

Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
der Technischen Universität München

## **Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage**

**Michael Ehrenstraßer**

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

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

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Färber

Die Dissertation wurde am 31.10.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 28.02.2007 angenommen.

Michael Ehrenstraßer

**Sensoreinsatz in der telepräsenten  
Mikromontage**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 206

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2007

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 978-3-8316-0743-3

Printed in Germany

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

# Inhaltsverzeichnis

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | Einleitung .....   | 9  |
| 1.1     | Potenziale der Mikrosystemtechnik .....  | 9  |
| 1.2     | Ausgangssituation und Motivation der Arbeit .....  | 11 |
| 1.2.1   | Wirtschaftliche Hemmnisse .....  | 11 |
| 1.2.2   | Technische Hemmnisse .....   | 13 |
| 1.2.3   | Ableitung des Handlungsbedarfs und Lösungsansatz .....                                     | 15 |
| 1.3     | Zielsetzung und Gliederung der Arbeit .....  | 17 |
| 2       | Stand der Technik .....  | 21 |
| 2.1     | Systeme zur manuellen Mikromontage .....   | 21 |
| 2.2     | Telepräsenz- und Teleaktionssysteme .....  | 22 |
| 2.2.1   | Begriffe und Definitionen .....  | 22 |
| 2.2.2   | Teilsysteme und Komponenten .....  | 24 |
| 2.2.2.1 | Kommunikation .....  | 25 |
| 2.2.2.2 | Softwarestrukturierung .....   | 31 |
| 2.2.3   | Geschichtliche Entwicklung der Telepräsenz .....   | 34 |
| 2.2.4   | Telepräsenz- und Teleaktionssysteme für die Handhabung von Mikro- bzw. Nanobauteilen ..... | 36 |
| 2.3     | Bewertung des Stands der Technik .....   | 41 |
| 2.4     | Konkretisierung der Aufgabenstellung .....   | 42 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.4.1   | Allgemeine produktionstechnische Anforderungen .....                  | 43 |
| 2.4.1.1 | Anwendungsflexibilität .....  | 43 |
| 2.4.1.2 | Rekonfigurierbarkeit und Erweiterbarkeit.....                         | 43 |
| 2.4.1.3 | Wiederverwendbarkeit und Modularisierung.....                         | 44 |
| 2.4.1.4 | Einheitliche Systemschnittstellen.....                                | 44 |
| 2.4.2   | Spezifische Anforderungen telepräsentierender Produktionssysteme..... | 45 |
| 2.4.2.1 | Physiologische und ergonomische Anforderungen .....                   | 45 |
| 2.4.2.2 | Intuitive Bedienbarkeit .....   | 46 |
| 2.4.2.3 | Sicherheitstechnische Anforderungen .....                             | 47 |
| 2.4.3   | Zusammenfassung der Anforderungen.....                                | 47 |
| 3       | Grundlagen der menschlichen Sinneswahrnehmung .....                   | 49 |
| 3.1     | Systemergonomie.....  | 49 |
| 3.2     | Visueller Empfindungsbereich .....                                    | 51 |
| 3.3     | Taktiler und kinästhetischer Empfindungsbereich.....                  | 53 |
| 3.3.1   | Taktiler Empfindungsbereich .....                                     | 54 |
| 3.3.2   | Kinästhetischer Empfindungsbereich .....                              | 55 |
| 3.3.3   | Kennwerte der haptischen Sinneswahrnehmung .....                      | 56 |
| 3.3.3.1 | Positionswahrnehmung.....   | 57 |
| 3.3.3.2 | Kraftwahrnehmung.....   | 57 |
| 3.3.3.3 | Steifigkeitswahrnehmung .....   | 58 |
| 3.3.3.4 | Zeitliche Auflösung der haptischen Wahrnehmung .....                  | 59 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.3.3.5 | Zusammenfassung .....   | 60 |
| 4       | Sensoren und Messprinzipien.....  | 63 |
| 4.1     | Sensoren zur visuellen Informationserfassung .....                                | 63 |
| 4.2     | Sensoren zur haptischen Informationsaufnahme .....                                | 69 |
| 4.2.1   | Klassifizierungsschema .....  | 70 |
| 4.2.2   | Sensoren zur Kräfteerfassung.....   | 71 |
| 4.2.2.1 | Dehnungsmessstreifen (DMS).....   | 72 |
| 4.2.2.2 | Piezoaufnehmer .....  | 72 |
| 4.2.2.3 | Visual Force Sensing .....  | 74 |
| 4.2.2.4 | Zusammenfassung: Sensoren für die Prozesskraftmessung .....                       | 75 |
| 4.2.3   | Sensoren zur Weg- und Abstandsmessung.....  | 76 |
| 4.2.3.1 | Elektrische Messprinzipien zur Weg- und Abstandsmessung.....                      | 77 |
| 4.2.3.2 | Optische Messprinzipien .....   | 80 |
| 4.2.4   | Zusammenfassung: Sensoren zur Weg- und Abstandsmessung.....                       | 82 |
| 4.3     | Telepräsenzgerechte Sensorauswahl.....  | 84 |
| 4.3.1   | Methodisches Vorgehen .....   | 85 |
| 4.3.2   | Analyse des Informationsbedarfs .....   | 86 |
| 4.3.3   | Sensorauswahlprozess .....  | 90 |
| 5       | Telepräsenzgerechte Sensormodule .....  | 93 |
| 5.1     | Logische Sensoren als Entwurfsmuster für telepräsenzgerechte<br>Sensormodule..... | 93 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 5.2     | Implementierung logischer Sensoren.....                         | 96  |
| 5.3     | Entwurf telepräsenzgerechter Sensormodule.....                  | 99  |
| 5.3.1   | Logische Sensoren 1. Art: Physikalische Basissensoren.....      | 100 |
| 5.3.1.1 | Definition und Funktionsweise.....                              | 100 |
| 5.3.1.2 | Sensormodul Prozesskraftmessung .....                           | 100 |
| 5.3.1.3 | Sensormodul Positions- und Orientierungsmessung .....           | 102 |
| 5.3.2   | Logische Sensoren 2. Art: Aggregatsensoren.....                 | 102 |
| 5.3.2.1 | Definition und Funktionsweise.....                              | 102 |
| 5.3.2.2 | Sensormodul Mehrdimensionale Kraftaufnehmer.....                | 104 |
| 5.3.2.3 | Sensormodul Mehrdimensionale Positionserfassung .....           | 104 |
| 5.3.3   | Logische Sensoren 3. Art: Adaptive Sensoren .....               | 105 |
| 5.3.3.1 | Definition und Funktionsweise.....                              | 105 |
| 5.3.3.2 | Sensormodul Telepräsenzgerechter Nadelspaltsensor.....          | 105 |
| 5.3.4   | Logische Sensoren 4. Art: Virtuelle Sensoren.....               | 108 |
| 5.3.4.1 | Definition und Funktionsweise.....                              | 108 |
| 5.3.4.2 | Anwendungsbeispiel 1: Arbeitsraumüberwachung .....              | 110 |
| 5.3.4.3 | Anwendungsbeispiel 2: Automatische Bewegungsskalierung .....    | 112 |
| 5.3.4.4 | Anwendungsbeispiel 3: Prozesskraftsensor für das Dispensen..... | 113 |
| 5.4     | Systemintegration .....   | 113 |
| 5.4.1   | Modalität Video .....   | 115 |
| 5.4.2   | Modalität Haptik.....   | 115 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 5.4.2.1 | Operatorseite.....                                     | 116 |
| 5.4.2.2 | Teleoperatorseite .....                                | 116 |
| 5.4.2.3 | Integration von Aktorik- und Sensorikkomponenten ..... | 117 |
| 6       | Exemplarische Anwendung und Erprobung .....            | 119 |
| 6.1     | Beschreibung der Montageaufgabe .....                  | 119 |
| 6.2     | Teleoperatorseite.....                                 | 122 |
| 6.3     | Operatorseite .....                                    | 126 |
| 6.4     | Experimentelle Evaluierung .....                       | 128 |
| 6.5     | Ergebnisse .....                                       | 131 |
| 6.6     | Wirtschaftliche Bewertung .....                        | 132 |
| 6.6.1   | Quantitative wirtschaftliche Bewertung .....           | 132 |
| 6.6.2   | Qualitative wirtschaftliche Bewertung .....            | 134 |
| 7       | Zusammenfassung und Ausblick .....                     | 137 |
| 8       | Literaturverzeichnis.....                              | 139 |
| 9       | Abbildungsverzeichnis .....                            | 149 |
| 10      | Tabellenverzeichnis.....                               | 153 |



# 1 Einleitung

## 1.1 Potenziale der Mikrosystemtechnik

Mit einer jährlichen Wachstumsrate von ca. 16 % und einem prognostizierten Marktvolumen von ca. 25 Mrd. US Dollar im Jahr 2009 (nach NEXUS 2006) spielt die Mikrosystemtechnik eine entscheidende Rolle in praktisch allen Bereichen unseres heutigen Lebens. Die Mikrosystemtechnik ermöglicht es, mehr und mehr Funktionen bei gleicher oder kleinerer Baugröße zu integrieren und gleichzeitig neue innovative Technologien zu entwickeln. Zahlreiche Anwendungsbeispiele aus der Automobilindustrie, der Medizin-, Umwelt-, Biotechnik sowie der Telekommunikationsindustrie der letzten Jahre belegen diese Entwicklung eindrucksvoll (siehe Abb. 1-1).

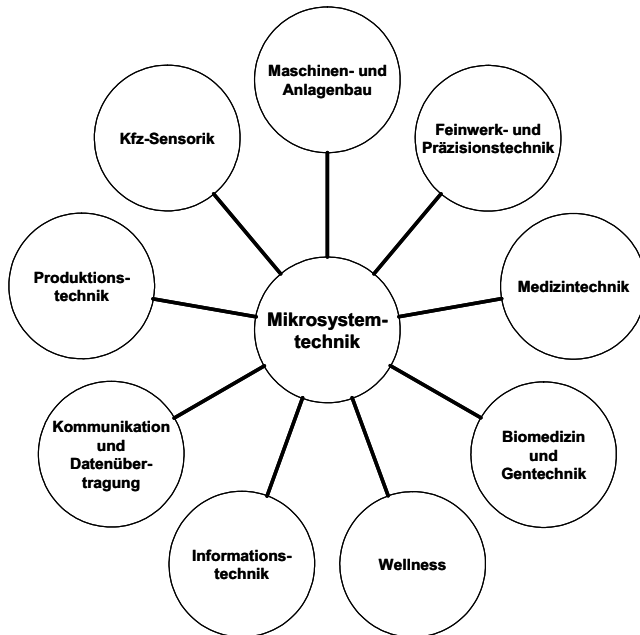


Abb. 1-1: Anwendungsfelder der Mikrosystemtechnik

Die **Fahrzeugtechnik** stellt heute eines der wichtigsten Anwendungsfelder der Mikrosystemtechnik dar. Der so genannte Airbagsensor wird seit seiner Einführung Anfang der 90er Jahre heute in fast jedem Neufahrzeug eingesetzt. Zahlreiche weitere Sensoren, z. B. zur Erfassung von Temperaturen, Öl-, Luft- und Hydraulikdruck wären ohne sie nicht möglich gewesen. In der **Informationstechnik** findet die Mikrosystemtechnik Anwendung bei Druckköpfen sowie Schreib- und Leseköpfen für Festplatten. In der **Medizintechnik** ermöglicht die Mikrosystemtechnik die Fertigung kleinster endoskopischer Geräte für die minimal-invasive Chirurgie. Darüber hinaus wird heute bereits intensiv an so genannten „in-vivo“-Applikationen geforscht: Beispiele hierfür sind implantierte Biosensoren zur kontinuierlichen Überwachung wichtiger Vitalfunktionen, wie z. B. Blutzuckerspiegel, Blutdruck oder Ionenkonzentration. Andere Implantate könnten durch kontinuierliche oder diskontinuierliche Abgabe von Medikamenten, wie z. B. Insulin für Diabetiker, die Lebensqualität der betroffenen Patienten erheblich steigern. Aber auch im **Maschinen- und Anlagenbau** wird die Mikrosystemtechnik eine immer größere Rolle spielen. „Intelligente“, mechatronische Werkzeuge mit integrierter Sensorik zur Überwachung von Werkzeugbruch und -verschleiß sowie die adaptive Regelung von Zerspanprozessen sind nur einige Beispiele der vielfältigen Potenziale.

