

Lehrstuhl für
Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme

Michael Höhn

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. J. Heinzl

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Zühlke,
Universität Kaiserslautern

Die Dissertation wurde am 27.10.2000 bei der Technischen
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für
Maschinenwesen am 13.02.2001 angenommen.

Forschungsberichte



Band 149

Michael Höhn

***Sensorgeführte Montage
hybrider Mikrosysteme***

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

Herbert Utz Verlag



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</p> <p>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

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Zühlke, dem Leiter des Lehrstuhls für Produktionsautomatisierung der Universität Kaiserslautern, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Kollegen, Studenten und Projektpartner haben mir wertvolle Impulse für diese Arbeit gegeben. Stellvertretend genannt seien hier nur Dirk Jacob, Gerhard Sigl, Johann Härtl und Ulrich Schilling. Schließlich gilt mein Dank *allen* Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für die äußerst unkomplizierte und kollegiale Zusammenarbeit und die stets wohlwollende Unterstützung.

München, im März 2001

Michael Höhn

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Mikromontage – Schlüsseltechnologie für innovative Produkte	1
1.2	Motivation	7
1.3	Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit	8
2	Stand der Technik	11
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
3	Konzeption fehlerkompensierender Positionierstrategien	31
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
4	Gestaltung flexibel konfigurierbarer Funktionsmodule	57
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 Fügemodule mit Kinematik	87
4.5.1	Anforderungen	88
4.5.2	Gestaltung der Greifmodule	88
4.5.3	Gestaltung der Fügemodule	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
5	Werkzeug- und Systemsynthese	105
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
6	Exemplarische Anwendung und Erprobung	132
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
7	Zusammenfassung	153
8	Literaturverzeichnis	155

Formelzeichen und Abkürzungen

Skalare

a	Kantenlänge optischer Bauelemente für die Strahlteilung
d	Mindestabstand der abzubildenden Objekte bei der Strahlteileroptik
d_{CCD}	Pixelmaß des CCD-Chips
g_{rel}	Relativer Gewichtungsfaktor (Nutzwertanalyse)
g_{abs}	Absoluter Gewichtungsfaktor (Nutzwertanalyse)
n / n'	Brechzahl objektseitig/bildseitig
r'	Minimaler Abstand zweier auflösbarer Bildpunkte nach dem Rayleigh-Kriterium
s_{opt}	Optische Weglänge
Δs_{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

T	Modulationsübertragungsfaktor der optischen Abbildung
α	Winkel zwischen Vision- und Toolkoordinatensystem
β'	Abbildungsmaßstab der Optik
δ / δ'	Objektseitiger/bildseitiger halber Öffnungswinkel
γ	Skalierungsfaktor der Bildverarbeitung
κ	Optischer Versatzkennwert der Strahlteileroptik
λ	Wellenlänge
μ	Durch Kalibrierung bedingter Fehlereinflussfaktor auf den Winkel α
v / v'	Objektseitige/bildseitige Ortsfrequenz der optischen Abbildung
v_{CCD}	Nyquist-Grenzfrequenz der CCD-Kamera
ω	Durch Kalibrierung bedingter Fehlereinflussfaktor auf das Skalierungsverhältnis γ
$\Delta\zeta$	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

$\mathbf{r}_z^V / \mathbf{r}_z^T$	Verbleibende Lageabweichung nach z Mess- und Korrekturzyklen ($z = 1, 2, \dots$) in Visionkoordinaten/Toolkoordinaten
\mathbf{t}	Ursprungsverschiebung zwischen Vision- und Toolkoordinatensystem
\mathbf{E}	Einheitsmatrix
${}^V\mathbf{M}_T$	Transformation von Vision-Koordinaten in Tool-Koordinaten
${}^T\mathbf{M}_V$	Transformation von Tool-Koordinaten in Vision-Koordinaten
\mathbf{R}	Rotationsmatrix
${}^V\mathbf{R}_T$	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).

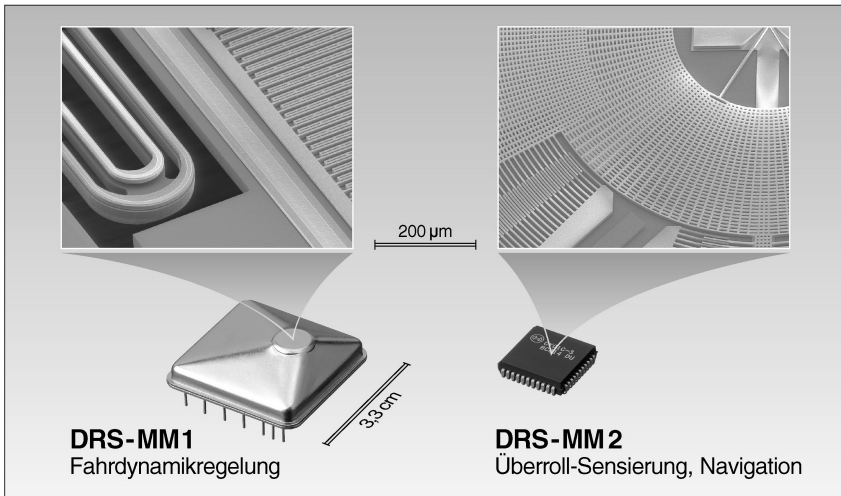
Das enorme Potential technologischer Miniaturisierung wurde von der **Mikroelektronik** eindrucksvoll aufgezeigt. Kontinuierlich verbesserte Produktionsverfahren (KOEK 1998) ermöglichen immer feiner werdende Strukturbreiten (1994: 0,35 μm , 1997: 0,25 μm , 1999: 0,18 μm) bei elektronischen Schaltkreisen und damit eine zunehmende Funktionsverdichtung. Entsprechend der SIA-Roadmap¹ 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**² (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-

¹ 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.

² 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-Technik³ (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

³ 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).

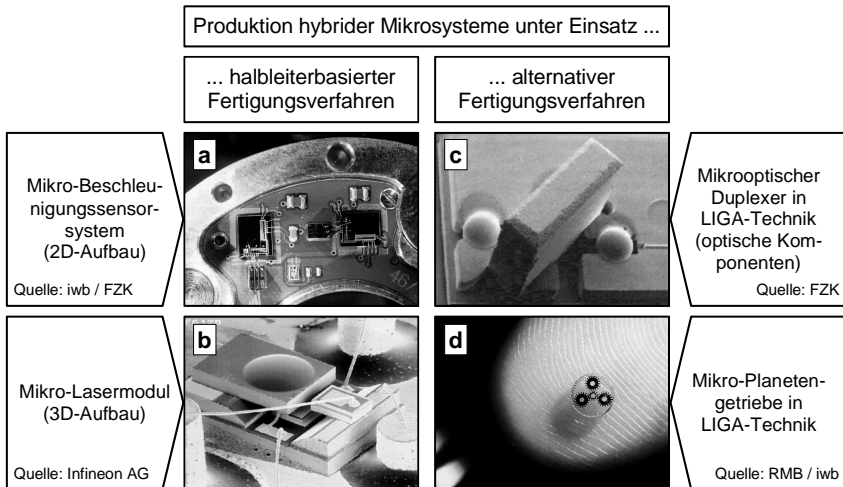


Bild 1.2: Klassifizierung hybrider Mikrosysteme mit Beispielen

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 Mikrobauteilen (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-Service⁴ (WENK 1999, ILLING 1996) und das Foundry-Konzept⁵ (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 Stückzahlenbereich⁶ (BAUER U.A. 1999, WESTKÄMPER U.A. 1998, HANKES 1998, KERDEL 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

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

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

⁶ 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**⁷ bezeichnet, bieten Potential für die Entwicklung

⁷ 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):

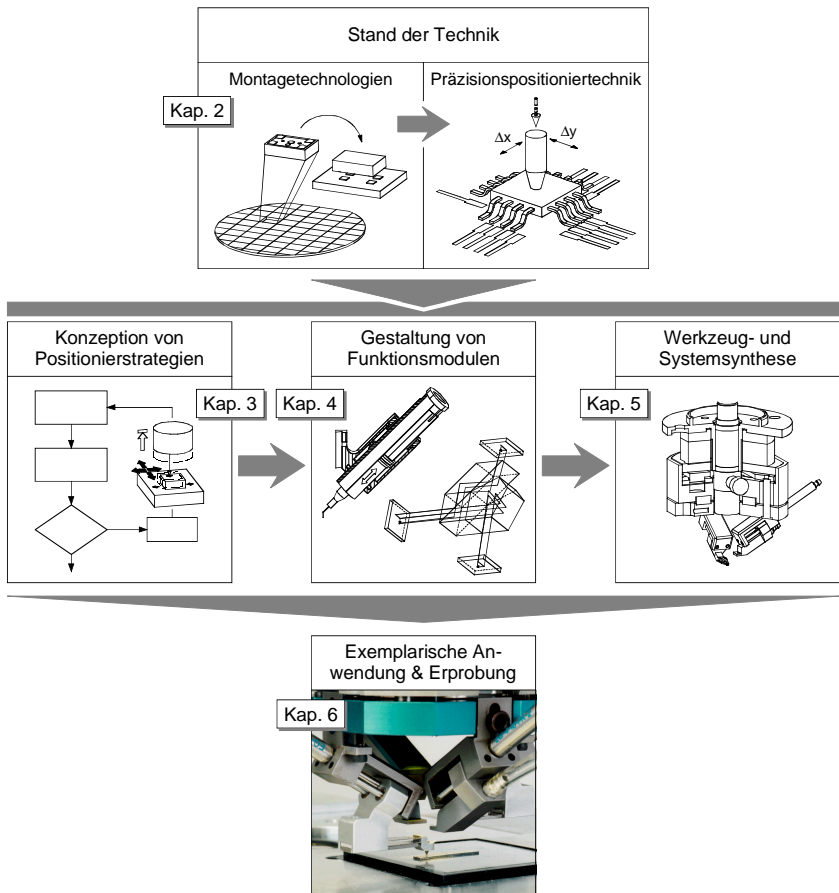


Bild 1.3: Vorgehensweise der Arbeit

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.

2 Stand der Technik

2.1 Grundlegende Montagestrategien

Aufgrund der vielfältigen Anforderungen lassen sich nur wenige Mikrosysteme in einem durchgängigen Prozess rein monolithisch, d.h. auf einem Chip integriert, fertigen, auch wenn dies ein wesentliches Bestreben vieler Entwicklungen ist. Deshalb dominiert in der Mikrosystemtechnik das hybride Aufbauprinzip aus einzelnen modularen Subkomponenten, die in sich funktionell optimiert und, falls erforderlich, auf der Basis unterschiedlicher Fertigungsprozesse und Materialien hergestellt werden. Die Hybridintegration, d.h. das geometrische und stoffliche Fügen der Einzelkomponenten zu einem hybriden Mikrosystem, erfolgt durch Technologien der Mikromontage. Hierbei ist zwischen zwei grundlegenden Montagestrategien, der *parallelen Montage im Nutzen* und der *seriellen Montage diskreter Einzelkomponenten* zu unterscheiden (Bild 2.1, nach SPATH & THIES (1996)).

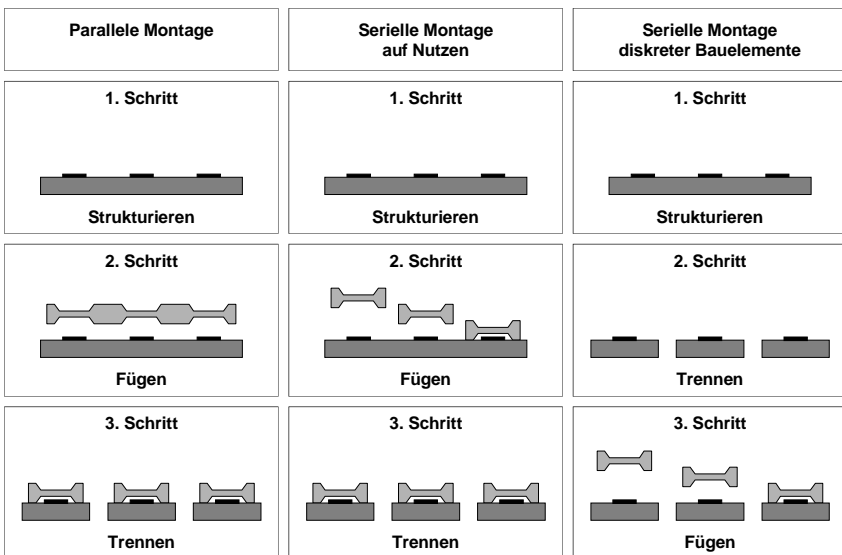


Bild 2.1: Schematische Darstellung paralleler und serieller Mikromontage

Bei der **parallelen Montage** werden viele gleichartige Strukturelemente bzw. Bauelemente in einem sogenannten *Nutzen* zusammengefasst und simultan in einem

gemeinsamen Arbeitsgang montiert. Bei halbleiterbasierten Mikrosystemen wird der Nutzen durch einen Wafer repräsentiert, auf dem eine Vielzahl von Bauelementen mit den Batchprozessen der Silizium-Mikromechanik strukturiert wird. Durch Waferbonden⁸, d.h. flächiges Fügen unterschiedlich prozessierter Wafer übereinander, entsteht ein mehrschichtiges Verbundbauteil, das sich anschließend in einzelne Mikrosysteme zerteilen lässt. Die durchgängige Erhaltung des Ordnungszustandes über die gesamte Prozesskette von der Fertigung bis zur Montage impliziert dabei eine Senkung der Produktionskosten und -zeiten. Gleichzeitig sind nur relativ große, flächige Bauteile (Wafer) zu handhaben, die zudem mit optischen oder mechanischen Marken für die Positionierung bzw. Justage versehen sein können. Allerdings können die Wafer beidseitig strukturiert sein und zerbrechliche, freigeätzte Strukturen aufweisen, wodurch ihre Handhabung und Montage erschwert wird. Hier bieten sich neuartige berührungslose Greif- und Förderprinzipien an, die einen mechanischen Kontakt mit den empfindlichen Strukturen vermeiden und die Beanspruchung der Komponenten minimieren (REINHART & HÖHN 1999A, REINHART & HÖPPNER 1999, SCHUTZRECHT 1999A). Die parallele Montage durch Waferbonden wird beispielsweise zur Herstellung von mikromechanischen Beschleunigungssensoren eingesetzt (GEßNER U.A. 1994). Dabei werden jeweils 148 Sensoren pro Wafer in fünf Waferebenen in einem Silicon-Fusion-Bondprozess bei einer Arbeitstemperatur von etwa 1100 °C gefügt.

Neuere Forschungsarbeiten zielen auf die Übertragung der nutzenbasierten Parallelmontage auf Mikrobauteile, die mittels Spritzgießen oder Heißprägen hergestellt werden (NIENHAUS 1999A). Der Nutzen wird dabei gebildet, indem die Mikrobauteile, die in einer Vielfach-Spritzgussform einen gemeinsamen Anguss aufweisen, ohne Aufgabe des Ordnungszustandes in ein Epoxidharz eingegossen werden. Durch Wegfräsen des Angusses entsteht ein Epoxid-Folienmagazin, aus dem die Bauelemente bei der Batch-Montage durch ein vieldorniges Werkzeug einfach herausgedrückt werden können.

Die parallele Montage gelingt jedoch nur zu einem Teil. Technologische und wirtschaftliche Hemmnisse, wie z.B.

- ♦ eingeschränkte Gestaltungsmöglichkeiten bezüglich Material, Design und damit auch Funktion,

⁸ Als Verbindungstechniken zum flächigen Fügen ganzer Wafer eignen sich anodisches und eutektisches Bonden (BÜTTGENBACH 1994, S. 134), Silizium-Waferbonden (*Silicon Fusion Bonding*, GEßNER U.A. 1994) sowie Glasfrittbonden (EHRKE & GABRIEL 1999).

- ♦ hohe Temperaturbelastung der Bauelemente beim Waferbonden sowie
- ♦ hohe Prozesskosten, die nur über entsprechende Stückzahlen auffangbar sind,

machen die **serielle Montage diskreter Einzelbauelemente** unumgänglich, auch wenn dadurch wesentlich höhere Montagezeiten je Bauelement in Kauf genommen werden müssen. Serielle Montagevorgänge sind auch erforderlich, um einer diskreten Bauelementefertigung eine Montage auf einen Nutzen folgen zu lassen. Damit wird es möglich, nachfolgende Prozesse, wie z.B. Beschichtungen, kosteneffizient im Batch durchzuführen. Diese Strategie wird beispielsweise von GRAMANN (1999) zur Herstellung komplexer, dreidimensionaler Mikromodule für die optische Datenübertragung auf der Waferebene verfolgt.

Da sich diese Arbeit auf serielle Mikromontagevorgänge konzentriert, soll diese Thematik weiter vertieft werden.

2.2 Halbleiterbasierte Montage- und Kontaktiertechnologien

Die serielle Montage von Mikrosystemen wird zu einem bedeutenden Teil durch Prozesse geprägt, die ihren Ursprung im sogenannten *Halbleiter-Backend-Bereich* haben, d.h. im Bereich der Montage von Halbleiterchips auf strukturierte Leiterplatten-substrate zur Herstellung mikroelektronischer Systeme. Unterschiede zur *hybriden Schaltungsintegration*⁹ in der Mikroelektronik ergeben sich jedoch aus der Größenordnung und hohen Empfindlichkeit der Bauelemente, den Genauigkeitsanforderungen und dem u. U. dreidimensionalen Aufbau von Mikromodulen (Tabelle 2.1). Zudem sind in der Regel weitaus geringere Stückzahlen zu verarbeiten, die eine flexible Auslegung der Montageeinrichtungen erfordern, um eine hohe Wirtschaftlichkeit durch die Verteilung der Investitionskosten auf mehrere Produktgruppen oder -generationen zu erzielen.

⁹ Unter *hybrider Schaltungsintegration* (auch: Hybridtechnik, Packaging) versteht man den technologischen Aufbau einer elektronischen Schaltung aus aktiven und passiven Bauelementen unterschiedlicher Packungsformen und Materialien auf einem gemeinsamen Substrat. Dabei ermöglicht die *Direktmontage* ungehäuster Halbleiterchips (ICs) auf Substrate größtmögliche Miniaturisierung bzw. Packungsdichte und Zuverlässigkeit (z.B. REICHL 1998). Die dafür erforderlichen Montage- und Kontaktierverfahren werden unter dem Begriff *Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)* zusammengefasst, der im Zuge fortschreitender Entwicklungen der Mikrosystemtechnik auch auf die Verknüpfung elektronischer mit nichtelektronischen Bauelementen (z.B. mikromechanische Sensor- oder Aktorelemente, Glasfasern etc.) ausgedehnt wurde.

	Hybridtechnik in der Mikroelektronik	Montage halbleiterbasierter Mikrosysteme
Bauteileigenschaften	quaderförmige Bauteile mit fester Struktur unempfindliche Oberflächen i.d.R. definierte Greifflächen hohe Standardisierung bei SMD-Bauteilen	Funktion bestimmt Geometrie (Chips, Linsen etc.) bruchempfindliche Materialien (GaAs, Glasfasern) empfindliche Funktionsoberflächen zerbrechliche Ätzstrukturen Kantentoleranzen bis 50 µm flexible Bauteile, z.B. optische Fasern
minimale Bauteilabmessungen	0,5 bis 1 mm	bis 0,1 mm
Montagetoleranzen	typ. $\geq 50 \mu\text{m}$	heute: 5 bis 25 µm zukünftig: $< 5 \mu\text{m}$
Montagedimensionen	planare Montage in der Ebene Fügerichtung normal zur Montageebene	Montage in mehreren Ebenen (2,5-D) unterschiedliche Fügerichtungen
Stückzahlen	i.d.R. hoch	häufig kleine Losgrößen, typ. 10 bis 100 Stück/Tag (THOBEN 1999, S.8)

Tabelle 2.1: Unterschiede zwischen hybrider Schaltungsintegration und Mikromontage

Im Folgenden werden grundlegende Montage- und Kontaktiertechnologien erläutert, die eine zentrale Rolle für den Aufbau halbleiterbasierter hybrider Mikrosysteme spielen. Dabei wird die Darstellung in prononciierter Form auf Prozesse beschränkt, die für das Verständnis der Arbeit erforderlich bzw. hilfreich sind. Für eine umfassende Beschreibung der Verfahren wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (REICHL 1988 und 1998, HEUBERGER 1989, MENZ 1997, GERLACH & DÖTZEL 1997).

2.2.1 Vereinzelung von Halbleiterbauelementen

Ausgangszustand von Mikrobauteilen, die mit halbleiterbasierten Strukturierungstechnologien gefertigt werden, ist der fertig prozessierte Wafer. Zur Vereinzelung wird der Wafer ganzflächig auf eine Adhäsivfolie (Bluetape), die in einem Spannrahmen gefasst ist, geklebt und mit einer Diamantsäge zerteilt (dicing). Die einzelnen Bauelemente werden durch Adhäsionskräfte auf der Folie fixiert, die damit als Zwischenmagazin fungiert. Mit einem Pick-and-Place-Automaten (Die-Bonder, Die-

Sorter) können die Bauelemente dann von der Adhäsivfolie entnommen werden. Um die Adhäsionskraft der Folie zu überwinden, wird das Ablösen der Bauelemente durch Ausstoßen mit einer Nadel (Die-Ejector) unterstützt. Je nach Anwendungsfall werden die Bauelemente anschließend direkt montiert (Die-Bonder) oder zur weiteren Handhabung in ein Zwischenmagazin (Waffle-Pack, Chip-Tray) sortiert (Die-Sorter).

Bedingt durch den Vereinzelungsprozess weisen die Sägekanten der Bauelemente typisch eine hohe Ungenauigkeit von ca. 50 µm auf (AZADEH U.A. 2000). Die Bauelemente können daher bei der Montage nicht anhand ihrer Kanten ausgerichtet werden.

2.2.2 Chip-and-Wire-Technik

Bei der Chip-and-Wire-Technik werden ungehäuste Halbleiterbauelemente (Bare Dies) auf ein Trägersubstrat montiert und anschließend mit dünnen Drähten elektrisch kontaktiert. Diese Montagetechnik leistet sowohl bei elektronischen Baugruppen (Montage integrierter Schaltkreise) als auch bei Mikrosystemen (z.B. Schnittstellenmodule für die optische Datenübertragung, vgl. Kap. 6.1) einen Beitrag zur Miniaturisierung und Erhöhung der Integrationsdichte.

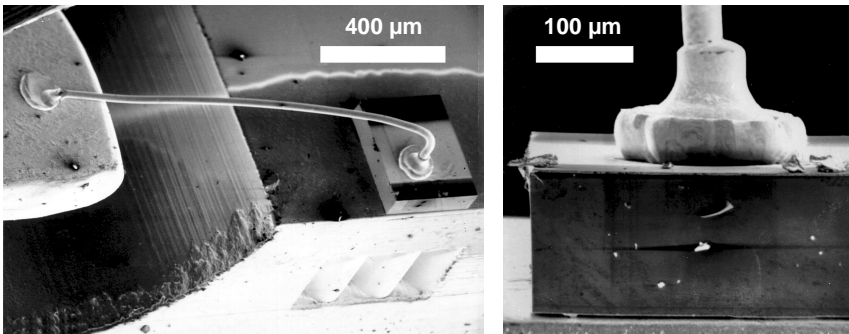


Bild 2.2: REM-Aufnahme eines optoelektronischen Mikromoduls in Chip-and-Wire-Technik; rechts: Detailaufnahme der Ball-Bondverbindung

Bild 2.2 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme eines in Chip-and-Wire-Technik aufgebauten Mikromoduls. Der erste Arbeitsschritt, der als *Die-Bonden* bezeichnet wird, dient der mechanischen Befestigung des Halbleiters auf dem Substrat.

Die Verbindung erfolgt durch Löten oder eutektisches Bonden¹⁰ und in zunehmendem Maß durch Kleben.

Im Anschluss an das Die-Bonden werden die elektrischen Verbindungen zwischen den metallischen Kontaktflächen (Bondpads) des Bauelementes und des Substrats mit bis zu 10 µm dünnen Drähten, vorzugsweise aus Gold, durch *Drahtbonden* (Wire-Bonding) hergestellt. Das Drahtbonden ist eine Mikroschweißtechnik. Das am häufigsten eingesetzte Verfahren ist das Thermosonic-Ball/Wedge-Bonden. Der prinzipielle Ablauf ist in Bild 2.3 dargestellt. Der Bonddraht wird zentrisch in einer Keramik-Kapillare des Bondwerkzeuges geführt. Das Ende des Drahtes wird zunächst durch einen Lichtbogen (elektrische Entladung) kugelförmig aufgeschmolzen. Unter Einwirkung von Temperatur und Druck bei gleichzeitiger Ultraschallanregung der Kapillare wird das Kügelchen (Ball) mit der Kontaktfläche des Bauelementes verschweißt (Ball-Bond, vgl. Bild 2.2, rechts). Anschließend wird über das Bondpad auf dem Substrat verfahren. Dort wird der Draht mit dem Rand der Kapillare angepresst, verschweißt und abgeschert (Wedge).

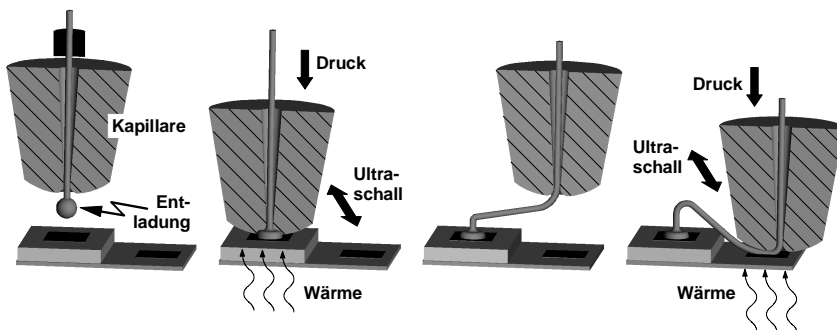


Bild 2.3: Prinzipieller Verfahrensablauf beim Thermosonic-Ball/Wedge-Drahtbonden

2.2.3 Flip-Chip-Technik

Die derzeit höchstintegrierte Aufbautechnologie für Halbleiterkomponenten in der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik ist die Flip-Chip-Technik. Im Gegensatz zur Chip-and-Wire-Technik wird durch den Übergang von peripherer zu flächenhafter

¹⁰ Beim eutektischen Bonden bildet sich bei einer Prozesstemperatur von ca. 400 °C (eutektischer Punkt) eine Si-Au-Legierung zwischen dem Siliziumbauelement und einem mit Gold beschichteten Substrat, die die beiden Fügepartner verbindet.

Anordnung der Anschlüsse unter dem Bauelement (Bild 2.4) eine weitere Senkung der Montagefläche bei gleichzeitiger Verbesserung der Kontaktierung bezüglich der Signalverarbeitungsgeschwindigkeit erreicht. In der Mikrosystemtechnik sprechen konstruktive (z.B. in der Optoelektronik, vgl. Kap. 6.1) als auch elektrische Vorteile (z.B. Hochfrequenztauglichkeit bei Mikrowellenmodulen, vgl. z.B. NIENHAUS 1999B) für die Flip-Chip-Montagetechnik.

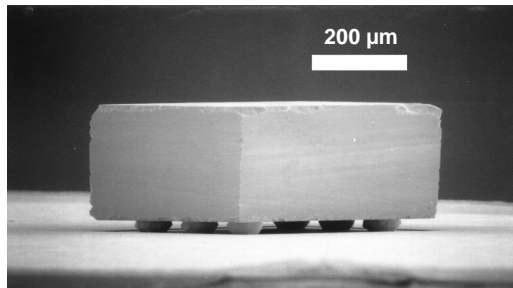


Bild 2.4: Flip-Chip auf Substrat (Quelle: Fraunhofer IZM)

Die Bezeichnung Flip-Chip kommt daher, dass der Chip auf seinem Weg vom gesägten Wafer (mit der unstrukturierten Rückseite auf das Blue-Tape geklebt) hin zu seinem Montageort auf dem Substrat umgedreht, d.h. geflippt (Die-Flip) werden muss (Bild 2.5). Die Bauelemente werden also face down, d.h. mit den zu fügenden Strukturen nach unten auf das Substrat positioniert und montiert. Die Kontaktierung erfolgt über Kontakthöcker (sogenannte Bumps), die in einem separaten Prozess (Bumping) vor der Montage auf die Anschlussmetallisierungen der im Waferverbund vorliegenden Chips aufgebracht werden. Für das Bumping steht eine Vielzahl von Prozesstechnologien zur Verfügung (REICHL 1998). Die Bauelemente werden mit dem Substrat durch Löten oder Kleben mit elektrisch leitfähigen Klebstoffen gefügt.

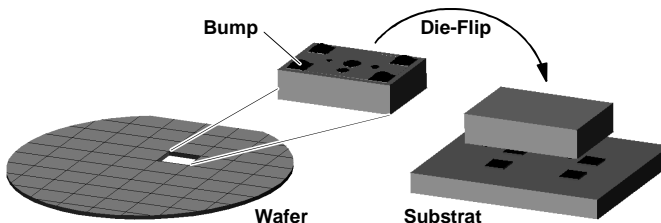


Bild 2.5: Flip-Chip-Montagetechnik von Halbleiterbauelementen

Da die zu fügenden Strukturen im letzten Abschnitt des Positionierprozesses verdeckt sind, gestaltet sich die Flip-Chip-Montage bei hohen Genauigkeitsanforderungen sehr anspruchsvoll.

2.2.4 Fügeverfahren

Neben dem Bonden werden Mikrobauelemente überwiegend durch Löten und Kleben stoffschlüssig gefügt (BAUER u.A. 1999). Insbesondere das Kleben gewinnt zunehmend an Bedeutung (HANKES 1998, S. 19, REICHL 1998, S. 105). Es bietet gegenüber dem Löten die Vorteile einer höheren Materialflexibilität, einer flussmittelfreien Verarbeitung (Vereinfachung des Montageverfahrens) und einer geringeren Temperaturbelastung von wärmeempfindlichen Bauteilen. Bei der Werkzeugentwicklung ist daher die Integrierbarkeit von Komponenten für die Durchführung von Klebprozessen relevant. In diesem Zusammenhang werden prinzipielle Möglichkeiten für das Aufbringen des Klebstoffes kurz vorgestellt.

Bei kleinen Stückzahlen und sich häufig ändernden Losgrößen stellen Stempeln, Dippen und Dispensen geeignete Verfahren für den Klebstoffauftrag dar. Die Vorteile gegenüber dem im Großserienbereich (SMD-Montage) eingesetzten Siebdruck liegen in der flexiblen Prozessführung und in der Verarbeitbarkeit von vorbestückten Substraten oder Gehäusen.

Mit **volumengesteuerten Dispensern**¹¹, die viskositäts- und rheologieunabhängig Menge fördern, können sehr kleine Klebstoffvolumina (bis unter 10 nl) mit hoher Reproduzierbarkeit (typ. 1 bis 2% Volumenschwankung, CAMELOT 1997) appliziert werden. Mit speziell entwickelten Präzisionsdispensköpfen werden derzeit Punktdurchmesser bis herunter zu einem Durchmesser von ca. 100 µm erreicht (JEREMIAS 1998).

Bei geringeren Anforderungen an die Reproduzierbarkeit werden kostengünstigere und kompaktere **Druck-/Zeit-Dispenser** eingesetzt. Damit sind Klebstoffvolumina ab etwa 25 nl dosierbar, beispielsweise im Bereich der Glasfasermontage (SCHMITZ 1998) oder bei der Montage von mikrooptischen Komponenten (GENGENBACH u.A. 1998A).

¹¹ Schrauben- und Kolbendispenser (Positive-Displacement-Dispenser); eine Übersicht mit Funktionsprinzipien findet sich z.B. in GESANG u.A. (1997).

