleich des Simulationsmodells mit den realen Gegebenheiten voraus.

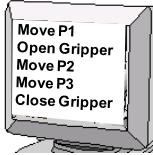
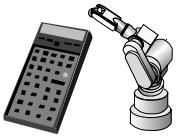
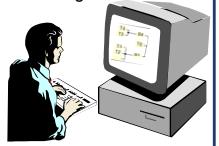
Programmierverfahren			
explizit		implizit	
textbasiert	grafisch-strukturiert	vorführend benutzergeführt	vorführend steuerungsgestützt
		 Roboterprogrammierung mittels AR-Verfahren	
grafisch-interaktiv	Offline-Programmierung in virtuellen Produktionsumgebungen	aufgaben-gestützt	lernend
			

Abbildung 13: Übersicht über Programmierverfahren klassifiziert nach Benutzerdialog mit exemplarischen Verfahrensbeispielen

Als ein Teil der vorführenden Verfahren wird in der benutzergeführten Programmierung (GOTTSCHALD 2001) die Handhabungs- oder Montageaufgabe entweder durch direkte Führung der Roboterkinematik oder durch Verwendung

von Hilfssystemen, z. B. eines kinematischen Ersatzmodells bzw. optischer, magnetischer und inertialer Positionsverfolgungssystemen, sog. Tracking-Systemen (WEIB 1989, NEUGEBAUER 1997), demonstriert. Durch Auslesen der Wegmesssysteme des Roboters oder der Messsysteme der eingesetzten Hilfsmittel werden die Positionen und Parameter der Bewegungsbahn punkt- oder bahnbasiert abgespeichert (sog. Teach-in oder Playback). Während des Programmervorgangs befindet sich der Programmierer entweder im realen oder im vollständig virtuell nachgebildeten Prozess- bzw. Produktionsbereich (VOYLES 1997). In einem intuitiven benutzergeführten Verfahren zeigen ZÄH ET AL. (2004A) das Potenzial von einer erweiterten und intuitiven Interaktionsmöglichkeiten des Bedieners mit dem zu programmierenden Robotersystem durch die Überlagerung von realer und virtueller Produktionsumgebung durch die Einsatz von Augmented Reality auf. Im Gegensatz zur benutzergeführten Programmierung stehen in der steuerungsgestützten Programmierung Bediener-schnittstellen zur Verfügung, durch welche eine Roboterbewegung von außerhalb des Arbeitsraums vorgegeben werden kann (REINHART ET AL. 2008A). Moderne und mobile Programmierhandgeräte der Roboterhersteller sind bereits mit ergonomischen Eingabegeräten zur Positions- und Bahnvorgabe, z. B. Joysticks oder SpaceMouse®, ausgestattet. Die Programmerstellung wird zudem durch die ergonomische Gestaltung der Benutzeroberflächen, durch eine einfache Benutzerführung und durch umfangreiche Programmier- und Editierhilfen optimiert.

In der aufgabenorientierten Programmierung wird die auszuführende Handhabungs- bzw. Montageaufgabe zunächst implizit in Teilaufgaben gegliedert und daraus dann in prozessnahe Anweisungen detailliert (WECK 1999). Die „Programmierkenntnisse“ fokussieren sich damit fast ausschließlich auf die Planungskompetenz und das Prozesswissen des Bedieners, welcher die Programmierung zudem mit seiner Entscheidungsfähigkeit unterstützt. Basis hierfür stellt wiederum ein Modell der Prozessumgebung dar, in dem der erzeugte Programmcode verifiziert werden kann.

Über zusätzliche Sensorsysteme und wissensbasierte Informationsverarbeitung kann die Programmerstellung in der lernenden Programmierung beschleunigt und abgesichert werden. Indem die Roboterkinematik bzw. das Anlagensystem bestimmte Anlagenzustände selbst erkennt, können Kalibrier- bzw. Parametrierabläufe bis hin zu gesamten Teilaufgaben eines Handhabungsprozesses entfallen, da sich die Roboterkinematik autonom auf einen geänderten Prozesszustand anpasst. Die Handhabungs- bzw. Montageaufgaben müssen der Anlage bei diesem Verfahren nicht mehr explizit über einzelne Detailanweisun-

gen mitgeteilt werden, sondern können über implizite Zustandbeschreibungen programmiert werden.

### 2.5.2 Analyse von Programmierverfahren

Für die steuerungstechnische Implementierung und Programmierung vorgegebener automatisierter Mikromontageprozesse (vgl. letzten Konfigurationsschritt für flexibel automatisierte Mikromontageanlagen in Abbildung 6) sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Festlegung der Bahnkurven für die Grobpositionierung der Montagepartner
- Festlegung der Bewegungsabläufe zur Feinpositionierung der Montagepartner über dem Fügeort
- Festlegung der notwendigen Prozessparameter, z. B. der maximal erlaubten Fügekräfte

Die Bahnkurven für die Grobpositionierung werden i. d. R. punktbasiert abgespeichert. Vorgegeben werden daher die Start- und Endposition anhand von Soll-Werten, da die genaue Endposition für die dann folgende Feinpositionierung nicht entscheidend ist. Ggf. sind auch noch Zwischenpositionen notwendig, sofern eine autonome Anlagenüberwachung z. B. zur Kollisionsvermeidung fehlt. Im Fall von kritischen Handhabungsprozessen oder sehr empfindlichen Bauteilen sind zudem weitere Parameter für die Bahndynamik wie z. B. die Begrenzung der Beschleunigungswerte zu definieren.

Im Gegensatz zur gesteuerten Grobpositionierung über Fixpunkte, deren Anfahrgenauigkeit von der Absolutpositionierung der Anlagenkomponenten abhängt, erfolgen die Bewegungsabläufe zur Feinpositionierung über eine Online-Regelung und über geeignete positionsvermessende Sensorsysteme. Daher sind für die Feinpositionierung nicht mehr Bewegungsbahnen bzw. deren Sollwerte, sondern Referenzwerte (Sollvorgaben) für den Regelkreis notwendig. Abhängig vom eingesetzten Messprinzip und der Sensordatenverarbeitung sind dies unterschiedliche Datensätze (z. B. Referenzbilder oder Referenzobjekte für eine Bildverarbeitung oder Vergleichsspannungen bei einem faseroptischen Sensor). Diese Informationen müssen für einen automatisierten Prozessablauf in der Anlagesteuerung abgespeichert sein. Für die Festlegung und Speicherung der sonstigen, die Fügeprozesse betreffenden Prozessparameter wie maximale Fügekräfte und Dosierparameter für Klebstoffe werden i. A. Variablen im Steue-

rungsprogramm hinterlegt, welche aufgabenspezifisch mit den jeweiligen, abgespeicherten Werten belegt werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen erfolgt die Programmierung eines automatisierten Mikromontagesystems daher über eine Kombination aus unterschiedlichen Programmierverfahren. Für die Vorgaben zur Grobpositionierung werden in der Mikromontage sowohl explizite als auch implizite Programmierverfahren angewandt. In einfach gestalteten Programmierschnittstellen ist die textuelle Programmierung immer noch stark vertreten. Diese wird jedoch immer mehr durch die grafisch-strukturierte Programmierung abgelöst. Moderne Systeme bieten auch grafisch-interaktive Programmieroberflächen. Nach der Festlegung der Bewegungsabläufe in einem virtuell nachgebildeten Raum ist hier allerdings aufgrund der Genauigkeitsanforderungen ein Verifikationsschritt und Plausibilitätsabgleich der Programmierung in der realen Prozessumgebung notwendig. Auf der Seite der impliziten Programmierverfahren wird bislang hauptsächlich die vorführende, steuerungsgestützte Programmierung verwendet, da diese für unterschiedliche Aufgaben flexibel anwendbar ist. Die Vorgabe von Referenzwerten für die Feinpositionierung wie auch für die Festlegung der Prozessparameter erfolgt i. A. über spezielle Benutzeroberflächen. Mit textuellen Eingaben oder Verweis auf entsprechend hinterlegte Datensätze können hier vorab ermittelte Kalibierwerte und Prozessparameter festgelegt werden.

Die vorführenden, benutzergeführten Programmierverfahren, d. h. die Ableitung von Prozesswissen aus manuellen Montagevorgängen und die parallele Sicherung für automatisierte Prozessabläufe, werden derzeit in der Mikromontage nicht eingesetzt. Die direkte manuelle oder auch die indirekte über Hilfsmittel gesteuerte Benutzerführung der Mikromontagekinematiken scheitert bislang an den geforderten Genauigkeitsanforderungen und an der erforderlichen Reinraumumgebung für die Mikromontageprozesse (vgl. Abschnitt 2.2). Durch die Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie ergeben sich jedoch hier neue Möglichkeiten, da die Vorteile eines Telepräsenzsystems nicht nur für die wertschöpfende manuelle Montage sondern auch für die Einrichtung von automatisierten Mikromontageprozessen genutzt werden kann. Indem ein manueller, telepräsenter Mikromontageprozess durchgeführt wird, ist es bei einer geeigneten Steuerungsstrategie und -architektur der adaptiven Mikromontageanlage grundsätzlich möglich, die im Telepräsenzsystem generierten Prozessinformationen auch für die Kalibrierung, Parametrierung und Programmierung eines automatisierten Prozessablaufes zu nutzen. Neben der dann möglichen Vorführung des Prozesses ergeben sich auch neue Ansätze, die Programmierung entweder aufgabenspezi-

fisch, d. h. unterteilt in Prozessbausteine, oder auch lernend, d. h. in Teilespekten autonom und dadurch für den Benutzer intuitiver durchzuführen. Die telepräsente Steuerungsprogrammierung stellt damit ein hybrides implizites Programmierverfahren dar.

### 2.6 Anforderungsprofil und Bewertungsschema

Aus den in Abschnitt 2.2 bis 2.5 vorgestellten Methoden und Technologien ergibt sich ein umfassender Anforderungskatalog für die Entwicklung und den Betrieb von adaptiven Mikromontagesystemen, aus dem ein zusammenfassendes Bewertungsschema im Sinne einer einfachen Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Systemlösungen abgeleitet wird (siehe Abbildung 14). Im Anforderungskatalog werden die Anforderungen zunächst in folgende kurz- bzw. langfristigen Flexibilitätsmerkmale geclustert:

- Produkt- bzw. Variantenflexibilität, d. h. die Fähigkeit, auf einem Montagesystem unterschiedliche Mikrobauteile bzw. Baugruppen zu verschiedenen Produkt(variant)en montieren zu können.
- Prozessflexibilität und -stabilität, d. h. die Fähigkeit, auf einem Montagesystem Produkte mit unterschiedlichen Montageoperationen prozessstabil und ausfallsicher zu fertigen.
- Mengen- bzw. Stückzahlflexibilität, d. h. die Fähigkeit eines Montagesystems, unter verschiedenen Auslastungsgraden und bei unterschiedlichen Fertigungsarten wirtschaftlich zu arbeiten.
- Einsatzflexibilität bzw. Umrüstflexibilität, d. h. die Fähigkeit eines Montagesystems, ein vorgegebenes Produktspektrum in beliebiger Reihenfolge zu montieren.
- Erweiterungs- bzw. Änderungsflexibilität, d. h. die Fähigkeit eines Montagesystems, sich an Anforderungen zukünftiger noch nicht bekannter Produkte und Montageszenarien anzupassen.

Den einzelnen Flexibilitätsmerkmalen sind jeweils mehrere Anforderungskategorien zugeordnet, welche wiederum die qualitativ bzw. quantitativ definierten Einzelanforderungen zusammenfassen.

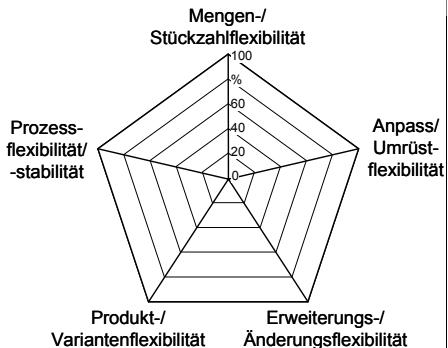
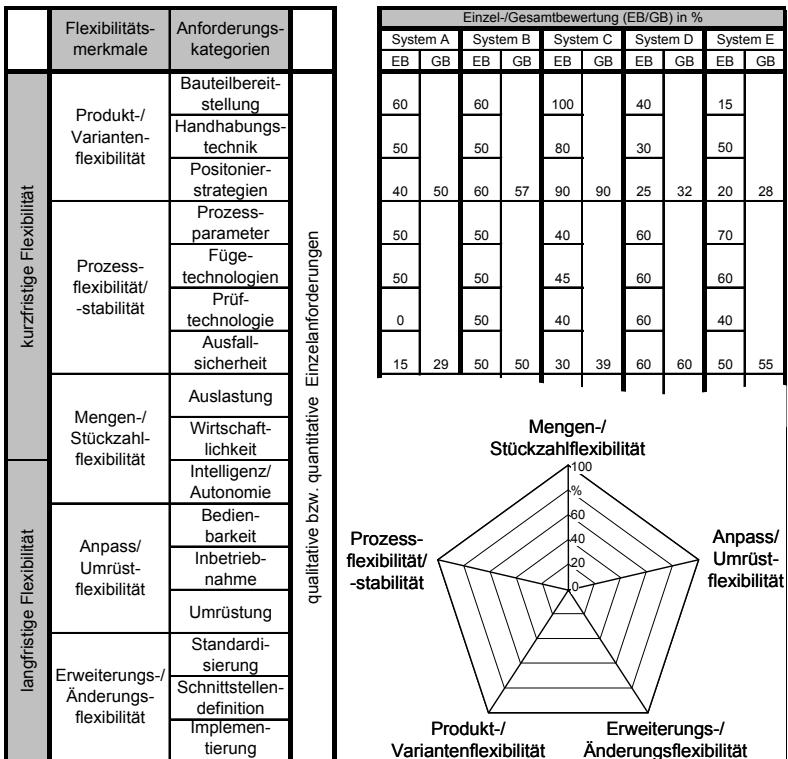


Abbildung 14: Anforderungskatalog (links) und Bewertungsschema (rechts) für adaptive Mikromontageanlagen

Die Produkt- und Variantenflexibilität umfasst damit alle Anforderungen, welche hauptsächlich die Bereitstellung, Handhabung und Positionierung unterschiedlicher Bauteile beeinflussen. Die Anforderungen spezifizieren daher alle Komponenten eines adaptiven Mikromontagesystems, welche eine direkte Schnittstelle zu den Mikrobauteilen aufweisen. Ebenso werden abhängig vom Produktspektrum die Montageszenarien und die notwendigen Positionierstrategien einschließlich der dafür notwendigen Werkzeuge bzw. Aktor- und Sensorsysteme definiert.

Unter der Prozessflexibilität und -stabilität werden alle Anforderungen bzgl. der notwendigen Füge- bzw. Prüfprozesse, der geforderten Prozessparameter bzw. der daraus abgeleiteten Anlagenparameter und der Ausfallsicherheit zusammengefasst. Somit sind sowohl die produktabhängige Prozessverkettung und -

technologien einschließlich der notwendigen Anlagenkomponenten, als auch die qualitätssichernden und störungsvermeidenden Methoden bzw. Verfahren und der dafür notwendigen Sensorkomponenten spezifiziert.

Unter der Mengen- und Stückzahlflexibilität werden Aspekte der Anlagenauslastung und des wirtschaftlichen Betriebs der Anlage für unterschiedliche Fertigungsarten definiert. Abhängig vom Produktspektrum und von den Fertigungsarten werden hier die Anforderungen hinsichtlich intelligenter Komponenten der Mikromontageanlage mit autonomen Funktionen gestellt.

Die Einsatz- und Umrüstflexibilität umfasst alle Anforderungen bzgl. der Anlagenbedienung, -inbetriebnahme und -umrüstung abhängig von der Fertigungsart bzw. abhängig vom Automatisierungsgrad der Anlage. Die Anforderungen beziehen sich hier hauptsächlich auf den manuellen, telepräsenten Betriebsmodus und definieren Aspekte bzgl. der intuitiven, ergonomischen und sicheren Interaktion zwischen Mensch und Maschine.

Die Erweiterungs- und Änderungsflexibilität bezieht sich auf die modulare Gestaltung des Anlagenaufbaus und der Steuerungsarchitektur, um die Anlage über das vorgegebene Produktpotential hinaus für weitere Veränderungen vorzubereiten. Hier werden die Anforderungen festgelegt, welche an Zusatzmodule zu stellen sind, um diese in die Anlagenarchitektur sowohl mechanisch wie auch steuerungstechnisch zu integrieren.

Aus den fünf Flexibilitätsmerkmalen leitet sich auch das Bewertungsschema für adaptive Mikromontageanlagen ab. Die Systeme werden anhand der Anforderungskategorien einzeln bewertet. Die Bewertungsskala reicht hier von 0% (sehr schlecht, Kriterium nicht erfüllt) bis 100% (sehr gut, Kriterium voll erfüllt). Aus dieser Einzelbewertung wird bei gleicher Gewichtung aller Einzelkriterien die Gesamtbewertung jedes Flexibilitätsmerkmals berechnet und in einem Netzdigramm aufgetragen (siehe Abbildung 14).

## 3 Stand der Forschung und Technik

### 3.1 Überblick

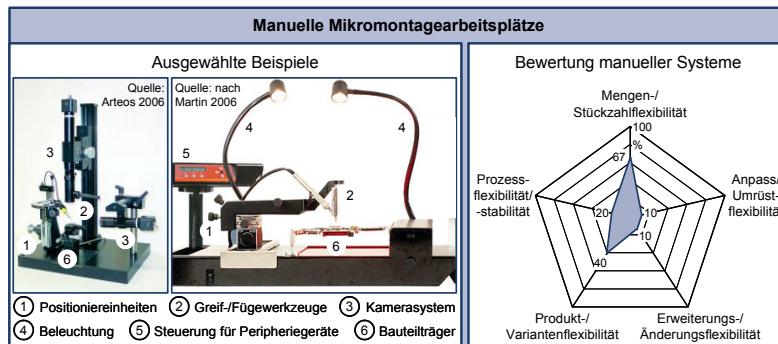
Abgeleitet von der allgemeinen Motivation und Zielsetzung der Arbeit (siehe Abschnitt 1.3) und aufbauend auf den in Kapitel 2 dargestellten Basistechnologien werden im Folgenden die existierenden Teillösungen und Systeme für die flexible und kostengünstige Montage hybrider Mikrosysteme in der Forschung und in der industriellen Praxis vorgestellt und analysiert. Die Analyse des Stands der Forschung und Technik schließt mit einer zusammenfassenden Auswertung und der Präzisierung der Aufgabenstellung.

### 3.2 Flexible Mikromontagesysteme

#### 3.2.1 Manuelle Mikromontagesysteme

Trotz der bisherigen Bemühungen in der Entwicklung von flexiblen und kosten-günstigen, automatisierten Mikromontagesystemen (siehe Abschnitt 3.2.3) zeigt sich im industriellen Umfeld, dass rein manuelle Tätigkeiten in der Montage von hybriden Mikrosystemen in kleinen und mittleren Stückzahlen immer noch sehr weit verbreitet sind (FATIKOW 2000). Die Überwindung der Skalierungseffekte (siehe Abschnitt 2.2.3) stellt die größte Herausforderung in der manuellen Bedienung von Mikromontageprozessen dar, welche aufgrund des notwendigen Prozessverständnisses hauptsächlich von geschulten technischen Fachkräften ausgeführt werden. Manuelle Mikromontagearbeitsplätze (ARTEOS 2006, MARTIN 2006) sind i. A. aus folgenden Komponenten aufgebaut:

- Positioniereinheiten zur Grob- und Feinjustierung der Montagepartner mit darauf fixierten Magazinen (Substraten) zur Bauteilbereitstellung,
- Werkzeuge zum Greifen, Manipulieren und Fügen der Bauteile (z. B. Pinzetten und Mikrogreifer, Dispenswerkzeuge, etc.),
- (Stereo-)Mikroskop bzw. hochauflösende Kamerasysteme zur (dreidimensionalen) Beobachtung des Montageprozesses und
- diverse Zubehör- und Peripheriegeräte.



*Abbildung 15: Beispiele von manuellen Mikromontagearbeitsplätzen und allg. Bewertung manueller Mikromontagesysteme anhand der für eine adaptive Mikromontagesystem definierten Bewertungsschemas (vgl. Abschnitt 2.6)*

Bei allen manuellen Mikromontagesystemen müssen Einschränkungen besonders bzgl. der Handhabung kleiner Bauteile, der Bedienbarkeit und der Prozessstabilität hingenommen werden. Aufgrund der geringen Bauteildimensionen und durch die notwendige Präzision in den Positionier- und Greifvorgängen werden bei allen Systemen die für den Bediener ergonomisch zumutbaren Grenzen während des manuellen Montagevorgangs schnell erreicht. Durch den Einsatz von mechanischen Hilfsmitteln z. B. durch Justagehilfen wird die Arbeitsbelastung zwar grundsätzlich gesenkt, reicht jedoch i. d. R. nicht aus, um eine manuelle Produktion in höheren Stückzahlen und eine kontinuierlich stabile Produktqualität über den Labormaßstab hinaus zu gewährleisten. Der große Dimensionsunterschied zwischen der miniaturisierten Prozesseite und der Bedienumgebung bedingt zudem sehr große mechanische Untersetzungen in den Handhabungseinrichtungen und Werkzeugen. Dies führt beim Bediener zu einer ungewohnten Hand-Auge-Koordination und zu einem eingeschränkten und meist unrealistischen Kraftempfinden z. B. von Prozesskräften. Auch die visuelle Beobachtung bzw. Darstellung der Prozesseite wird durch die stark vergrößernden Optiksysteme erheblich eingeschränkt, da wegen einer geringen Tiefenschärfe und wegen eines eingeschränkten Sichtfelds wichtige sensorische Informationen aus dem Montageprozess verloren gehen. Bei allen manuellen Mikromontageanlagen ist daher über einen längeren Zeitraum und bei größerem Produktionsaufkommen eine feinfühlige und reproduzierbare Handhabung der Mikrobauteile nur sehr begrenzt möglich (siehe auch Abschnitt 2.2). Trotz einer schon vor dem Durch-

bruch der Mikrosystemtechnik erarbeiteten Richtlinie zur ergonomischen Gestaltung manueller Mikromontagearbeitsplätze (REFA 1988) konnten diese grundsätzlichen Einschränkungen in der Bedienbarkeit manueller Mikromontagearbeitsplätze nicht vermieden werden.

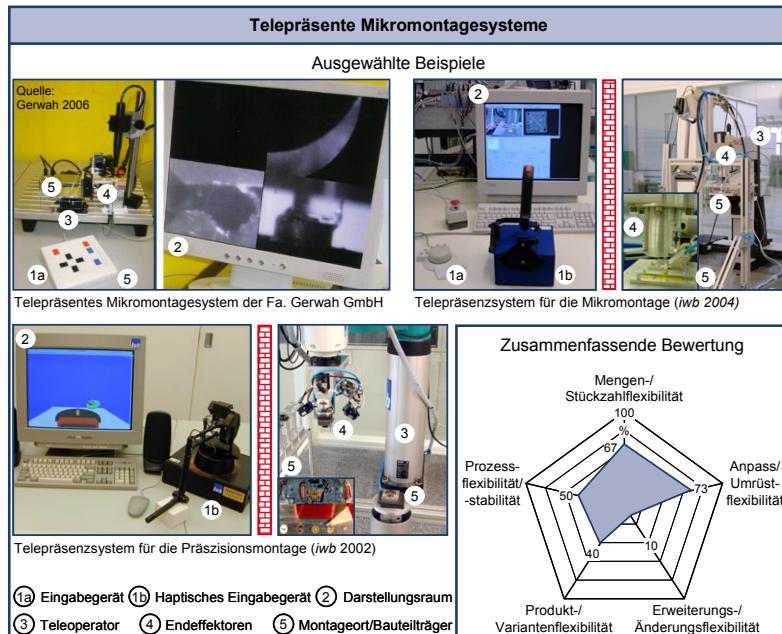
Obwohl damit erhebliche Einschränkungen bzgl. der Handhabungstechnik bestehen, zeichnen sich manuelle Systeme dadurch aus, dass sie mit einem vertretbaren Zeitaufwand auf neue Produkte umgerüstet werden können (Gesamtbewertung der Produkt-/Variantenflexibilität: 40%). Aufgrund der Defizite in der Prozessstabilität und der Fokussierung auf wenige Prozesstechnologien ergibt die Gesamtbewertung der Prozessflexibilität bzw. -stabilität ein nur ausreichendes Ergebnis (20%). Bezogen auf das Anwendungsfeld in der Einzelserie wird die Mengen- und Stückzahlflexibilität dagegen als gut (67%) eingestuft. Wegen der insgesamt unbefriedigenden Bedienbarkeit werden die Einsatz- bzw. Umrüstflexibilität und auch die Erweiterungs- und Änderungsflexibilität mit 10% nur gering bewertet.

### 3.2.2 Teleoperierte Mikromontagesysteme

Entgegen den bisherigen Ansätzen und Richtlinien, manuelle Mikromontagearbeitsplätze hinsichtlich der Bedienbarkeit ergonomisch zu optimieren, kann die Architektur und Gestaltung von Mikromontagesystemen im Hinblick auf eine intuitive Bedienung und auf einen effizienten Betrieb erst durch die dimensionskompensierende Telepräsenz grundlegend verbessert werden (siehe Abbildung 16, vgl. auch Abschnitt 2.4.3). Ein Teil der existierenden, teleoperierten Mikromontagesysteme in Forschung und Wissenschaft dienen als Versuchsplattformen, um wichtige Detailentwicklungen

- für die grundsätzlichen Möglichkeiten der telepräsenten und realitätsnahen Handhabung von Mikrobauteilen,
- in der Gestaltung von Telepräsenzsystemen für die Positionierung und Manipulation von Mikro- und Nanobauteilen,
- für die Steuerungsarchitektur von Telepräsenzsystemen und
- in der ergonomische Gestaltung der Operatorseite einer telepräsenten Mikromontageanlage

zu evaluieren. Produktionstechnische Fragestellungen und Anforderungen für eine wirtschaftliche Mikromontage (vgl. auch Abschnitt 2.6) werden in diesen Arbeiten nicht näher betrachtet.



*Abbildung 16: Beispiele von telepräsenten Mikromontagearbeitsplätzen und zusammenfassende Bewertung anhand der für eine adaptive Mikromontagesystem definierten Bewertungsschemas (vgl. Abschnitt 2.6)*

Um grundsätzlich eine realitätsnahe und intuitive Handhabung von Mikrobauteilen mit der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie zu ermöglichen, fokussieren sich YOKOKOHJI ET AL. (1994) auf die Entwicklung von Regelungstechnischen Ansätzen zur realitätsnahen Vermittlung der Steifigkeitswahrnehmung. Der Einfluss der Skalierungseffekte (vgl. Abschnitt 2.2.3) während der telepräsenten Handhabung von miniaturisierten Bauteilen wird hier jedoch nicht berücksichtigt. Diese störenden Effekte während einer Mikromanipulation werden am Beispiel von Adhäsionskräften eines Bauteils untersucht und soweit als möglich minimiert, um das ungewollte Anhaften von Bauteilen an einem sich öffnenden Greifer im telepräsenten Betrieb zu vermeiden (ZESCH & Fearing 1998). Durch die Verwendung von festgelegten Basisroutinen ist die telepräsente Bedienung übersichtlich, bleibt aber auf diese Basisfunktionen beschränkt. In den Arbeiten von CHANG ET AL. (1999) wird ein humanoider Teleoperator vorgestellt, mit dem

u. a. Mikrobauteile mit einer Kantenlänge von 100 µm intuitiv manipuliert werden können. Wegen der Beschränkung auf einen (YOKOKOHJI ET AL. 1994), zwei (CHANG ET AL. 1999) bzw. auf maximal drei Freiheitsgrade (ZESCH & FEARING 1998) ist eine flexible Nutzung dieser telepräsenten Versuchsplattformen für unterschiedliche Mikromontageaufgaben nur eingeschränkt möglich.

Weitere Arbeiten beschäftigen sich mit der Gestaltung von Telepräsenzsystemen für die Manipulation von Mikro- und Nanobauteilen. Auf der Teleoperatorseite werden hier spezialisierte und hochgenaue Greifwerkzeuge für die Manipulationsaufgaben bzw. Stereo-, Rasterelektronen- oder Rasterkraftmikroskope (sog. Atomic-Force-Mikroskope (AFM)) zur Beobachtung der telepräsenten Montageaufgabe eingesetzt (erste Arbeiten von SATO ET AL. 1993, MORISHITA & Hatamura 1994). Mit einem Greifwerkzeug von SAKAI ET AL. (2002) können Bauteile mit minimalen Abmessung bis zu 50 µm manipuliert werden, allerdings ist der Arbeitsraum des Manipulators mit 80 µm x 10 µm x 70 µm für produktionstechnische Anwendungen zu klein dimensioniert. Zudem ist die Immersion des Operators eingeschränkt, da nur visuelle Informationen aus der Prozessumgebung zurückgemeldet werden. Mit dem Einsatz eines Rasterkraftmikroskops auf der Teleoperatorseite können Objekte mit einer Kantenlänge von weniger als 10 µm bei einer Genauigkeit von wenigen Nanometern positioniert werden (SITTI & Hashimoto 1999). Die Immersion des Operators ist durch die damit mögliche Kombination von visueller und haptischer Rückmeldung sehr gut, allerdings ist eine produktionstechnischen Anwendung noch nicht vorhanden. Von ANDO ET AL. (2000) wird ein Telepräsenz- und Teleaktionssystem beschrieben, welches aus einer Parallelkinematik mit sechs Freiheitsgraden auf der Teleoperatorseite und auf der Operatorseite wahlweise aus einem am Markt erhältlichen oder aus einem selbst entwickelten, haptischen Eingabegerät mit jeweils sechs Freiheitsgraden besteht. Die Forschungsarbeiten fokussieren sich dabei auf die Entwicklung und Qualifizierung einer Parallelkinematik für Handhabungsaufgaben von miniaturisierten Bauteilen. Produktionstechnische Anforderungen, wie z. B. die flexible Integration von Greif- und Fügewerkzeugen sowie von Peripherieeinrichtungen zur Bauteilbereitstellung werden jedoch nicht untersucht.

Alle genannten Systeme stellen Speziallösungen im Forschungs- und Entwicklungsumfeld dar. Diese sind zwar technologisch für Mikromontageprozesse geeignet, jedoch unter produktionstechnischen Gesichtspunkten aufgrund der Gestaltung der verschiedenen Teleoperatoren zu unflexibel und wirtschaftlich nicht einsetzbar.

Neben Richtlinien und Methoden für die Gestaltung eines Telepräsenzsystems für Montageanwendungen fokussiert sich ANTON (2002) auf die Entwicklung und Umsetzung einer modularen und erweiterbaren Softwarearchitektur für Telepräsenzsysteme. Dies erfolgt mit der Zielsetzung, den Operator in Echtzeit und multimodal mit allen notwendigen Prozessinformationen zu versorgen. Damit wird der intuitive Telepräsenzbetrieb für die Präzisionsmontage gewährleistet (siehe Abbildung 16).

Andere Arbeiten beschäftigen sich mit unterschiedlichen Schwerpunkten in der Gestaltung der Operatorseite und der Einbindung einer Virtual-Reality-Umgebung (VR-Umgebung) in ein Telepräsenzsystem zur Planung, Visualisierung und Überwachung der Mikromontageaufgabe. Bei HAMDI & Ferreira (2004) stehen Berechnungsalgorithmen und die wirklichkeitsnahe Präsentation von Adhäsionskräften im Vordergrund. Die Einbindung einer VR-Umgebung in das Telepräsenzsystem ermöglicht zudem die Programmierung der Bahnkurven der Teleoperatorkinematik, bevor der Prozess ausgeführt wird. Die Kommandierung der Systeme zur Programmierung der Bahnkurven erfolgt entweder direkt über spezielle Eingabegeräte mit sechs Freiheitsgraden (SULZMANN ET AL. 1996) oder indirekt durch aufgabenorientierte Programmierung. Hier werden die Positionsänderungen über „Click & drag“-Befehle in der VR-Benutzerschnittstelle vorgegeben und danach über die VR-Simulation in Verfahrbefehle umgesetzt (ALEX ET AL. 1998). Nachdem der Teleoperator die Montageaufgabe dann zeitlich versetzt ausgeführt hat, wird das VR-Modell aktualisiert. Eine Echtzeitsteuerung ist bei diesen Mikromontagesystemen daher nicht möglich. KUNSTMANN (1999) zeigt die Notwendigkeit einer geeigneten Mensch-Maschine-Schnittstelle auf, welche die große SkalierungsbARRIERE überwindet. In dessen Telepräsenzsystem ist neben einem Teleoperator mit drei translatorischen Freiheitsgraden und einem rotatorischen Freiheitgrad auch ein in drei Raumrichtungen kraftrückkoppelndes Eingabegerät integriert. Optisch wird die Teleoperatorseite über ein Kamerabild dargestellt, dessen Blickwinkel über ein spezielles Eingabegerät telepräsent verstellt werden kann. Haptisch werden dem Operator sowohl die zwischen den Greiferspitzen gemessenen Greifkräfte als auch die während des Fügevorgangs auftretenden Fügekräfte skaliert ausgegeben. Durch eine zusätzliche Skalierung der Bewegungen zwischen Eingabegerät und Kinematik im Teleoperator wird damit ein realitätsnaher Eindruck des Montagevorgangs an den Operator vermittelt. Sowohl die Steuerungssoftware als auch der Aufbau der Teleoperatorseite behindern jedoch einen flexiblen Einsatz des Telepräsenzsystems für die Mikromontage.