Für den Begriff **Mikrosystemtechnik** existiert bis dato noch keine einheitliche Definition (vgl. BIERHALS 2000): In Europa wird unter dem Begriff Mikrosystemtechnik die „funktionale Integration mechanischer, elektronischer, optischer und sonstiger Funktionselemente unter Anwendung von speziellen Mikrostrukturtechniken“ verstanden. In Japan hingegen ist die Bezeichnung **Micromachines** geläufig und wird als „Zusammensetzung von funktionalen Elementen in der Größenordnung weniger Millimeter“ definiert. In den USA wird der Begriff **MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)** verwendet. Diese bezeichnen integrierte Mikroteile oder Systeme, bei denen elektrische und mechanische Elemente kombiniert werden und deren Herstellung auf IC-kompatiblen Batch-Prozesstechniken basiert.

In der Mikrosystemtechnik spielen hierbei so genannte **hybride Mikrosysteme** eine besondere Rolle, da sie die kosteneffiziente Entwicklung innovativer und kundenindividueller Produkte auch in kleinen bis mittleren Stückzahlen ermöglichen. Als hybride Mikrosysteme werden dabei Mikrosysteme bezeichnet, die modular aus mehreren Subkomponenten aufgebaut sind, welche in unterschiedlichen Technologien gefertigt wur-

den. HÖHN 2001 unterscheidet halbleiterbasierte Systeme sowie Mikrosysteme, die auf Basis alternativer Fertigungsverfahren, wie z. B. Ultrapräzisionsmikrobearbeitung oder Mikrospritzgießen (vgl. MENZ ET AL. 2005), aufgebaut sind.

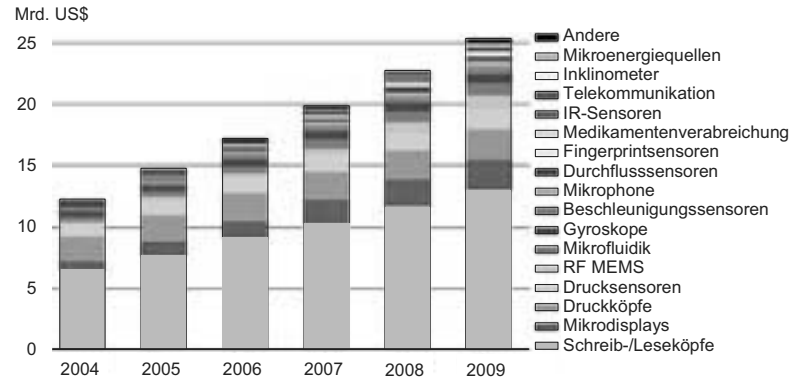
## **1.2 Ausgangssituation und Motivation der Arbeit**

Trotz der dynamischen Entwicklung im Bereich der Mikrosystemtechnik konnten sich in der Vergangenheit entsprechende Produktinnovationen am Markt nur zögerlich durchsetzen (vgl. BIERHALS 2000). Die Montage hybrider Mikrosysteme im Stückzahlbereich von Prototypen bzw. Kleinserien ist sowohl durch wirtschaftliche als auch durch technische Hindernisse geprägt, die eine rasche Markteinführung von Produktinnovationen verhindern. Diese Hemmnisse werden in den nächsten beiden Abschnitten näher erläutert.

### **1.2.1 Wirtschaftliche Hemmnisse**

#### **Stückkosten bei der Fertigung kleiner und mittlerer Stückzahlen**

Der Gesamtmarkt für mikrosystemtechnische Produkte kann hinsichtlich der Stückzahlen und Stückkosten in zwei Hauptgruppen unterteilt werden (vgl. Abb. 1-2): Auf der einen Seite gibt es einige wenige Produktgruppen, die in sehr großen Stückzahlen produziert werden, wie z. B. Druck- und Beschleunigungssensoren für die Automobilindustrie oder Schreib-/Leseköpfe für die IT-Industrie. Trotz der dabei häufig eingesetzten kostenintensiven Produktionsverfahren aus der Halbleiterfertigung, wie z. B. Lithographie, Nassätzen etc., können durch die geforderten hohen Stückzahlen und die damit verbundenen Skaleneffekte sehr niedrige Stückkosten erzielt werden. Andererseits existieren zahlreiche, neuartige mikrosystemtechnische Produkte, so genannte „emerging products“, wie z. B. Mikropumpen, Mikromotoren oder Mikrospiegel, die in kleinen Stückzahlen und in zahlreichen, kundenindividuellen Varianten gefertigt werden. Aufgrund der niedrigen Stückzahlen sind hierbei kostenintensive Automatisierungslösungen wirtschaftlich schwierig umzusetzen, so dass derartige Mikrosysteme auch heute noch manuell produziert werden. Die daraus resultierenden hohen Stückpreise werden jedoch nur in wenigen Branchen, wie z. B. in der Medizintechnik, am Markt akzeptiert.



**Abb. 1-2: Weltmarktprognose für Mikrosystemtechnische Produkte (nach NEXUS 2006)**

### Produktlebenszyklus und daraus resultierende Randbedingungen

Ein weiterer Grund für die zögerliche Marktetablierung von Produktinnovationen ist darüber hinaus in der besonderen Marktsituation vieler Unternehmen aus der Mikrosystemtechnik zu sehen. Vielfach werden entsprechende Innovationen durch Unternehmen kleiner und mittlerer Größenordnung entwickelt. Hierbei sind zahlreiche so genannte „Startup“-Unternehmen und Ausgründungen von Forschungseinrichtungen am Markt anzutreffen. Speziell für diese Unternehmensgruppen ist es aufgrund ihrer dünnen Kapitaldecke besonders schwierig, am Beginn des Produktlebenszyklus ein mikrosystemtechnisches Produkt am Markt zu etablieren. Insbesondere in der so genannten Einführungsphase, welche durch geringe Stückzahlen sowie geringes Wachstum gekennzeichnet ist, besteht in der Regel noch eine stark ausgeprägte Marktunsicherheit, die eine präzise Prognose der zu erwartenden Absatzzahlen erschwert. Aufgrund der geringen Stückzahlen und der bestehenden Marktunsicherheit zögern daher die meisten Unternehmen in dieser Phase, größere Investitionen in hocheffiziente, automatisierte Fertigungstechnologien vorzunehmen. Manuelle Fertigungsverfahren werden in diesem Stadium des Produktlebenszyklus meist als sinnvolle wirtschaftliche Alternative bevorzugt, während voll- oder teilautomatisierte Produktionsverfahren in der Regel erst nach einer erfolgreichen Markteinführung zum Einsatz kommen.

### 1.2.2 Technische Hemmnisse

Mit der Montage hybrider Mikrosysteme sind zudem sehr hohe technologische Anforderungen verbunden, die in der industriellen Praxis zu erheblichen Handhabungsproblemen führen:

Sehr filigrane Bauteilstrukturen, die überaus empfindlich gegenüber äußeren Verunreinigungen durch Schmutz oder kleinste Staubpartikel sind, erfordern in vielen Fällen die Montage unter **Reinraumbedingungen**. Aufwändige Filteranlagen, Luftschleusen sowie spezielle Schutzbekleidungen stellen hierbei einen nicht unerheblichen Kostenfaktor für die Produktion von Mikrosystemen dar. Da der Mensch hierbei eine der Hauptursachen für mögliche Verschmutzungen darstellt, ist man in der Praxis bestrebt, die Anwesenheit des Menschen in Produktionsanlagen für die Mikrofertigung auf ein absolutes Minimum zu beschränken.

Weitere Probleme bei der Handhabung von Miniatur- und Mikrobauteilen resultieren aus den geringen Dimensionen der zu handhabenden Objekte:

Aufgrund der äußerst geringen Bauteilabmessungen können selbst kleinste mechanische Belastungen zu einer **Überschreitung der zulässigen Flächenpressungen** der Bauteile führen. Eine hochpräzise und feinfühlig dosierende Greif- und Fügekräfte ist für die Handhabung von Mikrobauteilen daher von besonderer Bedeutung und macht den Einsatz hochgenauer Greif- und Positioniertechniken notwendig. Typische Prozessschritte bei der Durchführung von Mikromontageaufgaben erfordern Positioniergenauigkeiten von 10 µm und weniger. Aufgrund der begrenzten feinmotorischen Fähigkeiten des Menschen sind hierfür spezielle Vorrichtungen nötig. Beispielsweise werden zur genauen Positionierung von Bauteilen hochpräzise Kreuztische sowie spezielle Greifer und Pinzetten benötigt. Bedingt durch das begrenzte Auflösungsvermögen des menschlichen Auges sind darüber hinaus auch optische Vergrößerungsinstrumente, wie z. B. Lupen oder Stereomikroskope, erforderlich. Die Handhabung von Mikrobauteilen mit derartigen Hilfsmitteln stellt jedoch in der industriellen Praxis aus ergonomischer Sicht für die betroffenen Mitarbeiter eine starke Konzentrationsbelastung dar. Insbesondere führen das Problem der geringen Tiefenschärfe sowie das eingeschränkte Blickfeld stark vergrößernder optischer Instrumente zu einem sehr **ungewohnten Sinesinddruck bezüglich der Hand-Auge-Koordination**. Diese erhebliche mentale Be-

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Systeme zur manuellen Mikromontage

Derzeitige Arbeitsplätze zur manuellen Mikromontage (vgl. Abb. 2-1) bestehen typischerweise aus den folgenden Komponenten (HENSCHKE 1994):

- Mikropositioniertische mit manuell zu bedienenden Mikrometerschrauben,
- Substrathalter,
- Stereomikroskop zur dreidimensionalen Beobachtung des Montageprozesses, gegebenenfalls mit angeschlossener CCD-Kamera und Bildschirm,
- Beleuchtungseinrichtungen,
- Pinzetten und Mikrogreifer,
- Mikrolötwerkzeuge, Lotabscheider,
- Dispenswerkzeuge, UV-Lampen zur Kleberaushärtung,
- Bondwerkzeuge, Gap-Welding-Werkzeuge,
- Heizeinrichtungen (Heizplatten, -tische, -lampen, Heissluftgebläse) sowie
- diverse Zubehör- und Peripheriegeräte.

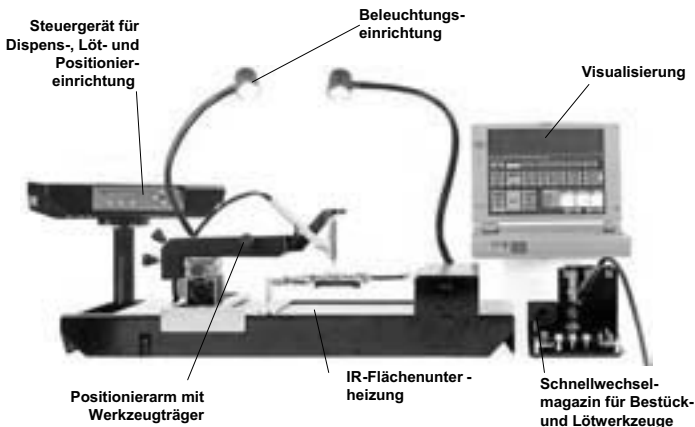


Abb. 2-1: Manueller Mikromontagearbeitsplatz (nach MARTIN 2003)

Aufgrund der Dimensionen der zu handhabenden Bauteile stößt die Montage mit manuell geführten Werkzeugen jedoch an ergonomisch zumutbare und technisch realisierbare

Grenzen. Insbesondere sehr große mechanische Untersetzungen führen beim Operator zu einer sehr ungewohnten Hand-Auge-Koordination. Zudem erfolgt die Handhabung der Bauteile ausschließlich durch visuelle Beobachtung, so dass eine Beurteilung der aufgebrachtten Prozesskräfte gar nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist. Eine feinfühlig und reproduzierbare Handhabung der Mikrobauteile ist daher praktisch nicht durchführbar, so dass die Gefahr der Beschädigung von Bauteilen besteht. Zudem ist mit dem Einsatz stark vergrößernder Optiken eine Reihe spezifischer Probleme verbunden. Insbesondere die geringe Tiefenschärfe sowie das eingeschränkte Sichtfeld behindern manuelle Montageoperationen sehr stark. Für den Operator ist es äußerst anstrengend und ermüdend, mehrere Stunden hinweg über ein Stereomikroskop gebeugt arbeiten zu müssen. Die eingeschränkte Bedienbarkeit manueller Mikromontagearbeitsplätze stellt in der industriellen Praxis ein erhebliches Problem dar, weshalb von der REFA eine Richtlinie zur ergonomischen Gestaltung manueller Mikromontagearbeitsplätze erlassen wurde (REFA 1988). Die Richtlinie sieht vor, die einzelnen Tätigkeiten einer Mikromontageaufgabe mit Hilfe einer so genannten sensomotorischen Analyse in Bezug auf die damit verbundenen Empfindungsbelastungen des Operators systematisch zu erfassen und zu bewerten. Hierbei werden visuelle, taktile und kinästhetische Empfindungen und Empfindungsbelastungen unterschieden. Die Gestaltung manueller Mikromontagearbeitsplätze hat sich streng nach ergonomischen Gesichtspunkten zu orientieren, so dass die mentale Belastung des Operators minimiert wird.