Eine besondere Gruppe von Klebstoffen sind gefüllte Leitkleber, die metallische Füllstoffe¹² enthalten und dadurch elektrische und thermische Leiteigenschaften aufweisen. Leitkleber werden beispielsweise bei der Flip-Chip-Kontaktierung oder bei der Chip-and-Wire-Technik verwendet, wenn die Rückseite des Bauelementes eine Kontaktfläche bildet (REICHL 1998). Sie zeichnen sich durch ein komplexes, viskoelastisches Fließverhalten aus, das die Dosierung mittels Dispenser durch den Effekt des Nachquellens erschwert (BAUER U.A. 1997). Zudem wird einer Verkleinerung des Dosiernadeldurchmessers und damit der Klebepunkte durch die Füllstoffe eine Grenze¹³ gesetzt. Für diese Art von Klebern bietet sich das **Stempeln** an. Bei der Stempeltechnik wird der Stempel in eine definierte, dünne Klebstoffschicht eingetaucht. Der anhaftende Klebstoff wird dann auf dem Substrat abgesetzt. Das Stempeln ist ein sehr kostengünstiges Verfahren, ist aber in seiner Präzision durch die rheologischen und adhäsiven Eigenschaften von Stempel und Klebstoff bestimmt und damit mehr Schwankungen als das Dispensieren unterworfen (JEREMIAS 1998).

Eine sehr einfache Methode, leitfähigen Klebstoff zu applizieren, ist das **Dippen**. Dabei wird das Bauelement mit seiner Unterseite in eine Klebstoffschicht mit geeigneter Dicke eingetaucht. Das Verfahren wird z.B. bei Flip-Chips angewendet (REICHL 1998, S. 196). Durch Adhäsionskräfte bleibt genügend Klebstoff am Bauelement haften, um dieses anschließend auf dem Substrat abzusetzen. Die Menge des übertragenen Klebstoffes hängt jedoch stark von dessen Viskosität und Thixotropität ab.

2.3 Präzisionspositioniertechnik

Präzisionspositioniersysteme mit prinzipiellen Einsatzpotentialen in der Mikromontage sind im Bereich der SMD-Bestückungssysteme, Die-Bonder, Präzisionsroboter und Achssysteme zu analysieren.

2.3.1 SMD-Bestückungssysteme

Bestückungssysteme für die automatische Montage oberflächenmontierbarer Bauelemente (Surface Mount Devices – SMD) lassen sich hinsichtlich Bestückleistung (Bauelemente pro Stunde – BE/h) und Bestückgenauigkeit grob in zwei Klassen

¹² Als Füllstoffe kommen vorwiegend leitende Silberpartikel mit einer Größe von typ. 30 µm zum Einsatz.

¹³ Beim Dispensieren von Silberleitkleber muss der Nadeldurchmesser ca. 7 mal größer als die leitenden Silberpartikel (30 µm) sein, um Verstopfungen zu vermeiden (CAMELOT 1997).

einteilen. Ein detaillierter Überblick über die unterschiedlichen Maschinenkonzepte findet sich z.B. in BACHMANN U.A. (1999).

- ♦ **Pick-and-Place-Automaten** sind der genaueren Klasse zuzuordnen und werden vorwiegend für die sequentielle Einzelbestückung von hochpoligen und Fine-Pitch-Bauelementen eingesetzt. Sie erreichen eine Mengenleistung im Bereich von 1.500 bis 1.800 BE/h bei einer Bestückgenauigkeit in der Größenordnung von ± 40 bis $\pm 50 \mu\text{m}$ (4σ)¹⁴. Mit diesen Systemen lassen sich Bauelemente bis herunter zu ca. 0,5 bis 1 mm Kantenlänge bestücken.
- ♦ Sogenannte **Chip-Shooter** sind Hochleistungs-Bestückungssysteme, die durch Maßnahmen zur Reduzierung der Nebenzeiten (Bestückung mit Karussell- oder Revolverkopf nach dem Collect-and-Place-Prinzip) und Parallelisierung von Hauptzeiten (Einsatz mehrerer Bestückköpfe) hinsichtlich der Bestückleistung optimiert sind. Diese liegt zwischen 6.000 und 12.000 BE/h (1 Revolverkopf) und reicht bis 50.000 BE/h (Vierportalsystem mit vier unabhängig voneinander positionierbaren Revolverköpfen). Chip-Shooter erreichen eine geringere Bestückgenauigkeit im Bereich von $\pm 70 \mu\text{m}$ bis $\pm 90 \mu\text{m}$ (4σ).

SMD-Bestückungssysteme sind sehr kostenintensive Fertigungseinrichtungen, die nur bei höheren Stückzahlen wirtschaftlich einsetzbar sind. Sie verarbeiten in der Regel ein weitgehend standardisiertes Bauteilspektrum und weisen nicht die für die Montage komplexer Mikrosysteme erforderliche Flexibilität und Genauigkeit auf.

2.3.2 Die-Bonder

Im industriellen Halbleiter-Backend-Bereich werden für die Chipmontage (vgl. Kap. 2.2.2 und 2.2.3) kartesisch aufgebaute Pick-and-Place-Automaten, sogenannte Die-Bonder, verwendet. Durch den Einsatz mehrerer Kameras in Kombination mit Bildverarbeitung wird eine lagegenaue Montage der Chips erreicht. Dabei werden Montagegenauigkeit, Zykluszeit und Flexibilität des Montagesystems maßgeblich durch die Kameraintegration und Messstrategie beeinflusst. Dies soll anhand von zwei charakteristischen Maschinenkonzepten für Standard-Die-Bonder erläutert werden (Bild 2.6).

¹⁴ Bestückgenauigkeit, bezogen auf die vierfache Standardabweichung (4σ)

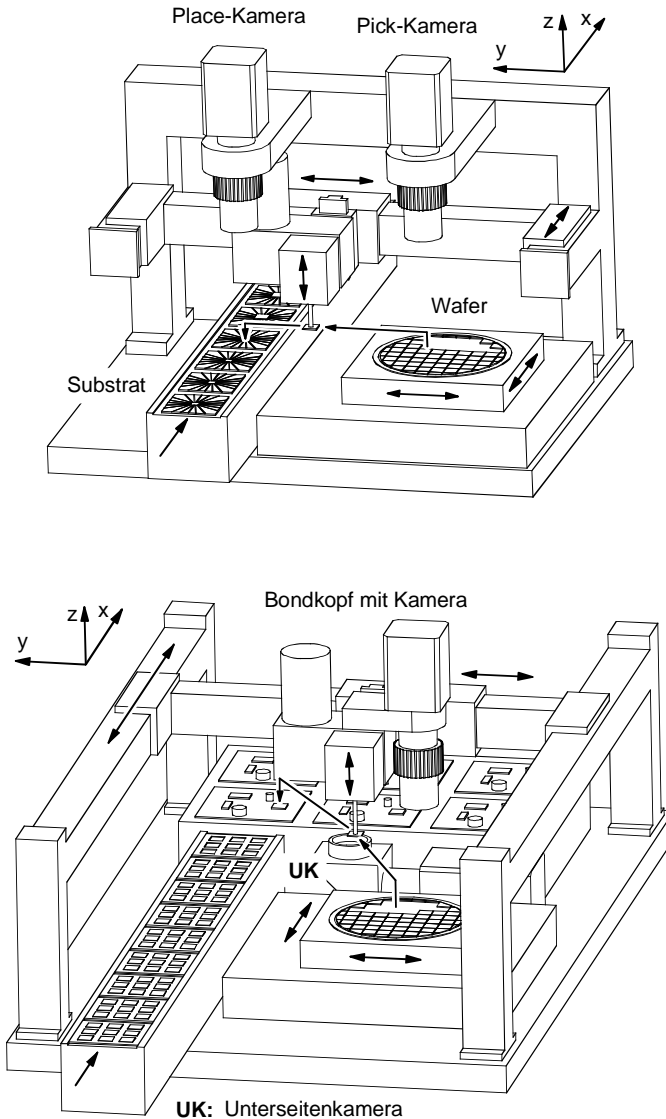


Bild 2.6: Kameraintegration bei Standard-Die-Bondern (schematische Darstellung); oben: Hochgeschwindigkeits-Die-Bonder, unten: flexibler Die-Bonder

Hochgeschwindigkeits-Die-Bonder (z.B. SCHUTZRECHT 1998A, MÜHLBAUER 1999) sind Spezialautomaten, die nur über einen kleinen Weg der x-Achse (einige Millimeter) zur Korrektur der Ablageposition verfügen. Der aufzunehmende Chip und die als sogenannte Leadframes ausgebildeten Substrate werden durch einen Wafertisch mit Die-Ejector und ein Transfersystem mit Indexer immer am gleichen Ort bereitgestellt. Der Bondkopf mit Saugpipette verfährt also im Wesentlichen zwischen zwei ortsfesten Positionen im Arbeitsraum. Lageungenauigkeiten des bereitgestellten Chips sowie des bereitgestellten Substrats werden durch zwei stationäre Kameras erfasst und durch Korrekturbewegungen der x- und y-Achse oder des Wafertisches kompensiert. Dabei erfolgt die Lageerkennung¹⁵ des Substrates parallel zum Pick-Vorgang und die des Chips parallel zum Place-Vorgang, wodurch kurze Zykluszeiten bis herunter zu ca. 300 ms erreicht werden. Thermische Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit, Kalibrierfehler sowie messtechnisch nicht erfassbare Lagetoleranzen des Chips am Greifer (Übergabefehler bei der Chipaufnahme) begrenzen die Platziergenauigkeit (Chip/Substrat) dieser schnellen Die-Bonder auf etwa $\pm 40 \mu\text{m}$. Das starre Maschinenkonzept beschränkt den Einsatz auf den Bereich großer Stückzahlen in der klassischen Halbleiter-Backend-Fertigung.

Der Übergang von stationärer zu seitlich am Bondkopf mitgeführter Substratkamera führt zu einem multipositionsfähigen Maschinenkonzept. **Flexible Die-Bonder** basieren in der Regel auf einem stehenden (z.B. ESEC 1999) oder hängenden (z.B. DATACON 1998) Achsportalsystem. Der größere nutzbare Arbeitsraum ermöglicht die Integration verschiedener applikationsspezifischer Funktionsmodule, wie z.B. ein Wendemodul (Die-Flipper) für Flip-Chips und eine Unterseitenkamera für die Lageerkennung der Bauelemente am Greifer. Neben der Verarbeitung der Chips direkt vom Wafer sind auch andere, für kleinere Stückzahlen geeignete Anlieferformen, wie z.B. Waffle-Packs, gegurtete Bauelemente (Surftape) oder Gel-Paks, möglich. Ein Nachteil dieses flexibleren Maschinenkonzeptes ist der serielle Positionierzyklus mit anteiligen Stopp- und Messzeiten für die Lageerkennung des Bauelementes über der Unterseitenkamera und die Bestimmung der Place-Position mit der mitgeführten Substratkamera. Für die Flip-Chip-Montage typische Zykluszeiten (inkl. Die-Flip und Flussmittelauftrag durch Dippen) liegen beispielsweise bei ca. 3,6 s (ESEC 1999). Mit aufwendigen konstruktiven (Luftlager, Granitbasis, hochauflösende Lineardirektantriebe) und/oder steuerungstechnischen (Temperaturkompensation) Maßnahmen wird derzeit eine Platziergenauigkeit (Chip/Substrat) von $\pm 12 \mu\text{m}$ (3σ) erreicht.

¹⁵ Für die Lageerkennung (Bildaufnahme und –auswertung) müssen etwa 150 bis 300 ms veranschlagt werden.

Wesentlich für die o.g. Maschinenkonzepte ist die Positionierung in Absolutkoordinaten und damit die Begrenzung der Platziergenauigkeit durch die Fehler des Achspositioniersystems¹⁶. Neben der Platziergenauigkeit sind für die Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten in der Mikromontage die minimalen Setzkkräfte relevant. Diese liegen typisch bei etwa 0,3 N (MÜHLBAUER 1999) bis 0,6 N (ESEC 1999).

Präzisions-Die-Bonder wurden als anwendungsspezifische Sondermaschinen für die Mikromontage von Hochfrequenzmodulen (NIENHAUS 1999B) und mikrooptischen Komponenten (GRAMANN 1999) entwickelt. Dabei wird der Positioniervorgang mittels einer (stationären oder relativ zum Greifer verfahrbaren) Kamera, die am gegriffenen Bauelement vorbei auf die Montageposition blickt, visionunterstützt in situ überwacht (VONDERHAGEN 1997). Die erreichten Montagegenauigkeiten liegen bei $\pm 5 \mu\text{m}$ (JEREMIAS 1998) bis herunter zu $\pm 1 \mu\text{m}$ (GRAMANN 1999). Für die $1 \mu\text{m}$ -Montage wurde eine Zykluszeit von 15 Sekunden angegeben.

Eine weitere, hochgenaue Klasse von Bondern wird durch **Spezialsysteme für die Flip-Chip-Montage** repräsentiert. Der derzeit wohl genaueste vollautomatische Flip-Chip-Bonder für den Produktionseinsatz (LECARPENTIER 1999) erreicht eine Platziergenauigkeit bis herab zu $\pm 1 \mu\text{m}$ (3σ). Mit Hilfe einer speziellen Doppelmikroskopoptik wird der Flip-Chip gegenüber dem Substrat ausgerichtet. Der Durchsatz des Systems liegt in Abhängigkeit von den Prozessanforderungen zwischen 200 und 300 BE/h, was einer Zykluszeit von 12 bis 18 Sekunden entspricht. Bei Investitionskosten von 1,2 Mio DM wird dieses ultrapräzise System für die Produktion von High-End-Produkten, z.B. aus dem Bereich der Optoelektronik, eingesetzt. Für den Laborbetrieb und die Montage von Kleinserien werden dagegen spezialisierte halbautomatische (z.B. OPUS 1999) und manuelle (z.B. SCHUTZRECHT 1996) Geräte verwendet.

2.3.3 Präzisionsroboter und frei programmierbare Achssysteme

Für hochpräzise und flexible Montage- und Messaufgaben wurde ein **sechssachsiger Vertikal-Knickarmroboter** mit einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 1,5 \mu\text{m}$ (2σ) in einem sphärischen Arbeitsraum von ca. 1 m entwickelt (FRICK 1994). In einer Applikation für die Mikromontage von LED-Chips (KEFERSTEIN & BRAAS 1989) wurde in Kombination mit Bildverarbeitung eine Montagegenauigkeit von $\pm 4 \mu\text{m}$ erreicht. Darüber hinaus wurde der Roboter in Prototypenanlagen für die Montage und Kontaktierung von mikromechanischen Drucksensoren (ALAVI 1998) sowie für die Montage von Mikrooptiken (SCHELLER U.A. 1997) integriert. Der besonderen Fähigkeit des

¹⁶ Dieses Positionierprinzip wird hinsichtlich seiner Fehlereinflüsse in Kap. 3.2.1 analysiert.

Roboters, sechssachsige Bewegungs- und Positioniervorgänge hochpräzise im Raum durchführen zu können¹⁷, stand 1994 ein hoher Anschaffungspreis von ca. 300.000 DM gegenüber.

Unter Berücksichtigung von montagegerechten Gestaltungsregeln (z.B. HENSCHKE 1994) sind für eine Vielzahl von Mikromontageaufgaben drei translatorische (x/y/z) und ein rotatorischer Bewegungsfreiheitsgrad um die z-Achse ausreichend. Aus diesem Grund haben *kartesisch aufgebaute Präzisionsroboter und Achssysteme* einen hohen Verbreitungsgrad erlangt. Typische Auflösungen/Wiederholgenauigkeiten der einzelnen Achsen liegen dabei in der Größenordnung von 0,5 μm /1 μm .

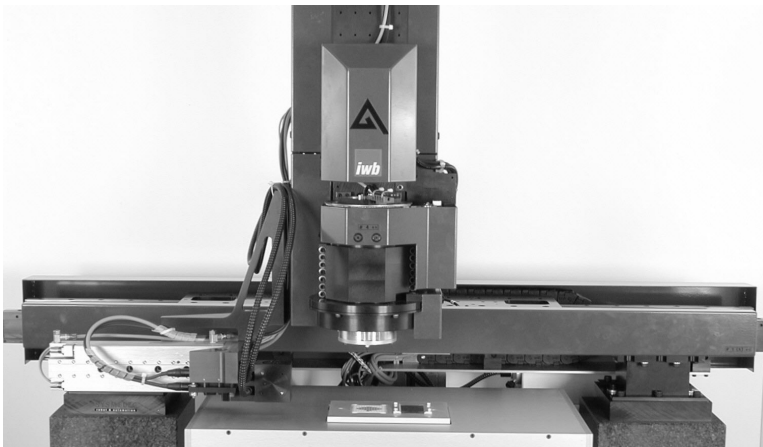


Bild 2.7: Kartesischer Präzisionsroboter (vgl. STEINER 1998, JACOB & HÖHN 2000)

Kartesische Präzisionsroboter wurden beispielsweise für die Linienmontage von Glasfasern entwickelt (SCHMITZ 1998, OSSIG U.A. 1998). Weitere Roboterapplikationen sind die Montage von Mikrogetrieben (ZÜHLKE U.A. 1997, FISCHER 1997, HANKES 1998, NIENHAUS 1999) oder von Flip-Chip-Komponenten aus dem Bereich der Optoelektronik (JACOB & HÖHN 2000), Bild 2.7. Die von STEINER (1998) und HERR (1998) vorgestellten Robotersysteme sind mit einer hohlgebohrten Roboter-z-Achse ausgestattet, durch die hindurch eine Kamera die Aktionen des Greifers beobachten und

¹⁷ Bei den in KEFERSTEIN & BRAAS (1989) sowie SCHELLER U.A. (1997) geschilderten Montagevorgängen im zweieinhalbdimensionalen Raum blieb diese Systemeigenschaft ungenutzt. Lediglich für die Kontaktierung der Drucksensoren mittels Drahtbonden (ALAVI 1998) war eine präzise räumliche Bewegungsführung erforderlich.

visionunterstützt steuern kann. In Verbindung mit hochauflösenden Linearantrieben ist damit eine Montagegenauigkeit von ca. $\pm 2 \mu\text{m}$ erreichbar. Mit Hilfe eines in die Greiferschnittstelle integrierten Kraftsensors lässt sich die Belastung auf empfindliche Bauelemente auf minimal 0,01 N begrenzen (STEINER 1998).

Hochpräzise **Achssysteme** als Portal (z/φ -Achse) in Kombination mit x/y -Tischen wurden im Labormaßstab für die flexible Montage mikrooptischer Komponenten realisiert (EBERHARDT & SCHELLER 1999, GENGENBACH U.A. 1998B). Ein Nachteil dieser kinematischen Anordnung besteht darin, dass die Grundfläche des Montagesystems nicht für einen kontinuierlichen Materialfluss (z.B. in Form eines Transfersystems) genutzt werden kann (GENGENBACH U.A. 1998A). Die Bauteile müssen in Magazinen oder Werkstückträgern auf den x/y -Tisch gebracht werden. Unproduktive Nebenzeiten sind die Folge. Damit bleibt dieses Handhabungskonzept auf die Montage kleiner Stückzahlen begrenzt - in Diskrepanz zu den verhältnismäßig hohen Investitionskosten. Diese können nur durch eine hohe Einsatzflexibilität aufgefangen werden, die es ermöglicht, das System über mehrere Produktgenerationen zu amortisieren.

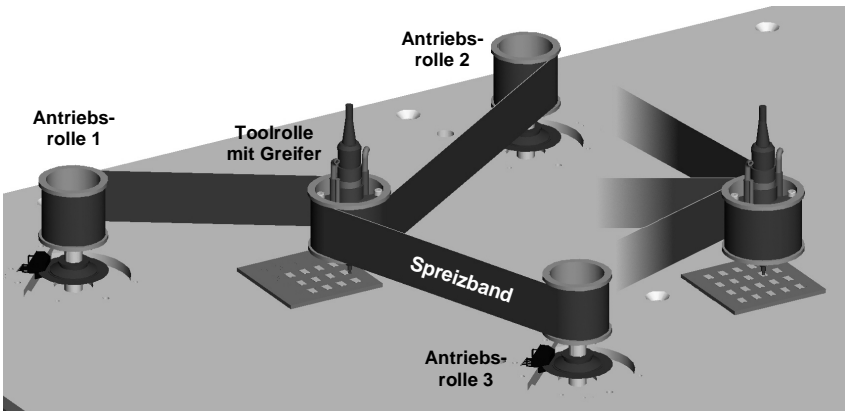


Bild 2.8: *Neuartiger Parallelroboter auf der Basis eines steifen, aufrollbaren Metallbandes, welches Handhabungsvorgänge auch außerhalb des von den Antriebsrollen aufgespannten Dreiecks ermöglicht (Quelle: iwv München / IWF Braunschweig)*

Eine zunehmend interessanter werdende Alternative stellen **Parallelroboter** (THOBEN 1999) dar. Dieses Prinzip bietet eine hohe Struktursteifigkeit bei gleichzeitig geringen Trägheitsmassen und ermöglicht dadurch eine hohe Genauigkeit und Geschwindigkeit. Prototypen erreichen eine Wiederholgenauigkeit zwischen 3 und 5 μm

(HESSELBACH & POKAR 1999), weitere Steigerungen sind zu erwarten. Allerdings weisen Parallelkinematiken mit konstanten Gliederlängen ein geringes Arbeitsraum/Bauraum-Verhältnis auf. Dies wirkt sich dann nachteilig aus, wenn umfangreiche Peripherieeinrichtungen (Tray Feeder, Die-Ejector, Die-Flipper, Prozessmodule) in den Arbeitsraum zu integrieren sind. Neuere Parallelroboterkonzepte auf der Basis rotatorischer Antriebe und variabler Gliederlängen (HESSELBACH U.A. 2000) bieten zukünftig Ansätze zur Vermeidung dieses Nachteils (Bild 2.8).

2.4 Greifer und intelligente Werkzeuge

An der Schnittstelle zwischen (makroskopischem) Handhabungsgerät und (mikroskopischem) Handhabungsobjekt kommt der **Mikrogreifertechnik** eine hohe Bedeutung zu. Der überwiegende Teil der Forschungsarbeiten verfolgt den grundlagenorientierten Ansatz, unter Nutzung oftmals neuer Technologien Mikrogreifer für ein breites Bauteilspektrum zu entwickeln („Technology Push“). Weitere Greiferentwicklungen wurden von konkreten industriellen Montageanwendungen getrieben („Application Pull“), wie z.B. die Montage von Miniaturgetrieben für Funkarmbanduhren (REINHART & HÖHN 1997A, HOFFMANN 1998) und Mikromotoren (NIENHAUS 1999A) oder die Montage optischer Fasern (ZÖPPIG U.A. 1997).

Neben Untersuchungen zu Adhäsionsgreifern (HENSCHKE 1994, WESTKÄMPER U.A. 1996, GRUTZECK & KIESEWETTER 1996), elektrostatischen (OH 1998) und fluidischen Greifern (NIENHAUS 1999B, EBERHARDT & SCHELLER 1999) konzentriert sich die Mehrzahl der Forschungsarbeiten auf den Bereich der mechanischen Greifer. Für letztere wurden Greiferantriebe auf der Basis von Piezoaktuatoren (SCHUTZRECHT 1998B, WECK & PETERSEN 1998, HÜMLER 1998, DÜNN & WURMUS 1999, SALIM & WURMUS 1996), Formgedächtnislegierungen (HESSELBACH & PITTSCHELLIS 1996, PITTSCHELLIS 1998) und elektromagnetischen Aktoren (FISCHER 1997, ZÖPPIG 1998) entwickelt und im Labormaßstab¹⁸ erprobt.

Einige Ansätze zielen auf die Integration von Sensoren für die Greifkraftmessung (MA 1999, HANKES 1998, GREITMANN 1998). Darüber hinaus spielen **intelligente Greifer und Werkzeuge**, die zusätzliche sensorische und/oder aktorische Funktionalitäten für eine flexible und präzise Prozessführung aufweisen, in der Mikromontage bisher eine eher untergeordnete Rolle. Die wenigen Arbeiten im Bereich der Sensorik

¹⁸ Festzustellen ist eine Diskrepanz zwischen der hohen Anzahl von Grundlagenarbeiten und der vergleichsweise geringen Anzahl industrieller Umsetzungen.

stammen im Wesentlichen von HENSCHKE (1994), GREITMANN (1998) und ZÖPPIG (1998), die zur Beobachtung des Montageprozesses eine Kamera in den Greifer integrierten. Ein Nachteil dieser Werkzeugkonzepte ist die durch die Sensorik erhöhte Kapitalbindung des Greifers, der dadurch zu einem kostenintensiven Betriebsmittel wird. BAUER U.A. (1999) schlagen daher ein modulares Greifersystem mit Kamera und anwendungsspezifisch austauschbaren Greifwerkzeugen vor. Hohe Werkzeugwechselzeiten und eine reduzierte Genauigkeit stehen diesem Flexibilisierungsansatz gegenüber.

Den o.g. Arbeiten ist gemeinsam, dass sie die Greiferentwicklung (und Sensorintegration) überwiegend isoliert, d.h. unabhängig von möglichen Positionierstrategien, betrachten und damit die Potentiale der integrierten Bildsensorik bei weitem nicht ausnutzen. Die Arbeiten bieten beispielsweise keine Lösungsansätze für die visuelle Lagebestimmung von Strukturen, die durch das gegriffene Bauelement verdeckt werden. Damit bleibt der Einsatzbereich dieser Werkzeuge auf sehr einfache Montagekonstellationen beschränkt; konkrete industrielle Montageanwendungen sind nicht bekannt. Sie nutzen auch nicht die Möglichkeiten der integrierten Sensorik zur Kompensation mechanischer Fehler und damit zur Reduzierung des Fertigungs- und Kostenaufwandes für die Werkzeugkomponenten.

HOLLIS & HAMMER (1992), SCHWEIGERT (1992) und HÖHN U.A. (1998) entwickelten Greifersysteme mit zusätzlicher Aktorik für die Feinmanipulation von Montageobjekten und die Kompensation von Schwingungen. Diese Werkzeugkonzepte wurden für Anwendungen in der Feinwerktechnik und konventionellen SMD-Montage erarbeitet und sind daher auf Montageprobleme der Mikrosystemtechnik nur sehr eingeschränkt übertragbar. Beispielsweise wurde der Greifer von SCHWEIGERT für feinerwerktechnische Bolzen-Loch-Fügeprobleme konzipiert. Diese Fügeproblematik ist in der klassischen Montage weit verbreitet, spielt jedoch in der Mikrosystemtechnik kaum eine Rolle.

2.5 Auswertung und Ableitung von Anforderungen

Zusammenfassend lassen sich aus dem Stand der Technik die folgenden Aussagen und Defizite ziehen:

I Montagetechniken

- ♦ Im Bereich der Montage halbleiterbasierter hybrider Mikrosysteme werden häufig die Chip-and-Wire-Technik und die Flip-Chip-Technik eingesetzt. Unterschiede

zur Mikroelektronikproduktion bestehen in der Vielfalt der zu verarbeitenden Komponenten und den oft kleinen Stückzahlen. Zudem können komplexe Mikrosysteme - im Gegensatz zum planaren Aufbau elektronischer Baugruppen - in mehreren Ebenen (siehe z.B. Bild 1.2-b) oder auf dreidimensionalen Substraten (z.B. Bild 2.2) aufgebaut sein. Unter diesen Randbedingungen ist eine flexible¹⁹ und n-schichtige Mikromontage mit den gängigen Montageautomaten der Elektronikproduktion und Halbleitertechnik nicht möglich, da diese Systeme auf ein weitgehend standardisiertes Bauteilspektrum und planar orientierte Montage spezialisiert sind.

- ♦ Klassische Halbleiterbauelemente sind meist großflächig und besitzen eine relativ stabile feste Struktur, die eine Handhabung mit Standard-Die-Bondern zulässt. Bauelemente der Mikrosystemtechnik mit teilweise sehr kleinen Abmessungen bis herunter zu 0,1 mm Kantenlänge bestehen dagegen häufig aus dem bruchempfindlichen Halbleiterwerkstoff Gallium-Arsenid und weisen sehr delikate Oberflächen und/oder zerbrechliche Ätzstrukturen²⁰ auf. Derart kleine und empfindliche Bauelemente sind möglichst während des gesamten Handhabungs- und Montageprozesses zu beobachten und erfordern eine Kontrolle und Begrenzung der bei der Montage wirkenden Kräfte.
- ♦ Während in der Chipmontage Genauigkeiten von $\pm 25 \mu\text{m}$ in der Regel ausreichend sind, sind für viele Anwendungen aus dem Bereich der Mikrosystemtechnik Genauigkeiten unterhalb $\pm 12 \mu\text{m}$, künftig sogar unterhalb $\pm 5 \mu\text{m}$ erforderlich.

II Präzisionspositioniertechnik

- ♦ Kennzeichnend für die im Halbleiter-Backend-Bereich verbreitete Pick-and-Place-Maschinenteknik ist die Positionierung in Absolutkoordinaten. Damit werden derzeit, bei hohem gerätetechnischen Aufwand, Montagetoleranzen von $\pm 12 \mu\text{m}$ erreicht. Diese Grenze wird nur durch sehr aufwendige und kapitalintensive Sondermaschinen (Präzisions-Die-Bonder, Flip-Chip-Bonder) unterschritten.

¹⁹ Der Gebrauch des Begriffes Flexibilität bezieht sich hier vor allem auf die Anpassflexibilität, also auf die Umrüstbarkeit und Wiederverwendbarkeit der Anlagenkomponenten für andere Produkte bzw. Montageaufgaben.

²⁰ Bei der Strukturierung mittels anisotropen Ätzverfahren entstehen Ätzgruben mit einem Böschungswinkel von 54,7 Grad. Ihre Kantenübergänge sind sehr scharf, so dass die Strukturen hier vorzugsweise zum Bruch neigen.

- ♦ Nahezu alle Maschinenkonzepte für die Präzisionspositioniertechnik basieren auf einer aufeinander aufbauenden Anordnung linearer Achsen. Dies bereitet mit zunehmenden Genauigkeitsanforderungen Probleme, da sich thermisch induzierte Längendehnungen und Führungsfehler (Kippen, Nicken und Gieren) stark auf die folgenden Achsen fortpflanzen (BLANK 1998). Die Folge sind steife und schwere Konstruktionen (vgl. z.B. GENGENBACH U.A. 1998B, EBERHARDT & SCHELLER 1999), die die dynamischen Eigenschaften solcher Antriebssysteme erheblich begrenzen. Parallelroboter sind ein innovativer Ansatz zur Vermeidung dieser Nachteile, befinden sich jedoch noch im Entwicklungsstadium.
- ♦ Bei den bisher veröffentlichten Mikromontageapplikationen wird in der Regel sowohl die Grobpositionierung im Weitbereich als auch die präzise Feinpositionierung im Nahbereich des Fügeortes allein über die Achsantriebe des Handhabungssystems realisiert. Diese Positioniertechnik führt zu großen Investitionskosten, da eine konstant hohe Positioniergenauigkeit über den gesamten, für die Integration von Peripherieeinrichtungen ausreichend großen, Arbeitsraum beherrscht werden muss²¹. Berücksichtigt man jedoch, dass hochgenaue Positioniervorgänge aufgrund der mikroskopischen Abmessungen der Handhabungsobjekte nur an wenigen, räumlich begrenzten Orten innerhalb des Arbeitsraumes notwendig sind, so müssen die heute eingesetzten Präzisionspositioniersysteme für viele Mikromontageaufgaben als überdimensioniert angesehen werden. Darüber hinaus gestaltet sich die Feinjustage über die Hauptachsen aufgrund des ungünstigen Verhältnisses von hoher bewegter Masse zu Antriebsleistung sehr zeitaufwendig.