Sowohl in Forschung und Wissenschaft als auch in Ansätzen in der industriellen Entwicklung werden teleoperierte Mikromontagesysteme eingesetzt, welche nach produktionstechnischen Gesichtspunkten entwickelt wurden. Die in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Vorteile der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie zeigen sich in einem telepräsenten Mikromontagesystem für die Einzelfertigung von SCHILP ET AL. (2004). In diesem wurde die multimodale Operatorinteraktion mit der Mikromontageumgebung mit Hilfe eines Multisensorsystems auf der Teleoperatorseite umgesetzt (siehe Abbildung 16). Das Telepräsenzsystem weist zwar eine modulare Gestaltung sowohl auf der Operator- und Teleoperatorseite wie auch in der Steuerungsarchitektur auf, ist jedoch nicht für einen adaptiven prozessflexiblen Betrieb geeignet. Neben den beschriebenen Forschungsplattformen werden bereits kommerzielle, manuell fernsteuerbare Mikromontagesysteme angeboten (OLYMPUS 1999, KLOCKE 2005, GERWAH 2006). Der Immersionsgrad ist jedoch bei diesen Systemen gering, da hauptsächlich einfache Eingabegeräte wie eine herkömmliche Maus, spezielle Tastaturen, Joysticks oder simple Bedienelemente verwendet werden und die Informationsrückgabe aus der Prozessumgebung nicht multimodal erfolgt.

Übergreifend über alle telepräsenten Mikromontagesysteme ist festzustellen, dass die Bedienbarkeit und die Inbetriebnahme neuer Prozesse durch eine verbesserte Immersion des Operators in die Prozessumgebung erheblich optimiert werden. Die Einsatz- bzw. Umrüstflexibilität ist deshalb im Vergleich zu manuellen Mikromontagesystemen erheblich höher einzustufen (73%). Durch die meist proprietären Steuerungsarchitekturen der Telepräsenzsysteme ist jedoch eine Erweiterung um neue Anlagenkomponenten nur mit erheblichem technischen und zeitlichen Aufwand möglich (Bewertung der Erweiterungs- und Änderungsflexibilität: 20%). Bzgl. der kurzfristigen Flexibilitätsmerkmale werden nur die Telepräsenzsysteme bewertet, welche nach produktionstechnischen Gesichtspunkten entwickelt wurden (ANTON 2002, SCHILP ET AL. 2004, OLYMPUS 1999, KLOCKE 2005, GERWAH 2006). Die Mengen- und Stückzahlflexibilität (67%) wie auch die Produkt- und Variantenflexibilität (40%) wird ähnlich zu den manuellen Mikromontagesystemen eingestuft. Die modular aufgebauten Anlagen sind über geeignete Schnittstellen für den jeweils vorgesehenen Stückzahlbereich in der Einzel- und Kleinserie bzw. für das angedachte Produktpotential hinreichend flexibel ausgelegt. Aufgrund der systemimmanenten Überwachung der Prozesse durch den Menschen oder das System selbst wird die Prozessflexibilität und -stabilität als befriedigend (50%) eingestuft.

#### 3.2.3 Automatisierte Mikromontagesysteme

Aufgrund der Marktanforderungen und der Stückzahlentwicklung hybrider Mikrosysteme (vgl. Abschnitte 2.2.2 und 2.2.3) wurden flexible und automatisierte Anlagensystem für die Mikromontage im kleinen und mittleren Stückzahlbereich meist in enger Kooperation von Forschung und Industrie entwickelt. Diese Anlagen bestehen alle aus verschiedenen modularen Komponenten und Werkzeugen (GAUGEL ET AL. 2004, RIZZI ET AL. 1997, HOFMANN ET AL. 2003, EBERHARDT ET AL. 2000, FLEISCHER ET AL. 2005, HÖHN 2001, VDI 2001, HESSELBACH ET AL. 2006). In der Entwicklung dieser Systeme wurden i. A. sowohl Basistechnologien wie eine effiziente Prozessverkettung und verschiedene Positionierstrategien als auch Basismethoden der Modularisierung, der Standardisierung, der Inbetriebnahmestrategien und der Netzwerkbildung berücksichtigt (vgl. auch Abschnitt 2.2.4). Damit weisen die aufgelisteten Anlagensysteme die kurzfristigen Flexibilitätsmerkmale

- Produkt- und Variantenflexibilität,
- Prozessflexibilität und -stabilität und
- teilweise der Mengen- und Stückzahlflexibilität

auf. Eine analoge Grundarchitektur weisen dabei die Mikromontagesysteme von GAUGEL et al. (2004) und RIZZI ET AL. (1997) auf, deren Hauptkinematik in den horizontalen Freiheitsgraden x und y mit einem planaren Lineardirektantrieb realisiert ist. Der Einsatz des sog. Planarsystems, auf dem sog. Läufer als Bau teilräger die verschiedenen, an die Montageaufgabe angepassten Prozessstationen in beliebiger Sequenz anfahren können, bildet die technologische Basis für die unterschiedlichen Flexibilitätsmerkmale (siehe Abbildung 17). Die Produkt- und Variantenflexibilität kann hier über unterschiedliche Bauteilaufnahmen auf den Läufern bzw. auch durch den Einsatz verschiedener Handhabungs- und Greifsysteme in den jeweiligen Prozessstationen erreicht werden. Für die Montageszenarien 1. und 2. Art ausgelegt, können allerdings Montageszenarien 3. Art nur durch eigene Handhabungsmittel und Kinematikstrukturen in den Prozesstationen realisiert werden. Da die Prozessstationen für unterschiedliche Fügetechnologien und Prüfverfahren über vorbereitete Schnittstellen am Rand des Planarsystems schnell in das Mikromontagesystem integriert werden können, wird ein hoher prozessflexibler Einsatz des Systems gewährleistet. Die Hauptkinematik ermöglicht auch eine Parallelisierung der Prozesse und damit eine Anpassung der Anlagenkapazität an unvorhergesehene Stückzahl Schwankungen. Hierzu sind allerdings dann Duplikate der Prozessmodule vorzuhalten.

Im Gegensatz zu diesen Systemen werden in anderen modularen Mikromontagesystemen u. a. aus Kostengründen alternative, am Markt verbreitete Präzisionskinematiken eingesetzt. In diesen Systemen stehen unterschiedliche Ansätze zur flexiblen Werkzeug- und Bauteilträgergestaltung für die Umsetzung von sensorbasierten Positionier- und Montagestrategien im Fokus der Entwicklung. So setzen HOFMANN ET AL. (2003) und EBERHARDT ET AL. (2000) modular aufgebaute Werkzeugsystem mit einem an die Werkzeugmaschinenindustrie angelehnten Revolveraufbau ein, während HÖHN (2001) einen zylindrischen Aufbau des Werkzeugsystems bevorzugt. Die einzelnen Werkzeuge (Endeffektoren) können an diese flexiblen Werkzeugsysteme über spezielle Schnittstellen fixiert werden. Die genannten Systeme weisen daher sowohl produkt- als auch prozessflexible Gestaltungsmerkmale auf, da sowohl unterschiedliche Handhabungs- und Greifmodule für das Montageszenario 1. und 2. Art als auch unterschiedliche Prozesstechnologien über geeignete Endeffektoren in das standardisierte Werkzeugsystem integriert werden können. Um auch das Montageszenario 3. Art in die Anlagen zu integrieren, bedarf es allerdings zusätzlicher Kameras und Kinematiksysteme.

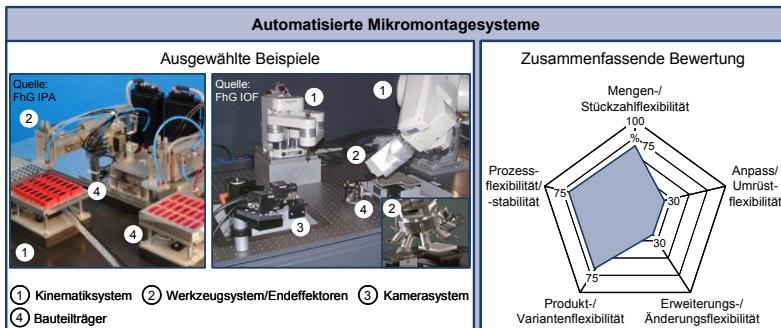


Abbildung 17: Beispiele von automatisierten Mikromontagesystemen und Bewertung anhand der für ein adaptives Mikromontagesystem definierten Bewertungsschemas (vgl. Abschnitt 2.6)

Mit einer modularen Plattform zur Aufnahme der kompletten Montageinfrastruktur stellen FLEISCHER ET AL. (2005) einen Baukasten für unterschiedliche Prozesstechnologien zur Verfügung. Dieser stellt die Grundlage für ein industriell eingesetztes System der Fa. Häcker Automation GmbH (HÄCKER 2006) dar. Das automatische Mikromontagesystem für mittlere Stückzahlen vereinigt die kurzfristigen Flexibilitätsmerkmale durch die Kombination aller Montageszenarien

und optional auch einer Vielzahl von Fügetechnologien in einem System, bietet aber nur eingeschränkt Erweiterungsmöglichkeiten hin zur Einzel- bzw. Kleinserienfertigung. Die Systeme der Fa. Amicra Microtechnologies GmbH (AMICRA 2006) weisen grundsätzlich ein analoges Layout auf, können jedoch wahlweise für den kleinen und mittleren Stückzahlbereich konfektioniert werden.

Für alle Anlagen der automatisierten Mikromontage stehen die Produkt- und Variantenflexibilität, die Prozessflexibilität und -stabilität und die Mengen- und Stückzahlflexibilität im Vordergrund der Entwicklungen. Daher sind diese Systeme auch zusammenfassend mit einer guten Bewertung (75%) zu versehen. Nachteile weisen diese Systeme in der Einsatz- und Umrüstflexibilität (30%) und der Erweiterungs- und Änderungsflexibilität (30%) auf, da der Betrieb dieser Systeme in anderen Fertigungsarten nur eingeschränkt möglich ist. Zudem sind Änderungen in der Anlagentechnik meist nur durch erheblichen technischen Aufwand umsetzbar.

#### 3.2.4 Adaptive Ansätze

In der Entwicklung flexibler Mikromontagesysteme gibt es auch einige Ansätze, um die bislang noch unzureichend berücksichtigten Flexibilitätsmerkmale der Einsatz- bzw. Umrüstflexibilität und der Erweiterungs- bzw. Änderungsflexibilität (vgl. Abschnitt 2.6) zu realisieren. Grundsätzlich lassen sich hier

- anlagentechnische bzw. den Anlagenaufbau betreffende Lösungen,
- intelligente Steuerungsarchitekturen bzw. Inbetriebnahmestrategien und
- intelligente Kombinationen von Betriebsmodi bzw. neue Betreibermodelle eines Mikromontagesystems

unterscheiden. Die den Anlagenaufbau betreffenden Lösungen umfassen i. A. Komponenten eines flexiblen Mikromontagesystems, welche auch in anderen Fertigungsarten und damit in anderen Betriebsmodi eines Anlagensystems zum Einsatz kommen können. Im Zusammenhang mit der Entwicklung eines flexiblen, automatisierten Mikromontagesystems für die sog. Flip-chip-Montage (Montageszenario 3. Art) stellt JACOB (2002) ein spezielles Optikmodul vor, welches auch für manuelle Flip-chip-Montagevorgänge eingesetzt werden und damit das Mikrosystem über den Produktlebenszyklus begleiten kann. Mit einem Baukasten aus unterschiedlichen sog. adaptierbaren Prozessmodulen kann im Mikromontagesystem der Fa. MiLaSys Technologies GmbH (MILASYS (2006)) der Betriebsmodus z. B. von manuellen Tätigkeiten auf automatisierte Vorgänge

gewechselt werden, ohne die Prozesstechnologie ändern zu müssen. Somit kann das Prozesswissen über den Produktlebenszyklus hinweg in die verschiedenen Fertigungsarten transferiert und gesichert werden. Allerdings muss das Anlagen- system bei einem Wechsel des Betriebsmodus immer neu eingerichtet werden. Ein Übergang zwischen den Betriebsmodi ist damit nicht ohne Produktionsunterbrechung möglich.

Intelligente, agentenbasierte Steuerungsarchitekturen mit speziellen Funktionen für die autonome Anmeldung und Selbstkonfiguration neuer Anlagenmodule stellen die Basis für anpassungsfähige, automatisierte Mikromontagesysteme dar. Um v. a. die Einsatz- und Umrüstflexibilität durch Reduzierung der Anlagennebenzeiten zu erhöhen, werden aufwändige und zeitraubende Programmierarbeiten vermieden, indem Anmelde- und Konfigurationsroutinen in der Steuerungsarchitektur nach der hardwareseitigen Integration neuer Funktionsmodule automatisch aufgerufen werden (QUAID & RIZZI 2000, BENGEL ET AL. 2003). In einem anderen Ansatz zur Reduzierung der Nebenzeiten wird die Inbetriebnahme eines Kraftrastermikroskops (AFM) zur Nanomanipulation durch einen visuell ferngesteuerten Programmiermodus für die Grobpositionierung und einen kraftgesteuerten Programmiermodus für die Feinpositionierung erleichtert (KIM ET AL. 2002a, KIM ET AL. 2002b). Die Immersion des Bedieners ist hier allerdings sehr gering, so dass nach Definiton nicht von einer telepräsenten Programmierung gesprochen werden kann. Die Aufzeichnung eines Einpressvorgangs eines Bolzens in eine Bohrung und die Speicherung der entsprechenden Bewegungsparameter für nachfolgende Prozesse wird in einem weiteren Montagesystem von JONES ET AL. (2002) vorgestellt.

Die Kombination unterschiedlicher, aufgabenabhängiger Betriebsmodi ermöglicht eine durchgängige Nutzung eines Mikromontagesystems für unterschiedliche Produktionsszenarien und eine große Bandbreite hinsichtlich der aktiven aber auch passiv-monitiven Prozessführung durch den Menschen (FERREIRA & HIRAI 2002, ZOU ET AL. 2002, CODOUREY ET AL. 1997). In der Mikromontageanlage von FERREIRA & HIRAI (2002) (einem sog. desktop micro device) kann die Prozessführung von einem manuellen Steuerungsmodus (sog. shared control), über eine geführte Prozesssteuerung (sog. traded control) bis hin zu einem autonomen Betrieb variiert werden. Die Interaktion des Menschen mit dem Prozess bzw. mit der Maschine über den viuellen Sinneskanal ist allerdings nicht optimal ausgelegt. So fehlt z. B. die haptische Rückkopplung.

Die anderen oben genannten Systeme kombinieren die manuelle Prozessführung für die unkritischen Prozesse mit der automatischen Prozessführung für die kritischen Mikromontageprozesse. Im Telepräsenzsystem von CODOUREY ET AL. (1997) steuert der Operator über ein spezielles Eingabegerät mit sechs Freiheitsgraden alle Kinematiken auf der Teleoperatorseite eigenhändig. Im sog. Automatikmodus reduziert sich diese Interaktion auf aufgabenorientierte Anweisungen, wie „Pick object“, „Place object“ o. ä.. Der Teleoperator führt dann die Prozesse über einen durch Echtzeitbildverarbeitungsalgorithmen geschlossenen Regelkreis und unter Überwachung des Operators aus. Auf Grundlage der flexiblen, automatisierten Mikromontagesysteme sind zudem Betreibermodelle von Montageanlagen in Netzwerken entstanden. Dabei werden die flexiblen Komponenten den Netzwerkpartnern zur Verfügung gestellt, um den Firmen der Mikrosystemtechnik die kostengünstige Fertigung ihre Produkte zu ermöglichen (DICKERHOF & GENGEBACH 2006).

### 3.3 Auswertung des Stands der Technik

Durch die Fokussierung des Marktumfelds hybrider Mikrosysteme auf ein breites Spektrum an Produkten und Produktvarianten im kleinen und mittleren Stückzahlbereich ist die Produktion dieser Produkte und Produktkomponenten durch eine stark heterogene Produktionsfolge hinsichtlich Stückzahlen, Füge- und Greiftechnologien und Montageszenarien geprägt (vgl. auch Abschnitt 2.2). Abgesehen vom hohen Planungsaufwand und unterschiedlichen Bereitstellungsstrategien der Vielzahl an Bauteilen und Komponenten bedingt dieser Sachverhalt flexible Prozesstechnologien und Anlagenkonzepte. Manuelle Mikromontagesysteme bieten hier allerdings nur eingeschränkte technologische Voraussetzungen hinsichtlich der Anlagenarchitektur und der Steuerungstechnik, um diese v. a. hinsichtlich der Bedienung, Handhabung und Prozessstabilität zu optimieren. Deshalb werden manuelle Systeme im Folgenden nicht mehr betrachtet, da diese durch telepräsente Mikromontagesysteme adäquat substituiert werden können.

Übergreifend über die unterschiedlichen Arten von flexiblen Mikromontagesystemen fokussieren sich bisherige Ansätze auf modular aufgebaute Fertigungs- und Montagesysteme mit standardisierten Schnittstellen. Damit kann das Anwendungsfeld der jeweiligen Systeme durch eine Erweiterung der kurzfristigen Flexibilitätsmerkmale auch auf andere Fertigungsarten ausgedehnt werden. In

ersten Ansätzen werden zudem durch neuen Programmier- bzw. Inbetriebnahmestrategien und durch neue Betreibermodelle auch die Anwendungsbereiche von automatisierten Mikromontageanlagen in Richtung kleinerer Stückzahlen und einem heterogenen Produktpool erweitert (vgl. auch Abschnitt 2.2.4). Die zusammenfassende Bewertung der unterschiedlichen Ansätze für die flexiblen, telepräsenten und automatisierten Mikromontageanlagen zeigt unterschiedliche Charakteristika in den Bewertungsschemata (siehe Abbildung 18), aus denen sich auch die Handlungsbedarfe ableiten lassen.

Telepräsente Mikromontagesysteme sind v. a. im Hinblick auf die Erweiterungs- bzw. Änderungsflexibilität, aber auch hinsichtlich der Produkt- und Prozessflexibilität zu optimieren. Wie bereits erste Ansätze in der Forschung aufzeigen, kann dies durch eine ergonomische, intuitive Bedienung für Programmier- und Rüstvorgänge erreicht werden.

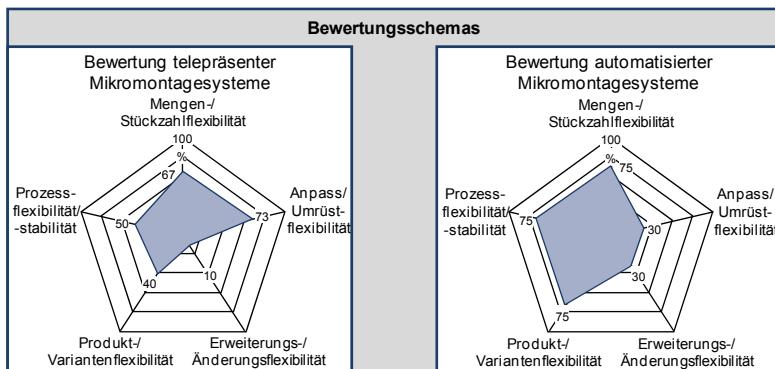


Abbildung 18: Überblick über die Bewertung des Stands der Forschung und Technik

In automatisierten Mikromontageanlagen zeigen sich die Defizite v. a. in der Erweiterungs- bzw. Änderungsflexibilität und in der Einsatz- und Umrüstflexibilität. Derzeitige Systeme schränken den durchgängigen und damit kostengünstigen Einsatz eines Anlagensystems für Anwendungen in unterschiedlichen Fertigungsarten und Produktionsszenarien zu sehr ein.

#### 3.4 Präzisierung der Aufgabenstellung

Aus den in Abschnitt 3.4. dargestellten Defiziten des Stands der Forschung und Technik kann die Zielsetzung der Arbeit weiter präzisiert werden: Ziel ist es, eine Anlagenarchitektur zu entwickeln, welche die bekannten Flexibilitätsmerkmale bzgl. Varianten, Produkttypen und Stückzahlen aufweist und sich adaptiv an unterschiedliche Fertigungsarten anpassen kann (vgl. Abschnitt 1.3). Hierzu werden folgende Hauptziele definiert:

- Entwicklung einer **adaptiven Montagestrategie** auf Basis der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie zur durchgängigen Nutzung einer Montageanlage in verschiedenen Betriebsmodi
- Entwicklung von Methoden für das **telepräsente Programmieren** von automatisierten Anlagen
- Entwicklung **universell einsetzbarer Aktor- und Sensorkomponenten** für die adaptive Nutzung in unterschiedlichen Betriebsmodi
- **Entwicklung, prototypische Umsetzung und technisch-wirtschaftliche Bewertung eines adaptiven Mikromontagesystems** auf Basis der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie. Die Anlage soll die herkömmlichen Flexibilitätsmerkmale bzgl. Varianten, Produkttypen und Stückzahlen aufweisen und zudem in unterschiedlichen Betriebsmodi betrieben werden können, um den Automatisierungsgrad an unterschiedliche Produktions-szenarien optimal anzupassen.

## 4 Entwurf eines adaptiven Mikromontagesystems

### 4.1 Entwurf einer adaptiven Mikromontagestrategie

Abgeleitet aus den Hauptzielen der Arbeit (vgl. Abschnitt 3.4) basieren das Grundkonzept und die Konfiguration des hier zu entwickelnden Mikromontagesystems auf einer adaptiven Mikromontagestrategie (siehe Abbildung 19). Angelehnt an die Phasen der allgemeinen Produktentwicklungsmethodik (PAHL ET AL. 2005) wird in dieser Montagestrategie zum einen das Entwicklungsvorgehen der einzelnen Funktionsmodule detailliert. Zum anderen gilt es, die methodischen Grundlagen für eine über die Fertigungsarten übergreifende Konfiguration und Nutzung des Anlagensystems darzustellen und sicherzustellen. Nach dem Entwurf einer grundlegenden Anlagenarchitektur aus dieser Mikromontagestrategie folgt in den weiteren Abschnitten die Konzeption der einzelnen Teilsysteme der adaptiven Mikromontageanlage.

Den Ausgangspunkt der Entwicklung und Konfiguration von adaptiven Mikromontagesystemen stellt das bereits beschriebene Marktumfeld hybrider Mikrosysteme (vgl. Abschnitt 2.2) dar. Die ausführliche Produkt- und Prozessanalyse der herzustellenden Produkte muss daher analog zur Planung und Konfiguration von flexiblen Mikromontagesystemen durchgeführt werden (vgl. Abbildung 6 oben). Die Basis ist ein Portfolio an Produkten und Produktvarianten mit unterschiedlichen Stückzahlen und Produktstrukturen. So sind zum einen aus diesen Produktstrukturen und Montagevorrägen die unterschiedlichen Montageoperationen und Montageszenarien und zum anderen aus den Stückzahlvorgaben die Verteilung der Fertigungsarten abzuleiten (siehe Abbildung 19 oben).

Aus den abgeleiteten Montageoperationen und Montageszenarien werden in der Konzeptphase der adaptiven Mikromontagestrategie für alle Produkte und Produktvarianten zum einen die einzelnen Prozesstechnologien hinsichtlich ihrer Anforderungen und Funktionen ausgewählt. Zum anderen können auch auch die erforderlichen Positionierstrategien einschließlich der dafür notwendigen Aktor- und Sensorkomponenten bestimmt werden. Im Gegensatz zu den Flexibilisierungsansätzen automatisierter Mikromontagesysteme nach dem Top-Down-Ansatz (vgl. Abschnitt 3.2.3), in denen zunächst für die Mittelserienfertigung entwickelte Anlagen soweit umzukonfigurieren sind, dass diese auch in der Einzel- oder Kleinserienfertigung eingesetzt werden können, wird hier nun ein

gegenläufiger Ansatz verfolgt: Unter Berücksichtigung der Mensch-Maschine-Interaktion und der Einführung von zwei neuen Basistechnologien – der Telepräsenztechnologie (vgl. Abschnitt 2.4) und der Systemergonomie (vgl. Abschnitt 2.3) – kann das Anlagenkonzept beliebig an unterschiedliche Fertigungsarten angepasst werden. Beginnend beim aktiven Prozesseingriff für manuell gesteuerte Prozesse der Einzelserie unter Verwendung von Telepräsenz- und Teleaktions-technologie werden die anpassungsfähigen Funktionseinheiten system-ergonomisch auch für den automatisierten Betrieb in der Klein- und Mittelserie ausgelegt. Neben einem übergreifenden Anforderungskatalog ergeben sich auf Grundlage der Basistechnologien unterschiedliche Funktionsstrukturen und Lösungskonzepte für die adaptiven Funktionseinheiten der Mikromontageanlage.

In der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase werden dann ausgewählte Konzepte detailliert und in einem sog. Baukasten adaptiver Funktionseinheiten integriert. Analog zum Aufbau eines Telepräsenzsystems (vgl. Abbildung 11) lässt sich dieser Baukasten zunächst in die Teleoperatorseite mit den Teilsystemen Kinetik und Teleoperatoren, Werkzeugsysteme und Endeffektoren sowie Bauteilträger und Aktionsort bzw. in die Operatorseite mit dem Teilsystem Bedienerschnittstellen untergliedern. In den klassifizierten Baukästen können die einzelnen Konzepte bzw. Funktionseinheiten vollständig eingeordnet werden. Um die genannten Teilsysteme der Teleoperator- und Operatorseite informationstechnisch zu verbinden, müssen die einzelnen Funktionseinheiten standardisierte Schnittstellen zu den zwei weiteren übergreifenden Teilsystemen des Baukastens – d. h. zum Multisensorsystem und zum Steuerungssystem – aufweisen. Die Zielsetzung der adaptiven Mikromontagestrategie ist am Ende der Entwicklungsphase daher nicht eine betriebsbereite Montageanlage für einen bestimmten Betriebsmodus, sondern eine strukturierte Bereitstellung anpassbarer Einzelkomponenten, welche informationstechnisch über ein Multisensorsystem und ein Steuerungssystem auf Basis der Telepräsenztechnologie verbunden werden können.

Die einzelnen Funktionsbausteine werden damit erst in der Betriebsphase passend zum aktuell vorliegenden Produktionsszenario ausgewählt und zu einer Mikromontageanlage konfiguriert. Neben dem Baukasten adaptiver Funktionsmodule stellt die Steuerungsstrategie die methodische und technische Grundlage zur Rekonfiguration und Nutzung der Anlage in verschiedenen Betriebsmodi dar. Der erste Montagevorgang im Produktanlauf wird danach im zuvor konfigurierten Anlagensetup zunächst manuell bzw. telepräsent ausgeführt, um die notwendigen Parameter für die Prozessdurchführung mit einem vorführenden

Programmierverfahrens einzustellen und abzuspeichern. Durch diese standardisierte Programmierung der Anlage unter Einsatz der Telepräsenztechnologie muss die Wahl eines Betriebsmodus der Anlage nicht schon während der Entwicklungsphase getroffen, sondern kann bis zum Serienanlauf offen gehalten werden. Damit lassen sich eine Veränderung des Anlagen-Setups und ein Wechsel des Betriebsmodus z. B. auf unvorhergesehene Auftragsänderungen einfach realisieren. Diese Mikromontagestrategie ermöglicht durch die vorliegende, telepräsente Programmierung aber nicht nur einen freien Wechsel zwischen den Betriebsmodi, sondern auch die direkte Übertragung des angesammelten Prozesswissens aus den telepräsent ausgeführten Aufgaben auf die automatisierte Produktion in der Klein- und Mittelserie.

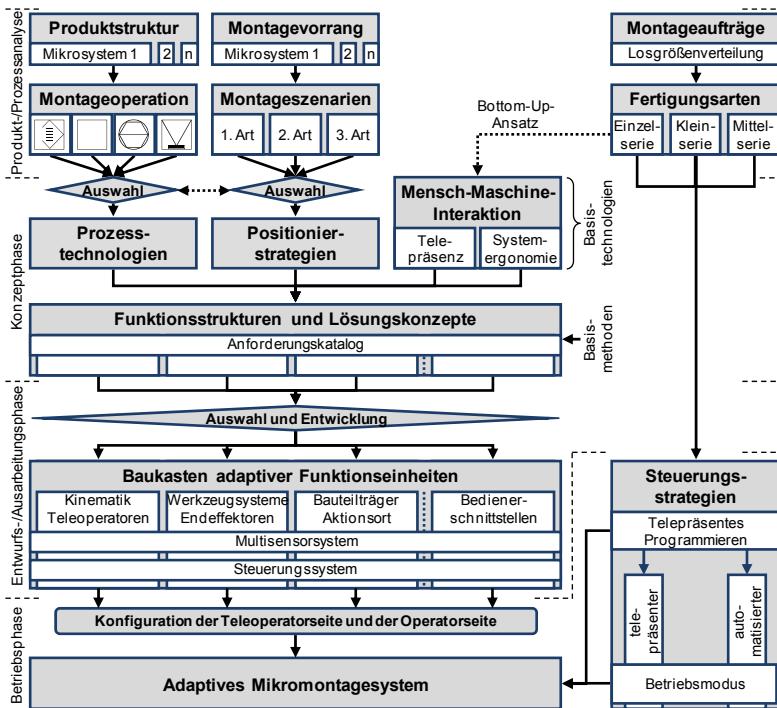


Abbildung 19: Adaptive Montagestrategie auf Basis der Telepräsenztechnologie zur Konfiguration und Nutzung einer Mikromontageanlage in verschiedenen Betriebsmodi

In der Betriebsphase ist damit das Anlagensystem durch die beiden Kernaspekte der adaptiven Mikromontagestrategie,

- der Entwicklung eines Systembaukastens anpassungsfähiger Funktionsmodule für die Teleoperatorseite und Operatorseite (vgl. Kapitel 5 und 6) und
- der Entwicklung einer Steuerungsstrategie auf Basis der Telepräsenztechnologie für den Anlagenbetrieb im Telepräsenz- und Automatikmodus (vgl. auch Abschnitt 6.2)

beliebig auf schnelle Veränderungen im Produktpotfolio adaptierbar und für unterschiedliche Montageaufträge konfigurierbar. Eine langfristige (und meist nicht durchführbare) Prognose der Montageaufträge eines hybriden Mikrosystems ist damit nicht mehr notwendig. Ebenso kann der Systembaukasten um neue Prozesstechnologien und -komponenten bei Veränderungen oder Zuwachsen im Produktpotfolio beliebig erweitert werden, sofern diese über standardisierte Schnittstellen zu den anderen Funktionseinheiten des Baukastens verfügen und sich informationstechnisch in das Multisensor- und Steuerungssystem integrieren lassen. Die adaptive Mikromontagestrategie liefert hierzu einen Entwicklungsleitfaden für neue anpassungsfähige Systemkomponenten. Neben diesem Zugewinn in der Einsatz- und Umrüstflexibilität bzw. der Erweiterungs- und Änderungsflexibilität bietet diese zudem auch innerhalb der einzelnen Fertigungsarten erhebliche Vorteile. Durch den Einsatz der Telepräsenztechnologie lassen sich nicht nur die Prozessschritte der Einzelfertigung von Mikrosystemen unter systemergonomischen Gesichtspunkten optimieren (vgl. Abschnitte 2.3.4 und 2.4.4), sondern auch die Prozesskenntnisse in anderen Betriebsmodi weiternutzen. Somit werden sowohl die Inbetriebnahme als auch der Ablauf automatisierter Prozesse erheblich effizienter. Die Übertragbarkeit dieser Strategie auf andere Anwendungsszenarien außerhalb der Mikromontage hängt in erster Linie vom dortigen Einsatzpotenzial der Telepräsenztechnologie ab, da diese der zentrale Bestandteil der Basistechnologie Mensch-Maschine-Interaktion und der adaptiven Steuerungsstrategie ist.

### 4.2 Anlagenarchitektur und Teilsysteme

Wegen der besonderen Bedeutung der Telepräsenztechnologie für die Montage hybrider Mikrosysteme in der Einzelfertigung und für die Programmierung und Inbetriebnahme automatisierter Prozesse orientiert sich die Anlagenarchitektur

des adaptiven Mikromontagesystems am Aufbau eines Telepräsenz- und Teleaktionssystems, welches allerdings für den durchgängigen Einsatz von der Einzelserien-, über die Kleinserien- bis hin zur Mittelserienfertigung um verschiedene Komponenten erweitert werden muss (siehe Abbildung 20).

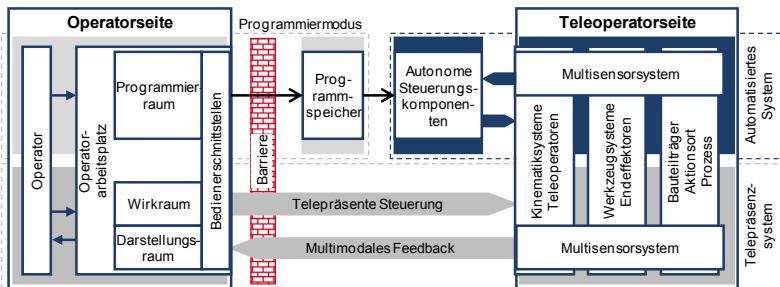


Abbildung 20: Basisarchitektur und abstrakte Funktionsmodule einer adaptiven Mikromontageanlagen auf Basis eines Telepräsenzsystems

Die Operatorseite besteht analog zum Aufbau eines Telepräsenzsystems aus dem Operatorarbeitsplatz mit den Komponenten des Wirk- und Darstellungsräums zur Steuerung telepräsenter Montageaufgaben (vgl. Abschnitt 2.4.1). Ergänzt um einen sog. Programmierraum ist die Operatorseite auch für das vorführende, telepräsenze Programmierverfahren ausgestattet. Damit kann das in den telepräsenten Montagevorgängen erlernte Prozesswissen gespeichert und für automatisierte Vorgänge genutzt werden (vgl. Kapitel Abschnitt 6.2). Die intuitive und einfache Mensch-Maschine-Interaktion über die Telepräsenzbarriere hinweg wird durch Bedienerschnittstellen gewährleistet, welche als adaptive Funktionseinheiten nach systemergonomischen Gesichtspunkten entwickelt und abhängig vom Einsatzfall aus dem Baukasten ausgewählt werden müssen (vgl. Kapitel 6).