## 2.2 Telepräsenz- und Teleaktionssysteme

### 2.2.1 Begriffe und Definitionen

Aufgrund der zahlreichen Ausprägungen und Entwicklungen, die Telepräsenz- und Teleaktionssysteme in den letzten Jahrzehnten in den verschiedensten Anwendungsbereichen, wie z. B. Raumfahrt, Unterwasserforschung, Nukleartechnik etc., durchlaufen haben, hat sich eine Fülle von zum Teil ähnlichen oder sich überschneidenden Begriffen herausgebildet. Für das allgemeine Verständnis hinsichtlich des Aufbaus und der Funktionsweise von Telepräsenz- und Teleaktionssystemen wird daher zunächst eine Übersicht über die wesentlichen fachterminologischen Begriffe gegeben. Die folgenden De-

definitionen orientieren sich dabei eng an den im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 453 „Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion“ vereinbarten und verwendeten Begriffsdefinitionen (vgl. FÄRBER 1998):

Der Begriff **Telepräsenz** bezeichnet den Eindruck eines menschlichen **Operators**, sich in einer entfernten oder unzugänglichen Teleoperationsumgebung präsent zu fühlen. Dies wird durch die sensorielle Erfassung von Prozessinformationen der Teleoperationsumgebung erreicht. Diese werden dann auf eine für den menschlichen Operator natürliche und wirklichkeitsnahe Weise präsentiert. Als **Teleoperationsumgebung** wird die Umgebung bezeichnet, in welcher der Teleoperator arbeitet. Ein **Teleoperator** besteht aus Sensoren, Aktoren sowie multimodalen Kommunikationskanälen von und zum menschlichen Operator. Von **idealer Telepräsenz** spricht man im Falle einer totalen Immersion, d. h. im Falle eines vollständigen Eintauchens des Operators mit all seinen sensorischen Fähigkeiten in die Teleoperationsumgebung.

**Teleaktion** beinhaltet die beiden Begriffe Teleoperation und Telemanipulation. Teleaktion bedeutet hierbei das physikalische Agieren in einer Teleoperationsumgebung. Diese Aktionen werden vom Bediener initiiert und dann vom Teleoperator entweder (semi-)automatisch, d. h. durch intelligente oder symbolische Telerobotik, oder durch einfache, also direkte Teleoperation ausgeführt. Unter **Teleoperation** versteht man die Erweiterung der sensoruellen und manipulatorischen Fähigkeiten einer Person für das Wirken an einem entfernten bzw. unzugänglichen Ort. Im Gegensatz zur Teleoperation bedeutet der Begriff der **Telemanipulation** nur die Veränderung der Teleoperationsumgebung durch Objektmanipulationen. Der Begriff Telemanipulation beinhaltet also nicht unbedingt die Nutzung der sensoruellen oder manipulatorischen Fähigkeiten des menschlichen Bedieners, da die Initiierung einer Veränderung der Teleoperationsumgebung beispielsweise auch über Tastatureingaben oder Programmsequenzen erfolgen kann.

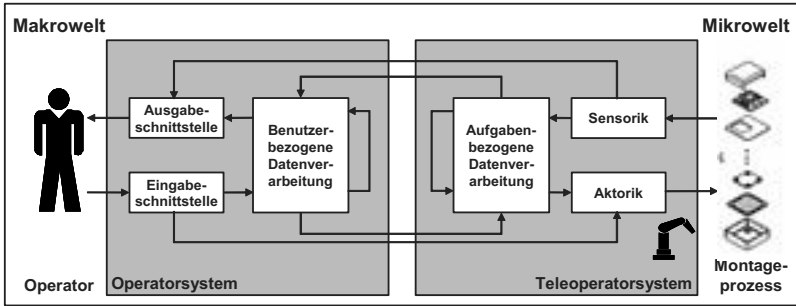
**Telerobotik** stellt eine weiterentwickelte Form der Teleoperation dar, bei welcher der menschliche Operator als Überwacher fungiert. Der Mensch formuliert Ziele, Nebenbedingungen, Pläne, Annahmen, Vorschläge und Kommandos, die durch einen zwischengeschalteten Computer an den Teleoperator übermittelt werden. Das System übermittelt an den Operator Informationen, z. B. über den Stand der durch den Teleoperator erfüllten Aufgaben, über Schwierigkeiten, Bedenken sowie sensorielle Daten bezüglich des Teleoperators und der Teleoperationsumgebung.



### 2.2.2 Teilsysteme und Komponenten

Abb. 2-2 zeigt den funktionalen Aufbau, der prinzipiell allen heutigen Telepräsenz- und Teleaktionssystemen zu Grunde liegt (vgl. SHERIDAN 1992 und UHL 2000). Dabei kann ein Telepräsenz- und Teleaktionssystem als ein Regelkreis betrachtet werden, der durch einen menschlichen **Operator** als Regler geschlossen wird. Das Gesamtsystem besteht aus den beiden Teilbereichen **Operatorsystem** und **Teleoperatorsystem**. Beide Bereiche sind in der Regel durch eine Barriere getrennt, die dem Operator eine unmittelbare Zugänglichkeit zum Prozess unmöglich macht. Diese kann in der Distanz, in gesundheitsgefährdenden Umweltbedingungen oder – wie in der Mikromontage – in den Dimensionen der zu handhabenden Bauteile begründet sein. Zur Überwindung dieser Barriere ist ein technischer Kommunikationskanal zur Übertragung multimodaler Informationen notwendig (vgl. Abschnitt 2.2.2.1). Die Aktionen des Operators werden über eine geeignete **Eingabeschnittstelle**, wie z. B. Steuerknüppel, Maus oder Datenhandschuhe, erfasst und an das Teleoperatorsystem übermittelt. Auf der Teleoperatorseite werden diese Informationen nach mehreren Datenverarbeitungsschritten an die **Aktorik** des Teleoperators übermittelt, der die eigentliche Durchführung der Prozessaufgabe, z. B. Bauteilhandhabung oder Fügeprozesse, übernimmt. Um dem Operator einen möglichst realistischen Telepräsenzeindruck zu vermitteln, ist es notwendig, Prozessinformationen über entsprechende **Sensorikkomponenten** zu erfassen, aufzubereiten und über eine multimodale **Ausgabeschnittstelle** an den Operator zurück zu melden. Sowohl auf der Operatorseite als auch auf der Teleoperatorseite erfolgt eine benutzer- bzw. aufgabenbezogene Datenverarbeitung. Als typische Beispiele sind hierbei u. a. zu nennen:

- Bereitstellung von Prozessinformationen über multimodale Schnittstellen bzw. alphanumerische Anzeigen,
- Skalierung und Koordinatentransformationen von Bewegungen und Kräften,
- Filteralgorithmen zur Glättung von Messsignalen oder Bewegungen (z. B. verursacht durch das „Handzittern“ des Operators).



**Abb. 2-2: Funktionale Struktur eines Telepräsenz- und Teleaktionssystems (UHL 2000, SHERIDAN 1992)**

### 2.2.2.1 Kommunikation

Eine leistungsfähige multimodale Datenübertragung zwischen der Operator- und der Teleoperatorseite ist für einen einwandfreien Betrieb eines Telepräsenz- und Teleaktionssystems von zentraler Bedeutung. Für produktionstechnische Anwendungsbereiche sind darüber hinaus auch die kommerzielle Verfügbarkeit und die Verbreitung eines geeigneten Kommunikationsmediums von großer Relevanz.

In den letzten 30 Jahren hat sich das Internet als weit verbreitetes Kommunikationsmedium etabliert, so dass ein leistungsfähiger Anschluss für eine globale Datenkommunikation heute an praktisch jedem beliebigen Standort der Welt zu günstigen wirtschaftlichen Konditionen vorausgesetzt werden kann. Andere Übertragungsmedien, wie z. B. Breitband-ISDN und ATM, bieten zwar äußerst performante technische Rahmendaten und weisen sehr gute Echtzeiteigenschaften auf, wie z. B. Datenübertragungsraten von bis zu 1 GBit/s, allerdings sind diese Technologien derzeit noch nicht überall verfügbar und können hinsichtlich der damit verbundenen finanziellen Bereitstellungskosten bei weitem nicht mit den heute gängigen Zugangskosten für das Internet konkurrieren. In der vorliegenden Arbeit werden daher nur die heute üblichen Internettechnologien als Grundlage für die Kommunikation telepräsenster Produktionssysteme näher betrachtet.

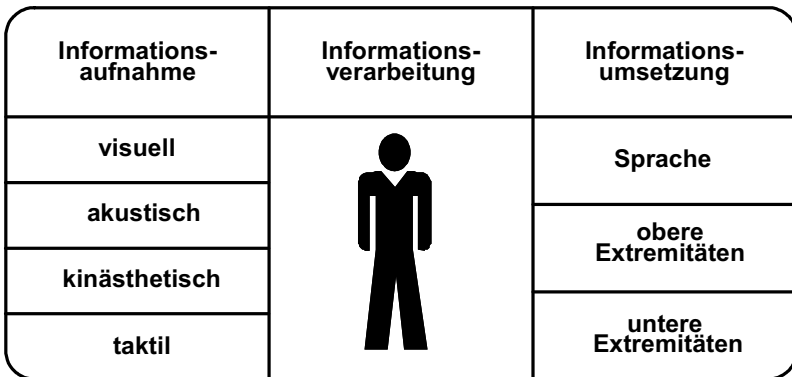
Als physikalische Übertragungsmedien zwischen der Operator- und der Teleoperatorstation sind prinzipiell alle physikalischen Möglichkeiten einer Informationsübertra-

### 3 Grundlagen der menschlichen Sinneswahrnehmung

Im Folgenden werden die systemergonomischen und physiologischen Grundlagen der menschlichen Sinneswahrnehmung dargestellt. Aufbauend auf den daraus resultierenden ergonomischen Anforderungen erfolgt dann in Kapitel 4 eine Zuordnung geeigneter Sensorkomponenten zu den einzelnen Sinneskanälen.

#### 3.1 Systemergonomie

Abb. 3-1 zeigt eine systemanalytische Betrachtung des Systemelements Mensch innerhalb eines Mensch-Maschine-Systems (MMS).



**Abb. 3-1: Grobstruktur des Systemelements Mensch (nach BUBB & SCHMIDTKE 1993)**

Nach MÜLLER-LIMMROTH 1993 ist die menschliche Sinneswahrnehmung eine aktive Leistung, d. h. dass die Aufmerksamkeit auf einen Wahrnehmungsgegenstand konzentriert wird. Zur Wahrnehmung von Informationen aus der Außenwelt sind so genannte Rezeptoren notwendig. Ein Rezeptor hat die Aufgabe, physikalische Reize der Umwelt in physiologische Reize zu transformieren. Durch das Einwirken äußerer Reize werden in den Rezeptoren Erregungen hervorgerufen, an die sich eine Empfindung anschließt.

Der Mensch besitzt insgesamt sechs Sinneskanäle, mit deren Hilfe er Informationen über seine Umwelt aufnehmen kann.

Im Einzelnen sind dies:

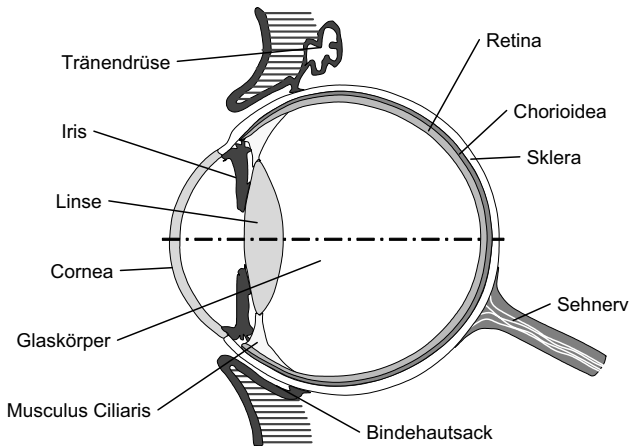
- die **visuelle**,
- die **auditive**,
- die **kinästhetische** (Kraft- und Bewegungswahrnehmung),
- die **taktile** (Berührungswahrnehmung),
- die **olfaktorische** (Geruchssinn) sowie
- die **gustatorische** Sinneswahrnehmung (Geschmackssinn).