III Intelligente Greifersysteme

- ♦ Flexibel einsetzbare, intelligente Greifersysteme, die den Positionierprozess durch sensorische und aktorische Zusatzfunktionalitäten unterstützen, haben bislang in der Mikromontage kaum Bedeutung erlangt. Es kann maximal auf Teillösungen und einige Ideen, wie z.B. die Integration einer Kamera, zurückgegriffen werden. Eine Anwendung in industriellen Montageapplikationen ist nicht bekannt. Als ein mögliches Hemmnis erscheint der weitgehend isolierte Greifer-

²¹ Die Größe des Arbeitsraumes hat signifikanten Einfluss auf die Kosten. Um eine hohe Positioniergenauigkeit in einem großen Arbeitsraum zu erreichen, sind sehr aufwendige und teure Maßnahmen zur Gewährleistung der Schwingungssteifigkeit und Spielfreiheit sowie zur Beherrschung thermischer Einflüsse (SLOCUM 1992) notwendig.

entwurf ohne synergetische Betrachtung der Wechselbeziehungen zwischen Greif- und Positioniertechnik.

Damit lassen sich der Handlungsbedarf für diese Arbeit konkretisieren und die Anforderungen an die zu entwickelnden Strategien und Werkzeuge formulieren:

I Entwicklung bildverarbeitungsbasierter Positionierstrategien für die kosten-effiziente Montage mikroskopischer Bauelemente

- ♦ Reduzierung der Anforderungen an die Absolutgenauigkeit des Handhabungsgerätes
- ♦ lokale Feinpositionierung, unabhängig von der Genauigkeit des Handhabungsgerätes
- ♦ Kompensation thermischer Fehlereinflüsse
- ♦ problemadäquate Strategien für unterschiedliche Zykluszeiten und Montagegenauigkeiten

II Umsetzung der Strategien in sensorgeführte Werkzeuge und Systeme

- ♦ hohe Anpassflexibilität an unterschiedliche Mikromontageaufgaben
- ♦ hohe Einsatzflexibilität in unterschiedlichen Handhabungssystemen
- ♦ prinzipielle Fähigkeit, Mikrobaulemente in mehreren Ebenen und optional auf dreidimensionale Substrate zu montieren
- ♦ Handhabung und Montage von Bauelementen mit Abmessungen im Sub-Millimeterbereich
- ♦ hohe Montagegenauigkeit im Bereich unter +/- 10 µm
- ♦ Beobachtung von Kleinstbauelementen während des Handhabungs- und Montageprozesses
- ♦ geringe mechanische Belastung empfindlicher Bauelemente beim Greifen und Fügen
- ♦ Fehlerkompensation mechanischer Werkzeugkomponenten durch integrierte Sensorik zugunsten einer vereinfachten und kostengünstigen Werkzeugkonstruktion und -fertigung
- ♦ kompakte Abmessungen und geringes Gewicht
- ♦ integrierbare Mikrofügeprozesse (Kleben, Löten)

3 Konzeption fehlerkompensierender Positionierungsstrategien

3.1 Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden Verfahren für die bildverarbeitungsunterstützte Positionierung von Mikrobautteilen entwickelt, die die Anforderungen an die Mechanik des Montagesystems reduzieren und eine Fehlerkompensation unvermeidbarer Toleranzen ermöglichen. Zunächst werden in Abschnitt 3.2 zwei grundlegende Prinzipien der visionbasierten Positionierung – die absolute und relative Positionierung mittels Bildverarbeitung – hinsichtlich Fehlereinflüssen auf die Montagegenauigkeit theoretisch analysiert und einander vergleichend gegenübergestellt. Diese Betrachtung legt der weiteren Verfahrensentwicklung das Basiskonzept der bildverarbeitungs-basierten Relativpositionierung zugrunde, die im Spannungsfeld zwischen Montagegenauigkeit und Zykluszeit entweder in einem geschlossenen Regelkreis mit optischer Lagekontrolle oder in einem gesteuerten Modus durchgeführt werden kann. In Abschnitt 3.3 wird dieses Basiskonzept dann anhand einer kinematischen Analyse des Positionierablaufs auf unterschiedliche Positionierstrategien erweitert, die wesentliche charakteristische Montageszenarien im Bereich halbleiterbasierter hybrider Mikrosysteme abdecken und als Ausgangspunkt für die Entwicklung der Montagegerätetechnik dienen.

3.2 Grundprinzipien bildverarbeitungsbasierter Positionierung

3.2.1 Absolute Positionierung

Gemäß dem Stand der Technik (vgl. S. 28) werden in der SMD- und Chipmontage fast ausschließlich absolut positionierende Verfahren genutzt (NIENHAUS 1999B, S.11). Mittels Bildverarbeitung werden die Positionen von Bauteil und Fügeort in räumlich getrennten Bildaufnahmen unabhängig voneinander, d.h. ohne Referenz oder direkten Bezug zueinander, vermessen. Mit dieser industriell verbreiteten Pick-and-Place-Maschinenteknik werden derzeit bei hohem gerätetechnischen Aufwand Montagegenauigkeiten von bis zu $\pm 12 \mu\text{m}$ (3σ) erreicht (JEREMIAS 1998, ESEC 1999).

Zur Analyse der Fehlereinflüsse bei der absoluten Positionierung ist in Bild 3.1 eine typische Systemkonfiguration (z.B. entsprechend dem Aufbau eines Die-Bonders,

vgl. Bild 2.6 unten) schematisch dargestellt. Demnach wird zunächst das gegriffene Bauteil im Sichtfeld einer ersten, ortsfesten Kamera lokalisiert. Diese Messung, die auch als optische Zentrierung bezeichnet wird (BACHMANN U.A. 1999), dient der Erfassung von Lageungenauigkeiten des Bauteils am Greifer. In einem weiteren Messschritt wird anschließend die Fügeposition mit einer zweiten, seitlich am Greifkopf mitgeführten Kamera vermessen (vgl. z.B. SCHUTZRECHT 1992, SCHUTZRECHT 1993, BACHMANN U.A. 1999). Bei bekannter Position der beiden Bildaufnahmeorte wird die im jeweiligen Kamerasichtfeld ermittelte Lage des gegriffenen Bauteils und des Fügeortes zur Berechnung des resultierenden Positionsversatzes in das Achskoordinatensystem des Handhabungsgerätes (repräsentiert durch das Welt- bzw. Toolkoordinatensystem, vgl. Bild 3.1) transformiert, in dem dann die Lagekorrektur stattfindet. Hierbei handelt es sich um eine einmalige, respektive gesteuerte Korrekturbewegung ohne Rückführung der erreichten Endposition des zu fügenden Bauteils.

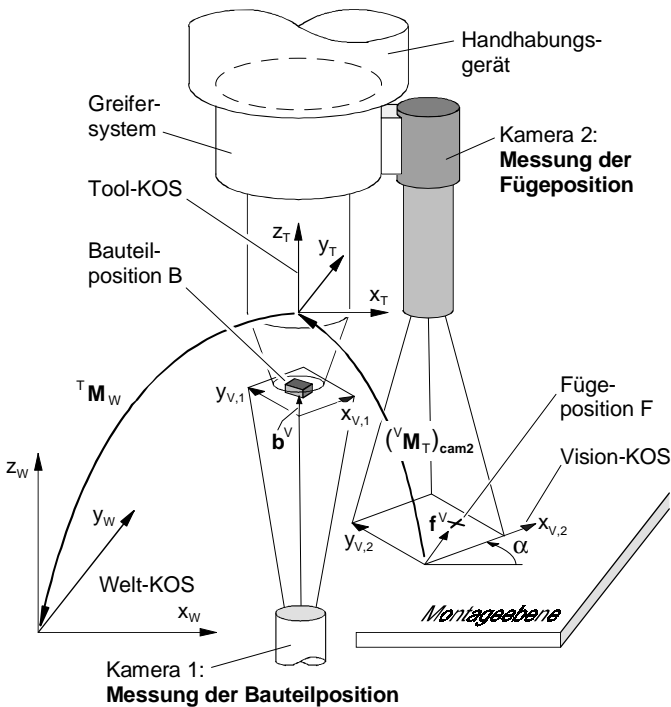


Bild 3.1: Absolutes Positionierverfahren – räumlich getrennte Positionsmessung der Fügepartner

Nachfolgend werden die Ungenauigkeiten dieses Verfahrens theoretisch untersucht. Voraussetzung für die Übertragung der 2D-Bildverarbeitungsdaten in Achskoordinaten ist eine Relation zwischen dem Sensorkoordinatensystem und dem Achskoordinatensystem. Diese Beziehung wird durch *interne und externe Parameter* der Kamera definiert (MOCTEZUMA 1996, S. 100-108). Die internen Parameter charakterisieren die perspektivische Abbildung der Optik. Sie beinhalten Abbildungsfehler (optische Verzerrungen), effektive Brennweite und die Skalierungsfaktoren, die den Abbildungsmaßstab des Systems kennzeichnen. Die externen Parameter beschreiben die Position und Orientierung der Kamera in Bezug zum Achskoordinatensystem des Handhabungsgerätes. Für die Ermittlung der internen und externen Parameter sind aus der Literatur unterschiedliche Kalibrierverfahren bekannt (LENZ 1987, TSAI 1987, WANG 1992, WENG U.A. 1992). Diese Methoden gelten für den allgemeinen dreidimensionalen Fall, bei dem die räumliche Lage der Kamera durch drei Freiheitsgrade der Rotation und drei Freiheitsgrade der Translation beschrieben wird.

Bei einem vierachsigen Handhabungssystem, wie in Bild 3.1 dargestellt, ist die Bildebene parallel zur Objekt- bzw. Montageebene ausgerichtet. Die Transformation der Visionkoordinaten kann dadurch auf ein ebenes Problem reduziert werden. Die Lage und Orientierung der Kamera lässt sich dann durch die folgenden, externen Parameter beschreiben:

- ◆ Rotationswinkel α für die Verdrehung des Visionkoordinatensystems um dessen z-Achse gegenüber dem Toolkoordinatensystem des Handhabungsgerätes (vgl. Bild 3.1)
- ◆ Translationsvektor $\mathbf{t} = (t_x, t_y)$ für die Ursprungsverschiebung zwischen dem Vision- und dem Toolkoordinatensystem

Der Abbildungsmaßstab der Kamera wird durch einen Skalierungsfaktor γ [mm/Pixel] berücksichtigt²². Dieser ist für die Umwandlung der Pixelkoordinaten des Bildspeichers in Steuergrößen für die Korrekturbewegung des Handhabungsgerätes notwendig. Ein Kalibrierverfahren zur Identifikation dieser Parameter für den ebenen Fall ist in HANKES (1998, S. 89-93) dargestellt.

Mit o.g. Parametern kann die Transformation der Visionkoordinaten in das Toolkoordinatensystem exemplarisch für die mitgeführte Kamera 2 angegeben werden. Sie ist

²² Neigungsfehler zwischen der Bild- und Objektebene können vereinfachend durch Ermittlung unterschiedlicher Skalierungsfaktoren γ_x und γ_y für die beiden Koordinatenachsen des CCD-Chips berücksichtigt werden.

durch die Rotationsmatrix \mathbf{R} und den Translationsvektor \mathbf{t} bestimmt. Der Skalierungsfaktor γ wird hier der Rotationsmatrix zugeschlagen. Die Gesamttransformation ${}^V\mathbf{M}_T$ überführt dann die Lage eines Objektes im Visionkoordinatensystem in das Toolkoordinatensystem des Handhabungsgerätes:

$$({}^V\mathbf{M}_T)_{cam2} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \text{ mit } \mathbf{R} = \gamma \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \text{ und } \mathbf{t} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Seien nun \mathbf{b}^V und \mathbf{f}^V Vektoren, die die Lage des gegriffenen Bauteils B und des Fügeortes F im Visionkoordinatensystem der jeweiligen Kamera beschreiben (vgl. Bild 3.1), dann folgt für die Kalkulation der Lageabweichung \mathbf{r}_0 im Toolkoordinatensystem:

$$\mathbf{r}_0^T = ({}^V\mathbf{M}_T)_{cam1} \cdot \mathbf{b}^V - ({}^V\mathbf{M}_T)_{cam2} \cdot \mathbf{f}^V \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Entsprechend Gleichung 3.2 ist die Montagegenauigkeit dieses absoluten Positionierverfahrens durch folgende **Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Lageabweichung** begrenzt:

- ♦ Messungenauigkeit der bildgebenden Sensorik bei der Vermessung der Bauteil- und der Fügeposition, enthalten in den Koordinaten \mathbf{b}^V und \mathbf{f}^V
- ♦ Kalibrierfehler ($\Delta\gamma$, $\Delta\alpha$, Δt_x , Δt_y) in den Transformationsmatrizen (vgl. Gl. 3.1) zur Überführung der Visionkoordinaten in Achskordinaten des Handhabungsgerätes

Nach Untersuchungen von HANKES (1998, S. 78) ist mit Kalibrierfehlern in der Größenordnung der Messungenauigkeit der Bildverarbeitung zu rechnen. Die Kalibrierfehler haben damit einen signifikanten Einfluss von etwa 50% auf die Genauigkeit der Lagebestimmung. Zusätzliche Ungenauigkeiten entstehen dadurch, dass die unter stationären Bedingungen ermittelten externen Parameter der Kalibrierung in stationären thermischen Störeinflüssen unterworfen sind. Diese werden durch Temperaturschwankungen aus dem Produktionsumfeld und, abhängig von den Betriebsbedingungen, durch innere Wärmequellen des Handhabungssystems (z.B. Antriebe, Führungen) verursacht (REINHART & GRÄSER 1998B). Die thermischen Einflüsse führen zu Verformungen der Struktur und damit zu einer fehlerhaften Transformation der Visionkoordinaten in die Lagekorrektur. Bei konventionellen Präzisionshandhabungssystemen sind gerade die thermischen Einflüsse nur unter einem beträchtlichen konstruktiven und steuerungstechnischen Aufwand beherrschbar (SLOCUM 1992).

Zu den Unsicherheiten bei der Bestimmung der Lageabweichung addieren sich die **Fehler der Lagekorrektur**. Da der räumliche Versatz zwischen der Fügeachse und der optischen Messachse zu einer Trennung von Mess- und Fügeposition führt, befindet sich der Fügeort nach der Lagekorrektur außerhalb des Sichtfeldes der Kame-

ra. Somit ist eine optische Kontrolle und Rückführung der erreichten Position nicht möglich; die Lagekorrektur kann also nur gesteuert (open loop) durchgeführt werden. Sie wird aufgrund der langen Verfahrwege zwischen den räumlich getrennten Bildaufnahme-positionen und der Fügeposition durch die absoluten Positionierfehler des Handhabungssystems beeinflusst. Zudem können Störeinflüsse, wie z.B. ein Verrutschen des Bauteils am Greifer nach der optischen Zentrierung nicht erfasst und ausgeglichen werden.

Zusammenfassend bestehen die wesentlichen Nachteile dieses Verfahrens in der Begrenzung der erreichbaren Montagegenauigkeit durch die Genauigkeit der Kame-rakalibrierung, durch thermische Störeinflüsse und durch die Absolutgenauigkeit des Handhabungssystems. Die Minimierung dieser Fehlereinflüsse erfordert eine sehr aufwendige Präzisionsmechanik und einen hohen Aufwand für die exakte Identifikation der Kalibrierparameter.

3.2.2 Relative Positionierung

Um die beschriebenen Nachteile absolut positionierender Verfahren zu vermeiden, wird für die zu entwickelnden Werkzeuge und Gerätekomponenten ein Basiskonzept gewählt, das – unabhängig von der Absolutgenauigkeit des Achssystems und auf der Grundlage unscharfer Kalibrierparameter – eine unmittelbare Erfassung und Kompensation auftretender Positionsungenauigkeiten ermöglicht.

Liegt die Fügeachse, wie in Bild 3.2 dargestellt, innerhalb des optischen Messbereiches, dann können sowohl das zu fügende Bauteil am Greifer als auch der Fügeort auf dem Substrat im Sichtfeld der Kamera abgebildet werden. In diesem Fall lässt sich die Bestimmung der Lageabweichung auf eine Relativmessung mittels Bildverarbeitung in einem gemeinsamen Bezugskoordinatensystem, dem Vision-Koordinatensystem, zurückführen. Wird die ursprüngliche Lageabweichung wiederum durch den Vektor \mathbf{r}_0 beschrieben, so gilt in Visionkoordinaten:

$$\mathbf{r}_0^V = \mathbf{b}^V - \mathbf{f}^V \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Zur Durchführung der Lagekorrektur muss der Positionsversatz \mathbf{r}_0^V in Visionkoordinaten in den Korrekturvektor \mathbf{r}_0^T in Toolkoordinaten überführt werden. Diese Transformation wird durch die Rotationsmatrix ${}^V\mathbf{R}_T$ beschrieben:

$$\mathbf{r}_0^T = {}^V\mathbf{R}_T \mathbf{r}_0^V \quad (\text{Gl. 3.4})$$

$$\text{mit } {}^V\mathbf{R}_T = \gamma \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad [\gamma] = \text{mm/Pixel}$$

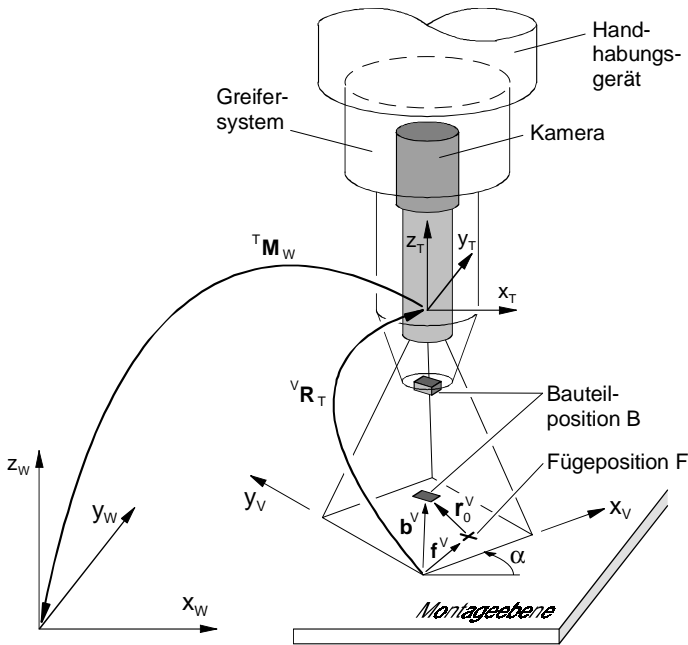


Bild 3.2: Relatives Positionierverfahren – beide Fügepartner befinden sich im Sichtfeld der Kamera

Bei dieser Systemkonfiguration entfällt gegenüber dem absoluten Positionierverfahren (vgl. Gleichung 3.1) der translatorische Offset t zwischen dem Vision- und dem Toolkoordinatensystem, da beide Fügepartner gemeinsam im Kamerasichtfeld abgebildet werden. Durch den Wegfall dieses Offsets ist die Kalibrierung deutlich stabiler gegenüber thermischen Einflüssen. Die Lagekorrektur erfolgt lediglich als Relativbewegung, deren Orientierung im Toolkoordinatensystem durch die Rotationsmatrix ${}^V R_T$ vorgegeben wird. Dabei sind nur kleine Korrekturbewegungen innerhalb des Sichtfeldes der Kamera notwendig. Die Vermeidung langer, präziser Verfahrensbewegungen, wie sie bei der absoluten Positionierung zwischen den räumlich getrennten Bildaufnahmen und dem Fügeort notwendig sind, wirkt sich positiv auf die Genauigkeit und Zykluszeit aus.

Die Korrektur der Lageabweichung kann bei diesem Verfahren, abhängig von den konkurrierenden Anforderungen an die Montagegenauigkeit und die Zykluszeit, prinzipiell auf zwei unterschiedliche Arten durchgeführt werden:

- ♦ Bei der **gesteuerten Relativpositionierung** erfolgt die Lagekorrektur durch eine einmalige Relativbewegung ohne Rückführung der erreichten Endlage des Bauteils (open loop). Die Genauigkeit wird damit von der Positioniergenauigkeit der Achsen und der Güte der Kamerakalibrierung beeinflusst. Aufgrund des nur kleinen Korrekturweges ist der Fehlereinfluss durch diese Faktoren jedoch weitaus geringer als bei den absolut positionierenden Verfahren des Standes der Technik. Die einmalige Korrekturbewegung begünstigt eine kurze Zykluszeit.
- ♦ Bei der **lagegeregelten Relativpositionierung** wird die Lagekorrektur dagegen in einem geschlossenen Positionsregelkreis zwischen dem Vision-System und den Positionierachsen durchgeführt (closed loop by visual feedback). Dies ist möglich, wenn die zu justierenden Mikrostrukturen der im gemeinsamen Kamerasichtfeld abgebildeten Fügepartner permanent für eine optische Messung der relativen Lageabweichung mittels Bildverarbeitung zugänglich sind. Der Positioniervorgang setzt sich dann aus mehreren Mess- und Korrekturzyklen zusammen. Nach Durchführung der Lagekorrektur wird die verbleibende Restabweichung zwischen den Bauteilen durch eine wiederholte Bildaufnahme und –auswertung bestimmt und die Position ggf. erneut nachkorrigiert, bis die geforderte Ablagegenauigkeit erreicht ist. Das Bauteil wird also iterativ in mehreren Schritten der Sollposition über dem Fügeort angenähert. Folglich wird die Genauigkeit der Lagekorrektur - im Gegensatz zur gesteuerten Relativpositionierung (s.o.) - nicht von der Positioniergenauigkeit der Achsen, sondern durch deren wesentlich bessere Positionsauflösung, respektive kleinste Schrittweite, beeinflusst. Damit zielt dieses Verfahren auf die Erreichung einer hohen Montagegenauigkeit mit einer verhältnismäßig einfachen und kostengünstigen Mechanik. Weiterhin werden auftretende Positionsungenauigkeiten, beispielsweise infolge temperaturabhängiger Verlagerungen oder durch ein Verrutschen des Bauteils am Greifer, unmittelbar erkannt und korrigiert, wodurch eine sehr präzise Justage des Bauteils gegenüber dem Substrat möglich ist. Das Verfahren eignet sich jedoch aufgrund des iterativen Ablaufes nicht für schnelle Pick-and-Place-Aufgaben mit minimalen Zykluszeiten.

Im Folgenden soll nun untersucht werden, welchen Einfluss Kalibrierfehler auf die Genauigkeit der lagegeregelten Relativpositionierung haben. Angenommen, der Winkel α in der Transformationsmatrix (Gleichung 3.4) sei fehlerhaft mit dem Faktor

μ und das Skalierungsverhältnis γ sei fehlerhaft mit dem Faktor ω , dann gilt für die Transformation der Lageabweichung in das Toolkoordinatensystem²³:

$$\mathbf{r}_0^{\text{T}} = {}^{\text{V}}\mathbf{R}'_{\text{T}} \mathbf{r}_0^{\text{V}} \quad (\text{Gl. 3.5})$$

$$\text{mit } {}^{\text{V}}\mathbf{R}'_{\text{T}} = \omega \cdot \gamma \cdot \begin{bmatrix} \cos(\mu\alpha) & -\sin(\mu\alpha) \\ \sin(\mu\alpha) & \cos(\mu\alpha) \end{bmatrix}$$

Aufgrund dieses Transformationsfehlers verbleibt nach der anschließenden, ersten Lagekorrektur im Toolkoordinatensystem ein Restversatz, der sich als Differenz zwischen der korrekten Transformation (Gleichung 3.4) und dem fehlerhaft kalkulierten Korrekturvektor (Gleichung 3.5) ergibt:

$$\mathbf{r}_1^{\text{T}} = \mathbf{r}_0^{\text{T}} - \mathbf{r}'_0^{\text{T}} \quad (\text{Gl. 3.6})$$

Diese Positionsabweichung ist bei der iterativen Positionierung wiederum Ausgangsbasis für einen erneuten Mess- und Korrekturzyklus. Aufgrund der wiederholten Bildaufnahme ist die Darstellung in Visionkoordinaten relevant:

$$\mathbf{r}_1^{\text{V}} = ({}^{\text{V}}\mathbf{R}_{\text{T}})^{-1} \mathbf{r}_1^{\text{T}} \quad (\text{Gl. 3.7})$$

$$\text{mit } ({}^{\text{V}}\mathbf{R}_{\text{T}})^{-1} = {}^{\text{T}}\mathbf{R}_{\text{V}} = \frac{1}{\gamma} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

Aus Gleichung 3.7 folgt mit den Gleichungen 3.6, 3.5 und 3.4 für die nach dem ersten Mess- und Korrekturzyklus verbleibende Lageabweichung in Visionkoordinaten:

$$\mathbf{r}_1^{\text{V}} = (\mathbf{E} - ({}^{\text{V}}\mathbf{R}_{\text{T}})^{-1} \cdot {}^{\text{V}}\mathbf{R}'_{\text{T}}) \mathbf{r}_0^{\text{V}} \quad (\text{Gl. 3.8})$$

mit der 2-reihigen Einheitsmatrix \mathbf{E} .

Mit der Matrixsubstitution $\mathbf{G} = (\mathbf{E} - ({}^{\text{V}}\mathbf{R}_{\text{T}})^{-1} \cdot {}^{\text{V}}\mathbf{R}'_{\text{T}})$ und dem Index z , der die Anzahl der Iterationsschritte bezeichnet, kann die Gleichung 3.8 in eine allgemeine Darstellung der nach z Mess- und Korrekturzyklen verbleibenden Lageabweichung überführt werden:

$$\mathbf{r}_z^{\text{V}} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{r}_{(z-1)}^{\text{V}} \quad (\text{Gl. 3.9})$$

Diese Abweichung lässt sich durch rekursive Berechnung von Gleichung 3.9 auf den

²³ Die mit den fehlerbehafteten Kalibrierdaten berechneten Größen sind durch einen hochgestellten Strich gekennzeichnet.

ursprünglichen Positionsversatz \mathbf{r}_0 der beiden Fügepartner (vor der ersten Lagekorrektur) zurückführen:

$$\mathbf{r}_z^V = \mathbf{G}^z \cdot \mathbf{r}_0^V \quad (\text{Gl. 3.10})$$

Anhand von Gleichung 3.10 kann nun der Einfluss von Kalibrierfehlern auf die Genauigkeit der lagegeregelten Relativpositionierung beurteilt werden. Mit einer zunehmenden Anzahl von Mess- und Korrekturzyklen ($z \rightarrow \infty$) konvergiert diese Funktion gegen den Nullvektor:

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \mathbf{G}^z \cdot \mathbf{r}_0^V = \mathbf{0} \quad (\text{Gl. 3.11})$$

Aus Gleichung 3.11 folgt, dass Kalibrierfehler bei diesem Verfahren kompensiert werden und daher – im Gegensatz zu dem absoluten Positionierverfahren nach Kapitel 3.2.1 – keinen Einfluss auf die erreichbare Montagegenauigkeit haben. Eine ungenaue Kamerakalibrierung erhöht lediglich – zu Lasten der Positionierzeit – die Anzahl der Mess- und Korrekturzyklen, die zum Erreichen einer definierten Füge toleranz notwendig sind.

Dieser vereinfachte mathematische Ansatz gilt jedoch nur unter Vernachlässigung der Messungenauigkeiten mittels Bildverarbeitung und der begrenzten minimalen Schrittweite des Achspositioniersystems. Unterhalb der Auflösungsgrenze der Achsen ist keine definierte Feinkorrektur der Lageabweichung möglich. Unter Berücksichtigung dieser Grenzen des Verfahrens konvergiert die verbleibende Lageabweichung mit zunehmender Anzahl an Iterationsschritten gegen einen Restfehler, der die Messungenauigkeiten der Bildverarbeitung und die Positionsauflösung der Achsen beinhaltet (Bild 3.3, oben). Die erforderliche Anzahl an Mess- und Korrekturzyklen hängt dabei von der Güte der Kamerakalibrierung und der zulässigen Füge toleranz ab (Bild 3.3, unten).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass nach dem Prinzip der bildverarbeitungs basierten Relativpositionierung wesentliche Fehlereinflüsse auf die Montagegenauigkeit, wie sie bei den absolut positionierenden Verfahren des Standes der Technik auftreten, kompensiert bzw. minimiert werden können. Damit begünstigt dieses Basiskonzept eine einfache und kostengünstige Montagegerätetechnik und dient als Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung aufgabenspezifischer Positionierstrategien.

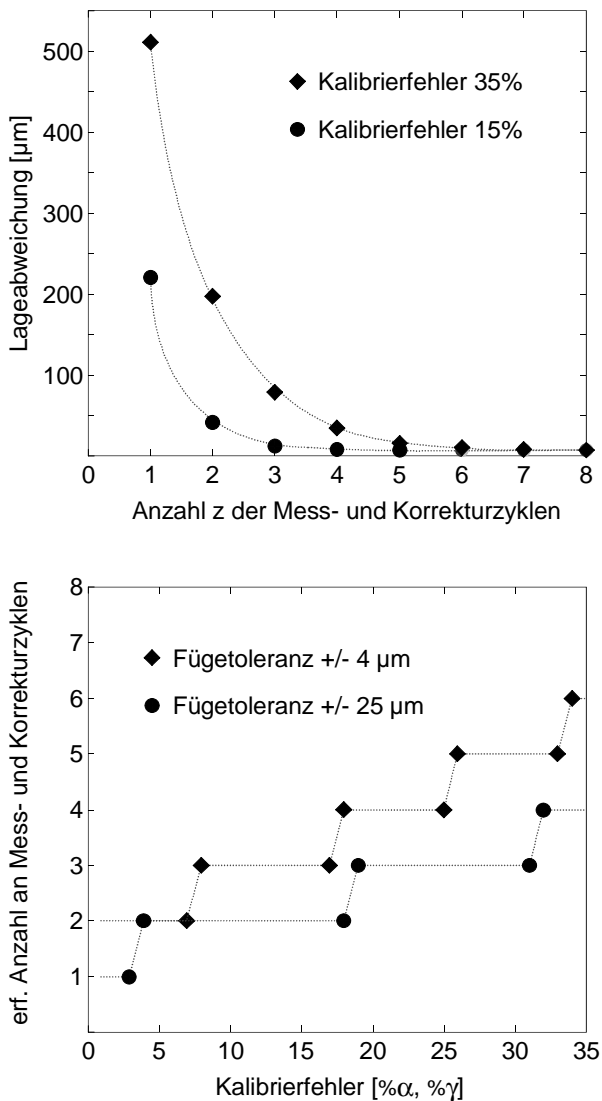


Bild 3.3: Simulation der lagegeregelten Relativpositionierung. Oben: Konvergenz der Lageabweichung als Funktion der Iterationsschritte; unten: notwendige Schritt-Anzahl als Funktion des Kalibrierfehlers und der geforderten Montagegenauigkeit (zulässige Fügetoleranz)

3.3 Kinematische Analyse des Positionierablaufes

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Entwicklung von Strategien, um das Prinzip der bildverarbeitungs-basierten Relativpositionierung auf unterschiedliche Montageszenarien anzuwenden.

3.3.1 Analyse der Montageaufgabe - Montageszenarien

Die optische Lageerkennung der zu fügenden Mikrobau-elemente kann prinzipiell anhand der Bauteilaußengeometrie²⁴, an funktionsrelevanten Strukturen (z.B. Leads, Pads, Bumps) oder aber an speziell applizierten Referenzmarken erfolgen. Diese Erkennungsmerkmale für die Bildverarbeitung, die von der spezifischen Bauteilgestaltung abhängen, werden im Folgenden allgemein unter dem Begriff **Referenzstrukturen** zusammengefasst (Bild 3.4).