Die anderen Funktionseinheiten dieses Baukastens, welche in den Teilsystemen der Kinematik bzw. Teleoperatoren, der Werkzeugsysteme bzw. Endeffektoren und der Bauteilträger bzw. dem Aktionsort zusammengefasst sind, stellen die Komponenten der Teleoperatorseite des adaptiven Mikromontagesystems dar. Im Vergleich zu Telepräsenz- und Teleaktionssystemen sind diese allerdings nicht nur für den Telepräsenz- sondern auch für den Automatikbetrieb auszulegen, um einen Austausch oder eine Änderung der Funktionseinheiten bei einem Wechsel zwischen der (manuellen) Einzelfertigung und der (automatisierten) Serienproduktion zu vermeiden. Da einzelne Teilsysteme abhängig von der Montageaufgabe mit physikalischen Sensoren ausgestattet sind, müssen diese Einheiten über

standardisierte Schnittstellen steuerungstechnisch in ein flexibles Multisensorsystem integriert werden (vgl. Abschnitt 5.4). In Verbindung mit standardisierten Schnittstellen zur Steuerungsarchitektur kann die Teleoperatorseite der adaptiven Mikromontageanlage damit abhängig vom Montageauftrag eines hybriden Mikrosystems beliebig aus dem Baukasten adaptiver Funktionseinheiten rekonfiguriert werden.

Die Steuerungsarchitektur (vgl. Abschnitt 5.5) stellt die technische Voraussetzung für die Umsetzung der flexiblen Steuerungsstrategie (vgl. Abschnitt 4.1) dar. Neben den Grundfunktionen für die Kommunikation zwischen der Operator- und Teleoperatorseite sind durch das Steuerungssystem zum einen schnelle Wechsel zwischen dem manuellen und automatisierten Betriebsmodus und zum anderen der Transfer von Prozesswissen zwischen den einzelnen Betriebsmodi zu gewährleisten. Ein wichtiger Bestandteil der Anlage ist daher ein dynamischer Programmspeicher für das standardisierte telepräsente Programmierverfahren, um das im telepräsenten Betriebsmodus erlernte Wissen zu sichern und für den automatisierten Betriebsmodus bereitzustellen.

## 5 Baukasten für die Teleoperatorseite

### 5.1 Kinematik und Teleoperatoren

Die adaptiven Funktionseinheiten des Teilsystems Kinematik und Teleoperatoren sind hauptsächlich nach den Detailanforderungen der Kategorie Handhabungstechnik auszulegen, welche die Anlagenparameter wie die Wiederholgenauigkeit, die Positionsauflösung, die Positionergenauigkeit und den Arbeitsraum beschreiben. Beeinflusst werden diese Funktionseinheiten ebenfalls durch Anforderungen der Kategorie Positionierstrategie, da bei Einsatz unterschiedlicher Positionierstrategien für verschiedene Montageprozesse zusätzliche Freiheitsgrade in den Kinematiksystemen der Anlage z. B. für die Verfahrbewegungen von Kameras vorzusehen sind.

Wegen der zahlreichen Arbeiten in der Entwicklung automatisierter Mikromontagesysteme und deren Kinematikkomponenten liegt der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Neukonzeption adaptiver Komponenten. Vielmehr sollen am Markt erhältliche Standardkomponenten derart modifiziert und über geeignete Schnittstellen integriert werden, dass diese in Kombination mit den anderen Teilsystemen der Teleoperatorseite anpassungsfähige Funktionseinheiten bilden. Mit der adaptiven Montagestrategie (vgl. Kapitel 4) wurde hierfür ein methodisches Vorgehen entwickelt, das zum einen die Anforderungsklärung für die Entwicklung und Konfiguration einer Montageanlage passend zu einer spezifischen Montageanwendung festlegt. Zum anderen werden über einen Baukasten adaptive Module und Komponenten aus anderen Anwendungen für den Aufbau und Inbetriebnahme einer Anlage bereitgestellt. Diese adaptive Montagestrategie dient als Entwicklungsrichtlinie, damit sich neue Funktionsmodule auf der Operator- oder Teleoperatorseite in die adaptive Montageanlage integrieren lassen. Im Vordergrund der Betrachtung stehen demzufolge die notwendigen Schnittstellen für einen adaptiven Einsatz im Montagesystem.

Im Teleoperator, d. h. im Montagesystem selbst, bildet immer das Kinematiksystem die Basis der Montageanlage. Zu unterscheiden ist hier zunächst die Anzahl und Art der notwendigen Freiheitsgrade, welche für die Ausführung der Montagevorgänge notwendig ist. Ausgehend von den Montageabläufen muss zunächst nach einer eingehenden Analyse der Montageaufgaben die Positionierstrategie festgelegt werden, welche dann direkt die notwendigen

Minimalfreiheitsgrade des Montagesystems definiert. Diese Minimalanzahl an vorzusehenden Freiheitsgraden kann dann konzeptionell auf verschiedene Arten in die jeweiligen Ausführungen von Kinematiksystem und Endeffektoren einfließen.

Bezüglich der Auswahl des Kinematiksystems im Teleoperator können zwei unterschiedliche Strategien verfolgt werden, welche beide bereits in der industriellen Anwendung zu finden sind. In der ersten Strategie werden die Kinematiksysteme spezifisch für die notwendigen Montageaufgaben zusammengestellt und aufgaben- bzw. auftragsabhängig implementiert. Kern dieser modularen Teleoperatoraufbauten ist die Verwendung einzelner, kombinierbarer linearer oder zirkularer Kinematikkomponenten, welche die gemäß Aufgabenanalyse notwendigen Freiheitsgrade für die Montageaufgabe bereitstellen.

In der zweiten Strategie wird das Basiskinematiksystem möglichst universell für eine Vielzahl an Montageaufgaben ausgelegt und verwendet. Die spezifisch notwendigen Freiheitsgrade werden dann durch die eingesetzten Werkzeugsysteme oder Endeffektoren abgedeckt.

### 5.2 Werkzeugsystem und Endeffektoren

Neben dem übergreifenden Multisensorsystem gliedert sich die Teleoperatorseite als wertschöpfer Kern der adaptiven Mikromontageanlage in Analogie zu einem Telepräsenz- und Teleaktionssystem in

- Werkzeugsysteme bzw. Endeffektoren,
- Kinematiksysteme bzw. Teleoperatoren und
- Bauteilträger bzw. den Aktionsort (vgl. Abschnitt 4.2).

Als Kernelement der Teleoperatorseite müssen durch die Werkzeugsysteme und durch die daran fixierten Endeffektoren die Hauptfunktionen Handhabung, Fügen und Prüfen erfüllt und bei Bedarf alle drei Montageszenarien (vgl. Abschnitt 2.2.3) abgedeckt werden. In der Konzeptionsphase fließen daher v. a. die Anforderungen bzgl. der Positionierstrategien und Prozessparameter bzw. der Füge- und Prüftechnologien in die Lösungsideen ein.

Die Entwicklung dieser Funktionsmodule basiert prinzipiell auf dem Konzept eines flexiblen, sensorbasierten Werkzeugsystems für die automatisierte Montage oberseitenstrukturierter Bauteile und damit für das Montageszenario 1. und 2. Art

(nach HÖHN (2001), welches aus der Reihe an unterschiedlichen, existierenden Werkzeugsystemen (vgl. Abschnitt 3.2.3) ausgewählt wurde. Der automatisierte, bildverarbeitungsbasierte Montagevorgang oberseitenstrukturierter Bauteile setzt sich dabei aus folgenden Teilschritten zusammen (vgl. Abbildung 21):

- Einfahrbewegung des Endeffektors in das Blickfeld des Optiksystems
- Lagevermessung der Position des ersten Fügepartners, d. h. des Bauteils am Greifer, anhand von Positioniermarken
- Abspeichern der Positionsdaten des ersten Fügepartners
- Ausfahrbewegung des Endeffektors
- Vertikale Ausgleichsbewegung des Werkzeugsystems zum Umfokussieren auf die Montageebene
- Lagevermessung der Position des zweiten Fügepartners, d. h. des Montageortes auf dem Substrat, anhand von Positioniermarken
- Abspeicherung der Positionsdaten
- Lagekorrektur des Bauteils über dem Substrat durch Feinpositionierung in den in der Ebene liegenden, karthesischen Freiheitsgrade x- und y-Richtung und im Rotationsfreiheitsgrad  $\varphi_z$  nach Abgleich der abgespeicherten Positionsdaten der Fügepartner
- Vertikale Ausgleichsbewegung des Werkzeugsystems zum Anfahren der Fügeausgangsposition
- Einfahrbewegung des Endeffektors
- Eindimensionale Fügebewegung in z-Richtung zum Absetzen und Verbinden der Fügepartner

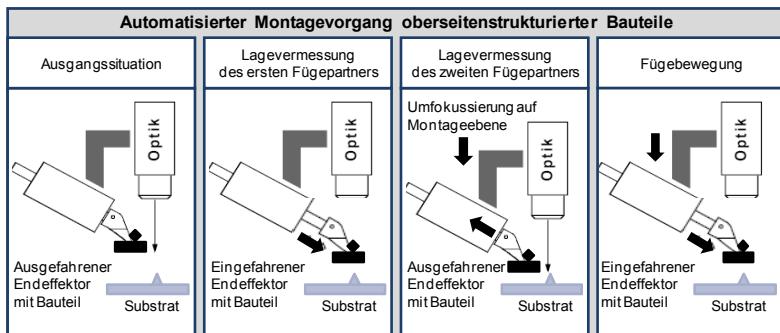


Abbildung 21: Automatisierter, bildverarbeitungsbasierter Montagevorgang oberseitenstrukturierter Bauteile

Für den telepräsenten Montagevorgang im adaptiven Anlagensystem sind an diesem Ablauf folgende Modifikationen notwendig (siehe Abbildung 22 rechts):

- Da vom Anlagensystem im Telepräsenzbetrieb keine Positionsdaten gespeichert werden, der Operator aber die genaue Position des Bauteils für die Lagekorrektur benötigt, müssen Referenzmarken des Bauteils in das Kamerabild über grafische Hilfsmarkierungen eingeblendet werden und auch nach dem Ausfahren des Endeffektors erhalten bleiben. Das Setzen dieser Markierungen kann manuell über Grafikinstrumente oder teilautonom und unterstützt durch das Bildverarbeitungssystem erfolgen.
- Analog zum automatisierten Montagevorgang müssen auch im Telepräsenzmodus die Positionen beider Fügepartner d. h. des Substrats und des Bauteils in unterschiedlichen Bildebenen gemessen werden. Dazu ist im automatisierten Montageablauf eine vertikale Ausgleichsbewegung notwendig, da die im Werkzeug fest installierte Kamera eine vorgegebene Brennweite besitzt. Dazu wird das gesamte Werkzeugsystem nach dem Vermessen des Bauteils am Greifer und nach dem Ausfahren des Greifers aus der vorgebene Bildebene durch eine definierte Ausgleichsbewegung mit bekannter Weglänge dem Substrat angenähert. Im Telepräsenzmodus sind diese Distanzen zunächst nicht bekannt bzw. vorgegeben, d. h. der Bediener würde sich – bei direkter Übertragung des Montageablaufs in den Telepräsenzmodus – dem Substrat annähern, bis er das Substrat in der Bildebene als scharf erkennt. Da diese Annäherung i. d. R. mit vertikalen Ausgleichsbewegungen um die Endposition von beiden Seiten verbunden ist, kann eine Kollision beider Fügepartner in diesem Fall nicht ausgeschlossen werden. Im Telepräsenzmodus muss daher zur Kollisionsvermeidung eine alternative Umfokussierung der Bildebene von der Bauteilloberfläche in die tiefer liegende Substratoberfläche gewählt werden: Für die vertikalen Ausgleichsbewegung zur Fokussierung verschiedener Bildebenen wird nicht das gesamte Werkzeugsystem sondern nur das integrierte Optiksystems bewegt. Da dieser Tiefenschärfeausgleich durch das Optiksystem auch eher dem menschlichen Sehverhalten über die Ausgleichsfunktion des Auges entspricht, kann dadurch ein intuitiver Eindruck des Montageszenarios erreicht werden.

Trotz dieser Unterschiede lassen sich aber die folgenden vier universellen Elementarfunktionen definieren (siehe Abbildung 22 mitte), welche als Grundlage für die weitere Konzeption des adaptiven Werkzeugsystems und der Endeffektoren dienen:

- Lagevermessung der Fügepartner,
- Bewegung der Endeffektoren und der Optik,
- Lagekorrektur (Feinpositionierung) und
- Fügebewegung.

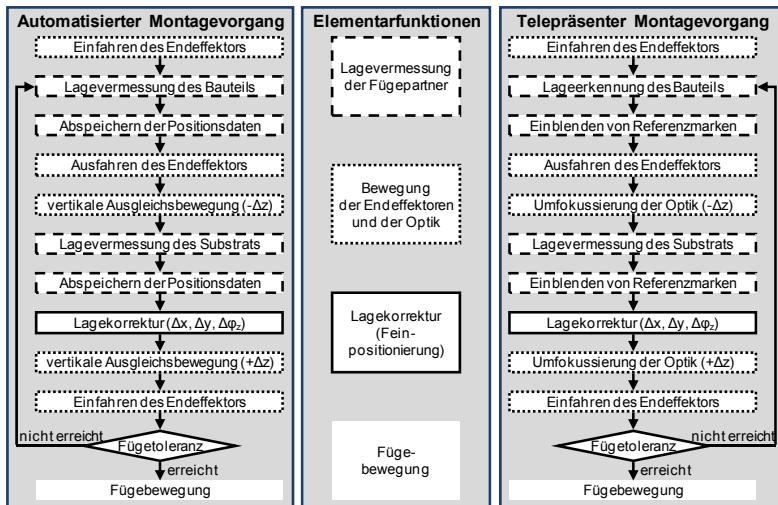


Abbildung 22: Elementarfunktionen für die Montage oberseitenstrukturierter Bauteile (mitte) (abgeleitet aus den Teilschritten des telepräsenten (rechts) und automatisierten Montagevorgangs (links))

Die von HÖHN (2001) für die sensorgeführte automatisierte Mikromontage zusammengestellten Konzepte werden nach diesen Elementarfunktionen gruppiert und an die entsprechenden Gestaltungsrichtlinien und notwendigen Zusatzfunktionen angepasst und weiterentwickelt (siehe Abbildung 23).

Die werkzeugabhängige Optik, d. h. das Mitführen des Optikmoduls mit dem Endeffektor, als ausgewähltes Lösungskonzept zur Lagevermessung der oberseitenstrukturierten Fügepartner gewährleistet in allen Betriebsmodi eine hohe Ortsflexibilität, da die präzisen Positionier- und Montagevorgänge im gesamten

Arbeitsraum der Mikromontageanlage ausgeführt werden können (siehe Abbildung 23 links). In automatisierten Prozessen kann die Lagevermessung des Bauteils am Greifer in der Nebenzeit des Handhabungsvorgangs parallel zur Verfahrbegleitung des Werkzeugsystems über den Fügeort erfolgen, um die Zykluszeit zu verkürzen. Im Telepräsenzmodus erlaubt die werkzeugabhängige Optik die genaue Erfassung der Bauteillage während des Greifvorgangs und den Abgleich der dort gesetzten grafischen Referenzmarkierungen im Kamerabild mit der realen Bauteilposition am Greifer während des Verfahrvorgangs zum Fügeort. In beiden Fällen kann so die genaue Position des Bauteils am Greifer vor der eigentlichen Fügebewegung noch einmal überprüft werden. Damit lassen sich Lageveränderungen während der Umpositionierung von der Bauteilaufnahme hin zum Fügeort erkennen und ausgleichen.

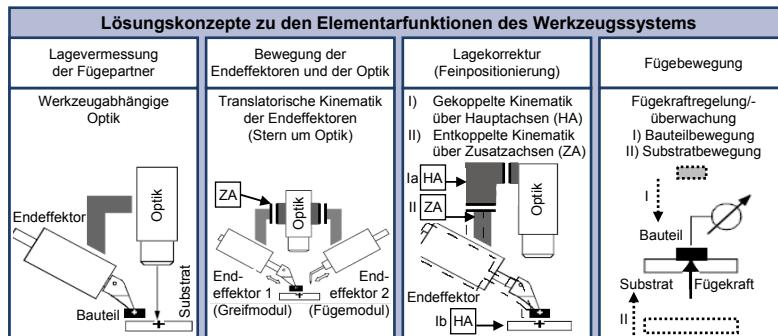


Abbildung 23: Lösungskonzepte für die einzelnen abgeleiteten Elementarfunktionen (nach Höhn (2001))

Aus konstruktiven Gründen und wegen der höheren Endlagegenauigkeit wurde für die Bewegung der Endeffektoren in und aus dem optischen Sichtfeld die sternförmige Anordnung der Endeffektoren um das zentrale Optikmodul über jeweils eine translatorische Kinematik gewählt (siehe Abbildung 23 mitte links). Der dadurch mögliche parallele Einsatz von mehreren anwendungsspezifischen Endeffektoren erhöht den Flexibilitätsgrad und die mögliche Auslastung des Werkzeugsystems und der Gesamtanlage, da alle Teilprozesse eines Montagevorgangs (Handhabungs-, Füge- und Prüfprozesse) ohne Einwechseln der entsprechenden Werkzeuge z. B. zum Handhaben bzw. zum Klebstoffauftrag ausgeführt werden können. Die spezifischen Eigenschaften der telepräsenten Montage (s.o.) und die damit verbunden sicherheitstechnischen Anforderungen erfordern eine zusätzliche lineare Achse, um das im Zentrum des Werkzeugsys-

tems angebrachte Optiksystem relativ zu den Endeffektoren vertikal verschieben zu können.

Für die Lagekorrektur (Feinpositionierung) der beiden Fügepartner zueinander sind kleine Korrekturbewegungen innerhalb des optischen Sichtfeldes notwendig. Abhängig davon, ob sich dabei die Endeffektoren relativ zum Optiksystem bewegen (kinematisch entkoppelt) oder nicht (kinematisch gekoppelt), existieren drei unterschiedliche Lösungskonzepte:

- Liegt eine kinematische Kopplung zwischen Endeffektor und Optiksystem vor, kann einerseits das gesamte Werkzeugsystem, d. h. das Bauteil, die Endeffektoren und die integrierte Optik, durch die Hauptachsen über dem (feststehenden) Substrat umpositioniert werden (siehe Abbildung 23 mitte rechts Fall Ia). Das optische Sichtfenster bewegt sich in diesem Fall richtungsgleich zur Feinpositionierbewegung mit.
- Andererseits kann – ebenfalls bei kinematischer Kopplung zwischen Endeffektor und Optiksystem – das Substrat unterhalb des (feststehenden) Werkzeugsystems in der Ebene für die Lagekorrektur bewegt werden (siehe Abbildung 23 mitte rechts Fall Ib). Die Umpositionierung des optischen Sichtfensters ist in diesem Fall der Positionierbewegung entgegen gerichtet.
- Wird die Optik vom Endeffektor über Zusatzachsen kinematisch entkoppelt, lässt sich das Bauteil relativ zum Optiksystem und damit innerhalb des ruhenden Bildausschnitts bewegen (siehe Abbildung 23 mitte rechts Fall II). Dieser Konzeptaufbau stellt das Analogon zum Bewegungsmodell eines manuellen Positionierungsvorgangs dar, da hier der Kopf des Bedieners, d. h. in Analogie das Optiksystem, stillsteht und sich die Hände, d. h. in Analogie die Endeffektoren, im Sichtfeld bewegen. Unter der Prämisse einer für den produktionstechnischen Einsatz effizienten, werkzeugabhängigen Optik (s. o.) müssen allerdings zumindest die ebenen Freiheitsgrade  $x$  und  $y$  durch entsprechende Kinematiksysteme doppelt realisiert werden, da diese zusätzlich zu den Hauptachsen für die Bauteilzuführung und zur Bewegung des Werkzeugsystems oder des Substrats erforderlich sind.

Die Fügebewegung kann entweder über eine vertikale Bewegung des Substrats oder des Bauteils erfolgen. Abhängig vom Lösungskonzept der Lagekorrektur muss die Fügebewegung damit an die Hauptachsen für die Grob- und Feinpositionierung in der Ebene gekoppelt, oder als eigenständiges Achssystem in das Anlagensystem integriert werden. Sowohl für den telepräsenten, wie auch den

automatisierten Betrieb gilt es, die Fügekraft zu überwachen und als Regelgröße der Fügebewegung aufzuzeichnen. Der dazu notwendige physikalische Kraftsensor kann entweder im Werkzeugsystem oder im Bauteilträger integriert werden.

### 5.3 Bauteilträger und Aktionsort

Unter den Bauteilträgern und dem Aktionsort werden alle Trägersysteme der Mikrobauteile auf der Teleoperatorseite verstanden, welche durch die Produkt- bzw. Variantenflexibilität und auch durch die Erweiterungs- bzw. Änderungsflexibilität beeinflusst werden. Durch die Bauteilträger werden die Funktionen der Bereitstellung und Vorpositionierung ausgeführt. Der tragende Grundrahmen muss so flexibel gestaltet sein, dass die Teleoperatorseite des adaptiven Anlagen- systems passend zu den jeweils ausgeführten Montageoperationen rekonfigurierbar und erweiterbar ist.

### 5.4 Multisensorsystem

#### 5.4.1 Physikalische Sensorkomponenten für die Mikromontage

Die Gestaltung des Gesamtsystems wird hauptsächlich durch die Forderung nach der Erweiterungs- bzw. Änderungsflexibilität beeinflusst. Besonders in den Teilkomponenten Multisensorsystem und Anlagensteuerung sind hierfür standardisierte Schnittstellen vorzusehen, welche eine möglichst einfach Erweiterung bzw. Umkonfiguration auf alternative oder neue Prozesse zulassen. Aus dem Hauptziel einer realitätsnahen und intuitiven Bedienung im Telepräsenzmodus und während des telepräsenten Programmierverfahrens ergeben sich auf der Teleoperatorseite besondere Anforderungen an den Sensoreinsatz und die Sensordatenverarbeitung, da für eine umfassende, multimodale Informationsbereitstellung im Darstellungs- und Wirkraum auf der Operatorseite (vgl. Abschnitt 6) unterschiedliche Sensordaten zur Verfügung gestellt werden müssen. Die Anforderung an ein derartiges Multisensorsystem können unter den Kategorien Intelligenz/Autonomie der verwendeten Komponenten, der Bedienbarkeit des Gesamtsystems und der Ausfallsicherheit der adaptiven Mikromontageanlage zusammengefasst werden.

Neben der geeigneten Gestaltung der Bedienerschnittstelle auf der Teleoperatorseite (vgl. Abschnitt 6) basiert die realitätsnahe Interaktion des Operators mit der

Prozessumgebung im Telepräsenzbetrieb auf einer im Rahmen der technischen Möglichkeiten vollständigen Erfassung der Prozessinformationen auf der Teleoperatorseite. Für die Informationsaufnahme und in Analogie zu den menschlichen Sinnesorganen sind hierfür Sensorkomponenten mit unterschiedlichen Messprinzipien erforderlich, um dem Operator am Operatorarbeitsplatz zum einen visuelle als auch haptische bzw. akustische Informationen zurückzumelden.

Anhand eines exemplarischen, standardisierten Ablaufs eines Pick & Place-Vorgangs mit den Teilprozessen

- Bauteilaufnahme aus dem Magazin,
- Grobpositionierung über dem Montagepartner,
- Feinpositionierung über dem Montagepartner und
- Absetzen des Bauteils auf dem Montagepartner (Fügen)

stellen sowohl

- Positionsdaten von Bauteilen und Werkzeugen für die Handhabungsvorgänge als auch
- Kraftwerte für die Überwachung der Referenzwerte für den Fügevorgang

die notwendigen Hauptinformationen dar, welche mit geeigneten Sensorkomponenten auf der Teleoperatorseite aufgezeichnet werden müssen.

In Analogie zur menschlichen Sinneswahrnehmung ist die direkte, visuelle Erfassung der Position und Orientierung von Werkzeugen und Mikrobauteilen für die telepräsenz Mikromontage von zentraler Bedeutung. Aufgrund der geringen Bauteilabmessungen, den hohen erforderlichen Positioniergenauigkeiten und schließlich des begrenzten menschlichen Auflösungsvermögens bei der Visualisierung der Prozessumgebung auf der Teleoperatorseite sind in jedem Fall vergrößernde, optische Sensorsysteme auf der Teleoperatorseite notwendig. Hinsichtlich der Auslegung von optischen Sensorkomponenten für die telepräsenz Mikromontage wird auf bestehende Arbeiten verwiesen (nach EHRENSTRÄBER 2007). Unter der Vorgabe hochgenauer, absolutpositionierender Kinematiksysteme können jedoch Positionsdaten auch aus den Positionswerten der Aktorsysteme indirekt ermittelt werden. Dies allerdings nur zu Vergleichszwecken, da die in der Mikromontage notwendigen Relativpositionierverfahren nicht auf absolute Positionsdaten zurückgreifen, sondern über die relativen Schrittweiten geregelt werden.

Zur Vermeidung von Bauteilbeschädigungen und für die Einhaltung der engen Parametergrenzen der eingesetzten Fügeprozesse in der Mikromontage sind zudem Sensoren notwendig, welche die Krafteinflüsse auf die Bauteile messen. Diese werden dann skaliert an den Operator über geeignete Feedbacksysteme als haptische Information zurückgemeldet. Analog zur Klassifikation der menschlichen Sinneswahrnehmung in Abschnitt 2.3.1 ist bei der Strukturierung von Sensorelementen eine eindeutige und scharfe Abgrenzung der Begriffe Kinästhetik, wie z. B. für die Aufnahme von Montage- und Fügekräften, und Taktilität, wie z. B. für die Wahrnehmung von Vibrationen, nicht möglich. Die Qualität der haptischen Wahrnehmung des Operators wird v. a. durch das Steifigkeitsempfinden beeinflusst. Dieses Empfinden bei der Berührung von Oberflächen lässt sich auf die Parameter der Positions- bzw. Kraftwahrnehmung sowie der zeitlichen Auflösung der haptischen Prozessinformationen zurückführen. Entscheidende Parameter bei der Aufnahme von haptischen Informationen sind damit die zeitliche Auflösung, mit der die sensorisch gewonnenen Informationen bereitgestellt werden, und damit die Abtastrate der jeweiligen Sensoraufnehmer.

In der Auswahl geeigneter physikalischer Sensoren für die Mikromontage wird auf eine Sensorbibliothek für Telepräsenzanwendungen zurückgegriffen (nach EHRENSTRÄBER 2007), welche die Auswahl geeigneter physikalischer Sensoren für eine bestimmte Telepräsenzanwendung erleichtert. Aufgrund der Vielzahl an physikalischen Messprinzipien werden innerhalb dieser Bibliothek mögliche Sensoren grundsätzlich anhand folgender Parameter in ein allg. Klassifizierungsschema eingeordnet:

- Messgröße (Kraft oder Weg)
- Art des physikalischen Messprinzips (elektrisch oder optisch)
- Art des Messaufnehmers (taktil oder berührungslos)

Ein konkreter physikalischer Sensor kann somit anhand dieser Klassifizierungskriterien in die Sensorbibliothek eingeordnet werden. Einzelne physikalische Sensoren einer Kategorie unterscheiden sich dann nur hinsichtlich ihrer spezifischen Eigenschaften z. B. des Messbereichs, der Auflösung oder der Abtastrate. Somit ist es innerhalb des Multisensorsystems möglich, physikalische Sensoren gleicher Kategorie einfach zu unterscheiden bzw. gezielt anwendungsspezifisch auszuwählen und bislang nicht erfasste Sensorkomponenten in das Multisensor-System aufzunehmen und einzuordnen.

### 5.4.2 Vorgehensweise für die physikalische Sensorauswahl

In der hier vorliegenden Anwendung müssen die physikalischen Sensorkomponenten sowohl den Telepräsenz- als auch den automatisierten Betrieb unterstützen. Methodisch wird hier auf Verfahren für die Entwicklung, Auswahl und Implementierung von Sensorkomponenten in Telepräsenzanwendungen (vgl. auch EHRENSTRÄBER 2007) zurückgegriffen, welche sowohl telepräsente Anwendungen als auch den automatisierten Betrieb berücksichtigen.

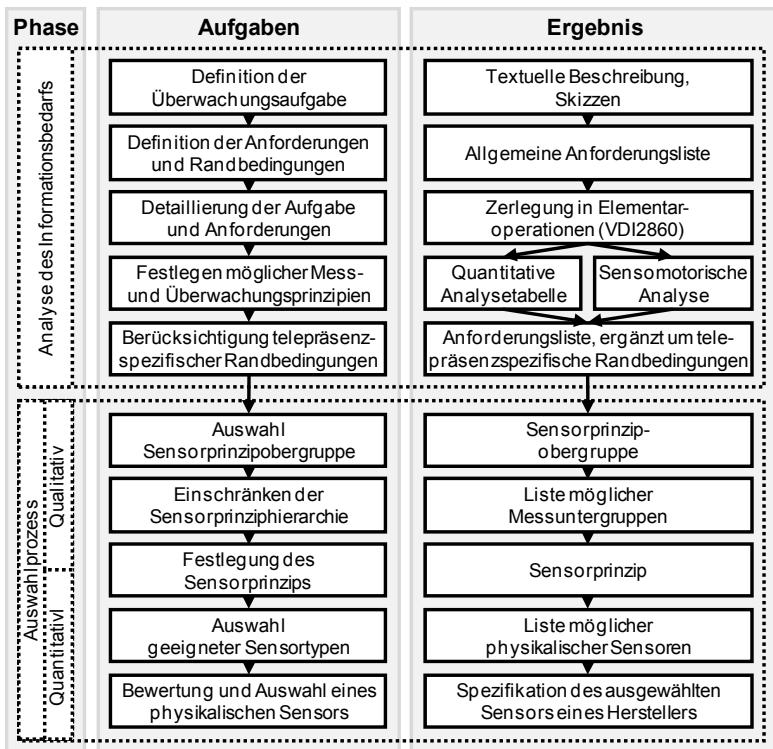


Abbildung 24: Vorgehensweise für eine telepräsenzgerechte Sensorauswahl  
(nach EHRENSTRÄBER 2007)

Abgeleitet aus bekannten konstruktionsmethodischen Vorgehensmodellen (LINDEMANN 2005) teilt sich die Vorgehensweise in die Phasen

- Analyse des Informationsbedarfs und
- Auswahlprozess.

In der Analyse des Informationsbedarfs werden die Messaufgabe und die notwendige Datenerfassung detailliert untersucht und ggf. die spezifischen Randbedingungen erfasst. Im Vergleich zu klassischen Sensorauswahlverfahren ist die telepräsenzgerechte Sensorauswahl durch bestimmte Arbeitsschritte gekennzeichnet: Nach der Zerlegung der Montageaufgabe in die einzelnen Teilschritte nach VDI 2860 werden in der sog. sensormotorischen Analyse die relevanten Empfindungsbereiche des Menschen für jeden dieser Teiltätigkeiten während der Ausführung ermittelt und daraus die Anforderungen an die Auswahl und Integration von Sensorkomponenten definiert. In einem weiteren Arbeitsschritt werden noch spezifische ergonomische und physiologische Anforderungen für den Auswahlprozess der physikalischen Sensoren in Telepräsenzanwendung z. B. die notwendigen Mindestabtastraten für haptische Reize für einen telepräsenten Feedbackindruck definiert. Diese Anforderungen stehen hauptsächlich mit den Randbedingungen der menschlichen Sinneswahrnehmung im Zusammenhang.

In diesem Prozess gilt es dann auf Basis der Analyseergebnisse und Randbedingungen, aus einer Vielzahl an möglichen Messverfahren den für die Montageaufgabe geeigneten physikalischen Sensor auszuwählen. Innerhalb eines mehrstufigen qualitativen und quantitativen Selektionsverfahrens kann man hier zwischen einer zunächst herstellerneutralen und einer dann herstellerspezifischen bzw. einer Anfangs qualitativen und am Ende quantitativen Auswahlsystematik unterscheiden. Qualitativ werden hier zunächst die technischen Randbedingungen, die Art des Messprinzips (taktile oder berührungslos) sowie die Art des physikalischen Messprinzips ausgewählt. Als technische Randbedingungen gelten z. B. strukturierte oder sensitive Bauteiloberflächen, welche den Einsatz taktiler Messprinzipien ausschließen. Ebenso können bei bestimmten Oberflächen- bzw. Werkstoffeigenschaften (Reflexion und Leitfähigkeit) des Bauteils optische oder elektrische Messprinzipien nicht eingesetzt werden. Im Folgenden werden dann nach Auswahl des Messprinzips quantitativ die zur Verfügung stehenden Sensoren weiter spezifiziert und reduziert. Als quantifizierbare Auswahlkriterien gelten hierbei sensorspezifische Anforderungen aufgrund der Messaufgabe wie

- Messbereich und -auflösung bzw.
- Abtastfrequenz

und auch implementierungsabhängige Randbedingungen wie

- Bauraum, Abmessungen des Sensors/Messfühlers bzw.
- Investitionskosten, Rüstkosten und Lieferzeiten

Am Ende kann mit dieser Vorgehensweise zunächst ein geeignetes Messprinzip und im Rahmen einer abschließenden technisch-wirtschaftlichen Bewertung ein passender Sensor bestimmt und ausgewählt werden.

#### 5.4.3 Sensorentwurf nach dem Prinzip der logischen Sensoren

Für die Fertigung kleiner Stückzahlen müssen die verwendeten physikalischen Sensoren fortwährend an wechselnde Anforderungen und Anwendungen in der Mikromontage angepasst werden. Unter produktionstechnischen Voraussetzungen gelingt dies bislang nur durch die Wiederverwendung und damit wirtschaftliche Anwendung von vergleichbaren bzw. standardisierten Soft- und Hardwaremodulen der Sensoren. Wiederverwendbare Standardsensormodule verringern hier zwar den Anpassungsaufwand an neue Montageanwendungen und erhöhen die Flexibilität einer Anlage, stellen aber in sich trotzdem proprietäre Soft- und Hardwarelösungen dar. Diese sind für die wechselnden Bedingungen in unterschiedlichen Fertigungsarten und für die damit verbundenen komplexen Sensoranwendungen nur begrenzt einsetzbar. Zur Nutzung einzelner physikalischer Sensoren in verschiedenen Anwendungsfällen innerhalb der adaptiven Mikromontageanlage müssen diese zudem über eine universelle Schnittstelle in die Steuerungsarchitektur integriert werden.