Für die ergonomische Gestaltung von produktionstechnischen Anlagen spielen der Geruchssinn sowie der Geschmackssinn in der Regel keine Rolle und werden daher im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Der auditive Sinneskanal ist für die klassische manuelle Mikromontage i. d. R. ebenfalls von untergeordneter Bedeutung, da praktisch alle relevanten Prozessinformationen über den visuellen, kinästhetischen und taktilen Sinneskanal erfasst werden können. Akustische Informationen können den Operator einer manuellen Mikromontagestation in bestimmten Situationen unterstützen, indem er beispielsweise das Klicken beim Einrasten einer Schnappverbindung hört, allerdings handelt es sich hierbei i. d. R. um redundante Informationen zusätzlich zur kinästhetisch-taktilen Wahrnehmung. Daher wird auch der akustische Empfindungsbereich im Folgenden nicht weiter betrachtet. Es sei jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass in einem Telepräsenz- und Teleaktionssystem prinzipiell die Möglichkeit zur Modalitätswandlung besteht, indem beispielsweise Kontaktkräfte in hörbare Frequenzen umgewandelt werden, oder aber in sicherheitskritischen Situationen, wie z. B. bei Überschreitung der maximal zulässigen Fügekräfte, ein Alarmsignal an den Operator ausgegeben wird (vgl. Abschnitt 5.3.4, „Virtuelle Sensoren“).

Im Folgenden werden der visuelle, der kinästhetische und der taktile Sinneskanal detailliert behandelt. Aufbauend auf den ergonomischen Grundlagen der menschlichen Sinneswahrnehmung wird dann in Kapitel 4 ein Verfahren zur telepräsenzgerechten Auswahl geeigneter Sensoren entwickelt.

### 3.2 Visueller Empfindungsbereich

Abb. 3-2 zeigt den anatomischen Aufbau des menschlichen Augapfels. Der Augapfel wird durch eine weiße Lederhaut (Sklera) und die für den Stoffwechsel wichtige Aderhaut (Chorioidea) umhüllt. Die reizempfindlichen Teile des Augapfels sind die Netzhaut (Retina) mit ihren lichtempfindlichen Rezeptoren (Zäpfchen und Stäbchen) sowie die Nervenzellen (Ganglien) und Nervenfasern des Sehnervs. Die lichtdurchlässige Hornhaut (Cornea), die vordere, mit Kammerwasser gefüllte Augenkammer, die Linse sowie der gallertartige Glaskörper bilden zusammen ein optisches System, um ein Bild der Außenwelt auf die Netzhaut zu projizieren.



**Abb. 3-2: Anatomischer Aufbau des menschlichen Auges (nach MÜLLER-LIMMROTH 1993)**

Auf der Netzhaut befinden sich ca. 130 Millionen Rezeptoren, wovon ca. 7 Millionen Zäpfchen sind. Die lichtempfindlichen Stäbchen können nur hell und dunkel unterscheiden, jedoch keine Farben. Die Aufgabe des Farben- und Formenerkennens übernehmen die Zäpfchen, die mehr Licht als die Stäbchen benötigen und deshalb optimal bei Tageshelligkeit arbeiten. Sie sind sensitiv gegenüber den drei Grundfarben rot, grün und blau und können somit Mischungen aus diesen Farben erzeugen, beispielsweise gelb aus den beiden Grundfarben rot und grün, indem gleichzeitig Zäpfchen für rot und

grün aktiviert werden. Unter optimalen Bedingungen kann der Mensch zehn Millionen verschiedene Farbtöne unterscheiden.

Eine besonders wichtige Kenngröße bei der Durchführung von Mikromontageaufgaben ist das räumliche Auflösungsvermögen des menschlichen Auges. Der kleinste Sehwinkel, bei dem zwei getrennte Punkte mit bloßem Auge noch als solche wahrgenommen werden können, wird als der so genannte **kleinste auflösende Sehwinkel** bezeichnet. Er wird durch den Abstand zweier nichtbenachbarter Netzhautelemente (Stäbchen und Zäpfchen) bestimmt. Zwei Punkte können vom menschlichen Auge nur dann wahrgenommen werden, wenn sie nicht auf ein einziges bzw. auf zwei benachbarte Netzhaut-elemente abgebildet werden. Für den kleinsten auflösenden Sehwinkel gelten nach LINDNER 1999 folgende Richtwerte:

|                                 | <b>Kleinster auflösender Sehwinkel</b> |
|---------------------------------|--|
| Angestregtes Sehen              | 1 Winkelminute                         |
| Aufmerksames und scharfes Sehen | 2 Winkelminuten                        |
| Bequemes Sehen                  | 4 Winkelminuten                        |

**Tab. 3-1: Richtwerte für den kleinsten wahrnehmbaren Winkelabstand zweier Punkte (nach LINDNER 1999)**

Um möglichst viele Details eines Gegenstandes erkennen zu können, muss der Abstand zwischen dem zu betrachtenden Objekt und dem Auge verkleinert werden, so dass der Sehwinkel vergrößert wird. Der minimale Objektabstand, bei dem ein Punkt noch scharf auf der Netzhaut abgebildet werden kann, wird als Nahpunkt bezeichnet. Die so genannte deutliche Sehweite bezeichnet diejenige Entfernung, bei welcher das Auge noch ohne Ermüdung akkomodieren kann. Sie ist vom Lebensalter abhängig und wächst mit zunehmendem Alter. Als Mittelwert für die deutliche Sehweite wird i. d. R. die so genannte **Bezugssehweite**  $a_B = 25 \text{ cm}$  definiert. Bei Bezugssehweite und einem kleinsten auflösenden Sehwinkel von einer Winkelminute müssen zwei Punkte eines Gegenstandes ca.  $70 \mu\text{m}$  weit auseinander liegen, um mit bloßem Auge noch getrennt wahrgenommen werden zu können. Um noch kleinere Details erkennen zu können, ist die Zuhilfenahme optischer Instrumente notwendig. Die Funktion optischer Instrumente besteht darin, den Sehwinkel, unter dem ein Gegenstand wahrgenommen wird, zu vergrößern. Die wesentlichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Grundlagen zur Auslegung und Berechnung optischer Instrumente werden in Abschnitt 4.1 erläutert.

Neben dem räumlichen Auflösungsvermögen spielt auch das zeitliche Auflösungsvermögen des Auges für die ergonomische Gestaltung eines manuellen Mikromontagearbeitsplatzes eine große Rolle, insbesondere falls kamerabasierte Visualisierungssysteme verwendet werden. Das zeitliche Auflösungsvermögen wird durch die so genannte **Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF)** bestimmt. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass oberhalb dieser Frequenz intermittierende Lichtreize nicht mehr von einer konstanten Belichtung unterscheidbar sind. Für ein ermüdungsfreies Arbeiten ist eine ausreichende Bildwiederholrate notwendig, die oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz liegen muss. In der Regel sollte die Bildwiederholrate eines kamerabasierten Visualisierungssystems oberhalb von 85 Hz liegen. Falls die Bildwiederholrate unterhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz liegt, das Bild also sichtbar flimmert, versuchen die Augen sich durch ständige Adaption auf die Schwankungen der Leuchtdichte einzustellen und einen Ausgleich herbeizuführen. Diese übermäßige Belastung führt nach längerer Zeit zu Nervosität und Konzentrationsschwächen und beeinträchtigt die Wahrnehmung von Informationen bzw. Details.

Für die Räumlichkeits- und Tiefenerfassung ist das räumliche Sehen von besonderer Bedeutung. Da von einem räumlich ausgedehnten Gegenstand im linken und rechten Auge verschiedene Bilder auf die jeweilige Netzhaut projiziert werden, können diese vom Gehirn zu einem räumlichen Gesamteindruck verschmolzen werden. Für Mikromontageoperationen, bei denen die Erfassung der räumlichen Tiefeninformation besonders wichtig ist, werden daher häufig Stereomikroskope eingesetzt.

### 3.3 Taktiler und kinästhetischer Empfindungsbereich

**Taktilität** bezeichnet die taktile Sinneswahrnehmung (Hautsinn) über mechanische, thermische und schmerzempfindliche Rezeptoren in den verschiedenen Hautschichten. Der Begriff **Kinästhetik** umfasst die kinästhetische oder propriozeptive<sup>2</sup> Sinneswahrnehmung und Bewegung des eigenen Körpers sowie der auf den Körper wirkenden

---

<sup>2</sup> Propriozeption: [von latein. proprius = eigen, receptor = Empfänger], Propriozeption, Tiefensensibilität, durch Propriozeptoren vermittelte Wahrnehmung der Stellung und Bewegung des eigenen Körpers im Raum (HANSER 2000)

## 4 Sensoren und Messprinzipien

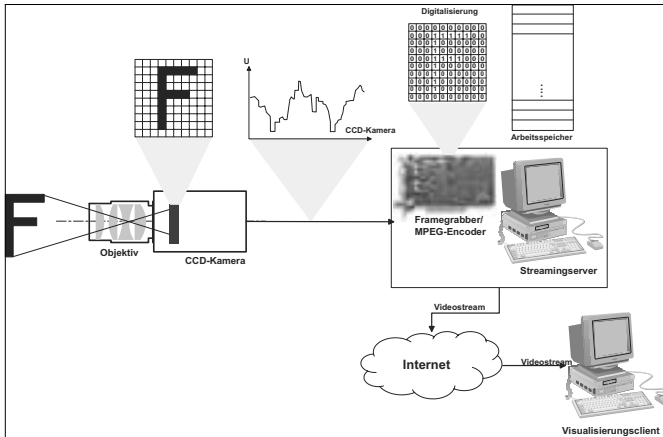
Zur Erfassung von Prozessinformationen der Teleoperatorseite ist der Einsatz von Sensoren als Ersatz für die menschlichen Sinnesrezeptoren notwendig. Im Folgenden werden geeignete Messprinzipien und Sensorsysteme, die zur Erfassung von Prozessinformationen für die Montage miniaturisierter Systeme geeignet sind, erläutert und entsprechend den menschlichen Sinnesmodalitäten klassifiziert. Aufbauend auf dieser Übersicht erfolgt dann die Ableitung einer Methodik zur systematischen Analyse des aufgaben- und prozessspezifischen Informationsbedarfs einer Mikromontageaufgabe sowie zur telepräsenzgerechten Auswahl von Sensorkomponenten bei der Anlagenprojektierung telepräsenster Montageanlagen.

### 4.1 Sensoren zur visuellen Informationserfassung

Die visuelle Erfassung der Position und Orientierung von Werkzeugen und Bauteilen ist für die telepräsenste Mikromontage von zentraler Bedeutung. Aufgrund der geringen Bauteilabmessungen, den hohen erforderlichen Positioniergenauigkeiten und des begrenzten menschlichen Auflösungsvermögens ist bei der manuellen Montage mikrosystem- und feinwerktechnischer Komponenten eine vergrößernde Darstellung der Teleoperatorseite notwendig. Abb. 4-1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Sensorsystems zur visuellen Prozessüberwachung in einem Telepräsenz- und Teleaktionssystem mittels Videostreaming über eine Internet- bzw. Intranetverbindung. Hierbei können folgende Kernkomponenten unterschieden werden:

- CCD-Kamera zur Erzeugung eines analogen Videosignals,
- Objektiv zur optischen Abbildung der Teleoperatorseite,
- Video-Server mit Framegrabber zur Digitalisierung des analogen Videosignals,
- MPEG-Komprimierungskarte zur Erzeugung eines digitalen Videostreams,
- Internet- bzw. Intranet-Kommunikationsnetzwerk sowie
- Video-Client zur Visualisierung des übertragenen Bildes.



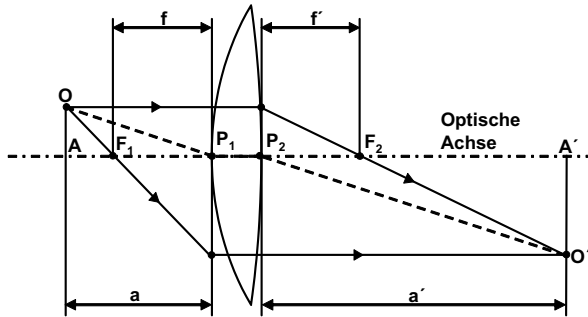


**Abb. 4-1: Videobasierte Visualisierung mit Informationsübermittlung via Internet**

Für eine optimale visuelle Erfassung der durchzuführenden Mikromontageaufgabe müssen die einzelnen Komponenten sorgfältig ausgewählt und aufeinander abgestimmt werden. Die Auslegung dieser optischen Instrumente wird dabei im Wesentlichen durch folgende fünf Fundamentalparameter bestimmt:

- Der notwendige Abbildungsmaßstab,
- der Arbeitsabstand,
- das geforderte Sichtfeld,
- die notwendige optische Auflösung sowie
- die erforderliche Tiefenschärfe.

