

Bernd Petzold

**Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes  
für die telepräsenste Mikromontage**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 217

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

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2008

ISBN 978-3-8316-0805-8

Printed in Germany

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>XV</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Die Produktion im Wandel .....	1
1.2 Telepräsenz als Schlüsseltechnologie .....	2
1.3 Bedeutung der Telepräsenz für die Produktionstechnik .....	4
1.4 Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	6
1.5 Vorgehensweise .....	7
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>9</b>
2.1 Manuelle Mikromontage.....	9
2.2 Begriffsdefinitionen für Telepräsenzsysteme .....	11
2.3 Bestehende Telepräsenzsysteme .....	14
2.3.1 Handhabung gefährlicher und gesundheitsgefährdender Objekte	14
2.3.2 Erschließung entfernter unzugänglicher Umgebungen.....	17
2.3.3 Exploration und Handhabung im Mikrokosmos .....	19
2.3.4 Einsatz im medizinischen Bereich .....	20
2.3.5 Industrieller Einsatz von Telepräsenzsystemen .....	23

2.3.6 Zusammenfassung .....	27
2.3.7 Zusammenfassung des Stands der Technik im Hinblick auf eigene Arbeiten .....	31
<b>3 Grundlagen einer Mensch-Maschine-Schnittstelle .....</b>	<b>33</b>
3.1 Visualisierung .....	33
3.1.1 Visualisierungsmedium .....	33
3.1.2 Realbild-Visualisierung .....	35
3.1.3 Modellbasierte Visualisierung .....	38
3.1.4 Überlagerte Visualisierung .....	41
3.1.5 Vergleich der Visualisierungsarten.....	43
3.1.6 Zusammenfassung .....	45
3.2 Interaktion.....	46
3.2.1 Die menschliche Hand .....	46
3.2.2 Fernsteuerungen.....	47
3.2.3 Standard-Eingabegeräte .....	48
3.2.4 3D-Eingabegeräte .....	50
3.2.5 Raumfeste haptische Eingabegeräte .....	51
3.2.6 Körperfeste Eingabegeräte.....	54
3.2.7 Kombinierte Geräte.....	55
3.2.8 Eingabemetaphern .....	57
3.2.9 Zusammenfassung .....	60
3.3 Haptisches Rendering .....	60

3.3.1	Art der Kraftermittlung .....	60
3.3.2	Voxelbasiertes haptisches Rendering.....	61
3.3.3	Haptisches Rendering mit triangulierten Geometriemodellen.....	63
3.3.4	Haptisches Rendering von zylindrischen Steckverbindungen.....	66
3.4	Zusammenfassung der Grundlagen.....	67
<b>4</b>	<b>Teilkonzepte für einen Operatorarbeitsplatz .....</b>	<b>69</b>
4.1	Bestimmung einer geeigneten Form der Visualisierung.....	69
4.1.1	Vorgehen zur Auswahl einer Visualisierungsart .....	69
4.1.2	Versuchsvorbereitung .....	70
4.1.3	Versuchsdurchführung .....	71
4.1.4	Versuchsauswertung .....	73
4.2	Die Notwendigkeit von haptischer Rückkopplung für die Telepräsenz. 76	
4.2.1	Haptische Rückkopplung in technischen Systemen .....	76
4.2.2	Versuchsvorbereitung .....	77
4.2.3	Versuchsdurchführung .....	78
4.2.4	Versuchsergebnisse .....	80
4.3	Betrachtung des Regelkreises bei haptischer Rückkopplung .....	81
4.3.1	Der Regelkreis in einem Telepräsenzsystem .....	81
4.3.2	Erhöhung des Skalierungsfaktors für die Positionsvorgabe .....	85
4.3.3	Verkleinerung der Krafterückkopplung.....	87
4.3.4	Aktive Dämpfung der Bedieneingaben.....	88
4.3.5	Reduktion der Totzeit durch einen modellbasierten Ansatz.....	89

4.3.6	Auswahl einer Methode zur Stabilisierung des Regelkreises.....	91
4.4	Haptisches Rendering .....	92
4.5	Konzept für die Mensch-Maschine-Interaktion eines Telepräsenzsystems .....	95
4.5.1	Auswahl einer Mensch-Maschine-Schnittstelle .....	95
4.5.2	Versuchsvorbereitung .....	96
4.5.3	Versuchsdurchführung.....	97
4.5.4	Versuchsergebnisse.....	98
4.6	Entwicklung eines angepassten Eingabegerätes.....	102
4.6.1	Anforderungen .....	102
4.6.2	Gesamtkonzept für eine Greifeinheit.....	110
4.6.3	Technische Konstruktion der Greifeinheit.....	114
4.6.4	Einsatz des entwickelten Eingabegeräts .....	118
4.6.5	Evaluierung des Eingabegeräts .....	121
<b>5</b>	<b>Gesamtkonzept .....</b>	<b>125</b>
5.1	Anforderungen aus den Teilkonzepten.....	125
5.2	Konzept eines WYSIWYF-Displays .....	126
5.3	WYSIWYF-Display für die telepräsen- te Mikromontage.....	131
5.4	Softwaretechnische Umsetzung.....	133
5.5	Einsatz des WYSIWYF-Displays.....	136
<b>6</b>	<b>Evaluierung.....</b>	<b>141</b>
6.1	Anwendungsbeispiel.....	141

6.2	Technisch-wirtschaftliche Bewertung .....	145
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>149</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>151</b>
<b>9</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>177</b>
<b>10</b>	<b>Genutzte Softwareprodukte und Geräte .....</b>	<b>181</b>
<b>11</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>183</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Trennung von Mensch und Maschine in einem Telepräsenzsystem .....	4
Abbildung 2:	Einteilung der Mikromontage in Teilbereiche nach REINHART & HÖHN 1999.....	10
Abbildung 3:	Begriffsdefinition der einzelnen Komponenten eines Telepräsenzsystems.....	11
Abbildung 4:	Telepräsenzsystem für die Handhabung radioaktiver Stoffe am Argonne National Laboratory (GOERTZ & THOMPSON 1954) ..	15
Abbildung 5:	Sprengstoffentschärfung mit einem Fahrzeug der Firma TELEROB (2005) .....	16
Abbildung 6:	Das Telepräsenzsystem da Vinci® zur Durchführung minimalinvasiver chirurgischer Eingriffe.....	22
Abbildung 7:	Ein Telepräsenzsystem für die Mikromontage .....	26
Abbildung 8:	Vergleich von Einsatzbereichen von Telepräsenzsystemen, eingeteilt nach sechs Bewertungskategorien .....	29
Abbildung 9:	Zentralperspektivisch verzerrte und telezentrische Abbildung von Objekten in verschiedenen Bildebenen (HÖHN 2001).....	36
Abbildung 10:	Kamerasystem zur Aufnahme von stereoskopischen Realbildaufnahmen (BAIER et al. 2001) .....	37
Abbildung 11:	Tessellierung (Mitte) eines Bauteils (links) und die daraus entstehende Modellabweichung (rechts) .....	39
Abbildung 12:	Reale (links) und modellbasierte (rechts) Visualisierung eines Miniaturzahnrad.....	39
Abbildung 13:	Beispiel für den Einsatz von Clipping in virtuellen Umgebungen; links: ohne Clipping; rechts: mit Clipping.....	41



Abbildung 14: Überlagerung von Realbildern und virtuellen Modellen zur Überbrückung von latenzbehafteter Kommunikation am Beispiel einer Montageaufgabe im Weltraum (KIM 1996).....	42
Abbildung 15: Bediengeräte für Spezialanwendungen: Roboter-Bedienpanel (links) und Steuerkonsole für Minenräumfahrzeug (rechts) .....	48
Abbildung 16: Standard-Eingabegeräte: PC-Maus (links), Joystick von Logitech® (Mitte) und Gamepad von Sony (rechts).....	49
Abbildung 17: 3D-Eingabegeräte: Spacemouse von Logitech® (links) und Eingabestift von Ascension Technology Corporation (rechts) .	50
Abbildung 18: Kommerzielle haptische Eingabegeräte: PHANTOM® Premium 1.5/6DOF von SensAble (links), Delta Haptic Device von Force Dimension (Mitte) und der HapticMASTER von FCS (rechts)	52
Abbildung 19: Prototypen haptischer Eingabegeräte: Das Levitation Device des MSL (links) und das DekiFed 4 des LSR (rechts) .....	53
Abbildung 20: Haptische Eingabegeräte mit Greiffunktion: Rutgers Master II von CAIP (links), CyberGrasp™ von Immersion (Mitte) und geOrb™ von Global Haptics (rechts).....	55
Abbildung 21: Haptische Eingabegeräte zur Übertragung von Greif- und Kontaktkräften: Spidar8 des Tokyo Institute of Technology (links) und der Sarcos Dextrous Arm (rechts).....	57
Abbildung 22: Zerlegung einer exakten Geometrie in eine Voxel-Karte nach MCNEELY et al. (1999); Legende (oben), Ausschnitt einer Voxel-Karte (links) und eine in Voxel konvertierte Teekanne (rechts) .....	62
Abbildung 23: Beschleunigung der Kollisionserkennung mittels verschiedener Hüllgeometrien: achsenparallele Quader (links), orientierte Hüllquader (Mitte) und Hüllgeometrien mit verschiedenen Hierarchisierungsebenen (rechts) .....	64
Abbildung 24: Einsatz der God-Object-Methode zur Kraftberechnung bei einer Kollision virtueller Objekte mittels eines Feder-Dämpfer-Systems .....	65

Abbildung 25: Tesselierte Rotationskörper und ihr Verhalten bei Passungen: normale Tesselierung (links), verfeinerte Tesselierung (Mitte) und Abschmelzen der Geometrie (rechts) .....	72
Abbildung 26: Montageprozess beim Aufsetzen des Stundentriebs auf den Minutentrieb eines Miniaturuhrwerks .....	71
Abbildung 27: Versuchsaufbau zur Bestimmung einer geeigneten Visualisierung für ein Telepräsenzsystem in der Mikromontage .....	72
Abbildung 28: Vergleich der benötigten Zeit (links) und der auftretenden Kräfte (rechts) bei einem telepräsenten Mikromontageprozess mit verschiedenen Visualisierungsarten.....	74
Abbildung 29: Auswertung des Fragebogens zur Bestimmung einer geeigneten Visualisierungsart für die telepräsente Mikromontage bezüglich verschiedener Kriterien; 100 % kennzeichnet den idealen Zustand.....	75
Abbildung 30: Versuchsablauf zur Bestimmung des Nutzens von haptischer Rückkopplung für die telepräsente Mikromontage .....	78
Abbildung 31: Versuchsaufbau des Experiments zur Bestimmung des Nutzens von haptischer Rückkopplung für die telepräsente Mikromontage anhand eines Aufsteckprozesses eines Zahnrades .....	80
Abbildung 32: Bearbeitungszeit der Versuchspersonen in Abhängigkeit der unterstützten Modalitäten und Signifikanzniveaus $p$ der Ergebnisse bezogen auf Gruppe 1 .....	81
Abbildung 33: Regelkreis einer Mensch-Maschine-Interaktion nach SCHMIDTKE (1993).....	82
Abbildung 34: Vereinfachter Regelkreis eines telepräsenten Mikromontage-Systems mit Realbild-Visualisierung.....	83
Abbildung 35: Sprungantwort eines Telepräsenzsystems, normiert auf eins ....	84
Abbildung 36: Überschwingverhalten eines Telepräsenzsystems bei einer Skalierung der Stellgröße.....	86

Abbildung 37: Überschwingverhalten eines Telepräsenzsystems bei Reduzierung der Krafrückkopplung an den Bediener .....	87
Abbildung 38: Sprungantwort eines Telepräsenzsystem bei Dämpfung der Eingabe .....	88
Abbildung 39: Vereinfachter Regelkreis eines modellbasierten Telepräsenzsystems für die Mikromontage .....	90
Abbildung 40: Sprungantwort eines Telepräsenzsystems bei einer Verkleinerung der Totzeiten auf ein Viertel .....	91
Abbildung 41: Darstellung von Bewegungsfreiheitsgraden in einer Schlussmatrix .....	93
Abbildung 42: Beispiel der logischen Verknüpfung von Schlussmatrizen .....	94
Abbildung 43: Schematischer Regelkreis der haptischen Synchronisation in einem Telepräsenzsystem mit Modell .....	95
Abbildung 44: Verschiedene Griffarten des Menschen nach CUTKOSKY & HOWE (1990) .....	104
Abbildung 45: Vorgehenszyklus für die methodische Lösungssuche in der Produktenwicklung nach EHRENSPIEL 2002 .....	111
Abbildung 46: Geometrische Abhängigkeiten einer Zirkelkinematik .....	115
Abbildung 47: Geometrische Abhängigkeiten einer Zirkelkinematik mit horizontal verschobenen Gelenkpunkten .....	116
Abbildung 48: Vergleich der vertikalen Verschiebung der Schenkelenden einer Zirkelkinematik mit einem gemeinsamen Gelenkpunkt und versetzten Gelenkpunkten ( $d_v=0,25 \cdot \text{maximale Greifdistanz}$ ). .....	116
Abbildung 49: Konstruktionszeichnung der Greifeinheit .....	117
Abbildung 50: Position des Greifmasters auf dem PHANTOM®-Stift .....	119
Abbildung 51: Darstellung der Position des Greifmasters abhängig von der Lage des PHANTOM®-Stiftes .....	119