Hierzu werden einzelne adaptive Sensor- und Signalverarbeitungskomponenten in einem allgemeinen Entwurfsmuster nach dem Prinzip der logischen Sensoren abstrahiert und in einem Baukasten logischer Sensoren (Multisensorsystem) zusammengefasst. Ein Entwurfsmuster, als Lösungsansatz dieser Problematik, stellt dabei eine abstrakte Schablone für die Lösung von gleich gearteten Aufgaben (BALZERT 1999) dar. Als eines der bekanntesten Entwurfsmuster zur Strukturierung von Sensoranwendungen gilt die Verallgemeinerung und Formalisierung von Sensoren durch die Einführung von sog. logischen Sensoren (HENDERSON & Shilcrat 1995). Logische Sensoren stellen dabei abstrakte Einheiten dar, welche ausschließlich durch den charakteristischen Ergebnistyp

definiert sind. Die Art des physikalischen Messprinzips bzw. der Algorithmen der Sensordatenverarbeitung, durch die das Ausgangssignal zustande kommt, spielt bei der Definition des logischen Sensors keine Rolle. Formal sind logische Sensoren wie folgt aufgebaut (siehe Abbildung 25):

- Durch einen eindeutigen Sensornamen (der sog. Sensor-ID) kann der logische Sensor eindeutig von außen aufgerufen werden.
- Anhand des charakteristischen Ausgabevektors wird der spezifische Datentyp des Sensors gekennzeichnet.
- Das sog. Interpretermodul interpretiert Kontrollkommandos, die von anderen Steuerungskomponenten, z. B. von anderen logischen Sensoren, aufgenommen werden, und veranlasst die entsprechenden Sensoraktivitäten.
- Eine beliebige Anzahl an alternativen Verarbeitungseinheiten bestimmt (über den Selektor s. u.) den charakteristischen Ausgabevektor des logischen Sensors. Jede Verarbeitungseinheit greift hierbei auf andere logische Sensoren als Eingabequellen zu.
- Durch den Selektor, als zentraler Bestandteil eines logischen Sensors, wird zum einen die korrekte Funktion der ihm untergeordneten Verarbeitungseinheiten überwacht und bei Bedarf zu alternativen Verarbeitungseinheiten umgeschaltet. Zum anderen werden hier die Daten der einzelnen Verarbeitungseinheiten abgefragt und aufgabenabhängig entschieden, welches Ergebnis als Ausgabevektor anderen logischen Sensoreinheiten zur Verfügung gestellt wird. Die Aufgabe des Selektors ist es damit den charakteristischen Ausgabevektor des logischen Sensors zu definieren.

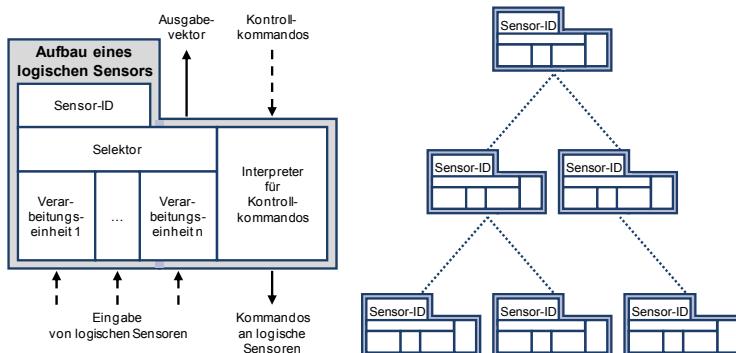


Abbildung 25: Aufbau eines logischen Sensors (links) und Einbindung in ein logisches Sensornetzwerk (rechts)

#### 5.4.4 Implementierungsmodell logischer Sensoren

Auf Basis des allg. Entwurfsmusters der logischen Sensoren wird im Folgenden eine Grundstruktur für Sensorkomponenten in adaptiven Mikromontageanwendungen abgeleitet. Hierbei sind entlang der Signalverarbeitungskette von Prozessinformationen zunächst die drei funktionalen Aufgabenbereiche

- physikalische Messwerterfassung,
- Sensordatenverarbeitung und
- Kommunikation

zu unterscheiden, aus denen sich unmittelbar eine dreischichtige Sensorgrundstruktur ableiten lässt (siehe Abbildung 26).

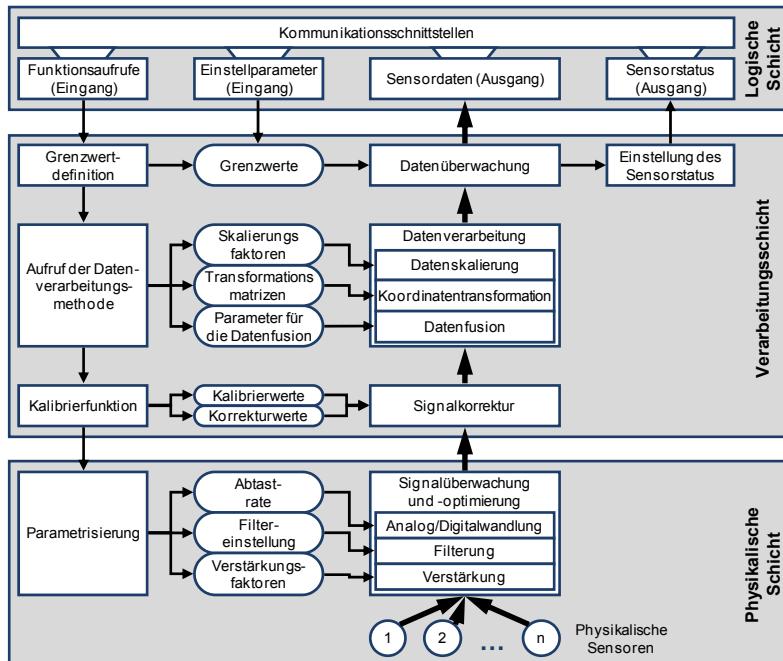


Abbildung 26: Entwurf einer Sensorgrundstruktur für die telepräsente und adaptive Mikromontage

Die Hauptaufgabe der physikalischen Schicht ist die Implementierung der einzelnen Sensorgeräte, welche über entsprechende, spezifische Treiberprogramme

angesprochen werden. Zudem erfolgt hier sensorspezifisch eine Vorparametrisierung und -prozessierung des aufgenommenen Eingangssignals, um dieses für die Weiterverarbeitung vorzubereiten.

In der Verarbeitungsschicht sind alle notwendigen Funktionen zur Signalkorrektur, zur Sensordatenverarbeitung und zur Informationsüberwachung implementiert. Die Signalverarbeitung gliedert sich hier in die speziell für die Mikromontage notwendige Skalierungsfunktion, die Koordinatentransformation bei richtungsabhängigen Informationen bzw. die Sensordatenfusion, sofern mehrere aufgenommene Informationen zu einem Ausgangssignal kombiniert werden müssen.

Über die logische Schicht als standardisierte Kommunikationsschnittstelle kann die Sensorkomponente von außen angesprochen werden kann.

### 5.4.5 Baukasten logischer Sensoren

Der Entwurf und das Implementierungsmodell logischer Sensoren aus den beiden vorangegangenen Abschnitten legt die Baukastenstruktur des für die adaptive Montagestrategie notwendigen Multisensorsystems fest und soll im Weiteren detailliert werden. Aus diesem Baukasten können dann für eine exemplarische Pilotanlage die notwendigen physikalischen Sensoren und die relevanten logischen Sensormodule passend zur Montageaufgabe ausgewählt werden.

Für den hier vorliegenden Anwendungsfall werden insgesamt folgende vier unterschiedliche Arten an logischen Sensoren (nach EHRENSTRÄBER 2007) als Klassifizierungsschema des Multisensorsystems definiert. Diese logischen Sensorarten unterscheiden sich hinsichtlich der Datenverarbeitung von einem oder mehreren physikalischen Sensorsignalen, um den Benutzer der Montageanlage die passenden und notwendigen Informationen situationsgerecht bereitzustellen:

- Logische Sensoren 1. Art, sog. physikalische Basissensoren
- Logische Sensoren 2. Art: sog. Aggregatssensoren
- Logische Sensoren 3. Art: sog. autonome, adaptive Sensoren
- Logische Sensoren 4. Art: sog. virtuelle Sensoren

Im einfachen Fall, dem logischen Sensor 1. Art., ist einem logischen Sensor genau ein physikalischer Sensor zugeordnet. Die physikalische Schicht des logischen Sensors 1. Art stellt das Treiberprogramm dar, welches die analogen,

elektrischen Signale des Sensors zyklisch abtastet und digitalisiert. In der Verarbeitungsschicht werden dann diese digitalisierten Basisdaten in geeignete zur Montageaufgabe passende Ausgangsinformationen aufbereitet. Dieser sog. physikalische Basissensor stellt somit die informationstechnische Grundlage dar, um zum einen unterschiedliche physikalische Sensoren in eine übergeordnete steuerungstechnische Rahmenarchitektur zu implementieren. Zum anderen können dadurch auch komplexe Sensornetzwerke aufgebaut werden, welche aus mehreren logischen Sensoren zusammengesetzt sind.

Als Anwendungsbeispiele logischer Sensoren 1. Art sind für die adaptive Mikromontage die Erfassung von Prozessinformationen, insbesondere von Prozesskräften sowie von Weg- und Winkelinformationen, zu nennen. Am Beispiel der Messung von Fügekräften während des Montagevorgangs muss im telepräsenten bzw. Programmierbetrieb der Montageanlage ein umfassender, kinästhetischer und taktiler Eindruck des Montagevorgangs an den Operator vermittelt werden. Hierzu ist die Integration passender haptischer Basissensoren in Form eines logischen Sensors 1. Art vorzunehmen.

Innerhalb der physikalischen Schicht (Treiberprogramm) werden hier zunächst die Rohsignale des ausgewählten Kraftsensors über die Messwerterfassungskarte aufgenommen. Danach werden diese Rohdaten in der Verarbeitungsschicht gefiltert, eventuell geglättet, passend zur Montageaufgabe skaliert und dann über die logische Schicht an das übergeordnete Steuerungsnetzwerk des adaptiven Montagesystems ausgegeben. Für den manuell, telepräsenten Betrieb aber auch für den automatisierten Betrieb können in der Verarbeitungsschicht des haptischen Basissensors zudem Grenzwerte eingestellt werden, an denen der Betriebszustand des Sensors z. B. bei Überschreitung eines Kraftwerts von einem Initialzustand in einen sicherheitskritischen Zustand übergeht. Unterschreitet der Kraftwert den voreingestellten Grenzwert, wird wieder der Initialzustand eingenommen. Dies ist notwendig, um v. a. im Telepräsenzbetrieb zu vermeiden, dass der physikalische Sensor selbst oder auch die Fügepartner während des Fügevorgangs durch eine mechanische Überlastung beschädigt bzw. zerstört werden. Neben den aufbereiteten Kraftwerten werden die Betriebszustände der Sensoren entweder direkt an den Operator der adaptiven Montageanlage über entsprechende Warnmeldung ausgegeben, oder zunächst in der übergeordneten Anlagensteuerung in Form von Regelungsstrategien zur Anlagenabsicherung weiterverarbeitet. So sollte z. B. bei Überschreitung eines Kraftsignals durch die übergeordnete Steuerungsarchitektur eine entsprechende Reaktion in Form einer Sperrung der Achsbewegung in der sensitiven Raumrichtung des physikalischen

Sensors bzw. in Form einer Rückzugsbewegungen entgegen dieser Richtung entweder operatorgesteuert oder autonom durch das System selbst eingeleitet werden.

Als weiteres Anwendungsbeispiel für logische Sensoren 1. Art gelten die Erfassung von Bewegungen des Teleoperators über physikalische Sensoren zur Positions- und Winkelmessung. Hierbei können sowohl gesonderte als auch in ein Kinematiksystem integrierte physikalische Sensoren implementiert werden. Diese Sensortypen unterscheiden sich nur durch den Weg der Datenaufzeichnung in der physikalischen Schicht, da im ersten Fall auf eine eigene Messkarte und im zweiten Fall auch auf den Achskontroller des Kinematiksystems zugegriffen wird. Der logische Sensor 1. Art kann damit universell für mehrere physikalische Sensoren der Weg- und Winkelmessung herangezogen werden.

Logische Sensoren 2. Art sind als sog. Aggregatssensoren eine Höheraggregierung logischer Sensoren 1. Art und dadurch gekennzeichnet, dass sie keine physikalische Schicht aufweisen, sondern direkt auf die charakteristischen Ausgabeinformationen physikalischer Basissensoren zugreifen. Die Vorteile dieser hierarchischen Sensorstruktur von logischen Sensorelementen in einem adaptiven Mikromontagesystem lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Die Wiederverwendbarkeit bereits vorhandener logischer Sensorelemente aus anderen Montageanwendungen und damit ein wirtschaftlicher Betrieb bzw. die Anpassungsfähigkeit an neue Montagevorgänge
- Die Verfügbarkeit vorhandener, bereits bewährter Sensormodule und damit die Unterstützung der Stabilität von Sensorapplikationen und Erhöhung der Verfügbarkeit der Sensorkomponenten
- Die Entkopplung der physikalischen Sensoren von der Steuerungsfunktionalität, d. h. die Austauschbarkeit von Basissensoren ohne Eingriff in das Steuerungssystem.

In Analogie zu den logischen Sensoren 1. Art stellen z. B. mehrdimensionale Kraftaufnehmer oder mehrdimensionale Positionsauflnehmer Anwendungsbeispiele der logischen Sensoren 2. Art dar, ohne dass weitere physikalische Sensoren in die Montageanlage integriert werden müssen. Im ersten Fall können somit mehrere eindimensionale physikalische Kraftsensoren zu einem mehrdimensionalen Kraftsensor kombiniert werden. Die oben beschriebenen Betriebszustände (z. B. sicherheitskritische Zustände) können hier übernommen werden. Damit

wird die Kontroll- und Steuerungsfunktion des adaptiven Montagesystems z. B. durch Sperren der Kinematikachsen in mehreren Raumrichtungen bei aus mehreren Freiheitsgraden zusammengesetzten Fügebewegungen erweitert. Bei Montagevorgängen, welche aus mehreren translatorischen oder rotatorischen Bewegungsrichtungen zusammengesetzt sind, bildet ein logischer Sensor 2. Art die Grundlage, um die Sensorik zur genauen Positionserfassung einfach zu erweitern. Durch die Kopplung der Messwerte logischer, eindimensionaler Basissensoren kann der Positionsdatensatz dann über eine Koordinatentransformation berechnet werden.

Für den Wechsel zwischen den Betriebsmodi in einer adaptiven Mikromontageanlage erlauben es logische Sensoren 3. Art, sog. adaptive Sensoren, das Montagesystem zum einen im Telepräsenzbetrieb möglichst intuitiv zu bedienen. Zum anderen kann dadurch die Programmierung der Steuerung für den Automatikbetrieb möglichst einfach gestaltet werden. Durch einen adaptiven Sensor werden die Sensordaten eines oder mehrerer anderer logischer Sensoren verarbeitet und die Sensorparameter autonom und dynamisch eingestellt. Somit ist es möglich, dass sich ein Sensorsignal in Echtzeit, selbständig und situationsgerecht an sich verändernde Prozessumgebungen anpasst. Der Operator der Mikromontageanlage kann sich dadurch auf die eigentlichen Montageaufgaben konzentrieren und wird nicht durch Parameteranpassungen bzw. -eingaben abgelenkt. Die Vorgaben zur autonomen und dynamischen Parameteranpassung erhält ein logischer Sensor 3. Art aus einer verbundenen Datenbank, welche die relevanten Sensorcharakteristika und Kalibriereigenschaften enthält.

Als Anwendungsbeispiel für adaptive Sensoren sind v. a. Messverfahren zu nennen, deren Messergebnis stark von den Umgebungsrandbedingungen abhängt. So werden z. B. bei optischen Messprinzipien deren Messsignale stark von den jeweiligen Lichtverhältnissen und Messoberflächen beeinflusst. Optische Sensoren werden in der Mikromontage wegen ihres berührungslosen Messprinzips häufig eingesetzt, da auf diese Weise die sensiblen Bauteile nicht beeinträchtigt werden und kontakt- bzw. kontaminationsfrei gemessen werden kann. Die Einhaltung definierter Abstände ist z. B. beim Lot- oder Klebstoffauftrag, dem sog. Dispensen von besonderer Bedeutung. Das Prozessergebnis, d. h. die Position, die Form und die Größe des Lot- oder Klebstofftropfens hängt hier stark von der Reproduzierbarkeit des Arbeitsabstandes von Austrittsnadel und Substrat ab. Typische Arbeitsabstände bei Dispensvorgängen betragen wenige hundert Mikrometer, so dass bereits kleinste Veränderungen in der Prozessumgebung wie Unebenheiten des Substrats zu Schwankungen in der Prozessqualität führen. Eine

Absolutpositionierung der Dispensnadel ist damit in keinem Betriebsmodus möglich, im Telepräsenzbetrieb bzw. Programmierbetrieb ist ohnehin für die Online-Prozessüberwachung eine relative Messstrategie direkt am Fügeort notwendig. Systemtechnisch lassen sich die dafür notwendigen physikalischen Sensoren (faseroptische Sensoren) aufgrund ihrer geringen Baugröße gut in das Dispenswerkzeug integrieren.

Um den adaptiven Sensor mit den notwendigen Kalibrierdaten zu versorgen, sind zunächst die Kalibrierkurven eines faseroptischen Sensors in Abhängigkeit von den Oberflächen notwendig und in einer Datenbank zu hinterlegen. Zudem sind die Materialien in der Prozessumgebung z. B. auf der Substratoberfläche in einem Datensatz abzuspeichern, welcher die relevanten, unterschiedlichen Materialeigenschaften beinhalten muss. In Abhängigkeit von der Position des Dispenswerkzeugs können so die richtigen Kalibrierkurven aus der Datenbank geladen werden. Der adaptive Sensor greift damit auf mehrere Rohdaten z. B. der Positionssensoren zu und löst autonome Parameteranpassungen abhängig vom vorhandenen Material an dieser Position aus.

Durch sog. virtuelle Sensoren, den logischen Sensoren 4. Art wird v. a.

- das Präsenzempfinden des Operators,
- die Arbeits- und Anlagensicherheit im Arbeitsraum und
- eine Modalitätstransformation von Prozessinformationen in geeignete Sinnesmodalitäten

im Telepräsenzbetrieb bzw. Programmievorgang unterstützt. Virtuelle Sensoren benötigen dabei keinen eigenen physikalischen Sensor, sondern greifen auf die Signale anderer logischer Sensoren zu. Daraus erzeugen die logischen Sensoren 4. Art aufgabenabhängige virtuelle Steuersignale auf Basis von physikalischen Modellen. Diese virtuellen Informationen werden dann den realen, verarbeiteten Sensorsignalen in der Darstellung auf der Operatorseite überlagert.

Im ersten Anwendungsfall virtueller Sensoren wird das Realitätsempfinden des Operators in der ungewohnten Mikrowelt erhöht, indem ein virtueller Sensor z. B. aus der Makrowelt gewohnte, aber in der Mikrowelt nur sehr aufwändig messbare Trägheitskräfte „erzeugt“ und haptisch an den Operator ausgibt. Somit kann bei Handhabungs-, Greif- und Fügevorgängen das Aufnehmen, Transportieren und Ablegen eines Bauteils immersiver gestaltet werden. Die virtuell erzeugten Massenträgheits- und Gewichtskräfte der Bauteile werden in diesem Fall i. d. R. zusätzlich zu den physikalisch gemessenen Fügekräften augmentiert und

an den Bediener ausgegeben. Da der Einsatz hochempfindlicher Sensoren für die Erfassung von Trägheitskräften im Mikro- bzw. Nanonewton-Bereich zwar technisch möglich, allerdings sehr aufwändig ist, können virtuelle Sensoren in der produktionstechnischen Anwendung als wirtschaftlich interessante Alternative angesehen werden.

Virtuelle Sensoren können zudem eingesetzt werden, um dem Operator mit virtuellen Sicherheitsbarrieren, Bewegungskorridoren und Fügehilfen intuitiv die erlaubten Bewegungsräume aufzuzeigen. Zudem können mit einer Arbeitsraumüberwachung Bedienfehler des Operators minimiert und daraus resultierende Kollisionen während der Durchführung einer Montageaufgabe vermieden werden. Um während der Montageprozesse die aktuelle Position des Werkzeug-Tool-Center-Points (TCP) am Teleoperator online überwachen zu können, nutzt ein übergeordneter, virtueller Sensor ohne eigene physikalische Schicht die vorhandenen Informationen der logischen Positionssensoren 1. Art in den Kinematikachsen. Die Informationen werden dann mit dem vorab erstellten physikalischen Modell des Arbeitsraums verglichen. Dieses Modell muss benutzerfreundlich vor der Durchführung des Montageprozesses mit VRML-Editoren definiert werden, indem die Montageszenarien geometrisch in mehreren Volumenmodellen festgelegt werden. Durch die Augmentierung dieser Bewegungshilfen kann somit z. B. ein kinästhetischer Eindruck einer virtuellen, starren Wand über das haptische Eingabegerät an den Bediener ausgegeben werden, wenn z. B. ein vorgegebener Arbeitsraum verlassen wird. Da der Operator durch den starren virtuellen Kontakt intuitiv eine Gegenbewegung wieder in den Arbeitsraum zurück einleitet, lässt sich ein Verlassen des vorgegebenen Bewegungsräumes vermeiden. Ebenso kann im Telepräsenzbetrieb die präzise Positionierung des Bauteils im Arbeitsraum verbessert werden, indem mit einem virtuellen Sensor die Teleoperatorbewegung gezielt skaliert wird. So ist es z. B. möglich, die Geschwindigkeit des Teleoperators bei Annäherung der Fügepartner zu limitieren. Analog können auch zur Arbeitsraumdefinition sog. Sicherheitsbereiche definiert werden, in denen die maximale Verfahrgeschwindigkeit des Teleoperators automatisch limitiert wird. Diese Funktion erlaubt die Ausführung feinmotorischer Montageaufgaben bei erhöhter Realitätsnähe im Telepräsenz- und Programmierbetrieb und verringert das Risiko von Kollisionen.

Ein dritter Anwendungsfall für virtuelle Sensoren stellt zudem die Transformation von Prozessinformationen in eine andere Sinnesmodalität dar. Bei Qualitätssicherungsaufgaben während der Prozessdurchführung ist somit denkbar, dass notwendige Prozessinformationen wie z. B. die elektrische Leitfähigkeit, für die

der Mensch keine entsprechenden Sinnesrezeptoren besitzt, über eine andere Sinnesmodalität ausgegeben wird. So können auch geometrische Informationen derart aufbereitet werden, dass die realen Abstandsdaten sich annähernder Bauteile aus einer Abstandsmessung während des Montagevorgangs nicht nur visuell an den Operator vermittelt werden, sondern zugleich in taktile, kinästetische oder akustische Informationen übersetzt werden. Dies unterstützt die Immersion des Operators bei Ausführung der Montageaufgabe besonders, wenn er zugleich zu den visuellen Abstandsinformationen einen virtuellen Krafteindruck gewinnt. Dies kann z. B. beim oben erwähnten Lot- bzw. Klebstoffauftragsprozess (Dispensen) genutzt werden, um den präzisen Abstand zwischen Dispensnadel und Substrat optimal einhalten zu können. Die Abstands-information wird nicht nur visuell ausgegeben, sondern auch mit Hilfe einer Kraftrückkopplung. Der Operator setzt die Dispensnadel demnach gefühlt auf einer virtuellen Oberfläche ab, welche in vorab definierten Arbeitsabstand über dem Substrat positioniert wurde.

Während der Augmentierung dieser haptischen, virtuellen Montagehilfen mit Hilfe eines logischen Sensors 4. Art wird somit das Ausgangssignal eines logischen Sensors 3. Art (s.o.) genutzt, welches wiederum auf das gemessene Wegsignal eines logischen Sensors 1. Art zurückgreift. Damit zeigt sich sowohl ein wirtschaftlicher, als auch technischer Vorteil der strikten Modularisierung des Multisensorsystems in einzelne Elementarfunktionen innerhalb des skizzierten logischen Sensornetzwerks. Aus vorhandenen gemessenen Sensordaten und zusätzlich hinterlegten Kalibrier-, Arbeitsraum- bzw. Montageinformationen können eine Vielzahl an möglichen Funktionen im adaptiven Montagesystem implementiert werden, ohne jeweils eigene Sensoren entwickeln und einbinden zu müssen. Neue oder modifizierte Montageaufgaben können somit steuerungsseitig einfach in das vorhandene Anlagensystem integriert werden.

## 5.5 Steuerungssystem

### 5.5.1 Steuerungsarchitektur

Um die Anpassungsfähigkeit der Montageanlage zu gewährleisten, wurde eine spezielle, modulare Kommunikations- und Steuerungsarchitektur in Form eines Frameworks entwickelt. Dieses soll die räumlich getrennten Einheiten der Operator- und Teleoperatorseite über die Telepräsenzsteuerung miteinander

verbinden bzw. die Komponenten der Teleoperatorseite autonom ansteuern. Alle Teile des adaptiven Montagesystems müssen durch eine schlanke aber leistungsfähige und betriebssichere Datenübertragung miteinander verbunden werden.

Im Hinblick auf den anwendungsnahen, produktionstechnischen Einsatz wurde für die sog. äußere Kommunikation der zentralen Telepräsenzsteuerung auf bekannte Referenzmodelle und Protokolle der Informationsübertragung und etablierte Internet-Technologien zurückgegriffen. Somit können die Steuerungskomponenten auf der Teleoperatorseite mit den Komponenten der räumlich entfernten Operatorseite informationstechnisch verbunden werden. Für die Übertragung haptischer Daten wurde das standardisierte UDP-Protokoll ausgewählt, welche im Vergleich zu anderen Verbindungsprotokollen erhebliche Vorteile im Austausch von zeitkritischen Informationspaketen aufweist. Für die äußere Übertragung visueller Daten wurden leistungsfähige und kommerziell erhältliche Live-Streaming-Verfahren, in denen das Bildmaterial digitalisiert und in Echtzeit über das Internet übertragen werden kann, eingesetzt.

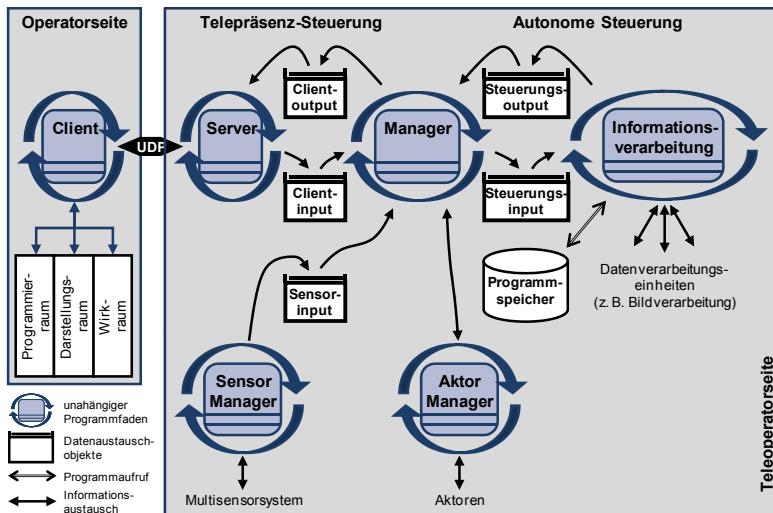


Abbildung 27: Steuerungsarchitektur des adaptiven Mikromontagesystems

Die Architektur besteht ferner aus mehreren voneinander unabhängigen Teilsystemen, sog. Programmfäden bzw. Threads, welche jeweils unterschiedliche Aufgaben in der Anlagensteuerung übernehmen. Bei sog. Multi-Threading-Verfahren werden den einzelnen Threads abwechselnd und kontinuierlich kleine

Rechenzeitanteile zugewiesen. Damit können die einzelnen Teilaufgaben durch die Aufteilung in einzelne aufgabenspezifische Threads quasiparallel auf einem oder einigen wenigen Prozessoren abgearbeitet werden. Dadurch sind komplexe Gesamtaufgaben auch mit herkömmlichen Rechnerleistungen zu bewältigen. In Multi-Threading-Anwendungen entsteht durch die systembedingte Unabhängigkeit der Threads die Notwendigkeit, die einzelnen Zweige zeitlich miteinander zu koordinieren bzw. zu synchronisieren, um das Antwortverhalten der Anwendung zu optimieren.

Damit die einzelnen Threads kontinuierlich mit den aktuellen Eingabedaten versorgt werden, aber trotzdem unabhängig voneinander arbeiten können, sind sog. **Data Exchange Objects** (DEOs) für den inneren Datenaustausch zwischen den einzelnen Threads notwendig. Diese funktionieren ähnlich wie Dateiordner, indem sie die Eingabe- und Ausgabedaten speichern und den Threads wieder zur Verfügung stellen.

Neben der Operatorseite, deren Funktionen informationstechnisch in einem Thread Client zusammengefasst werden, sind auf der Teleoperatorseite für die unterschiedlichen Steuerungsaufgaben insgesamt fünf Threads mit den folgenden spezifischen Aufgaben erforderlich:

- Übergreifend über die Steuerungsaufgaben der Anlage und als Kern des Frameworks stellt der Thread „Manager“ die betriebssichere Bearbeitung und Weiterleitung von Steuerungsdaten sicher. Er beinhaltet Routinen, welche den fortwährenden Zugriff auf alle DEOs und die Aufrechterhaltung der Datenkommunikation zwischen den anderen Threads gewährleisten. Als zentrale Kontrollinstanz koordiniert dieser Programmfad damit auch den vollständigen und richtigen Datenaustausch zwischen den anderen Programmfäden.
- Für die Integration des für alle Betriebsarten notwendigen Multisensorsystems in die Steuerungsarchitektur ist ein eigener Thread „Sensor Manager“ notwendig. Dieser hat die Hauptfunktion, sowohl die Sensordaten als auch die Zustände aller logischen Sensorkomponenten zu überwachen. Um die Sensordaten und -zustände für die Weiterverarbeitung zeitnah zur Verfügung zu stellen, werden diese im Datenaustauschobjekt „Sensor Input“ kontinuierlich abgelegt und unabhängig davon bei Bedarf durch den zentralen Thread „Manager“ entnommen.
- Die verschiedenen Akteure des adaptiven Mikromontagesystems müssen ebenfalls unabhängig vom Betriebsmodus angesteuert werden. Die Koor-

dination der einfacheren boole'schen Aktoren und der eingesetzten Kinematiksysteme, welche meist mit eigenen Treibern ausgestattet sind, erfolgt über den Thread „Actuator Manager“, welcher die dafür notwendigen Funktionalitäten zur Verfügung stellt.

- Im Telepräsenzbetrieb der adaptiven Mikromontageanlage müssen die Daten der Operatoreingabe und die aktualisierten Prozessdaten zyklisch ausgetauscht werden. Die dazu notwendige bidirektionale Datenkommunikation zwischen der Operator- und der Teleoperatorseite erfolgt über eine Client-Server-Verbindung, welche den telepräsenten Betrieb der Anlage sowohl über ein unternehmensinternes Netzwerk, als auch über das Internet zulässt. Der Thread „Server“ auf der Teleoperatorseite koordiniert und überwacht hierzu die Kontrollflüsse für die telepräsente Anwendung. Dazu werden die Operatoreingaben von der räumlich getrennten Operatorseite (Thread „Client“) empfangen und im Datenaustauschobjekt „Client Input“ für die Weiterleitung an die Aktoren und Werkzeuge auf der Teleoperatorseite abgelegt. Parallel dazu werden durch den Programmfad „Server“ die aktuellen Prozessdaten, welche im Datenaustauschobjekt „Client Output“ hinterlegt sind, abgefragt und an die Clientanwendung weitergeleitet.
- Für den automatisierten Betrieb der adaptiven Mikromontageanlage ist ein weiterer Thread „Informationsverarbeitung“ notwendig, der die verschiedenen Einheiten der Datenverarbeitung koordiniert und diese zur Gewährleistung eines sicheren Anlagenbetriebs überwacht. Hierzu kommuniziert dieser Programmfad mit einem Programmspeicher, in dem die Steuerungsprogramme über ein telepräsentes Programmierverfahren hinterlegt werden. Der Operator gibt im automatisierten Betrieb durch die Verkettung der Threads über die Client-Server-Verbindung den Befehl, ein bestimmtes Programm aus dem Programmspeicher aufzurufen. Dieses wird dann durch den Thread „Informationsverarbeitung“ abgearbeitet. Die Weiterleitung der Steuerungsdaten zum Programmfad „Manager“ erfolgt analog zur Telepräsenzsteuerung über die zwei weiteren Datenaustauschobjekte „Steuerungsinput“ und „-output“.

### 5.5.2 Kombination unterschiedlicher Steuerungsfunktionen

Analog zum Multisensorsystem stellt die Anlagensteuerung ein weiteres Bindeglied zwischen den Komponenten der Teleoperator- und Operatorseite des adaptiven Mikromontagesystems dar (vgl. Baukasten in Abbildung 19). Für die

informationstechnische Kombination der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Aktor- und Sensorsysteme müssen unterschiedliche Funktionen durch eine geeignete Steuerungsarchitektur dargestellt werden. Als Hauptanforderungen an eine derartige Architektur in einem adaptiven Mikromontagesystem für den produktionstechnischen Einsatz sind zum einen die Rekonfigurierbarkeit und Erweiterbarkeit auf mögliche neue Anwendungsfälle zu nennen. Zum anderen ist auch die Wiederverwendbarkeit und Integration bekannter Softwarekomponenten, z. B. Treiber zur Ansteuerung von am Markt erhältlichen Komponenten, gefordert. Dies wird i. A. in sog. Steuerungs-Frameworks durch den Einsatz definierter Schnittstellen zu den einzelnen Komponenten gewährleistet (BALZERT 1999).

Durch die Anlagensteuerung des Mikromontagesystems müssen folgende Hauptfunktionen abgedeckt werden:

- Telepräsente Ansteuerung der Anlagenkomponenten und multimodales Feedback für den Telepräsenzbetrieb
- Telepräsenzes Teach-in für die Programmierung von automatisierten Abläufen
- Überwachung der Anlagenparameter im automatisierten Betrieb

Die Anlagensteuerung muss daher die Funktionen eines Telepräsenzsystems und eines automatisierten Systems kombinieren und zugleich für Erweiterungen um zusätzliche Funktionskomponenten, wie Aktoren und Sensoren, in den oben genannten Betriebsmodi gerüstet sein. Durch die unterschiedlichen Anforderungen an telepräsente und automatisierte Anlagensteuerungen ist ein modularer Aufbau der Steuerungsarchitektur notwendig, um auch hier dieselben Komponenten für verschiedene Betriebszustände und Montageaufgaben verwenden zu können.