Aufgabe des optischen Abbildungssystems ist es, die von einem räumlichen Gegenstand reflektierten Lichtstrahlen auf eine Bildebene zu projizieren. Jedes optische System kann ersatzweise auf eine dicke Linse reduziert werden. Der Strahlenverlauf und somit die optischen Abbildungseigenschaften einer derartigen dicken Linse lassen sich bestimmen, wenn die **Gesambrennweite** und die **Lage der Hauptebenen** des Systems bekannt sind (HERING ET AL. 1989). Abb. 4-2 zeigt den Strahlenverlauf durch eine dicke Linse.



**Abb. 4-2: Abbildung eines Gegenstands durch ein optisches System**

Mathematisch lässt sich die Abbildung eines Gegenstands durch die so genannte **Abbildungsgleichung** beschreiben.

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \quad (\text{Gleichung 4-1})$$

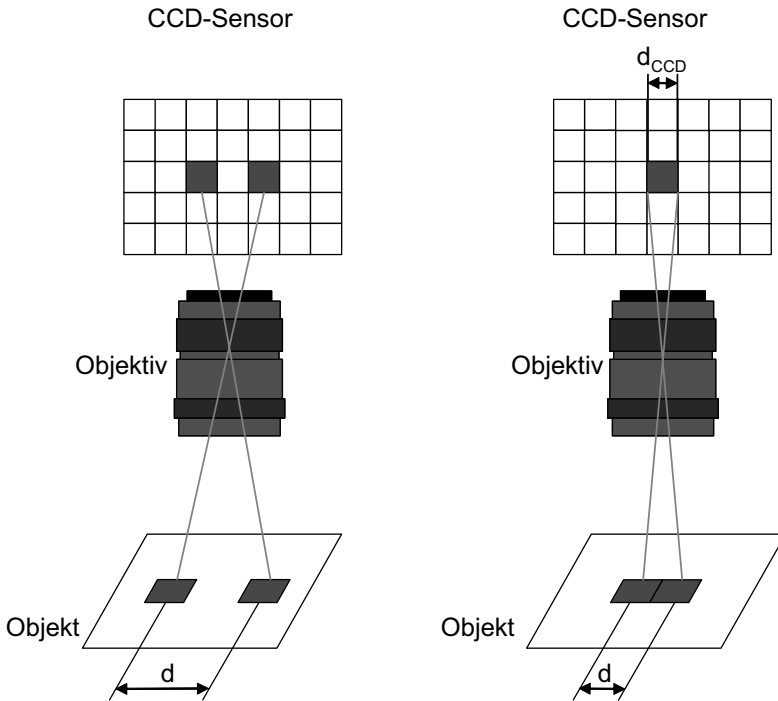
Hierbei bezeichnet  $a$  die Gegenstandsweite und die  $a'$  die Bildweite sowie  $f'$  die bildseitige Brennweite des Lensensystems. Der **Abbildungsmaßstab  $\beta'$  eines optischen Systems** wird durch das Verhältnis von Bild- und Gegenstandsweite ( $a'$  und  $a$ ) bzw. Bild- zu Gegenstandsgröße ( $B$  und  $G$ ) bestimmt:

$$\beta' = \frac{a'}{a} = \frac{B}{G} \quad (\text{Gleichung 4-2})$$

Der erforderliche Abbildungsmaßstab eines optischen Lensensystems ergibt sich aus der Größe des zu beobachtenden **Sichtfeldes** sowie der **Bildgröße**, welche i. d. R. durch die Abmessungen der sensitiven Fläche des CCD-Chips in der Kamera festgelegt ist.

Die **Auflösung** eines optischen Systems gibt an, inwieweit zwei eng benachbarte Punkte noch getrennt abgebildet werden können. Setzt man voraus, dass die Pixelgröße  $d_{\text{CCD}}$  die begrenzende Größe der optischen Auflösung ist, lässt sich die resultierende Auflösung wie folgt abschätzen: Zwei eng benachbarte Punkte eines Gegenstands können dann noch getrennt voneinander aufgelöst werden, wenn sie auf zwei verschiedene CCD-Pixel projiziert werden (vgl. Abb. 4-3):

$$d > \frac{d_{\text{CCD}}}{\beta'} \quad \text{(Gleichung 4-3)}$$

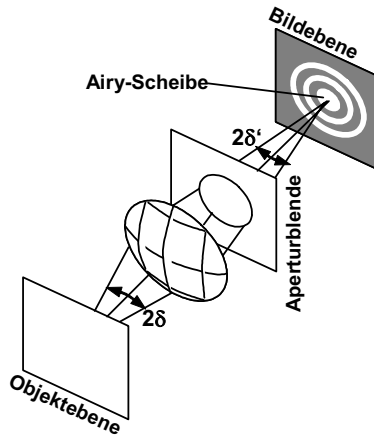


**Abb. 4-3: Einfluss der CCD-Pixelgröße auf die Auflösung eines optischen Systems**

Das mit einem optischen Abbildungssystem **physikalisch maximal erreichbare Auflösungsvermögen** wird durch Beugungseffekte begrenzt. Ein absolut perfektes optisches Linsensystem bildet einen Objektpunkt nicht als Punkt, sondern als konzentrisches Beugungsmuster in der Bildebene ab (vgl. Abb. 4-4). Hierbei wird das Maximum 0. Ordnung in der Mitte als so genannte Airy-Scheibe bezeichnet. Der Durchmesser  $r'$  dieser Airy-Scheibe lässt sich mit Hilfe des Kriteriums nach Rayleigh abschätzen (PAUL 1999):

$$r' \geq 1,22 \cdot \frac{\lambda}{NA'} = 1,22 \cdot \frac{\lambda \cdot |\beta'|}{NA} \quad \text{(Gleichung 4-4)}$$

Hierbei bezeichnen  $\lambda$  die Wellenlänge des verwendeten Lichts sowie  $NA'$  bzw.  $NA$  die bildseitige bzw. objektseitige numerische Apertur des verwendeten Objektivs. Bei inkohärenter Beleuchtung können nach dem Rayleigh-Kriterium zwei benachbarte Punkte auf zwei verschiedene CCD-Pixel abgebildet werden, wenn der Durchmesser der Airy-Scheibe kleiner als das Pixelmaß des CCD-Chips ist.



**Abb. 4-4: Physikalische Auflösungsgrenze eines optischen Systems (nach HÖHN 2001)**

Neben der Vergrößerung und der erreichbaren Auflösung ist die **Tiefenschärfe** ein weiteres wichtiges Kriterium für die Auslegung eines optischen Systems. Eine absolut scharfe Abbildung ist nur für diejenigen Punkte eines Gegenstands möglich, die exakt in der idealen Objektebene liegen. Objektpunkte vor oder hinter der idealen Objektebene werden als Unschärfekreise mit dem Durchmesser  $u'$  abgebildet (vgl. Abb. 4-5).

Da in der Praxis die vom Teleoperator zu handhabenden Objekte eine gewisse räumliche Ausdehnung haben, ist eine bestimmte Unschärfe unvermeidlich. Als Schärfentiefe wird der Objektbereich bezeichnet, der es ermöglicht, einen Punkt bei einem tolerierbaren Durchmesser  $u'$  des Unschärfekreises noch „scharf“ abzubilden. Hierbei bezeichnet  $a_v$  bzw.  $a_h$  den maximalen bzw. minimalen Abstand der Objektebenen zur Hauptebene des optischen Systems.

## 5 Telepräsenzgerechte Sensormodule

Ausgehend von den Anforderungen telepräsenster Montagesysteme (vgl. Kapitel 2), den Grundlagen der menschlichen Sinneswahrnehmung (vgl. Kapitel 3) sowie den für die Präzisions- und Mikromontage zur Verfügung stehenden physikalischen Messprinzipien (vgl. Kapitel 4) wird im Folgenden ein Entwurfsmuster nach dem Prinzip der logischen Sensoren für den telepräsenzgerechten Einsatz von Sensor- und Signalverarbeitungseinheiten präsentiert. Basierend auf diesem Entwurfsmuster wird dann eine Baukastensystematik zum Aufbau einer Komponentenbibliothek von Sensormodulen abgeleitet. Diese bildet dann die Grundlage für spezifische Sensornetzwerke, die anschließend in aufgabenspezifische Werkzeugkonzepte integriert werden können (vgl. Kapitel 6). Die Anwendung dieser Bibliothek wird exemplarisch anhand ausgewählter Sensormodule, die für typische Pick & Place-Aufgaben in der Mikromontage einsetzbar sind, erläutert.

### 5.1 Logische Sensoren als Entwurfsmuster für telepräsenzgerechte Sensormodule

Für die realitätsnahe Durchführung telepräsenster Manipulationsaufgaben ist der Einsatz von Sensor- und Signalverarbeitungskomponenten unabdingbar. Bedingt durch die Tatsache, dass telepräsenste, manuell gesteuerte Produktionseinrichtungen vorwiegend für die Fertigung kleiner bis sehr kleiner Stückzahlen geeignet sind, müssen die einzusetzenden Sensoren ständig an neue, wechselnde Anforderungen angepasst werden. Aus produktionstechnischer Sicht ist dies nur durch die Wiederverwendung von Soft- und Hardwaremodulen wirtschaftlich möglich.

Aufgrund der Vielzahl physikalischer Messprinzipien, der mannigfaltigen Möglichkeiten zur Sensordatenverarbeitung sowie der Fülle an unterschiedlichen Einsatzszenarien in der telepräsenster Mikromontage ist der Einsatz wieder verwendbarer Standardsensormodule, die flexibel in beliebige Szenarien integriert werden können, nur sehr begrenzt möglich. Derartige Module verringern zwar den Anpassungsaufwand von Sensoranwendungen, indem sie die Flexibilität einer Anlage erhöhen. Allerdings handelt es sich hierbei um starre, vorgedachte Lösungen, die dem Betreiber einer telepräsenster

Produktionsanlage keinerlei Unterstützung bei der Strukturierung und Implementierung neuartiger, komplexer Sensoranwendungen bieten.

Zur Lösung dieser Problematik bietet sich der Einsatz von Entwurfsmustern an. Nach BALZERT 1999 gibt „ein **Entwurfsmuster** [...] eine bewährte, generische Lösung für ein immer wiederkehrendes Entwurfsproblem an, das in bestimmten Situationen auftritt“. Ein Entwurfsmuster kann daher als eine abstrakte Beschreibung oder Schablone zur Lösung einer Klasse gleich gearteter Aufgaben aufgefasst werden. Nach GAMMA ET AL. 1996 ist die Anwendung eines Entwurfsmusters „keine Wiederverwendung von Programmcode, sondern [...] mit einer neuen Implementierung verbunden.“

Eines der bekanntesten Entwurfsmuster zur Strukturierung von Sensoranwendungen wurde von HENDERSON & SHILCRAT 1984 entwickelt. Hierzu wird der Sensorbegriff durch die Einführung so genannter „logischer Sensoren“ verallgemeinert und formalisiert. Logische Sensoren sind dabei lediglich durch ihren charakteristischen Ergebnistyp, jedoch nicht durch die Art der physikalischen Messprinzipien oder Algorithmen, durch die dieses Ergebnis zustande kommt, definiert. Formal können logische Sensoren durch die folgenden Bestandteile beschrieben werden (vgl. Abb. 5-1):

- (a) Ein **eindeutiger Sensorname** (Sensor-ID). Durch ihn kann der logische Sensor identifiziert und von außen angesprochen werden.
- (b) Ein **charakteristischer Ausgabevektor**. Dieser kennzeichnet den spezifischen Datentyp des Sensors.
- (c) Ein **Interpretermodul**. Dieses interpretiert Kontrollkommandos von anderen logischen Sensoren und veranlasst die entsprechenden Sensoraktivitäten.
- (d) **Eine oder mehrere alternative Verarbeitungseinheiten**, die aus einer Menge spezifischer Eingabequellen, d. h. andere logische Sensoren, den charakteristischen Ausgabevektor des logischen Sensors bestimmen. Jede Verarbeitungseinheit greift hierbei auf eine Reihe weiterer logischer Sensoren als Eingabequellen zu.
- (e) Ein **Selektor**. Dessen Eingangsvektor wird aus Daten anderer logischer Verarbeitungseinheiten gebildet. Seine Aufgabe ist es, die korrekte Funktion der ihm untergeordneten Programmeinheiten zu überwachen und zu entscheiden,

welches Ergebnis als Ausgabevektor anderen logischen Sensoreinheiten zugeht. Ferner kann der Selektor das Versagen einer Verarbeitungseinheit feststellen und bei Bedarf auf eine alternative logische Verarbeitungseinheit umschalten.