Abbildung 52: Versuchsablauf einer telepräsenten Minenentschärfung einer Splittermine des Typs PROM-1 .....	123
Abbildung 53: Trennung von Wirk- und Darstellungsraum bei einem klassischen PC-Arbeitsplatz .....	126
Abbildung 54: Konzept eines WYSIWYF-Displays für eine einhändige Interaktion (Quelle: Reachin) .....	128
Abbildung 55: Konzept eines WYSIWYF-Displays für eine beidhändige Mensch-Maschine-Interaktion .....	130
Abbildung 56: Ergonomische Anordnung des WYSIWYF-Displays .....	132
Abbildung 57: Prototyp eines WYSIWYF-Displays für die telepräsente Mikromontage.....	133
Abbildung 58: Blockschaltbild des im Rahmen dieser Arbeit umgesetzten Telepräsenzsystems.....	135
Abbildung 59: Einstellmöglichkeiten des WYSIWYF-Displays, um eine angenehme Arbeitshaltung für den Bediener zu erreichen.....	137
Abbildung 60: Sicht des Bedieners auf ein WYSIWYF-Display während eines Montagevorgangs: Kalibriertes System (links) und unkalibriertes System (rechts).....	138
Abbildung 61: Durchführung einer telepräsenten Mikromontageaufgabe mit Hilfe des entwickelten WYSIWYF-Displays .....	139
Abbildung 62: Uhrwerk einer Armbanduhrenreihe; Einzelteile (links) und montiertes Uhrwerk (rechts) .....	141
Abbildung 63: Einordnung der Montage des Uhrwerkbeispiels in die Teilbereiche der Mikromontage.....	142
Abbildung 64: Beschädigung eines Lagers des Uhrwerksträgers durch zu hohe Montagekräfte .....	143

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich von realer, modellbasierter und überlagerter Visualisierung; die Vorteile sind grau hinterlegt.....	45
Tabelle 2:	Einteilung der 48 Probanden des Versuchs zur Bestimmung des Nutzens von haptischem Feedback in vier Gruppen mit unterschiedlicher Rückkopplung der Kräfte .....	79
Tabelle 3:	Vergleich der Möglichkeiten zur Stabilisierung des Regelkreises eines Telepräsenzsystems .....	91
Tabelle 4:	Metrische Teilnutzenwerte verschiedener Eingabegeräte für einen beidhändigen Montageprozess im virtuellen Umfeld .....	99
Tabelle 5:	Metrische Teilnutzenwerte verschiedener Eingabegeräte für einen beidhändigen Montageprozess im virtuellen Umfeld, eingeteilt in unterschiedliche Benutzergruppen.....	100
Tabelle 6:	Vergleich des räumlich-zeitlichen Eingabeverhaltens bei einer bimanuellen Interaktion zwischen einer PHANTOM®-PHANTOM®-Kombination und einer Standardmaus-PHANTOM®-Kombination .....	101
Tabelle 7:	Morphologischer Kasten zur Auswahl eines Gesamtkonzepts für eine Greifeinheit.....	112
Tabelle 8:	Morphologischer Kasten zur Entwicklung eines WYSIWYF-Displays für eine beidhändige Interaktion; positive Merkmale sind grau hinterlegt angezeigt .....	129

## Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
A/D-Wandler	Analog-Digital-Wandler
AFM	Rasterkraftmikroskop (engl. Atomic Force Microscope)
AR	erweiterte Realität (engl.: Augmented Reality)
BBC	britische Rundfunkanstalt (engl. British Broadcasting Corporation)
bspw.	beispielsweise
CAD	computerunterstütztes Konstruieren (engl. Computer Aided Design)
CAIP	Center for Advanced Information Processing (Fakultät der State University of New Jersey, NJ, USA)
CORBA	objektorientierte Middleware zur Erstellung plattformunabhängiger verteilter Computeranwendungen (engl. Common Object Request Broker Architecture)
CRT	Kathodenstrahl-Röhre (engl.: Cathode-Ray Tube)
d. h.	das heißt
DHM	Dextrous Hand Master: Prototyp eines haptischen Eingabegeräts
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNS	Desoxyribonucleinsäure
DOF	Freiheitsgrad (engl. degree of freedom)
E/A	Ein- und Ausgabe
engl.	englisch
e.V.	eingetragener Verein
et al.	et alii

## Formelverzeichnis

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Erklärung</b>
$A_{\dot{U}}$	m	Überschwingamplitude in einem Regelkreis
$c_{GOM}$	$\text{Nm}^{-1}$	Federkonstante für die Berechnung einer Kollisionskraft nach der God-Object-Methode
$D$	m	Greifdistanz
$d_{GOM}$	$\text{kg s}^{-1}$	Dämpfungskonstante für die Berechnung einer Kollisionskraft nach der God-Object-Methode
$d_{vs}$	m	horizontale Verschiebung der Gelenkpunkte einer Zirkelkinematik
$\mathbf{f}_a$	m	Differenzvektor zwischen PHANTOM® und Greifmaster im Weltkoordinatensystem
$F_D$	N	Dämpfungskraft
$f_d$	$\text{kg s}^{-1}$	Dämpfungskonstante
$F_{diff}$	N	Differenz zwischen gemessener und berechneter Kraft
$F_{ist}$	N	gemessene Kraft
$F_K$	N	Kraft aus einer Kollision zweier virtueller Objekte
$F_M$	$\text{s}^{-1}$	Frequenzgang des Menschen als Regler
$F_{mod}$	N	modellbasierte Kraft
$\mathbf{f}_r$	m	Differenzvektor zwischen PHANTOM® und Greifmaster im PHANTOM®-Koordinatensystem
$F_{rend}$	N	durch haptisches Rendering berechnete Kraft
$H$	m	vertikale Verschiebung
$\mathbf{I}$	$\text{kgm}^2$	Massenträgheitstensor
$K$		Verstärkungsfaktor in einem Regelkreis
$K_{diff}$		Proportionalglied zur Umrechnung der Differenzkraft $F_{diff}$ in eine Differenzposition $x_{diff}$
$K_{E1}, K_{E2}$		Proportionalglieder im Eingabegerät

# 1 Einleitung

Im ersten Kapitel wird eine Einleitung in das Thema Produktion und Telepräsenzsysteme gegeben. Außerdem werden das Ziel und die Vorgehensweise dieser Arbeit kurz erläutert.

## 1.1 Die Produktion im Wandel

Handhabungssysteme, wie bspw. Roboter, stellen ein wichtiges Hilfsmittel dar, um eine leistungsfähige Produktion in der heutigen Zeit aufrechterhalten zu können. Sie übertreffen den Menschen vor allem in den Bereichen der Präzision, der Durchführungsgeschwindigkeit und der erreichbaren Maximalkraft. Sie führen ihre Aufgaben immer nach gleichem Programmablauf durch. Dieser Ablauf wird von einem Spezialisten festgelegt und dem Roboter oder Handhabungsautomaten programmiert. Da die Programmierung ein zeitaufwändiger Prozess ist, bei dem in der Regel viele Iterationsschleifen notwendig sind, ist eine Inbetriebnahme dieser Maschinen zeit- und kostenintensiv. Demzufolge eignet sich der Einsatz von Robotern und Handhabungsautomaten meist nur für Großserien. Aufgrund des Trends der letzten Jahre hin zu individualisierten Produkten (vgl. WAGNER et al. 2003) spielen Klein- und Mittelserien heute eine ebenso bedeutende Rolle in der Produktion wie Großserien. Diese Montage in Klein- und Mittelserien erfolgt heute in vielen Produktsparten manuell. Die manuelle Montage stößt jedoch in einigen Bereichen der Produktion auf neue Herausforderungen.

Schon 1998 identifizierte die Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM) die Mikrosystemtechnik als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts (VDE 1998). Die kleinen Dimensionen der Bauteile werfen dabei für den Monteur zwei grundsätzliche Probleme auf. Zum einen ist es für den Menschen schwierig, die winzigen Bauteile zu handhaben, da ein Greifen mit den Fingern oftmals nicht möglich ist oder zu Beschädigungen des Bauteils führen würde. Zum anderen ist es für den Menschen schwierig, die hohen Genauigkeitsanforderungen bei der Mikromontage einzuhalten. Der Monteur muss dann Hilfsmittel benutzen, um die Bauteile mit den eingeschränkten Dimensionen handhaben und fügen zu können. Dabei werden vor allem Lupen und Mikroskope für die Vergrößerung der Sicht auf die Bauteile eingesetzt und Pinzetten,



um die Bauteile aufnehmen zu können, ohne sie zu beschädigen. Aber auch mit diesen Hilfsmitteln stößt der Mensch mit seinen Fähigkeiten an seine Grenzen. Ziel muss es daher sein, die Vorteile von Handhabungssystemen mit denen des Menschen zu koppeln, um so ein optimales Montagesystem zu generieren.

### **1.2 Telepräsenz als Schlüsseltechnologie**

Die Telepräsenztechnologie nutzt die Kopplung zwischen Mensch und Maschine, um ein leistungsfähiges Gesamtsystem aufzubauen. Mit Hilfe der Telepräsenz ist es möglich, den Bediener vom Ort einer umzusetzenden Aufgabe zu trennen. Über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle ist der Bediener mit dem ausführenden Manipulator verbunden. Im Allgemeinen wird dabei zwischen Tele-X-Anwendungen und Telepräsenzsystemen unterschieden.

Tele-X-Anwendungen präsentieren dem Bediener nur einen kleinen Ausschnitt der entfernten Umgebung bspw. in Form eines Videobildes. Dieser Ausschnitt wird meist für Überwachungszwecke genutzt. Über Eingabefenster kann ein eingeschränkter Umfang an Funktionen auf der entfernten Maschine geschaltet werden. Für Tele-X-Anwendungen wird auch oft der Begriff der Fernsteuerung oder Fernwartung verwendet.

Im Gegensatz dazu wird dem Bediener bei Telepräsenzsystemen ein ganzheitlicher Eindruck der entfernten Umgebung übermittelt. Dazu zählt eine immersive Visualisierung, mit der verschiedene Sichten auf den Operationsort möglich sind. Die Interaktion mit den Handhabungssystemen wird mit speziellen Bediengeräten umgesetzt. Durch die Rückkopplung von verschiedenen Signalen bildet sich ein geschlossener Regelkreis zwischen dem Menschen auf der einen und dem Handhabungssystem auf der anderen Seite. Dabei ist es dem Bediener durch die Stimulation der Sinne möglich, sich in der entfernten Umgebung präsent zu fühlen und somit seine Aufgabe lösen zu können, ohne durch die örtliche Trennung eingeschränkt zu sein. In der Literatur findet man neben der Telepräsenz auch die Teleaktion, die die Interaktion in der entfernten Umgebung beschreibt. Da die Präsenz meistens auch das Interagieren beinhaltet, wird in dieser Arbeit von Telepräsenz gesprochen, ohne die Teleaktion auszugrenzen.

Die Trennung von Operationsort und Bediener muss nicht immer zwangsläufig eine rein örtliche Trennung sein. ANTON (2002) teilt Telepräsenzsysteme nach der Art der Barriere zwischen Mensch und Maschine in drei Kategorien ein (siehe *Abbildung 1*):

**Distanz kompensierende Telepräsenzsysteme** überbrücken eine Entfernung zwischen Mensch und Maschine. Diese Entfernung kann im Extremfall über 50 Millionen Kilometer groß sein, wie bei der Exploration des Planeten Mars mit dem Fahrzeug „Path Finder“, das von der Erde aus gesteuert wird (NASA 2005). Die Unzugänglichkeit des Operationsortes ist jedoch meist nicht durch die große Distanz gegeben, sondern durch die Tatsache, dass der Mensch den Operationsort nicht betreten kann. Dies kann durch die Gefährdung des Menschen in der entfernten Umgebung durch gesundheitsschädigende Stoffe, wie bspw. Gifte, radioaktive Strahlung oder Sprengkörper, bedingt sein (HOLL et al. 2004).

**Größen kompensierende Telepräsenzsysteme** überwinden die Barriere der Dimension. Dabei ist vor allem der Mikrokosmos für den Menschen interessant, da er diesen ohne Hilfsmittel nicht erschließen kann. Besondere Aufmerksamkeit widmet der Mensch dem Bereich der Forschung auf Molekularebene (GUTHOLD et al. 2000), der Handhabung winziger Objekte (CODOUREY et al. 1997) und der minimalinvasiven Chirurgie (DEML et al. 2004). Neben der Handhabung von miniaturisierten Objekten spielt die Handhabung von überdimensionalen Bauteilen ebenfalls eine Rolle. Mit den Systemen von TELEROB (2005) werden die schweren Elemente von Schiffsmotoren bearbeitet. Hier wird die Intelligenz des Menschen mit der hohen Arbeitskraft von Robotern kombiniert.

**Zeit kompensierende Telepräsenzsysteme** dienen der Überwindung von zeitlichen Restriktionen. Eine Aufgabe kann so einmal durchgeführt werden und danach beliebig oft abgespielt und erlebt werden. Dieses Vorgehen wird unter anderem in der Medizin eingesetzt, um angehende Chirurgen auszubilden und zu trainieren (CAVUSOGLU 2000).

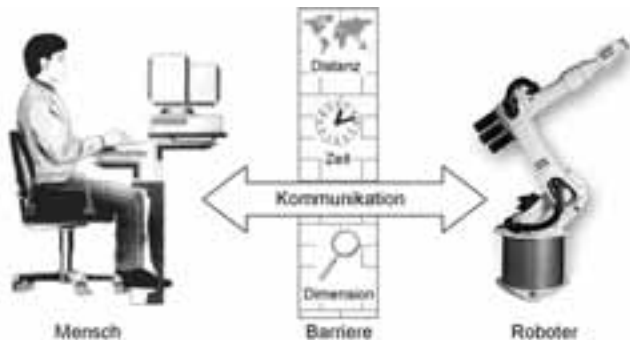


Abbildung 1: Trennung von Mensch und Maschine in einem Telepräsenzsystem

## 1.3 Bedeutung der Telepräsenz für die Produktionstechnik

Für die Produktionstechnik spielt die Telepräsenz eine immer wichtiger werdende Rolle. Durch die Trennung von Operationsort und Bediener bietet diese Technologie neue Möglichkeiten in der Produktion. So können zum einen Manipulatoren gesteuert und überwacht werden, ohne dass der Anwender direkt anwesend sein muss. Der Manipulator kann alle Tätigkeiten übernehmen, die dem Menschen schwer fallen oder für ihn gar unmöglich sind. Zu nennen sind hier zum Beispiel das Heben schwerer Bauteile oder auch das Handhaben von Miniaturbauteilen. Der Mensch unterstützt den Roboter durch Fähigkeiten, welche dieser nicht besitzt, wie bspw. Intelligenz oder Improvisationsvermögen. Roboter und Mensch bilden somit eine hochleistungsfähige Montageeinheit. BULLINGER & FÄHNRIK (1984) bezeichnen solche Systeme als symbiotische Mensch-Maschine-Systeme.