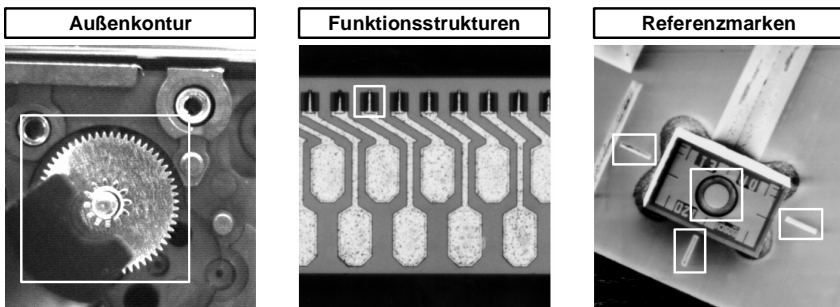


Bild 3.4: Referenzstrukturen

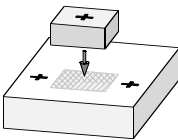
Für die Entwicklung von Strategien für die bildverarbeitungs-basierte Relativpositionierung ist die Beobachtbarkeit der Referenzstrukturen in der **Justageposition** von Bedeutung. Unter der Justageposition wird die Position des Bauelementes oberhalb des Fügeortes verstanden, in der die relative Messung und Feinkorrektur der Lageabweichung (Justage des Bauelementes gegenüber dem Substrat) vorgenommen wird.

²⁴ Eine Lageerkennung über die Außengeometrie ist nur bei entsprechend hoher Maßhaltigkeit der Bauelemente (z.B. Mikrozahnräder, Glasfasern) möglich. Dagegen können Halbleiterbauelemente i.d.R. nicht anhand ihrer Außenkanten ausgerichtet werden, da diese, bedingt durch den Dicing-Prozess (vgl. Kap. 2.2.1), Toleranzen bis zu 50 µm aufweisen.

Entsprechend diesem Klassifizierungsmerkmal ist eine Einteilung und Beschreibung möglicher Montagekonstellationen in drei grundlegende Szenarien möglich. Dabei ist die Darstellung nach Bild 3.5 als Abstraktion zu verstehen, die eine Anwendung der zu entwickelnden Verfahren auf unterschiedlich ausgeprägte Referenzstrukturen und Bauteilgeometrien (vgl. Bild 3.4) ermöglicht.

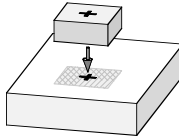
1. Art:

Referenzstrukturen
beider Fügepartner
sichtbar



2. Art:

Referenzstrukturen
des Substrats
verdeckt



3. Art:

Referenzstrukturen
des Fügeteils
verdeckt

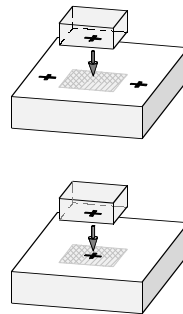


Bild 3.5: Klassifizierung von Montageszenarien bzgl. der Beobachtbarkeit der Referenzstrukturen in der Justageposition (abstrahierte Darstellung)

Das **Montageszenario 1. Art** stellt den einfachsten Fall dar. Hierbei liegen sowohl die Referenzstrukturen des Substrates als auch die des Fügeteils während der Justage innerhalb des Sichtfeldes des optischen Systems. Nach dem Fügen des Bauelements kann die erreichte Ablagegenauigkeit mittels Bildverarbeitung durch eine Post-Process-Messung bestimmt werden.

In einem schwierigeren Fall, charakterisiert durch das **Montageszenario 2. Art**, verdeckt das vorpositionierte Fügeteil die darunter liegenden Referenzstrukturen des Substrates. Eine dem Fügeprozess nachfolgende Kontrolle der erreichten Ablagegenauigkeit mittels Bildverarbeitung ist nur bei optisch transparenten Materialien möglich.

Im schwierigsten Fall, bezeichnet als **Montageszenario 3. Art**, befinden sich die Referenzstrukturen des Fügeteils auf dessen Unterseite und sind damit für eine optische Beobachtung von oben nicht mehr zugänglich. Bei der Montage müssen die einander zugewandten Strukturen von Fügeteil und Substrat mittels Bildverarbeitung erkannt und abgeglichen werden. Ein Beispiel für dieses Szenario ist die Montage von Flip-Chip-Bauelementen (vgl. Kap. 2.2.3).

3.3.2 Verfahrensübersicht

Ausgehend von den dargestellten Montageszenarien erfolgt die Konzeption von Verfahren für die relative Messung der Lageabweichung mittels Bildverarbeitung. Hierbei erweist sich eine Einteilung in *direkte* und *indirekte* Verfahren als sinnvoll. Bild 3.6 zeigt eine Übersicht über grundlegende Lösungsansätze.

Bei der **direkten Relativmessung** werden Kamerabilder ausgewertet, die gleichzeitig die Referenzstrukturen des Substrates als auch die des gegriffenen Fügeteils in der Justageposition zeigen. Die für die Bestimmung der Lageabweichung relevanten Merkmale können dann unmittelbar aus einem einzigen Bild extrahiert werden.

Beim Verfahren 1.1 werden die Strukturen beider Montagepartner in einer gemeinsamen Bildaufnahme bei fester Fokusslage der Optik konturenscharf abgebildet. Dies ist nur dann möglich, wenn die maximale Höhendifferenz Δh der zu vermessenden Strukturen den Schärfentiefebereich $\Delta \zeta$ der Optik nicht überschreitet.

Durch den Einsatz einer Infrarotkamera und -beleuchtung (Verfahren 2.1 und 3.1) ist die direkte Relativmessung prinzipiell auch bei verdeckten Strukturen möglich, da Bauelemente der Mikrosystemtechnik aus gängigen Halbleitermaterialien wie Silizium, GaAs und InP für Licht im infraroten Wellenlängenbereich optisch transparent sind²⁵. Ein prinzipbedingter Nachteil ist jedoch die ca. um den Faktor 2 geringere optische Auflösung gegenüber dem sichtbaren Wellenlängenbereich ($\lambda \approx 550$ nm), vgl. Bild 4.6. Aus diesem Grund und wegen der Einschränkung auf Halbleiterwerkstoffe sollen Infrarot-Verfahren nicht weiter vertieft werden.

²⁵ Silizium ist für Strahlung ab ca. 1090 nm durchlässig, GaAs ab ca. 880 nm und InP ab ca. 980 nm (SZE 1981, S. 750)

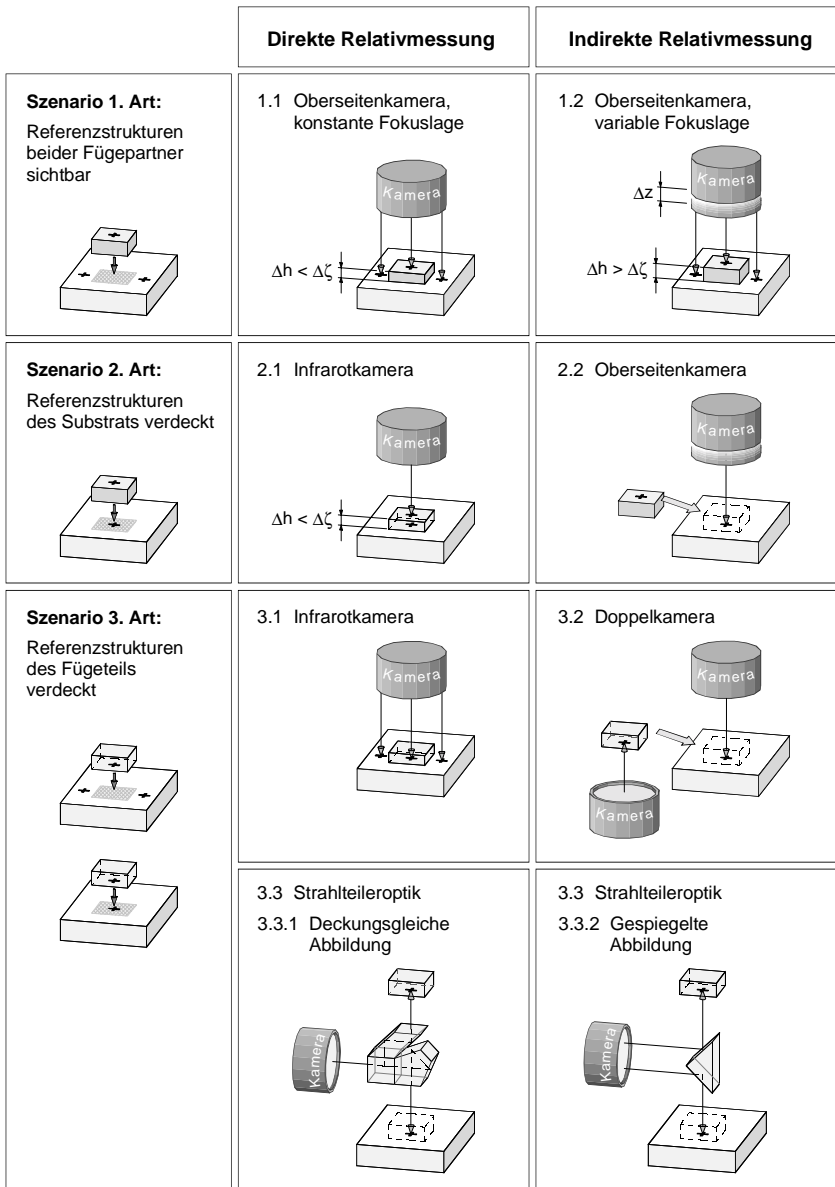


Bild 3.6: Prinziplösungen für die relative Lagemessung - Verfahrensübersicht

Bei der **indirekten Relativmessung** werden die Referenzstrukturen von Substrat und Füge teil in korrespondierenden Bildaufnahmen getrennt voneinander abgebildet. Anschließend werden die Bilder zur Bestimmung der relativen Lageabweichung im Vision-System zur Deckung gebracht.

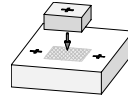
Verfahren 1.2 basiert auf einer Umfokussierung zwischen den Messebenen von Substrat und Füge teil für den Fall, dass die zu vermessenden Strukturen außerhalb des Schärfentiefebereichs der Optik liegen.

Beim Montageszenario 2. Art sind die Referenzstrukturen von Substrat und Füge teil für eine simultane Messung aufgrund optischer Abschattung nach dem Überlappen der aktiven Füge fläche nicht mehr zugänglich. Die Substratstrukturen können jedoch gemäß Verfahren 2.2 in einem separaten Bild lokalisiert werden, bevor das gegriffene Bauteil in die Justageposition über dem Substrat gebracht wird.

Zusätzlich zur Verdeckungsproblematik erfordern die einander zugewandten Referenzstrukturen beim Montageszenario 3. Art eine optische Beobachtung von zwei verschiedenen Seiten. Dies ist entweder mit zwei gegengerichteten (unidirektional abbildenden) Kameras oder mit Hilfe einer diametral abbildenden Strahlteileroptik möglich. Im ersten Fall (Doppelkameraprinzip, Verfahren 3.2) werden die Strukturen des Füge teils mit Hilfe einer Unterseitenkamera vermessen und in das Sichtfeld einer Oberseitenkamera zum Abgleich mit den Positionskoordinaten des Substrates projiziert. Für die Überlagerung der Bildkoordinaten sind gemeinsame Bezugsmerkmale in den getrennt aufgenommenen Bildern erforderlich. Dies können (in der abstrahierten Schemaskizze nach Bild 3.6 nicht dargestellt) Hilfsmarken am Greifer sein, die von beiden Kameras aus sichtbar sind.

Im Gegensatz zum Doppelkameraprinzip wird die Strahlteileroptik in die Füge achse eingeschoben und ermöglicht damit eine Lageerkennung der Referenzstrukturen in der Justageposition des Füge teils über dem Substrat. Nach der Bildauswertung und Lagekorrektur wird die Optik zum Fügen der Bauelemente wieder zurückgezogen. Die optische Abbildung ist von der Gestaltung der Strahlteileroptik abhängig: Werden die beiden Objekte durch die Optik, wie beim Verfahren 3.3.1, deckungsgleich auf die Kamera abgebildet, so kann die Lageabweichung unmittelbar aus *einer* Bildaufnahme bestimmt werden (direkte Relativmessung). Bei spiegelbildlicher Abbildung dagegen ist ein zusätzlicher Bildverarbeitungsschritt zur Spiegelung der Positionskoordinaten notwendig, bevor die Lageabweichung berechnet werden kann (indirekte Relativmessung, Verfahren 3.3.2).

3.3.3 Positionierstrategien für das Montageszenario 1. Art



In diesem Abschnitt wird das Verfahren 1.2 aus Bild 3.6 weiter detailliert.

Beim Montageszenario 1. Art wird die konturenscharfe Abbildung der Referenzstrukturen auf der Oberseite des Fügeteils zu den darunter liegenden Substratstrukturen durch die Schärftiefe des optischen Systems determiniert. Überschreitet die Höhendifferenz der zu vermessenden Objektebenen die optische Schärftiefe, so ist ein Umfokussieren zwischen Substrat und Fügeteil notwendig. Hierbei wird das erste Montageobjekt – Substrat oder Fügeteil - im Fokus der Optik lokalisiert und dessen Position im Bildfenster abgespeichert. Nach dem Umfokussieren auf das andere Objekt wird mit derselben Optik und in Bezug auf das bereits vermessene Objekt aus derselben Aufnahme-position heraus ein weiteres, korrespondierendes Bild des zweiten Fügepartners aufgenommen und ausgewertet. Durch Abgleich mit den bereits gespeicherten Positionskoordinaten kann dann die Lageabweichung des Füge-teils relativ zum Substrat in den ebenen Freiheitsgraden x , y und ϕ_z für eine nachfolgende Feinkorrektur berechnet werden.

Nachfolgend werden die kinematischen Randbedingungen für die Aufnahme der Bilder untersucht.

Das Prinzip der *lagegeregelten Relativpositionierung* basiert auf einem Regelkreis zwischen dem Vision-System und der Achssteuerung, der nach jeder Lagekorrektur die Positionsabweichung des Füge-teils relativ zum Substrat erneut erfasst und bei Überschreitung zulässiger Montagetoleranzen eine Wiederholung des Justagevorganges durch die Achsen einleitet (vgl. S. 37). Nach jeder Lagekorrektur sind also wiederum korrespondierende Bildinformationen über die Lage von Substrat und Füge-teil notwendig. Ein wiederholtes Umfokussieren, wie es zur erneuten Vermessung beider Fügepartner erforderlich wäre, ist aufgrund der damit verbundenen Erhöhung der Zykluszeit nicht akzeptabel. Ziel ist daher, nach der Lagekorrektur nurmehr das bereits im Fokus befindliche Montageobjekt wiederholt zu vermessen und mit der einmalig gespeicherten Position des anderen Fügepartners zu vergleichen. Den prinzipiellen Ablauf zeigt Bild 3.7.

Dieses Vorgehen setzt folglich Koinzidenz zwischen der abgespeicherten und der tatsächlichen Position des zuerst vermessenen Montageobjektes vor und nach der Lagekorrektur voraus. Damit lässt sich eine kinematische Beziehung für die Führung

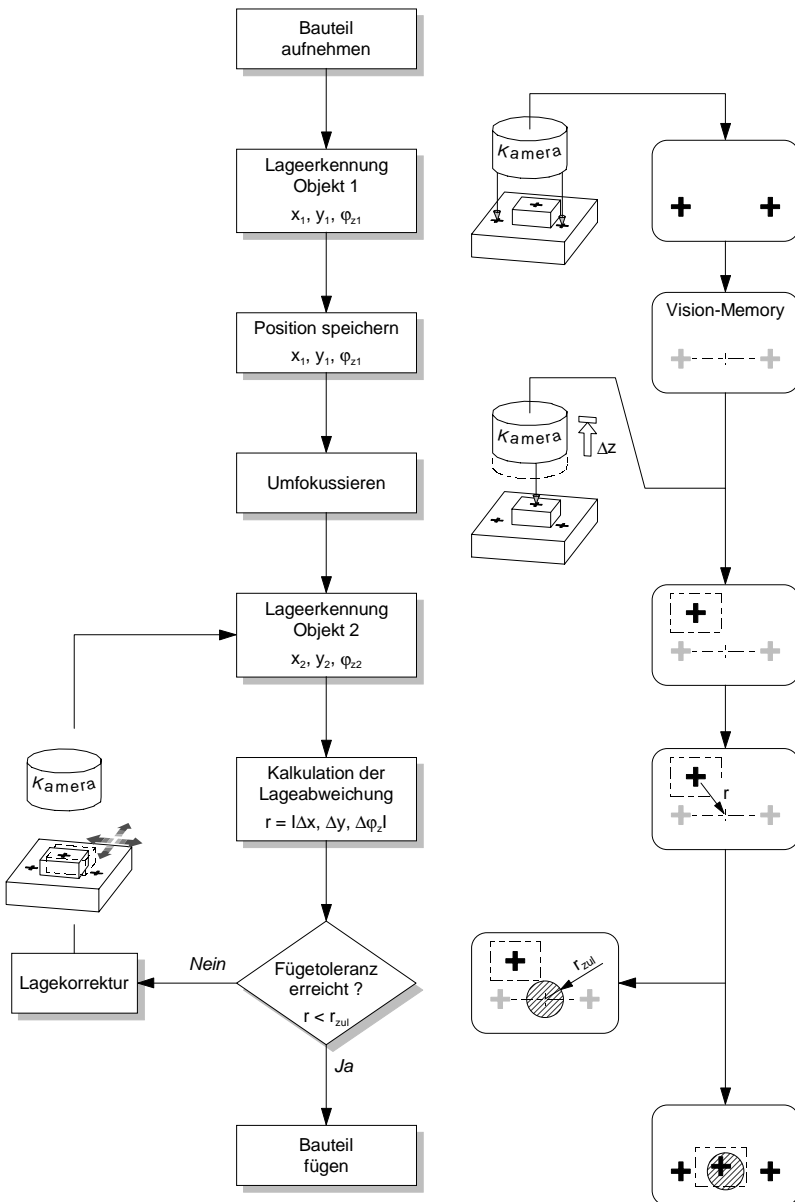
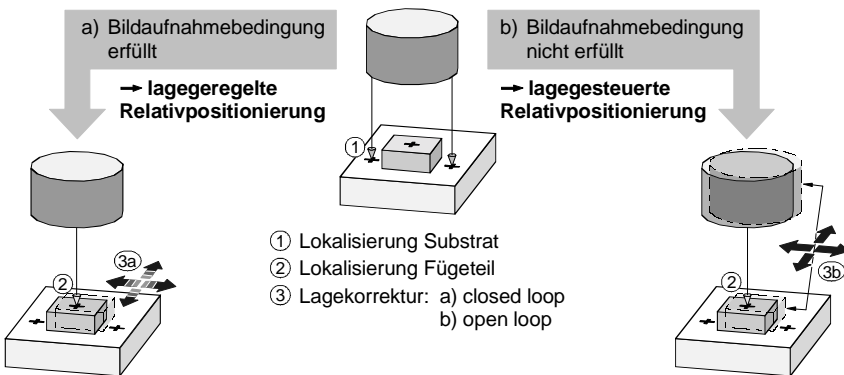


Bild 3.7: Ablauf der indirekten, lagegeregten Relativpositionierung (der Greifer ist nicht dargestellt)

der Kamera bei der Lagekorrektur herleiten, die als **Bildaufnahmebedingung für die indirekte, lagegeregelter Relativpositionierung** bezeichnet wird und auch auf die Montageszenarien 2. und 3. Art anwendbar ist:

Bei der lagegeregelter Relativpositionierung ist die Lagekorrektur derart zu führen, dass sich die Position des zuerst vermessenen Montageobjektes in Bezug auf die Bildebene der Kamera während des gesamten Justagevorganges nicht verändert, um Koinzidenz zwischen dessen abgespeicherter und tatsächlicher Lage zu gewährleisten.

Anhand von zwei Beispielen lässt sich die Bildaufnahmebedingung verdeutlichen. In der Darstellung nach Bild 3.8 wird exemplarisch die Messreihenfolge Substrat/Fügeteil zugrunde gelegt, d.h. zunächst wird in einer ersten Bildaufnahme die Lage des Substrats vermessen und im Vision-System abgespeichert. Anschließend wird die gespeicherte Position des Substrats nach der Umfokussierung auf das ge-griffene Fügeteil mit dessen Bildkoordinaten überlagert.



Entkoppelte Kinematik:

Kinematische Unabhängigkeit zwischen Kameraführung und Lagekorrektur

Gekoppelte Kinematik:

Kinematische Kopplung zwischen Kameraführung und Lagekorrektur

Bild 3.8: Kinematische Beziehung zwischen Kameraführung und Lagekorrektur bei der lagegesteuerten und lagegeregelter Relativpositionierung zur Erläuterung der Bildaufnahmebedingung (exemplarisch für die Messreihenfolge Substrat/Fügeteil)

Die Bildaufnahmebedingung ist erfüllt, wenn die Kamera bei der Lagekorrektur in Bezug auf das zuerst vermessene und gespeicherte Objekt, in diesem Beispiel das

Substrat, feststeht (Bild 3.8-a). Dieser Fall erfordert kinematische Unabhängigkeit zwischen der Kamera und der Lagekorrektur des Fügeteils durch den Greifer, z.B. Manipulation des Bauteils unter einer stationär im Arbeitsraum angeordneten Kamera. Dann kann die Lageabweichung nach jedem Korrekturschritt jeweils aus einer weiteren Bildaufnahme des Fügeteils und den in Bezug auf das Bildfeld invarianten, gespeicherten Substratkoordinaten bestimmt werden. Auf diese Weise ist die iterative Justage des Fügeteils nach dem Prinzip der lagegeregelten Relativpositionierung (closed loop by visual feedback) möglich.

Wird dagegen eine Systemkonfiguration gewählt, bei der die Kamera synchron zur Lagekorrektur mitbewegt wird²⁶ (z.B. am Greifer mitgeführte Kamera), so ist – bei gleicher Messreihenfolge Substrat/Fügeteil – die Bildaufnahmebedingung nicht erfüllt (Bild 3.8-b). Bei dieser Anordnung führt die Lagekorrektur zu einer Relativbewegung zwischen der Kamera und dem defokussierten, respektive nicht lokalisierbaren Substrat. Die Folge ist eine Diskrepanz zwischen der abgespeicherten und der tatsächlichen Position des Substrates im Bildfeld. Nach einem Korrekturzyklus kann die Lage des Substrats nur durch erneutes, zeitaufwendiges Nachfokussieren und wiederholten Bildeinzug oder indirekt durch Berücksichtigung des bereits zurückgelegten Korrekturweges bestimmt werden. Mit der Einbeziehung von Lageinformationen der Achsen spiegeln sich jedoch deren Positionierfehler in der Lagebestimmung wider, wodurch der wesentliche Vorteil der lagegeregelten Relativpositionierung - die Erfassung und Kompensation von Ungenauigkeiten der Lagekorrektur - entfällt. In diesem Fall ist die Lagekorrektur daher als einmalige, gesteuerte Relativpositionierung – ohne Rückführung der erreichten Endlage (open loop) – durch einen präzisen Achsantrieb zu führen.

Die Bildaufnahmebedingung kann auch auf die inverse Messreihenfolge, die Überlagerung der gespeicherten Position des Fügeteils mit den on-line gemessenen Lagekoordinaten des Substrats, angewendet werden. Die Umkehr der Messreihenfolge beeinflusst die Systemkonfiguration: Bei der lagegeregelten Relativpositionierung ist die Kamera, z.B. durch eine mechanische Kopplung zum Greifer, synchron zur Lagekorrekturbewegung des Fügeteils zu führen.

²⁶ Eine solche Systemkonfiguration wird in der symbolischen Beschreibung der Positionierstrategien (vgl. Bild 3.8 ff.) durch einen Pfeil zwischen Kamera, Fügeteil und Lagekorrektursymbol abstrahiert, der auf eine kinematische Kopplung zwischen der Kamera und den Achsen für die Lagekorrektur hinweist.

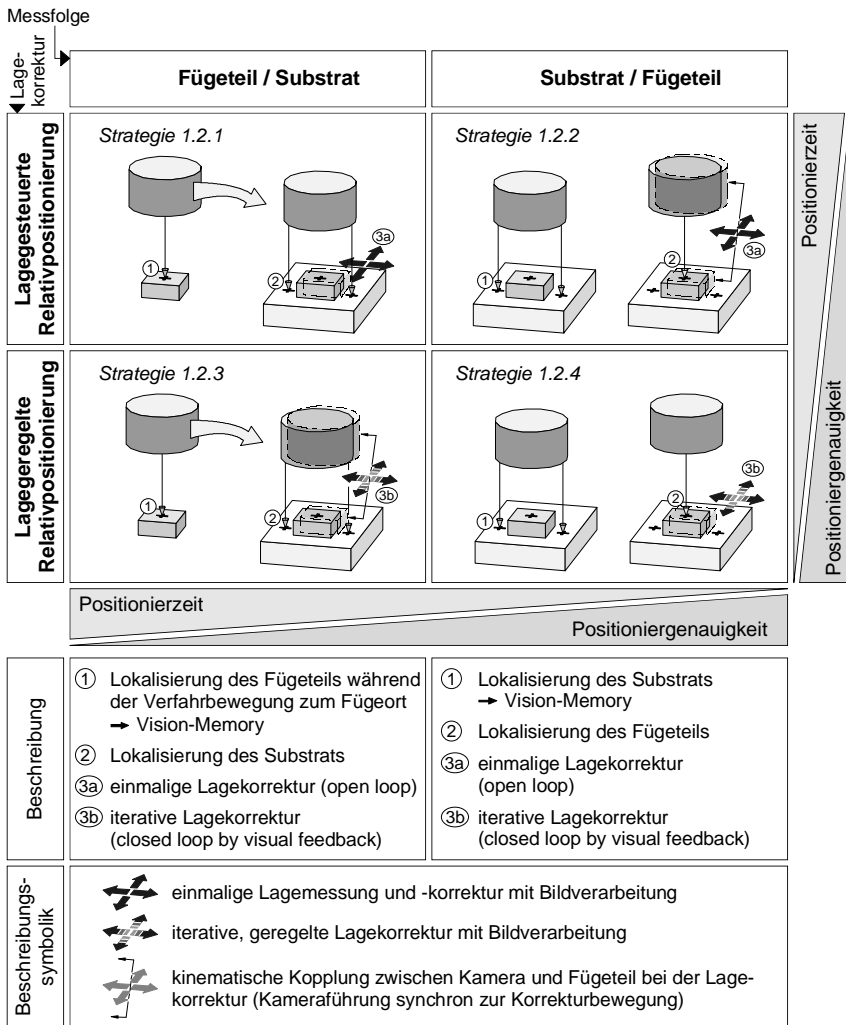


Bild 3.9: Positionierstrategien für das Montageszenario 1. Art

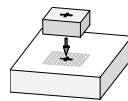
Mit der Bildaufnahmebedingung und den beiden Varianten für die Messreihenfolge ergeben sich prinzipiell vier mögliche Positionierstrategien für das Montageszenario 1. Art. Diese sind in Bild 3.9 mittels einer symbolischen Beschreibungstechnik abs-

trahiert dargestellt²⁷. Die Strategien unterscheiden sich hinsichtlich der erreichbaren Positioniergenauigkeit und der Positionierzeit. Die Positioniergenauigkeit wird dabei im Verhältnis zum erforderlichen gerätetechnischen Aufwand betrachtet. Anhand dieser Kriterien ist eine vergleichende Bewertung der Strategien möglich. Zwischen der Positioniergenauigkeit und der Positionierzeit besteht ein Antagonismus:

- ♦ Bei den Strategien für die lagegezielte Relativpositionierung (1.2.3 und 1.2.4) lässt sich mit minimalem gerätetechnischen Aufwand – unter Ausnutzung der Achsauflösung (vgl. S. 37) – eine hohe Positioniergenauigkeit erreichen. Die Positionierzeit ist jedoch aufgrund der wiederholten Mess- und Korrekturzyklen schlechter als bei den lagegesteuerten Strategien 1.2.1 und 1.2.2.
- ♦ Bei der Messreihenfolge Füge teil/Substrat (Strategien 1.2.1 und 1.2.3) kann das Füge teil am Greifer bereits während der Zuführung zum Füge ort durch eine mitgeführte Kamera lokalisiert werden. Durch diese Parallelisierung von Mess- und Fahrzeiten lässt sich die Positionierzeit gegenüber den Strategien 1.2.2 und 1.2.4 reduzieren. Ein eventuelles Verrutschen des Füge teils am Greifer nach dem ersten Messschritt infolge von Beschleunigungskräften führt jedoch zu einer schlechteren Einschätzung der Positioniergenauigkeit.

Diese Einordnung bildet die Grundlage für die Auswahl eines Verfahrens entsprechend den anwendungsabhängig geforderten Parametern des Montageprozesses. Darüber hinaus können Randbedingungen durch eine vorgegebene Systemkonfiguration (z.B. ortsfeste Kamera) die Auswahl der Positionierstrategie beeinflussen.

3.3.4 Positionierstrategien für das Montageszenario 2. Art



In diesem Abschnitt wird das Verfahren 2.2 aus Bild 3.6 weiter detailliert. Dieses Verfahren löst die Verdeckungsproblematik beim Montageszenario 2. Art dadurch, dass die Referenzstrukturen des Substrats lokalisiert werden, bevor das Füge teil in die Justageposition gebracht wird und somit den Füge ort abschattet.

Für die kinematische Konzeption des Ablaufs erweist sich eine funktionale Teilung zwischen der eigentlichen Justage- bzw. Lagekorrekturbewegung und einer Hilfsbe-

²⁷ Auf den letzten, allen Strategien gemeinsamen Ablaufschritt, die Fügebewegung in der z-Koordinate, wird in der Darstellung der Übersicht halber verzichtet.

wegung des Greifers relativ zur Kamera zum Einbringen des Fügeteils in die Justageposition als sinnvoll:

- ♦ Die Justage des Bauelements erfordert nur geringe Stellwege zur Feinkorrektur toleranzbedingter Positionsungenauigkeiten. Bei Erfüllung der Bildaufnahmebedingung (vgl. S. 48) kann die Lagekorrektur mit einem einfachen Antrieb iterativ im geregelten Modus, andernfalls im gesteuerten Modus durchgeführt werden. Die Ausrichtung des Fügeteils relativ zu den Strukturen des Substrats erfordert in der Regel zwei translatorische Freiheitsgrade (x , y) und einen rotatorischen Freiheitsgrad (φ_z) um die Fügeachse.
- ♦ Die im Folgenden auch anschaulich als **Tool-Shift** bezeichnete Hilfsbewegung des Greifers dient bei der Bildaufnahme des Substrats dazu, das Fügeteil aus dem Sichtfeld zu ziehen, um die Sicht der Kamera auf die darunter liegenden Substratstrukturen freizugeben. Umgekehrt ermöglicht sie es, das gegriffene Fügeteil zur Lagemessung in das Sichtfeld einzubringen. Diese Bewegung kann als einachsiger Hub des Greifers mit zwei reproduzierbaren Endlagen innerhalb und außerhalb des Sichtfeldes ausgeführt werden.

