

***Forschungsberichte***

---

The logo for 'iwb' consists of the lowercase letters 'iwb' in a bold, white, sans-serif font, set against a solid black rectangular background.

***Band 149***

***Michael Höhn***

***Sensorgeführte Montage  
hybrider Mikrosysteme***

---

***herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

---

***Herbert Utz Verlag***

The logo for 'UTZ' features the uppercase letters 'UTZ' in a bold, serif font. The letters are enclosed within a square frame formed by four horizontal lines, with two lines above and two lines below the text.

## Forschungsberichte iwb

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

herausgegeben von

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

<p>Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich</p>
--

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2001

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2001

ISBN 3-8316-0012-0

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 - Fax: 089/277791-01

## **Geleitwort des Herausgebers**

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

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

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

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

*Gunther Reinhart*

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Mikromontage – Schlüsseltechnologie für innovative Produkte	1
1.2	Motivation	7
1.3	Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit	8
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>11</b>
2.1	Grundlegende Montagestrategien	11
2.2	Halbleiterbasierte Montage- und Kontaktiertechnologien	13
2.2.1	Vereinzelung von Halbleiterbauelementen	14
2.2.2	Chip-and-Wire-Technik	15
2.2.3	Flip-Chip-Technik	16
2.2.4	Fügeverfahren	18
2.3	Präzisionspositioniertechnik	19
2.3.1	SMD-Bestückungssysteme	19
2.3.2	Die-Bonder	20
2.3.3	Präzisionsroboter und frei programmierbare Achssysteme	23
2.4	Greifer und intelligente Werkzeuge	26
2.5	Auswertung und Ableitung von Anforderungen	27
<b>3</b>	<b>Konzeption fehlerkompensierender Positionierstrategien</b>	<b>31</b>
3.1	Vorgehensweise	31
3.2	Grundprinzipien bildverarbeitungsbasierter Positionierung	31
3.2.1	Absolute Positionierung	31
3.2.2	Relative Positionierung	35

3.3	Kinematische Analyse des Positionierablaufes	41
3.3.1	Analyse der Montageaufgabe - Montageszenarien	41
3.3.2	Verfahrensübersicht	43
3.3.3	Positionierstrategien für das Montageszenario 1. Art	46
3.3.4	Positionierstrategien für das Montageszenario 2. Art	51
3.3.5	Positionierstrategien für das Montageszenario 3. Art	54
<b>4</b>	<b>Gestaltung flexibel konfigurierbarer Funktionsmodule</b>	<b>57</b>
4.1	Vorgehensweise	57
4.2	Zuordnung von Funktionsmodulen zu den Ablaufschritten der Positionierstrategien	57
4.3	Unidirektional abbildendes Optikmodul	60
4.3.1	Anforderungen	60
4.3.1.1	Integration des Optikmoduls	60
4.3.1.2	Optische Abbildung	61
4.3.2	Dimensionierung der Optik	62
4.3.3	Gestaltung und Charakterisierung der Optik	71
4.4	Diametral abbildendes Optikmodul	78
4.4.1	Anforderungen	78
4.4.2	Optische Aufbauvarianten	79
4.4.3	Bewertung und Auswahl	81
4.4.4	Modulgestaltung	86
4.5	Greif- und Fügmodule mit Kinematik	87
4.5.1	Anforderungen	88
4.5.2	Gestaltung der Greifmodule	88
4.5.3	Gestaltung der Fügmodule	90

4.6	Feinpositioniermodul	93
4.6.1	Anforderungen	94
4.6.2	Wirkprinzip und Modulgestaltung	96
4.7	Module für die Fügekraftbegrenzung und -überwachung	101
4.7.1	Anforderungen	101
4.7.2	Wirkprinzipien und Modulgestaltung	102
<b>5</b>	<b>Werkzeug- und Systemsynthese</b>	<b>105</b>
5.1	Übersicht	105
5.2	Werkzeug für die Mikromontage mit Präzisionsroboter	107
5.2.1	Werkzeugkonfiguration	109
5.2.2	Prototypenhafte Realisierung	109
5.3	Feinpositionierbare Werkzeuge für die Mikromontage mit Standardroboter	114
5.3.1	Pick-and-Place-Werkzeug	114
5.3.1.1	Werkzeugkonfiguration	114
5.3.1.2	Prototypenhafte Realisierung	116
5.3.2	Multifunktionales Werkzeug für flexible Prozessführung	122
5.3.2.1	Werkzeugkonfiguration	122
5.3.2.2	Prototypenhafte Realisierung	124
5.4	Positioniersystem mit Strahlteileroptik	127
5.4.1	Systemkonfiguration	128
5.4.2	Laboraufbau	130
<b>6</b>	<b>Exemplarische Anwendung und Erprobung</b>	<b>132</b>
6.1	Anwendungsbeispiel: Mikrosysteme für die optische Datenübertragung	132