Ein zentrales Element der Anlagensteuerung, ohne das die Übertragung und Sicherung der Prozesskenntnisse des Operators nicht möglich wäre, stellt der sog. Programmspeicher dar. Während des telepräsenten Teach-in wird dieser Programmspeicher parallel zum telepräsenten Montagevorgang mit den notwendigen Prozess- und Anlagenparametern gefüllt. Diese werden dann im automatisierten Betrieb als Grundlage für die automatisierte Regelung der Prozesse ausgelesen.

## 6 Baukasten für den Operatorarbeitsplatz

### 6.1 Klassifikation von Bedienerschnittstellen

Die Konzeption und Entwicklung der Bedienerschnittstellen im Baukasten der adaptiven Funktionsmodule bzw. des Operatorarbeitsplatzes wird hauptsächlich durch die beiden Basistechnologien Systemergonomie (vgl. Abschnitt 2.3) und Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie (vgl. Abschnitt 2.4) beeinflusst, um eine möglichst realitätsnahe und intuitive Mensch-Maschine-Interaktion für die unterschiedlichen Betriebsmodi des Anlagensystems zu gewährleisten. Daher sind aus dem umfassenden Anforderungskatalog für adaptive Mikromontagesysteme (vgl. Abschnitt 2.6) besonders die Einsatz- und Umrüstflexibilität mit den Anforderungskategorien Bedienbarkeit und Inbetriebnahme von Bedeutung. Ausgangspunkt für die Entwicklung von Lösungskonzepten stellt zunächst die allgemeine Klassifikation von Bedienerschnittstellen in Mensch-Maschine-Systemen dar, um diese angepasst an die verschiedenen Hauptfunktionen eines Operatorarbeitsplatzes auszuwählen. Die Gestaltung des Darstellungs-, Wirk- und Programmerraums und die Integration der Bedienerschnittstellen in einen Operatorarbeitsplatz erfolgt dann nach den Richtlinien der Systemergonomie. Diese beschäftigt sich u. a. mit der Erfassung, Auswertung und Anwendung von Körpermaßen der Menschen und liefert wichtige Grundlagen für die Konzeption von Bedienplattformen.

Nach der Systemergonomie sind in einem Mensch-Maschine-System unterschiedliche Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Informationsaufnahme am Eingang des Systemelements Mensch und zu den Elementen der Informationsumsetzung am Ausgang des Systemelements Mensch notwendig (vgl. Abbildung 9 und Abschnitt 2.3.1). Diese werden technisch durch Anzeigenelemente bzw. aktive oder passive Bedienelemente auf der Operatorseite realisiert. Anzeigenelemente können systematisch anhand der Merkmale Informationsinhalt, Darstellungsform und Darstellungsort gegliedert werden. In der Gestaltung von integrierten, funktionsübergreifenden Bedienerschnittstellen im Operatorarbeitsplatz sind jedoch hauptsächlich die ersten beiden Klassifikationsmerkmale von Bedeutung, da der Darstellungsort meist durch Monitore oder Displays als Wiedergabemedium am Arbeitsplatz fest definiert ist.

Klassifizierung von Bedienerschnittstellen					
Anzeigeelemente	Informationsinhalt	Soll-/Istwertanzeige Differenzanzeige Synthetische Anzeige Voranzeige	Darstellungsform	Absolut situationsanalog Bildhaft situationsanalog Analog Digital	Darstellungsart
Bedienelemente	Bedienung	Bewegungsart	Wirkungsweise	Dimensionalität	Integration
	Extremität Greif-/Tretart	translatorisch rotatorisch quasitranslatorisch	analog digital	Eingabedimensionen Ausgabedimensionen	sequentiell simultan

Abbildung 28: Klassifizierung von Bedienerschnittstellen

Anzeigen lassen sich nach ihrem Informationsinhalt

- in Soll-/Istwertanzeigen, welche die Regelgröße (Istwert) alleine oder die Führungsgröße (Sollwert) und Regelgröße in Kombination wiedergeben,
- in Differenzanzeigen, welche die Differenz zwischen Führungsgröße und Regelgröße in einem Ausgabewert zusammenfassen,
- in synthetische Anzeigen, welche eine Größe höherer Aussagekraft als Regelgröße aus mehreren Einzelgrößen berechnen, sowie
- in Voranzeigen, welche einen wahrscheinlichen oder bekannten zukünftigen Verlauf der Soll- und/oder Istwerte ausgeben,

untergliedern. Bezogen auf die Darstellungsform sind zudem

- absolut situationsanaloge Anzeigen (Videobilder),
- bildhaft situationsanaloge Anzeigen (stilisierte Abbildungen der Umwelt mit quantitativen Informationen von Prozessgrößen in Form von Füllstandsanzeigen, Blockschatzbildern, künstlicher Horizont etc.),
- analoge Anzeigen (parallele bildhafte Darstellung der Regelgröße und des Wertebereichs in abstrakter, analoger Form) sowie
- digitale Anzeigen

zu unterscheiden.

Zur Informationsübermittlung vom Systemelement Mensch an die Maschine stehen eine Vielzahl von aktiven und passiven Bedienelementen zur Verfügung, die sich anhand folgender Klassifizierungsmerkmale charakterisieren lassen:

- Durch das Merkmal Bedienung werden die auf das Bedienelement wirkenden Extremitäten und auch die Greif- bzw. Tretart definiert.
- In ihrer Bewegungsart sind rotatorische, translatorisch und quasitranslatorische (schaltende) Bedienelemente zu unterscheiden.

- Hinsichtlich der Wirkungsweise auf das Maschinensystem oder den Menschen können Informationen über Bedienelemente analog und kontinuierlich bzw. digital und in diskreten Schritten umgesetzt werden.
- Im Merkmal Dimensionalität werden die Freiheitsgrade des Bedienelements definiert, in denen Informationen auf das Maschinensystem oder auf den Menschen ausgegeben werden können. I. A. ist die Dimensionalität des Bediengeräts damit eng mit den erforderlichen Freiheitsgraden der Aufgabenstellung verbunden.
- I. d. R. werden in einem Bediengerät aus ergonomischen Gründen mehrere Bedienfunktionen der Informationsumsetzung integriert. Durch die sequentielle oder simultane Betätigung dieser einzelnen Funktionen während der Manipulation können unterschiedliche Teil- oder Parallelaufgaben durchgeführt werden.

### 6.1.1 Konzeption von Darstellungs- und Wirkraum

In der Konzeption des Operatorarbeitsplatzes des Mikromontagesystems (vgl. Abbildung 20) steht zunächst mit dem Telepräsenzbetrieb die realitätsnahe Interaktion des Menschen mit der Mikromontageumgebung im Vordergrund. Die Bedienung ist dabei über die Gestaltung geeigneter Bedienerschnittstellen so realitätsnah und ergonomisch wie möglich zu gestalten. Hierzu sind im Darstellungsraum die Hauptfunktionen zur Visualisierung der Prozessumgebung, der Prozessparameter bzw. -grenzen sowie des Anlagenzustandes angeordnet. Im Wirkraum sind die Hauptfunktionen der haptischen Interaktion sowie die Kalibrierung und Parametrierung der Anlagenkomponenten zusammengefasst. Für jede dieser Hauptfunktionen des Telepräsenzsystems werden die einzelnen Lösungskonzepte für die Bedienerschnittstellen, welche zunächst unabhängig von einer integrierten Gesamtlösung der Operatorseite zu entwerfen sind, in einem morphologischen Kasten zusammengefasst (siehe Abbildung 29).

Für die Visualisierung des Prozessszenarios bzw. der Remote-Umgebung stehen in Form von Realbildern oder virtuellen Modellen entweder absolut oder bildhaft situationsanaloge Istwertanzeigen bzw. eine Kombination aus beiden zu Verfügung, da diese eine hohe Anschaulichkeit bei gleichzeitig hoher Intuition bieten. In der direkten Realbilddarstellung wird die Remote-Umgebung über eine oder mehrere Kameras in unterschiedlichen Perspektiven erfasst und am Visualisierungsmedium direkt und ohne Zeitverlust ausgegeben. Durch die Nutzung eines virtuellen Modells sind im Vergleich zur Realbilddarstellung erweiterte Funktio-

nen z. B. eine Veränderung des Zooms oder der Perspektive umsetzbar. Um einen realitätsnahen Eindruck während der Interaktion mit dem virtuellen Modell zu erreichen, müssen die Abweichungen zwischen Modell und Realität sehr gering gehalten werden. Für Mikromontageszenarien ist dies jedoch zum einen wegen der notwendigen feinen Auflösung des virtuellen Modells und zum anderen wegen dem hochgenauen Abgleich der realen Prozessumgebungen mit dem virtuellen Modell mit erheblichem technischen Aufwand verbunden. Daher beschränkt sich die Darstellung von virtuell erzeugten Informationen in dieser Arbeit auf kleine Teilmodelle bzw. auf in Realbilder eingeblendete Zusatzelemente.

Hauptfunktionen für den Telepräsenzbetrieb		Lösungsraum für Bedienerschnittstellen für den Telepräsenzbetrieb					
Darstellungsraum	Visualisierung des Prozessszenarios/der Remote-Umgebung	Realbilder	Einblendung von virtuellen Informationen in Realbilder				
	Visualisierung von Prozessparametern/-grenzen.	Soll-/Istwertanzeige	digital	Synthetische Anzeige			
	Visualisierung des Anlagenzustands.	Istwertanzeige	analog	analog			
Wirkraum	Interaktion und haptische Rückmeldung	Soll-/Istwertanzeige	Differenzanzeige				
	Parametrierung/ Kalibrierung der Anlagenkomponenten.	Analoger Verlauf	digital				
Multisensor-System	Erfassung haptischer Daten	Force-Feedback Joystick	Phantom				
	Erfassung visueller Daten	einhandig	einhandig	beidhändig			
		Beidhändig	beidhändig	Eingabegerät			
		Joystick	Phantom	SpaceMouse	Tastatur/Maus		
		Direkt über geeignete Sensoren in der Remote-Umgebung					
		Direkte über geeignete Sensoren in der Remote-Umgebung					

Abbildung 29: Hauptfunktionen des Operatorarbeitsplatzes im Telepräsenzbetrieb (links); Lösungskonzepte für Bedienerschnittstellen des Darstellungs- und Wirkraums des Operatorarbeitsplatzes

Der umfassende Eindruck der Prozessumgebung wird durch die qualitative oder quantitative Darstellung von Prozessparametern bzw. -grenzen ergänzt. Aufgrund der geforderten Präzision und der ungewohnten Prozessumgebung müssen in der telepräsenten Mikromontage sowohl die absoluten Prozessgrenzwerte (z. B. die maximale Fügekraft) als Sollwerte visualisiert als auch die relative Annäherung an diese Grenzwerte dargestellt werden, um die vorgegebenen Prozessgrenzen auch einzuhalten. Zudem müssen die Istwerte der Prozessparameter aus qualitätssichernden Aspekten mitprotokolliert werden. Hierfür eignen sich daher digitale als auch analoge Soll-/Istwertanzeigen in Kombination mit analogen synthetischen Anzeigen, welche z. B. in einem Toleranzband in Form eines grünen, gelben und roten Balkens die Annäherung der Parameter an die Grenzwerte anzeigen. Damit können kritische oder überkritische Grenzbereiche optisch

dargestellt werden. Eine abstrakte Form dieser prozessrelevanten Informationen gewährleistet eine schnelle Informationsverarbeitung beim Menschen und damit letztlich einen qualitativ hochwertigen Anlagenbetrieb. Der Anlagenzustand wird dagegen mit digitalen Differenzanzeigen (Zustandsleuchten) in Kombination mit analogen Soll-/Istwertanzeigen für die kritischen Anlagenparameter wiedergegeben. So kann der Operator auf einen Blick mit farbcodierten Zustandsleuchten den Anlagenzustand erfassen und bei Störungen oder Ausfällen aus einem Vergleich der absoluten Soll- und Istwerte der Anlagenparameter den Grund des kritischen Zustandes analysieren.

Die Interaktion und haptische Rückmeldung kombiniert die Eingabe von Bewegungskommandos mit der Ausgabe von haptischen Informationen an den Bediener jeweils in mehreren Freiheitsgraden. Abgestimmt auf das vorgegebene 2,5D-Montageszenario, d. h. die planare Montage von hybriden Mikrosystemen in mehreren Montageebenen, sind zur Ausführung mindestens drei translatorische ( $x, y, z$ ) und ein rotatorischer Freiheitsgrad ( $\varphi_z$ ) erforderlich. Diese werden durch Zusatzkinematiken z. B. für Kameraverstellungen ergänzt. Als Bedienerschnittstellen werden in dieser Arbeit nur Geräte betrachtet, welche jeweils einhändig mit den Händen gegriffen werden und Bewegungskommandos analog verarbeiten. Zudem sollen die Bedienelemente soweit steuerungstechnisch integrierbar sein, dass sie Zusatzfunktionen über digitale Schalter oder Hebel ansteuern können. Dies ist z. B. für die Eingabe von Steuerbefehlen zur Parametrierung und Kalibrierung der Anlagenkomponenten während der telepräsente Montage erforderlich.

Die Funktionen der Operatorseite im Telepräsenzbetrieb betreffen auch das Multisensorsystem, durch das die haptischen bzw. visuellen Daten auf der Teleoperatorseite erfasst werden. Für Mikromontageanwendungen ist hier die direkte Erfassung der haptischen wie auch der visuellen Daten mit Hilfe geeigneter Sensoren von besonderer Bedeutung, was auch einige aktuelle Forschungsansätze belegen. Aus wirtschaftlichen, wie auch technischen Gründen ist es allerdings in bestimmten Anwendungsfällen notwendig, die rückgemeldeten Größen aus alternativen Sensorinformationen zu fusionieren (vgl. Abschnitt 5.4).

### 6.1.2 Konzeption des Programmierraums

Der telepräsente Grundaufbau des Arbeitsplatzes muss für Wechsel der Fertigungsarten der Anlage um einen Programmierraum erweitert werden. In diesem sind die Funktionen der Wissensvermittlung zwischen Mensch und Maschine

während der telepräsenten Programmierung eines Bewegungsablaufs für den Automatikmodus zusammengefasst. Die Hauptfunktionen des Programmierraums sind

- die Visualisierung von Prozess- und Anlagenparametern zur Überwachung des Systemzustands,
- die Kommandierung von neuen bzw. modifizierten Parametervorgaben zur Parametrierung bzw. Kalibrierung der Anlagenkomponenten und
- die Programmierung eines Bewegungs- und Montageablaufs (siehe Abbildung 30).

Durch die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Programmierraum darf die Visualisierung und Interaktion im Darstellungsraum und Wirkraum während des Telepräsenzbetriebs nicht gestört werden. Der Programmierraum muss daher mit dem Darstellungs- und Wirkraum so gut vernetzt sein, dass der Benutzer sowohl beim Interagieren mit der Remote-Umgebung im manuellen Betrieb als auch beim Programmieren des automatisierten Montageablaufs hinsichtlich des Bedienkonzepts und des -komforts die gleichen Voraussetzungen vorfindet. Unterschiedliche Funktionen müssen daher über einheitliche Bedienerschnittstellen ausführbar sein.

Hauptfunktionen der Operatorseite		Konzeptioneller Lösungsraum für die Operatorseite			
Programmierraum	Visualisierung von Anlagen- und Prozessparametern	Soll-/Istwertanzeige		Synthetische Anzeige	
	Kommandierung von neuen/ modifizierten Parametervorgaben	digital	analog	analog	
	Programmierung eines Bewegungs-/ Montageablaufs.	Force-Feedback Gerät		Eingabegerät	
		Joystick	Phantom	SpaceMouse	Tastatur/Maus
		Force-Feedback Gerät			
		Integrierte Funktionstasten		Eigene Funktionstasten	

Abbildung 30: Hauptfunktionen des Programmierraums

Daher werden in Analogie zur Konzeption des Darstellungsraums (vgl. Abbildung 29) die gleichen oder gar dieselben Visualisierungssysteme in Form einer digitalen bzw. analogen Soll-/Istwertanzeige oder einer analogen synthetischen Anzeige verwendet, um die Informationen für den Telepräsenzbetrieb mit den Informationen zur Programmierung zu ergänzen. Auch für die Kommandierungsfunktion bzw. für die Programmierung von Bewegungsabläufen muss auf die Eingabegeräte zurückgegriffen werden, welche auch für die telepräsente Interaktion verwendet werden. Ein Wechsel zwischen Bediengeräten würde sonst die intuitive Interaktion stören. Neben dieser homogenen Schnittstellengestaltung bedingt die implizite telepräsente Programmierung von automatisierten Bewe-

gungsabläufen einen erweiterten standardisierten Mensch-Maschine-Dialog, um aufbauend auf der telepräsenten Interaktion zusätzliche Programmierinformationen online an das Maschinensystem weiterzugeben.

### 6.1.3 Grundkonzept eines integrierten Operatorarbeitsplatzes

Für ein Gesamtkonzept des Operatorarbeitsplatzes stellt sich für den Telepräsenzbetrieb in erster Linie die Frage, wie der Darstellungs- und Wirkraum zueinander angeordnet werden. Die Verwendung von klassischen PC-Bildschirmen und haptischen Eingabegeräten auf einem Arbeitstisch ist mit erheblichen Einschränkungen bzgl. der realitätsnahen Interaktion verbunden, da der Darstellungsraum nicht mit dem Wirkraum korreliert (LINDEMANN et al. 2004). Damit ist der Blick des Betrachters im Unterschied zu manuell ausgeführten Tätigkeiten nicht auf die Hände sondern auf den Bildschirm gerichtet. Dieses Defizit kann nur sinnvoll durch eine Positionierung des Wirkraums hinter das Darstellungsmedium gelöst werden, da dadurch das Eingabegerät im Sichtkegel des Bedieners liegt und der Darstellungsraum durch die Aufbauten der Eingabegeräte nicht beeinträchtigt wird. Eine derartige Verschmelzung von Darstellungs- und Wirkraum wird nach YOKOKOJI ET AL.(1994) als WYSIWYF-Displays, d. h. „What You See Is What You Feel“-Display, bezeichnet.

Das Grundlayout des hier verwendeten Operatorarbeitsplatzes basiert auf einem statischen Aufbau eines WYSIWYF-Displays für die beidhändige Interaktion in telepräsenten Montageanwendungen (siehe Abbildung 31). Diese Idee wurde nach den Richtlinien der Systemergonomie als kombinierter Sitz- und Steharbeitsplatz konzeptioniert. Sowohl die Visualisierungsmedien in Form einer Leinwand bzw. eines Zusatzmonitors als auch die Arbeitsplatte mit den darauf fixierten Eingabegeräten sind flexibel in der Höhe verstellbar und damit an die individuelle Körpergröße des Bedieners anpassbar. Während der Verwendung als Sitzarbeitsplatz können zudem zusätzliche Fußschalter auf einer in der Neigung verstellbaren Fußplattform installiert werden.

Im Konzept dieses integrierten Operatorarbeitsplatzes verschmelzen damit sowohl der Darstellungs- und Wirkraum für die Telepräsenzanwendung als auch der Programmieraum ineinander. Das Konzept dient als Grundgerüst, um die unterschiedlichen Bedienerschnittstellen flexibel für die beidhändige Interaktion miteinander zu kombinieren. Passend zu unterschiedlichen Aufgabenarten kann der Arbeitsplatz damit schnell umkonfiguriert und mit den entsprechenden Bedienerschnittstellen ausgestattet werden. Für die aktive Aufgabenart in der

telepräsenten Interaktion wird die Konfiguration als Sitzarbeitsplatz empfohlen, für die passiv-monitive Aufgabenart während des Automatikbetriebs aber die Variante als Steharbeitsplatz.

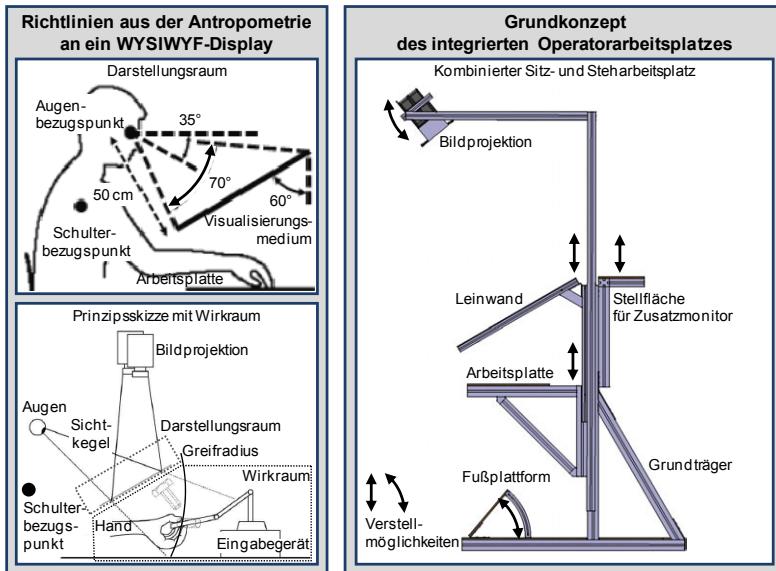


Abbildung 31: Layout eines integrierten und anpassbaren Operatorarbeitsplatzes (rechts) und relevante Richtlinien aus der Anthropometrie (links)

## 6.2 Steuerungsstrategie

### 6.2.1 Kontinuierlicher Wechsel zwischen den Fertigungsarten

Das Potenzial des adaptiven Anlagenkonzepts und der Steuerungsstrategie lässt sich am Lebenszyklus eines Mikrosystems aufzeigen. Beginnt im Produktleben die Einzelfertigung der Prototypen, so kann die Anlage bereits in ihrem telepräsentem Grundmodul in Betrieb gesetzt werden. Dieses Modul enthält alle für den Prozess notwendigen Hardware- und Steuerungskomponenten. Das Wissen, welches während dieser telepräsenten Fertigungsphase aufgebaut wird, kann online durch Aufzeichnung der Prozessparameter und Steuerungsbefehle für

weitere Betriebsmodi vorgehalten werden. Beginnt in der Produktanlaufphase die Serienfertigung können bei hinreichend großen Stückzahlen Teilprozesse automatisiert werden. Hierzu ist dann der Betriebsmodus „Automatik“ erforderlich. Das notwendige Wissen zum Parametrieren und Kalibrieren der Prozessparameter basiert auf dem aufgebauten und in der Anlage gespeicherten Know-how des Laborbetriebs. In der Sättigungsphase der Anlagennutzung bei vergleichsweise höheren Stückzahlen kann dann auf vollautomatisierten Betrieb umgestellt werden. Die Methoden für den Know-how Transfer und die Inbetriebnahme der automatisierten Anlage sind dieselben wie beim Übergang vom telepräsenten zum teilautomatisierten Modus. Beim Auslaufen des Produkts oder bei großen Stückzahlschwankungen kann simultan – d. h. online innerhalb einer Fertigungsstufe – in den jeweils niedrigeren Betriebsmodus zurückgewechselt werden. Das Potenzial dieses simultanen Wechsels der Betriebsmodi zeigt sich auch im Einsatz der Montagesysteme für heterogene Produktionsfolgen. Ein Wechsel zwischen Losgröße 1 und 1000 kann hier ohne erhebliche Aufwände für Einrichtprozesse und Inbetriebnahme erfolgen, da sich das adaptive System auf die neuen Montageszenarien anpasst und zudem auf Prozessvorwissen zurückgegriffen werden kann. Ein einmal telepräsent gefertigtes Produkt kann somit teil- oder vollautomatisiert beliebig oft und in beliebigen Losgrößen unbestimmter Abfolge produziert werden.

In jeder Fertigungsart ist die Montagequalität der hergestellten Produkte zu überprüfen. Analog zur manuellen Fertigung kann auch im Telepräsenzbetrieb nicht auf eine Bauteilendkontrolle verzichtet werden, da die Prozessparameter und deren Schwankungen nicht online überwacht werden. So kann es trotz qualitätssichernder Maßnahmen wie der Einblendung von Fügehilfen oder Positioniermarken vorkommen, dass die Positioniergenauigkeit nicht innerhalb der vorgegebenen Toleranzen eingehalten wird. Durch das telepräsente Ansteuern sind die Bewegungsbahnen und damit auch die Positioniergenauigkeit Schwankungen unterworfen. Im Automatikmodus können dagegen Schwankungen der Prozessparameter innerhalb vorgegebener Toleranzen ausgeregelt werden, sofern diese sensorisch überwacht werden. Z. B. können durch die gewählte Relativpositionierung der Bauteile Lageverschiebungen von Bauteil und Substrat noch während der Fügebewegung ausgeglichen werden.

### 6.2.2 Telepräsenzmodus für die Einzelfertigung

Im Unterschied zur manuellen Montage werden durch die Kommunikation zwischen Operator- und Teleoperatorseite im Telepräsenzmodus bereits Daten generiert, welche auch für die automatisierte Montage nötig sind. Dies sind z. B. maximale erlaubte Fügekräfte, geometrische Informationen über Positionen der Fügepartner (Bauteile und Substrate), Kalibriereinstellungen der notwendigen Sensoren etc.. Im Telepräsenzmodus werde diese Daten zwar generiert und für den Prozess benutzt, jedoch nicht aufgezeichnet bzw. für Wiederholprozesse gespeichert.

Als Basisinformationen für den Telepräsenzmodus sind für die Montage i. A. beim Operator Kenntnisse über den Montageablauf, die eingesetzte Fügetechnik und die Bauteileigenschaften der Fügepartner notwendig. Der Montageablauf zeigt dem Operator, wo er welche Fügepartner, Werkzeuge, Greifer etc. auffindet, ggf. aufnehmen bzw. einwechseln muss und wo der Montageort zu finden ist. Im Gegensatz zu manuellen Montageanlagen, v. a. wenn der Operator keine freie Sicht auf den Teleoperator besitzt, ist hier eine visuelle kamerabasierte Anzeige der kompletten Montageanlage notwendig, damit der Operator sich auf der Teleoperatorseite zurechtfindet. Für das Anfahren von Grobpositionen über dem Bauteilmagazin, dem Greiferbahnhof bzw. über dem Montageort ist eine derartige Übersichtsdarstellung ausreichend. Für das spezielle Auffinden von Bauteilen bzw. des Montageorts ist eine weitere hochauflöste Darstellung notwendig, welche den Bauteilgreifer, eventuelle Referenzmarken und die Bauteile eindeutig und in einer Raumrichtung darstellt. Befindet man sich beispielsweise über dem Montageort, so muss die genaue Montageposition des Substrats (i. d. R. ein Bild des Substrats mit Leiterbahnen und Referenzmarken) und des Bauteils mit Referenzmarken deutlich erkennbar sein. Der Operator als Regler des Regelkreises in der telepräsenten Montage muss nun beide Referenzmarken deckungsgleich zusammenführen und auf diese Weise die Montageposition finden. Über Zusatzinformationen im Telepräsenzmodus kann das Montagesystem den Operator unterstützen. Wird ein Abbild der Referenzmarken der Fügepartner vorab hinterlegt, so kann mit einem logischen Sensor 4. Art die Feinpositionierung der Fügepartner durch das Einblenden von Zusatzinformationen z. B. durch ein Positivsignal oder durch ein autonomes Sperren der Position bei Übereinstimmung der Fügepartner erfolgen und damit der Feinpositionierungsvorgang erleichtert werden.

### 6.2.3 Telepräsenzes Programmieren

Diese Zusatzinformationen im Telepräsenzmodus sind diejenigen Daten, welche für den Programmierungsvorgang eines automatisierten Montageablaufs notwendig sind. Um die Daten für die Programmierung zu strukturieren, wird der Montageablauf zunächst in einzelne Basisoperationen unterteilt. Am Beispiel eines Montageablaufs mit dem Montageszenario 1. Art, in dem die Positioniermarken beider Fügepartner zugleich zu sehen sind, soll dieser Vorgang aufgezeigt werden. Unter der Annahme, dass alle notwendigen Handhabungs-, Greif- und Fügewerkzeuge im Anlagensystem vorhanden sind und die Bauteile bzw. Substrate in einem Magazin in der Anlage zur Verfügung stehen, kann der Montagevorgang in folgende Teilprozesse unterteilt werden:

- Anfahren des Magazins (Absolutpositionierung)
- Feinpositionierung des Greifers über dem Bauteil (Relativpositionierung)
- Aufnehmen und Greifen des Bauteils aus einem Magazin (kraftgeregeltes Anfahren)
- Anfahren des Montageorts bzw. Substrats (Absolutpositionierung)
- Ausführen des Fügevorgangs, z. B. Klebstoffapplikation mit einer Dispensnadel: Feinpositionierung der Dispensnadel über dem Fügeort (Relativpositionierung), Anfahren des Arbeitsabstandes über dem Substrat (z. B. kraftgeregeltes Anfahren eines virtuellen Bezugspunkts), Klebstoffapplikation
- Feinpositionieren des Bauteils über dem Substrat (Relativpositionierung)
- Absetzen des Bauteils auf dem Substrat (kraftgeregeltes Anfahren)

Dieser Montagevorgang lässt sich damit aus den Basisoperationen

- Absolutpositionierung,
- Relativpositionierung und
- kraftgeregeltes Anfahren

zusammensetzen.

Für das telepräsente Programmieren ist es daher notwendig, den kontinuierlichen Bewegungsablauf des telepräsenten Montagevorgangs gezielt und für jedes verwendete Werkzeug in diese Basisoperationen zu unterteilen. Für jede Basisoperation wird dann der notwendige Datensatz im Programmspeicher hinterlegt. Mit zunehmender Kognition in Maschinensteuerungen ist es hier auch möglich, dass Basisoperationen während der Ausführung des Montagevorgangs eigenständig

dig durch die Anlagensteuerung erkannt werden. Dem Operator wird dann mitgeteilt, ob die jeweilige Basisoperation richtig zugeordnet wurde und welche Informationen für den Programmspeicher notwendig sind. Eine Umsetzung dieser Zusatzfunktionalität ist jedoch hier nicht weiter ausgeführt.

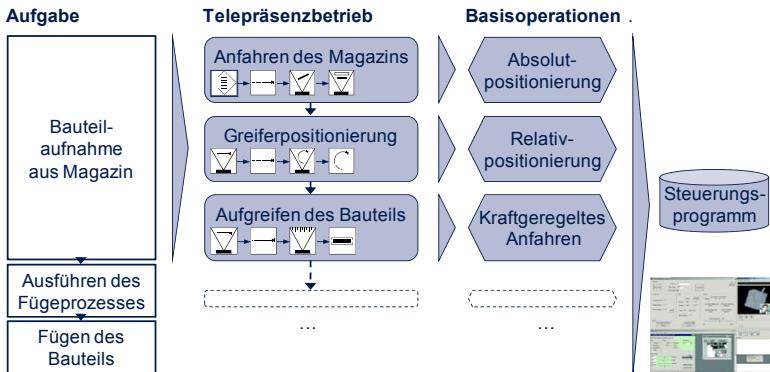


Abbildung 32: Zerlegung der Montageaufgabe in Basisoperationen für das telepräsenzmodus Programmieren

Für die Absolutpositionierung sind nur die Ausgangs- und Endposition des Vorgangs abzuspeichern, der zurückgelegte Weg zwischen den Positionen ist zunächst beliebig. Abhängig vom Anlagenlayout bzw. von Aufbauten muss der Bewegungsraum jedoch zur Kollisionsvermeidung eingeschränkt bzw. durch allgemein im Programmspeicher hinterlegte Bewegungsräume vorgegeben werden. Der Bewegungsablauf und die dazugehörigen Parameter wie zurückgelegter Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung können sich daher zwischen dem Telepräsenzmodus und dem Automatikmodus unterscheiden. Sofern Parameter wie z. B. die Maximalbeschleunigung prozessabhängig limitiert werden müssen, ist dies bereits für den Telepräsenzmodus in den Grundeinstellungen der Ansteuerung der Kinematiksysteme hinterlegt.

Für die Relativpositionierung ist zunächst die Ausgangsposition zu erfassen, ab welcher der Relativpositionierungsvorgang eingeleitet werden soll. Zudem müssen im System die Informationen über die Referenzmarken in Form von Vergleichsbildern hinterlegt werden. Abhängig von den Teilprozessen des Montagevorgangs ist zudem die Genauigkeit und Toleranz für die Feinpositionierung zu unterscheiden, da z. B. die Bautellaufnahme aus dem Magazin weniger genau als der Positionierungsvorgang über dem Substrat erfolgen muss. Der genaue Lageregelvor-

gang des Operators in der telepräsenten Montage ist für den automatisierten Vorgang nicht von Bedeutung, sondern wird durch die Anlagensteuerung selbst ausgeführt.

Sowohl die Bauteilpositionen im Magazin als auch die Montageorte auf dem Substrat sind entweder in einem regelmäßigen oder zumindest in einem bekannten Muster definiert und in CAx-Daten hinterlegt. Unter dieser Voraussetzung müssen nicht alle Positionen für die Basisoperationen Absolut- und Relativpositionierung einzeln „geteacht“ werden. Bei Hinterlegung des Magazin- bzw. Substratlayouts im Programmspeicher und dem Abspeichern einer spezifischen Bauteil- bzw. Montageposition über dem Substrat z. B. an einem vordefinierten Eckpunkt des Magazins bzw. des Substrates können die Relativabstände zwischen den einzelnen Bauteilen bzw. Montageorten durch die Steuerung selbst berechnet werden.

Für die Basisoperation kraftgeregeltes Anfahren sind keine zusätzlichen Daten für den Automatikmodus zu hinterlegen, da die notwendigen Parameter wie maximale Fügekraft bereits im Telepräsenzmodus notwendig sind. Im hier aufgezeigten Montagevorgang folgt der Basisoperation Feinpositionierung immer die Basisoperation kraftgeregeltes Anfahren, allerdings mit unterschiedlichen Parametern für die Bauteilaufnahme aus dem Magazin, für das Klebstoffdispensieren und für das Absetzen des Bauteils auf dem Substrat. Während des telepräsenten Ausführens des Montagevorgangs müssen damit im Programmspeicher die spezifischen Werte für die jeweiligen Kraftregelparameter hinterlegt werden.