Für die Produktionstechnik sind dabei zwei Einsatzgebiete für Telepräsenzsysteme interessant. Beim Teleservice kann ein Techniker von seinem Einsatzort aus auf Maschinen zugreifen, die sich an einem entfernten Ort befinden. Dabei besteht die Aufgabe des Technikers in erster Linie in der Überwachung der Maschine und nicht in der Steuerung. Mit Hilfe dieses Teleservices ist es möglich, von einem Ort aus mehrere Maschinen an verschiedenen Standorten durch eine Person zu überwachen. Neben dem Warten von Maschinen über eine Entfernung hinweg ist die Mikromontage ein weiteres Anwendungsfeld in der Produktions-

technik. Durch die Verkleinerung der Bauteile ist eine direkte Interaktion zwischen Mensch und Bauteil nicht mehr möglich. Ein Roboter kann hier aufgrund seiner Präzision den Menschen ersetzen. Die hochkomplexen Montagevorgänge sind jedoch aufwändig und daher ist eine Roboter- bzw. Anlagenprogrammierung sehr komplex und zeitintensiv. Für Prototypen, kleine Bauteilserien oder Einzelanfertigungen ist diese Programmierung meist nicht wirtschaftlich. Aus diesem Grund bietet die Zusammenführung von Mensch und Roboter verschiedene Vorteile:

**Schutz vor Verunreinigungen:** Die winzigen Bauteile in der Mikromontage sind sehr empfindlich gegenüber Verunreinigungen. Kleine Staubpartikel können die Funktionalität der einzelnen Bauteile und -gruppen stark beeinträchtigen. Demzufolge werden in der Mikromontage sog. Reinräume eingesetzt, die durch Filterung der Luft eine sehr geringe Anzahl an Fremdpartikeln aufweisen. Der Mensch hingegen gibt im Laufe des Tages eine Menge winziger Partikel ab, wie bspw. Hautschuppen. Auch aus der Kleidung lösen sich kontinuierlich Staub und Stoffflusen. In Reinräumen ist es daher notwendig, dass der Mensch spezielle Kleidung, ein Haarnetz und einen Mundschutz trägt, um die Verschmutzung des Reinraums zu verringern. Mit dem Aufbau eines Telepräsenzsystems muss der Mensch für die Verrichtung seiner Montagetätigkeit den Reinraum nicht betreten. Die Verunreinigung der Bauteile wird ebenso vermindert wie die Auflagen an spezielle Kleidung für den Monteur. Dadurch gestaltet sich das Arbeiten für den Menschen angenehmer.

**Erleichterung der Arbeit:** Eine weitere Verbesserung der Arbeit entsteht durch die Skalierung zwischen Bediener und Roboter mit Hilfe von z. B. Kamerabilddern. Der Mensch ist damit nicht mehr auf die Verwendung von Mikroskopen oder Lupen für die Vergrößerung der Sicht angewiesen. Er kann das Bild auf einem Monitor beliebig groß einstellen. Für die Handhabung kann er ebenfalls auf Pinzetten u. ä. verzichten, da er durch die Trennung vom Operationsort nicht in Kontakt mit den Bauteilen kommt. Demzufolge wird erwartet, dass die Effizienz seiner Arbeit durch ein Telepräsenzsystem gesteigert werden kann. Die Erleichterung der Arbeit mit Hilfe der Telepräsenz kommt einem Trend in der gesellschaftlichen Entwicklung in den Industrieländern zugute. Durch die sehr gute medizinische Versorgung der Bevölkerung und die geringe Geburtenrate besteht die Bevölkerung prozentual aus immer mehr älteren Menschen (ZÄH et al. 2003). Im Alter nehmen sowohl die Sehkraft als auch die sensomotorischen

Fähigkeiten des Menschen ab (LIPPERT 2000). Mit Hilfe der Telepräsenz kann die Mikromontage erleichtert werden, so dass die Umsetzung auch für ältere Menschen möglich ist und so die Produktion trotz demographischen Wandels gesichert werden kann.

**Qualitätsverbesserungen:** Die Qualität der Montage wird zum einen durch die reduzierte Belastung an Partikeln erreicht. Zum anderen bietet ein Telepräsenzsystem eine weitere Möglichkeit der Qualitätskontrolle im Vergleich zur manuellen Montage. Zusätzlich zu der manuellen Qualitätskontrolle können Sensoren am Roboter die auftretenden Kräfte während der Montage überwachen und so exakt feststellen, ob zulässige Maximalkräfte während des Prozesses überschritten wurden.

### 1.4 Aufgabenstellung und Zielsetzung

In den *Abschnitten 1.1 bis 1.3* wurde die Notwendigkeit beschrieben, neue Technologien für die Mikromontage zu entwickeln, um in einer sich wandelnden Gesellschaft und einer fortschreitenden Miniaturisierung von Bauteilen wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Telepräsenz bietet für die manuelle Mikromontage eine Technologie, um den Anforderungen der heutigen Trends gerecht zu werden.

Ein Telepräsenzsystem besteht immer aus den drei Komponenten Bediener mit Eingearbeitsplatz, Roboter mit Sensorik und der Kommunikation zwischen beiden Seiten zur Überwindung der Telepräsenz-Barriere. Für die Mikromontage wurden im Bereich der Automatisierungstechnik schon in einigen Arbeiten Handhabungssysteme evaluiert und optimiert (FATIKOW et al. 2004, HÖHN 2001, JACOB 2002). Auch im Bereich der Sensorik sind aktuelle Arbeiten bekannt (HANKES 1998, SCHILP et al. 2004). Die Entwicklung eines Frameworks für die Kommunikation ist von ANTON (2002) ausführlich behandelt worden. Aus diesem Grund wird sich diese Arbeit auf den Bereich der Eingabeseite konzentrieren. Dort sind so gut wie keine Untersuchungen für den Einsatz in der Mikromontage bekannt. Gerade ist diese Eingabeseite aber ein wichtiger Faktor für die Leistungsfähigkeit eines Telepräsenzsystems. Sie muss dem Bediener alle Möglichkeiten zur Verfügung stellen, die er für die intuitive Steuerung eines entfernten Roboters benötigt. Trotz einer umfassenden Funktionsvielfalt darf die

Eingabeseite keine kognitive Belastung auf den Bediener ausüben, da dieser sonst nicht produktiv arbeiten kann. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Operatorarbeitsplatz zu entwickeln, der für die telepräsenste Mikromontage eingesetzt werden kann. Der Arbeitsplatz muss so konzipiert werden, dass alle benötigten Aufgaben vom Bediener durchgeführt werden können. Die kognitive Belastung für den Bediener darf durch den Arbeitsplatz nicht merklich erhöht werden.

## 1.5 Vorgehensweise

Ausgehend von der in *Kapitel 1* aufgezeigten Ausgangssituation und der Zielsetzung der Arbeit wird in den folgenden Kapiteln die Entwicklung eines Eingabe-arbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage beschrieben und das Ergebnis verifiziert.

In *Kapitel 2* werden wichtige Begriffe für die weitere Arbeit erklärt. Außerdem wird der Stand der Technik beleuchtet, um so einen umfassenden Überblick über die existenten Telepräsenzsysteme und deren Einsatzgebiete zu erhalten. Neben den Telepräsenzsystemen werden weitere Mensch-Maschine-Schnittstellen beleuchtet, um daraus einen optimalen Eingabe-arbeitsplatz für die telepräsenste Mikromontage zu entwickeln.

In *Kapitel 3* werden die Grundlagen beschrieben, die notwendig sind, um eine Mensch-Maschine-Schnittstelle für ein Telepräsenzsystem aufzubauen. Dabei werden die Punkte Visualisierung, Interaktion und Kraftrückkopplung näher beleuchtet.

*Kapitel 4* beschreibt die Entwicklung eines Arbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage. Dabei werden Teilkonzepte für die Bereitstellung der visuellen Informationen und der Rückkopplung von haptischen Signalen an den Bediener erarbeitet. Die auf den Grundlagen aus *Kapitel 3* aufbauenden Teilkonzepte werden anhand von eigenen Untersuchungen verifiziert.

In *Kapitel 5* wird die Kombination einzelner Teilsysteme aus dem *Kapitel 4* zu einem Gesamtsystem erläutert.

In *Kapitel 6* wird das entwickelte System anhand eines Anwendungsbeispiels aus der Mikromontage verifiziert. Evaluiert wird, ob das Telepräsenzsystem geeignet ist, Prozesse in der telepräsenten Mikromontage durchzuführen.

In *Kapitel 7* werden die Kerninhalte dieser Arbeit zusammenfassend dargestellt und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsziele gegeben.

## 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Begriffe definiert, die für Telepräsenzsysteme in den letzten Jahren geprägt wurden. Des Weiteren werden bestehende Arbeiten zu Telepräsenzsystemen aus verschiedenen Bereichen vorgestellt. Aus diesen wird der Handlungsbedarf für die eigenen Arbeiten abgeleitet.

### 2.1 Manuelle Mikromontage

Der Montageprozess wird nach der Richtlinie VDI 2815 (1978) als der Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen in der Fertigung beschrieben. Dabei wird die Montage in die Teilprozesse Handhaben und Fügen unterteilt.

In der Richtlinie VDI 2860 (1990) ist der Begriff Handhaben als das Schaffen, das definierte Verändern oder das vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem definiert. Die räumliche Anordnung eines Körpers in einem Bezugskoordinatensystem ergibt sich aus seinen sechs Freiheitsgraden der Bewegung.

Fügen wird in der DIN-Norm 8580 (DIN 8580 2003) als ein auf Dauer angelegtes Verbinden oder sonstiges Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken geometrisch bestimmter fester Form oder von eben solchen Werkstücken mit formlosem Stoff definiert. Dabei wird der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt. In der DIN-Norm 8593 (DIN 8593 2003) werden die wichtigsten Fügeverfahren definiert. Diese sind das Zusammensetzen, das Füllen, das Ein- und Anpressen, das Fügen durch Urformen, das Fügen durch Umformen, das Schweißen, das Löten, das Kleben und das textile Fügen.

Die Mikromontage definiert sich durch die Montage von Bauteilen, die besonders kleine Abmessungen besitzen und deren Montagegenauigkeit sehr hoch sein muss. REINHART & HÖHN (1999) definieren dabei drei verschiedene Unterbereiche der Mikromontage: Die Mikromontage, die Präzisionsmontage und die Mikropräzisionsmontage (vgl. *Abbildung 2*).



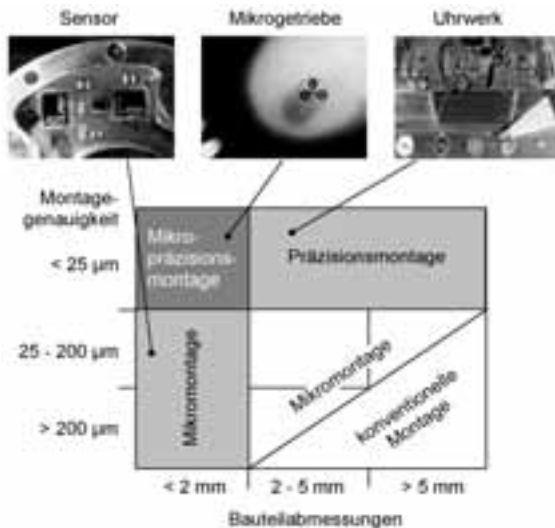


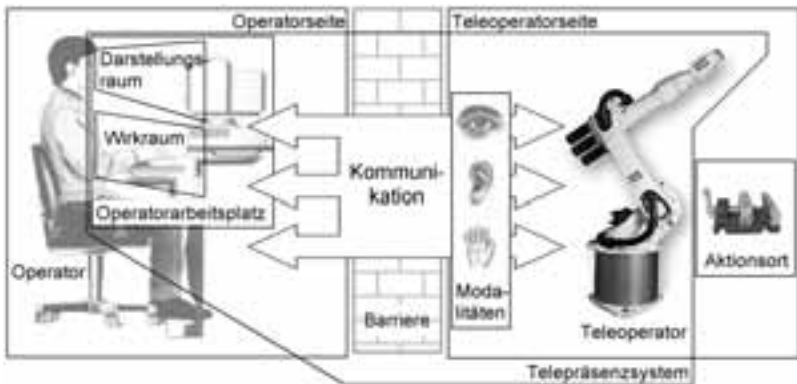
Abbildung 2: Einteilung der Mikromontage in Teilbereiche nach REINHART & HÖHN 1999

Typische Anwendungen in der Mikromontage sind die Bestückung von Elektronik-Platinen, die Montage von Kleinstbauteilen, wie bspw. ein Mikrogetriebe, und das hochgenaue Fügen empfindlicher Bauteile.

Im Gegensatz zur automatisierten Mikromontage wird die manuelle Mikromontage von einem menschlichen Bediener durchgeführt. WESTKÄMPER et al. (1998) beschreiben, dass die Automatisierung von Mikromontageprozessen unumgänglich ist, um eine kosteneffiziente Produktion mit ausreichender Qualität zu erreichen. Für Großserien in der Mikromontage wird deshalb ausschließlich die automatisierte Montage eingesetzt. Ein großer Teil der Mikromontage besteht jedoch aus Klein- und Mittelserien mit Stückzahlen unter 100 Stück pro Tag (THOBEN 1999). Das Bestreben nach Automatisierung dieser geringen Stückzahlen stößt auf eine Vielzahl von Herausforderungen, die noch gelöst werden müssen (GENGENBACH 1998, SCHÜNEMANN et al. 1998). Aus diesem Grund bleibt die manuelle Mikromontage weiterhin ein wichtiger Bestandteil der Produktion.