6.2	Pilotanlage	134
6.2.1	Systemüberblick	134
6.2.2	Inbetriebnahme und Einrichten der Montagewerkzeuge	138
6.3	Montageablauf und Versuchsergebnisse	140
6.3.1	Klebstoffauftrag	140
6.3.2	Zeitanalyse des Montageprozesses	141
6.3.3	Genauigkeitsnachweis	143
6.3.3.1	Positionierung oberseitenstrukturierter Bauelemente	143
6.3.3.2	Positionierung von Flip-Chip-Bauelementen	145
6.4	Bewertung	145
6.4.1	Technischer Nutzen	146
6.4.2	Wirtschaftlicher Nutzen	147
6.4.3	Fazit und Ausblick	150
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>153</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>155</b>

## Formelzeichen und Abkürzungen

### Skalare

$a$	Kantenlänge optischer Bauelemente für die Strahlteilung
$d$	Mindestabstand der abzubildenden Objekte bei der Strahlteileroptik
$d_{\text{CCD}}$	Pixelmaß des CCD-Chips
$g_{\text{rel}}$	Relativer Gewichtungsfaktor (Nutzwertanalyse)
$g_{\text{abs}}$	Absoluter Gewichtungsfaktor (Nutzwertanalyse)
$n / n'$	Brechzahl objektseitig/bildseitig
$r'$	Minimaler Abstand zweier auflösbarer Bildpunkte nach dem Rayleigh-Kriterium
$s_{\text{opt}}$	Optische Weglänge
$\Delta s_{\text{opt}}$	Optische Weglängendifferenz zweier Strahlenbündel
$u'$	Zulässiger Durchmesser des Unschärfekreises im Bild
$y$	Objektfeldgröße
$y'$	Bildfeldgröße
$z$	Anzahl der Mess- und Korrekturzyklen bei der lagege-regelten Relativpositionierung
$I$	Lichtintensität
$I_0$	Lichtintensität im Zentrum der Airy-Scheibe
$M$	Modulation der optischen Abbildung
$NA / NA'$	Objektseitige/bildseitige numerische Apertur

## Formelzeichen und Abkürzungen

---

$T$	Modulationsübertragungsfaktor der optischen Abbildung
$\alpha$	Winkel zwischen Vision- und Toolkoordinatensystem
$\beta'$	Abbildungsmaßstab der Optik
$\delta / \delta'$	Objektseitiger/bildseitiger halber Öffnungswinkel
$\gamma$	Skalierungsfaktor der Bildverarbeitung
$\kappa$	Optischer Versatzkennwert der Strahlteileroptik
$\lambda$	Wellenlänge
$\mu$	Durch Kalibrierung bedingter Fehlereinflussfaktor auf den Winkel $\alpha$
$v / v'$	Objektseitige/bildseitige Ortsfrequenz der optischen Abbildung
$\nu_{\text{CCD}}$	Nyquist-Grenzfrequenz der CCD-Kamera
$\omega$	Durch Kalibrierung bedingter Fehlereinflussfaktor auf das Skalierungsverhältnis $\gamma$
$\Delta\zeta$	Optische Schärfentiefe

## Vektoren, Matrizen und Transformationen

$\mathbf{x}^Y$	Allgemeine Darstellung des Vektors $\mathbf{x}$ im Koordinatensystem $Y$
$\mathbf{b}^V / \mathbf{b}^T$	Position des Bauteils in Visionkoordinaten/Toolkoordinaten
$\mathbf{f}^V / \mathbf{f}^T$	Position des Fügeortes in Visionkoordinaten/Toolkoordinaten
$\mathbf{r}_0^V / \mathbf{r}_0^T$	Ursprüngliche Lageabweichung (vor der ersten Lagekorrektur) in Visionkoordinaten/Toolkoordinaten
$v_i$	

$r_z^V / r_z^T$	Verbleibende Lageabweichung nach z Mess- und Korrekturzyklen ( $z = 1, 2, \dots$ ) in Visionkoordinaten/Toolkoordinaten
$t$	Ursprungsverschiebung zwischen Vision- und Toolkoordinatensystem
$E$	Einheitsmatrix
${}^V M_T$	Transformation von Vision-Koordinaten in Tool-Koordinaten
${}^T M_V$	Transformation von Tool-Koordinaten in Vision-Koordinaten
$R$	Rotationsmatrix
${}^V R_T$	Rotation zwischen Vision- und Tool-Koordinatensystem

### Abkürzungen

AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
CCD	Charged Coupled Device
COB	Chip on Board
DMS	Dehnungsmessstreifen
FC	Flip Chip
FEM	Finite-Elemente-Methode
LED	Lichtemittierende Diode
MID	Molded Interconnect Devices
MTF	Modulation Transfer Function
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
TCP	Tool-Center-Point



## 1 Einleitung

### 1.1 Mikromontage – Schlüsseltechnologie für innovative Produkte

**Technologische Miniaturisierung und Funktionsintegration** werden zunehmend zu einem Kerncharakteristikum zukunftsweisender Produktinnovationen. Die Umsetzung dieser technologischen Trends in neue, marktfähige Produkte, die sich über Kosten, Funktion oder Qualität am Markt differenzieren, wird von Unternehmen vielfach als strategisches Instrument zur Sicherung ihrer Wettbewerbsfähigkeit in dem von hohem Kostendruck und Innovationstempo geprägten globalen Wettbewerb verstanden (BIERHALS U.A. 1999, BMBF 1997, BOTTHOF U.A. 1998, REINHART U.A. 1998A).