Unter Berücksichtigung der Bildaufnahmebedingung und der Messreihenfolge lassen sich wiederum vier Positionierstrategien herleiten (Bild 3.10) und hinsichtlich Positioniergenauigkeit und Positionierzeit vergleichend gegenüberstellen:

- ♦ Bei der Messreihenfolge Substrat/Fügeteil (Strategien 2.2.2 und 2.2.4) wird in einer ersten Bildaufnahme die Lage des Substrats erfasst und gespeichert, während das Fügeteil zunächst außerhalb des Sichtfeldes vom Greifer gehalten wird. Im nächsten Schritt wird das Fügeteil dann durch die Greifer-Hilfsbewegung in die Justageposition über dem Substrat gebracht (Schritt ②) und durch eine zweite, korrespondierende Bildaufnahme aus derselben Kameraposition heraus lokalisiert. Diese Messreihenfolge hat den Vorteil, dass Endlagenfehler der Greifer-Hilfsbewegung, beispielsweise infolge von mechanischem Spiel, durch die Optik erfasst und bei der Positionierung berücksichtigt werden können. So kann eine hohe Positioniergenauigkeit mit einem verhältnismäßig einfachen, kompakten und kostengünstigen Bewegungsantrieb für den Greifer erreicht werden.
- ♦ Steht dagegen die Minimierung der Taktzeit im Vordergrund, so ist es günstiger, das gegriffene Bauteil schon während der Verfahrensbewegung zum Fügeort mittels

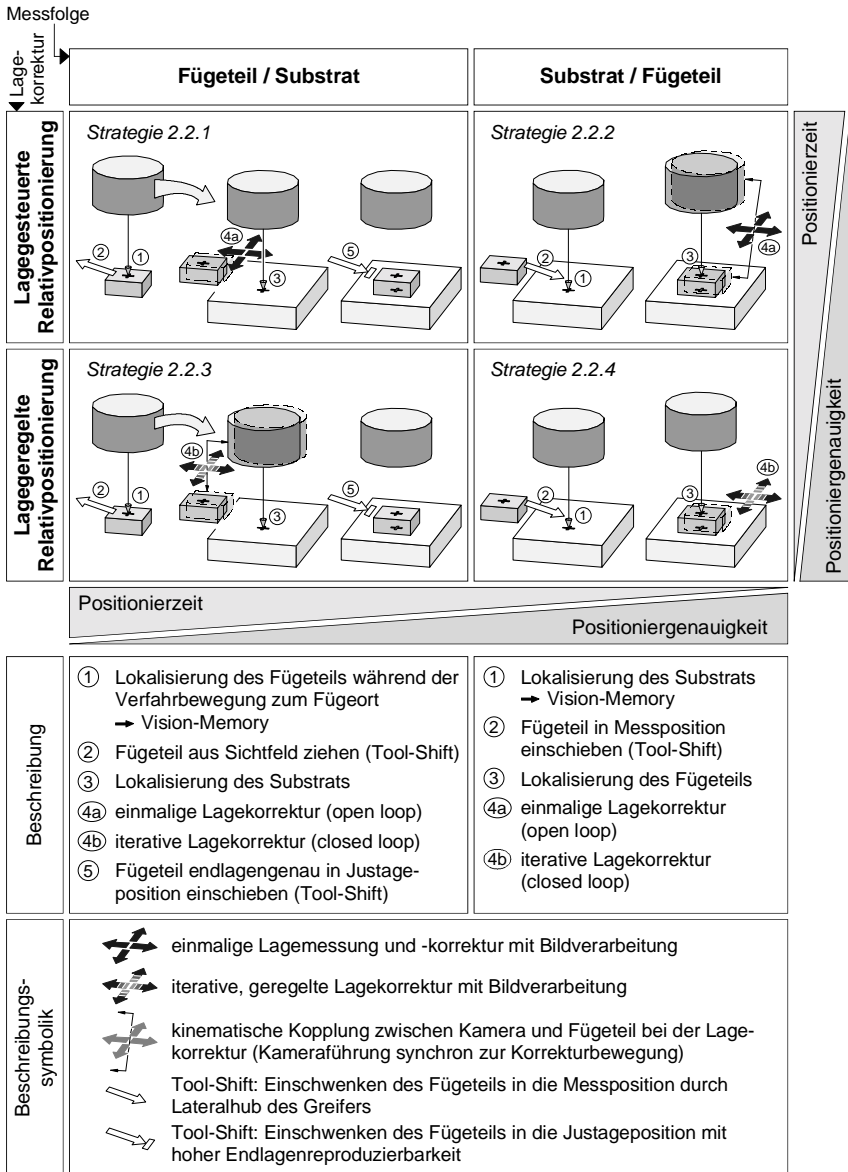
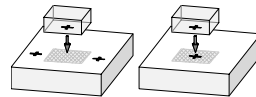


Bild 3.10: Positionierstrategien für das Montageszenario 2. Art

einer im Werkzeug mitgeführten Kamera zu vermessen, um die für die Bildaufnahme und –auswertung benötigte Zeit mit den Nebenzeiten der Handhabung zu parallelisieren. Der Positionierablauf wird dann durch die Strategien 2.2.1 und 2.2.3 beschrieben. Nach der Bildaufnahme des Fügeteils werden dessen Vision-Koordinaten abgespeichert und der Greifer aus dem Kamerasichtfeld zurückgezogen (Schritt ②), um in einer nachfolgenden Bildaufnahme das Substrat zu lokalisieren. Nach der Lagekorrektur wird das Bauteil durch die Greifer-Hilfsbewegung in die Justageposition über dem Substrat geschoben (Schritt ⑤) und die Fügebewegung in der z-Koordinate eingeleitet. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Greifer seine ursprüngliche Ausgangsposition, die er zu Beginn des Prozesses bei der Lokalisierung des Fügeteils (Schritt ①) hatte, wieder reproduzierbar erreicht. Abweichungen von dieser Endlage werden nicht erfasst und fließen in die Fehlerkalkulation der Montagegenauigkeit ein. Diese Strategien zielen daher auf eine Optimierung der Positionierzeit zu Lasten der Positioniergenauigkeit.

3.3.5 Positionierstrategien für das Montageszenario 3. Art



Beim Montageszenario 3. Art müssen Referenzstrukturen auf der Unterseite des Fügeteils erkannt werden. Zur Lösung dieser Aufgabe werden entsprechend der Verfahrensübersicht in Bild 3.6 die Verfahren 3.2 (Doppelkamera) und 3.3 (Strahlteileroptik) weiter detailliert.

Positionierstrategie für zwei unidirektional abbildende Kameras: Doppelkamera-Konzept

Diese Positionierstrategie stellt eine Erweiterung der Strategie 2.2.4 (vgl. Bild 3.10) für die indirekte, lagegeregelte Relativpositionierung von oberseitenstrukturierten Bauteilen dar. Dabei werden Lageungenauigkeiten des Fügeteils am Greifer mit Hilfe einer zusätzlichen Unterseitenkamera detektiert, während die Position des bereitgestellten Substrats im Sichtfeld der Oberseitenkamera bestimmt wird (Bild 3.11).

Im Gegensatz zu den absolut positionierenden Verfahren des Standes der Technik wird jedoch die Lage des Fügeteils nicht in Absolutkoordinaten des Vision- bzw. Achskoordinatensystems, sondern relativ in Bezug auf zusätzliche Hilfsmarken am Greifer bestimmt. Diese Hilfsmarken sind so gestaltet, dass sie sowohl im Sichtfeld der Unterseitenkamera als auch im Sichtfeld der Oberseitenkamera beobachtet werden können. Anhand der Hilfsmarken ist es auf Basis der Messdaten der Untersei-

tenkamera möglich, die Lage der nur von unten sichtbaren Füge­teilstrukturen im Sichtfeld der Oberseitenkamera zu rekonstruieren und mit den Positions­koordinaten des Substrats abzugleichen. Auf diese Weise lässt sich die Lage­abweichung ohne Informationen über die räumliche Lage der Kameras zueinander oder in Bezug auf das Achskoordinatensystem bestimmen. Ein Nachteil dieser Strategie ist die Lokali­sierung des gegriffenen Füge­teils außerhalb der Justageposition über dem Substrat. Nach diesem Messschritt kann ein eventuelles Verrutschen des Füge­teils aufgrund der Lateralbeschleunigung des Greifers zum Fügeort nicht mehr erfasst und korrigiert werden.

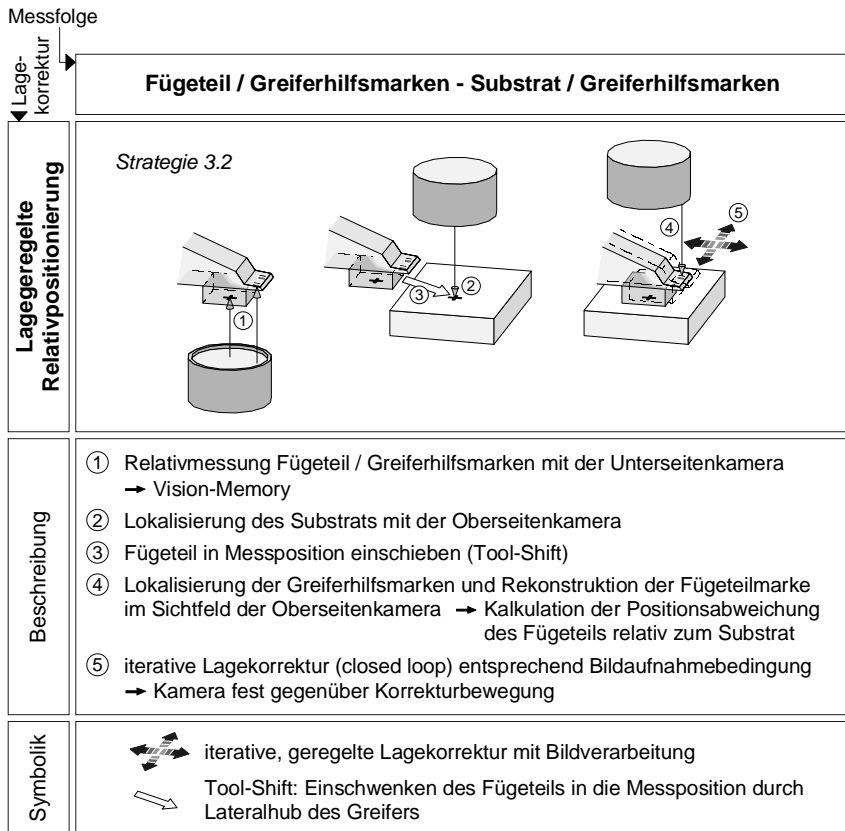


Bild 3.11: Lage­regelte Positionierstrategie für das Montageszenario 3. Art auf der Basis des Doppelkamera-Konzeptes

Die nachfolgend konzipierte Positionierstrategie für die Strahlteileroptik vermeidet diesen Nachteil, erfordert aber einen höheren Aufwand für die Gestaltung des optischen Systems.

Positionierstrategie für eine diametral abbildende Optik: Strahlteilerkonzept

Diese Positionierstrategie basiert auf einer Vermessung des Fügeteils in der Justageposition über dem Substrat, um Querbeschleunigungen auf die zu fügenden Bauelemente nach deren Lageerkennung zu vermeiden (Bild 3.12). Dazu wird eine diametral abbildende Optik in die Fügeachse zwischen dem Substrat und dem am Greifer befindlichen Fügeteil eingeschoben. Durch ein Strahlteilermodul und ein Abbildungsobjektiv werden die gegenüberliegenden Referenzstrukturen der beiden Fügepartner auf den CCD-Chip der Kamera abgebildet und für die Berechnung des relativen Positionsversatzes überlagert. Die Bildüberlagerung kann dabei prinzipiell entweder auf optischem oder elektronischem Weg durchgeführt werden. Während des gesamten Justageprozesses stehen beide Bauteile ständig im Sichtfeld der Optik, so dass die Lagekorrektur im geschlossenen Regelkreis zwischen dem Vision-System und den Achsen durchgeführt werden kann. Nachdem die erforderliche Justagegenauigkeit erreicht ist, wird das optische System aus der Fügeachse zurückgezogen und die Fügebewegung eingeleitet.

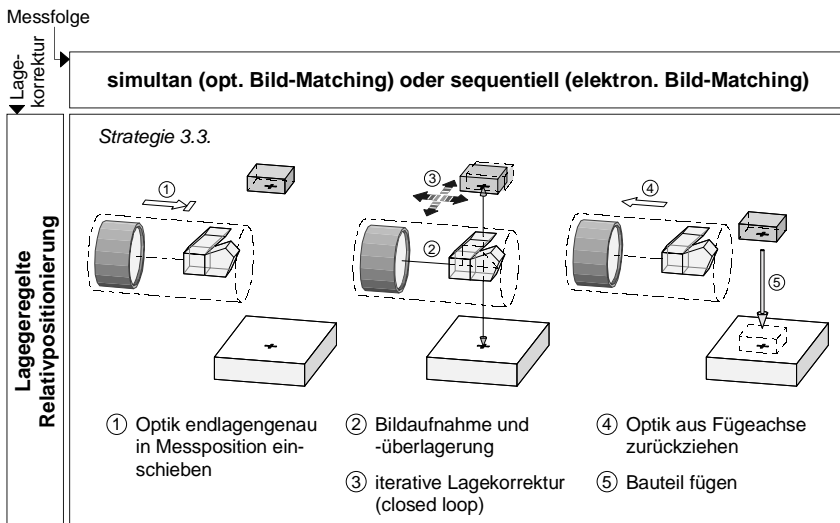


Bild 3.12: Lagegeregelt Positionierstrategie für das Montageszenario 3. Art nach dem Prinzip der diametral abbildenden Strahlteileroptik

4 Gestaltung flexibel konfigurierbarer Funktionsmodule

4.1 Vorgehensweise

Entsprechend der Zielsetzung sollen in dieser Arbeit Werkzeuge und Systeme für eine kosteneffiziente und flexible Montage hybrider Mikrosysteme entwickelt werden. Ein sinnvoller Ansatz zur Erreichung dieses Ziels ist die konsequente Modularisierung in abgeschlossene, funktionelle Bausteine, die zu applikationsspezifischen Automatisierungslösungen konfigurierbar sind. In diesem Kapitel wird die Gestaltung derartiger Funktionsmodule behandelt.

Zunächst wird dargestellt, wie sich die Module aus den elementaren Ablaufschritten der zuvor entwickelten Positionierstrategien ableiten. Anschließend werden die Module isoliert betrachtet und als Teilsysteme ausgearbeitet.

4.2 Zuordnung von Funktionsmodulen zu den Ablaufschritten der Positionierstrategien

Die Positionierstrategien wurden aus einer Analyse funktionaler Zusammenhänge für unterschiedliche Montageszenarien gewonnen. Sie strukturieren den gesamten Positionierprozess in elementare Ablaufschritte geringer Komplexität, die im Folgenden als **Elementarfunktionen** bezeichnet werden.

Die resultierenden Elementarfunktionen sind in Bild 4.1 dargestellt.

Die Verknüpfung der Elementarfunktionen zur jeweiligen Positionierstrategie beschreibt die Funktionsstruktur der zu entwickelnden Werkzeuge in abstrahierter Form, d.h. zunächst noch ohne Festlegung einer bestimmten Art von Lösung.

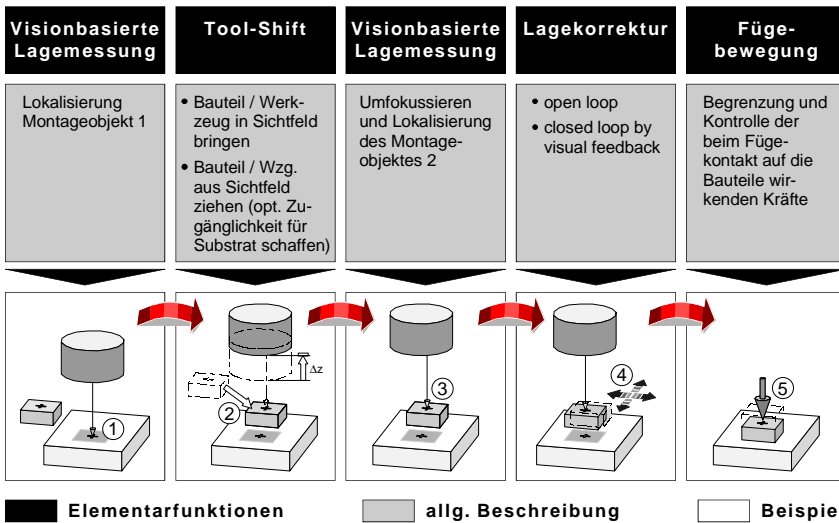


Bild 4.1: Elementarfunktionen und ihre Verknüpfung, dargestellt am Beispiel der Positionierstrategie 2.2.4 (auf die anderen Strategien übertragbar)

Durch Zuordnung von Funktionsmodulen zu den Elementarfunktionen ergibt sich eine Wirkstruktur der Werkzeuge, die in zweckmäßiger Weise den modularen Einsatz von Komponenten für die Lagemessung, den Tool-Shift, die Lagekorrektur und die Fügebewegung initiiert. Dieses Vorgehen wird durch die Aufstellung einer Strukturmatrix der Elementarfunktionen und der zugeordneten Funktionsmodule in Bild 4.2 skizziert. Anhand des eingezeichneten Beispieelpfades ist ersichtlich, wie sich aus den Positionierstrategien durch Kombination von Funktionsmodulen korrespondierende Werkzeug- bzw. Systemkonfigurationen ableiten lassen. Somit können die unterschiedlichen Montageszenarien (vgl. Kap. 3.3.1) mit wenigen Funktionsmodulen abgedeckt werden. Die Vorteile dieser Baukastenstruktur bestehen in einer Reduktion der Systemkomplexität und des spezifischen Entwicklungsaufwandes sowie in der flexiblen Adaption der Werkzeuge an unterschiedliche Montageaufgaben.

In den folgenden Unterkapiteln werden, Bezug nehmend auf das Übersichtsbild 4.2, die einzelnen Funktionsmodule und ihre Gestaltung detailliert erläutert.

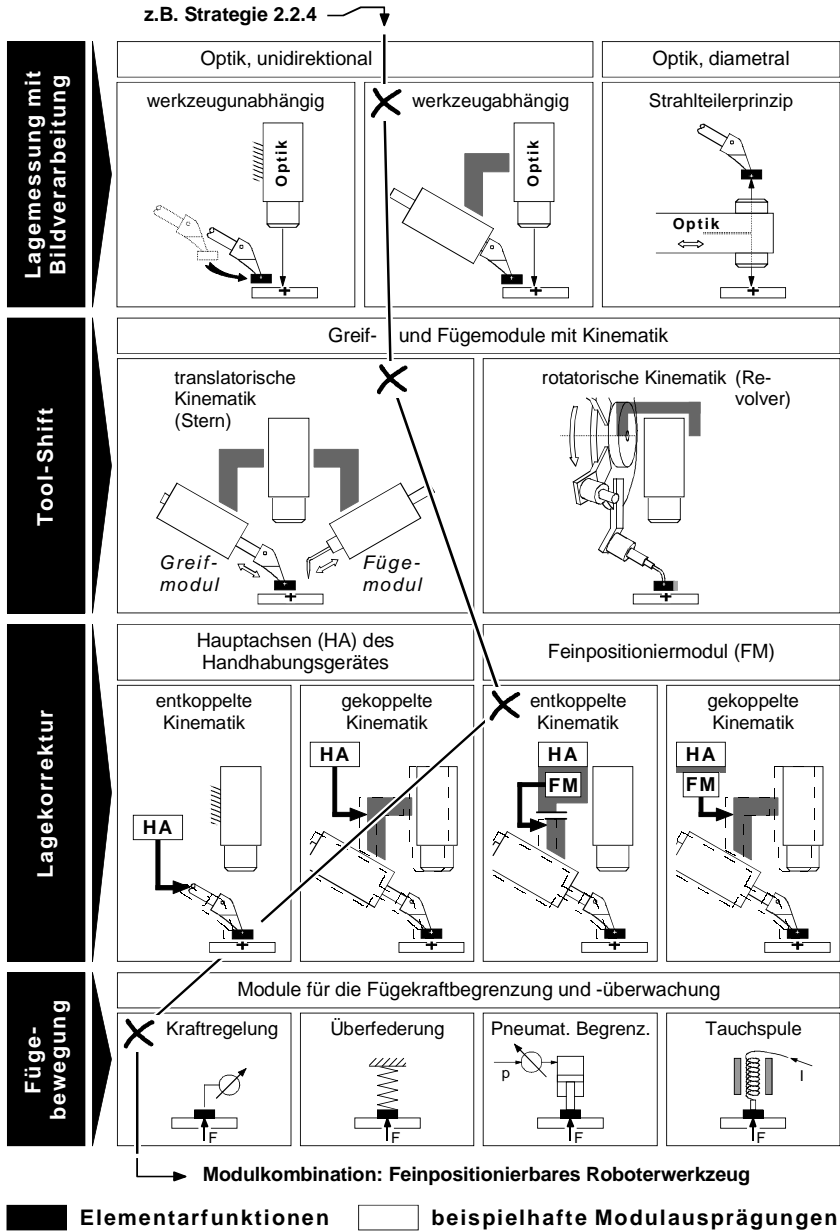


Bild 4.2: Zuordnung von Funktionsmodulen zu den Elementarfunktionen

4.3 Unidirektional abbildendes Optikmodul

Die entwickelten Positionierungsstrategien nutzen für die optische Lagemessung zwei unterschiedliche Lösungsprinzipien (vgl. Bild 3.6): die unidirektionale Abbildung mit

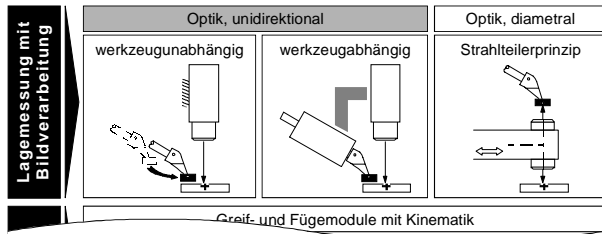
einer bzw. zwei Optiken (Oberseitenkamera und Doppelkamera-Konzept) sowie die diametrale Abbildung mit einer Strahlteileroptik. Gegenstand dieses Abschnittes ist die Gestaltung des Optikmoduls für die unidirektionale Abbildung. Das Modul umfasst die Komponenten Messobjektiv, Kamera und Beleuchtung.

Die in diesem Abschnitt durchgeführten optischen Auslegungsberechnungen verwenden die normgemäßen Vorzeichenkonventionen nach DIN 1335. Sofern für das Verständnis erforderlich, werden die physikalisch-optischen Zusammenhänge kurz dargestellt. Für weiterreichende Informationen wird auf die einschlägige Literatur der physikalisch-technischen Optik verwiesen (NAUMANN 1992, HAFERKORN 1994, PAUL 1999, HECHT 1991, BERGMANN-SCHAEFER 1993).

4.3.1 Anforderungen

4.3.1.1 Integration des Optikmoduls

Mögliche Werkzeug- und Systemkonfigurationen müssen in Bezug auf die Integration des Optikmoduls die Bedingung erfüllen, dass sowohl der Greifer mit dem Fügeteil als auch der Fügeort auf dem Substrat innerhalb des optischen Sichtfeldes liegen, so dass die Bestimmung der Lageabweichung auf eine Relativmessung zurückgeführt werden kann. Um inhomogene Konturenschärfe²⁸ im Bild und perspektivischen Versatz zu vermeiden, ist zudem eine parallele Ausrichtung von Bild- und Objektebene anzustreben. Mit diesen beiden Bedingungen ist die optische Achse koinzident zu der durch die Fügerichtung vorgegebenen Fügeachse anzuordnen. Dabei kann zwi-



²⁸ Hochauflösende Messobjektive weisen nur einen geringen Schärfentiefebereich auf und erfordern daher eine präzise Einstellung des Arbeitsabstandes zum Messobjekt.

schen einer werkzeugunabhängigen und einer werkzeugabhängigen Optik unterschieden werden.

- ♦ Werkzeugunabhängige Optik: Im einfachsten Fall wird diese durch ein stationäres Optikmodul repräsentiert, in dessen Sichtfeld ein vom Handhabungsgerät geführter, gekröpfter Greifer seitlich hineinragt. Dies bedingt den Einsatz mehrerer Optiken für unterschiedliche Prozessorte (z.B. Entnahme der Komponenten aus Magazinen, Beobachtung der Fügeposition). Alternativ kann die Optik auf zusätzlichen Achsen angebracht und an den jeweiligen Prozessort verfahren werden. In beiden Fällen lassen sich handelsübliche optische Standardkomponenten einsetzen. Allerdings ist ein hoher Aufwand (mehrere Optiken, zusätzliche Achsen) für das Montagesystem erforderlich. Zudem muss berücksichtigt werden, dass das Füge teil durch eine Drehung des Greifers aus dem optischen Sichtfeld herausbewegt wird, wenn dessen Drehachse nicht mit der optischen Achse übereinstimmt. Eine rotatorische Lagekorrektur des Füge teils um seine Hauptachse erfordert dann die Berücksichtigung einer Werkzeugkorrektur und erhöht den steuerungstechnischen Aufwand für das Positioniersystem.
- ♦ Werkzeugabhängige Optik: Eine hohe Ortsflexibilität wird erreicht, wenn das Optikmodul im Montagewerkzeug mitgeführt wird, d.h. das durch den Greifer gehaltene Füge teil und die Optik sind gemeinsam mit dem Werkzeugkopf verfahrbar. Damit können im gesamten Arbeitsraum des Positioniersystems präzise, bildverarbeitungs-basierte Positioniervorgänge durchgeführt werden. Zudem lässt sich die Zykluszeit verkürzen, da die Lagemessung des Füge teils am Greifer in den Nebenzeiten des Handhabungsvorganges erfolgen kann.

Um die Vorteile der werkzeugabhängigen Optik zu nutzen, muss das Modul äußerst kompakte Abmessungen (Integrationsfähigkeit in Montagewerkzeuge) und eine geringe (zu beschleunigende) Masse bei gleichzeitig hoher Abbildungsqualität aufweisen. Kamera, Objektiv und Beleuchtung sollen zusammen auf einer Länge von ca. 100 mm einen Durchmesser von 18 mm nicht überschreiten. Dieses Ziel erfordert die Entwicklung eines miniaturisierten Messobjektives.

4.3.1.2 Optische Abbildung

Die Objektiventwicklung orientiert sich an folgenden Anforderungen:

- ♦ Bei der anvisierten Montagegenauigkeit unterhalb von 10 μm (vgl. S. 30) soll die optische Auflösung besser als 4 μm sein. Bei Verwendung eines Messalgorithmus mit einer unter industriellen Montagebedingungen realistischen Subpixelauf-

lösung von 1/4 bis 1/8 Pixel kann dann von einer elektronischen Auflösung unterhalb 1 μm ausgegangen werden.

- ◆ Das Sichtfeld muss ausreichend groß sein, um die zu fügenden Bauteile gemeinsam darin abzubilden. Dabei ist ein Fangbereich der Bildverarbeitung zum Ausgleich lateraler Bereitstellungs-, Positionier- und Greiftoleranzen zu berücksichtigen.
- ◆ Um den Greifer kollisionsfrei in das Sichtfeld einschieben zu können (Tool-Shift), ist ein Messabstand zwischen Objektiv und Messobjekt (sog. *Arbeitsabstand*) von ca. 30 mm erforderlich.
- ◆ Der Messabstand kann infolge unvermeidbarer Ungenauigkeiten bei der Bauteilbereitstellung und der Positionierung des Werkzeugsystems innerhalb gewisser Toleranzen schwanken. Die Schärfentiefe des Objektivs muss ausreichend sein, um Objekte innerhalb dieser Toleranzen mit einem für die Bildverarbeitung ausreichenden Kontrast abzubilden.
- ◆ Für eine kontrastreiche Abbildung ist eine homogene Ausleuchtung des Sichtfeldes mit programmierbaren Helligkeitsstufen vorzusehen.

4.3.2 Dimensionierung der Optik

Sichtfeld und Abbildungsmaßstab

Die erforderlichen Abmessungen des Sichtfeldes lassen sich aus einer maßstabsgetreuen Darstellung der Größenverhältnisse beim Positionierprozess ableiten (Bild 4.3). Als maßliche Referenz dienen die später im Anwendungsbeispiel verwendeten Mikrobauteile (siehe Bild 6.2-a).

Die Dimensionierung des Sichtfeldes erfolgt unter der Randbedingung, die Referenzstrukturen von Substrat und Bauteil bei der ersten Bildaufnahme voneinander örtlich getrennt abbilden zu können, um die Merkmalsextraktion mittels Bildverarbeitung zu vereinfachen. Durch eine Vorpositionierung wird zunächst der Winkelversatz zwischen den Fügepartnern ausgeglichen (①). Dadurch wird vermieden, dass die Referenzmarken des Substrates während der Feinpositionierphase (③) vom Bauteil teilweise verdeckt und für die Bildverarbeitung nicht separierbar sind.

Um zudem Lagetoleranzen der Substrate und Positionierungsgenauigkeiten der (mitgeführten) Optik zu erfassen, wird ein Fangbereich für die Substratstrukturen von $\pm 150 \mu\text{m}$ und $\pm 10^\circ$ Grad berücksichtigt. Weiterhin wird angenommen, dass die Lage

der Bauteile im Sichtfeld infolge von Zentrierfehlern des Greifers in einem Toleranzbereich von $\pm 80 \mu\text{m}$ und ± 10 Grad variieren kann.

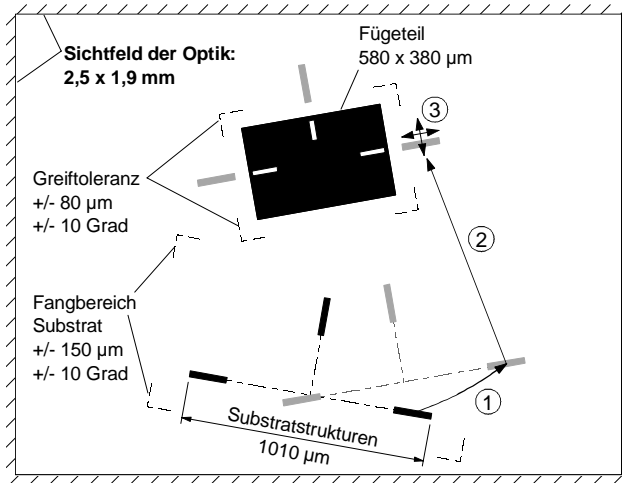


Bild 4.3: Dimensionierung des Sichtfeldes (maßstabsgetreue Darstellung des Positionierprozesses für die Bauteile aus Bild 6.2-a): ① Winkelkorrektur, ② Ausgleich des translatorischen Versatzes, ③ Feinkorrektur bzw. Justage

Auf der Basis dieser Überlegungen wird ein Objektfeld (y) von $2,5 \times 1,9 \text{ mm}$ gewählt. Bei Verwendung eines $1/3''$ -CCD-Chips mit 752×582 effektiven Pixeln und einer aktiven Sensorfläche von $4,8 \times 3,6 \text{ mm}$ ($-y'$) resultieren daraus der Abbildungsmaßstab

$$\beta' = \frac{y'}{y} = -1,92$$

und eine optische Auflösung von ca. $3,3 \mu\text{m}/\text{Pixel}$.

Numerische Apertur

Voraussetzung für die präzise optische Positionsmessung ist eine kontrastreiche, hochauflösende Abbildung der zu lokalisierenden Objekte. Ein wesentlicher, weil das Auflösungsvermögen bestimmender Auslegungsparameter des Objektives ist die numerische Apertur.

Das laterale Auflösungsvermögen des Objektives ist der kleinste erfassbare Abstand zweier Objektpunkte, die sich in der Fokusebene befinden. Bildseitig wird das mini-

mal auflösbare Objektdetail durch die ortsdiskrete Pixelanordnung des CCD-Sensors begrenzt, d.h. Objektstrukturen, die bei der Abbildung in die Bildebene das Pixelmaß unterschreiten, können nur zu einem Punkt gleicher Helligkeit integriert und damit vom CCD-Sensor nicht mehr aufgelöst werden. Die Dimensionierung des Messobjektives erfolgt daher nach dem Kriterium, dass dessen Auflösungsvermögen ausreichend hoch sein muss, um die Ortsauflösung des CCD-Sensors ausnutzen zu können.