## 2.2 Begriffsdefinitionen für Telepräsenzsysteme

Die ersten Begriffe im Bereich Telepräsenz wurden vor über 50 Jahren geprägt (vgl. SHERIDAN 1992a) und seit dieser Zeit verschieden interpretiert und erweitert. Für ein einheitliches Verständnis der Arbeit sollen im folgenden Abschnitt die wichtigsten Begriffe der Telepräsenz erläutert werden. In *Abbildung 3* sind die Begriffe skizziert und werden sie im Anschluss erklärt.



*Abbildung 3: Begriffsdefinition der einzelnen Komponenten eines Telepräsenzsystems*

**Telepräsenz:** Telepräsenz bezeichnet das Gefühl des Operators, in einer entfernten Umgebung präsent zu sein. Das Präsenzepfinden wird nach STEUER (1995) durch sensorielle Reichhaltigkeit und den Grad der Interaktivität beeinflusst. Demzufolge beinhaltet dieser Begriff gleichzeitig die Teleaktion. Die Telepräsenz hebt sich somit von der Fernsteuerung von Maschinen ab, bei der kein Präsenzepfinden vorliegt.

**Tele-X:** Tele-X-Anwendungen präsentieren dem Bediener nur einen kleinen Ausschnitt der entfernten Umgebung, ohne dabei ein Präsenzepfinden für den Bediener zu vermitteln. Tele-X wird hauptsächlich verwendet, um entfernte Maschinen zu überwachen. Für Tele-X-Anwendungen wird auch oft der Begriff der Fernsteuerung oder Fernwartung verwendet.

**Telepräsenzsystem:** Ein Telepräsenzsystem umfasst den gesamten Aufbau inklusive Software, die notwendig ist, um eine telepräsenste Aufgabe zu lösen. Weder der menschliche Bediener noch die zu manipulierenden Objekte sind Teil eines Telepräsenzsystems.

**Telepräsenzbarriere:** Sie stellt das Hindernis dar, das mittels eines Telepräsenzsystems überwunden werden soll. Die Barriere kann durch Distanz, Zeit oder Größenunterschied hervorgerufen werden (vgl. *Abschnitt 1.3*).

**Operator:** Der Operator bezeichnet den menschlichen Bediener eines Telepräsenzsystems.

**Operatorseite:** Auf der Operatorseite befindet sich der Operator mit seinen Eingabegeräten. Der Begriff umschließt dabei sowohl den Menschen als auch seinen Arbeitsplatz mit allen Geräten. Die Operatorseite wird in der Literatur oft auch als Master-Seite bezeichnet.

**Teleoperator / Manipulator:** Die Handhabungsgeräte auf der dem Operator nicht zugänglichen Seite werden als Teleoperator oder auch Manipulator bezeichnet. Sie führen die Handhabungsaufgabe aus, die der Operator vorgibt. In der Literatur ist auch der Begriff „Slave“ für den Teleoperator gebräuchlich.

**Teleoperatorseite / Remote-Umgebung:** Dies ist der Ort, an dem die Roboter für die telepräsenste Operation stehen. Er ist meist für den Operator nicht direkt zugänglich. Im Vergleich zum Teleoperator beinhaltet die Teleoperatorseite die komplette Arbeitsumgebung des Teleoperators, also auch Vorrichtungen, Sensoren und alle Objekte in erreichbarer Umgebung des Teleoperators.

**Aktionsort / Montageort:** Am Aktionsort wird vom Manipulator die eigentliche Aufgabe ausgeführt. Im Vergleich zur gesamten Teleoperatorseite werden in diesem Begriff nur die zu manipulierenden Objekte ohne die Aufbauten um diese Objekte herum zusammengefasst.

**Modalitäten:** Modalitäten bezeichnen im Zusammenhang mit Telepräsenzsystemen die verschiedenen Sinne des Menschen, die unterstützt werden. Von den fünf klassischen Modalitäten Video (Sehsinn), Audio (Hörsinn), Haptik (Tast-sinn), Olfaktorik (Geruchssinn) und Gustatorik (Geschmackssinn) sind heute in fast allen Fällen nur die ersten drei für Telepräsenzsysteme relevant.

**Multimodalität:** Unter Multimodalität wird die gleichzeitige Stimulierung verschiedener Sinne des Menschen verstanden. Für die Telepräsenz sind dies in erster Linie Video, Audio und Haptik.

**Haptik:** Die Haptik bezeichnet im Deutschen alles, was den menschlichen Tastsinn betrifft (MEYERS 1995). Die Haptik teilt sich dabei in die Kinästhetik und die Taktilität auf. Die Kinästhetik umfasst die propriozeptiven Sinneswahrnehmungen wie Lage und Bewegung des eigenen Körpers. Durch sie nimmt der Mensch Kräfte auf. Mit der taktilen Sinneswahrnehmung ist es dem Menschen möglich, Vibrationen und Temperatureinflüsse zu erkennen. Meist wird der Überbegriff Haptik stellvertretend für die Kinästhetik verwendet, da die Taktilität in vielen Anwendungsfällen keine besondere Rolle spielt. In dieser Arbeit soll der Begriff Haptik aus Gründen der Konformität zu ähnlichen Arbeiten ebenfalls stellvertretend für die Kinästhetik verwendet werden.

**Mensch-Maschine-Interaktion:** *„Bei der Mensch-Maschine-Interaktion bilden Mensch und Maschine zwei Einheiten, die sich gegenseitig beeinflussen. Die Aktionen des Menschen werden dabei als Handeln bezeichnet. Das Gegenteil zur Mensch-Maschine-Interaktion, die bilateral stattfindet, bildet die einseitig ablaufende Stapelverarbeitung“* (CHARWAT 1994).

**Eingabegeräte:** Für die Mensch-Maschine-Interaktion werden Eingabegeräte benötigt, die das menschliche Handeln in digitale Signale umwandeln und somit für den Teleoperator in einen verwertbaren Zustand bringen. Eine spezielle Art der Eingabegeräte sind kraftrückkoppelnde Eingabegeräte, sog. Force-Feedback-Geräte. Ihre Funktion ist nicht nur auf die Eingabe beschränkt, sondern sie geben auch Daten in Form von Kräften und Momenten an den Bediener aus. Streng genommen sind sie Ein- und Ausgabegeräte, werden aber in der Literatur, wie auch in dieser Arbeit, als haptische Eingabegeräte bezeichnet.

**Darstellungsraum:** Der Darstellungsraum ist der Ort, an dem ein Bild für den Menschen sichtbar ist. Bei zweidimensionalen Medien, wie bspw. Monitor oder Papier, entspricht das Medium dem Darstellungsraum. Bei stereoskopischen Visualisierungen ist der Darstellungsraum dreidimensional ausgeprägt und liegt zwischen Mensch und Visualisierungsmedium.

**Wirkraum:** Der Wirkraum wird durch den Bereich definiert, der von den Händen des Bedieners für die Interaktion verwendet wird. In der Mensch-Maschine-

## 3 Grundlagen einer Mensch-Maschine-Schnittstelle

In diesem Kapitel werden die Grundlagen beschrieben, deren Kenntnis notwendig ist, um einen Operatorarbeitsplatz für die telepräsenste Mikromontage zu entwickeln. Dazu werden die Visualisierung und die Mensch-Maschine-Interaktion als Kernthemen näher betrachtet.

### 3.1 Visualisierung

#### 3.1.1 Visualisierungsmedium

Die Rückkopplung von Informationen an den Bediener kann in verschiedenen Modalitätskanälen geschehen. Die wichtigste Modalität ist dabei die visuelle Wahrnehmung des Menschen, da dieser den größten Teil seiner Umgebung über die Augen erfasst. Die Visualisierung entscheidet in erster Linie über den Immersionsgrad eines Systems, also wie stark das Präsenzgefühl des Bedieners in der abgebildeten Welt ausgeprägt ist. Es wird zwischen dem Visualisierungsmedium und der Visualisierungsart unterschieden. Das Visualisierungsmedium ist das Gerät, auf dem Bildinformationen für den Bediener dargestellt werden. Die Visualisierungsart beschreibt, wie die Bildinformationen erzeugt werden. Diese können entweder von einer Kamera aufgenommen werden (Realbild-Visualisierung), mit Hilfe eines Modells berechnet werden (modellbasierte Visualisierung) oder es kann beides gleichzeitig geschehen (überlagerte Visualisierung).

Das Spektrum an Visualisierungsmedien ist groß. Die einfachsten und kostengünstigsten Lösungen sind Monitore. Sie lassen allerdings nur einen geringen Grad an Immersion für den Benutzer zu. Die größten Visualisierungssysteme werden im Bereich *Virtual Reality* (VR) eingesetzt. Bei VR-Anwendungen ist eine hochimmersive Darstellung der virtuellen Welt notwendig, um so dem Bediener ein starkes Präsenzgefühl zu vermitteln. Dieser hohe Immersionsgrad wird durch eine Verwendung von mehrseitigen Projektionsflächen erreicht. Eine *CAVE* ist ein Raum, in dem bis zu sechs Projektionsflächen aufgebaut sind, so dass der Bediener einer solchen *CAVE* die virtuelle Umgebung in allen Blickrichtungen wahrnehmen kann (CRUZ-NEIRA et al. 1993). Durch die Bestimmung der

Kopfposition des Bedieners durch das VR-System, das sog. *Head Tracking*, kann der Bediener seinen Blickpunkt in der virtuellen Welt intuitiv anpassen.

Um den Immersionsgrad noch zu steigern, werden für VR-Anwendungen stereoskopische Visualisierungen eingesetzt. Dabei wird bei der Darstellung des Bildes der Augenversatz zwischen linkem und rechtem Auge, die sog. Parallaxe, berücksichtigt. Der Bediener nimmt bei einem stereoskopischen Display genau wie in der Realität zwei unterschiedliche Bilder auf. Aus der getrennten Bildinformation erstellt das menschliche Gehirn eine dreidimensionale Szene, die räumlich wirkt. Dadurch kann der Bediener Tiefeninformationen eines Bildes wahrnehmen, was mit einer monoskopischen Darstellung nicht möglich ist. Es wird grundsätzlich zwischen aktiver und passiver Stereoskopie unterschieden. Bei der aktiven Stereoskopie werden die Bildinformationen von einer Brille, die der Bediener trägt, getrennt. Die Bildinformationen beim passiven Stereo werden direkt vom Visualisierungsmedium durch bspw. Polarisation getrennt.

Der Platzbedarf und die Investitionskosten für Mehrseitenprojektionen sind sehr hoch. Als Visualisierungsinstrument für einen einzelnen Arbeitsplatz sind sie daher nicht geeignet. Hochimmersive Einzelplatzlösungen bieten *Head Mounted Displays* (HMDs). Diese Visualisierungssysteme mit einem Bildschirm für jedes Auge werden auf dem Kopf getragen und bieten dem Bediener ebenfalls eine stereoskopische Darstellung. Durch die Positionsverfolgung des Kopfes, das sog. *Head Tracking*, wird eine freie Blickpunkteinstellung auf die Szene durch Kopfbewegungen ermöglicht. Kopffeste Visualisierungssysteme eignen sich nicht für einen längeren Einsatz, da sie zum einen durch ihr Gewicht auf die Halswirbelsäule und die Nackenmuskulatur des Benutzers drücken und zusätzlich zu Schwindel und Übelkeit, der sog. *Simulation Sickness*, führen (HETTINGER & RICCIO 1992). Eine weitere Möglichkeit, eine stereoskopische Visualisierung für einen Einzelarbeitsplatz einzusetzen, sind autostereoskopische Displays. Diese Monitore trennen die Bildinformation für das linke und rechte Auge durch Linsenmasken (BERKEL & CLARKE 1997) oder Prismenmasken (SCHWERDTNER & HEIDRICH 1998). Der Bediener benötigt weder eine Shutterbrille wie beim Aktivstereo noch eine Polarisationsbrille. Entscheidend für die Immersion ist jedoch nicht allein das Visualisierungsmedium, sondern auch die Erzeugung und Qualität des Bildes, das auf dem Medium gezeigt wird. Dazu kann entweder ein reales Bild von einer Kamera dargestellt werden oder ein Bild aus 3D-Modellen berechnet werden.

### 3.1.2 Realbild-Visualisierung

Die meisten Telepräsenz Anwendungen verwenden für ihre Visualisierung ein Bild, das von einer oder mehreren Kameras aufgenommen und dem Bediener über einen Monitor ausgegeben wird. Diese Art der Visualisierung wird so häufig eingesetzt, weil sie ohne hohen Aufwand realisierbar ist und ein gewohntes Bild der Remote-Umgebung liefert. Gerade für die Exploration von unbekanntem, meist unstrukturierten Umgebungen liegen keine Modelle der Teleoperatorseite vor, so dass die Realbild-Visualisierung die einzige Lösung für die Darstellungsart bietet

Die Aufnahme des Bildes erfolgt in der Regel über digitale Kameras, die über den *Universal Serial Bus* (USB) oder den Standard *FireWire* mit einer Recheneinheit verbunden sind (WICKELGREN 1997). Obwohl seit einigen Jahren Kameras mit einer Auflösung von einem Megapixel erhältlich sind, werden viele Systeme noch mit Kameras mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixel ausgestattet. Die Qualität des Bildes hängt jedoch nicht ausschließlich von der Anzahl der Pixel ab, sondern wird durch weitere Faktoren bestimmt. Eine annehmbare Helligkeit und ein angemessener Kontrast können mittels einer guten Beleuchtung der Remote-Umgebung oder durch eine digitale Veränderung des aufgenommenen Bildes erreicht werden. Dabei muss jedoch bei metallischen Oberflächen darauf geachtet werden, dass durch die Beleuchtung keine Reflexionen entstehen, die den Kontrast des Bildes verschlechtern.

Für die Mikromontage ist es nicht ausreichend, eine konventionelle Digitalkamera zur Bildaufnahme zu verwenden. Aufgrund der kleinen Abmessungen der Bauteile müssen hoch auflösende Kameras mit Spezialoptiken eingesetzt werden. Die kleinen Bauteilabmessungen und der geringe Abstand zwischen der Kamera und der Bildebene bewirken eine hohe Unschärfe und eine starke Verzerrung der Objekte, die nicht in der Bildebene liegen. Durch Verwendung eines telezentrischen Objektivs verlaufen die Hauptstrahlen im Objektraum parallel (ECKERL & PRENZEL 1994, HENTSCHEL & MÜLLER 1997). Objekte auch außerhalb der Bildebene werden unverzerrt abgebildet (vgl. *Abbildung 9*). Die Tiefenunschärfe wird dadurch allerdings nicht beseitigt. Objekte in verschiedenen Bildebenen können nur durch Umfokussieren scharf abgebildet werden (vgl. HÖHN 2001).