Das enorme Potential technologischer Miniaturisierung wurde von der **Mikroelektronik** eindrucksvoll aufgezeigt. Kontinuierlich verbesserte Produktionsverfahren (KOEK 1998) ermöglichen immer feiner werdende Strukturbreiten (1994: 0,35  $\mu\text{m}$ , 1997: 0,25  $\mu\text{m}$ , 1999: 0,18  $\mu\text{m}$ ) bei elektronischen Schaltkreisen und damit eine zunehmende Funktionsverdichtung. Entsprechend der SIA-Roadmap<sup>1</sup> wird spätestens alle drei Jahre eine neue Speicherchip-Generation mit vierfacher Bit-Dichte auf dem Markt eingeführt (SIA 1997, BEHRINGER 1999). Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Mikroelektronik ist herausragend: Allein in Deutschland wurde 1997 von einem Umsatzvolumen durch elektronische Produkte von ca. 81 Mrd. DM ausgegangen (VDE 1998).

Mit der **Silizium-Mikromechanik**<sup>2</sup> (HEUBERGER 1989, GERLACH & DÖTZEL 1997, MENZ 1997) wurden die **halbleiterbasierten Fertigungsverfahren** der Mikroelektronik auf die Herstellung von dreidimensionalen, nicht-elektronischen Strukturen und Komponenten ausgedehnt. Damit war die Grundlage für eine erweiterte Funktionsintegration miniaturisierter Systeme geschaffen, die neben mikroelektronischen auch mikromechanische oder mikrooptische Funktionalitäten für sensorische und aktorische An-

---

<sup>1</sup> Die Semiconductor-Industry-Association (SIA)-Roadmap ist eine Projektion über 15 Jahre und definiert für die Herstellung von integrierten Schaltungen die zukünftigen Anforderungen bezüglich Entwicklungsbedarf und benötigten Technologien.

<sup>2</sup> Die Silizium-Mikromechanik umfasst einerseits nasschemische, anisotrope Tiefenätztechniken, mit denen dreidimensionale Mikrostrukturen aus dem Silizium-Einkristall herausgearbeitet werden (Bulk Micromachining), und andererseits Oberflächenstrukturierungsverfahren, bei denen additiv Schichtfolgen auf die Silizium-Scheibe abgeschieden, strukturiert und selektiv geätzt werden (Surface Micromachining).

wendungen ermöglicht. Die stoffkohärente Integration nicht-elektronischer Komponenten mit elektronischen Schaltkreisen unter Nutzung kompatibler Halbleiterprozesse führt zu **monolithischen Mikrosystemen**, wie z.B. mikromechanischen Drehratensensoren für die Kraftfahrzeugtechnik (Bild 1.1). Die zur Entwicklung dieser Mikrosysteme erforderlichen Entwurfs-, System- und Fertigungstechniken wurden unter dem Begriff **Mikrosystemtechnik** zusammengefasst (HEUBERGER 1996).

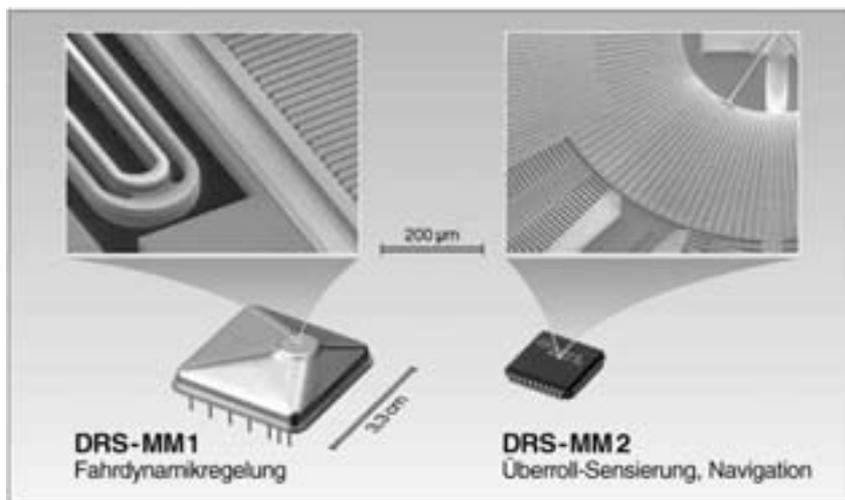


Bild 1.1: *Monolithisch integrierte Drehratensensoren für die Automobilindustrie (Quelle: Robert Bosch GmbH)*