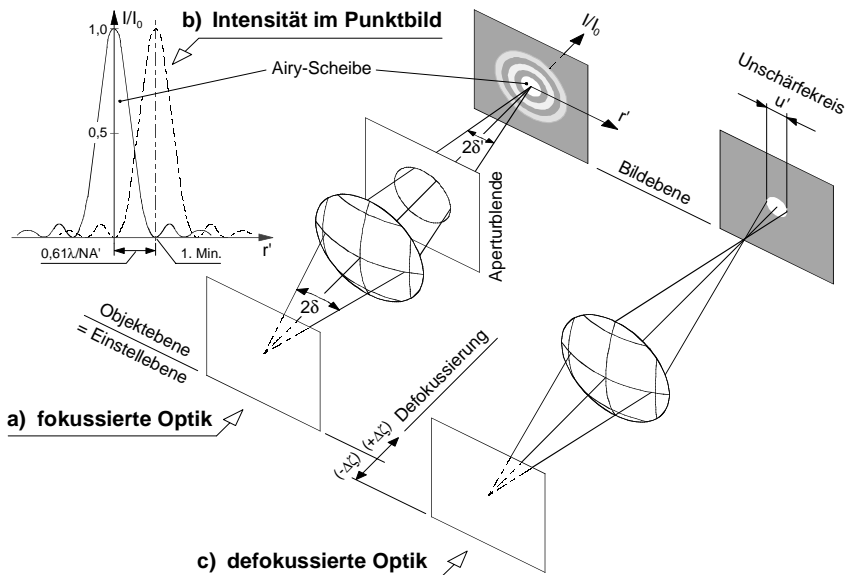


Bild 4.4: Optische Abbildung: a) Beugung an der Aperturblende; b) Normierte Intensitätsverteilung im Beugungsbild, gestrichelt ein benachbarter Bildpunkt an der Auflösungsgrenze; c) Unschärfe durch Defokussierung

Die physikalische Auflösungsgrenze des Objektives wird auch bei optimaler Korrektur geometrischer Abbildungsfehler durch Beugungseffekte erreicht. Ein perfektes²⁹ Objektiv bildet einen Objektpunkt nicht als infinitesimal kleinen Bildpunkt, sondern infol-

²⁹ Als optisch *perfekt* wird ein (hypothetisches) Abbildungssystem bezeichnet, das keine geometrischen Abbildungsfehler (Aberrationen) aufweist, aber aufgrund seiner endlichen Apertur Beugungseffekten unterliegt (BERGMANN-SCHAEFER 1993, S. 152).

ge der Beugung der Lichtwellen an der Aperturblende³⁰ des Systems als konzentrisches Beugungsmuster in der Bildebene ab (Bild 4.4-a). Bild 4.4-b zeigt die bezüglich der Zentrumsachse rotationssymmetrische Lichtintensitätsverteilung im Beugungsbild in Abhängigkeit vom Radius. Das zentrale Maximum erscheint als kreisförmige Fläche hoher Lichtintensität und wird als *Airy-Scheibe*³¹ bezeichnet.

Nach dem Kriterium von Rayleigh³² können zwei Punkte gleicher Intensität gerade dann noch aufgelöst werden, wenn das zentrale Beugungsmaximum des einen Punktbildes mit dem ersten Beugungsminimum des anderen Punktbildes zusammenfällt (vgl. Bild 4.4-b). Bei inkohärenter Beleuchtung entspricht der beugungsbezugte, minimale Abstand zweier auflösbarer Bildpunkte damit genau dem Radius des Airy-Scheibchens (PAUL 1999, S. 49):

$$r' = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{NA'} = 0,61 \cdot \frac{\lambda \cdot |\beta'|}{NA} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

In Gl. 4.1 bestimmt die bildseitige bzw. objektseitige *numerische Apertur* NA' bzw. NA die erreichbare Auflösung des Objektives. Die numerische Apertur beschreibt das Produkt aus dem Sinus des halben Öffnungswinkels δ' bzw. δ (Bild 4.4-a) und der Brechzahl des umgebenden Mediums n' bzw. n im Bild- bzw. Objektraum.

$$\text{Bildseitig: } NA' = n' \cdot \sin \delta' \quad \text{Objektseitig: } NA = n \cdot \sin \delta \quad (\text{Gl. 4.2})$$

Mit der Abbe'schen Sinusbedingung (NAUMANN 1992, S. 111) gilt: $NA = NA' \cdot |\beta'|$

Da sich die zu vermessenden Objekte und das optische System in Luftatmosphäre befinden, sind die objekt- und bildseitigen Brechungsindizes $n' = n = 1$.

Die erforderliche Objektivauflösung hängt nun von der Struktur des CCD-Empfängers ab. Die Auflösungsgrenze des verwendeten 1/3"-CCD-Chips ist erreicht, wenn der

³⁰ Die Apertur- oder Öffnungsblende bestimmt den Strahlenverlauf (Beeinflussung der Bildschärfe) und die Strahlungsleistung (Beeinflussung der Bildhelligkeit) im Objektiv, indem sie die wirksame Apertur, d.h. den Öffnungswinkel eines von einem axialen Objektpunkt ausgehenden Strahlenbündels begrenzt. Bei dem entwickelten, objektseitig telezentrischen Objektiv liegt die Aperturblende als Austrittspupille in der bildseitigen Brennebene (vgl. S. 71).

³¹ Auf die Airy-Scheibe entfallen ca. 84 Prozent des gesamten Lichtes (NAUMANN 1992, S. 23). Demgegenüber kann die Beleuchtungsstärke in den konzentrischen Ringen vernachlässigt und der Durchmesser des Beugungsmusters durch den der Airy-Scheibe angenähert werden.

³² Für die Berechnung der Auflösung existieren verschiedene Kriterien und Modelle, denen auch unterschiedliche Geometrien von Objektdetails zugrunde liegen. Das bekannteste Auflösungskriterium wurde von Lord Rayleigh angegeben. Ein guter Überblick findet sich in PAUL (1999, S. 48).

Abstand r' der beiden Bildpunkte das Pixelmaß ($d_{\text{CCD}} = 6,5 \mu\text{m}$) unterschreitet. Damit berechnet sich die notwendige objektseitige Apertur des Objektivs durch Gleichsetzen von $r' = d_{\text{CCD}}$ und Auflösen von Gleichung 4.1 nach NA:

$$NA \geq 0,61 \cdot \frac{\lambda \cdot |\beta'|}{d_{\text{CCD}}} = 0,1$$

$\lambda = 550 \text{ nm}$ ist die mittlere Wellenlänge des Lichtes.

Entsprechend Gleichung 4.2 ist somit ein Öffnungswinkel von mindestens $2\delta = 11,5$ Grad erforderlich, um die Ortsauflösung des CCD-Sensors auszunutzen.

Abschätzung der Schärfentiefe des Messobjektives

Ein weiterer wichtiger optischer Parameter ist die Schärfentiefe des Messobjektives. Die Schärfentiefe $\Delta\zeta$ kennzeichnet den Bereich, um den das Objekt aus der Fokusebene ohne Überschreitung einer zulässigen Unschärfe im Bild in Richtung der optischen Achse verschoben werden kann.

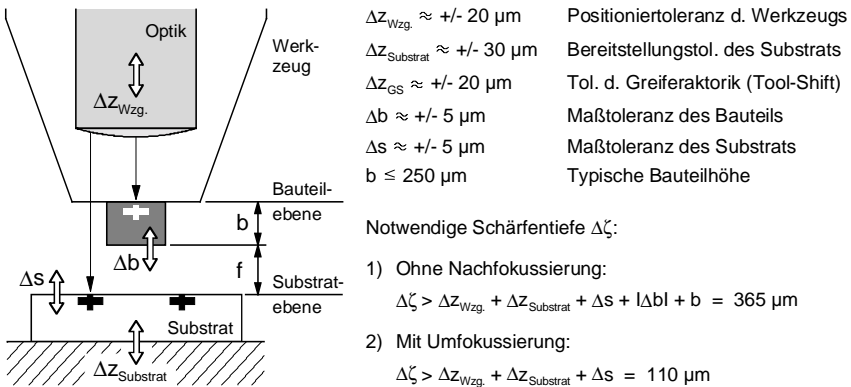


Bild 4.5: Toleranzverhältnisse bei der Montage oberseitenstrukturierter Bauelemente und Auswirkungen auf die erforderliche Schärfentiefe der Optik

Die für die Werkzeug- und Montagesystementwicklung relevanten Wechselbeziehungen zwischen den Toleranzverhältnissen beim Positionierprozess und der opti-

schen Schärfentiefe werden nachfolgend analysiert. Die entsprechenden Parameter können Bild 4.5 entnommen werden³³.

Bei der relativen Positionierung oberseitenstrukturierter Mikrokomponenten liegen die zu lokalisierenden Bauteilstrukturen in verschiedenen Ebenen zur Optik (Oberseite des Substrates vs. Oberseite des zu fügenden Bauteils). Bei der Analyse der Toleranzverhältnisse und ihrer Auswirkungen auf die erforderliche Schärfentiefe sind prinzipiell zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Liegt der Abstand (b+f) der zu vermessenden Objektebenen innerhalb des Schärfentiefebereiches der Optik, so genügt eine einzige Bildaufnahme für die Bestimmung des Positionsversatzes. Substrat und Bauteil können gleichzeitig mit ausreichendem Kontrast abgebildet werden.

In der Bildaufnahmeposition ist toleranzbedingt ein minimaler Fügeabstand erforderlich, um eine Kollision zwischen den Fügepartnern zu vermeiden: $f_{\min} = |\Delta z_{Wzg.}| + |\Delta z_{Substrat}| + |\Delta b| + |\Delta s| = 60 \mu\text{m}$

Andererseits lässt sich der toleranzbedingte maximale Fügeabstand angeben: $f_{\max} = f_{\min} + |\Delta z_{Wzg.}| + |\Delta z_{Substrat}| + |\Delta s| = 115 \mu\text{m}$

Unter Berücksichtigung der Bauteilhöhe b ergibt sich damit der Abstand der beiden Messebenen. Um beide Bauteile simultan mit ausreichendem Kontrast abzubilden, darf dieser die Schärfentiefe des Objektivs nicht überschreiten:

$$\Delta \zeta_{\text{simult.}} \geq f_{\max} + b = 365 \mu\text{m}$$

2. Andernfalls ist ein Umfokussieren zwischen den Messebenen von Substrat und Bauteil notwendig. Der Positionsversatz wird dann (entsprechend Bild 3.7) aus zwei sequentiellen Bildaufnahmen bestimmt.

Bei der Bildaufnahme des Substrates variiert der Arbeitsabstand infolge von Positioniertoleranzen (Werkzeugpositionierung und Substratbereitstellung) und Maßtoleranzen des Substrates. Die Schärfentiefe muss größer als diese toleranzbedingte Schwankungsbreite des Arbeitsabstandes sein:

$$\Delta \zeta_{\text{sequentiell}} \geq \Delta z_{Wzg.} + \Delta z_{Substrat} + \Delta s = 110 \mu\text{m}$$

³³ Die Annahme für die Bauteilhöhe (250 μm) erfolgt im Hinblick auf die im Anwendungsbeispiel verwendeten Referenzbauteile (vgl. Bild 6.2-a)

Mit Kenntnis der numerischen Apertur lässt sich die Schärfentiefe des Objektivs näherungsweise³⁴ abschätzen und in Relation zu den oben erörterten Toleranzverhältnissen setzen. Die Unschärfe im Bild setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

- ♦ Die wellenoptische Unschärfe resultiert aus der Beugung des Lichts an der Aperturblende. Nach Bild 4.4-a entsteht ein Beugungsmuster, dessen Lichtintensität in der Bildebene maximal ist, wenn diese sich im geometrisch-optischen Bildpunkt (Gaußsche Bildebene) befindet (fokussiertes System). Vom geometrisch-optischen Bildpunkt nimmt die Intensität längs der optischen Achse ab. Nach HAFERKORN (1994, S. 335) ist es üblich, einen 20%igen Intensitätsabfall eines Bildpunktes in axialer Richtung für die Bilddefinition zu tolerieren. Daraus resultiert ein Toleranzbereich für den Abstand des Objektes, der als *wellenoptische Schärfentiefe* $\Delta\zeta_{w.o.}$ bezeichnet wird:

$$\Delta\zeta_{w.o.} = \pm \frac{\lambda}{2 \cdot NA^2} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

- ♦ Die geometrisch-optische Unschärfe entsteht, wenn die Objektebene nicht mit der zur Bildebene optisch konjugierten Ebene, der sog. Einstellebene, zusammenfällt (defokussiertes System, Bild 4.4-c). Da nur die Punkte der Einstellebene kollinear als Punkte in die Bildebene abgebildet werden, werden die Punkte einer gegenüber der Einstellebene verschobenen Objektebene als Unschärfekreis in die Bildebene projiziert. Der zulässige Unschärfekreisdurchmesser u' bestimmt dann die *geometrisch-optische Schärfentiefe* $\Delta\zeta_{g.o.}$ (HAFERKORN 1994, S. 287):

$$\Delta\zeta_{g.o.} = \pm \frac{u'}{2 \cdot NA \cdot |\beta|} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

Die Schärfentiefe ergibt sich aus der Addition des wellenoptischen und des geometrisch-optischen Anteils:

$$\Delta\zeta = \Delta\zeta_{w.o.} + \Delta\zeta_{g.o.} = \pm 0,5 \cdot \left(\frac{\lambda}{NA^2} + \frac{u'}{NA \cdot |\beta|} \right) \quad (\text{Gl. 4.5})$$

Aufgrund der physikalisch durch die Beugung bedingten Unschärfe des Bildes ist es nicht sinnvoll, den geometrisch-optischen Unschärfekreis kleiner als den Durchmes-

³⁴ Die Betrachtungen gelten für das paraxiale (achsnahe) Gebiet eines aberrationsfreien optischen Systems (*Gaußsche Optik*) und sind für die grundlegende Objektivauslegung ausreichend. Eine differenziertere Beurteilung der Schärfentiefe ist für das realisierte Messobjektiv mit der Methode der Modulationsübertragungsfunktion möglich (Kap. 4.3.3).

ser der Airy-Scheibe zu fordern. Mit $u' = 2 \cdot r'$ und Gleichung 4.1 lässt sich die Schärfentiefe an der beugungsbedingten Auflösungsgrenze abschätzen:

$$\Delta\zeta = \pm 1,11 \cdot \frac{\lambda}{NA^2} \quad (\text{Gl. 4.6})$$

Bei voller Blendenöffnung ($NA = 0,1$) folgt für das hier betrachtete Objektiv:

$$\Delta\zeta|_{NA=0,1} = \pm 61,05 \mu\text{m} = 122,1 \mu\text{m} \quad (\text{Gl. 4.7})$$

Bild 4.6 zeigt den Zusammenhang zwischen der Schärfentiefe (Gleichung 4.6) und dem Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der Öffnung der Aperturblende für zwei verschiedene Lichtwellenlängen. Die Schärfentiefe ist an der Beugungsgrenze umgekehrt proportional dem Quadrat der Apertur. Das Auflösungsvermögen ergibt sich als Reziprokwert des minimalen Punktabstandes r' nach Rayleigh (Gleichung 4.1) und ist der Apertur proportional.

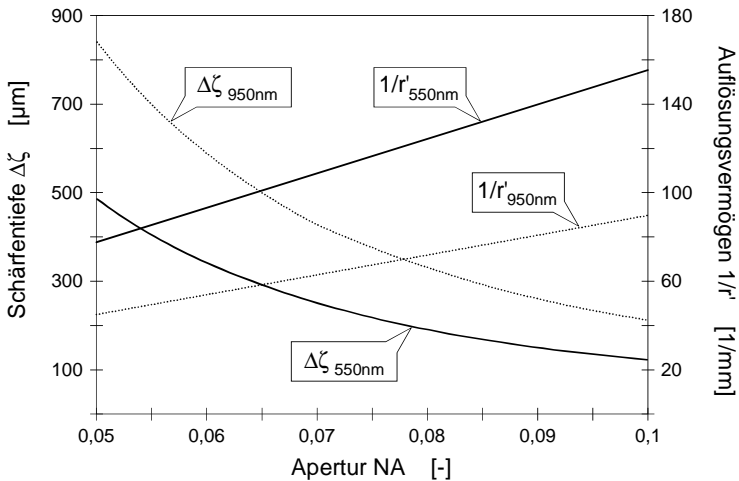


Bild 4.6: Schärfentiefe und Auflösung in Abhängigkeit von der Blendenöffnung für sichtbares Licht mit 550 nm; gestrichelt: Infrarotbeleuchtung 950 nm

Durch Abblenden, d.h. Aperturverkleinerung ($NA \downarrow$), lassen sich zwar die Schärfentiefe erhöhen und Abbildungsfehler (sphärische Aberration, Koma) reduzieren. Allerdings nimmt damit infolge des verstärkten Beugungseinflusses auch die erreichbare

Auflösung ab und die Unschärfe im Bild zu. Es besteht also ein Antagonismus zwischen der erreichbaren Schärfentiefe und dem Auflösungsvermögen der Optik.

Aus den vorhergehenden Betrachtungen resultieren folgende Konsequenzen für die Werkzeugentwicklung und den Werkzeugeinsatz:

- ◆ Bei voller Öffnung der Aperturblende ($NA = 0,1$) beträgt die Schärfentiefe ca. 122 μm . Sie liegt damit trotz der vergleichsweise geringen optischen Vergrößerung unterhalb der typischen Dicken ($b \approx 250 \mu\text{m}$, vgl. Bild 4.5) der zu fügenden Mikrobau-
bauteile. Durch Umfokussierung können jedoch beide Objekte bei maximaler Auflösung im Schärfentiefebereich der Optik abgebildet werden.
- ◆ Die geringe Schärfentiefe bei voller Öffnung erfordert eine Justagemöglichkeit für die Fokusslage des Greifers.
- ◆ Durch Abblenden auf ca. 50% lässt sich der Schärfentiefebereich über die Bauteildicke und die Toleranzen des Montagesystems hinaus ausdehnen (Bild 4.5), wodurch die in unterschiedlichen Ebenen liegenden Strukturen von Bauteil und Substrat gleichzeitig detektiert werden können. Diese Strategie vermeidet den zeitaufwendigen Schritt der Umfokussierung, führt jedoch zu einem verminderten Bildkontrast. Durch den Einsatz unschärfetoleranter Bildauswertelgorithmen kann dieses Problem bis zu einem bestimmten Grad umgangen werden³⁵. Die Quantifizierung und Beurteilung des (reduzierten) Kontrastvermögens im Hinblick auf die Bildauswertung erfordert eine differenzierte Charakterisierung des ausgeführten Objektives, die in Kap. 4.3.3 gegeben wird.

Objektseitig telezentrischer Strahlengang

Um dreidimensionale Objekte innerhalb des Schärfentiefebereiches verzerrungsfrei abzubilden, ist für alle Objektdetails ein konstanter Abbildungsmaßstab notwendig.

Bei *entozentrisch* abbildenden Standardobjektiven (Bild 4.7-a) ändert sich der Abbildungsmaßstab innerhalb des Schärfentiefebereiches in Abhängigkeit von der Objektweite, d.h. gleich große, aber in unterschiedlichen Abständen vom Objektiv lie-

³⁵ Bei einigen Anwendungen ist eine gewisse Konturenunschärfe sogar erwünscht. Bei der Verwendung von Subpixelalgorithmen lässt sich durch Grauwertinterpolation eine Genauigkeit bei der Detektion von Kanten von bis zu 1/5 Pixel erreichen, indem die Kanten gezielt unscharf über einen Bereich von ca. 5 bis 7 Pixel abgebildet werden (LENHARDT 1997, KOPP 1997).

gende Objektdetails werden aufgrund der perspektivischen Verzerrung unterschiedlich groß in die CCD-Ebene abgebildet.

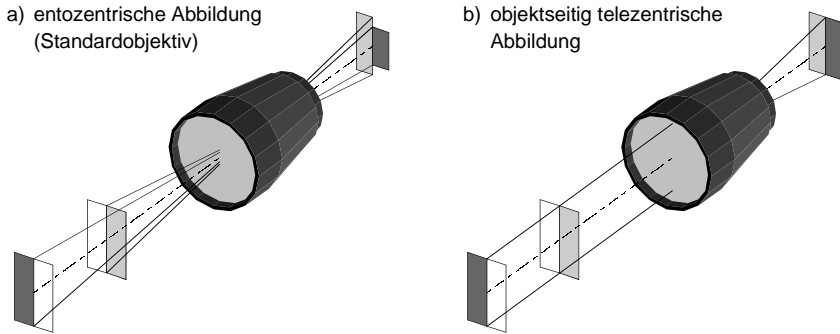


Bild 4.7: Zentralperspektivisch verzerrte (a) und telezentrische (b) Abbildung

Eine Vermeidung dieser Maßstabsfehler erreicht man durch einen *objektseitig telezentrischen Strahlengang* des Messobjektives (Bild 4.7-b). Bei einem telezentrischen Objektiv (ECKERL & PRENZEL 1994, HENTSCHEL & MÜLLER 1997) liegt die Eintrittspupille im Unendlichen. Dies wird konstruktiv durch die Anordnung der Aperturblende in der bildseitigen Brennebene realisiert. Die Hauptstrahlen verlaufen dann im Objekt-raum (annähernd) parallel zur optischen Achse³⁶. Bei einer axialen Verschiebung des Objektes (innerhalb des Schärfentiefebereiches) ändert sich zwar die Schärfe, nicht aber die Lage bzw. Größe des Bildes. Der Abbildungsmaßstab ist exakt festgelegt und invariant gegenüber Abstandsänderungen. Dadurch lässt sich der gesamte Schärfentiefebereich ohne Maßstabsfehler voll ausnutzen.

4.3.3 Gestaltung und Charakterisierung der Optik

Basierend auf der Dimensionierung der optischen Basisparameter wurde das Objektiv von einem Ingenieurbüro berechnet und gefertigt (ECKERL 1998). Bild 4.8 zeigt das gesamte Optikmodul. Es zeichnet sich aufgrund seiner äußerst kompakten und schlanken Bauweise durch die Integrationsfähigkeit in Roboterwerkzeuge aus.

³⁶ Der Durchmesser eines telezentrischen Objektives muss damit - im Gegensatz zu einem Standardobjektiv - grundsätzlich größer als das Objektfeld sein. Aufgrund der kleinen Bauteilabmessungen bedeutet dies jedoch keine Einschränkung für den Einsatz in der Mikromontage.

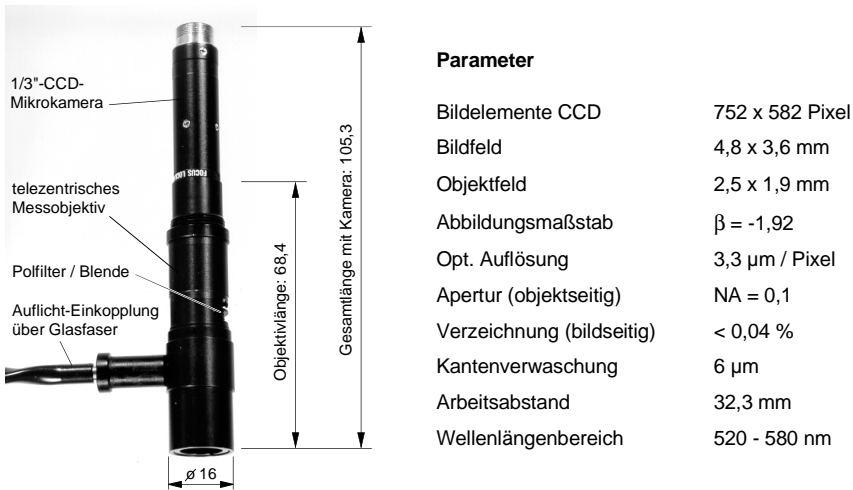


Bild 4.8: Miniaturisiertes Optikmodul für die Integration in Roboterwerkzeuge

Das Modul besteht aus einer handelsüblichen Mikrokamera mit abgesetztem Kamerakopf (TELI CS 4000) und dem miniaturisierten Messobjektiv. Über einen Lichtwellenleiteradapter kann koaxiales Auflicht einer Kaltlichtquelle mit programmierbarer Helligkeit eingekoppelt werden. Durch ein Polarisationsfilter und eine $\lambda/4$ -Platte wird eine gute Abbildung an spiegelnden und diffusen Oberflächen erreicht. Der Wellenlängenbereich wird durch ein integriertes Filterpaket auf 520 – 580 nm begrenzt, um maximale Abbildungsqualität zu gewährleisten.

Das Objektiv verfügt über einen ausreichend großen Arbeitsabstand, um mit verschiedenen Greif- und Fügemodulen (z.B. Stempel, Dispenser) Montagevorgänge im Sichtfeld der Optik durchführen zu können.

Wesentlich für den Bildverarbeitungseinsatz ist die Validierung der optischen Abbildungsqualität anhand relevanter Objektivkennlinien und -parameter. Eine differenzierte Bewertung ist mit der Methode der *Modulationsübertragungsfunktion* (MTF - Modulation Transfer Function) möglich.

Modulationsübertragungsfunktion des Messobjektives

Fasst man die Abbildung als Übertragung optischer Informationen von der Objekt- in die Bildebene auf, so wird das Übertragungsverhalten eines optischen Systems

durch die MTF beschrieben³⁷ (PAUL 1999, S. 133 ff., NAUMANN 1992, S. 408 ff.). Mit der MTF ist es möglich, das Zusammenwirken von Beugung und Abbildungsfehlern sowohl experimentell als auch rechnerisch³⁸ zu erfassen.

Entscheidend für die Merkmalsextraktion durch Bildverarbeitung ist der Kontrast der Intensitätsverteilung, auch *Modulation* genannt:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Der maximale Kontrast $M = 1$ wird für $I_{\min} = 0$ erreicht, für $I_{\max} = I_{\min}$ (kein Intensitätsunterschied) verschwindet der Kontrast. Durch die optische Übertragung verliert das Bild gegenüber dem abgebildeten Objekt infolge des Einflusses von Aberrationen und der Beugung an Kontrast. Der Quotient aus Bild- und Objektmodulation wird als *Modulationsübertragungsfaktor* bezeichnet,

$$T = M'/M,$$

und hängt von der Feinheit der abgebildeten Strukturen ab.

Für die Kantendetektion mittels Bildverarbeitung kann nach Erfahrungswerten (ECKERL 1998) überschlägig von einem mindest erforderlichen Kontrastverhältnis, respektive Modulationsübertragungsfaktor, von etwa 25 – 30 Prozent ausgegangen werden.

Die MTF beschreibt für die Abbildung von Gitterstrukturen³⁹ den Modulationsübertragungsfaktor $T(v')$ als Funktion der Detailfeinheit. Als Maß für die Detailfeinheit der Gitterstruktur dient hierbei die *Ortsfrequenz* v . Sie ist der Reziprokwert der Gitterkonstanten g und wird in Linienpaaren pro mm (Lp/mm) angegeben. Die MTF wird, unter Berücksichtigung des Abbildungsmaßstabes, auf die Ortsfrequenz in der Bildebene v' bezogen:

$$v = 1/g \quad (\text{objektseitig}) \quad \Rightarrow \quad v' = v/|\beta| \quad (\text{bildseitig am CCD})$$

³⁷ In der Fourier-Optik werden Abbildungen in der Terminologie der Systemtheorie behandelt (DIN 58 185). Die MTF kann als optisches Analogon zum Amplitudengang eines mechanischen Systems aufgefasst werden.

³⁸ Allgemein ergibt sich die MTF als Betrag der Fourier-Transformierten der *Punktverwaschungsfunktion*. Im aberrationsfreien Fall ist die Punktverwaschungsfunktion die Airy-Scheibe (vgl. Bild 4.4-b)

³⁹ Das Grundelement aller Objektstrukturen ist ein Sinusgitter, da sich jede allgemeine Intensitätsverteilung durch Fourier-Analyse als Überlagerung elementarer Sinusgitter darstellen lässt.

Bild 4.9-a zeigt die MTF des entwickelten Objektivs über der Ortsfrequenz bei voller Blendenöffnung im Fokus (Kennlinie b) und an der Grenze des nach Gl. 4.7 abgeschätzten Schärfentiefebereichs ($\Delta\zeta_{NA=0,1} = (+)/- 61 \mu\text{m}$, Kennlinie c) im Vergleich zur optimalen Modulationsübertragung (Kennlinie a) eines nur durch die Beugung begrenzten (d.h. hypothetisch aberrationsfreien) optischen Systems.

Bei voll geöffneter Blende ist

$$v_0^i = \frac{2 \cdot NA}{\lambda \cdot |B|} = 189,4 \text{ Lp/mm}$$

die beugungsbedingte Grenzfrequenz⁴⁰ des Objektivs, bei der die physikalische Auflösungsgrenze erreicht und der Kontrast zu Null wird. Dies entspricht einer minimalen Strukturbreite im Objekt von $2,75 \mu\text{m}$. Feinere Objektdetails als diese Grenze können physikalisch bedingt nicht aufgelöst werden.

Wie bereits anhand von Bild 4.6 erläutert, kann die Schärfentiefe durch Abblenden auf $NA = 0,055$ auf den Bereich von ca. $\pm 182 \mu\text{m}$ erhöht werden, der für die simultane Abbildung von Substrat und Bauteil erforderlich ist. In diesem Fall wird die Modulationsübertragung des Objektivs durch die Kennlinien d (im Fokus) und e (an der Grenze des erweiterten Schärfentiefebereiches) beschrieben. Bei dieser Blende wird die Auflösungsgrenze bereits bei einer Grenzfrequenz von 104 Lp/mm erreicht. Dies entspricht einer minimalen Strukturbreite im Objekt von $5 \mu\text{m}$.

Die senkrechte Gerade in Bild 4.9-a kennzeichnet die theoretische Grenzfrequenz der verwendeten $1/3''$ -CCD-Kamera (752×582 Pixel mit einem Mittenabstand von $d = 6,5 \mu\text{m}$). Diese ergibt sich unter Berücksichtigung des Nyquist-Kriteriums zu (JENOPTIK 1998):

$$v_{\text{CCD}}^i = 1/(2d) = 77 \text{ Lp/mm}$$

Mit Kenntnis der in den realen Bildern enthaltenen Ortsfrequenzanteile kann das für die Bildverarbeitung zur Verfügung stehende Kontrastvermögen aufgabenspezifisch untersucht werden. Exemplarisch werden wiederum die Montageobjekte aus dem Anwendungsbeispiel (siehe Bild 6.2-a) betrachtet, die $25 \mu\text{m}$ breite Referenz-

⁴⁰ Die Grenzfrequenz stimmt bis auf einen Faktor 1,22 mit dem Reziprokwert von Gleichung 4.1 überein. Rücken die beiden Airy-Scheiben in Bild 4.4-b so weit zusammen, bis der Kontrast verschwindet, dann ist die Grenzfrequenz erreicht.