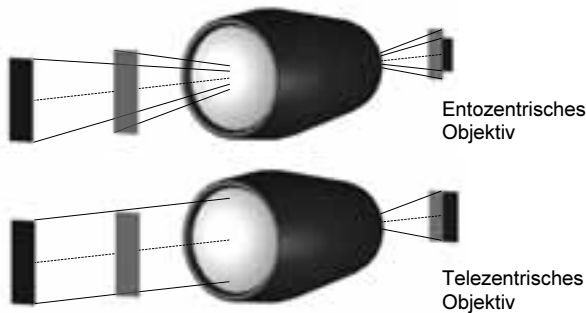


Abbildung 9: Zentralperspektivisch verzerrte und telezentrische Abbildung von Objekten in verschiedenen Bildebenen (HÖHN 2001)

In Abschnitt 3.1.1 wurde beschrieben, dass für immersive Visualisierungen stereoskopische Darstellungen des Bildes verwendet werden. Um zwei verschiedene Bilder dem Bediener zeigen zu können, müssen zwei Bilder aufgenommen werden. Demzufolge sind zwei identische Kameras notwendig, die mit einem definierten Versatz nebeneinander aufgebaut sind. Die Kameras müssen dabei auf den Fokuspunkt ausgerichtet sein. Ist dieser Punkt variabel, wie in der Mikromontage, müssen die Kameras in ihrer Ausrichtung verstellbar sein. In *Abbildung 10* sind die Zusammenhänge zwischen stereoskopischer Darstellung und dem Einsatz von zwei Kameras zur Bildaufnahme skizziert (BAIER et al. 2001). Diese aufwändigen Aufbauten sind für die Mikromontage zu groß, um sie sinnvoll einsetzen zu können. Die fehlenden Informationen der Raumtiefe werden deswegen durch den Aufbau von mehreren, aus verschiedenen Winkeln auf die Szene blickenden Kameras gewonnen. Je mehr Kameras auf der Teleoperatorseite installiert werden, desto größer ist die Menge an Daten, die auf die Operatorseite übertragen werden muss. Mit deren Zunahme sinkt jedoch zum einen die mögliche Bildwiederholfrequenz und es steigt auch die Übertragungszeit der Bilddaten an den Bediener. Dieser Effekt senkt die Stabilität des Telepräsenz-Regelkreises und somit die Immersion des Bedieners. Um dies zu vermeiden, gibt es verschiedene Möglichkeiten, um die Datenmenge zu verkleinern. Ein farbiges Bild wird im Rot-Grün-Blau-(RGB)-Format durch 24 Bits pro Bildpunkt repräsentiert. In diesem Format hat ein Bild mit der Größe von einem Megapixel ein Datenaufkommen von 24 MegaBit.



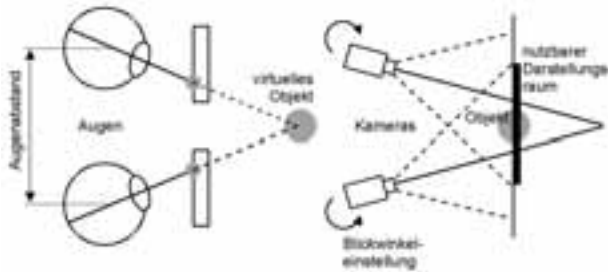


Abbildung 10: Kamerasystem zur Aufnahme von stereoskopischen Realbildaufnahmen (BAIER et al. 2001)

Jedes Bild enthält jedoch Informationen, die für seine Repräsentation nicht notwendig sind. Diese Information wird als Redundanz bezeichnet. Zusätzlich enthält jedes Bild Bestandteile, die vom Betrachter entweder nicht wahrgenommen werden können oder für ihn nicht von Interesse sind. Diese irrelevanten Informationen werden als eine psycho-visuelle Redundanz definiert. Durch die Entfernung der Redundanzen kann die Größe des Bildes erheblich verkleinert werden. Der Faktor der Verkleinerung ist dabei abhängig von der Entropie der Bildinformation, der gewählten Algorithmen und der gewünschten Qualität. Während die Qualität und die Algorithmen verändert werden können, ist die Entropie nur abhängig von dem aufgenommenen Bild. Sie stellt die Ordnung in einem Bild dar. Ein Bild, das nur aus einer einzigen Farbe besteht, kann am besten komprimiert werden. Die Entropie eines solchen Bildes ist gleich null. Je höher die Anzahl der Farben in einem Bild und je ungeordneter die Verteilung dieser Farben ist, desto höher ist die Entropie und geringer die Kompressionsmöglichkeit. Wird die Bildqualität nicht beeinträchtigt, wird dies als Kodierung bezeichnet, bei einer Verminderung der Qualität als Kompression eines Bildes. Qualitätsverluste, die bei der Kompression entstehen, sind irreversibel. Für statische Bilder ist die jpeg-Komprimierung die am häufigsten eingesetzte. Für Bildsequenzen wurde 1993 der internationale Standard MPEG-1 verabschiedet (ISO / IEC 11172 1993). Ihm folgte drei Jahre später der internationale Standard MPEG-2 (ISO / IEC 13818 1996). Die hohe Kompressionsrate von MPEG-2 wird durch die Komprimierung von mehreren Bildern (=Frames) zu einem Paket erreicht. Da bei der MPEG-2-Komprimierung mehrere Frames zu einem Datenpaket zusammengefasst werden, ergibt sich zusätzlich zur Komprimierungszeit noch eine weitere Verzögerung in der Bilddatenübertragung. Zusätzlich zu Bildinformationen können mit

## 4 Teilkonzepte für einen Operatorarbeitsplatz

In diesem Kapitel werden Teilkonzepte für die Visualisierung und die Interaktion entwickelt. Diese bauen auf den beschriebenen Grundlagen aus *Kapitel 3* auf und werden anhand von Experimenten validiert.

### 4.1 Bestimmung einer geeigneten Form der Visualisierung

#### 4.1.1 Vorgehen zur Auswahl einer Visualisierungsart

Grundsätzlich sind drei verschiedene Visualisierungsarten für Telepräsenzsysteme bekannt. Diese sind, wie im *Abschnitt 3.1* beschrieben, die Realbild-Visualisierung, die modellbasierte Visualisierung und die Überlagerung der beiden. Der Vergleich der drei Varianten in *Tabelle 1* auf Seite 45 zeigt, dass ein Bild, welches aus einem Modell erzeugt wurde, viele Vorteile im Vergleich zu einer Realbild-Visualisierung aufweist. Eine modellbasierte Lösung kann jedoch nicht für alle Telepräsenzsysteme eingesetzt werden, da zum einen ein sehr genaues Modell der Remote-Umgebung existieren muss und zum anderen dieses Modell zu jeder Zeit mit der Realität übereinstimmen muss. Aus diesen zwei Gründen wird in den meisten Telepräsenzsystemen ein reales Bild zur Darstellung eingesetzt.

In der Mikromontage ist die Remote-Umgebung vollständig bekannt und in vielen Fällen liegt diese, ebenso wie die einzelnen Bauteile, als 3D-CAD-Modelle vor. Der Aufwand, eine modellbasierte Visualisierung einzusetzen, wäre somit geringer als bei anderen Einsatzbereichen. Aufgrund der kleinen Abmessungen und der hohen Montagegenauigkeiten ergeben sich sehr hohe Anforderungen an die Synchronisation zwischen Modell und Realität. Es sind keine Ergebnisse aus anderen Forschungsarbeiten bekannt, welche die Machbarkeit einer modellbasierten Visualisierung für die Mikromontage untersuchen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Versuch umgesetzt, mit dem herausgefunden werden sollte, ob eine modellbasierte Visualisierung für die Mikromontage möglich und praktikabel ist. Dieser Versuch ist in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 4.1.2 Versuchsvorbereitung

Das Hauptziel bei dem Experiment war, eine Aussage darüber zu treffen, ob die modellbasierte Visualisierung eine bessere Ausführung von manuellen Mikromontageprozessen ermöglicht. Die Qualität der Mikromontage wird dabei durch mehrere Faktoren definiert:

**Produktivität:** Das erste Qualitätsmerkmal ist die Zeit, in der eine Mikromontageaufgabe gelöst werden kann. Je schneller eine Tätigkeit durchgeführt werden kann, desto höher ist die Produktivität. Je intuitiver das System ist, desto schneller wird die maximale Produktivität erreicht.

**Qualität:** Da es sich in der Mikromontage um hochsensible Bauteile handelt, sind die auftretenden Montagekräfte ebenfalls ein wichtiges Merkmal für die Montagequalität. Je geringer die Abweichung der tatsächlichen Montagekräfte von den gewünschten Kräften ist, desto höher ist die erreichte Qualität der umgesetzten Montage.

**Ergonomie:** Bei Montagetätigkeiten ist der Mensch auch ein zentraler Bestandteil. Je schwieriger eine Aufgabe für den Menschen ist, desto höher ist die Belastung bei der Lösung dieser Aufgabe. Je höher also die physische und psychische Belastung für den Menschen ist, desto mehr nimmt seine Arbeitsleistung im Laufe seiner Beschäftigungsdauer ab.

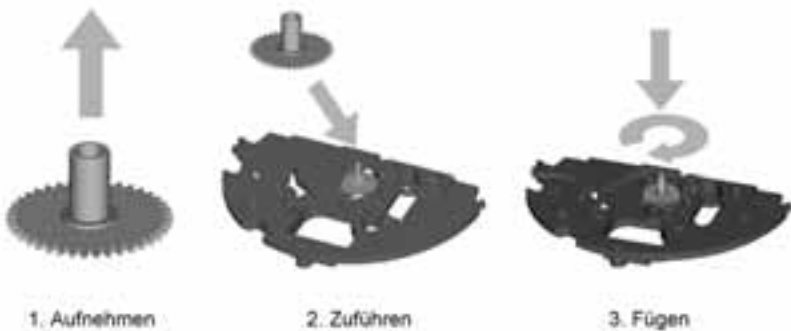
Daraus wurden die drei Hypothesen für den Versuch abgeleitet:

1. Aufgrund der höheren Bildqualität und erweiterten Funktionalitäten ist die modellbasierte Visualisierung besser geeignet als die Realbild-Visualisierung. Die durchschnittliche Zeit, Montageaufgaben auszuführen, ist demzufolge kleiner als bei einer Realbild-Visualisierung.
2. Bei einer modellbasierten Darstellung steigt die Qualität der Durchführung. Die am Bauteil auftretenden Maximalkräfte und auch die gemittelten Kräfte sind bei einer modellbasierten Visualisierung geringer.
3. Der Bediener zieht aufgrund der besseren Bildqualität eine virtuelle Umgebung einem Realbild vor.

Im Folgenden wird ein Versuch beschrieben, welcher der Überprüfung der Hypothesen dient.

### 4.1.3 Versuchsdurchführung

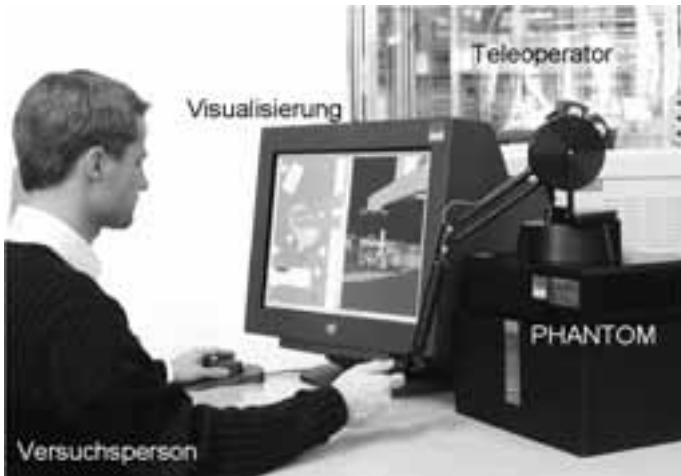
Der Vorgang eines Montageprozesses gliedert sich in zwei grundsätzliche Aufgabenbereiche. Zum einen besteht die Montage aus der Handhabung von Bauteilen, zum anderen aus dem Fügen von Bauteilen. Aus diesem Grund wurde eine zweistufige Aufgabe gewählt. Zuerst sollte ein Bauteil aufgenommen werden, der Montagestelle zugeführt und dann in eine Baugruppe eingefügt werden. Für den Versuch wurde ein Miniaturuhrwerk ausgewählt, bei dem das Stundenrad auf das Minutenrad aufgesteckt werden musste (vgl. *Abbildung 26*). Der Durchmesser beider Bauteile betrug 3 mm, der Durchmesser der Achsen 100  $\mu\text{m}$ . Die Positionsgenauigkeit lag bei 20  $\mu\text{m}$ .



*Abbildung 26: Montageprozess beim Aufsetzen des Stundentriebs auf den Minutentrieb eines Miniaturuhrwerks*

Als Teleoperator diente ein SCARA-Roboter der Firma Bosch. Der Endeffektor wurde mit einem Miniaturbackengreifer ausgerüstet, der pneumatisch geöffnet und geschlossen werden konnte. Am Greifer war ein Kraft- und Momentsensor angebracht, um die auftretenden Montagekräfte zu messen. Über dem Greifer war eine Kamera mit Spezialoptik angebracht, die vom Roboter mitgeführt wurde und einen Blick aus der Vogelperspektive auf den Montageort ermöglichte. Zusätzlich wurde eine statische Kamera auf der Teleoperatorseite angebracht, die eine Seitenansicht auf die Montagestelle zur Verfügung stellte. Beide Kameras waren Schwarz-weiß-Kameras mit einer Auflösung von 720 x 576 Pixel. Für die Darstellung der Bilder wurde auf der Operatorseite ein Monitor verwendet, auf

dem beide Bilder nebeneinander eingeblendet wurden. Für die modellbasierte Visualisierung wurden ebenfalls zwei Bilder generiert. Die Positionen, aus denen der Bediener auf die Szene blickte, wurden dabei so eingestellt, dass sie exakt den realen Kamerapositionen auf der Teleoperatorseite entsprachen. Da nur die Visualisierung im Vordergrund stand, wurden alle Funktionalitäten, die ein modellbasiertes System zusätzlich leisten kann, nicht aktiviert. Für die Steuerung des Teleoperators wurde ein PHANTOM® Premium 1.5/6DOF der Firma SensAble eingesetzt. *Abbildung 27* zeigt den Verfasser als Versuchsperson bei der Durchführung des Experiments.