Die **technischen Potentiale der Miniaturisierung** sind vielfältig und gehen deutlich über Anwendungen hinaus, bei denen reine Volumen- und Gewichtsreduzierung im Vordergrund stehen. Eine reduzierte Leistungsaufnahme und erhöhte Funktionsverdichtung sind Motive für den Einsatz mikrotechnischer Lösungen bei portablen, mobilen oder implantierbaren Systemen. Bei Sensoren beispielsweise spielt die Erhöhung von Leistung und Zuverlässigkeit eine große Rolle. Einerseits werden durch kurze Signalwege parasitäre Induktivitäten und Kapazitäten minimiert, wodurch die Arbeitsfrequenz gesteigert werden kann. Andererseits lassen sich durch Mikrotechnologien viele miniaturisierte Sensorelemente kostengünstig zu einem Array kombinieren, um durch Mittelwertbildung eine höhere Messgenauigkeit und durch Redundanz eine höhere Zuverlässigkeit zu erreichen (MENZ 1995).

Obwohl monolithische Mikrosysteme diese technischen Miniaturisierungspotentiale durch ihre hohe Integrationsdichte optimal ausschöpfen, existieren wirtschaftliche und technologische **Grenzen der monolithischen Integration**. Zwar besteht, entsprechend hohe Stückzahlen vorausgesetzt, ein wesentlicher Vorteil der halbleiterbasierten Fertigung in der kosteneffizienten Anwendung von Batch-Prozessen, d.h. der gleichzeitigen Strukturierung einer Vielzahl von Bauelementen in gemeinsamen Prozessschritten. Allerdings erfordert die monolithische Integration von Mikrosystemen im Vergleich zur Herstellung integrierter Schaltungen eine größere Vielfalt von Prozessschritten, variable Prozessfolgen und zusätzliche Sonderprozesse (KERGEL U.A. 1995). Aufgrund der sehr hohen Investitionskosten in derartige Fertigungseinrichtungen konnten sich monolithisch integrierte Mikrosysteme bisher nur im Massenmarkt der Kraftfahrzeugsensorik (BUCH & ZEPPENFELD 1998) durchsetzen. Weiterhin sind viele Anforderungen hinsichtlich Werkstoff und Formgebung inkompatibel zu Halbleiterprozessen. Daher wurden **alternative Fertigungsverfahren** entwickelt, die ein breites Spektrum technischer Werkstoffe für eine dreidimensionale Mikrostrukturierung erschließen, aber infolge ihrer Inkompatibilität untereinander eine getrennte Herstellung der Komponenten eines Mikrosystems bedingen. Neben Massenfertigungsverfahren, wie der LIGA-Technik<sup>3</sup> (EHRFELD & MÜNCHMEYER 1991, PANTENBERG U.A. 1998), dem Mikrospritzgießen (MICHAELI U.A. 1998, BOY 1998) und dem Heißprägen (HECKELE U.A. 1997), werden zunehmend Verfahren für eine flexible Fertigung kleiner und mittlerer Stückzahlen, wie das Mikroerodieren (BRAUNSCHWEILER & WEISNER 1996), die Laserbearbeitung (GILLNER 1998, RIZVI 1999, BASTING & ENDERT 1997, DICKMANN U.A. 1998), die Stereolithographie (GÖTZEN 1998, TILLE U.A. 1999) und die spanende Mikrobearbeitung (SCHMIDT & HÜNTRUP 1998, WECK U.A. 1996, WEINERT U.A. 1998), eingesetzt.

Die Konsequenz dieser hinsichtlich Material und Geometrie erweiterten Fertigungsmöglichkeiten sind **hybride Mikrosysteme**, die modular aus einzelnen Subkomponenten aufgebaut sind. In Bild 1.2 wurde eine Klassifizierung hybrider Mikrosysteme vorgenommen, an der sich die vorliegende Arbeit orientiert. Von dieser Klassifizierung ausgenommen sind rein elektronische Baugruppen und Systeme. Demnach können hybride Mikrosysteme sowohl auf der Basis von Halbleiterelementen als auch auf der Basis alternativer Fertigungsverfahren aufgebaut werden. Bei *aktiven* Systemen werden Halbleiterchips für die Signalverarbeitung mit mikromechanischen

---

<sup>3</sup> Mittels LIGA-Technik, einer Kombination der Prozesse Lithographie, Galvanoformung und Abformung, lassen sich dreidimensionale Mikrostrukturen aus Kunststoff oder Metall (vorzugsweise Nickel) herstellen.

oder mikrooptischen Komponenten kombiniert (Bild 1.2-a, b und c), während *passive* hybride Mikrosysteme keine aktiven elektronischen Komponenten beinhalten (Bild 1.2-d).