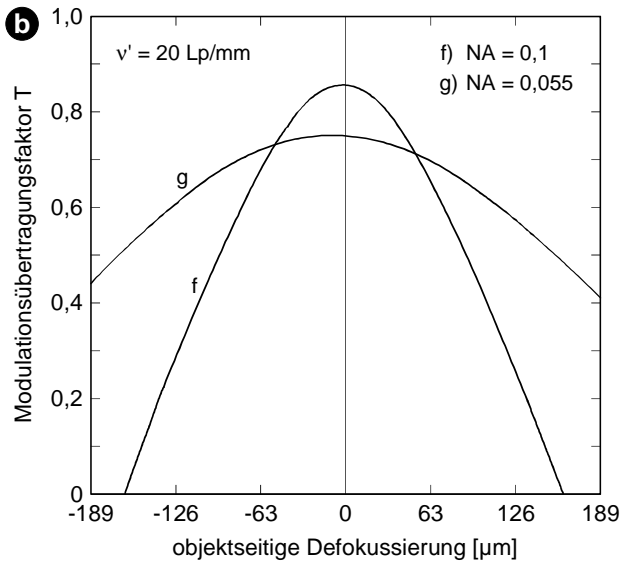
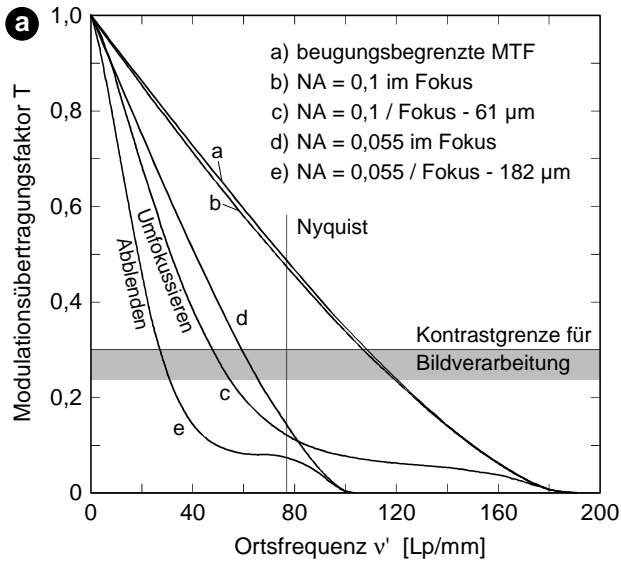


Bild 4.9: MTF des entwickelten Messobjektives: a) als Funktion der Ortsfrequenz; b) als Funktion der Defokussierung zur Bewertung der Schärfentiefe

strukturen für die bildgeführte Justage aufweisen. Diese Strukturbreite entspricht einer Ortsfrequenz im Bild von ca. 20 Lp/mm. Sehr nützlich für die Bewertung des optischen Systems und die Ableitung von Folgerungen für die Werkzeugentwicklung ist die Darstellung des Übertragungsfaktors T bei einer festen Ortsfrequenz als Funktion der (objektseitigen) Defokussierung (Bild 4.9-b). Die Darstellung erfolgt für die o.g. interessierende Ortsfrequenz von 20 Lp/mm. Kennlinie f gilt dabei für maximale Öffnung ($NA = 0,1$), während Kennlinie g den Fokussierbereich für das abgeblendete Objektiv ($NA = 0,055$) kennzeichnet. Ersichtlich ist der engere Fokussierbereich durch steilen T -Abfall bei offener Blende.

Aus der MTF lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- ◆ Ein Vergleich zwischen den Kennlinien a und b zeigt, dass die Abbildungsfehler des Objektivs bis nahezu an die Beugungsgrenze korrigiert wurden. Bei voller Blendenöffnung erreicht das Objektiv nahezu die physikalische Grenze der licht-optischen Abbildung für maximale Detailauflösung bei hohem Kontrast.
- ◆ Bei der Nyquist-Grenzfrequenz der verwendeten Kamera ergibt sich eine Modulation von 48%. Wird aufgrund von Ladungsträgerdiffusion auf dem CCD-Sensor und Verlusten auf der Videodigitalisierungskarte ein verbleibendes Kontrastvermögen von 70 Prozent angenommen, so steht für die Bildverarbeitung noch ein ausreichendes Kontrastverhältnis von 34% zur Verfügung.
- ◆ Bei offener Blende führt Defokussierung zu einem steilen Abfall der Modulation (Kennlinie f). Eine simultane Abbildung der Referenzmarken von Substrat und Bauteil ist folglich bei offener Blende nicht möglich, da die Defokussierung infolge der Höhendifferenz der abzubildenden Objektebenen entsprechend Bild 4.5 bis zu $\pm 182 \mu\text{m}$ betragen kann. In diesem Fall ist kein ausreichender Kontrast mehr im Bild detektierbar. Durch Umfokussieren zwischen der Substrat- und Bauteilebene (Bild 4.10) lassen sich die Abstandstoleranzen in Richtung der optischen Achse jedoch auf $110 \mu\text{m}$ reduzieren (Bild 4.5) und liegen damit innerhalb des nach Gleichung 4.7 berechneten Schärfentiefebereiches bei offener Blende. Bei dieser Defokussierung von $\pm 55 \mu\text{m}$ wird ein für die Bildverarbeitung gut ausreichendes Kontrastverhältnis von etwa 71% erzielt (Kennlinie f).
- ◆ Durch Abblenden auf $NA = 0,055$ können sowohl die Substrat- als auch die Bauteilstrukturen mit vermindertem Kontrast (Kennlinie g : $T \approx 44\%$ bei einer Defokussierung von $\pm 182 \mu\text{m}$) im erweiterten Schärfentiefebereich detektiert werden. Unter Verwendung unschärfetoleranter Bildverarbeitungsalgorithmen kann somit

bei den hier beispielhaft betrachteten, $25\text{ }\mu\text{m}$ breiten Referenzstrukturen auf ein Umfokussieren zugunsten einer besseren Taktzeit verzichtet werden.

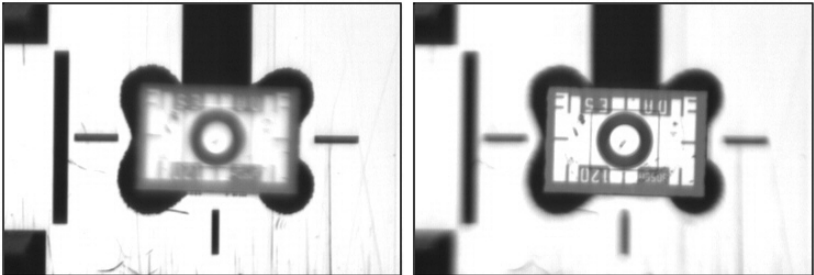


Bild 4.10: Umfokussierung zwischen zwei Messebenen; links: Fokus auf dem Substrat; rechts: Fokus auf dem Bauelement. Eine perspektivische Ansicht dieser Szene ist in Bild 6.2-a schematisch dargestellt.

- ♦ Auf andere Montageobjekte (z.B. Bauteile mit hohem Aspektverhältnis⁴¹ oder kleinen Strukturbreiten) verallgemeinert wird das Abbildungsverhalten des Objektives für die beiden Strategien *Umfokussieren* und *Abblenden* (unter Berücksichtigung der jeweils relevanten Abstandstoleranzen in Richtung der optischen Achse gemäß Bild 4.5) generell durch die beiden Kennlinien *c* und *e* charakterisiert. Umfokussieren liefert also grundsätzlich bessere Kontrastverhältnisse als Abblenden. Entsprechend Kennlinie *e* fällt die Modulation der abgeblendeten, defokussierten Optik bei höheren Ortsfrequenzen stark ab und unterschreitet oberhalb 27 Lp/mm (Strukturbreite im Objekt kleiner als $19\text{ }\mu\text{m}$) die Kontrastgrenze für die Bildverarbeitung; feinere Strukturen der Montageobjekte sind aufgrund zunehmender Bildunschärfe nicht mehr präzise lokalisierbar. In diesem Fall lässt sich durch Öffnung der Blende und Umfokussieren (Kennlinie *c*) eine verbesserte Detailauflösung erzielen, wodurch Objektstrukturen bis herunter zu $11\text{ }\mu\text{m}$ (48 Lp/mm an der Kontrastgrenze) erkannt werden können. Daraus folgt, dass bei der Werkzeugentwicklung eine Fokussiermöglichkeit zu berücksichtigen ist, um einen universellen Einsatzbereich für unterschiedliche Montageaufgaben zu gewährleisten. Kapitel 5.3.1.2 greift diese Problematik später auf.

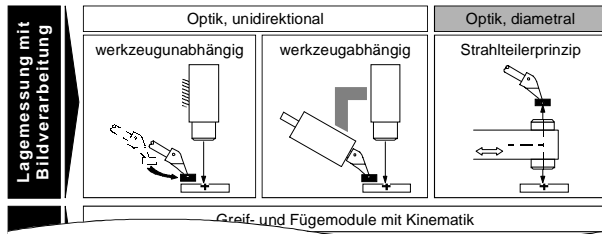
⁴¹ Verhältnis der axialen Strukturhöhe zu den minimalen lateralen Abmessungen. Lateral bezieht sich auf die optische Messebene, während mit axial die Koordinatenrichtung gemeint ist, die in Normalenrichtung zur Messebene, also in Richtung der optischen Achse, verläuft. Ein hohes Aspektverhältnis erschwert die konturenscharfe Abbildung der Bauteilstrukturen zu den darunterliegenden Substratstrukturen mit einer festen Fokuseinstellung.

4.4 Diametral abbildendes Optikmodul

Das diametral abbildende Optikmodul mit Strahlteilung stellt eine auf das Montageszenario 3. Art ausgegerichtete Ergänzung zu der im vorhergehenden Abschnitt be-

schriebenen unidirektionalen Optik dar. Dem Einsatz dieses Moduls liegt die Positionierstrategie 3.3 (vgl. Bild 3.12) zugrunde.

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Aufbaumöglichkeiten für die Optik analysiert und ein geeignetes Lösungsprinzip zur Umsetzung ausgewählt.



4.4.1 Anforderungen

Ausgangsbasis ist die Formulierung grundlegender Anforderungen an das Optikmodul:

- ♦ **Hohe Messgenauigkeit:** Mit der Strahlteileroptik soll eine vergleichbar hohe Auflösung in der Größenordnung von $1\ \mu\text{m}$ (mit vier- bis achtfacher Subpixelinterpolation, vgl. Kap. 4.3.1.2) erreicht werden wie mit der zuvor beschriebenen unidirektionalen Optik. Im Unterschied dazu wird jedoch die Messgenauigkeit neben der Abbildungsqualität zusätzlich durch mechanische Fehler (beispielsweise Endlagenfehler beim Einfahren der Optik in die Fügeachse) beeinflusst, die bei der Bewertung optischer Aufbauvarianten zu berücksichtigen sind.
- ♦ **Hohe Einsatzflexibilität:** Die Strahlteileroptik soll als autonomes Modul in verschiedenen Positioniersystemen einsetzbar sein. Dies beinhaltet beispielsweise die Integration in manuelle Systeme bei geringen Stückzahlen in der Einführungsphase eines Produktes, wie auch den Einsatz in halbautomatischen und automatischen Systemen in der Wachstumsphase des Produktlebenszyklus.
- ♦ Der Aufbau der Optik soll die Erreichung einer **geringen Zykluszeit** des Positionierprozesses unterstützen.
- ♦ Für eine schnelle Umsetzbarkeit des Strahlteilerkonzeptes ist ein **geringer Realisierungsaufwand** anzustreben.

Die Entwicklung eines hinsichtlich seiner Abbildungsleistung optimierten Strahlteiler-Optikmoduls würde den hier zur Verfügung stehenden Rahmen weit sprengen. Im Vordergrund steht daher nicht die differenzierte Analyse der optischen Abbildung, sondern die Evaluierung prinzipieller Lösungsmöglichkeiten für die optische Strahlteilung, die in die Realisierung eines ersten Funktionsmusters mündet.

4.4.2 Optische Aufbauvarianten

Die diametral abbildende Optik basiert auf der Teilung und Umlenkung des optischen Strahlenganges in ein oberes und unteres Bündel. Über ein Objektiv werden die beiden konvergenten Teilstrahlen auf dem CCD-Chip einer Kamera abgebildet (vgl. Bild 3.12). Für die weitere Betrachtung wird auf die Darstellung des Objektivs der besseren Übersicht wegen verzichtet.

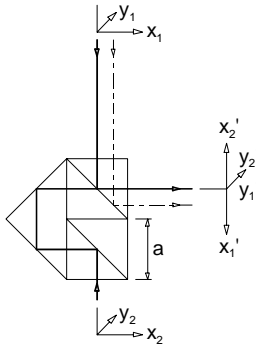
In Bild 4.11 sind mögliche Aufbauvarianten für die Optik dargestellt.

Bei Prismensystemen kann die Strahlteilung und –umlenkung durch eine Kombination aus einem Strahlteilerwürfel und zwei Reflexionsprismen realisiert werden (Teilbilder a bis c). Die Prismensysteme werden entsprechend der verwendeten Reflexionsprismen als Porroprisma-, Rhomboidprisma- und Pentagonprisma-Optik bezeichnet und durch Verkitten der Einzelelemente zusammengebaut. Nachteile der Prismenoptiken sind die langen und nicht symmetrischen Strahlengänge im Glas, die zu Abbildungsfehlern (sog. Öffnungsfehler und Astigmatismus, NAUMANN 1992, S. 100) führen.

Eine weitere Möglichkeit zur Teilung des Strahlenganges ist der Einsatz von bewegten optischen Elementen, wie z.B. ein um 90 Grad drehbarer Spiegel oder ein verschiebbares Spiegelprisma (Teilbilder d und e). Dadurch können symmetrische und kurze optische Strahlengänge realisiert werden. Die Kinematik erhöht jedoch die Ungenauigkeiten bei der Bildaufnahme durch den Einfluss der Endagentoleranzen. Darüber hinaus ist keine simultane Bildaufnahme von Bauteil und Substrat möglich, was zu längeren Zykluszeiten führt.

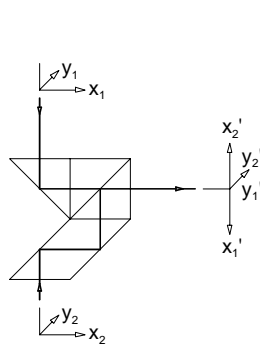
Bei der Halbbild-Optik (Teilbild f) werden Bauelement und Substrat in zwei separaten Strahlengängen über ein Doppelspiegelprisma auf den CCD-Chip abgebildet. Dieses Prinzip verbindet die Vorteile der Prismenoptiken (Vermeidung bewegter optischer Elemente) mit denen der Spiegeloptiken (kurzer und symmetrischer Strahlengang). Da jedoch für das untere und obere Objektfeld jeweils nur eine Hälfte der CCD-Chip-Fläche ausgenutzt wird, kann gegenüber den Optikvarianten a bis e nur eine verminderte Ortsauflösung erreicht werden.

a) Porroprisma-Optik



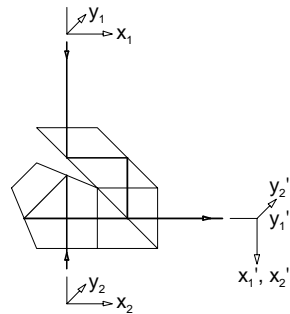
$$\begin{aligned} s_{\text{opt}} &= 4a & \Delta s_{\text{opt}} &= 3a \\ d &= 5a & \kappa &= 3,67 \end{aligned}$$

b) Rhomboidprisma-Optik



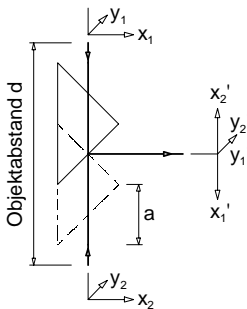
$$\begin{aligned} s_{\text{opt}} &= 3a & \Delta s_{\text{opt}} &= 1a \\ d &= 3a & \kappa &= 3,67 \end{aligned}$$

c) Pentagonprisma-Optik



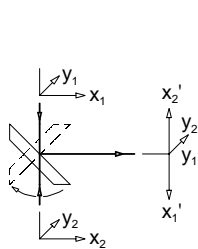
$$\begin{aligned} s_{\text{opt}} &= 4,4a & \Delta s_{\text{opt}} &= 1,4a \\ d &= 3,4a & \kappa &= 4,93 \end{aligned}$$

d) Translatorischer Spiegel



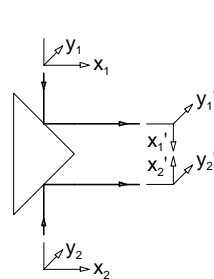
$$\begin{aligned} s_{\text{opt}} &= 0 & \Delta s_{\text{opt}} &= 0 \\ d &= 3a & \kappa &= 2,62 \end{aligned}$$

e) Rotatorischer Spiegel



$$\begin{aligned} s_{\text{opt}} &= 0 & \Delta s_{\text{opt}} &= 0 \\ d &= 1a & \kappa &= 2,62 \end{aligned}$$

f) Halbbild-Optik



$$\begin{aligned} s_{\text{opt}} &= 0 & \Delta s_{\text{opt}} &= 0 \\ d &= 2a & \kappa &= 2,1 \end{aligned}$$

Bild 4.11 Optik-Aufbauvarianten und charakteristische opt. Parameter: s_{opt} maximale optische Weglänge im Glas, Δs_{opt} Weglängendifferenz der beiden Teilstrahlen im Glas, d Mindest-Objektabstand, κ Versatzkennwert (vgl. Bild 4.13); die Koordinatensysteme kennzeichnen die Bildlage: Varianten a, b, d, e, f \rightarrow vertikal gespiegelte Abbildung, Variante c \rightarrow deckungsgleiche Abbildung

4.4.3 Bewertung und Auswahl

Für die systematische Bewertung der Lösungsprinzipien wird die Methode der Nutzwertanalyse (vgl. z.B. PAHL & BEITZ 1993, S. 122 ff.) angewendet. Dazu werden, basierend auf den Anforderungen, in einem ersten Schritt Zielvorstellungen aufgestellt, aus denen sich die Bewertungskriterien ableiten. Die Nutzwertanalyse systematisiert diesen Arbeitsschritt durch Bildung eines Zielsystems, das die einzelnen Teilziele vertikal in unterschiedliche Zielbereiche - hohe Genauigkeit, geringe Zykluszeit, hohe Einsatzflexibilität und geringer Realisierungsaufwand - und horizontal in mehrere Zielstufen abnehmender Komplexität hierarchisch gliedert (Bild 4.12). Die Teilziele der Zielstufe mit der geringsten Komplexität stellen dann die Bewertungskriterien dar.

Im Zielsystem wird die unterschiedliche Bedeutung der Bewertungskriterien für den Gesamtwert einer Lösung durch relative und absolute Gewichtungsfaktoren berücksichtigt. Die relativen Gewichtungsfaktoren g_{rel} erhält man, indem 100% Gesamtgewichtung jeweils auf alle Ziele (einer Zielstufe) verteilt werden, die sich unter einem übergeordneten Kriterium zusammenfassen lassen.

Die absolute Gewichtung g_{abs} des Teilzieles in Bezug auf das Gesamtziel ergibt sich dann durch Multiplikation seines relativen Gewichtes mit dem absoluten Gewicht des übergeordneten Zieles. Die Summe der absoluten Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien in der untersten Zielstufe ist dann 1 bzw. 100%.

Dieses Vorgehen führt auf folgende Bewertungskriterien:

Geringe optische Weglänge im Glas: Bei langen Glaswegen und vielen Grenzschichten treten Verluste durch Absorption und Abbildungsfehler (Öffnungsfehler, Astigmatismus) auf. Weiterhin wirken lange Glaswege aperturbegrenzend und reduzieren damit die erreichbare Auflösung. Die optische Weglänge im Glas wird als ein Vielfaches der Kantenlänge a eines Strahlteilers (vgl. Bild 4.11) angegeben.

Symmetrischer Strahlengang: Symmetrie ist vorhanden, wenn die optische Weglänge im Glas für beide Teilstrahlen gleich ist. Bei den Prismensystemen a bis c liegt ein asymmetrischer Strahlengang vor, d.h. Weglängenunterschiede im Glas müssen durch unterschiedliche Objektabstände unten/oben ausgeglichen werden (vgl. Bild 4.11). Asymmetrischer Strahlengang führt zu unterschiedlichen Abbildungsfehlern in den beiden Teilstrahlen (oben/unten) und reduziert die Messgenauigkeit. Die Weglängendifferenz zwischen den beiden Teilstrahlen im Glas wird wiederum als ein Vielfaches der Kantenlänge a eines Strahlteilers angegeben.

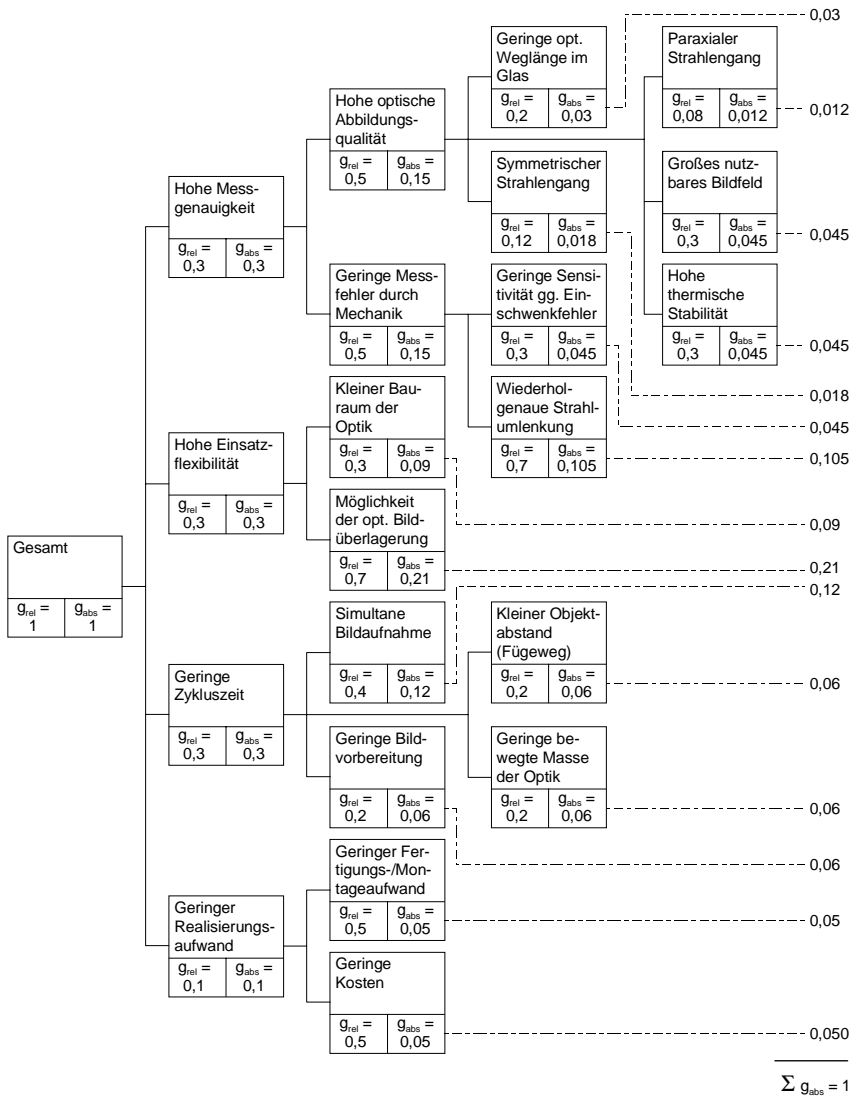


Bild 4.12: Struktur des Zielsystems mit Gewichtungsfaktoren

Paraxialer Strahlengang: Im Paraxialgebiet, d.h. Strahlenverlauf im achsnahen Raum, sind Abbildungsfehler (Verzeichnung) vernachlässigbar. Bei der Halbbild-Variante ist paraxialer Strahlengang nicht realisierbar, die Strahlen verlaufen in den Randbereichen des Objektives.

Großes nutzbares Bildfeld: Die erreichbare Ortsauflösung korreliert mit der Größe und dem Format der Fläche auf dem CCD-Chip, die für die Bildauswertung zur Verfügung steht. Bei der Halbbild-Variante ist das nutzbare Bildfenster aufgrund der Aufteilung der Chipfläche für den unteren und oberen Strahlengang eingeschränkt.

Hohe thermische Stabilität: Thermisch bedingte Verformungen optischer und mechanischer Elemente führen zu Lage- und Winkelabweichungen zwischen den beiden Teilstrahlengängen.

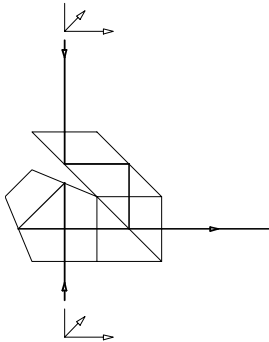
Geringe Sensitivität gegen Einschwenkfehler: Der Ablenkwinkel ist von einer Drehung der Optik um eine Achse senkrecht zur Einfallsebene abhängig. Damit führen Verkippen der Optik, die durch die begrenzte Wiederholgenauigkeit des Antriebs für das Einschwenken des Moduls in die Fügeachse bedingt sind, zu optischen Messfehlern aufgrund von Lage- und Winkelabweichungen zwischen den beiden Teilstrahlen (Koinzidenzfehler). Die Sensitivität der jeweiligen Optik im Hinblick auf rotatorische Endlagenfehler⁴² kann durch einen dimensionslosen Versatzkennwert κ vergleichend beschrieben werden. Dieser entspricht dem Abstand zweier Punkte, die durch die Optik in die Bildebene abgebildet werden (Bild 4.13). Um vergleichbare Werte zu erhalten, wird für alle Optiken eine Verdrehung von 2 Grad zugrunde gelegt.

Wiederholgenaue Strahlumlenkung: Dieses Kriterium berücksichtigt optische Messfehler (Koinzidenzfehler), die durch den Einfluss der begrenzten Wiederholgenauigkeit bewegter optischer Elemente (Optikvarianten d und e) in den beiden Endlagen für die Strahlumlenkung entstehen.

Simultane Bildaufnahme: Darunter wird die Möglichkeit verstanden, die untere und obere Bildaufnahme gleichzeitig durchzuführen. Dagegen muss bei den Optikvarianten d und e das optische Element zwischen den Bildaufnahmen bewegt werden, um nacheinander beide Objekte abzubilden.

⁴² Gegenüber translatorischen Endlagenfehlern ist die optische Abbildung invariant.

a) Optik endlagengenau



b) Optik verkippt

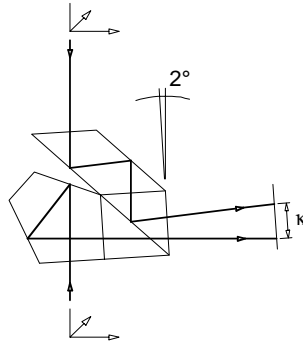


Bild 4.13: Charakterisierung des Einschwenkfehlers durch einen dimensionslosen Versatzkennwert (κ) am Beispiel der Pentagonprisma-Optik

Geringe Bildvorbereitung: Mit Ausnahme des Pentagonprisma-Systems bilden alle betrachteten Optiken das untere und obere Objekt horizontal zueinander gespiegelt auf dem CCD-Chip ab. Zur Bestimmung der Lageabweichung ist daher ein zusätzlicher Bildvorbereitungsschritt in Form einer Spiegelung notwendig.

Kleiner Objektabstand bzw. Fügeweg: Der theoretisch mindest erforderliche Abstand zwischen Substrat und Bauteilunterseite ergibt sich aus der Größe der Optik und ggf. der Weglängendifferenz zwischen unterem und oberem Strahlengang (bei asymmetrischem Strahlengang, Aufbauvarianten a bis c) und kann als ein Vielfaches der Kantenlänge a eines Strahlteilers angegeben werden. Dieser Abstand soll möglichst klein sein, um den Zeitbedarf für die Fügebewegung zu minimieren.

Geringe bewegte Masse des Optikmoduls: Um – im Hinblick auf die Reduzierung der Zykluszeiten - beim Ein- und Ausschwenken der Optik in und aus der Fügeachse (Bildaufnahmeposition) ein gutes Beschleunigungsvermögen zu erreichen und Schwingungsanregung zu vermeiden, ist eine geringe bewegte Masse anzustreben.

Kleiner Bauraum der Optik: Eine hohe Einsatzflexibilität der Optik in unterschiedlichen Positioniersystemen und Applikationen soll durch kompakte Abmessungen unterstützt werden. Zudem soll die Optik vom Hand-

habungsgerät mitgeführt werden können, um eine Lageerkennung an unterschiedlichen Orten (Pick-Position, Place-Position) im Arbeitsraum zu ermöglichen.

Möglichkeit der optischen Bildüberlagerung: Das Optikmodul soll stückzahlflexibel in manuelle, teilautomatische und vollautomatische Handhabungs- und Positioniersysteme integriert werden können. Während die Lageabweichung bei vollautomatischer Montage mittels Bildverarbeitung bestimmt wird, benötigt der Bediener bei manueller und teilautomatischer Montage eine visuelle Information über die Lageabweichung, die eine deckungsgleiche Abbildung und Überlagerung der beiden Objekte voraussetzt.

Geringer Fertigungs- und Montageaufwand: Dieses Kriterium beinhaltet den Aufwand für die Fertigung und Justage der optischen Komponenten, um eine möglichst hohe Abbildungsqualität zu erzielen. Die große Anzahl der verwendeten Bauelemente und die damit zu beherrschenden Toleranzen erhöhen z.B. den Fertigungs- und Justageaufwand bei den Prismensystemen.

Geringe Kosten: Die Grobbewertung umfasst Material, Entwicklungs- und Herstellkosten.

Für die anschließende Bewertung der Optikvarianten werden, in Anlehnung an die VDI-RICHTLINIE 2225 (1977), Punkte von 0 (sehr schlecht, unbefriedigend) bis 4 (sehr gut, Ideallösung) vergeben, die mit dem absoluten Gewicht des jeweiligen Bewertungskriteriums multipliziert und zum Nutzwert der jeweiligen Variante aufsummiert werden (Tabelle 4.1).

Auf der Grundlage dieser Vorgehensmethodik erzielt die Pentagonprisma-Optik den höchsten Nutzwert. Diese Lösungsvariante soll daher in ein Funktionsmuster umgesetzt werden. Herausragendes Merkmal der Pentagonprisma-Optik ist die simultane und deckungsgleiche optische Abbildung, wodurch eine geringe Zykluszeit und eine hohe Einsatzflexibilität sowohl in manuellen (direkte, visuelle Bildüberlagerung auf einem Monitor) als auch in automatisierten Montagesystemen mit Bildverarbeitung begünstigt werden. Diesem Vorteil stehen in einigen Punkten Einbußen in Bezug auf die Messgenauigkeit und ein erhöhter Fertigungs- und Justageaufwand der Prismen gegenüber.

	abs. Ge- wicht	Porropris- ma-Optik	Rhom- boidpris- ma-Optik	Penta- gonpris- ma-Optik	Transla- torischer Spiegel	Rotatori- scher Spiegel	Halbbild- Optik
Opt. Weglänge im Glas	0,03	2	3	1	4	4	4
Symm. Strahlengang	0,018	0	3	2	4	4	4
Parax. Strahlengang	0,012	4	4	4	4	4	1
Nutzbare Bildfeld	0,045	3	3	4	3	3	1
Therm. Stabilität	0,045	3	2	2	2	2	4
Einschwenkfehler	0,045	2	2	1	3	3	4
Strahlumlenkung (Wh.)	0,105	4	4	4	3	2	4
Kleiner Bauraum	0,09	2	2	2	1	2	4
Opt. Bildüberlagerung	0,21	0	0	4	0	0	0
Simult. Bildaufnahme	0,12	4	4	3	0	0	4
Bildvorbereitung	0,06	1	1	4	1	1	1
Kleiner Objektstand	0,06	0	2	1	2	4	3
Bewegte Masse	0,06	3	3	3	2	2	4
Herstellaufwand	0,05	1	1	1	2	2	4
Kosten	0,05	2	2	2	2	2	4
Nutzwert (Summe)		1,94	2,1	2,86	1,51	1,61	2,75

Tabelle 4.1: Bewertung der Optikvarianten

4.4.4 Modulgestaltung

Bild 4.14 zeigt ein Funktionsmuster, das für eine erste Beurteilung der Bildüberlage-
rung realisiert wurde, aber noch nicht hinsichtlich seiner Abmessungen und bezüglich

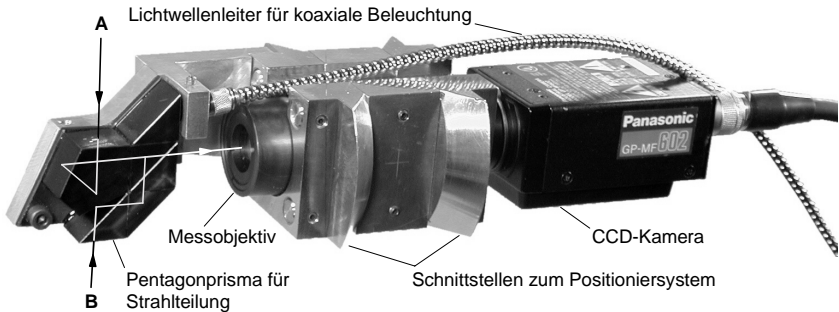


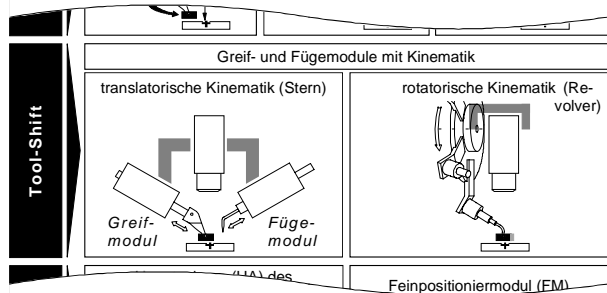
Bild 4.14: Diametral abbildendes Optikmodul: realisiertes Funktionsmuster mit Pentagonprisma-Strahlteiler

der Abbildungsqualität optimiert ist. Verwendet wird hier noch ein voluminöses, handelsübliches Messobjektiv mit $\frac{1}{2}$ "-CCD-Kamera, das bei späteren Prototypen durch das in Kap. 4.3.3 beschriebene Miniaturobjektiv mit $\frac{1}{3}$ "-Kamera ersetzt werden soll. Damit kann das Modul künftig noch deutlich kompakter ausgeführt werden.