*Abbildung 27: Versuchsaufbau zur Bestimmung einer geeigneten Visualisierung für ein Telepräsenzsystem in der Mikromontage*

Der Greifer am Teleoperator konnte über die Tastatur geöffnet und geschlossen werden. Die am Greifer auftretenden Kräfte wurden vom Kraftsensor gemessen und dem Bediener über das PHANTOM® ausgegeben. Um die empfindlichen Bauteile und Sensoren nicht zu beschädigen, wurde der Bediener durch eine aktive Kraft über das PHANTOM® am Überschreiten von definierten Kraftwerten gehindert. Da der Arbeitsraum des SCARA-Roboters nicht mit dem PHANTOM® abgedeckt werden konnte, wurde die *Indexing-Metapher* (vgl. *Abschnitt 3.2.8*) eingesetzt. So konnte durch das Drücken der Taste auf dem

PHANTOM®-Stift die Verbindung zwischen Operator und Teleoperator unterbrochen und das PHANTOM® neu positioniert werden. Um die Kraft- und Positionswerte zwischen Operator- und Teleoperatorseite schnell und zuverlässig austauschen zu können, wurde ein mehrschichtiges Telepräsenz-Framework, aufbauend auf der Middleware CORBA, für den Versuch eingesetzt (ANTON 2002, MALINOWSKI 1998).

Für die Versuchsdurchführung wurden 60 Personen aus dem technischen Bereich mit vergleichbarer akademischer Bildung ausgewählt. Die Anzahl der Versuchspersonen wurde so hoch gewählt, um eine Stichprobe an Personen zu erhalten, die zu einem signifikanten Versuchsergebnis führte. Keine der Testpersonen hatte Erfahrung mit Telepräsenzsystemen, virtuellen Umgebungen oder dem Eingabegerät PHANTOM®. Die Testpersonen wurden in zwei Gruppen (Realbild- und Modell-Gruppe) mit je 30 Personen eingeteilt. Die erste Gruppe führte den Versuch mit Realbildübertragung durch, die zweite mit modellbasierter Visualisierung. Jede Versuchsperson musste den Montageprozess dreimal wiederholen. Dabei wurden bei jedem Durchgang die Zeit und die Kräfte, die auf die Bauteile beim Montageprozess wirkten, gemessen und aufgezeichnet. Nach den Versuchsdurchläufen wurde der subjektive Eindruck der Versuchspersonen bezüglich des Systems ermittelt. Dazu wurde ein international anerkannter Fragebogen für Telepräsenzsysteme nach WITMER & SINGER (1998) verwendet (siehe *Anhang 10.1*).

### 4.1.4 Versuchsauswertung

Die Auswertung der Montagezeiten ergibt, dass die modellbasierte Visualisierung zu einer schnelleren Umsetzung der Aufgabe führte. Die Probanden der Realbild-Gruppe benötigten beim ersten Versuchsdurchlauf im Durchschnitt 50 % mehr Zeit, als die andere Gruppe. Dazu waren 16 % der Realbild-Gruppe nicht in der Lage, beim ersten Durchgang die Aufgabe in einer angemessenen Zeit zu vollenden. Bei der Modell-Gruppe lag der Anteil dagegen nur bei 3 %. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit  $p$  liegt unter 1 % ( $p < 0,01$ : sehr signifikant). Es ist somit belegt, dass es sich bei den Ergebnissen der Versuchsauswertung dieser Stichprobe um sehr signifikante Ergebnisse handelt. Beim dritten Durchgang benötigten die Testpersonen der Realbild-Gruppe nur noch 50 % der Zeit des ersten Durchgangs. Da für alle Personen der Versuchsaufbau unbekannt war, zeigt der Verlauf die Lernkurve der Probanden. Beim dritten Durchgang benötigte die Realbild-Gruppe im Durchschnitt noch

## 5 Gesamtkonzept

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln zusammengeführt und ein Gesamtkonzept für einen telepräsenten Operatorarbeitsplatz entwickelt.

### 5.1 Anforderungen aus den Teilkonzepten

In *Abschnitt 3.1* wurde anhand eines Experiments gezeigt, dass für die telepräsente Mikromontage eine modellbasierte Visualisierung eine Reihe von Vorteilen gegenüber der Realbildarstellung bringt. Diese sind vor allem eine flexible Blickwinkleinstellung und die bessere Bildqualität. Beide Punkte wurden auch von den Testpersonen des Experiments zur Kampfmittelbeseitigung gewünscht. Dabei wird die stereoskopische Visualisierung bevorzugt, da sie mehr Tiefeninformationen enthält als die monoskopische. Schwere HMDs, die einen vollimmersiven Eindruck der visualisierten Umgebung vermitteln, sind dabei aufgrund der langen Arbeitsperioden nicht geeignet. Die Interaktion für das Telepräsenzsystem sollte beidhändig sein, so dass mit dem Einsatz von sensomotorisch begabten und trainierten Operatoren eine hohe Produktivität im Montageprozess erreicht werden kann. In *Abschnitt 4.5* wurde erläutert, dass dabei die Auswahl der Geräte eine wichtige Rolle spielt. Der Einsatz von zwei PHANTOM®-Geräten hat sich für Montageaufgaben als sehr gut geeignet erwiesen. Neben den sechs Freiheitsgraden im Raum muss auf der Operatorseite auch der Freiheitsgrad Greifen abgebildet werden. Für einen Einsatz in der manuellen Mikromontage muss ein An- und Ablegen aller Geräte innerhalb von wenigen Sekunden realisierbar sein, um dem Bediener kein Gefühl der Angebundenheit zu vermitteln. Um ein Gesamtkonzept umsetzen zu können, stellt sich noch die Frage, an welchem Platz die Eingabegeräte im Bezug zum Visualisierungsmedium positioniert werden sollten. Bei manuellen Tätigkeiten ist der Fokuspunkt der Augen auf den Montageprozess gerichtet, der von den beiden Händen durchgeführt wird. Durch die Trennung von Montageort und Mensch ist diese Zusammenführung nicht ohne weiteres möglich. Nach der klassischen Anordnung von Eingabegeräten an einem PC ist es denkbar, die Eingabegeräte rechts und links des Monitors aufzustellen, so dass der Bediener freie Sicht hat. Der Grad der Benutzerfreundlichkeit ist durch diese Anordnung aber stark beeinträchtigt, da Wirk-

und Darstellungsraum nicht korrelieren (LINDEMANN et al. 2004). Eine weitere Beeinträchtigung erfolgt durch die Teilung des Wirkraumes in zwei Hälften (vgl. *Abbildung 53*).



*Abbildung 53: Trennung von Wirk- und Darstellungsraum bei einem klassischen PC-Arbeitsplatz*

### 5.2 Konzept eines WYSIWYF-Displays

Die Problematik der Teilung von Darstellungs- und Wirkraum ist im Bereich von virtuellen Welten in der Forschung bekannt. Sinnvoll gelöst werden kann dieses Problem bisher nur durch die Verlegung der Eingabegeräte hinter das Visualisierungsmedium. Somit wird erreicht, dass sich der Wirkraum im Sichtkegel des Bedieners aufspannt und die Eingabegeräte den Darstellungsraum des Operators nicht beeinträchtigen. YOKOKOHI et al. (1999) bezeichnen diese Aufbauten als WYSIWYF-Displays, was als Abkürzung für „What You See Is What You Feel“ steht und eine Umschreibung für die Zusammenlegung von Wirk- und Darstellungsraum ist. Die einfachste Möglichkeit, die zwei Räume zu vereinen, ist die Verwendung von Head Mounted Displays (HMDs), die sich in den letzten Jahren in verschiedenen Variationen auf dem Markt etabliert haben. Dabei können grundsätzlich zwei Arten von Displays unterschieden werden. Zum einen existieren HMDs mit See-Through-Display, die eine Mischung von realer Umgebung und gerenderten Bildern zulassen. Diese Geräte sind für Augmented-Reality-



Anwendungen gut geeignet, da das Realbild direkt über das Display wahrgenommen werden kann (PATRON 2005). Zum anderen werden auch HMDs ohne See-Through-Option angeboten. Diese werden vor allem für rein virtuelle Welten eingesetzt, da sie dem Benutzer einen sehr hohen Immersionsgrad verschaffen. Der Einsatz von HMDs ist jedoch umstritten. In verschiedenen Experimenten wurde herausgefunden, dass HMDs eine starke Beanspruchung für das Gehirn und den Gleichgewichtssinn des Menschen verursachen. Aus diesem Grund wird davon abgeraten, HMDs längere Zeit am Stück zu tragen, da dies die sog. *Simulation Sickness*, einen Zustand ähnlich der Seekrankheit bis hin zu epileptischen Anfällen, auslösen kann (NAPFLIN & MENOZZI 1998, SILVERMAN & SPIKER 1997).

YOKOKOHI et al. (1999) umgehen dieses Problem, indem sie ein statisches Display aufbauen. Ein LCD-Flachbildschirm mit einer 15 Zoll messenden Bild diagonalen dient ihnen als Visualisierungsmedium, hinter dem sie einen Roboter als Eingabegerät aufbauen. Die Verwendung von LCD-Bildschirmen ermöglicht durch ihre flache Bauweise den Aufbau eines WYSIWYF-Displays. Sie sind aber aufgrund ihrer maximalen Bildwiederholfrequenz nicht für eine stereoskopische Visualisierung einsetzbar. Aus diesem Grund verwenden LINDEMANN et al. (2004) und die REACHIN TECHNOLOGIES (2005) in ihren Arbeiten einen Röhrenmonitor, mit dem eine aktive Stereovisualisierung umsetzbar ist. Im Vergleich zu Flachbildschirmen ist bei den Kathodenstrahlschirmen keine Möglichkeit gegeben, die Eingabegeräte sinnvoll hinter dem Monitor zu positionieren. Durch die Verwendung eines Spiegels, mit dem das Monitorbild abgelenkt wird, können der Darstellungs- und der Wirkraum vereint werden (vgl. *Abbildung 54*).

Die Umlenkung des Monitorbildes über einen Spiegel bewirkt, dass der Blickpunkt des Bedieners in einem kleinen definierten Raum liegen muss. Durch das Verlassen dieses Raumes sieht der Bediener nicht mehr das Monitorbild, sondern blickt an ihm vorbei. Dieses Problem wurde von FRANZ (2001) erkannt. Er baute ebenfalls ein stereofähiges Display auf und entwickelte zusätzlich noch eine Vorrichtung, die den Kopf in einer festen Position hält. Aus ergonomischen Gesichtspunkten ist dieses Display, das nur im Stehen einsetzbar ist, für den produktiven Einsatz nicht denkbar. Die Verwendung eines Spiegels zur Umlenkung des Bildes ist für einhändiges Arbeiten, wie dreidimensionales Skizzieren, gut geeignet, für eine beidhändige Interaktion in einem größeren Arbeitsraum ist der Darstellungsraum zu klein.

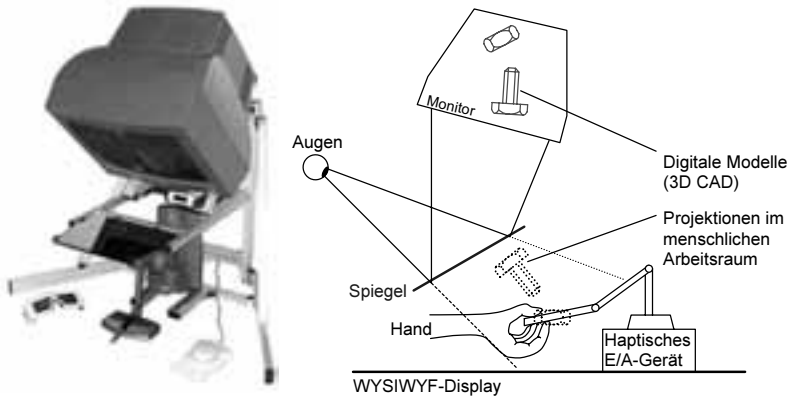


Abbildung 54: Konzept eines WYSIWYF-Displays für eine einhändige Interaktion (Quelle: Reachin)

Einen ganz anderen Ansatz verfolgen BREDESON et al. (2000) in ihren Arbeiten. Sie verwenden eine waagrechte Projektionsfläche, auf die sie von unten ein Bild in stereoskopischer Visualisierung projizieren. Als Eingabegerät verwenden sie ein PHANTOM® Premium 3.0, das sie kopfüber an einem Balken über ihre Projektionsfläche hängen. Dadurch lösen sie zwar das Problem, dass das PHANTOM®-Gerät nicht in ihrem Darstellungsraum steht, können aber trotzdem nicht die Verdeckung lösen, die durch die Hand des Bedieners und die PHANTOM®-Kinematik hervorgerufen wird. Für eine beidhändige Interaktion mit zwei PHANTOM®-Geräten und Greifmastern ist die Verdeckung des Darstellungsraumes durch die Geräte zu groß, um damit arbeiten zu können. Eine weitere Lösung schlagen KOLEVA et al. (2000) vor, die als Projektionsflächen durchdringbare Materialien wie Wasser und Streifenvorhänge verwenden. In ihren Arbeiten dienen diese Projektionsflächen zum einmaligen Durchschreiten, um den Übergang in eine virtuelle Welt zu symbolisieren. Für eine Interaktion sind die Technologien unter anderem aufgrund ihrer niedrigen Bildqualität nicht geeignet. In Anlehnung an die bisher entwickelten WYSIWYF-Displays wird im Folgenden ein Display vorgestellt, das den Anforderungen der bimanuellen telepräsenten Mikromontage gerecht wird. Dazu wurde ein morphologischer Kasten erstellt, in dem alle bisherigen Konzepte in ihren Teilfunktionen und Randbedingungen abgebildet sind (siehe *Tabelle 8*). Die besten Lösungen der jeweiligen Teilfunktionen sind in der Tabelle grau hinterlegt.