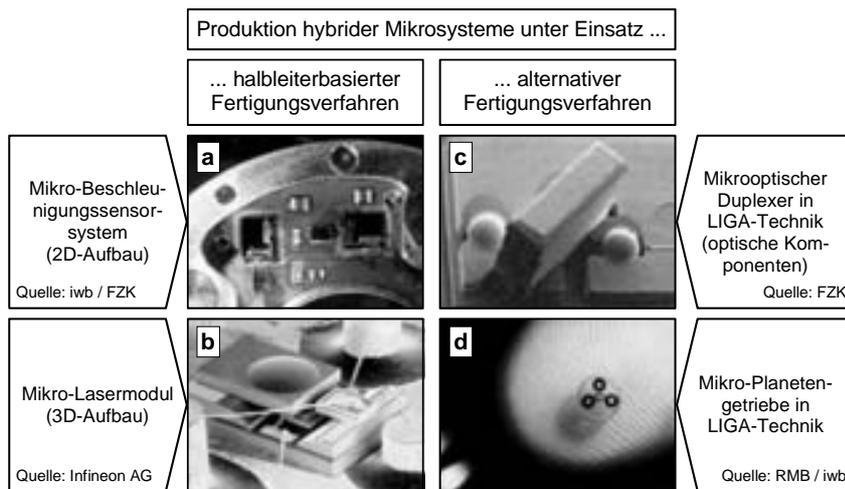


Bild 1.2: Klassifizierung hybrider Mikrosysteme mit Beispielen

Der Fokus der Arbeit liegt auf **halbleiterbasierten hybriden Mikrosystemen**. Diese kombinieren die Variabilität der Hybridintegration mit den Vorteilen der Halbleiterfertigung. Einerseits lassen sich durch das hybride Aufbauprinzip im Vergleich zur monolithischen Integration komplexere, funktionsangepasste Geometrien, z.B. durch Anordnung von Halbleiterbauelementen in mehreren Ebenen, realisieren (Bild 1.2-b). Andererseits ermöglicht die Batchfertigung von Standardkomponenten, die erst bei der Systemintegration anwendungsspezifisch zum jeweiligen Mikroprodukt kombiniert werden, eine erhebliche Reduzierung der Fertigungskosten. Um diesen Vorteil auch für die Produktion von Mikrosystemen in kleinen und mittleren Stückzahlen auszunutzen, werden heute große Anstrengungen für eine Standardisierung von Mikrobauanteilen (GENGENBACH 1998) und eine Modularisierung hybrider Mikrosysteme (GROßER & REICHL 1996, BÖTTCHER & MEUSEL 1992, SCHÜNEMANN U.A. 1998) unternommen. Durch diese Ansätze wird ein hoher Wiederverwendungsgrad mikrotechnischer Bauelemente, die in großen Mengengerüsten möglichst unter Wahrung der Kompatibilität zu Standard-Halbleiterprozessen produziert werden können, angestrebt. Die Variantenbildung erfolgt dann erst bei der Montage der Bauelemente zum Mikrosystem. Erweitert werden diese Ansätze zur Kostenreduzierung durch neue

Organisations- und Kooperationsmodelle. Für kleine und mittelständische Unternehmen mit begrenztem Investitionskapital bieten der Multiprojektwafer-Service<sup>4</sup> (WENK 1999, ILLING 1996) und das Foundry-Konzept<sup>5</sup> (ILLING U.A. 1997) die Möglichkeit eines Kostensharing durch die gemeinsame Nutzung kapitalintensiver Halbleiterfertigungseinrichtungen.

Alle diese Ansätze verfolgen das Ziel, **variantenreiche Mikrosysteme in kleinen und mittleren Serien** zu marktakzeptablen Preisen herzustellen. Denn der Markt für Mikrosysteme hat eine andere Struktur als jener für elektronische Schaltungen. Viele heterogene Anwendungen, die für einen Innovationsschub durch mikrosystemtechnische Komponenten prädestiniert sind, erfordern eine hohe kundenspezifische Ausrichtung und liegen überwiegend im niedrigen bis mittleren Stückzahlenbereich<sup>6</sup> (BAUER U.A. 1999, WESTKÄMPER U.A. 1998, HANKES 1998, KERGEL U.A. 1995, KROY 1992).

Eine zentrale Rolle im Produktionsprozess hybrider Mikrosysteme spielen Technologien der **Mikromontage, Mikrojustage, Aufbau- und Verbindungstechnik**, die die einzelnen Komponenten eines hybriden Mikrosystems auf einem gemeinsamen Träger oder Substrat integrieren. Dabei wirft der hohe Grad an Miniaturisierung und Integration viele montagetechnische Probleme auf, die vor allem aus den hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit und der Empfindlichkeit filigraner Mikrostrukturen gegenüber mechanischen Kräften und Partikeln resultieren. Andererseits beeinflusst die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Mikromontage in hohem Maß die Systemeigenschaften des Produkts. Sowohl die technischen Parameter als auch die Zuverlässigkeit eines komplexen Mikrosystems werden neben der Leistung und Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten signifikant durch die Qualität der Montage bestimmt (BÖTTCHER & MEUSEL 1992, REICHL 1998, S. 262).