Nach einer Implementierung eines neuen Montageprozesses oder eines neuen Werkzeugs zum Zwecke der Anlagenflexibilisierung muss daher geprüft werden, ob die im Programmspeicher hinterlegte Einteilung an Basisoperationen für einen telepräsenten Programmervorgang ausreicht oder ob ggf. zusätzliche Basisoperationen implementiert werden müssen. Im ersten Fall können neue Montageabläufe ohne Zusatzaufwände aus den Basisoperationen zusammengesetzt werden, im zweiten Fall muss erst die neue Basisoperation in das Steuerungssystem integriert werden.

#### **6.2.4 Automatikmodus für die Mittelserienfertigung**

Sind alle Basisoperationen im Programmspeicher hinterlegt und miteinander in der richtigen Reihenfolge verknüpft, kann das so erstellte Programm beliebig oft

aufgerufen werden, sofern Bauteile, Substrate und Werkzeuge an derselben Stelle im System vorhanden sind. Automatisierte Fertigungszyklen eines Bauteils können somit in beliebiger Sequenz auf dem adaptiven Anlagensystem durchgeführt werden.

Finden im Produktlebenszyklus Produktanpassungen z. B. mit enger tolerierten Fügekräften statt oder variieren Magazin- oder Substratpositionen, so können die automatisierten Montageabläufe ohne Neuprogrammierung angepasst werden. Dazu sind einfach die neuen Referenzdaten im Programmspeicher zu hinterlegen. Dies erhöht zusätzlich die Varianten- und Einsatzflexibilität der Anlage.

Um eine ausreichende Montagequalität zu gewährleisten, sind hier sowohl die relevanten Prozessparameter als auch die Toleranzen im Programmspeicher zu hinterlegen. Für die Handhabung von Substrat und Bauteil, sind z. B. die Grobposition der Komponenten vorzugeben, an der über die Bildverarbeitung dann der Abgleich von Referenz- und Realbild erfolgen kann. Die Grobposition erleichtert und beschleunigt damit das Auffinden der richtigen Position, ist aber nicht bestimmd für die Positioniergenauigkeit. Durch die Vorgabe von Toleranzen kann dann die automatisierte Lageregelung über den Abgleich von Referenz- und Realbild erfolgen. Bewegen sich die Prozessparameter zwischen einzelnen Fertigungschargen außerhalb der vorgegebenen Toleranzen müssen die Referenzdaten im Programmspeicher neu hinterlegt bzw. angepasst werden.

## 7 Aufbau einer Pilotanlage

### 7.1 Teleoperatorseite für die adaptive Mikromontage

#### 7.1.1 Kinematiksystem und Mikromontagewerkzeuge

Die adaptive Mikromontagestrategie und Anlagenarchitektur (siehe Abschnitt 4.1) und ausgewählte Elemente des Baukastens (siehe Kapitel 5 und 6) wurden in einer Pilotanlage in Form eines erweiterten Telepräsenzsystems (vgl. Abbildung 20) umgesetzt, welches für die Montage hybrider Mikrosysteme von der Einzel- über die Klein- bis zur Mittelserie ausgelegt ist. Die Pilotanlage besteht aus den folgenden Komponenten:

- **Teleoperatorseite:** Die Wertschöpfung erfolgt durch eine auf die adaptive Mikromontage ausgelegte Teleoperatorseite, welche modular aus den Kinematiksystemen, den Mikromontagewerkzeugen, den Bereitstellungs- komponenten und der Sensorik aufgebaut und an die unterschiedlichen Betriebsmodi adaptiert werden kann.
- **Bedienerschnittstelle:** Über die Bedienerschnittstelle (Operatorseite) wird das Anlagensystem entweder aktiv im Telepräsenzmodus gesteuert bzw. programmiert oder passiv-monitiv im automatisierten Betrieb überwacht.
- **Anlagensteuerung:** In der Anlagensteuerung, welche auch die umfassende Betriebs- und Bediensicherheit des Mikromontagesystems gewährleistet, erfolgt die Informationsverarbeitung des Mensch-Maschine-Systems.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Mikromontageanlagen für die Einzelfertigung mit mechanisch einstellbaren Kinematiken (vgl. Abschnitt 3.2.1) besteht bereits das Grund-Setup des adaptiven Mikromontageteleoperators aus motorisch angetriebenen Aktorkomponenten. Um den Bereich der planaren Montage in mehreren Montageebenen (die sog. 2,5D-Montage) vollständig abzudecken, wurde die Pilotanlage mit drei linearen Freiheitsgraden in den kartesischen Koordinaten ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) und einem Rotationsfreiheitsgrad im Drehwinkel um die vertikale  $z$ -Koordinate ( $\phi_z$ ) ausgelegt. Die Bereitstellung, Zuführung und Positionierung der Bauteile in der horizontalen Ebene ( $x$ ,  $y$ ) erfolgt über ein sog. Planarsystem, welches begrifflich abgeleitet von den bekannten Rotationsantrieben aus

- einem bis vier Primärelementen, den sog. Läufern, und
- einem feststehenden Sekundärelement, dem sog. Stator,

besteht. Basierend auf dem Prinzip des Linearmotors (STÖLTING & KALLENBACH 2001) werden damit in einem Planarsystem zwei Lineardirektantriebe zu einer ebenen Bewegungseinheit kombiniert. Im eingesetzten System können bis zu vier Läufer mit den Abmessungen von jeweils 146 mm x 154 mm auf dem Stator mit den Abmessungen 1000 mm x 600 mm entweder sequentiell oder parallel betrieben werden. In der Pilotanlage werden aus Verfügbarkeitsgründen zwei Läufer eingesetzt, auf denen über standardisierte Schnittstellen unterschiedliche Bauteilmagazine eingespannt werden können (siehe Abbildung 33).

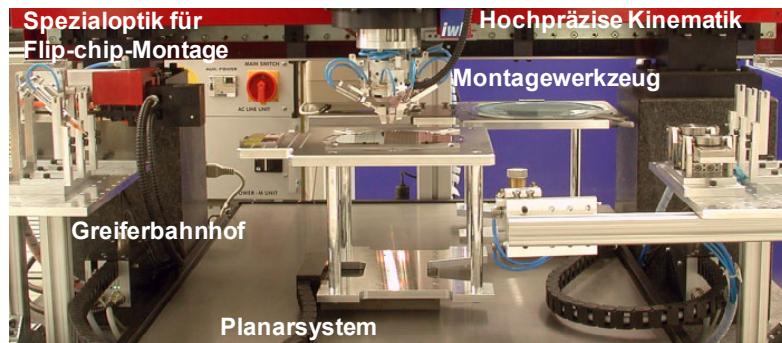


Abbildung 33: Module der Teleoperatorseite

Zur Aufnahme von Werkzeugen für die unterschiedlichen Füge- und Montageprozesse ist an einer Seite des Tisches ein modularer Mikromontagewerkzeugkopf auf einer Linearachse der Firma PI (z-Achse) angeordnet. Sie sind frei um ihre Hochachse drehbar ( $\phi$ -Achse). (Anm. des Verf.: In Abbildung 33 ist dieser Werkzeugkopf in einem analogen Aufbau an einer Zusatzkinematik (in der Bildmitte) dargestellt, welche eine höhere Positioniergenauigkeit erzielt als die in der Pilotanlage verwendete Linearachse.) Die Werkzeugsysteme wurden für den hier notwendigen Einsatz in verschiedenen Betriebsmodi weiterentwickelt bzw. evolutorisch optimiert. In ihrem prinzipiellen Aufbau basieren sie auf dem für die automatisierte Mikromontage entwickelten Werkzeugkonzepts (vgl. Abschnitt 5.2), welches aus einem zentralen Zylinder mit integrierter, hochauflösender Kamera und Kraftsensorik und daran befestigten Endeffektoren (Greifwerkzeuge, Dispenswerkzeuge, etc.) besteht. Der zentrale Werkzeugzylinder wurde für den hier notwendigen Einsatz soweit modularisiert, dass verschiedene Sensor-

komponenten wie Kraft- bzw. Wegsensoren und an die Montageaufgabe angepasste optische Systeme einfach integriert werden können (siehe Abbildung 33).

Zudem wurde der bis dahin starre Werkzeugzylinder durch Aktorsysteme und zusätzliche Kinematiken erweitert. Da hochauflösende optische Sensoren systembedingt einen sehr engen Tiefenschärfebereich haben, wurde zwischen Optiksystem und Werkzeugzylinder ein zusätzlicher Freiheitsgrad eingebracht. Damit kann die scharfe Bildebene in der vertikalen Achse verschoben werden. Diese Funktion ist besonders für den telepräsenten Betrieb notwendig, da man mit diesem Freiheitgrad die Anpassungsfähigkeit der Schärfenebene des Auges beim Annähern an das Objekt nachahmen kann.

Um für bestimmte Montageaufgaben zwei Werkzeuge am Prozesspunkt relativ zueinander zu positionieren, ist eine Endeffektorschnittstelle relativ zu den anderen (drei Schnittstellen) in drei Freiheitsgraden (x, y, z) beweglich ausgeführt. Somit lassen sich zwei Werkzeuge relativ zueinander und über die weiteren Freiheitsgrade der Mikromontageanlage auch relativ zum Fügeort positionieren. Somit kann in allen Betriebsmodi eine „quasi“ beidhändige Montageoperation realisiert werden. Besonders im telepräsenten Betriebsmodus wird dadurch eine realitätsnahe Arbeitsweise möglich.

Durch geeignete Schnittstellen sind an den zentralen Zylinder des Werkzeugsystems verschiedene an die Montageaufgabe angepasste Endeffektoren adaptierbar. Hierzu wurde eine spezielle Steilkegelschnittstelle mit integrierten Fluiddurchführungen entwickelt. Diese entspricht der parallel dazu entwickelten Norm (DIN 32565).

### 7.1.2 Sensorik und Bildverarbeitung

In der Pilotanlage sind ein monoaxialer Kraftsensor zur Aufnahme von Fügekräften und mehrere optische Sensoren zur Visualisierung bzw. Positionsvermessung integriert. Der monoaxiale Kraftsensor (Firma Burster) erlaubt es dabei, Fügekräfte von maximal  $+/ - 50$  N aufzunehmen. Dadurch lassen sich Mikromontageprozesse hinreichend genau überwachen, ohne dass es zu einer Schädigung der Fügepartner kommt. Der Sensor ist durch ein mehrstufiges Sicherheitskonzept gegen Überlastung gesichert. Die maximale Fügekraft wird zunächst über den Sensor selbst bei einem einstellbaren Limit abgeregelt. Zudem ist der Sensor mechanisch über eine federnde Lagerung gegenüber Lastspitzen gesichert.

Die optischen Sensoren in der Montageanlage lassen sich in drei Klassen einteilen:

- Zur reinen Visualisierung der Gesamtanlage bzw. der Prozesse werden handelsübliche CCD-Kameras eingesetzt, die mit Zusatzfunktionen wie Schwenken in zwei Freiheitsgraden und Tracking zur Nachverfolgung der Fügepartner, Werkzeuge etc. ausgestattet sind.
- Zur Feinpositionierung in den planaren Freiheitsgraden werden hochauflösende Optiksysteme eingesetzt, die abhängig vom Montageszenario verschiedene Bildgrößen, Auflösungen und Genauigkeiten aufweisen. Für Positionergenauigkeiten im  $\mu\text{m}$ -Bereich wird ein telezentrisches Messobjektiv in Verbindung mit einer Schwarz/weiß-CCD-Kamera des gleichen Herstellers eingesetzt. Für größere Objekte wird ein telezentrisches Messobjektiv in Verbindung mit einer Farb-Fire-Wire-CCD-Kamera des gleichen Herstellers bei einer geringfügig schlechteren Positionergenauigkeit verwendet. Beide Objektive sind auswechselbar und austauschbar zentrisch in den Werkzeugkopf integriert und zeigen den Montageprozess mit den Fügepartnern aus der Vogelperspektive.

Zwei der erstgenannten Messobjektive sind auch im Spezialoptiksystem für die Flip-chip Montage integriert und bilden die Unterseite des Bauteils (Flip-chip) und die Oberseite des Fügepartners (Substrat) kongruent ab. Ein genauer Aufbau dieser Spezialoptik beschreibt JACOB (2002). Das Modul lässt sich aufgrund des modularen Aufbaus einfach in das hier entwickelte Montagesystem mechanisch und steuerungstechnisch integrieren.

## 7.2 Bedienerschnittstelle

### 7.2.1 Haptische Eingabegeräte

Die Bedienerschnittstelle wurde als flexibel konfigurierbarer Arbeitsplatz ausgeführt. Abhängig vom Einsatzfall kann der Arbeitsplatz mit Monitoren oder Displayvisualisierung über unterschiedliche haptische Eingabegeräte sitzend bzw. stehend bedient werden.

Die in der Pilotanlage dargestellten Montageprozesse und -werkzeuge werden über zwei handelsübliche kraftrückkoppelnde Joysticks gesteuert. Dabei können maximale Kräfte bis zu 8,9 N ausgegeben werden. Dies reicht aus, um dem

Operator einen realistischen (skalierten) Eindruck der Montagesprozesse zu vermitteln.

### 7.2.2 Visualisierung und Kontrollfunktionen

Zur Visualisierung kommen entweder zwei Bildschirme oder ein **What-You-See-Is-What-You-Feel (WYSIWYF)** Display bzw. eine Kombination aus beiden Lösungen zum Einsatz. Das Display ist dabei über den Eingabegeräten angeordnet, so dass der Operator während des Verfolgens des Prozesses auf dem Display immer auf seine Hände blickt. Dies spiegelt die angelernte, manuelle Arbeitshaltung wider und ist somit die intuitivste Bedienung des Telepräsenzsystems. Die Visualisierung erfolgt dabei als 3D-Darstellung, damit die visuelle Immersion am größten ist.

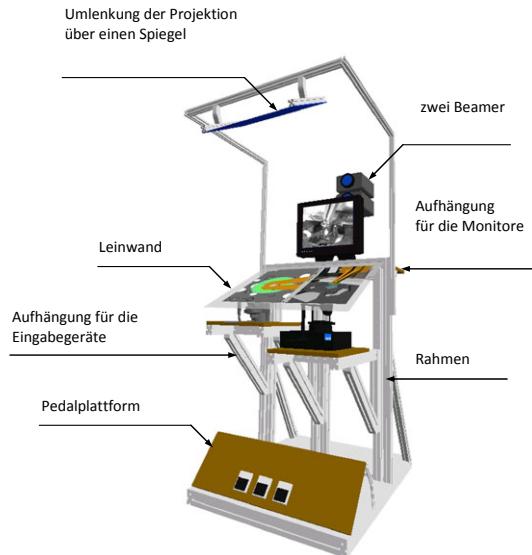


Abbildung 34: Operatorarbeitsplatz der Pilotanlage (nach PETZOLD 2008)

In der Displaydarstellung oder an den Bildschirmen werden neben dem eigentlichen Montageszenario in mehreren Bildern auch Kontrollfunktionen der Steuerungssoftware bzw. des Anlagenstatus dargestellt. Dies erfolgt entweder augmentiert im Montageszenario oder als analoge oder digitale Darstellung im GUI der Steuerung.

### 7.3 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

#### 7.3.1 Technische Bewertung

Die in Kapitel 6 vorgestellte beispielhafte adaptive Mikromontageanlage ermöglicht eine hochgenaue manuelle und automatisierte Montage von Mikrosystemen in einem Anlagensystem. Durch die relativen Positionierstrategien und den Einsatz von wiederholgenauen Kinematikkomponenten (Achsauflösung:  $0,5 \mu\text{m}$ ) werden in beiden Betriebsmodi Montagegenauigkeiten erreicht, welche mit den auf dem Markt befindlichen Anlagen vergleichbar sind. Im Vergleich zu absolut positionierenden Montagesystemen ohne Signalregelung können sowohl im manuellen als auch im automatisierten Anwendungsfall höhere Genauigkeiten erreicht werden. Die erreichbare Montagegenauigkeit als technische Grundvoraussetzung eines Mikromontagesystems ist damit erfüllt.

Im vorgestellten Montagesystem wurde trotz höherer einmaliger Investitionskosten die Lösung ausgewählt, das Grundkinematiksystem möglichst universell für eine große Bandbreite an Positionierstrategien und Montagevorgängen auszulegen. Da der Arbeitsraum des eingesetzten Lineardirektantriebs sehr groß ausgelegt wurde, können unterschiedliche periphere Einrichtungen in den Arbeitsraum des Systems eingebracht werden. Damit können unterschiedliche Anforderungen bezüglich der Bauteilzuführung, der Substratbereitstellung und Zusatzeinrichtungen wie Messtechnik und Fügetechnik erfüllt werden.

Der Einsatz eines automatisierten Greiferwechselsystems, dessen systembedingte Genauigkeitstoleranzen aufgrund der Relativpositionierstrategie keine Rückwirkung auf die Positioniergenauigkeit des Systems haben, ermöglicht die Erfüllung unterschiedlicher Anforderungen bezüglich Greifertechnik und Fügetechnologie. Damit ist die Anpass- und Umrüstflexibilität systemimmanent vorhanden, für die Gestaltung der spezifischen Endeffektoren sind nur die Schnittstellen für das Greiferwechselsystem von Bedeutung.

Die verwendete Positionieroptik für die Flip-chip-Montage ist als eigenständiges Modul ausgebildet, welches in der Pilotanlage sowohl für den Telepräsenzbetrieb als auch für die automatisierte Montage eingesetzt werden kann. Bei der Verwendung in einer manuellen Positionierzvorrichtung ergeben sich zweierlei Möglichkeiten: Erstens kann ein Bildverarbeitungssystem als Auswerteeinheit dienen. Zweitens können die Videosignale der beiden Messkameras mit Hilfe eines Videomischpults übereinander gelegt und auf einem Bildschirm dargestellt

werden, um eine Online-Positionierung des Bauteils zum Substrat durchzuführen. Damit ist insbesondere die Kernkomponente des Systems, die Optik flexibel einsetzbar, welche den überwiegenden Einfluss auf die Positioniergenauigkeit hat. Die Erweiterungs- und Änderungsflexibilität ist damit gegeben.

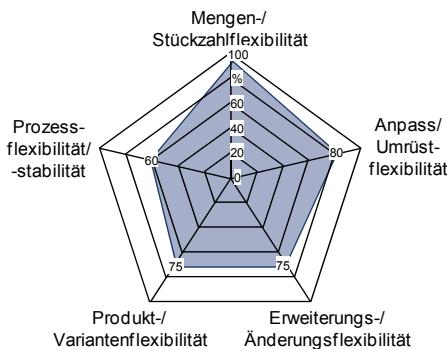


Abbildung 35: *Technische Bewertung der adaptiven Mikromontageanlage anhand des Bewertungsschemas (vgl. Abschnitt 2.6)*

Durch die geringen Ausmaße der Montageanlage ergeben sich zudem Potenziale bzgl. einer einfachen Verlagerungsmöglichkeit. Bei ausreichend hohen Produktionsvolumina kann die Anlage schnell vor Ort beim Kunden installiert werden. Das Einarbeiten von neuem Personal am Operatorarbeitsplatz und an der Teleoperatorseite kann über eine Telepräsenzverbindung kostengünstig und in kurzen Reaktionszyklen erfolgen. Theoretisch könnten auch weiter entfernte Operatorarbeitsplätze (z. B. in anderen Ländern) auf den Teleoperator des adaptiven Montagesystems zugreifen. Damit können die eingesetzten Personal- und Anlagenressourcen optimiert ausgelastet werden.

### 7.3.2 Wirtschaftliche Bewertung

Für die wirtschaftliche Bewertung einer beispielhaften Umsetzung der adaptiven Montagestrategie in Form der oben vorgestellten Montageanlage ist ein Vergleich mit auf dem Markt erhältlichen Systemen für die manuelle und automatisierte Montage notwendig. In der industriellen Anwendung ist jedoch kein direkt vergleichbares Montagesystem bekannt, welches in den vorgestellten Betriebsmodi betrieben werden kann und die unterschiedlichen Montageszenarien und Positionierstrategien beinhaltet.

Für den Vergleich wird daher ein manuelles Montagesystem mit vergleichbarer Ausstattung und mit folgenden Investitionskosten herangezogen:

Stereomikroskop	€ 7.500
Visualisierungsbildschirm	€ 1.500
Planarer manuell gesteuerter xy- Präzisionspositionierkinematik	€ 3.500
Arbeitsplatz (Arbeitstisch und Peripherie)	€ 2.500
Manuelle Werkzeuge und Hilfseinrichtungen	€ 5.000
<b>Summe</b>	<b>€ 20.000</b>

Abbildung 36: Investitionskosten eines manuellen Mikromontagearbeitsplatzes

Für den Vergleich mit einem automatisierten System wird ein Flip-chip-Bonder aus dem Bereich der Halbleitertechnik mit vergleichbarer Genauigkeit herangezogen, da mit diesem Anlagensystem das komplexe Montageszenario 3. Art durchgeführt werden kann. Als Investitionskosten werden hier €500.000 (nach SÜSS 2000) angesetzt, die Taktzeit wird mit 15 s angenommen. Da hier allerdings auch Schutzeinrichtungen beinhaltet sind, welche in den anderen Anlagensystemen nicht integriert wurden, werden die Investitionskosten auf €400.000 herabgesetzt. Diese Reduktion um €100.000 orientiert sich an Werten aus der Literatur in vergleichbaren Bewertungen (JACOB 2002) und wurde bewusst hoch angesetzt, um die Vergleichsrechnung abzusichern.

Die Investitionskosten der realisierten Pilotmontageanlage werden wie folgt veranschlagt:

Teleoperatorseite	
Planarsystem inkl. Läufern, Controllerkarte und Gestell	€ 45.000
Z-Achse inkl. Controllerkarte für Werkzeugsystem	€ 7.500
Universalgreifkopf mit Greiferwechselsystem, Werkzeugen, Werkzeugbahnhof und Peripheriekomponenten	€ 5.000
Messoptik im Universalgreifer	€ 5.000
Bildverarbeitungssystem	€ 5.000
Messoptik für Flip-chip Montage	€ 12.500
Aufbauten auf Planarläufern inkl. Aufspannung Bauteilmagazin und Substrat	€ 2.500
Peripherieeinrichtung (Halterungen, etc.)	€ 5.000
Beleuchtungssystem	€ 1.000
Weitwinkelkameras	€ 1.000
Integrations-/Engineeringkosten	€15.000
Operatorseite	
Windows-PC inkl. Monitore	€ 2.000
Zwei aktives haptisches Eingabegeräte	€ 1.000

Passives haptisches Eingabegerät (Spacemaus)	€ 500
Operatorarbeitsplatz (Arbeitstisch, Stuhl, etc.)	€ 2.000
<b>Summe</b>	<b>€ 110.000</b>

Abbildung 37: *Investitionskosten der Pilotanlage*

Im Folgenden wird nun auf der einen Seite ein manueller Mikromontagearbeitsplatz mit der Pilotanlage im Telepräsenzbetrieb und auf der anderen Seite die Pilotanlage im Automatikbetrieb mit einem Flip-chip-Bonder verglichen. Grundlage dieses Benchmarks ist die Berechnung des Maschinenstundensatzes nach VDI-Richtlinie 3258A und VDI-Richtlinie 3258B und dem daraus folgenden Arbeitsstundensatz. Die Nutzungsdauer wird mit 5 Jahren bei allen Anlagen angenommen, ebenso wird ein Zinssatz mit einheitlich 10% angesetzt. Nach HÖHN (2001, S. 148) werden die Raumkosten für die Geräte, welche im Reinraum betrieben werden müssen mit jährlichen Betriebskosten des Reinraums von 550 €/m<sup>2</sup> angesetzt, Energiekosten werden mit 0,10 €/kWh und Instandhaltungskosten mit jährlich 7% der Investitionskosten kalkuliert. Die Einsatzzeit im Zweischichtbetrieb wird bei allen Systemen mit 75% bei einer Anlagenausnutzung von ca. 2.400 h/a angenommen. Aus den durchschnittlichen Taktzeiten der Anlage und dem Arbeitsstundensatz des Bedienpersonals berechnen sich die Stückkosten pro Bauteil.

Die Berechnungen ergeben, dass die Pilotanlage im Telepräsenzbetrieb im Hinblick auf die Stückkosten um ca. 20% günstiger als der manuelle Montagearbeitsplatz ist. Die durchschnittliche Taktzeit wird hierbei mit ca. 25% geringer angesetzt als in der manuellen Montage, da das Telepräsenzsystem die Arbeitsabläufe unterstützt und damit beschleunigt. Im Vergleich zu einem automatisierten Flip-chip-Bonder ergeben sich identische Stückkosten, obwohl die Taktzeiten in der Pilotanlage aufgrund der geringeren Beschleunigungen der Kinematikkomponenten mit dem ca. 1,9 fachen angesetzt werden.

Stückkostenvergleich	Formelzeichen/Formel	Einheit	Manueller Montagearbeitsplatz	Pilotanlage im Telepräsenzbetrieb	Pilotanlage im Automatikbetrieb	Die-Bonder
Investitionskosten	$I$	€	20.000	110.000	100.000	400.000
Nutzungsdauer	$N$	a	5	5	5	5
Arbeitszeit im Jahr	$E$	h/a	2.400	2.400	2.400	2.400
Verfügbarkeit	$V$	%	80	80	80	80
Abschreibekosten	$K_{a}=I/(N*E*V)$	€/h	0,02	0,11	0,10	0,42
Zinsatz	$Z$	%	10	10	10	10
Kalk. Zinskosten	$K_{z}=I*(Z/100)/(2*E*V/100)$	€/h	0,52	2,86	2,60	10,42
Flächenbedarf	$F$	qm	5	3	3	8
Betriebskosten	$B$	€/qm/a	550	550	550	550
Raumkosten	$K_{r}=(F*B)/E$	€/h	1,15	0,69	0,69	1,83
Nennleistung	$P$	kW	0,50	5	5	5
Strompreis	$K$	€/kWh	0,10	0,10	0,10	0,10
Nutzungsfaktor	$N$	%	60	60	60	60
Energiekosten	$K_{e}=P*K*N/100$	€/h	0,03	0,30	0,30	0,30
Instandhaltungskostensatz	$I_{KS}$	%	7	7	7	7
Instandhaltungskosten	$K_{i}=I_{KS}*(K_{a}/100)/(N*E*V/100)$	€/h	0,15	0,80	0,73	2,92
Maschinenstundensatz	$K_{M}=K_{a}+I_{Z}+K_{r}+K_{e}+K_{i}$	€/h	1,86	4,77	4,43	15,88
Anteilige Dedienerkosten	$P_K$	€/h	35	35	10	10
Arbeitsstundensatz	$K_{AH}=K_{M}+P_K$	€/h	36,86	39,77	14,43	25,88
Spezifische Montagekosten pro Sekunde	$K_{S}=K_{AH}/3600$	€/s	0,01	0,01	0,00	0,01
Taktzeit pro Bauteil	$T$	s/BE	240	180	28	15
Stückkosten pro BE	$K_{S}=K_{S} \cdot T$	€/BE	2,46	1,99	0,11	0,11

Abbildung 38: Vergleich der Montagekosten einer manuellen Mikromontageanlage mit der Pilotanlage im Telepräsenzbetrieb und der Pilotanlage im Automatikbetrieb mit einem verfügbaren Flip-chip-Bonder

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Ergebnisse und ihre Bedeutung

Abgeleitet von der heterogenen Marktsituation hybrider Mikrosysteme (vgl. Abschnitt 2.2.2) und passend zur allg. Tendenz in Richtung intelligenter Automatisierungstechnik (vgl. Abschnitt 1.1) wurden in dieser Arbeit Richtlinien für die Auslegung der Komponenten eines adaptiven Mikromontagesystems vorgestellt. Diese basieren auf einer Mikromontagestrategie zur flexiblen Konfiguration und Nutzung einer Mikromontageanlage in verschiedenen Betriebsmodi unter Verwendung der Telepräsenztechnologie (vgl. Kapitel 4). Als Beispiele für flexibel ausgelegte Komponenten auf der Teleoperatorseite (vgl. Kapitel 5) sind die Kinematiksysteme und Teleoperatoren, Werkzeugsystem und Endeffektoren, Bauteilträger und das Multisensorsystem zu nennen. Mit der übergeordneten Anlagensteuerung beeinflussen diese die Mengen- und Stückzahlflexibilität, die Erweiterungs- und Änderungsflexibilität und die Umrüstflexibilität im positiven Sinne. Auf der Operatorseite (vgl. Kapitel 6) wurden die notwendigen Bedienerschnittstellen für den Telepräsenzbetrieb im sog. Darstellungs- und Wirkraum sowie für den Programmierbetrieb vorgestellt. Durch die Umsetzung der Steuerungsstrategie der adaptiven Montageanlage in Form eines Telepräsenzmodus, eines telepräsenten Programmiermodus und eines Automatikmodus kann die Erweiterungs- und Änderungsflexibilität gesteigert werden. Beispielhafte Komponenten aus beiden Baukästen wurden in ein adaptives Mikromontagesystem integriert, welches in unterschiedlichen Produktionsszenarien von Mikrosystemen genutzt werden kann.

Die so vorgestellte Mikromontageanlage weist dabei eine Anlagenarchitektur auf, welche es ermöglicht, die Anlage an die unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus anzupassen. Neben flexibel einsetzbaren Anlagenkomponenten und einer flexiblen Steuerungsarchitektur gilt hier die Möglichkeit, die Anlage in einem telepräsenten Betriebsmodus für die Einzelfertigung und in einem Automatikmodus für die Kleinserienfertigung zu betreiben, als Grundvoraussetzung. Um einen möglichst einfachen Übergang zwischen den Betriebsmodi zu erreichen, wurde eine Lösung geschaffen, die notwendigen Prozessinformationen während des telepräsenten Betriebs in einem Programmspeicher der Anlage zu hinterlegen. Hierzu wurde die Form des Programmierens durch Vormachen genutzt und ein in der Praxis anwendbares Modell des telepräsenten

Programmierens der Steuerungsarchitektur des automatisierten Anlagensystems dargestellt.

### 8.2 Weiterer Handlungsbereiche

Ausgehend von der vorgestellten Montagestrategie und dem daraus entwickelten adaptiven Anlagensystem für die Mikromontage stehen noch weitere Aspekte zur Diskussion, welche eine erweiterte Anwendungsbreite bzw. eine Einbindung in alternative Produktionsstrategien ermöglichen:

Ein noch nicht betrachteter Bereich sind weitere Anwendungsfälle außerhalb der Mikromontage, welche vergleichbare Anforderungen, z. B. in der Mikrofertigungstechnik, besitzen. Im Weiteren können Produktionsaufgaben durch Telepräsenztechnologien erschlossen werden, welche eine besondere Trennung des Operators von der eigentlichen Aufgabe notwendig machen. Dies sind z. B. gefährdende oder gefährliche Stoffe, nicht zugängliche Arbeitsbereiche oder gefährliche Arbeitsumgebungen, in denen jeweils unterschiedliche Anforderungen an den Telepräsenzbetrieb gestellt werden. Ebenso muss abhängig vom Einsatzfall das Programmervorgehen, d. h. das telepräsente Teach-in, an die jeweilige Produktionsaufgabe angepasst werden.

In alternativen Produktionsstrategien im globalen Umfeld und innerhalb von Unternehmensnetzwerken können die Bildung von Produktionsclustern, d. h. der Zusammenschluss eines oder mehrerer Teleoperatoren mit vorgestellter Architektur und verteilter Operatorarbeitsplätze zu einem optimal ausgelasteten Produktionsnetzwerk, diskutiert werden. Die Idee einer global verteilten Produktion über die unterschiedlichen Zeitzonen hinweg und damit eine Quasi-24-Stunden-Produktion ohne Lohnzuschläge für Überstunden oder Schichtzuschläge, ähnlich wie dies bei global verteilten Entwicklungsprojekten bereits praktiziert wird, ist hier als Alternative denkbar.

Durch das telepräsente Programmieren werden auch neue Ausbildungs- und Schulungsformen ermöglicht, in denen sich der Ausbilder nicht ursächlich in der Nähe der Auszubildenden befinden muss. Die Fähigkeiten eines Operators können durch das telepräsente Programmieren nicht nur für das Teach-in von automatisierten Montageabläufen, sondern auch für die Weitergabe von Erfahrungen und Know-How an andere Produktionsmitarbeiter genutzt werden. Weiter wurden logistische Fragestellungen, d. h. die Materialversorgung an das Monta-

gesystem und qualitätssichernde Prozesse bislang in der Betrachtung ausgeklammert, müssen aber in Ergänzung noch betrachtet werden.