	Yokokohji	Reachin	Brederson	Koleva	HMD
Stereo	nein	aktiv	aktiv	nein	passiv
Gewicht der Stereobrillen	-	mittel	mittel	-	schwer
Medium	LCD	CRT	Projektor	Projektor	HMD
Immersionsgrad	gering	hoch	hoch	gering	hoch
Verdeckung durch eigene Hand	nein	nein	ja	ja	nein
Verwendung von Eingabegeräten	ja	ja	ja	nein	teilweise
Art der Raumverschmelzung	Darstellungsraum vor Wirkraum	Darstellungsraum vor Wirkraum	Darstellungsraum hinter Wirkraum	Durchgreifen durch Projektionsfläche	Darstellungsraum vor Wirkraum
einsetzbar für Beidhändigkeit	mit Einschränkung	nein	mit Einschränkung	nein	ja
Umlenkung des Bildes	nein	ja	nein	nein	nein
Simulation Sickness	nein	nein	nein	nein	ja
Head Tracking	ja	nein	ja	nein	teilweise

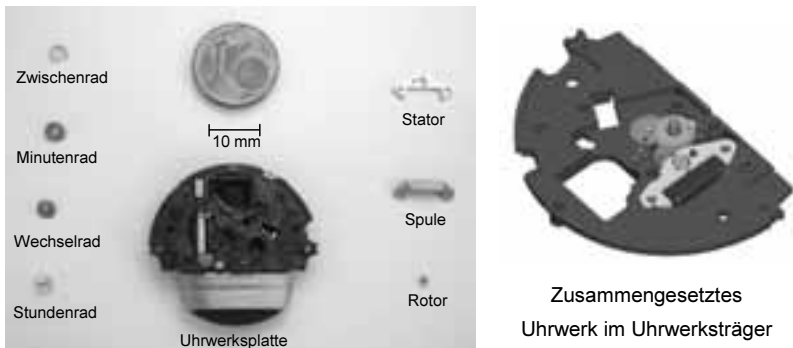
*Tabelle 8: Morphologischer Kasten zur Entwicklung eines WYSIWYF-Displays für eine beidhändige Interaktion; positive Merkmale sind grau hinterlegt angezeigt*

## 6 Evaluierung

Im folgenden Kapitel werden die in den *Kapiteln 4* und *5* gewonnenen Ergebnisse anhand eines Beispiels aus der manuellen Mikromontage bewertet.

### 6.1 Anwendungsbeispiel

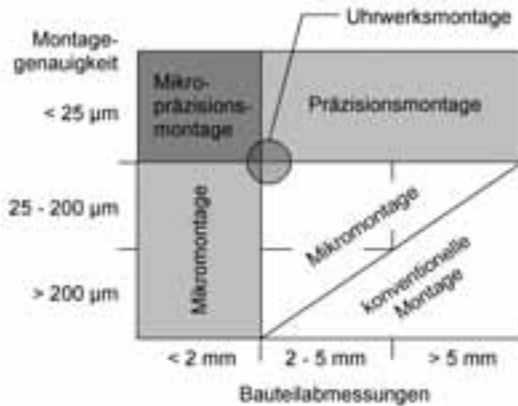
Als Anwendungsbeispiel für die telepräsente Mikromontage wurde ein miniaturisiertes Uhrwerk einer Funkuhr gewählt, und zwar ein Modell der Firma JUNGHANS UHREN GMBH (2005), das in dieser Bauform für eine Reihe von Uhrenmodellen eingesetzt wird. Das Preissegment der Uhren liegt dabei zwischen 100 und 500 Euro. Das Uhrwerk besteht aus insgesamt sieben Teilen, die in *Abbildung 62* dargestellt sind.



*Abbildung 62: Uhrwerk einer Armbanduhrenreihe; Einzelteile (links) und montiertes Uhrwerk (rechts)*

Die Mikromontage kann in verschiedene Bereiche unterteilt werden. Dabei sind die zwei Faktoren Bauteilgröße und Montagegenauigkeit ausschlaggebend für die Unterteilung (vgl. *Abbildung 2*). Bauteile mit Abmessungen von zwei Millimetern und kleiner werden klassisch der Mikromontage zugeordnet. Bauteile, die größer als zwei Millimeter sind, jedoch mit einer Genauigkeit von unter  $25\ \mu\text{m}$  gefügt werden, werden in den Bereich Präzisionsmontage eingeteilt. Den Bereich

mit den kleinsten Abmessung und gleichzeitig höchsten Montagegenauigkeiten zeichnet den Bereich Präzisionsmikromontage aus. Die Anwendung, anhand derer das Telepräsenzsystem evaluiert werden soll, befindet sich im Grenzbereich zwischen der allgemeinen Mikromontage und der Präzisionsmontage (vgl. *Abbildung 63*).



*Abbildung 63: Einordnung der Montage des Uhrwerkbeispiels in die Teilbereiche der Mikromontage*

Die sieben Uhrwerksteile werden in verschiedenen Prozessschritten auf die Uhrwerksplatte montiert. Diese besteht in ihrem Grundzustand aus den drei Teilen Uhrwerksträger, Elektronik und Funkspule. Die Montage dieser drei Teile zur Uhrwerksplatte soll hier nicht weiter betrachtet werden, da die Teile weder sehr klein sind noch präzise montiert werden müssen. Die Montage kann daher automatisiert erfolgen. Die Montage der Zahnräder hingegen muss aufgrund der winzigen Bauteilabmessungen und der hohen Montagegenauigkeit manuell erfolgen. Dazu wird als erster Schritt das Zwischenrad in die Uhrwerksplatte eingesetzt. Neben dem Zwischenrad wird der Rotor platziert. Der Rotor ist mit 1,4 mm Durchmesser das kleinste Bauteil. Die Mantelfläche des Rotors ist mit Zähnen bestückt. Diese für den Menschen nicht wahrnehmbaren Zähne müssen bei der Montage in die ebenfalls winzige Verzahnung des Zwischenrades greifen. Im nächsten Montageschritt wird das Minutenrad in die Uhrwerksplatte eingesetzt. Dabei muss die Achse des Minutenrades in die vorgesehene Achshalterung in der Uhrwerksplatte eingefügt werden. Zusätzlich muss der Monteur darauf achten,

dass die äußere Verzahnung des Minutenrades in die Ritzelverzahnung des Zwischenrades greift. In die Ritzelverzahnung des Minutenrades wird das Wechselrad eingefügt. Das Wechselrad untersetzt die Bewegungen des Minutenzeigers auf die Bewegungen des Stundenzeigers. Dieser ist mit dem Stundenrad verbunden, dessen Montage der schwierigste Prozess bei der Uhrwerksmontage ist. Das Stundenrad hat eine hohle Achse und muss mit einer Präzision von  $20\ \mu\text{m}$  auf die Achse des Minutenrades gesteckt werden. Das Minutenrad kann zwar über einen Stift in der Montagevorrichtung leicht fixiert werden, ist jedoch nicht völlig starr. Zusätzlich zum Aufsteckprozess muss die Außenverzahnung des Stundenrades in die Ritzelverzahnung des ebenfalls beweglichen Wechselrades greifen. Nach diesem Schritt ist die Mechanik des Uhrwerks fertig gestellt. Mit dem Einsetzen der Spule und des Stators ist das Uhrwerk prinzipiell funktionsbereit. Über eine Abdeckplatte, die über das Uhrwerk geschraubt wird, wird das Uhrwerk fixiert.

Der Versuch, die Montage des Uhrwerks vollständig zu automatisieren, scheiterte. Die Gründe dafür sind der hohe Aufwand und die fehlende Feinfühligkeit der Manipulatoren. Dadurch kommt es zu Beschädigungen der Bauteile. Besonders betroffen sind dabei die empfindlichen Lager der Zahnräder, die bei Beschädigung zum Funktionsausfall des Uhrwerks führen. Der Werkstoff des Uhrwerksträgers Vectra A530 ist ein flüssigkristallines Polymer mit 30 % Mineralfüllung. Der Uhrwerksträger darf mit Montagekräften von maximal  $4,7\ \text{N}$  beansprucht werden, so dass die Werkstoffbelastung nicht über die kritische Grenze von  $164\ \text{Nmm}^{-2}$  steigt. Anderenfalls besteht die Gefahr, dass Beschädigungen am Uhrwerksträger auftreten (vgl. *Abbildung 64*).



*Abbildung 64: Beschädigung eines Lagers des Uhrwerksträgers durch zu hohe Montagekräfte*

Da es bisher nicht möglich war, die Montage des gewählten Uhrwerks zu automatisieren, wird die Montage heute noch manuell ausgeführt, aber dies ist keine ideale Lösung. Um die einzelnen Teile manuell montieren zu können, sind Hilfsmittel notwendig, die den Menschen in seiner Tätigkeit unterstützen. Für die visuelle Vergrößerung der winzigen Bauteile werden in der manuellen Mikromontage Standlupen und Augenklemlupen verwendet. Die bikonvexen Linsen ermöglichen dabei eine Vergrößerung der Teile auf das Zehnfache. Für die Handhabung der kleinen Teile werden Pinzetten eingesetzt. Dadurch wird zum einen ermöglicht, die Miniaturteile zu greifen, zum anderen verhindert dies potentielle Verunreinigungen der Bauteile, wie sie bei direktem Kontakt mit den Händen durch Schweiß oder Verschmutzung entstehen können. Der direkte Hautkontakt ist jedoch nicht die einzige Art und Weise, auf die Bauteile durch die Einwirkung des Menschen beschädigt werden. Durch den Verlust von Hautschuppen, die sich vermehrt von der Kopfhaut lösen, und die Verteilung von Kleinstorganismen über Mund und Nase können die Funktionen der Miniaturbauteile ebenfalls beeinträchtigt werden. Mützen und Mundschutz sind daher gebräuchliche Maßnahmen, um Bauteile in der Mikromontage vor diesen Partikelquellen zu schützen. Für den Menschen entsteht durch all diese Randbedingungen eine psychisch und physisch anstrengende Tätigkeit. Die extrem gebeugte Haltung bei der dauerhaften Verwendung von Standlupen führt zu starken Verspannungen im Rücken- und Schulterbereich, die zu Kopfschmerzen und Konzentrationseinbußen führen können. Die feinfühligke Arbeit mit den Pinzetten zwingt zusätzlich den Bediener zu einer ruhigen Sitzhaltung, die wiederum einen negativen Einfluss auf den Kreislauf des Menschen hat (vgl. MANZ 2003). Eine durchgängige Arbeit an einem manuellen Mikromontageplatz über eine Zeit von einer Stunde hinweg ist nicht möglich bzw. nicht empfehlenswert. In der Uhrmacherindustrie wird daher eine Schicht von zwei Mitarbeiterinnen besetzt, die sich in einem sechzigminütigen Turnus in der Arbeit abwechseln. Die Montagekosten verdoppeln sich dadurch im Vergleich zu einer manuellen Montage, bei der jede Schicht nur einfach besetzt wird.

Der in dieser Arbeit entwickelte Operatorarbeitsplatz löst die Probleme, die bei der manuellen Mikromontage entstehen. Das Vergrößerungsglas wird durch ein großes Display ersetzt. Durch die Abbildung der Szene in einer virtuellen Welt ist eine fast beliebige visuelle Vergrößerung der Objekte möglich, so dass keine zu große Belastung für die Augen entsteht. Durch die geeignete Display-Fläche

wird ein relativ aufrechtes Sitzen auf einem Stehsitz ermöglicht. Rücken und Schultermuskulaturen werden dadurch nicht so stark belastet, wie bei herkömmlichen Montagearbeitsplätzen in der manuellen Mikromontage. Die zwei PHANTOM®-Geräte sind so hinter dem Display positioniert, dass Wirk- und Darstellungsraum verschmelzen und die kognitive Belastung des Bedieners nicht erhöht wird. Die Fußschalter auf dem verstellbaren Fußbrett erlauben jederzeit ein Unterbrechen der Arbeiten durch das so genannte *Indexing*. Aus ergonomischer Sicht ist die Verwendung eines Operatorarbeitsplatzes und von Telepräsenztechnologien eine erhebliche Verbesserung im Vergleich zur manuellen Mikromontage.

## 6.2 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Neben den ergonomischen Gesichtspunkten soll der Operatorarbeitsplatz auch auf seine Wirtschaftlichkeit hin analysiert werden. Die Wirtschaftlichkeit ist der Hauptfaktor, der heute bestimmt, ob ein System produktiv eingesetzt wird oder nicht. Für die Untersuchung wird die Montage eines Uhrwerkes aus dem letzten Abschnitt bzw. einzelne Montageprozesse daraus herangezogen.

In dem Experiment aus *Abschnitt 4.1* konnte gezeigt werden, dass Telepräsenzsysteme eingesetzt werden können, um Montageprozesse aus der Präzisionsmontage durchzuführen. Die Qualität der Montage wird dabei zum einen in der fehlerlosen und zum anderen in der beschädigungsfreien Ausführung der Prozesse sichtbar. Das Experiment belegt, dass mit Hilfe des entwickelten Telepräsenzsystems die Fügekräfte während der Uhrwerksmontage höchstens 2,0 N groß sind. Somit können Beschädigungen am Uhrwerksträger durch zu hohe Montagekräfte ausgeschlossen werden. Die technische Einsetzbarkeit ist somit gewährleistet. Im Folgenden wird das System noch hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit bewertet.