Um in dieser Größenordnung kosteneffizient mit reproduzierbar hoher Qualität und hoher Ausbeute fertigen zu können, ist eine **Automatisierung der Mikromontageprozesse** nahezu unumgänglich (WESTKÄMPER U.A. 1998). Dies betrifft insbesondere

---

<sup>4</sup> Der Multiwaferprojekt-Service vereint Entwürfe mehrerer Kunden auf einem gemeinsamen Wafer und senkt somit die Maskenkosten.

<sup>5</sup> Beim Foundry-Konzept erfolgen Entwurf, Marketing und Vertrieb im eigenen Unternehmen, die Strukturierung hingegen bei externen Dienstleistern (Foundries).

<sup>6</sup> Eine Umfrage des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig bestätigt diese Einschätzung. Laut Angabe der befragten Unternehmen liegen die Stückzahlen schwerpunktmäßig im Bereich von weniger als 100 Stück pro Tag (THOBEN 1999).

die Sicherung der Produktqualität. Nur durch eine durchgängige Automatisierung der Fertigungs- und Montageprozesse lassen sich die hohen Qualitätsstandards der Halbleiterindustrie zur Herstellung von Mikrokomponenten auch auf deren Montage übertragen. Diese basieren auf einer Rückverfolgbarkeit einzelner Prozessschritte („Known Good Die“) und dem Verwurf auf geringer Wertschöpfungsstufe (GRAMANN 1999). Nur in automatisierten Mikromontagesystemen ermöglichen sensorbasierte Prozessüberwachungssysteme und Inline-Kontrollen zwischen aufeinander folgenden Montageschritten – trotz schlechter Zugänglichkeit und ungünstiger Produktionsbedingungen (Vakuum, Reinraum) – die Dokumentation und den Nachweis fähiger Prozesse, der für die Einhaltung von Qualitätsregelwerken, wie der DIN ISO EN 9000-9004, zwingend notwendig ist.

Eine erfolgreiche Markterschließung durch Mikrosystemtechnik-Lösungen hängt nun in hohem Maß davon ab, ob neben dem Technologie- auch ein Kostenvorteil erreicht werden kann. Einer der Hauptgründe für den - entgegen vielen Prognosen - nur zögerlichen Marktdurchbruch vieler Mikrosysteme (vgl. STAUDT & KRAUSE 1999) wird heute in der nicht beherrschten Produktionstechnik bzw. den zu hohen **Produktionskosten** gesehen (z.B. BEHRINGER 1998, VDI 1998, KERGEL U.A. 1995). Während Produktionsprozesse der Massenfertigung in Großunternehmen weiter entwickelt sind, weist die flexible Produktion bei kleinen und mittleren Stückzahlen noch große Defizite auf (vgl. BIERHALS U.A. 1999, S. 54-56). So sind vor allem kleine und mittelständische Unternehmen, die die Industrielandschaft in Deutschland prägen, nicht in der Lage, die Innovationspotentiale der Mikrosystemtechnik für ihre Produkte auszuschöpfen. Diese Unternehmen benötigen **modulare und kostengünstige Fertigungs- und Montagesysteme**, die bei hoher Flexibilität und an Klein- und Mittelserienproduktion angepasster Produktivität die Lücke zwischen der Labor- und Massenfertigung schließen (vgl. WESTKÄMPER U.A. 1998). Vor diesem Hintergrund müssen flexible Mikromontagetechniken für viele kleine und mittelständische Unternehmen als **Schlüsseltechnologie** für die Durchsetzung innovativer Produkte am Markt angesehen werden.

Nach CHOLLET & JACOT (1999) bindet die Mikromontage bis zu 80% der Produktionskosten eines Mikroproduktes. Mikrosysteme kostengünstig und damit wirtschaftlich herzustellen, heißt also nicht zuletzt, **Rationalisierungspotentiale** im Bereich der Mikromontage auszuschöpfen. Dies bedeutet zum einen eine Reduzierung der Montagekosten durch eine konsequent mikromontagegerechte Produktgestaltung (CHOLLET & JACOT 1999, GENGENBACH U.A. 1998A, HENSCHKE 1994). Es betrifft weiter die Entwicklung innovativer Maschinen- und Werkzeugkonzepte, die die Investitions-

kosten der Mechanik durch fehlerkompensierende Steuerungsstrategien reduzieren. Zu diesem Punkt soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

## 1.2 Motivation

Die Produktion hybrider Mikrosysteme erfordert Montagesysteme, die bei hoher Genauigkeit, Dynamik und Flexibilität empfindliche Mikrokomponenten feinfühlig handhaben und präzise positionieren bzw. fügen können. Zwischen der Montage im Labormaßstab und der Großserienfertigung mit hochspezialisierten Sondermaschinen liegt die flexible Montage von Mikrosystemen in kleinen bis mittleren Stückzahlen (< 50.000 Stück/Jahr) zu marktakzeptablen Preisen. Dieser Bereich weist jedoch auf ein grundlegendes **Defizit an adäquaten Montagetechniken und Automatisierungskomponenten** auf, die kostengünstig ein hohes Maß an Flexibilität und Modularität in sich vereinen.