---

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Intelligente Automatisierungstechnik (Mitte) als Bindeglied zwischen den Marktumfeld der Mikrosystemtechnik (oben) und dem Entwicklungsstand der Mikroproduktionstechnik (unten)
- Abbildung 2: Zielsetzung: Entwicklung eines an die Phasen des Produktlebenszyklus anpassungsfähigen, adaptiven Mikromontagesystems auf Basis der Telepräsenztechnologie (oben) und die dadurch zu erwartende qualitative Veränderung des Gewinns (unten)
- Abbildung 3: Struktur der Arbeit
- Abbildung 4: Abgrenzung der Mikromontage gegenüber den Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT) (nach Nienhaus 1999)
- Abbildung 5: Einordnung der Positionierstrategien in Abhängigkeit von der Klassifizierung der Montageszenarien nach der Sichtbarkeit der Referenzstrukturen (linke Spalte) und in Abhängigkeit von direkten (mittlere Spalte) oder indirekten Relativmessverfahren (rechte Spalte) (nach HÖHN 2001 und JACOB 2002)
- Abbildung 6: Vorgehensmodell für die Planung und Konfiguration flexibler manueller bzw. automatisierter Mikromontagesysteme
- Abbildung 7: Strukturbild eines technischen Mensch-Maschine System mit den informationsverarbeitenden Systemelementen Mensch und Maschine am Beispiel einer Kompensationsaufgabe und einer aktiven Aufgabenart (nach BUBB & Schmidtke 1993, S. 308 und BUBB 1993A, S. 333, PETZOLD 2008, S 82)
- Abbildung 8: Vereinfachtes Modell der Informationsverarbeitung innerhalb des Systemelements Mensch (nach BUBB 1993A, S. 341ff) unterteilt in die Elemente Informationsspeicherung (oben), Entscheidungsmechanismen (Mitte) und Problemlösungsverhalten (unten)
- Abbildung 9: Strukturbild eines Mensch-Maschine System am Beispiel einer Kompensationsaufgabe und einer passiv-monitiven Aufgabenart (nach BUBB 1993B, S. 407)

## **Abbildungsverzeichnis**

---

- Abbildung 10: Gegenüberstellung der unterschiedliche Fähigkeiten von Mensch und Maschine (nach BUBB 1993B, S. 411)
- Abbildung 11: Aufbau eines Telepräsenzsystems
- Abbildung 12: Exemplarische Telepräsenzanwendungen außerhalb der Produktionstechnik, klassifiziert nach der Art der Telepräsenzbarriere Dimension/Größe (links) und Distanz (rechts)
- Abbildung 13: Übersicht über Programmierverfahren klassifiziert nach Benutzerdialog mit exemplarischen Verfahrensbeispielen
- Abbildung 14: Anforderungskatalog (links) und Bewertungsschema (rechts) für adaptive Mikromontageanlagen
- Abbildung 15: Beispiele von manuellen Mikromontagearbeitsplätzen und allg. Bewertung manueller Mikromontagesysteme anhand der für eine adaptive Mikromontagesystem definierten Bewertungsschemas (vgl. Abschnitt 2.6)
- Abbildung 16: Beispiele von telepräsenten Mikromontagearbeitsplätzen und zusammenfassende Bewertung anhand der für eine adaptive Mikromontagesystem definierten Bewertungsschemas (vgl. Abschnitt 2.6)
- Abbildung 17: Beispiele von automatisierten Mikromontagesysteme und Bewertung anhand der für ein adaptives Mikromontagesystem definierten Bewertungsschemas (vgl. Abschnitt 2.6)
- Abbildung 18: Überblick über die Bewertung des Stands der Forschung und Technik
- Abbildung 19: Adaptive Montagestrategie auf Basis der Telepräsenztechnologie zur Konfiguration und Nutzung einer Mikromontageanlage in verschiedenen Betriebsmodi
- Abbildung 20: Basisarchitektur und abstrakte Funktionsmodule einer adaptiven Mikromontageanlagen auf Basis eines Telepräsenzsystems
- Abbildung 21: Automatisierter, bildverarbeitungsbasierter Montagevorgang oberseitenstrukturierter Bauteile

- 
- Abbildung 22: Elementarfunktionen für die Montage oberseitenstrukturierter Bauteile (mitte) (abgeleitet aus den Teilschritten des telepräsenten (rechts) und automatisierten Montagevorgangs (links))
- Abbildung 23: Lösungskonzepte für die einzelnen abgeleiteten Elementarfunktionen (nach Höhn (2001))
- Abbildung 24: Vorgehensweise für eine telepräsenzgerechte Sensorauswahl (nach EHRENSTRÄßer 2007)
- Abbildung 25: Aufbau eines logischen Sensors (links) und Einbindung in ein logisches Sensornetzwerk (rechts)
- Abbildung 26: Entwurf einer Sensorgrundstruktur für die telepräsente und adaptive Mikromontage
- Abbildung 27: Steuerungsarchitektur des adaptiven Mikromontagesystems
- Abbildung 28: Klassifizierung von Bedienerschnittstellen
- Abbildung 29: Hauptfunktionen des Operatorarbeitsplatzes im Telepräsenzbetrieb (links); Lösungskonzepte für Bedienerschnittstellen des Darstellungs- und Wirkraums des Operatorarbeitsplatzes
- Abbildung 30: Hauptfunktionen des Programmierraums
- Abbildung 31: Layout eines integrierten und anpassbaren Operatorarbeitsplatzes (rechts) und relevante Richtlinien aus der Anthropometrie (links)
- Abbildung 32: Zerlegung der Montageaufgabe in Basisoperationen für das telepräsente Programmieren
- Abbildung 33: Module der Teleoperatorseite
- Abbildung 34: Operatorarbeitsplatz der Pilotanlage (nach PETZOLD 2008)
- Abbildung 35: Technische Bewertung der adaptiven Mikromontageanlage anhand des Bewertungsschemas (vgl. Abschnitt 2.6)
- Abbildung 36: Investitionskosten eines manuellen Mikromontagearbeitsplatzes
- Abbildung 37: Investitionskosten der Pilotanlage

## **Abbildungsverzeichnis**

---

Abbildung 38: Vergleich der Montagekosten einer manuellen  
Mikromontageanlage mit der Pilotanlage im Telepräsenzbetrieb  
und der Pilotanlage im Automatikbetrieb mit einem verfügbaren  
Flip-chip-Bonder

---

## **Literaturverzeichnis**

### **ALEX ET AL. 1998**

Alex, J.; Vikramaditya, B.; Nelson, B. J.: A Virtual Reality Teleoperator Interface for Assembly of Hybrid MEMS Prototypes. In: Proceedings of DETC'98 ASME Design Engineering Technical Conference, 13.-16. September 1998, Atlanta, USA.

### **AMICRA 2006**

Amicra 2006: High Accuracy Die-Bonder ADB 2000. <http://www.amicra.com>.

### **ANDO ET AL. 2000**

Ando, N.; Ohta, M.; Hashimoto, H.: Micro Teleoperation with Parallel Manipulator. In: Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), 30. Oktober - 5. November 2000, Takmatsu, Japan. S. 677-682.

### **ANTON 2002**

Anton, O.: Ein Beitrag zur Entwicklung telepräzenter Montagesysteme. München: Herbert Utz Verlag 2002. (*iwb* Forschungsberichte 175).

### **ARTEOS 2006**

Arteos GmbH 2006: [http://www.atas.de/arteos/mm\\_geraete.html](http://www.atas.de/arteos/mm_geraete.html).

### **AZADEH ET AL. 2002**

Azadeh, R.; Jung, E.; Braun, T.; Oestermann, U.; Hillmann, V.; Amiri Jam, K.; Großer, V.; Aschenbrenner, R.; Reichl, H.: Baukasten für modulare Mikrosysteme. In: EPP Dezember 2002.

### **BAERTLE ET AL. 2006**

Baertle, J.; Löwer, T.; von Dobeneck, D.: Electron beam welding beyond the ordinary scale. In: 8th International Conference on Electron Beam Technologies, Vama 2006.

### **BALZERT 1999**

Balzert, H.: Lehrbuch der Objektmodellierung: Analyse und Entwurf. Heidelberg: Spektrum, Akademischer Verlag 1999.

### **BAUERNSCHMITT ET AL 2009**

Bauernschmitt, R.; Braun, E. U.; Buss, M.; Fröhlich, F.; Hirche, S.; Hirzinger, G.; Kammerl, J.; Knoll, A.; Konietzschke, R.; Kübler, B.; Lange, R.; Mayer, H.; Rank, M.; Schillhuber, G.; Staub, C.; Steinbach, E.; Toberge, A.; Ulbrich, H.; Vittorias, I.; Zhao, C.: On the Role of Multimodal Communication in Telesurgery Systems, In: International Workshop on Multimedia Signal Processing 2009, Rio de Janeiro, Brasilien, Oktober 2009.

### BAZU 2004

Bazu, M.: Concurrent Engineering - a tool for improving MEMS research and manufacturing. In: Proceedings of 24th International Conference on Microelectronics (MIEL 2004) 16.-19. Mai 2004. S. 41-48, Vol. 1.

### BENGEL ET AL. 2003

Bengel, M.; Gaugel, T.; Schraft, R. D.: Java-based control architecture for reconfigurable micro-assembly systems. In Tuokko, R. (Hrsg.): Modular self-organizing re-configurable automation systems. Proceedings of the 3rd International Symposium on Open Control Systems 2003, 9.-10. September 2003, Helsinki, S. 1-6.

### BIGGS & MACDONALD 2003

Biggs, G.; MacDonald, B.: A survey of robot programming systems. In: Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation, CSIRO, Brisbane, Australien, 1.-3. Dezember 2003.

### BINDER 2004

Binder A.: Praxisübersicht von berührungslosen Handlinglösungen mit Bernoulli-Effekt. In: Berührungslose Handhabung. *iwb* Seminarberichte 76, München: Herbert Utz Verlag 2004.

### BLEY ET AL. 2004

Bley, H.; Reinhart, G.; Seliger, G.; Bernardi, M.; Korne, T.: Appropriate human involvement in assembly and disassembly. In: Annals of the CIRP, Vol. 53/2 (2004), S. 487 ff.

### BMBF 2004

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): Mikrosysteme – Rahmenprogramm zur Förderung 2004 - 2009. Bonn 2004.

### BROCKMANN ET AL. 2002

Brockmann, R.; Honekamp, M.; Dickmann, K.; Meier, St.; Letsch, H.; Matthes, K.-J.: Moderne Schweißverfahren für die Mikrosystemtechnik und Elektronik unter besonderer Berücksichtigung des Lasers. In: Schweißen und Schneiden 53 (2001) H. 9, S. 596-603.

### BRYCEK ET AL. 1994

Brycek, J.; Petersen, K.; McCulley, W.: Micromachines on the march. IEEE Spektrum, Mai 1994, S. 20-31.

### BUBB 1993A

Bubb, H.: Informationswandel durch das System. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Ergonomie. 3. Aufl. München: Carl Hanser 1993.

---

BUBB 1993B

Bubb, H.: Systemergonomische Gestaltung. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Ergonomie. 3. Aufl. München: Carl Hanser 1993.

BUBB & SCHMIDTKE 1993

Bubb, H.; Schmidtke, H.: Systemstruktur. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Ergonomie. 3. Aufl. München: Carl Hanser 1993.

BÜTTGENBACH 1998

Büttgenbach, S. (Hrsg.): Mikrosystemtechnik 2000 – Überlegungen zur zukünftigen Rolle der Mikrosystemtechnik in Deutschland. VDE/VDI Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikrotechnik und Feinwerktechnik (GMM), Fachbereich Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie, Fachausschuss Grundsatzfragen der Mikrosystemtechnik. Frankfurt/Main: VDI/VDE 1998.

BULLINGER & FÄHNRICH 1984

Bullinger, H. J.; Fähnrich, K. P.: Symbiotic Man.Machine-Interfaces and the User Assistance Concept. Stuttgart: Fraunhofer Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation 1984.

CAVUSOGLU 2000

Cavusoglu, M. C.: Telesurgery and Surgical Simulation: Design, Modeling, and Evaluation of Haptic Interfaces to Real and Virtual Surgical Environments. Berkeley: University of California 2000.

CHANG ET AL. 1999

Chang, S.; Kim, J.; Kim, I.; Borm, J.; Lee, C.; Park, J.: KIST Teleoperation Stem for Humanoid Robot. In: International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 99). 1999, S. 1198-1203.

CHARWAT 1994

Charwat, H. J.: Lexikon der Mensch-Maschine-Kommunikation. Zweite Aufl. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH 1994.

CHEN ET AL. 2000

Chen, M. L.; Kume, S.; Rizzi, A. A.; Quaid, A. E.; Butler, Z. J.; Brown, H. B.; Gowdy, J.; Hollis, R. L.: Agent-based microassembly. In: 2nd International Workshop on Microfactories, Fribourg, Schweiz, 9.-10. Oktober 2000, S. 39 ff.

CODOUREY ET AL. 1997

Codourey, A.; Rodriguez, M.; Pappas, I.: A Task-oriented Teleoperation System for Assembly in the Microworld. In: International Conference of Advanced Robotics (ICAR '97). Monterey, USA: 1997, S. 235-240.

### CODOUREY & HONEGGER 2002

Codourey, A.; Honegger, M.: A centralized control system for microfactories. In: 3rd International Workshop on Microfactories, 16.-18. September 2002, Minneapolis, USA, S. 9-12.

### DAMMERTZ 1996

Dammertz, R.: Ein Programmiersystem zur grafisch-strukturierten Erstellung von Roboterprogrammen und Programmoberflächen. Dissertation RWTH Aachen, Shaker, Aachen 1006

### DEML ET AL. 2004

Deml, B.; Ortmaier, T.; Weiss, H.: Minimally Incasive Surgery: Empirical Comparison of Manual and Robot Assisted Force Feedback Surgery. In: EuroHaptics 2004. München: 2004 (CDROM)

### DENKENA ET AL. 2005

Denkena, B.; Wörn, H.; Apitz, R.; Bischoff, R.; Hein, B.; Kowalski, P.; Mages, D.; Schuler, H.: Roboterprogrammierung in der Fertigung – Einfache Roboterprogrammierung für die Produktion von morgen (Ergebnisse des IRoProg Projekts). In: wt Werkstattstechnik online Jahrgang 95 (2005) H. 9, S. 656 ff.

### DICKERHOF & GENGENBACH 2006

Dickerhof, M.; Gengenbach, U.: Kooperationen flexibel und einfach gestalten – Checklisten - Tipps – Vorlagen. Carl Hanser 2006 (Auflage 1), 304 Seiten.

### DIERSELHUIS & KOLKMAN 1999

Dierselhuis, M.-F.; Kolkman, G.-W.-A.: The AMAS Advanced Micro Assembly System. In: Nexus Workshop on Back End Equipment for MST; 1999.

### DILTHEY UND MÖLLER 2001

Dilthey, U.; Möller, M.: Mikrokleben – Mikroapplikation von Klebstoffen. In: SFB 440 Montage hybrider Mikrosysteme, Statuskolloquium 6. September 2001, Aachen. S. 99-108.

### DILTHEY & DORFMÜLLER 2006

Dilthey, U.; Dorfmüller, T.: Micro electron beam welding. In: Microsystem Technologies 2006, Vol. 12, S. 626-631.

### DIN 32561

DIN 32561: Fertigungsmittel für Mikrosysteme: Werkstückträger - Anschlussmaße und Toleranzen. Berlin. Beuth 2003.

### DIN 32564-2

DIN 32564-2: Fertigungsmittel für Mikrosysteme – Begriffe – Teil 2: Basistechnologien und Herstellung. Berlin Beuth 2004.

---

## DIN 32565

DIN 32565: Fertigungsmittel für Mikrosysteme – Schnittstelle zwischen Endeffektor und Handhabungsgerät. Berlin, Beuth 2005.

## DIN 8580

DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin Beuth 2003.

## DIN 8593 TEIL 0

DIN 8593 Teil 0: Fertigungsverfahren Fügen: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth 2003.

## DREHER ET AL. 1997

Dreher, C.; Lay, G.; Michler, T.: Teleservice in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer ISI 1997, Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung; PI-Mitteilungen Nr. 6.

## DUCRÉE & ZENGERLE 2002

Ducrée, J.; Zengerle, R.: Microfluidic – Markets and Technologies. In: mstnews 05/02; S. 8-10.

## DWYER ET AL. 2002

Dwyer, C.; Guthold, M.; Falvo, M.; Washburn, S.; Superfine, R.; Erie, D.: DNA-Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes. *Nanotechnology* 13 (2002) 4, S. 601-605.

## EBERHARDT ET AL. 2000

Eberhardt, R.; Mohaupt, M.; Scheller, T.: Hybrid assembly of microoptical systems. In: *Proceedings of MICRO.tec 2000: Applications, trends, visions; S.459-464*; Berlin: VDE-Verlag, 2000, ISBN 3-8007-2579-7.

## ECKL ET AL. 2010

Eckl, R.; Gumprecht, J.D.J.; Strauss, G.; Hofer, M.; Dietz, A.; Lueth, T.C.: Comparison of manual steering and steering via joystick of a flexible rhino endoscope. In: *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010, Annual International Conference of the IEEE*, S. 1234-1237, 31. August - 4. September 2010.

## EHRENSTRÄßer 2007

Ehrensträßer, M.: Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage. München Utz 2007 (*iwb Forschungsberichte* 206).

## EHRFELD ET AL. 2001

Ehrfeld, W.; Begemann, M.; Berg, U.; Lohf, A.; Michel, F.; Nienhaus, M.: Highly parallel mass fabrication and assembly of microdevices. In: *Microsystems Technologies* 7 (2001) S. 145-150, Springer 2001.

### EIJK ET AL. 2003

Van Eijk, J.; Brouwer, D.; Franse, J.: A Systems Approach towards Business Creation. In: Proceedings of Machines and Processes for Micro-scale and Meso-scale Fabrication, Metrology and Assembly, Gainesville, USA, 22. Januar 2003.

### ESI 2006

ESI: Explosive & ordnance disposal (EOD) robots and robots for hazardous tasks. Toronto, Kanada, <http://www.esit.com/mobile-robots/index.html>. 2006.

### FÄRBER 1998

Färber, G. (Hrsg.): Finanzierungsantrag 1999-2001 des Sonderforschungsbereichs 1731: Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion. München: Hieronymus 1998.

### FÄRBER 2004

Färber, G.: Sonderforschungsbereich 453 - Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion. Finanzierungsantrag 2005-2007, S. 343 ff.

### FAHLBUSCH ET AL. 2002

Fahlbusch, S.; Shirinov, A. ; Fatikow, S. : AFM-based micro force sensor and haptic interface for a nanohandling robot. In: IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems IROS 02 Vol. 2. Lausanne, Schweiz: 2002, S. 1772 ff.

### FATIKOW 2000

Fatikow, S.: Mikroroboter und Mikromontage – Aufbau, Steuerung und Planung von flexiblen mikroroboterbasierten Montagestationen. Teubner Stuttgart – Leipzig 2000, ISBN 3-519-06264-X.

### FEARING 1995

Fearing, R. S.: Survey of sticking effects for micro parts handling. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 5.-9. August 1995, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. Los Alamos, Calif.: IEEE Computer Soc. Press 1995.

### FERREIRA & HIRAI 2002

Ferreira A., Hirai S.: Task-Level Remote Control Issues for a Desktop Micro Device Assembly. In: 3rd International Workshop on Microfactories, 16.-18. September 2002, Minneapolis, USA, S. 17-20.

### FISCHER 2000

Fischer, W.-J. (Hrsg.): Mikrosystemtechnik. 1. Aufl. Würzburg: Vogel 2000.

---

FLEISCHER ET AL. 2005

Fleischer, J.; Volkmann, T.; Krahtov, L.: Konzeption einer skalierbaren Mikroproduktion - Planungssystematik und Plattform von Prozessmodulen zur Produktion mikromechatronischer Produkte. In: *wt-Werkstattstechnik online* 09/2005 Seite 705-711.

GAUGEL ET AL. 2002

Gaugel, T.; Dobler, H.; Bengel, M., Weis, Ch.; Schließer, J.: Building a Mini-Factory from a Technology Construction Kit. In: *3rd International Workshop on Microfactories*, 16.-18. September 2002, Minneapolis, USA, S. 21-24.

GAUGEL ET AL. 2004

Gaugel, T.; Bengel, M.; Malthan, D.; Schließer, J.; Kegeler, J. ; Munz, G.: Miniaturized reconfigurable micro-assembly system. In: Ratchev, S. (Hrgs.): *Proceedings of the International Precision Assembly Seminar IPAS 2004*, Bad Hofgastein, Austria, 11.-13.Februar 2004, S.157-166.

GAUSEMEIER ET AL. 2000

Gausemeier, J.: Lindemann, U.; Reinhart, G.; Wiendahl, H.-P.: Kooperatives Produktengineering: ein neues Selbstverständnis des ingenieurmässigen Wirkens. Paderborn: HNI, 2000.

GEIGER ET AL. 2010

Geiger, L.; Popp, M.; Faerber, B.; Artigas, J.; Kremer, P.; Hirzinger, G.: Is a telepresence-system an effective alternative to manned missions? In: *Proceedings of the Fifth ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Osaka, Japan, März 2010.

GEIßINGER 1989

Geißinger, J.: *Grundlagen zur Entwicklung reinraumtauglicher Handhabungssysteme*. Springer, Berlin 1989.

GENGENBACH ET AL. 2003

Gengenbach, U.; Hofmann, A.; Engelhardt, F.; Scharnowell, R.: The Yin and Yang Strategy for a more Economic Hybrid Microsystem Assembly. In: *mstnews* 02/2003, S. 38-40.

GERWAH 2006

GERWAH Mikrotechnik GmbH 2006: <http://www.gerwahmikro.de/pages/montieren.html>.

### GERLACH ET AL. 2001

Gerlach, A.; Knebel, G.; Guber, A.-E.; Hecke, M.; Herrmann, D.; Muslija, A.; Schaller, T.: Microfabrication of Single-Use Plastic Microfluidic Devices for High-Throughput Screening and DNA Analysis. In: Reichl, H. (Hrsg.): Micro System Technologies, Düsseldorf, 27.-29. März 2001. Berlin: VDE 2001, S. 143-148.

### GIESLER & DILLMANN 2003

Giesler, B.; Dillmann, R.: Augmented Reality in Robot Instruction. In: Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2003). Tokyo 2003.

### GILLNER 2000

Gillner, A.: Neue Anwendungen des Lasers in Elektrotechnik und Mikrotechnik. In: Tagungsband zum Aachener Kolloquium für Lasertechnik. Aachen: Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, 1998.

### GÖHRINGER 2001

Göhringer, J.: Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen. Bamberg: Meisenbach 2001 (Fertigungstechnik Erlangen 111).

### GOERTZ & THOMPSON 1954

Goertz, R.; Thompson, R.: Electronically controlled manipulator. Nucleonics (1954), S. 46-47.

### GOTTSCHALD 2001

Gottschald, J.: Place&Play Roboter – Ein portables Handhabungssystem für die Werkstatt. In Eversheim et al. (Hrsg.): Berichte aus der Produktionstechnik (wzl) Band 22/2001 Shaker 2001.

### GRIFFITHS 2000

Griffiths, G.: Tele-operation in practice: Using autonomous underwater vehicles within science programmes. In: TSM 2000 Workshop. Southampton, USA: 2000.

### GRUTZECK 2000

Grutzeck, H.: Fluidisches Greifen in der Mikrosystemtechnik. Düsseldorf: VDI 2000. (VDI Fortschritt Berichte Reihe 9 Nr. 314).

### GRUTZECK & KIESEWETTER 2002

Grutzeck, H.; Kiesewetter, L.: Down-scaling of grippers for micro-assembly. In: Microsystem Technologies 8 (2002), Springer 2002.

---

GUTHOLD ET AL. 2004

Guthold, M.; Liu, W.; Stephens, B.; Lord, S.; Hantgan, R. R.; Erie, D. A.; Taylor, R. M.; Superfine, R.: Visualization and Mechanical Manipulations of Individual Fibrin Fibers. *Biophysical Journal* 29 (2004) 6, S. 4226-4236.

HACKE 1987

Hacke, H.-J.: Montage integrierter Schaltungen. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer, 1987.

HÄCKER 2006

Häcker 2006: VICO Placer. <http://www.haecker-automation.com/deutsch/produkte/placer.htm>.

HAMDI & FERREIRA 2004

Hamdi, M.; Ferreira, A.: Microassembly Planning Using Physical-Based Models in Virtual Environment. In: IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sendai, Japan: 2004, S. 3369-3374.

HANKES 1997

Hankes, J.: Sensoreinsatz in der automatisierten Mikromontage. In: Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2, Fertigungstechnik 459. Kaiserslautern, Universität, Dissertation, 1997.

HENDERSON & SHILCRAT 1995

Henderson, Th. C.; Shilcrat, E.: Logical Sensor Systems. In: Luo, R. C.; Kay, M. G. (Hrgs.): Multisensor integration and fusion for intelligent machines and systems. Ablex Publishing Corp. 1995, S. 81 ff.

HENSCHKE 1994

Henschke, F.: Miniaturgreifer und montagegerechtes Konstruieren in der Mikromechanik. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994. (Fortschrittsberichte VDI-Reihe 1 Nr. 242).

HESSELBACH ET AL. 2003

Hesselbach, J.; Raatz, A.; Wrege, J.; Herrmann, H.; Weule, H.; Buchholz, C.; Tritschler, H.; Knoll, M.; Elsner, J.; Klocke, F.; Weck, M.; von Bodenhausen, J.; von Klitzing, A.: mikroPro – Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik. In: *wt Werkstatttechnik online* jahrgang 93(2003) H.3, S. 119-128.

HESSELBACH ET AL. 2006

Hesselbach, J.; Schöttler, K.; Tutsch, R.; Berndt, M.: Assembly of Hybrid Microsystems Using an Assembly System with 3D Optical Sensor. In: *Annals of CIRP* Vol. 55/1, Kobe, Japan, 2006, S.11-14.

### HIRCHE ET AL. 2004

Hirche, S.; Stanczyk, B.; Buss, M.: Haptic Tele-Assembly. In: Eurohaptics 2004. München: 2004, S. 417 ff.

### HIRZINGER ET AL. 2004

Hirzinger, G.; Landzettel, K.; Brunner, B.; Fischer, M.; Preusche, C.; Reintsema, D.; Albu-Schaeffer, A.; Schreiber, G.; Steinmetz, B.M.: DLR's Robotics Technologies for On-Orbit Servicing. *Advanced Robotics* 18 (2004) 2, S. 139-174.

### HOCH 2003

Hoch, A.: A modular system for microassembly with standardised interface.. In: Proceedings of the 2nd VDE World, Microtechnologies Congress, München, 13.-15. Oktober 2003, Berlin [u.a.] : VDE, 2003 S.279-283, Incl.CD-ROM, ISBN 3-8007-2791-9.

### HÖHN 2001

Höhn, M.: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme. München Utz 2001 (*iwb* Forschungsberichte 149).

### HÖHN & JACOB 2001

Höhn, M.; Jacob, D.: Verfahren und Methoden für die kosteneffiziente Montage hybrider Mikrosysteme. In: Reinhart, G. (Hrsg.): *Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik*. München: Herbert Utz 2001, S. 2-1 - 2-15. (*iwb* Seminarberichte Nr. 59).

### HOFMANN ET AL. 2002

Hofmann, A.; Engelhardt, F.; Fodor, R.; Gengenbach, U.; Scharnowell, R.: Modules of the microgripper construction kit - fine positioning, compliance. In Hollis, R.; Nelson, B. [Hrsg.]: *Proceedings of Microfactory: 3rd International Workshop on Microfactories*, Minneapolis, 16.-18. September 2002. S. 129-132.

### HOFMANN ET AL. 2003

Hofmann, A.; Gengenbach, U.; Scharnowell, U.; Bär, M: Handling and assembly of micro-optical components – modules and solutions. In: Proceedings of the 2nd VDE World, Microtechnologies Congress, München, 13.-15. Oktober 2003, Berlin [u.a.] : VDE, 2003 S.279-283, Incl.CD-ROM, ISBN 3-8007-2791-9, S. 289 ff.

### HUDETZ & HARNISCHFEGER 1997

Hudetz, W.; Harnischfeger, M.: Teleservice für die industrielle Produktion – Potenziale und Umsetzungshilfen. Leituntersuchung innerhalb des Rahmenkonzeptes „Produktion 2000“. In: FZK-PFT Bericht Nr. 186 (1997) Forschungszentrum Karlsruhe.

---

**INTUITIVE SURGICAL 2005**

Intuitive Surgical: DaVinci Surgical Systems. Sunnyvale, USA,  
<http://www.intuitivesurgical.com>.

**JACOB 2002**

Jacob, Dirk.: Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik. München Utz 2002 (*iwb* Forschungsberichte 167).

**JASCHINSKI & LIESTMANN 1997**

Jaschinski, C.; Liestmann, V.: Teleservice im Maschinenbau. In: FIR+IAW Mitteilungen 2/97, S. 3-5.

**JONES ET AL. 2002**

Jones, J. F.; Kozlowski, D. M.; Trinkle, J. C.: Micro-Scale Force Fit Insertion. In: 3rd International Workshop on Microfactories, 16.-18. September 2002, Minneapolis, USA, S. 17-20.

**KERGEL ET AL. 1995**

Kergel, H.; Köhler, T.; Ruf, C.: Mikrosystemtechnische Produkte und deren Fertigungstechnik. *wt - Produktion und Management*. 85 (1995), S. 572-575.

**KIM ET AL. 2001**

Kim, D. H.; Kim, K. Y.; Kyunghwan, K.: A Micro Manipulation System based on teleoperation techniques. In: 32nd International Symposium on Robotics (ISR 2001). Seoul, Korea: 2001.

**KIM ET AL. 2002A**

D.-H. Kim, T. Kim, K. Kim, B. Kim: Motion planning of an AFM-based nanomanipulator in a sensor-based nanorobotic manipulation system. In: 3rd International Workshop on Microfactories, 16.-18. September 2002, Minneapolis, USA, S. 137-140.

**KIM ET AL. 2002B**

K. Kim, D. H. Kim, S. J. Lee, J. Lee: Hybrid microassembly system for three-dimensional MEMS components. In: 3rd International Workshop on Microfactories, 16.-18. September 2002, Minneapolis, USA, S. 21-24.

**KINKEL & LAY 2004**

Kinkel, S.; Lay, G.: Produktionsverlagerungen unter der Lupe. Karlsruhe, Fraunhofer ISI. Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung 34 (2004).

**KLINKE ET AL. 2005**

Klinke, R.; Pape, H.-Chr.; Silbernagl, St. (Hrsg.): Lehrbuch der Physiologie. 5. Auflage. Thieme, Stuttgart 2005.

### KLOCKE 2005

Klocke: Motion from the nanoworld. Aachen, <http://www.nanomotor.de>.

### KOELEMEIJER CHOLLET & JACOT 1999

Koelemeijer Chollet, S.; Jacot, J.: Cost efficient assembly of microsystems. In: mst news (1999) Januar. S. 30-33.

### KUEBLER ET AL. 2009

Kuebler, B.; Gruber, R.; Joppek, Ch.; Port, J.; Passig, G.; Nagel, J. H.; Hirzinger, G.: Tactile Feedback for Artery Detection in Minimally Invasive Robotic Surgery -- Preliminary Results of a New Approach. In: IFMBE Proceedings of the 11th International Congress of the IUPESM, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Muenchen, 2009, S. 299-302.

### KUNSTMANN 1999

Kunstmann, Chr.: Handhabungssystem mit optimierter Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Mikromontage. In: VDI Reihe 8 Nr. 751. Düsseldorf VDI 1999.

### LAY ET AL. 2001A

Lay, G.; Schirrmeister, E.; Wiendahl, H. P.; Röhrig, M.: Zurück zu neuen Ufern. Rücknahme des Automatisierungsniveaus in deutschen Unternehmen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF, Jahrgang 96 (2001) H. 7/8, Frankfurt/Main, Carl Hanser.

### LAY ET AL. 2001B

Lay, K.; Prassler, E.; Dillmann, R.; Grundwald, G.; Hägele, M.; Lawitzky, G.; Stopp, A.; von Seelen, W.: Morpha: Communication and interaction with Intelligent, Anthropomorphic Robot Assistants. In: Tagungsband Statustage Leitprojekte Mensch-Technik-Interaktion in der Wissenschaftsgesellschaft. Saarbrücken 2001.

### LICHTENEGGER 1998

Lichtenegger, M.: Reparatur aus der Ferne. In: Gateway März 1998, S. 82-84.

### LINDEMANN 2005

Lindemann, U. (Hrsg.): Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer Berlin, 2005, 295 Seiten, ISBN 3-540-14041-7.

### LINDNER 1999

Lindner, H.: Physik für Ingenieure. München: Carl Hanser, 1999.

### LINDSAY & NORMAN 1972

Lindsay, P. H.; Norman, D. A.: Human Information Processing. In: An Introduction to Psychology. New York, London 1972.

---

LIPPERT 2000

Lippert, H.: Arm – Membrum superius. In: Lehrbuch Anatomie. 5. Aufl. München: Urban & Fischer Verlag 2000, S. 649-702.

LORIA 2002

Loria, A.: Bluetooth im Auto – Von der Freisprecheinrichtung bis zur Fahrzeugdiagnose. In F&E 110 (2002) 7-8, Hanser, München.

MAEYAMA ET AL. 2003

Maeyama, S.; Yuta, S.; Harada, A.: Mobile robots in a remote art museum. In: SPIE International Technical Group newsletter Vol.12 Nr. 2, September 2003, S. 8.

MAIER ET AL. 2008

Maier, T.; Strauß, G.; Niazmand, K.; Lueth, T.C.: MicroMan – Ein neuartiger Mikromanipulator für den chirurgischen Einsatz in der Mittelohrchirurgie. In: Proceedings of Robotic 2008, S. 67-70.

MAIER ET AL. 2010

Maier, T.; Meschede, T.; Strauss, G.; Kraus T.; Dietz A.; Lüth T.C.: Joystick Control with Capacitive Release Switch for a Microsurgical Telemannipulator. In: Proceedings 2010 IEEE Human System Interaction, S. 223-229.

MANOCHA ET AL. 2001

Manocha, K.; Pernalete, N.; Dubey, R.: Variable Position Mapping Based Assistance in Teleoperation for Nuclear Clean Up. In: International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2001, 21.-26. Mai 2001, Seoul, Korea: 2001.

MANZHEY ET AL. 2009

Manzhey, D.; Strauss, G.; Trantakis, C.; Lueth, T.; Röttger, S.; Bahner-Heyne, J.E.; Dietz, A.; Meixensberger, J.: Automation in surgery: a systematic approach. In: Surgical Technology International, 18, S. 37-45, 2009.

MARTIN 2006

Martin GmbH 2006: <http://www.martin-smt.de/>.

MABBERG 1998

Maßberg, W.: Teleservice in Life-Cycle-übergreifenden Engineering-Netzwerken. In: Seminarband F29 zum Fraunhofer IPA-Technologie Forum „Teleservice“. Stuttgart: 1998, S. 49-74.

MENZ & MOHR 1997

Menz, W.; Mohr, J.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. 2. Aufl. Weinheim: VCH 1997, S. 197 und S. 395.

### MEYERS 1995

Meyers: Meyers Großes Taschenlexikon – Wissen von A-Z. Ulm: Franz Spiegel Buch GmbH 1995.