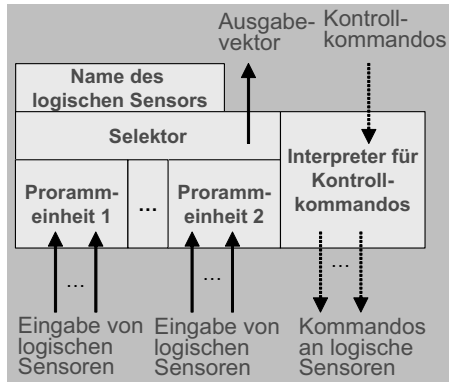


Abb. 5-1: Aufbau eines logischen Sensors (nach HENDERSON & SHILCRAT 1984)

Mehrere logische Sensoren können logische Verarbeitungsnetzwerke bilden, die aus mehreren, hierarchisch gegliederten Subnetzwerken bestehen. Der Informationsfluss innerhalb des Verarbeitungsnetzwerks wird hierbei über Kontrollflüsse zwischen den einzelnen Subnetzwerken koordiniert.

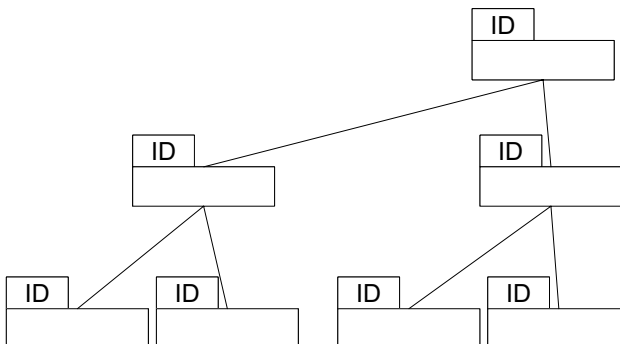


Abb. 5-2: Logische Verarbeitungsnetzwerke (nach HENDERSON & SHILCRAT 1984)

## 5.2 Implementierung logischer Sensoren

Basierend auf dem Konzept logischer Sensoren wird im Folgenden eine Grundstruktur für telepräsenzgerechte Sensorkomponenten entwickelt. Entsprechend den einzelnen Schritten in der Signalverarbeitungskette sind bei der Integration einer Sensorkomponente in ein telepräsenz Montagesystem die drei funktionalen Aufgabenbereiche „physikalische Messwerterfassung“, „Sensordatenverarbeitung“ und „Kommunikation“ zu unterscheiden. Daraus lässt sich unmittelbar eine entsprechende dreischichtige Sensorstruktur ableiten, welche in Abb. 5-3 dargestellt ist:

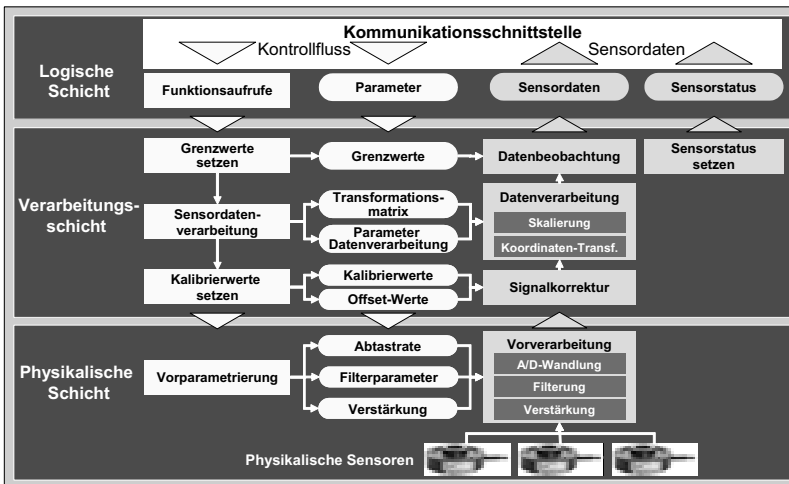
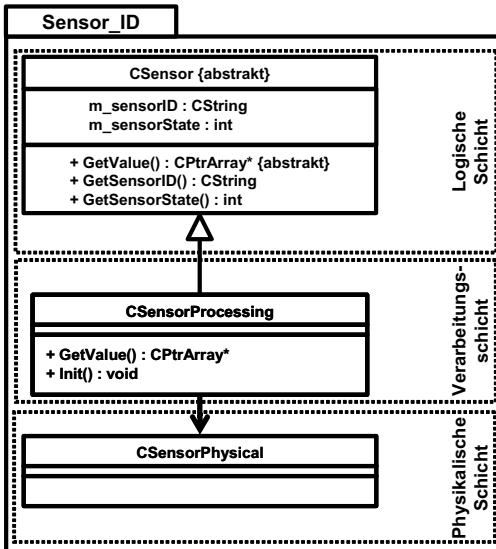


Abb. 5-3: Entwurf einer telepräsenzgerechten Sensorgrundstruktur (nach SCHILP ET AL. 2004)

Während in der physikalischen Schicht die physikalischen Sensorgeräte über entsprechende Treiberprogramme angesprochen werden, erfolgt in der Verarbeitungsschicht die Implementierung von Funktionen zur Sensordatenverarbeitung, wie z. B. Signalkorrektur, Koordinatentransformationen oder Sensordatenfusion. Die logische Schicht wiederum bildet die Kommunikationsschnittstelle, über die eine Sensorkomponente von außen angesprochen werden kann.



Die Umsetzung der beschriebenen Sensorgrundstruktur erfolgt mittels objektorientierter Methoden (siehe Abb. 5-4). Hierbei werden die Eigenschaften und Funktionen der einzelnen Verarbeitungsschichten eines logischen Sensors in Klassen zusammengefasst und gekapselt. Nach OESTEREICH 1998 ist „eine **Klasse** [...] die Definition der Attribute, Operationen und der Semantik für eine Menge von Objekten. [...] Alle Objekte dieser Klasse entsprechen dieser Definition“.



**Abb. 5-4: Implementierung der Sensorgrundstruktur**

Die Eigenschaften und Funktionen der logischen Schicht sind in einer abstrakten Oberklasse `CSensor` abgebildet. Alle logischen Sensoren werden von dieser Klasse abgeleitet. Eine abstrakte Klasse enthält mindestens eine abstrakte Funktion, welche lediglich aus einem Funktionsrumpf besteht, der einen Rückgabewert und eine Parameterliste, jedoch keinerlei Implementierung enthält. Die Implementierung muss daher in einer Unterklasse, welche die Methoden und Attribute der abstrakten Oberklasse erbt, erfolgen.

Die abstrakte Klasse `CSensor` beinhaltet dabei konkrete Funktionen und Attribute, um den eindeutigen Sensornamen (Sensor-ID) sowie den Zustand eines Sensors zu hinter-

## 6 Exemplarische Anwendung und Erprobung

Im Folgenden werden die in Kapitel 5 entwickelten telepräsenzgerechten Sensormodule sowie deren Integration in die Rahmenarchitektur telepräsender Montageanlagen anhand einer Pilotanlage experimentell gezeigt. Als konkretes Anwendungsbeispiel dient hierbei die Montage eines halbleiterbasierten Mikrosystems auf einem Testsubstrat. Zusätzlich zum Nachweis der technischen Machbarkeit und der experimentellen Erprobung des telepräsensten Montagesystems wird eine technische und wirtschaftliche Bewertung durchgeführt.

### 6.1 Beschreibung der Montageaufgabe

Abb. 6-1 zeigt die durchzuführende Montageaufgabe. Zunächst ist vom Operator ein quaderförmiger Mikrochip mit den Abmessungen 1,5 mm x 1,5 mm x 1 mm aus einem Magazinbehälter zu entnehmen. Zuvor ist das Bauteil anhand einer Sichtprüfung auf eventuelle Beschädigungen zu überprüfen. Ferner ist zu kontrollieren, ob das Bauteil mit der Oberseite nach oben im Magazinbehälter liegt. Nachdem der Chip gegriffen wurde, wird er zunächst zum Substrat gefördert und dort grob vorpositioniert. Anhand von Referenzmarken auf dem Testsubstrat wird die horizontale Position sowie die Orientierung des Bauteils feinjustiert, bevor es auf dem Substrat aufgesetzt wird.

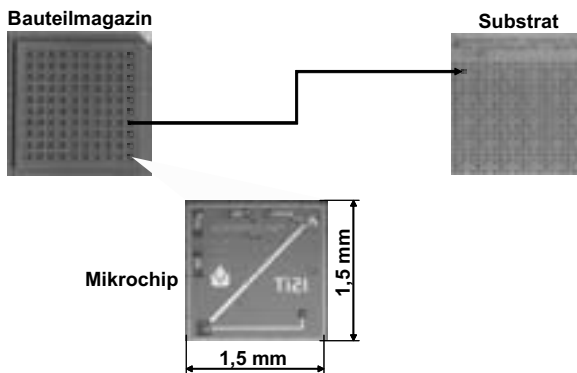


Abb. 6-1: Montageaufgabe

In Abb. 6-2 ist die schematische Darstellung der Montageaufgabe anhand von Elementaroperationen entsprechend VDI 2860 dargestellt.

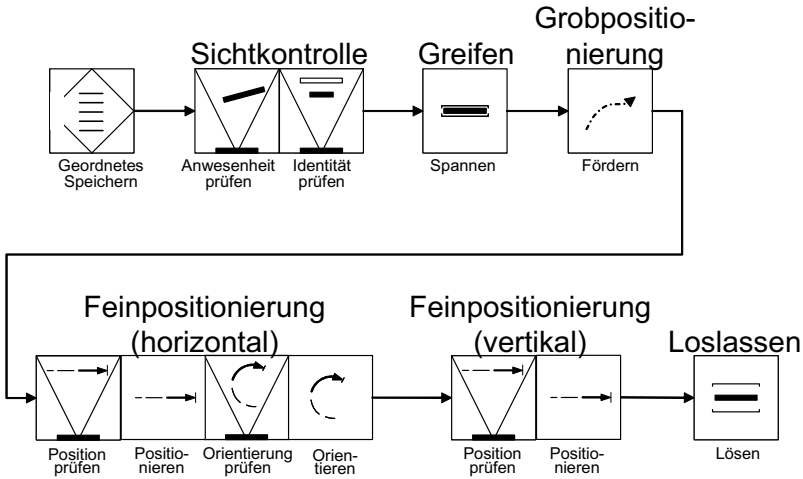


Abb. 6-2: Zerlegung der Montageaufgabe in Elementaroperationen (VDI 2860)

Gemäß dem in Abschnitt 4.3 erläuterten Verfahren zur telepräsenzgerechten Sensorauswahl werden die Prozessgrößen der Montageaufgabe zunächst mittels einer quantitativen Analysetabelle (Abb. 6-3) erfasst:

| Prozessschritte                    | 1 Position/Orientierung<br>[mm] bzw. [°] |                  |                  |             |             |                 | 2 Kräfte/Momente<br>[N] bzw. [Nm] |       |                   |       |       |       |
|------------------------------------|--|------------------|------------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------------------------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
|                                    | x  | y                | z                | $\varphi_x$ | $\varphi_y$ | $\varphi_z$     | $F_x$                             | $F_y$ | $F_z$             | $M_x$ | $M_y$ | $M_z$ |
| 1. Sichtkontrolle                  | -  | -                | -                | -           | -           | -               | -                                 | -     | -                 | -     | -     | -     |
| 2. Bauteil greifen                 | 50<br>$\pm 0.1$                          | 50<br>$\pm 0.1$  | 10<br>$\pm 0.1$  | -           | -           | 10<br>$\pm 0.1$ | -                                 | -     | 0.5<br>$\pm 0.01$ | -     | -     | -     |
| 3. Grobpositionierung              | 100<br>$\pm 1.0$                         | 100<br>$\pm 1.0$ | 100<br>$\pm 1.0$ | -           | -           | 10<br>$\pm 1.0$ | -                                 | -     | -                 | -     | -     | -     |
| 4. Feinpositionierung (horizontal) | 1<br>$\pm 0.05$                          | 1<br>$\pm 0.05$  | -                | -           | -           | 5<br>$\pm 0.1$  | -                                 | -     | -                 | -     | -     | -     |
| 5. Feinpositionierung (vertikal)   | -  | -                | 10<br>$\pm 0.05$ | -           | -           | -               | -                                 | -     | 0.5<br>$\pm 0.01$ | -     | -     | -     |
| 6. Loslassen                       | -  | -                | -                | -           | -           | -               | -                                 | -     | -                 | -     | -     | -     |

Abb. 6-3: Quantitative Prozessgrößenanalyse

Abb. 6-3 zeigt, dass für die Ausführung der Montageaufgabe lediglich ein Teilbereich der theoretisch möglichen Prozessgrößen sensorisch erfasst werden muss. Insbesondere ist für das Greifen bzw. Aufsetzen des Mikrochips lediglich eine Überwachung der in vertikaler Richtung wirkenden Prozesskraft notwendig, um eine Bauteilbeschädigung ausschließen zu können.