Im ersten Schritt wird dazu der Operatorarbeitsplatz mit schon existierenden Systemen verglichen, um die Leistungsfähigkeit des Systems gegenüber anderen Systemen zu verifizieren. HAMEL (2003) präsentiert in seinen Arbeiten eine Skala zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Telepräsenzsystemen. Durch einen Vergleich von verschiedenen Telepräsenzsystemen stellt er fest, dass die Umsetzung der Arbeit mittels Telepräsenz in der Regel zehn- bis hundertmal länger dauert als die direkte Ausführung. Er definiert seine Skala von sehr gut (10fach)



---

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, einen Operatorarbeitsplatz zu entwickeln, der in der telepräsenten Mikromontage eingesetzt werden kann. Dazu wurden in einem ersten Schritt die Modalitäten untersucht, die notwendig sind, um dem Operator ein ausreichendes Präsenzgefühl zu vermitteln. Über den Sehsinn nimmt der Mensch dabei die meisten Informationen seiner Umwelt auf. Die Qualität des Bildes muss dementsprechend sehr hoch sein. Die beste Lösung wird hier durch die Verwendung einer modellbasierten Visualisierung mit stereoskopischer Darstellung erreicht. Dennoch reicht der Sehsinn des Menschen für viele Fälle nicht aus und muss durch haptische Reize unterstützt werden. Durch die ebenfalls modellbasierte Kraftberechnung mittels Kollisionsrechnung kann ein verzögerungsarmer Regelkreis zwischen Teleoperator und Operator aufgebaut werden, so dass Instabilitäten bei der Interaktion mit Krafrückkopplung vermieden werden.

In einem weiteren Teil der Arbeit werden die Anforderungen aus einem realen Montageprozess auf die telepräsente Mikromontage übertragen. Daraus ergibt sich, dass eine Steigerung in der Effizienz von Telepräsenzsystemen erreicht wird, wenn eine bimanuelle Interaktion ermöglicht wird. Der Leistungszugewinn kann aber nur bei Personen mit überdurchschnittlichen sensomotorischen Fähigkeiten beobachtet werden. Für andere Personen besteht die Gefahr, dass die kognitive Belastung größer wird und dies den zusätzlichen Nutzen durch die zweite Hand zunichte macht. Bei der bimanuellen Mensch-Maschine-Interaktion sollten beide Eingabegeräte gleicher Bauart sein und die natürlichen Bewegungen des Menschen bestmöglich abdecken. Demzufolge wurden in dieser Arbeit am Markt erhältliche Eingabegeräte so erweitert, dass ein intuitives Greifen mit den Standard-Eingabegeräten möglich ist.

Durch die Integration der nicht-dominanten Hand in das Telepräsenzsystem entsteht nach bislang gegebenem Stand der Technik eine große Kluft zwischen dem Darstellungsraum und dem Wirkraum. Der Darstellungsraum spaltet den Wirkraum in zwei Hälften. Die dem entgegen wirkende Verschmelzung von Wirk- und Darstellungsraum wird anhand eines WYSIWYF-Displays vorgestellt. Die höhere Realitätsnähe und der ergonomische Aufbau erleichtern die Arbeit des Operators. Mit der Entwicklung eines optimierten Operatorarbeitsplatzes wurde

---

## 8 Literaturverzeichnis

3DCONNEXION 2005

3Dconnexion: Spacemouse. Seefeld,  
<http://www.3dconnexion.com/spacemouseplus.htm>.

5DT 2005

5DT: 5DT Data Glove 5 Ultra. Irvine, CA, USA,  
<http://www.5dt.com/products/pdataglove5u.html>.

AKAY & MARSH 2001

Akay, M.; Marsh, A.: Information Technologies in Medicine. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc. 2001.

AL-ASHAAB & RODRIGUEZ 2003

Al-Ashaab, A.; Rodriguez, K.: Virtual Product Development in a Collaborative Environment. In: Coutellier, D. et al. (Hrsg.): Virtual Concept. Biarritz, Frankreich: ESTIA, 2003, S. 26-33.

ANGUS & SOWIZRAL 1995

Angus, I. G.; Sowizral, H. A.: Embedding the 2D Interaction Metaphor in a Real 3D Virtual Environment. In: Fisher, S. S. et al. (Hrsg.): Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems II SPIE Vol. 2409. 1995, S. 282-293.

ANTON 2002

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

ANTON et al. 2001

Anton, O.; Ehrenstrasser, M.; Patron, C.; Petzold, B.: Component-Oriented Framework for Telepresence Systems. In: Färber, G. (Hrsg.): Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems. München: Hieronymus Buchreproduktions GmbH 2001, S. 151-162.

ATHÈNES et al. 2003

Athènes, S.; Sallagoity, I.; Albaret, J.-M.; Zanone, P.-G.: Universal Features of Handwriting: Towards a Non-linear Model. In: 11<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society (IGS). Scottsdale, AZ, USA: 2003, S. 46-49.

BACKHAUS et al. 2006

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.: Multivariate Analysemethoden. 11. Aufl., Berlin: Springer-Verlag 2006.

---

ZHAI et al. 1997

Zhai, S.; Milgram, P.; Rastogi, A.: Anisotropic Human Performance in Six Degree-of-Freedom Tracking: An Evaluation of Three-Dimensional Display and Control Interfaces. *Man and Cybernetics* 27 (1997) 4, S. 518-528.

ZILLES & SALISBURY 1995

Zilles, C.; Salisbury, J. K.: A Constraint-based God-object Method for Haptic Display. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS*. Pittsburgh, PA, USA: 1995, S. 146-151.

---

## 9 Glossar

**AR (Augmented Reality):** Augmented Reality bezeichnet die Überlagerung von Ansichten der realen Umgebung mit in Echtzeit rechnergenerierten Bildern, abhängig von der Betrachterposition. Dadurch erscheint die natürliche Ansicht der virtuellen Objekte und Anweisungen erweitert.

**Bit:** „Abkürzung für „binary digit“, also für Ziffern auf der Basis 2, die nur die diskreten Zustände 0 oder 1 annehmen können. Das Bit ist damit die kleinste Einheit für die Codierung von Daten.“ (CHARWAT 1994)

**CAD (Computer Aided Design):** Überwiegend geometrieorientierte Programmsysteme für alle Aktivitäten, bei denen eine Rechnerunterstützung für die Entwicklung, Konstruktion und Produktionsplanung in Anspruch genommen wird.

**Entropie:** Durch die Entropie wird der Grad der Unordnung eines Systems ausgedrückt. In der Bildverarbeitung bezeichnet die Entropie die Anzahl und die Verteilung der Farben in einem Bild. Bei einem monochromen Bild ist die Entropie null.

**Exoskelett:** Ein Exoskelett ist eine Stützstruktur für einen Organismus, die eine stabile äußere Hülle um diesen bildet. In der Mensch-Maschine-Interaktion stellt das Exoskelett eine Mechanik dar, die über den menschlichen Körper gestülpt wird, um Kräfte an diesen auszugeben.

**FireWire:** FireWire ist eine Schnittstelle, die für den schnellen Datenaustausch zwischen Multimedia- und anderen Peripheriegeräten eingesetzt wird. Sie wurde ursprünglich von Apple als Nachfolger für SCSI entwickelt und wurde unter dem Namen IEEE 1394 standardisiert. Im Frühjahr 2004 wurde die Spezifikation für Wireless FireWire verabschiedet. Sie sieht ein zusätzliches Protocol Adaptation Layer (PAL) für FireWire über IEEE 802.15.3 vor.

**Freiheitsgrad:** In der Kinematik beschreibt ein Freiheitsgrad eine Richtung, in der sich ein Körper bewegen kann. Im dreidimensionalen Raum sind dabei sechs verschiedene Freiheitsgrade möglich: drei translatorische parallel der Koordinatenachsen und drei rotatorische um die Koordinatenachsen.

**Immersion:** Der Begriff Immersion beschreibt das Eintauchen in eine künstliche Welt. Im Unterschied zu der passiven, filmischen Immersion gewinnt die Immer-

**Turboscara SR6**

SCARA-Roboter

Bosch Rexroth AG

Maria-Theresien-Str. 23

97816 Lohr am Main

<[www.boschrexroth.com](http://www.boschrexroth.com)>

**Wiener Testsystem**

System zur psychologischen Diagnostik

Dr. G. Schuhfried GmbH

Hyrtlstraße 45

2340 Mödling, Österreich

<[www.schuhfried.at](http://www.schuhfried.at)>

---

## 11 Anhang

### 10.1 Fragebogen für den Versuch zur Visualisierung (Abschnitt 4.1)

#### Allgemeine Fragen:

- 1 Versuchsgruppe
- 2 Laufende Nummer
- 3 Alter ..... Jahre
- 4 Geschlecht männlich weiblich
- 5 Wie fit fühlen Sie sich heute? Müde Topfit

#### Bedienung/Gewöhnung/ Konzentration

- 6 Die Bedienung des Systems war für mich intransparent sehr intuitiv
- 7 Die Gewöhnungsphase, um mit der Bedienung des Systems vertraut zu werden, empfand ich als sehr kurz sehr lang
- 8 Ich konnte mich während des Versuchs voll und ganz auf die gestellte Aufgabe konzentrieren. Die Bedienung des Systems erforderte von mir keinerlei Anstrengung. uneingeschränkte Ablehnung uneingeschränkte Zustimmung
- 9 Wie geschickt glauben Sie nach der Versuchsreihe mit dem System umgehen zu können? ungeschickt geschickt
- 10 Haben Sie während der Ausführung der gestellten Aufgabe Ereignisse wahrgenommen, die um Sie herum geschahen (z.B. Hintergrundgespräche)? Nein, überhaupt nicht Ja, in allen Details

# iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*  
**Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel**  
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*  
**Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen**  
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*  
**Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern**  
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*  
**Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen**  
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*  
**Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen**  
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*  
**Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung**  
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, J.*  
**Schneiderodierte Oberflächen**  
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*  
**Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen**  
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*  
**Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung**  
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*  
**Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen**  
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*  
**Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse**  
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*  
**Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze**  
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*  
**Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion**  
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Grohe, A.*  
**Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme**  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*  
**Klipsmontage mit Industrierobotern**  
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*  
**Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung**  
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*  
**Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems**  
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*  
**Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung**  
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*  
**Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme**  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*  
**Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen**  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*  
**Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen**  
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*  
**Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung**  
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*  
**Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems**  
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*  
**Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage**  
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Witba, P.*  
**Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik**  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*  
**Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung**  
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*  
**Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie**  
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*  
**Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**  
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*  
**Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**  
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*  
**Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**  
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*  
**Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*  
**Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*  
**Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und 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 *Hoßmann, J.*  
**Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen**  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*  
**Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabaukastens für robotergeführte Klebprozesse**  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*  
**Integrierte Diagnose in Produktionszellen**  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*  
**Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*  
**Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *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 Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe**  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*  
**Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*  
**Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*  
**Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*  
**Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*  
**Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*  
**Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*  
**Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*  
**Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5



- 60 *Strohmayr, R.*  
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von  
Zubringeinrichtungen**  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer  
Zellenrechnersoftware**  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56889-5
- 62 *Stetter, R.*  
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur  
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dindorfer, A.*  
**Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*  
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender  
Werkzeugmaschinen**  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*  
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-  
Layoutoptimierung**  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*  
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur  
Planung manueller Montagesysteme**  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*  
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen  
Automatisierung von Produktionssystemen**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
**Simulationsgestützte CAD/ICAM-Kopplung für die 3D-  
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
**Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
**Automatische Inbetriebnahme  
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von  
Produktionssystemen**  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
**Rechnergestütztes Projektinformations- und  
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*  
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur  
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*  
**Verfahren zur simulationsgestützten  
Produktionsregelung in der Einzel- und  
Kleinserienproduktion**  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*  
**Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung**  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*  
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer  
flexiblen Fertigung**  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*  
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in  
der Arbeitsvorbereitung**  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*  
**Strömungstechnische Optimierung von  
Produktionssystemen durch Simulation**  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*  
**Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen**  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*  
**Technologisches Prozeßmodell für die  
Kugelschleifbearbeitung**  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*  
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von  
Werkzeugmaschinen**  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen  
Fertigungszellen**  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der  
Hartbearbeitung**  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in  
flexiblen Produktionszellen**  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung  
und logistisches Störungsmanagement**  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
**Systematische Planung anwendungsspezifischer  
Materialflußsteuerungen**  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in  
Montageanlagen**  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Limmer, St.*  
**Konzept einer integrierten Produktentwicklung**  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*  
**Integrierte Planung von Informationssystemen für  
rechnergestützte Produktionssysteme**  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*  
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in  
mittelständischen Unternehmen**  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*  
**Recyclingintegrierte Produktentwicklung**  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*  
**Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte**  
 1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
**Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen**  
 1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
**Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren**  
 1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
**Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme**  
 1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
**Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen**  
 1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
**Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme**  
 1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
 1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*  
**Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie**  
 1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
**Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**  
 1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
**Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten**  
 1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischeltzrieder, 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 variantenreichen Kleinprodukten**  
 1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
**Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung**  
 1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
**Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem**  
 1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*  
**Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe**  
 1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
**Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen**  
 1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krämer, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung**  
 1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
**Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service**  
 1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*  
**Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion**  
 1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
**Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen**  
 1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
**Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung**  
 1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
**Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz**  
 1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
**Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse**  
 1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermeier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
 1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, 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.*  
**Erfahrungsgleitete Planung von Laseranlagen**  
 1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

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

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

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**  
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ins Ziel**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibel und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**  
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**  
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 **Mechatronik · Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen**  
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**  
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 **Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**  
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**  
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 76 **Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapselfur 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 Mößner, 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 Partnernverbänden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

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

- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer  
**Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste 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 telepräseneter 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 Breitinge  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer  
**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**  
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger  
**Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme**  
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl  
**Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing**  
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch  
**Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie**  
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3



- 189 Thomas Mosandl  
**Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme**  
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron  
**Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung**  
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek  
**Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen**  
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer  
**Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen**  
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke  
**Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung**  
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried  
**Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern**  
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner  
**Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion**  
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich  
**Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen**  
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl  
**Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern**  
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann  
**Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge**  
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp  
**Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage**  
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz  
**Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme**  
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner  
**Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding**  
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein  
**Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation**  
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren  
**Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse**  
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf  
**Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie**  
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch  
**Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia**  
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer  
**Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage**  
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

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