### MICHAELI 1998

Michaeli, W.; Rogalla, A.; Spennemann, A.; Ziegmann, C.: Mikrostrukturierte Formteile aus Kunststoff gestalten. F&M Feinwerktechnik 106 (1998) 9, S. 642-645.

### MILASYS 2006

MiLaSys technologies GmbH: <http://milasys.de>.

### MILBERG & PETZOLD 2005

Milberg, J.; Petzold, B.: A Model-Based Telepresence System for Micro-Assembly. In: Annals of the German Academic Society for Production Engineering, Braunschweig, XII/1, 2005, S. 219ff.

### MORISHITA & HATAMURA 1994

Morishita, H.; Hatamura, Y.: Development of ultra precise manipulator system for future nanotechnology. In: Proceedings of MEMS '94, Yokohoma, Japan.

### MOUNIER & PROVENCE 2002

Mounier, E.; Provence, M: Technolgies and market trends in biochips and microfluidic chips. In: mstnews 5/02; S. 4-6.

### NASA 2006A

NASA: Mars pathfinder. Pasadena, USA. <http://mars.jpl.nasa.gov/missions/past/pathfinder.html>. 2006.

### NASA 2006B

NASA: Mars Science Laboratory. Pasadena, USA. <http://mars.jpl.nasa.gov/missions/future/msl.html>. 2006.

### NEUGEBAUER 1997

Neugebauer, J.-G.: Einsatz neuer Mensch-Maschine-Schnittstellen für die Robotersimulation und -programmierung. In: Warnecke, H.-J. & Bullinger, H.-J. (Hrsg.): IPA-IAO – Forschungs und Praxis 256 , Springer, Berlin 1997.

### NIENHAUS 1999

Nienhaus, M.: Zur Montage hybrider Mikrosysteme am Beispiel von Radarsensoren und Umlaufrädergetrieben. Düsseldorf: VDI 1999. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 501).

---

O'BRIAN & LANE 2001

O'Brien, D. J.; Lane, D. M.: 3D force control system design for a hydraulic parallel bellows continuum actuator. In: 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA 2001). Seoul, Korea: 2001, S. 2375-2380.

OLYMPUS 1999

Olympus: Microfactory Prototype. Tokyo, Japan, <http://www.olympus.co.jp/en/news/1999b/nr991201mifae.cfm?ote=0&nr=1>.

PAHL ET AL. 2005

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz. Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005.

PAHLKE 2001

Pahlke, W.: Mikromodule: Kostenentlastung in der Sensorproduktion. In: *wt Werkstattstechnik online* Jahrgang 91 (2001) Nr 12. S. 761 ff.

PEER & BUSS 2008

Peer, A.; Buss, M.: A New Admittance Type Haptic Interface for Bimanual Manipulations. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 13, Nr. 4, S. 416-428, 2008.

PETZOLD 2008

Petzold, B.: Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage. München Utz 2008 (*iwb Forschungsberichte* 217).

PETZOLD ET AL. 2004

Autor Petzold, B.; Zaeh, M.F.; Faerber, B.; Deml, B.; Egermeier, H.; Schilp, J.; Clarke, S.: A Study on Visual, Auditory and Haptic Feedback for Assembly Tasks. In PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, MIT Press, Cambridge, 13 (2004) 1, S. 16 ff.

POTSAID ET AL. 2002

Potsaid, B.; Bellouard, Y.; Wen, J.: Scanning optical mosaic scope for micro-manipulation. In: International Workshop on Micro-Factories (IWMF02). 2002.

PREUSCHE & HIRZINGER 2000

Preusche, C.; Hirzinger, G.: Scaling Issues for Teleoperation. In: Fifth PHAN-ToM User Group Workshop. Aspen, USA: 2000, S. 10-14.

QUAID & RIZZI 2000

Quaid, A. E.; Rizzi, A. A.: Robust and efficient motion planning for a planar robot using hybrid control. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, USA, April 2000, S. 4021ff.

### RADI ET AL 2010A

Radi, M.; Reiter, A.; Zaidan, S.; Nitsch, V.; Faerber, B.; Reinhart, G.: Telepresence in Industrial Applications: Implementation Issues for Assembly Tasks. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 19, Nr. 5, S. 415-429, 2010.

### RADI ET AL. 2010B

Radi, M.; Reiter, A.; Zäh, M. F.; Müller, T.; Knoll, A.: Telepresence technology for production: From manual to automated assembly. In: *Proceedings of EuroHaptics 2010*, July 2010.

### RADI & REINHART 2009

Radi, M.; Reinhart, G.: Industrial Haptic Robot Guidance System for Assembly Processes. In: *IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games*, Lecco, 2009, S. 69-74.

### RASMUSSEN 1999

Rasmussen, J.: The definiton of human error and a taxonomy for technical system design. In: Rasmussen, J. et al. (Hrsg.): *New technology and human error*. Wiley & Sons, New York 1999.

### REFA 1988

Refa – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): *Montage in der Mikrowelt der Fertigung – Hinweise zur Gestaltung von Arbeiten mit Seh- und Handhabungshilfen*. Druck: Refa, Darmstadt 1988.

### REINHART & HÖHN 1999

Reinhart, G; Höhn, M.: Strategien und Werkzeuge für die präzise Positionierung in der Mikromontage. *VDI-Z* 141 (1999) 9/10, S. 52-54.

### REINHART ET AL. 2000

Reinhart, G.; Anton, O.; Auer, F.; Cuiper, R.; Ehrenstraßer, M.; Patron, C.: Telepräsente Mikromontage für die industrielle Anwendung. In: *Industrie Management* 16 (2000) 4, S. 42-44.

### REINHART ET AL. 2001

Reinhart, G.; Angerer, T.; Lercher, B.; Schilp, M.: Mechatronik – eine Herausforderung für die Montage und Fügetechnik. In: *Proceedings zum Fachkolloquium Fügetechnik und Montage*, Dresden, 11. Oktober 2001.

### REINHART ET AL. 2004

Reinhart, G.; Clarke, S.; Petzold, B.; Schilp, J.: Telepresence as a Solution to Manual Micro-Assembly. In: *Annals of CIRP* Vol. 53/1/2004.

---

REINHART ET AL. 2008A

Reinhart, G.; Radi, M.; Zaidan, S.: On the Feasibility of a PBD Approach for a Force Controlled Robot Production Cell. In: 2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems. Toronto, Kanada: 21.-23.09.2008.

REINHART ET AL. 2008B

Reinhart, G.; Radi, M.; Zaidan, S.: Industrial Telepresence Robot Assembly System: Preliminary Simulation Results. In: 2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems. Toronto, Kanada: 21.-23.09.2008.

REINHART & RADI 2009

Reinhart, G.; Radi, M.: Some Issues of Integrating Telepresence Technology into Industrial Robotic Assembly. In: Proceedings of International Conference on Control and Automation, 28.-30. Jan. 2009.

REINHART ET AL. 2009A

Reinhart, G.; Radi, M.; Reiter, A.: Haptisch geführtes Robotersystem für die Montage. In: *wt Werkstattstechnik online* 99 (2009) 9, S. 648-654.

REINHART ET AL. 2009B

G. Reinhart, M. Radi, and A. Reiter. Haptisch geführtes Robotersystem für die Montage. In: *wt-online*, 9(1): S. 648-654, 2009.

REINTSEMA ET AL. 2004

Reintsema, D.; Preusche, C.; Ortmaier, T.; Hirzinger, G.: Towards High Fidelity Telepresence in Space and Surgery Robotics. PRESENCE – Teleoperators and Virtual Environments 13 (2004) 1, S. 77 ff.

REMOTEC 2006

Remotec: ANDROS Remote Vehicles. Baltimore, USA, <http://www.remotec-andros.com>. 2006.

RIZZI ET AL. 1997

Rizzi, A. A.; Gowdy, J.; Hollis, R. L: Agile assembly architecture: an agent based approach to modular precision assembly systems. In: Proceedings of the 1997 International Conference on Robotics and Automation.

SATO ET AL. 1993

Sato, T.; Koyano, K.; Nakao, M.; Hatamura, Y.: Novel manipulation for micro object handling as interface between micro and human world system. In: Proceedings of IEEE RSJ, Yokohoma, Japan, 1993, S. 1674-1681.

SAKAI ET AL. 2002

Sakai, S.; Tsuda, N.; Fujimori, R.: Development and assembling of Chopstick-type micro manipulator. 3rd International Workshop on Microfactories, 16-18. September 2002, Minneapolis, USA, S. 113-116.

### SCHILP 2001

Schilp, M.: Dosier- und Dispensertechnik - das Problem des kleinen Tropfens. In: Reinhart, G. (Hrsg.), Automatisierte Mikromontage, Seminarberichte iwb (2001) 59, Herbert Utz Verlag, München 2001.

### SCHILP 2006

Schilp, M.: Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage. München Utz 2006 (*iwb* Forschungsberichte 199)

### SCHILP ET AL. 2003

Schilp, J.; Harfensteller, M.; Jacob, D.; Schilp, M.: High-accuracy micro-assembly by intelligent vision systems and smart sensor integration. In: Knopf, G.K. (Hrsg.): Optomechatronic Systems IV, Providence, Rhode Island. Washington: Proceedings of SPIE Vol. 5264 (2003), S. 274-282.

### SCHILP ET AL. 2004

Schilp, J.; Ehrenstrasser, M.; Clarke, S.; Petzold, B.; Zaeh, M. F.: Smart Sensor application in teleoperated micro-assembly systems. In: Gopalakrishnan, B.; Gunasekaran, A.; Orban, P. E. (Eds.): Intelligent Manufacturing, Providence, RI, USA. Washington: Proceedings of SPIE Vol. 5263 (2004), S. 38 ff.

### SCHLICK & ZÜHLKE 2003

Schlick, J.; Zühlke, D.: Development of adaptive grippers for automated microassembly. In: Proceedings of MIRCO.tec 2003, München, 13-15. Oktober 2003, VDE 2003.

### SCHMIDT 1976

Schmidt, R. F.: Integrative Funktion des Zentralnervensystems. In: Schmidt, R. F.; Thews, G. (Hrsg.): Physiologie des Menschen. Berlin, Heidelberg, New York.

### SCHÜLE ET AL. 2001

Schüle, A.; Bauer, G.; Schäfer, W.: Modulare Mikrosysteme – ein Beispiel aus der medizinischen Analytik. In: *wt Werkstattstechnik online* Jahrgang 91 (2001) H. 12, S. 751 ff.

### SCHUMACHER 1991

Schumacher, H.: Einheitliche Programmierung von Automatisierungskomponenten roboterbestückter Bearbeitungs- und Montagezellen. In: *isw Forschung und Praxis* 83, Springer 1991.

### SHERIDAN 1992A

Sheridan, T. B.: Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control. Cambridge, USA: MIT Press 1992.

---

**SHERIDAN 1992B**

Sheridan, T. B.: *Musings on Telepresence and Virtual Presence*. *Presence – Teleoperators and Virtual Environments* 1 (1992) 1, S. 120-126.

**SITTI & HASHIMOTO 1999**

Sitti, M.; Hashimoto, H.: Teleoperated Nano Scale Object manipulation. In: Kaynak, O.; Tosunoglu, S.; Ang, M. J. (Hrsg.): *Recent Advances on Mechatronics*, 2000, S. 322-325.

**SITTI & HASHIMOTO 2003**

Sitti, M.; Hashimoto, H.: Teleoperated touch feedback from surfaces at the nanoscale: modeling and experiments. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 8 (2003).

**SULZMANN ET AL. 1996**

Sulzmann, A.; Breguet, J.-M.; Carlier, J.; Jacot, J.: Virtual Reality and high accurate vision feedback as key information for micro robot telemanipulation. In: Sulzmann, A. (Hrsg.): *Microrobotics: Components and Applications*, Proceedings of SPIE Vol. 2906, 1996, S. 38-57.

**STEUER 1995**

Steuer, J.: Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. In: Biocca, F. et al. (Hrsg.): *Communication in the age of virtual reality*. Mahwah, USA: Lawrence Erlbaum Association Inc. 1995, S. 33-56.

**STILWELL ET AL. 2003**

Stilwell, J. L.; McCarty, D. M.; Negishi, A.; Superfine, R.; Samulski, J.: Development and Characterization of Novel Empty Adenovirus Capsids and their Impact on Cellular Gene Expression. *Journal of Virology* 23 (2003), S. 12881 ff.

**STÖLTING & KALLENBACH 2001**

Störling, H.-D.; Kallenbach, E.: *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*. In: Hanser, München, Wien 2001.

**STOLL ET AL 2009**

Stoll, E.; Letschnik, J.; Walter, U.; Artigas, J.; Preusche, C.; Kremer, P.; Hirzinger, G.; Pongrac, H.: On the feasibility of telepresent on-orbit satellite servicing. In: *Journal of Field Robotics*, Vol. 26, Nr. 3, S. 287-307, 2009.

**TAN ET AL. 1994**

Tan, H. Z.; Srinivasan, M. A.; Eberman, B.; Cheng, B.: Human Factors for the design of Force Reflecting Haptic Interfaces. In: *Dynamic Systems and Control*. ASME DSC-Vol. 55-1, 1994, S. 353 ff.

**TELEROB 2006**

TeleRob 2006: The Remote Handling People. Ostfildern, <http://www.telerob.de>.

## **Literaturverzeichnis**

---

### **THOBEN 1999**

Thoben, R.: Parallelroboter für die automatisierte Mikromontage. In: Fortschrittsberichte VDI Reihe 8 Nr. 758. Düsseldorf VDI 1999.

### **TILLE ET AL. 1999**

Tille, C; Deuke, R.; Eidam, R.: Manufacturing High Resolution Parts with Stereolithography Method. In: Proceedings of the 10th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, USA, 1999, S. 849-856.

### **UHL 2000**

Uhl, A.: Flexibles Telerobotersteuerungssystem auf der Basis offener numerischer Steuerungen. Dissertation Universität. Stuttgart (isw136), 2000.

### **UNTERHINNINGHOFEN ET AL. 2008**

Unterhinninghofen, U.; Freyberger, F. K.; Buss, M.: Study on computer assistance for telepresent reaching movements. In: EuroHaptics 2008: Proceedings of the 6th international conference on Haptics, S. 745-754, Springer-Verlag, 2008.

### **VDI 2001**

VDI (Hrsg.): Eine Minifabrik für die Mikromontage. In: VDI nachrichten vom 21. September 2001, Stuttgart.

### **VDI 2860**

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

### **VDI 3258A**

VDI-Richtlinie 3258 Bl. 1: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen. Begriffe, Bezeichnungen, Zusammenhänge. Düsseldorf: VDI 1962.

### **VDI 3258B**

VDI-Richtlinie 3258 Bl. 2: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen - Erläuterungen und Beispiele. Düsseldorf: VDI 1964.

### **VDI/VDE-IT 1999**

VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (VDI/VDE-IT) (Hrsg.): Industrieller Einsatz von Verbindungstechniken für Mikro-/Millimeterwellenkomponenten (MikroMilli) – Industrielle Produktion von Mini- und hochintegrierten Endoskopen (MEP). In: Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik Band 67 Teltow VDI 1999; ISBN 3-89750-083-3.

---

VIKRAMADITYA & NELSON 1997

Vikramaditya, B.; Nelson, B.-J.: Visually guided Microassembly Using Optical Microscopes and Active Vision Techniques. Proceedings of the 1997 IEEE Internaional Conference on Robotics and Automation. Albuquerque: IEEE 1997, S. 3172-3177.

VOGL ET AL. 2004

Vogl, W.; Sitti, M.; Ehrenstrasser, M.; Zäh, M. F.: Augmented Reality User Interface for Nanomanipulation using Atomic Force Microscopes. In: Eurohaptics 2004. München: 2004, S. 413 ff.

VOYLES 1997

Voyles, R. M.: Towards gesture-based programming: agent-based haptic skill acquisition and interpretation. In: technical report CMU-RI-TR-97-36, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Dissertation August 1997.

WAGNER 1996

Wagner, M.: Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe. Berlin: Springer, 1996 (*iwb* Forschungsberichte 106).

WALLRABE & MOHR 2003

Wallrabe, U.; Mohr, J.: Modular microoptical systems for sensors and telecommunication. In Baltes, H.; Fedder, G.K.; Korvink, J.G. (Eds): Sensor Update Vol. 12 2003, S. 143 ff.

WECHSUNG 2002

Wechsung, R. (Hrsg.): NEXUS Task Force Market Analysis: Microsystems World Market Analysis 2000-2005. A NEXUS task force report, NEXUS 2002.

WECK 1999

Weck, M.; Gottschald, J.: Integrated 3D-Sewing System – Simulation based robot programming. Aufsatz im Tagungsband des Techtextil Symposiums 4/1999, Messe Frankfurt, 1999.

WECK 2001

Weck, M.: Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme, Band 4, Automatisierung und Steuerungstechnik. Springer, Berlin 2001.

WEINERT ET AL. 1998

Weinert, K.; Guntermann, G.; Schwietering, C.: Mikrofräsbearbeitung schwerzerspanbarer Werkstoffe. *wt Werkstattstechnik* 88 (1998) H. 11/12, S. 503-506.

WEIB 1989

Weiß, F.: Prozessnahe Roboterprogrammierung unter Einsatz eines inertialen Messsystems. Aachen, RWTH, Dissertation 1989.

### WESTKÄMPER 1994

Westkämper, E.; Wietfeld, Th.: Grafisch-interaktive Systeme zur Off-line Programmierung von Industrierobotern. *CIM Management*, 3/94, S. 13-16.

### WESTKÄMPER 2000

Westkämper, E.: Miniaturisierung von Komponenten und Bauteilen im Maschinenbau – Einsatz technischer Intelligenz in der Produktion (Teil 1). In: *Werkstatttechnik wt* 90 (2000) H. 11/12, S. 476 ff.

### WESTKÄMPER 2001A

Westkämper, E.: Miniaturisierung von Komponenten und Bauteilen im Maschinenbau Auslegung produktionstechnischer Systeme und Messtechnik (Teil 3). *wt Werkstatttechnik* 91 (2001) 2, S. 90-94.

### WESTKÄMPER 2001B

Westkämper, E.: Miniaturisierung von Komponenten und Bauteilen im Maschinenbau – Miniaturisierung und Integration technischer Funktionen (Teil 2). In: *wt Werkstatttechnik* 91 (2001), H.1, S. 47-51.

### WESTKÄMPER 2003

Westkämper, E.: Industrial Manufacturing of Microsystems. In: *MICRO.tec 2003: Applications - trends - visions. Proceedings of the 2nd VDE World Micro-technologies Congress*, 13.-15. Oktober 2003, International Congress Centre, Munich, Germany Berlin: VDE Verlag, 2003.

### WESTKÄMPER 2005

Westkämper, E.: Auf dem Weg zur Intelligenten Produktion. In: *Werkstatttechnik wt* 95 (2005) H. 3, S. 80.

### WEULE ET AL. 2001

Weule, H.; Spath, D.; Schmidt, J.; elsner, J.; Buchholz, C.; Tritschler, H.: Prozesskette der Fertigung mikromechanischer Bauteile. In: *wt Werkstatttechnik online* Jahrgang 91 (2001), Ausgabe 12; Springer, S. 726 ff.

### WICHT 1999

Wicht, H.: Mikrosystemtechnik: eine Marktanalyse; Produzenten – Nutzer – Netzwerke als Chance für den Markt. Frankfurt a. M.: Peter Lang 1999. (europäische Hochschulschriften: Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft; Band 2427).

### WICHT ET AL. 2001A

Wicht, H.; Bouchaud, J.; Bahle, C.: Vergebene Liebesmühe oder Wachstumsmarkt? In: *inno* Nr. 20, 5/01.

### WICHT ET AL. 2001B

Wicht, H.; Bouchaud, J.; Le Floch, C.: From research to industry: Start-up companies in microsystems technology (MST). In: *WTC 2001*, S. 1-6.

---

#### WICHT & BOUCHAUD 2005

Wicht, H.; Bouchaud, J.: NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III 2005 – 2009. In: mstnews 05/2005, S. 33 f.

#### WÖSCH 2002

Wösch, T.: Taktile Mensch-Maschine Interaktion. In Robotik 2002 (VDI Bericht 1679), S. 275-280.

#### YABUSHITA ET AL. 2004

Yabushita, H.; Kosuge, K.; Hirata, Y.: Ground Adaptive Manipulation of GPR for Mine Detection System. In: IARP Robotics and Mechanical Assistance in Humanitarian Demining and Similar Risky Interventions (Hudem). Brüssel-Leuven, Belgien: 2004.

#### YOKOKOSHIJI 1994

Yokokoshoji, Y.; Hosotani, N.; Ueda, J.; Yoshikawa, T.: A Micro Teleoperation System for Compensating Scaling effects based on Environment Model. In: Proceedings of Japan-USA Symposium on flexible Automation, 1994.

#### YOKOKOHJI ET AL. 1994

Yokokohji, Y.; Hosotani, N.; Yoshikawa, T.: „Analysis of maneuverability and stability of micro-teleoperation systems“. In: Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, S. 237-243.

#### YOKOKOHJI ET AL. 1994

Yokokohji, Y.; Hosotani, N.; Yoshikawa, T.: „Analysis of maneuverability and stability of micro-teleoperation systems“. In: Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, S. 237-243.

#### ZÄH ET AL. 2002

Zäh, M. F.; Reinhart, G.; Petzold, B.; Patron, C.: Force-Feedback in VR/AR-Anwendungen - Grundlagen, Bewertungsgrößen und technische Integration. In: Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung 2002. Paderborn 2002.

#### ZÄH ET AL. 2003A

Zäh, M. F.; Zimmermann, J.; Schilp, M.; Zitzmann, A.: Non-Contact Handling and Assembly in Microfabrication. In: Proceedings of MICRO.tec 2003 - 2nd VDE World Microtechnologies Congress, München 2003.

#### ZÄH ET AL. 2003B

Zäh, M. F.; Wagner, W.; Weber, V.: Maintaining, Increasing and Using the innovative Capability of Older Employees. In: 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Saarbrücken: 2003, S. 567-570.

### ZÄH ET AL. 2004A

Zäh, M. F.; Munzert, U.; Vogl, W.: Augmented Reality – Einsatz zur intuitiven Programmierung von Industrierobotern. In: Paderborner Workshop VR/AR 2004.

### ZÄH ET AL. 2004B

Zaeh, M.F.; Egermeier, H.; Petzold, B.; Spitzweg, M.: Dexterous Object Manipulation in a Physics Based Virtual Environment. In Drews P. (Hrsg.): Proceedings of Mechatronics & Robotics 2004, Aachen, S. 1340 ff.

### ZÄH & PETZOLD 2005

Zaeh, M. F; Petzold, B.: An Operator Workplace for a Telepresent Micro-Assembly System. In: Joint International COE/HAM - SFB453 Workshop on Human Adaptive Mechatronics and High Fidelity Telepresence, Tokyo, S. 45 ff.

### ZÄH ET AL. 2006A

Zaeh, M. F.; Rimpau, Ch.; Franzkowiak, M.; Hoffmann, H.; Träger, M.: Innovative Strategien für die Produktion der Zukunft. In: Hoffmann, H.; Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Zukunft Voraus – Denken für den Standort Deutschland. Tagungsband zum Münchener Kolloquium 2006. München utz 2006, S. 109 ff.

### ZÄH ET AL. 2006B

Zäh, M. F.; Franzkowiak, M.; Harfensteller, M.; Heinz, M.; Reiter, A.; Schilp, J.; Zitzmann, A.: Handhabung in besonderen Produktionsumgebungen. In: wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 3, S. 81 ff.

### ZÄH & FRANZKOWIAK 2006

Zäh, M. F.; Franzkowiak, M.: Universelles Mikroproduktionszentrum - Flexible Handhabungsmittel für die Elektronenstrahlbearbeitung. In: wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 9, S. 613-617.

### ZESCH & FEARING 1998

Zesch, W.; Fearing, R. S.: Alignment of Microparts Using Force Controlled pushing. In: Sulzmann, A., Nelson, B. (Hrsg.): Microrobotics and Micromanipulation, Proceedings of SPIE Vol. 3519 (1998).

### ZIEGNER 2002

Ziegner, J.: Ein Tausendsassa stellt sich vor – Einsatz von Programmiergeräten auf breiter Linie. In Industrie-Service 12/2002 S. 34 f.

### ZINNER 2003

Zinner, H. (Hrsg.): Product-technology roadmap for Microsystems. A NEXUS task force report, NEXUS September 2003.

### ZÖPPIG 1998

Zöppig, V.: Untersuchungen zur Entwicklung von Miniaturgreifern für die industrielle Mikromontage. Ilmenau: ISLE 1998.

---

ZOU ET AL. 2002

Zhou, Q.; Aurelian, A.; del Corral, C.; Koivo, H. N.: Environment controlled microassembly system. In: 3rd International Workshop on Microfactories, 16.-18. September 2002, Minneapolis, USA, S. 13-16.



# 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  | <i>Streiflinger, E.</i><br>Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel<br>1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3      | 14 | <i>Groha, A.</i><br>Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme<br>1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8                      |
| 2  | <i>Fuchsberger, A.</i><br>Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen<br>1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1  | 15 | <i>Riese, K.</i><br>Klippsmontage mit Industrierobotern<br>1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6   |
| 3  | <i>Maier, C.</i><br>Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern<br>1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X                           | 16 | <i>Lutz, P.</i><br>Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung<br>1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3                                  |
| 4  | <i>Summer, H.</i><br>Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen<br>1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8   | 17 | <i>Klippel, C.</i><br>Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems<br>1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0                   |
| 5  | <i>Simon, W.</i><br>Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen<br>1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16593-9  | 18 | <i>Rascher, R.</i><br>Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung<br>1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9                 |
| 6  | <i>Büchs, S.</i><br>Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung<br>1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7                                   | 19 | <i>Heusler, H.-J.</i><br>Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme<br>1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5                             |
| 7  | <i>Hunzinger, I.</i><br>Schneiderradierte Oberflächen<br>1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5   | 20 | <i>Kirchknopf, P.</i><br>Ermittlung modularer Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen<br>1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3                    |
| 8  | <i>Pilland, U.</i><br>Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen<br>1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2   | 21 | <i>Sauerer, Ch.</i><br>Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen<br>1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1                                |
| 9  | <i>Bärthelmeß, P.</i><br>Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung<br>1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2 | 22 | <i>Karstedt, K.</i><br>Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung<br>1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7     |
| 10 | <i>Reithofer, N.</i><br>Nutzungsicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen<br>1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6                              | 23 | <i>Peiker, St.</i><br>Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems<br>1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0                                   |
| 11 | <i>Düss, H.</i><br>Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse<br>1988 · 66 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5                           | 24 | <i>Schugmann, R.</i><br>Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage<br>1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0                     |
| 12 | <i>Reinhart, G.</i><br>Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leistungssätze<br>1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1           | 25 | <i>Wrba, P.</i><br>Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik<br>1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X                                     |
| 13 | <i>Bürstner, H.</i><br>Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion<br>1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6                                 | 26 | <i>Eibelhäuser, P.</i><br>Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung<br>1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7 |
|    |   | 27 | <i>Prasch, J.</i><br>Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie<br>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 Pfraun, 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 Tuzek, H.  
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschränkungen mittels Methoden der Bildverarbeitung  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.  
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.  
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 Naber, H.  
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupec, Th.  
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.  
Dynamisches Verhalten von Kreissägen  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.  
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile  
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.  
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung  
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.  
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme  
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.  
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen  
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hößmann, 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 Programmbaustens 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 Wisbacher, J.  
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 Garnich, F.  
Laserbearbeitung mit Robotern  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.  
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 Gläss, W.  
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H. J.  
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.  
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.  
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bomm, H.  
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendl, A.  
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.  
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.  
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayer, R.*  
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringereinrichtungen  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stettner, R.*  
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56891-1
- 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 *Waenckxhaus, Ch.*  
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummesteiner, 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 Produktions systemen  
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 geschwindigkeits adaptiver Zustandsregler  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktions systemen  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinations system für das Fertigungsfeld  
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 *Zeilmayer, 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 Materialflußsteuerungen  
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 *Fichttmöller, 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 Produktionsysteme  
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*  
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Gewer, 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 *Pischeltrieder, 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 Ablaufsimulationsystem  
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, 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 *Kube, R.*  
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Keiser, 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 *Lindermair, R.*  
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koecher, J.*  
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*  
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen  
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*  
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung  
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*  
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen  
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*  
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
Erfahrungsgelenkte Planung von Laseranlagen  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

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

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utz.de](mailto:info@utz.de)

- |    |  |    |   |
|----|--|----|---|
| 1  | Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung<br>115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9                                    | 25 | Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele<br>152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6                           |
| 2  | Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt<br>82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7   | 26 | Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelaufrag<br>110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4                       |
| 3  | Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung<br>110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5                                   | 27 | Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt<br>111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2                             |
| 4  | Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte<br>134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3  | 28 | Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt<br>154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0                                 |
| 5  | Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung<br>95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1  | 29 | Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar<br>156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9  |
| 6  | Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung<br>86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0  | 30 | Nicht erschienen - wird nicht erscheinen  |
| 7  | Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen<br>80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9  | 31 | Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends<br>183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0  |
| 8  | Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel<br>130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7  | 32 | Nicht erschienen - wird nicht erscheinen  |
| 9  | Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte<br>120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5   | 33 | 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension<br>181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7  |
| 10 | 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel<br>90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8   | 34 | Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz<br>102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5                    |
| 11 | Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion<br>110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6   | 35 | Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben<br>129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3   |
| 12 | Autonome Produktionsysteme<br>100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4  | 36 | Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion<br>124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1                               |
| 13 | Planung von Montageanlagen<br>130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2  | 37 | Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze<br>95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X       |
| 14 | Nicht erschienen - wird nicht erscheinen   | 38 | Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung<br>128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8                               |
| 15 | Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung<br>80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9  | 39 | Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau<br>130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6  |
| 16 | Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart<br>80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7   | 40 | Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen<br>160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X |
| 17 | Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen<br>80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5                                     | 41 | Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen<br>146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0  |
| 18 | Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen<br>165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3   | 42 | Stückzahlflexible Montagesysteme<br>139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9   |
| 19 | Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung<br>85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1                                       | 43 | Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern<br>120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7  |
| 20 | Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme<br>105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5 | 44 | Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen<br>125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5                                 |
| 21 | Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen<br>95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3   | 45 | Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele<br>173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3  |
| 22 | Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale<br>95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1                                  | 46 | Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation<br>108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1  |
| 24 | EDM Engineering Data Management<br>195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8   |    |   |

- 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 Prototypenserialen**  
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 **Klebetechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**  
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 **Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**  
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**  
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 76 **Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle**  
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 **ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen**  
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 **Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen**  
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 **Produktionsmanagement**  
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 **Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche**  
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 **Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder**  
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 **Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 **Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen**  
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 **Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?**  
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 **3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau**  
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 **Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung**  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 **Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand**  
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 **Mechatronik · Vorsprung durch Simulation**  
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 **RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten**  
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

# Forschungsberichte iwb

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

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

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

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

- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer  
**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 Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin 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 telepräsentier 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 Laserstrahlenschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen**  
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke  
**Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung**  
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried  
**Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern**  
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner  
**Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion**  
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich  
**Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen**  
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl  
**Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern**  
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann  
**Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge**  
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp  
**Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage**  
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz  
**Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme**  
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner  
**Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding**  
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein  
**Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation**  
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren  
**Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse**  
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf  
**Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie**  
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebisch  
**Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia**  
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrensträßer  
**Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage**  
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack  
**Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik**  
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff  
**Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion**  
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller  
**Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen**  
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler  
**Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme**  
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlichenrieder  
**Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten Kleben großflächiger Bauteile**  
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller  
**Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme**  
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl  
**Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen**  
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge  
**Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiraumen**  
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wünsch  
**Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme**  
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertl  
**Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben**  
2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold  
**Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage**  
2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis  
**Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains**  
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl  
**Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung**  
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig  
**Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten**  
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck  
**Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie**  
2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier  
**Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen**  
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthias Sigl  
**Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns**  
2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller  
**Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets**  
2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner  
**Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie**  
2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann  
**Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen**  
2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy  
**Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry**  
2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl  
**Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern**  
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl  
**Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess**  
2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann  
**Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels**  
2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise  
**Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models**  
2009 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht  
**Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten**  
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg  
**Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen**  
2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 Ulrich Munzert  
**Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen**  
2010 · 176 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 Georg Völlner  
**Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern**  
2010 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0955-0
- 236 Nils Müller  
**Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen**  
2010 · 270 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0992-5
- 237 Franz Decker  
**Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe**  
2010 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0996-3
- 238 Christian Lau  
**Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung**  
2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4012-6
- 239 Christoph Rimpau  
**Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte**  
2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4015-7
- 240 Michael Loy  
**Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung**  
2010 · 169 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4027-0
- 241 Andreas Eursch  
**Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen**  
2010 · 205 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4029-4

- 242 Florian Schwarz  
**Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung**  
2010 · 256 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4030-0
- 243 Martin Georg Prasch  
**Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage**  
2010 · 261 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4033-1
- 244 Johannes Schilp  
**Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz**  
2011 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4063-8
- 245 Stefan Lutzmann  
**Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlenschmelzens**  
2011 · 222 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4070-6
- 246 Gregor Branner  
**Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren**  
2011 · 230 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4071-3
- 247 Josef Ludwig Zimmermann  
**Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme**  
2011 · 184 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4091-1
- 248 Clemens Pörnbacher  
**Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme**  
2011 · 280 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4108-6
- 249 Alexander Lindworsky  
**Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest**  
2011 · 300 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4125-3
- 250 Michael Mauderer  
**Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen**  
2011 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4126-0
- 251 Roland Mörk  
**Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze**  
2011 · 228 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4127-7
- 252 Florian Reichl  
**Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung**  
2011 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4128-4
- 253 Paul Gebhard  
**Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen**  
2011 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4129-1
- 254 Michael Heinz  
**Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik**  
2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4147-5
- 255 Pascal Krebs  
**Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten**  
2012 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4156-7
- 256 Gerhard Straßer  
**Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung**  
2012 · 290 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4161-1
- 257 Frédéric-Felix Lacour  
**Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen**  
2012 · 222 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4162-8
- 258 Thomas Hensel  
**Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen**  
2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4167-3