Anschließend erfolgt eine sensomotorische Bewertung, um den Informationsbedarf des Operators unter telepräsenzspezifischen Gesichtspunkten beurteilen zu können (vgl. Abb. 6-4):

| Empfindungsbereiche   |  |                           |                    |                   |                  |                       |                        |                           |                     |               |                           |                        |                            |                    |                     |                               |   |
|---|--|---------------------------|--------------------|-------------------|------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|---------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|---|
| Sensomotorische Analysefrage<br>„Welche Empfindungen innerhalb der in Frage kommenden Empfindungsbereiche sind für jeden einzelnen Prozessschritt notwendig?“ |  | 1 Visuell                 |                    |                   |                  |                       |                        | 2 Taktile                 |                     |               |                           |                        | 3 Kinästhetisch            |                    |                     |                               |   |
|   |  | Helligkeitsunterscheidung | Farbunterscheidung | Kontrastempfinden | Schärfeempfinden | Distanzunterscheidung | Räumlichkeitsempfinden | Ziel-/Richtungssicherheit | Härteunterscheidung | Beweglichkeit | Oberflächenunterscheidung | Substanzunterscheidung | Elastizitätsunterscheidung | Formunterscheidung | Zug-/Druckempfinden | Ziel- und Richtungssicherheit |   |
| Prozessschritte   |  |                           |                    |                   |                  |                       |                        |                           |                     |               |                           |                        |                            |                    |                     |                               |   |
| 1. Sichtkontrolle   |  | 1                         | 0                  | 1                 | 1                | 0                     | 0                      | 0                         | 0                   | 0             | 0                         | 0                      | 0                          | 0                  | 0                   | 0                             |   |
| 2. Bauteil greifen  |  | 1                         | 0                  | 1                 | 1                | 1                     | 1                      | 1                         | 0                   | 0             | 0                         | 0                      | 0                          | 0                  | 1                   | 1                             |   |
| 3. Grobpositionierung   |  | 0                         | 0                  | 0                 | 0                | 0                     | 0                      | 1                         | 1                   | 0             | 0                         | 0                      | 0                          | 0                  | 0                   | 0                             | 0 |
| 4. Feinpositionierung (horizontal)  |  | 0                         | 0                  | 1                 | 1                | 1                     | 1                      | 1                         | 0                   | 0             | 0                         | 0                      | 0                          | 0                  | 0                   | 0                             |   |
| 5. Feinpositionierung (vertikal)  |  | 0                         | 0                  | 0                 | 1                | 1                     | 1                      | 1                         | 0                   | 0             | 0                         | 0                      | 0                          | 0                  | 1                   | 1                             |   |
| 6. Loslassen  |  | 0                         | 0                  | 0                 | 0                | 0                     | 0                      | 0                         | 0                   | 0             | 0                         | 0                      | 0                          | 0                  | 0                   | 0                             |   |

Abb. 6-4: Sensomotorische Bewertung der Montageaufgabe

Wie die Tabelle zeigt, ist lediglich für die Prozessschritte 2 und 5, nämlich beim Greifen bzw. Aufsetzen des Mikrochips, die Erfassung und Bereitstellung kinästhetischer Informationen notwendig. Die übrigen Montageschritte können durch eine rein visuelle Kontrolle erfasst werden.

Aufgrund der obigen Prozessgrößenanalysen wurde folgende Sensorkonfiguration ermittelt: Für die Erfassung der vertikalen Prozesskraft beim Aufnehmen bzw. Absetzen des Bauteils ist ein uniaxialer Kraftsensor mit einem Messbereich von mindestens 0,5 N

vorzusehen. Im Sinne eines ausreichenden Überlastschutzes sollte der Sensor mit einem Sicherheitsfaktor 10 gegen Überlastung ausgestattet sein. Da das relative Kraftauflösungsvermögen des Menschen bezogen auf die aktuell wirkende Absolutkraft zwischen 5-10% liegt (vgl. Abschnitt gemäß 3.3.3), folgt daraus ein Auflösungsvermögen des Kraftsensors von mindestens 0,0125 N, wenn eine mittlere Fügekraft von 50% der maximal zulässigen Prozesskraft von 0,5 N angenommen wird. Die zeitliche Abtastung der Kraftsignale sollte zwischen 20-30 Hz liegen, um dem Operator einen qualitativ hochwertigen kinästhetischen Eindruck vermitteln zu können. Ein Vergleich der am Markt verfügbaren Sensoren ergibt, dass diese Messaufgabe mittels handelsüblichen DMS-Messaufnehmern in Verbindung mit einem Trägerfrequenzmessverstärker kostengünstig und zuverlässig durchgeführt werden kann.

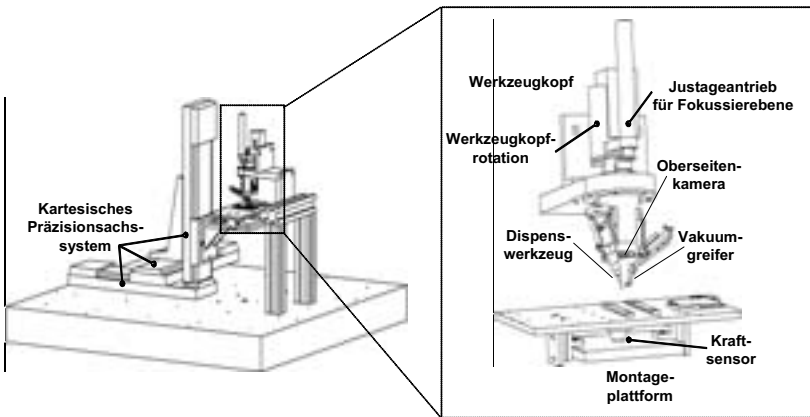
Die in der quantitativen Prozessgrößenanalyse geforderten Positionier- bzw. Orientierungsgenauigkeiten von 0,05 mm bzw.  $0,1^\circ$  sind mit üblichen Weg- bzw. Winkelsensoren kommerzieller Präzisions-Kinematikachsen ebenfalls problemlos erreichbar.

Für die visuelle Überwachung der Feinpositionierung ist ein hochauflösendes Optikmodul mit einem minimalen Sichtfeld von mindestens 1,5 mm x 1,5 mm vorzusehen, damit der zu handhabende Mikrochip präzise auf dem Substrat ausgerichtet werden kann und gleichzeitig vollständig im Sichtfeld der Kamera zu sehen ist. Um dem Operator die Durchführung der Grobpositionierung und die Makronavigation im Arbeitsraum zu erleichtern, empfiehlt es sich, mindestens eine zusätzliche Kamera mit einem Sichtfeld von ca. 200 mm x 200 mm in das Montagesystem zu integrieren. Auf den Einsatz von Farbkameras kann dabei verzichtet werden, da keine farbigen Merkmale zu unterscheiden sind. Im folgenden Abschnitt werden der Aufbau des Teleoperators sowie die Integration der Sensorkomponenten näher erläutert.

## 6.2 Teleoperatorseite

Als Ausgangsbasis für die experimentelle Evaluierung dient die in Abb. 6-5 dargestellte modular aufgebaute, telepräsente Montageanlage, welche aus drei aufgabenspezifisch konfigurierbaren Systemmodulen besteht.

Sowohl für die Durchführung großräumiger Grobpositionierbewegungen als auch für präzise Feinpositionierungsaufgaben wird eine kartesische Kinematik eingesetzt, welche aus drei translatorischen Präzisionsachsen der Fa. Physik Instrumente vom Typ M521 DD zusammengesetzt ist. Die nominelle Positionierauflösung beträgt laut Herstellerangaben in jeder Achsrichtung  $0,1 \mu\text{m}$  (PHYSIK INSTRUMENTE 2005). Insgesamt kann hiermit ein Arbeitsraum von  $204 \text{ mm} \times 204 \text{ mm} \times 204 \text{ mm}$  abgedeckt werden.



**Abb. 6-5: Hardware-Aufbau der Teleoperatorseite (ZÄH ET AL. 2003A)**

Die kartesische Positionierkinematik kann mit einer aufgabenspezifisch konfigurierbaren Montageplattform ausgerüstet werden. Auf dieser Plattform befinden sich sowohl die Magazine zur Bereitstellung der zu montierenden Bauteile, als auch das Substrat, auf dem die Montageoperation durchgeführt wird.

Zur Integration prozessspezifischer Handhabungs- und Fügwerkzeuge wird das multifunktionale Montagewerkzeug SATURN (Sensor Based Tool Using Robot Vision, vgl. HÖHN 2001) verwendet, welches am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der TU München ursprünglich für den Einsatz in automatisierten Mikromontageanlagen entwickelt wurde. Für die Anwendung in einem telepräsenten Mikromontageszenario ist der SATURN-Werkzeugkopf an einem feststehenden Trägergestell befestigt. Der gesamte Werkzeugkopf kann mittels eines Schrittmotors  $360^\circ$  um seine Hauptachse rotiert werden. Zusammen mit den drei translatorischen Freiheits-

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Trotz aller Bestrebungen zur Automatisierung von Produktionsabläufen bei der Montage variantenreicher, hybrider Mikrosysteme in Kleinst- und Kleinserien werden auch in Zukunft manuell durchgeführte Montageoperationen unverzichtbar bleiben. Die begrenzten sensomotorischen Fähigkeiten des Menschen sowie die speziellen Randbedingungen in der Mikromontage stellen ein erhebliches Hindernis für die Handhabung von Mikrobautteilen mit konventionellen Hilfsmitteln, wie z. B. Pinzetten und Mikroskopen, dar. Für die betroffenen Mitarbeiter ist damit eine sehr hohe Konzentrationsbelastung verbunden.

Für eine präzise und geschickte Handhabung miniaturisierter Bauteile ist ein umfassender visueller und haptischer Sinnesindruck von entscheidender Bedeutung. Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es daher, den Menschen bei der manuellen Montage miniaturisierter Bauteile bestmöglich zu unterstützen. Eine Betrachtung des Stands der Technik zeigt, dass Teleaktions- und Telepräsenzsysteme hierbei als ein prinzipiell geeigneter technologischer Lösungsansatz angesehen werden können. Allerdings sind die bislang bekannten Lösungen für einen wirtschaftlichen, industriellen Einsatz nur bedingt geeignet, da es sich hierbei um proprietäre Lösungen handelt, die mit erheblichem Aufwand an sich wandelnde Produktionsszenarien angepasst werden müssen. Insbesondere die anwendungsspezifische Integration von Sensorkomponenten wird mangels einheitlicher, offener Systemschnittstellen sowie durch das Fehlen wieder verwendbarer Sensormodule in der produktionstechnischen Praxis erheblich erschwert.

Zur Überwindung dieser Problematik wurde im Rahmen dieser Arbeit zunächst eine Methodik zur telepräsenzgerechten und aufgabenorientierten Auswahl von Sensorkomponenten erarbeitet. Ausgangspunkt hierfür waren dabei die physiologischen Grundlagen der menschlichen Sinneswahrnehmung, die zur Verfügung stehenden physikalischen Messprinzipien marktüblicher Sensorkomponenten sowie die systematische Zerlegung der Montageaufgabe in einzelne Elementaroperationen.

In einem zweiten Schritt wurde die Integration von Sensorkomponenten in ein Telepräsenz- und Teleaktionssystem betrachtet. Hierzu wurde anhand eines Entwurfsmusters auf Basis logischer Sensoren ein allgemeingültiges Konzept für den Aufbau eines tele-

## 8 Literaturverzeichnis

ALEX ET AL. 1998

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

ANDO ET AL. 2000

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

BALZERT 1999

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

BIERHALS 2000

Bierhals, R.: Mikrosystemtechnik – wann kommt der Marktdurchbruch? Miniaturisierungsstrategien im Technologiewettbewerb zwischen USA, Japan und Deutschland. Heidelberg: Physica-Verlag 2000.

BEJCZY ET AL. 1990

Bejczy, A. K.; Kim, W.S.; Venema, S.C.: The phantom Robot: Predictive Displays for Teleoperation with Time delay. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 13.-18. Mai 1990, Cincinnati, Ohio. Los Alamitos: IEEE Press 1990, S. 546-551.

BRUEGGE & DUTOIT 2000

Bruegge, B.; Dutoit, A. H.: Object-Oriented Software Engineering : Conquering Complex and Changing Systems. Upper Saddle River: Prentice Hall 2000.

BUBB & SCHMIDTKE 1993

Bubb, H.; Schmidtke, H.: Systemergonomie. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Ergonomie. 3. neubearb. und erw. Aufl. München: Hanser 1993.