So sind derzeit kaum **Handhabungssysteme** für eine wirtschaftliche und flexible Klein- und Mittelserienfertigung verfügbar. Die Montagetechnik aus dem Maschinenbau bietet zwar hinsichtlich ihrer Flexibilität Ansatzpunkte für die Mikrosystemtechnik, die hier erreichbaren Fügegenauigkeiten sind jedoch bei weitem nicht ausreichend. Präzisionspositioniersysteme der Mikroelektronikfertigung hingegen erreichen bei einem beachtlichen gerätetechnischen Aufwand prinzipiell die erforderlichen Genauigkeiten. Sie sind jedoch hinsichtlich ihres Anwendungsbereiches zu stark spezialisiert und aufgrund hoher Investitionskosten nur bei großen Stückzahlen wirtschaftlich einsetzbar.

Indes hängt die Montagequalität nicht nur von den gerätespezifischen Genauigkeitsparametern des Handhabungssystems ab. Einen wesentlichen Einfluss auf Qualität, Kosten und Zeit der Montage haben **Strategien** zur sensorischen Erfassung und Kontrolle von Montagepositionen und -kräften. Schnelle, sensorgeführte Montageoperationen erfordern den Aufbau kurzer Regelkreise direkt über die zu justierenden Mikrostrukturen, die eine Erkennung, Auswertung und Kompensation zwangsläufig vorhandener Toleranzen sowie die präzise Einhaltung vorgegebener Prozessparameter (z.B. zulässige Fügekraft) ermöglichen. Diese Strategien, hier anschaulich als **endpoint sensing & actuating**<sup>7</sup> bezeichnet, bieten Potential für die Entwicklung

---

<sup>7</sup> Endpoint sensing & actuating: prozessnahe Messung und Ausregelung von Störeinflüssen direkt am Endeffektor entsprechend vorgegebener Sollparameter, wie z.B. zulässige Lagetoleranz oder Fügekraft

kostengünstiger Montage- und Justagetechniken für Mikrosysteme, sind jedoch bisher aufgrund folgender Hemmnisse nur ansatzweise untersucht:

- ◆ Bei konventionellen Handhabungssystemen sind dem Aufbau kurzer Regelkreise durch die vom Prozess meist getrennte und i.d.R. indirekt messende Sensorik sowie aufgrund der langen mechanischen Übertragungsstrecke über die Bewegungsachsen hinweg Grenzen gesetzt.
- ◆ Bei vielen Positionieraufgaben wird ein solches Verfahren dadurch erschwert, dass die funktionsbestimmenden Strukturen der zu justierenden Mikrokomponenten für eine direkte Lagemessung während der Positionierung nicht oder nur eingeschränkt zugänglich sind.

### 1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

**Hauptziel** dieser Arbeit ist die Entwicklung, Realisierung und Erprobung von Automatisierungslösungen für eine flexible und kosteneffiziente Montage hybrider Mikrosysteme in kleinen bis mittleren Losgrößen. Daraus lassen sich folgende **Teilziele** ableiten:

- ◆ Entwicklung fehlerkompensierender Positionierstrategien, die unter Ausnutzung sensorischer und steuerungstechnischer Intelligenz den Investitionsaufwand von teurer Präzisionsmechanik zu kostengünstigeren Steuerungs- und Kompensationsmethoden verlagern.
- ◆ Prototypenhafte Umsetzung der entwickelten Strategien in modulare, sensorgeführte Werkzeuge und Systeme, die eine unmittelbare Erfassung von Fehlereinflüssen auf den Montageprozess gewährleisten und über kurze Positions- und Kraftregelkreise eine online-Korrektur der Prozessstellgrößen entsprechend vorgegebener Sollparameter ermöglichen.

Um praxisrelevante Lösungen zu erarbeiten, bedarf es der **Eingrenzung des Untersuchungsfeldes**. Insofern konzentriert sich diese Arbeit auf die Montage *halbleiterbasierter* hybrider Mikrosysteme (vgl. S. 4). Die entwickelten Verfahren sind jedoch prinzipiell auch auf andere Montageprobleme der Mikrosystemtechnik übertragbar.