BURSTER 2006

Burster Präzisionsmesstechnik Gmbh & Co KG: <http://www.burster.com> (01.10.2006)



VDI 2860

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

VOGL ET AL. 2004

Vogl, W.; Sitti, M.; Ehrenstrasser, M.; Zäh, M.: Augmented Reality Interface for Nanomanipulation using Atomic Force Microscopes. In: Proceedings of Eurohaptics 2004, 5.-7. Juni, München. München: TU München (Eigenverlag) 2004.

YOKOKOHI ET AL. 1994

Yokokohji, Y.; Hosotani, N.; Yoshikawa, T.: Analysis of maneuverability and stability of micro-teleoperation systems. In: Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 8.-13 Mai, San Diego, USA. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press 1994, S. 237 – 243.

ZELLER 1996

Zeller, F.-J.: Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter. Wien: Hanser 1996. (Fertigungstechnik – Erlangen 51)

ZESCH & FEARING 1998

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

ZÄH ET AL. 2003A

Zäh, M. F.; Ehrenstraßer, M.; Schilp, J.: Global Tele-operated micro-assembly Systems. In: Proceedings of IEEE Humanoids 2003, 1.-3. Oktober, Karlsruhe/München. Düsseldorf: VDI/VDE-GMA 2003.

ZÄH ET AL. 2003B

Zäh, M. F.; Ehrenstraßer, M.; Schilp, J.: Global Tele-Operation for Micro-Assembly Tasks. In: Proceedings of ASPE 2003 Annual Meeting, 26.-31. Oktober, Portland, Oregon. Raleigh: ASPE 2003, S. 247-250.

## 9 Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abb. 1-1: Anwendungsfelder der Mikrosystemtechnik   | 9  |
| Abb. 1-2: Weltmarktprognose für Mikrosystemtechnische Produkte                              | 12 |
| Abb. 1-3: Gliederung der Arbeit   | 18 |
| Abb. 2-1: Manueller Mikromontagearbeitsplatz  | 21 |
| Abb. 2-2: Funktionale Struktur eines Telepräsenz- und Teleaktionssystems                    | 25 |
| Abb. 2-3: Vergleich OSI- und TCP/IP-Referenzmodell  | 26 |
| Abb. 2-4: Datenübertragung nach dem TCP-Transportprotokoll                                  | 29 |
| Abb. 2-5: Datenübertragung nach dem TCP-Transportprotokoll mit „Sliding Window“-<br>Technik | 29 |
| Abb. 2-6: Datenübertragung nach dem UDP-Transportprotokoll                                  | 30 |
| Abb. 2-7: Verteilungsdiagramm: Beispiel für ein verteiltes Telepräsenzsystem                | 32 |
| Abb. 2-8: Operator und Teleoperator als zentralisierte Systeme                              | 32 |
| Abb. 3-1: Grobstruktur des Systemelements Mensch  | 49 |
| Abb. 3-2: Anatomischer Aufbau des menschlichen Auges  | 51 |
| Abb. 3-3: Struktur und Lage der Hautrezeptoren in der unbehaarten und behaarten Haut        | 54 |
| Abb. 3-4: Sensomotorische Bandbreiten des menschlichen Fingers                              | 60 |
| Abb. 4-1: Videobasierte Visualisierung mit Informationsübermittlung via Internet            | 64 |
| Abb. 4-2: Abbildung eines Gegenstands durch ein optisches System                            | 65 |
| Abb. 4-3: Einfluss der CCD-Pixelgröße auf die Auflösung eines optischen Systems             | 66 |
| Abb. 4-4: Physikalische Auflösungsgrenze eines optischen Systems                            | 67 |
| Abb. 4-5: Tiefenschärfe eines optischen Systems   | 68 |

## Abbildungsverzeichnis

---

|   |    |
|---|----|
| Abb. 4-6: Klassifizierungsschema für Sensoren   | 70 |
| Abb. 4-7: Klassifizierungsschema für Sensoren zur Prozesskraftmessung   | 71 |
| Abb. 4-8: Aufbau eines 3-Komponenten Kraftaufnehmers  | 73 |
| Abb. 4-9: Berührungslose Prozesskraftmessung am Beispiel eines Atomic Force<br>Microscope   | 74 |
| Abb. 4-10: Berührungslose Greifkraftmessung   | 75 |
| Abb. 4-11: Klassifizierungsschema für Sensoren zur Weg- und Abstandsmessung   | 77 |
| Abb. 4-12: Berührungsloser kapazitiver Wegaufnehmer: Schematischer Aufbau (links)<br>sowie Prinzipschaltbild (rechts)               | 78 |
| Abb. 4-13: Berührungsloser induktiver Abstandssensor: Schematischer Aufbau (links)<br>sowie Ersatzschaltbild (rechts)               | 79 |
| Abb. 4-14: Funktionsweise eines Triangulationssensors: diffus reflektierende<br>Oberflächen (links), spiegelnde Oberfläche (rechts) | 80 |
| Abb. 4-15: Funktionsprinzip eines faseroptischen Sensors  | 81 |
| Abb. 4-16: Kalibrierkurve eines faseroptischen Sensors  | 82 |
| Abb. 4-17: Sensoren zur Weg- und Abstandsmessung: Messbereich und Auflösung<br>üblicher, industriell eingesetzter Sensoren          | 83 |
| Abb. 4-18: Vorgehensweise für eine telepräsenzgerechte Sensorauswahl  | 86 |
| Abb. 4-19: Symbolische Darstellung eines Pick & Place-Handhabungsvorganges gemäß<br>VDI 2860  | 88 |
| Abb. 4-20: Analysetabellen zur quantitativen Analyse der Prozessgrößen  | 89 |
| Abb. 4-21: Sensomotorische Analysetabelle   | 90 |
| Abb. 5-1: Aufbau eines logischen Sensors  | 95 |
| Abb. 5-2: Logische Verarbeitungsnetzwerke   | 95 |

|  |     |
|--|-----|
| Abb. 5-3: Entwurf einer telepräsenzgerechten Sensorgrundstruktur             | 96  |
| Abb. 5-4: Implementierung der Sensorgrundstruktur                            | 97  |
| Abb. 5-5: Logischer Sensor 1. Art  | 100 |
| Abb. 5-6: Sensor 1. Art zur Prozesskraftmessung: Struktur und Zustandsgraph  | 101 |
| Abb. 5-7: Logischer Sensor 2. Art  | 103 |
| Abb. 5-8: Logische Sensoren 3. Art   | 105 |
| Abb. 5-9: Zeitlicher Ablauf eines Dispensvorganges                           | 106 |
| Abb. 5-10: Adaptiver Sensor zur Nadelspaltmessung                            | 107 |
| Abb. 5-11: Logischer Sensor 4. Art   | 108 |
| Abb. 5-12: Zylindrische Arbeitsraumbegrenzung                                | 111 |
| Abb. 5-13: Arbeitsraumüberwachung mittels eines virtuellen Sensors           | 112 |
| Abb. 5-14: Virtueller Sensor zur Augmentierung einer virtuellen Dispenshilfe | 113 |
| Abb. 5-15: Übersicht: Gesamtstruktur der Rahmenarchitektur                   | 114 |
| Abb. 5-16: Registrierung logischer Sensorkomponenten mittels Hashtable       | 118 |
| Abb. 6-1: Montageaufgabe   | 119 |
| Abb. 6-2: Zerlegung der Montageaufgabe in Elementaroperationen               | 120 |
| Abb. 6-3: Quantitative Prozessgrößenanalyse                                  | 120 |
| Abb. 6-4: Sensomotorische Bewertung der Montageaufgabe                       | 121 |
| Abb. 6-5: Hardware-Aufbau der Teleoperatorseite                              | 123 |
| Abb. 6-6: Logisches Sensornetzwerk   | 124 |
| Abb. 6-7: Operatorseite  | 126 |
| Abb. 6-8: Transatlantisches Versuchsszenario                                 | 128 |

## Abbildungsverzeichnis

---

|   |     |
|---|-----|
| Abb. 6-9: Messung der Round-Trip-Zeit (RTT)   | 129 |
| Abb. 6-10: Teleoperator am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften ( <i>iwb</i> ) in Garching | 130 |

## 10 Tabellenverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Tab. 1-1: Skalierungseffekte am Beispiel eines Siliziumwürfels  | 15  |
| Tab. 2-1: Bewertung ausgewählter telepräsender Systeme für die Handhabung bzw.<br>Montage von Miniatur- und Mikroobjekten | 42  |
| Tab. 2-2: Zusammenfassung der Anforderungen   | 48  |
| Tab. 3-1: Richtwerte für den kleinsten wahrnehmbaren Winkelabstand  | 52  |
| Tab. 3-2: Übersicht: Eigenschaften menschlicher Mechanorezeptoren   | 55  |
| Tab. 3-3: Abhängigkeit des menschlichen Auflösungsvermögens für die Wahrnehmung<br>von Positionen von der Bezugslänge     | 57  |
| Tab. 4-1: Elektrische Messprinzipien: Überblick   | 84  |
| Tab. 5-1: Standard-Statusvariablen  | 99  |
| Tab. 6-1: Investitionskosten für ein telepräsendes Mikromontagesystem   | 132 |
| Tab. 6-2: Investitionskosten eines manuellen Mikromontagearbeitsplatzes   | 133 |
| Tab. 6-3: Szenario 1: Stückkostenvergleichsrechnung   | 134 |

# iwb Forschungsberichte Band 1–121

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

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

- 1 *Streifinger, E.*  
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel  
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*  
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen  
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*  
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern  
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*  
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen  
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*  
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen  
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*  
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung  
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*  
Schneiderodierte Oberflächen  
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*  
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen  
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*  
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung  
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*  
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen  
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*  
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse  
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*  
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze  
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*  
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion  
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*  
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Fleise, 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 *Hertberger, H.*  
**Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*  
**Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*  
**Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten**  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*  
**3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 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 Arbeitsstellung**  
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 Programmabwärtens für robotergeführte Klebprozesse**  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*  
**Integrierte Diagnose in Produktionszellen**  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*  
**Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*  
**Prozuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schraifer, 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 *Glaes, 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 3.540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*  
**Rechnergestützte Simulationstools zur Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*  
**Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*  
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen**  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*  
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung**  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*  
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme**  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*  
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
**Simulationstestgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
**Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
**Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen**  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
**Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*  
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmeyer, H.*  
**Verfahren zur simulationstestgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion**  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindt, M.*  
**Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung**  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*  
**Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung**  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*  
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung**  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*  
**Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation**  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zah, M. F.*  
**Dynamisches Prozessmodell Kreissägen**  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzner, N.*  
**Technologisches Prozessmodell für die Kugelschleifbearbeitung**  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*  
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen**  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen**  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung**  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionzellen**  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement**  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
**Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen**  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen**  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*  
**Konzept einer integrierten Produktentwicklung**  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*  
**Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme**  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*  
**Prozessorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen**  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*  
**Recyclingintegrierte Produktentwicklung**  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*  
**Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte**  
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
**Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen**  
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
**Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren**  
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
**Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme**  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
**Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen**  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
**Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme**  
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*  
**Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie**  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
**Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**  
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
**Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten**  
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Fischelsrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Kähler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten**  
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
**Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung**  
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
**Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem**  
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*  
**Steuerungsinintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe**  
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
**Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen**  
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung**  
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
**Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service**  
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*  
**Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion**  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
**Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen**  
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
**Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung**  
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
**Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz**  
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
**Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse**  
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*  
**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.*  
**Erfahrungsgel leitete 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 3-931327-76-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Analysen und Konzepte**  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **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 · Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit · ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage · Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken · Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion · Ablaufsimulation**  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**  
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**  
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 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 · vergiffen
- 72 **Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**  
ISBN 3-89675-072-0 · vergiffen
- 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 Kapselfabrik zur aseptischen Ampulle**  
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 **ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen**  
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 **Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen**  
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 **Produktionsmanagement**  
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 **Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche**  
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 **Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder**  
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 **Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 **Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen**  
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 **Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?**  
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 **3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau**  
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 **Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung**  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 **Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand**  
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 **Mechatronik · Vorsprung durch Simulation**  
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 **RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten**  
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

# Forschungsberichte iwb

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

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

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

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

- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer  
**Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenster Montagesysteme**  
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingner  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer  
**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**  
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger  
**Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme**  
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl  
**Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing**  
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch  
**Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie**  
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3



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

- 207 Rainer Schack  
**Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik**  
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff  
**Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion**  
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller  
**Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen**  
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler  
**Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme**  
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerrieder  
**Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile**  
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller  
**Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme**  
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl  
**Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen**  
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge  
**Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen**  
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wunsch  
**Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme**  
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli  
**Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben**  
2008 · 184 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold  
**Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage**  
2008 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8