Das Ziel soll durch folgende **Vorgehensweise** erreicht werden (Bild 1.3):

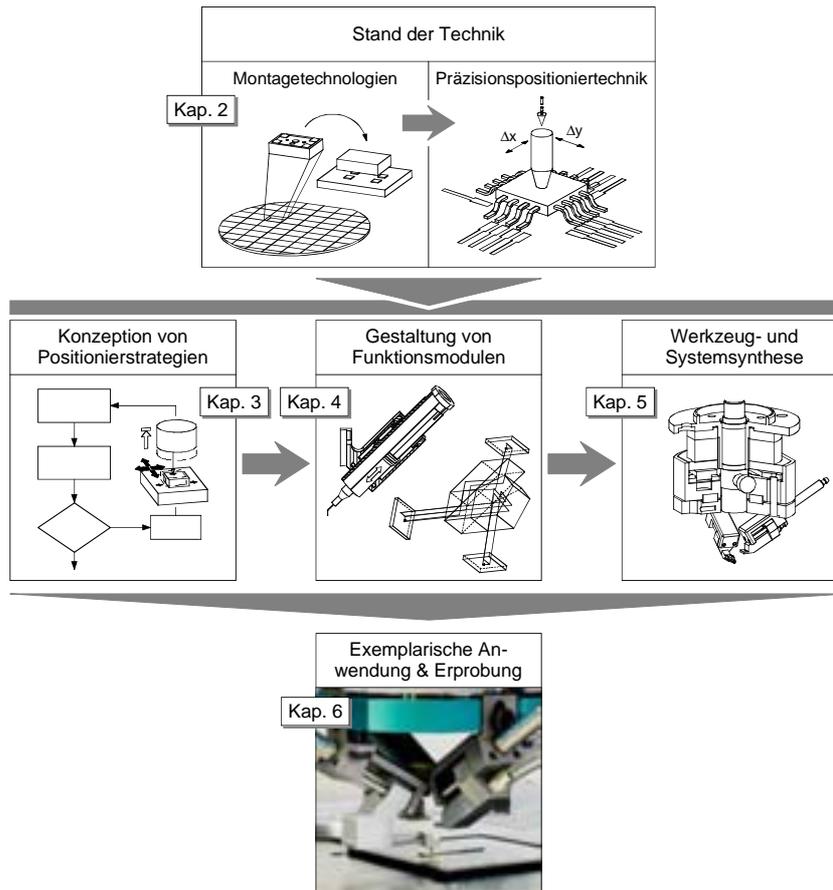


Bild 1.3: Vorgehensweise der Arbeit

Zur Hinführung an die Thematik werden im **zweiten Kapitel** die Grundlagen der Montage halbleiterbasierter hybrider Mikrosysteme in Form einer komprimierten Darstellung wesentlicher Verfahren und Technologien behandelt. Entsprechend dem Ziel der Arbeit liegt der Schwerpunkt der weiteren Betrachtungen auf der problemspezifischen Analyse des Standes der Automatisierungstechnik. Untersuchungsgegenstand sind demzufolge heute bekannte Systeme und Werkzeuge für die Präzisionspositionierung. Ausgehend von den Defiziten in diesem Bereich werden der Handlungsbe-

darf für die Arbeit konkretisiert und Anforderungen an die zu entwickelnden Strategien und Werkzeuge abgeleitet.

Auf der Basis einer Genauigkeitsanalyse bildverarbeitungsbasierter Positionierprozesse und einer Klassifizierung charakteristischer Montageszenarien werden im **dritten Kapitel** Positionierstrategien für die Mikromontage konzipiert, die eine prozessnahe optische Messung und Kompensation unvermeidbarer Toleranzen bei reduzierten Anforderungen an die Mechanik des Montagesystems ermöglichen. Diese Strategien strukturieren den Gesamtprozess in elementare Ablaufschritte geringer Komplexität, die in variabler Reihenfolge auf die verschiedenen Montageszenarien anwendbar sind.

In den beiden folgenden Kapiteln erfolgt die Umsetzung der Positionierstrategien in sensorgeführte Werkzeug- und Geräteprototypen. Im **vierten Kapitel** werden zu den Elementarschritten der Positionierstrategien korrespondierende Funktionsmodule gestaltet, die flexibel zu applikationsspezifischen Automatisierungslösungen konfigurierbar sind. Im **fünften Kapitel** erfolgt anhand von vier Realisierungsbeispielen die Synthese der Module zu Werkzeugen und Systemen, die hochpräzise Positionier- und Fügeaufgaben unter kontinuierlicher Positions- und Kraftüberwachung durchführen können und durch ihren modularen Aufbau flexibel an unterschiedliche Montageaufgaben adaptierbar sind.

Die entwickelten Strategien und Werkzeuge werden im **sechsten Kapitel** auszugsweise anhand eines konkreten industriellen Anwendungsbeispiels - der Montage von Mikrosystemen für die optische Datenübertragung - unter praxisnahen Bedingungen in einer Pilotanlage erprobt. Daraus resultieren experimentell validierte Aussagen über die Genauigkeit, Taktzeit und Wirtschaftlichkeit, die für den Transfer der erzielten Ergebnisse in die Industrie relevant sind.