Das Pentagonprisma ist aus verkitteten Einzelprismen der Kantenlänge 15 mm aufgebaut. Der Messabstand der beiden Montageobjekte zum Prisma beträgt für den oberen Strahlengang 5 mm und für den unteren Strahlengang 26 mm. Zur homogenen Ausleuchtung der beiden Objektfelder kann das Licht einer Kaltlichtquelle über eine Glasfaser in das Prisma eingekoppelt werden.

4.5 Greif- und Fügemodule mit Kinematik

Neben unterschiedlichen anwendungsspezifischen Greifern für die Handhabung der Bauelemente bedarf es geeigneter Fügemodule⁴³, um eine hohe Einsatzflexibilität in Bezug auf verschiedene Montageaufgaben im Bereich hybrider Mikrosysteme zu erreichen.



In Zusammenhang mit der Problematik optisch verdeckter Referenzstrukturen wurde bereits auf die Notwendigkeit einer Greiferkinematik⁴⁴ hingewiesen, um das zu fügende Bauteil aus dem optischen Sichtfeld zur Lageerkennung der abgeschatteten Substratstrukturen zurückzuziehen. Diese kinematische Forderung ist auf die Fügemodule verallgemeinerbar, da *alle* Teilprozesse der Montage (sowohl die Handha-

⁴³ Module zur Durchführung von Fügeprozessen, wie z.B. Dispensmodul für Klebeprozesse

⁴⁴ In Kap. 3.3.4 (S. 52) wurde hierfür der Begriff *Tool-Shift* eingeführt. Die Greiferkinematik ist nur bei Werkzeugen mit integrierter Optik (werkzeugabhängige Optik, Bild 4.2) nötig. Sie ist damit für die im nächsten Hauptkapitel entwickelten Roboterwerkzeuge relevant. Im anderen Fall, also bei werkzeugunabhängiger Optik, kann die Relativbewegung zum Ein- und Auschieben des Greifers in das Sichtfeld durch die Achsen des Handhabungsgerätes realisiert werden, da Optik und Handhabungsachsen mechanisch entkoppelt sind.

bungs- als auch die Fügeprozesse) konsequent unter optischer Kontrolle des Bildverarbeitungssystems ablaufen sollen.

Die Gestaltung der Greif- und Fügemodule inklusive Aktorik bildet somit den Schwerpunkt dieses Kapitels.

4.5.1 Anforderungen

Die Entwicklung der Module orientiert sich an folgenden Anforderungen:

- ♦ Um Nebenzeiten durch den Werkzeugwechsel zu minimieren, sollen mehrere (austauschbare) Greifer und Fügewerkzeuge gleichzeitig über Schnittstellen an einem Werkzeugträger aufgenommen und wechselweise in das optische Sichtfeld eingebracht werden können.
- ♦ Die Größe des Greifers setzt dem minimal möglichen Abstand zwischen der objektivseitigen Hauptebene und dem Montageort Grenzen und limitiert dadurch die maximal erreichbare Vergrößerung und Auflösung der optischen Messung. Der in das Sichtfeld hineinragende Teil des Greifers soll daher eine nur geringe Ausdehnung in Richtung der optischen Achse aufweisen. Die Greifergestaltung muss zudem eine ständige Beobachtung von charakteristischen geometrischen Merkmalen des gegriffenen Bauelements im Sichtfeld der oberhalb angeordneten Optik ermöglichen.
- ♦ Kleben und Löten zählen zu den häufigsten Fügeprozessen in der Mikrosystemtechnik (vgl. Kap. 2.2.4). Für diese Prozesse sind an eine flexible Kleinserienproduktion angepasste Fügemodule (Dispenser, Stempel, Lötmodul) vorzusehen.

4.5.2 Gestaltung der Greifmodule

Das laterale Ein- und Ausschieben des gegriffenen Fügeteils in bzw. aus dem optischen Sichtfeld kann durch eine einachsige Aktorik mit rotatorischer oder translatorischer Kinematik erfolgen. Nach einer systematischen Analyse möglicher Lösungskonzepte wurden zwei Kinematikvarianten, die in Bild 4.2 schematisch dargestellt sind, in die nähere Auswahl gezogen: die Gestaltung als Revolveraktorik sowie die sternförmige Anordnung von Linearmodulen, um das für den jeweiligen Teilprozess benötigte Greif- oder Fügewerkzeug in das Sichtfeld der Optik zu bringen. Da die lineare Kinematik bei geringerem konstruktiven Aufwand eine höhere Endlagengenauigkeit erwarten lässt, wird nachfolgend das Prinzip der Sternanordnung weiter ausgeführt.

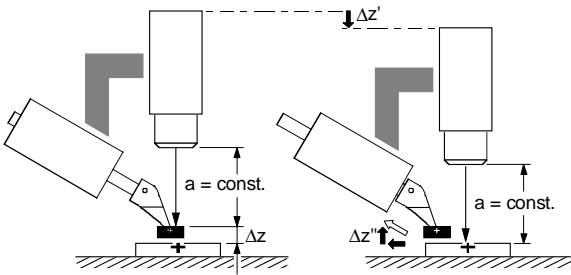


Bild 4.15: Greiferkinematik

Für die Lagemessung müssen beide Montageobjekte nacheinander in die Fokusebene der Optik gebracht werden, d.h. im gleichen Abstand zur Optik positioniert werden. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Fügeteils in der z-Richtung muss die Aktorik, neben der reinen

Lateralbewegung, eine vertikale Bewegungskomponente ($\Delta z''$ in Bild 4.15) aufweisen, um bei der Bildaufnahme des Substrats eine Kollision mit dem gegriffenen Füge-
 teil zu vermeiden. Dies kann durch ein schräg angeordnetes Linearmodul realisiert werden.

Aufgrund ihres einfachen Aufbaus und der kompakten Abmessungen erscheinen in Bezug auf die optische Lageerkennung speziell gestaltete Sauggreifer praktikabel. Die in Bild 4.16-a und Bild 4.16-b dargestellten Sauggreifer weisen optisch transparente Materialien auf, so dass Referenzstrukturen, die sich auf der Oberseite des Bauelementes befinden, durch die Saugbohrung oder einen Saugglaseinsatz hindurch beobachtet werden können. Dieses Prinzip eignet sich für die Handhabung kleiner Bauelemente mit Kantenlängen bis minimal ca. 150 μm . Für etwas größere Bauelemente bietet sich die Greifervariante nach Bild 4.16-c an, die das gegriffene Objekt nur teilweise verdeckt und damit die Beobachtung der Bauteilstrukturen am Greifer vorbei ermöglicht. Einer wegen der geringeren Greiffläche prinzipiell geringeren Haltekraft steht dabei der Vorteil einer freien Beobachtung ohne Glaskomponenten im optischen Strahlengang gegenüber.

Das Greifmodul ist modular aufgebaut und besteht aus einem pneumatischen Aktor für das Einschieben des Greifers in das Sichtfeld und dem eigentlichen, bauteilspezifischen Greifer. Letzterer ist einfach und kostengünstig austauschbar. Das komplette Greifmodul wird über eine definierte Schnittstelle an den Werkzeugträger des Gesamtsystems⁴⁵ angekoppelt.

⁴⁵ Der Gesamtaufbau der Werkzeuge wird in Kapitel 5.2 und 5.3 beschrieben.

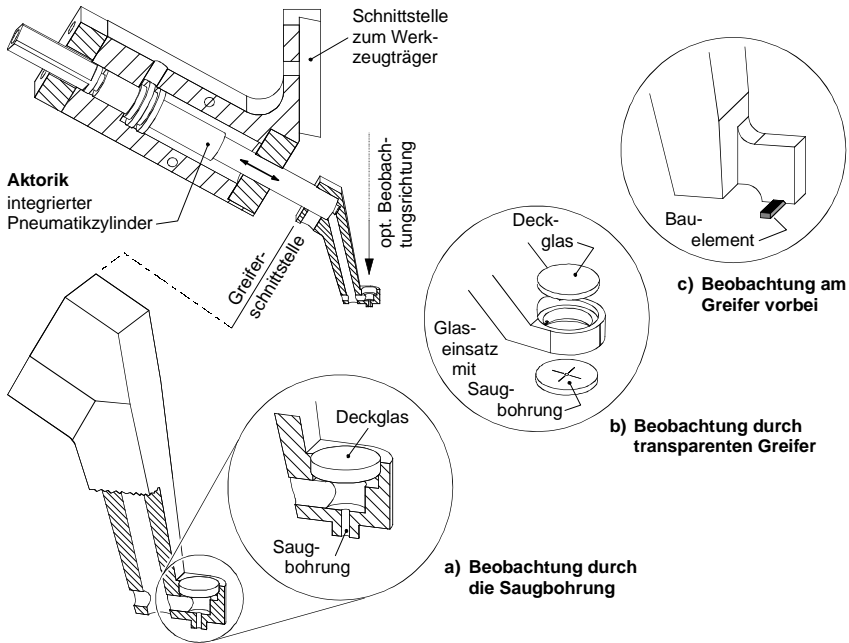


Bild 4.16: Modulare Greifergestaltung - ausgeführte Beispiele

4.5.3 Gestaltung der Fügmodule

Beim Kleben und Löten ist es erforderlich, vor dem Fügevorgang das Verbindungsmedium (Klebstoff oder Lotpaste) aufzutragen. Entsprechend dem in Kap. 1.3 formulierten Ziel der Arbeit sind dafür in erster Linie Verfahren relevant, die eine flexible Prozessführung erlauben. Dazu zählen Stempeln und Dispensen (vgl. Kap. 2.2.4).

Der hohen Präzision von volumengesteuerten Dosiersystemen steht der Nachteil großer Abmessungen des Dispenskopfes gegenüber, da Dosieraktorik und Nadeldispenser eine Einheit bilden. Bei einem Druck-/Zeit-Dispenser dagegen ist das Dosiergerät abgesetzt und über einen Luftschlauch mit dem Dispenskopf, der aus einer Klebstoffkartusche mit Dosiernadel besteht, verbunden. Damit kann der Dispenskopf als kompaktes Modul an einem übergeordneten Werkzeugsystem mitgeführt werden. Die Klebstoffdosierung erfolgt über die Parameter Druck und Zeit, die am Dosiergerät eingestellt werden. Über den Luftschlauch wird die Kartusche für die Dauer der gewählten Dosierzeit mit dem eingestellten Druck beaufschlagt. Dadurch wird ein

Dichtkolben in der Kartusche verdrängt und der Klebstoff durch die Dosiernadel auf das Substrat gedrückt.

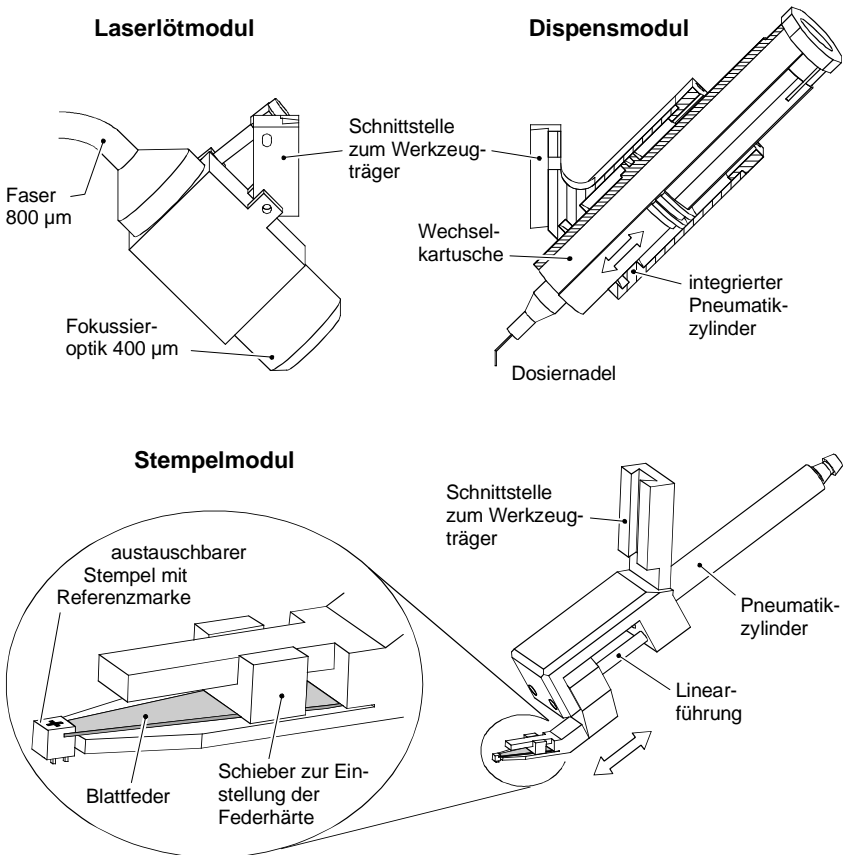


Bild 4.17: Prozessflexibilität durch anwendungsspezifische Fügmodule (ausgeführte Beispiele)

Bild 4.17 zeigt das entwickelte **Dispensmodul**, das von einem Dosiergerät des Typs LOCTITE 97006 mit Druck beaufschlagt wird. Das Modul nimmt eine austauschbare und preiswerte Standardkartusche mit einem Volumen von 3 cm³ auf. Der Dispenser kann, wie die zuvor beschriebenen Greifmodule, über eine Schnittstelle an das übergeordnete Werkzeugsystem angekoppelt werden und ist über eine pneumatische Aktorik in das Sichtfeld der Optik einschiebbar. Damit ist es möglich, die Lage der

Dosiernadel beim Dispensvorgang mittels Bildverarbeitung zu bestimmen und mit der Position des Fügeortes auf dem Substrat abzugleichen. So wird die Genauigkeit des Klebstoffauftrages auch durch einen Wechsel der Dosiernadel nicht beeinflusst⁴⁶.

Es können leicht verfügbare, handelsübliche Dosiernadeln aus Edelstahl mit einem Innendurchmesser von 110 µm und 160 µm verwendet werden. In Versuchen wurde ermittelt, dass damit minimale Dotdurchmesser appliziert werden können, die ca. dem 1,3- bis 1,5-fachen des Nadelinnendurchmessers entsprechen (HÖHN 1999). Bei einem mittleren Dotdurchmesser⁴⁷ von 158 µm ergab sich beispielsweise eine Streuung von $\pm 14,8$ µm, bezogen auf ein Vertrauensintervall von 3σ .

Vorrangig für die Applikation von gefüllten⁴⁸ Klebstoffen, die aufgrund ihres komplexen Fließverhaltens und der Verstopfungsgefahr der Dosiernadel (vgl. Kap. 2.2.4) für das Dispensieren nur bedingt geeignet sind, ist das in Bild 4.17 dargestellte **Stempelmodul** konzipiert.

Der Klebstoff wird über sehr feine, erodierte Spitzen des Stempels auf das Substrat übertragen. Um diese Spitzen beim Aufsetzen auf das Substrat nicht zu überlasten und zu beschädigen, ist der Stempel mittels einer Blattfeder nachgiebig gelagert. Die Nachgiebigkeit kann dabei durch einen Schieber zur Einstellung der wirksamen Federlänge beeinflusst werden. Auch der Stempel wird über einen pneumatischen Aktor und eine Linearführung in das Sichtfeld der Optik gebracht und weist für die Lageerkennung mittels Bildverarbeitung auf seiner Oberseite eine Referenzmarke auf.

Weiterhin zeigt Bild 4.17 ein **Lasermodule** für das sequentielle Einzelpunktlöten. Hierbei wird die Energie eines fasergekoppelten Diodenlasers (30 W, 960 nm) mittels einer Glasfaser und einer Fokussieroptik in die Verbindungsstelle eingekoppelt. Das Modul besteht aus der Fokussieroptik, einer Justagevorrichtung zur Einstellung der Fokusslage und des Einstrahlwinkels sowie der Schnittstelle zum Werkzeugträger. Der Fokussdurchmesser beträgt 400 µm.

Der grundsätzliche Vorteil des selektiven Laserstrahl-Mikrolötens gegenüber konventionellen Verfahren, wie Infrarot-, Heißluft- oder Reflowlötens, besteht in der berühr-

⁴⁶ Die Lage der Dosiernadelspitze stellt eine variable Größe dar, deren Reproduzierbarkeit durch die Toleranzen der Nadel und des Verbindungselementes und durch die Sorgfalt beim Rüstvorgang eingeschränkt wird.

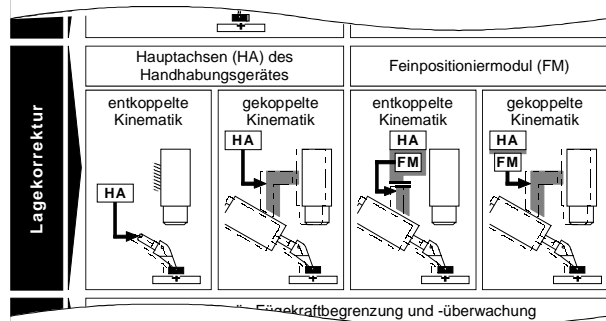
⁴⁷ Die Angaben beziehen sich auf einen lichtaktivierbaren Klebstoff (Loctite 366) mit einer Viskosität von 7000 mPas. Der Klebstoff wurde auf ein Silizium-Substrat aufgetragen.

⁴⁸ Wie in Kap. 2.2.4 erläutert, erreicht man durch die Zugabe von metallischen Füllstoffen (meist Silberpartikel) elektrische und thermische Leitfähigkeit des Klebstoffes.

rungslosen, lokalen und kurzzeitigen Energieeinbringung. Nachteilig ist dagegen die geringe Produktivität dieses sequentiellen Verfahrens.

4.6 Feinpositioniermodul

Sowohl bei der lagegesteuerten als auch bei der lagegeregelten Relativpositionierung (vgl. Kap. 3.2.2) sind gegenüber den absolut positionierenden Verfahren des Standes der Technik nur kleine Korrekturbewegungen innerhalb des



optischen Sichtfeldes zur Kompensation der auftretenden Lagetoleranzen notwendig. Neben der direkten Feinpositionierung des Greifers durch die Hauptachsen eines *Präzisions-Handhabungsgerätes* kann die Lagekorrektur auch - unabhängig vom Handhabungsgerät - von einem zusätzlichen *Feinpositioniermodul* mit geringem Stellbereich, aber hoher Stellgenauigkeit durchgeführt werden.

Als **Präzisions-Handhabungsgeräte** eignen sich die im Stand der Technik (Kap. 2.3) aufgeführten Die-Bonder, Präzisionsroboter und Achssysteme. Diese Geräte haben einen hohen Verbreitungsgrad erlangt und sind daher als Ausgangsbasis für eine rasche Umsetzung der entwickelten Positionierstrategien in industrielle Montagegerätetechnik prädestiniert. Nachteilig sind jedoch die hohen Investitionskosten, die maßgeblich durch die gegenläufigen Parameter Arbeitsraumgröße und Genauigkeit beeinflusst werden. Darüber hinaus gestaltet sich die Feinpositionierung über die Hauptachsen zeitaufwendig, da die für kleine, schnelle Korrekturbewegungen ausschlaggebende Maximalbeschleunigung durch das ungünstige Verhältnis von bewegter Masse zu Antriebsleistung begrenzt wird.

Die unterschiedliche Ausprägung von weiträumigen Nebenbewegungen, die zwischen den verschiedenen Peripherieeinrichtungen und dem Fügeort mit hoher Geschwindigkeit, aber ohne besondere Genauigkeit auszuführen sind, sowie kleinen, präzisen Lagekorrekturbewegungen initiiert das Lösungsprinzip der **Grob-/Feinpositionierung** mit einem kombinierten System, bestehend aus dem Handhabungsgerät und einem **Feinpositioniermodul**. Die Leistungsparameter des Gesamtsys-

tems ergeben sich dann aus der Arbeitsraumgröße und Geschwindigkeit des Handhabungsgerätes und der Genauigkeit des Feinpositioniermoduls. Um die Feinpositionierung im gesamten Arbeitsraum des Handhabungsgerätes ortsflexibel nutzen zu können, ist die Integration des Feinpositioniermoduls in das vom Handhabungsgerät geführte Montagewerkzeug sinnvoll. Entsprechend diesem Prinzip wird das Montagewerkzeug durch das Handhabungsgerät zunächst grob, d.h. innerhalb des Stellbereiches des Feinpositioniermoduls, vorpositioniert. Im zweiten Schritt wird die Lage des Fügeteils mit der Präzision des feinpositionierbaren Werkzeuges relativ zu den Referenzmarken des Substrats korrigiert. Aufgrund der nur geringen bewegten Massen sind schnelle Korrekturbewegungen und kurze Zykluszeiten erreichbar.

Da die Lagekorrektur unabhängig von der Genauigkeit der für die Grobpositionierung eingesetzten Achsen vorgenommen wird, kann ein flexibles und kostengünstiges Standard-Handhabungsgerät, beispielsweise ein Industrieroboter, eingesetzt werden. Dessen großer Arbeitsraum ermöglicht die Integration unterschiedlichster Peripherieeinrichtungen (Zuführ- und Transportsysteme, Wafer Handling, Die Ejector, Chip Flipper, Werkzeugwechseleinrichtung etc.) und eignet sich damit für den Aufbau einer modularen, multifunktionalen Mikromontagezelle mit Kostenvorteilen gegenüber bekannten Präzisionspositioniersystemen. Für zweieinhalbdimensionale Positionierprozesse bietet sich ein Scara-Roboter an. Bei komplexen, räumlichen Montageaufgaben lässt sich das Grob-/Feinpositionierprinzip prinzipiell auch mit einem Sechachsroboter anwenden.

4.6.1 Anforderungen

Beim Entwurf des Feinpositioniermoduls sind die Wechselbeziehungen zwischen der Feinpositionierung und der Grobpositionierung durch das übergeordnete Handhabungsgerät zu berücksichtigen. Ausgangsbasis für die Bestimmung der Anforderungen bildet daher eine Analyse der Genauigkeit der Grobpositionierung. Dazu wurden verschiedene Scara-Roboter (ADEPT 550, BOSCH TURBOSCARA SR6) experimentell untersucht (Bild 4.18).

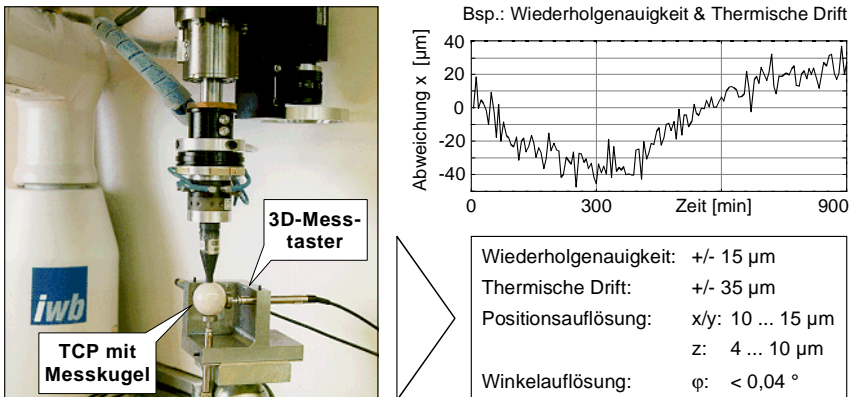


Bild 4.18: Messung der Genauigkeit der Grobpositionierung an einem Scara-Roboter mit hochauflösenden induktiven Messtastern

Entsprechend diesen Untersuchungen sind folgende Anforderungen und Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Der Stellbereich des Feinpositioniermoduls soll in den Koordinaten x und y mindestens 100 µm betragen, um Unsicherheiten bei der Grobpositionierung infolge der begrenzten Wiederholgenauigkeit und der thermischen Drift des Handhabungsgerätes zu kompensieren.
- Überschreitet die Lageabweichung zwischen den Bauteilen den Stellweg des Feinpositioniermoduls, so kann der Roboter mit einer Auflösung von ca. 10 bis 15 µm (gemessen am Tool Center Point - TCP) mittels Bildverarbeitung in den Feinstellbereich nachgeführt werden.
- Die Positionsauflösung der Roboter-z-Achse ist, in Abhängigkeit vom Gerätetyp, auf etwa 4 bis 10 µm begrenzt. Dies schränkt die Durchführung sehr feinfühler Fügebewegungen (z.B. mit Kraftregelung) mit dem Handhabungsgerät ein. Daher soll optional ein weiterer hochauflösender Bewegungsfreiheitsgrad des Feinpositioniermoduls für die Zustellung des Bauteils in der z-Koordinate vorgesehen werden.
- Die Drehachse des Scara-Roboters erreicht eine Winkelauflösung von unterhalb 0,04°. Da diese Auflösung besser als der kleinste mittels Bildverarbeitung mess-

bare Winkel⁴⁹ ($\alpha_{\min} \approx 0,1^\circ$) ist, kann die rotatorische Lagekorrektur mit der Roboterachse durchgeführt und auf die Integration einer Drehachse in das Feinpositioniermodul verzichtet werden.

- ♦ Die Wegauflösung des Feinpositioniermoduls soll im Submikrometerbereich liegen.
- ♦ Das Feinpositioniermodul soll konzentrisch um die Optik herum angeordnet werden können, um eine möglichst kompakte Bauweise der Montagewerkzeuge zu gewährleisten.

4.6.2 Wirkprinzip und Modulgestaltung

Zu den wichtigsten physikalischen Effekten, die zur Erzeugung hochauflösender kurzhubiger Linearbewegungen geeignet sind, zählen der Piezoeffekt, der Memory-Effekt von Formgedächtnislegierungen⁵⁰, Magnetostriktion⁵¹ sowie elektrodynamische (Lorentz-) und elektromagnetische (Maxwell-) Kräfte. Einen guten Überblick geben z.B. BRAND (1996), JENDRITZA (1995) und LÖFFLER (1993).

Ein Vergleich der Eigenschaften dieser Aktorprinzipien ist in Tabelle 4.2 dargestellt. Daraus geht hervor, dass piezoelektrische Aktoren (aufgrund ihres direkten, elektro-mechanischen Wandlungsprinzips) bei geringem Bauvolumen eine nahezu unbegrenzte Wegauflösung und eine hohe Stellgeschwindigkeit erreichen. Diese herausragenden Merkmale prädestinieren die Piezotechnik als Antriebsprinzip für das Feinpositioniermodul.

Physikalische Grundlage ist der inverse piezoelektrische Effekt. Demnach erfährt ein piezoelektrisches Material eine Längendehnung, wenn eine äußere Spannung angelegt wird. Sogenannte *Stapelaktoren* bestehen aus 100 µm dicken, verklebten Sinterkeramikscheiben (PZT – Blei Zirkonat Titanat) und arbeiten mit einer Betriebsspannung von üblicherweise 150 V.

⁴⁹ Die Abschätzung des kleinsten messbaren Winkels eines Bauteils im Kamerasichtfeld erfolgt unter der in Kap. 4.3.1.2 getroffenen Annahme, dass die Lage einer Bauteilkante mittels Bildverarbeitung mit einer Subpixelgenauigkeit von etwa $dy = 1 \mu\text{m}$ bestimmt werden kann. Nimmt man die Länge der Bauteilkante mit $a = 580 \mu\text{m}$ an (Kantenlänge einer Fotodiode, vgl. Kap. 6.1), so folgt für den kleinsten messbaren Winkelversatz $\alpha_{\min} = \arcsin(dy/a) \approx 0,1^\circ$.

⁵⁰ Formgedächtnisaktoren verändern ihre äußere Form unter dem Einfluss thermischer Energie.

⁵¹ Magnetostriktive Aktoren dehnen sich unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes.

	piezoelektrischer Antrieb	Formgedächtnis-Antrieb	magnetostriktiver Antrieb	elektrodynamischer Antrieb	elektromagnetischer Antrieb
Stellweg	○	◐	○	●●	●
Genauigkeit	●●	◐	●●	◐	○
Dynamik	●●	○	●	◐	◐
Bauvolumen	●●	●●	○	◐	◐
Ansteuerung	●●	●	◐	●	◐
Verfügbarkeit	●	◐	○	●	●

●● sehr gut ● gut ◐ mittel ○ mäßig

Tabelle 4.2: Vergleich der Eigenschaften von Aktoren für kurzhubige Linearbewegungen

Hauptnachteil piezoelektrischer Aktoren ist der geringe Stellweg, der durch die maximale Dehnung der Piezokeramik von ca. 0,12 Prozent der Aktorlänge bestimmt wird. Durch eine mechanische Hebelübersetzung kann der Stellweg jedoch bis um den Faktor 10 vergrößert (VOIGT 1999, LAUX 1997) und damit in den für die Feinpositionierung erforderlichen Bereich oberhalb 100 μm gebracht werden. Das Hebelprinzip wurde auch bei dem hier betrachteten Feinpositioniermodul angewendet. Bild 4.19 zeigt schematisch den Aufbau.

Das Feinpositioniermodul besteht aus drei Systemkomponenten:

Die **Systemkomponente Primärtrieb** ist ein Piezo-Stapelaktor, der bei einer Länge von 24 mm einen Primärhub von ca. 29 μm hat.

Die **Systemkomponente Mechanik** dient der spiel- und stick-slip-freien Bewegungswandlung und Wegübersetzung in den für die Feinpositionierung erforderlichen Stellbereich. Die Übersetzung basiert auf einem Parallelogrammprinzip. Das Parallelogramm ist zur Vermeidung von Spiel und Stick-slip-Effekten als strukturelastisches Element aus einem vergüteten Stahl mit Festkörpergelenken A, B, C und D (vgl. Bild 4.19) ausgeführt. Mit dieser Anordnung wird der Primärhub des Piezoelementes um den Faktor 7 übersetzt, wodurch ein Stellweg von ca. 200 μm erreicht wird. Durch die Kopplung mehrerer eindimensionaler Übersetzungsmodule lassen

sich bis zu drei translatorische Freiheitsgrade $x/y/z$ in monolithischer Bauweise realisieren. Dieses Aufbauprinzip bietet bei einem sehr geringen Bauvolumen die Möglichkeit, das in Kap. 4.3 beschriebene, unidirektionale Optikmodul zur Beobachtung des Montageprozesses zentrisch durch das Feinpositioniermodul hindurchzuführen.

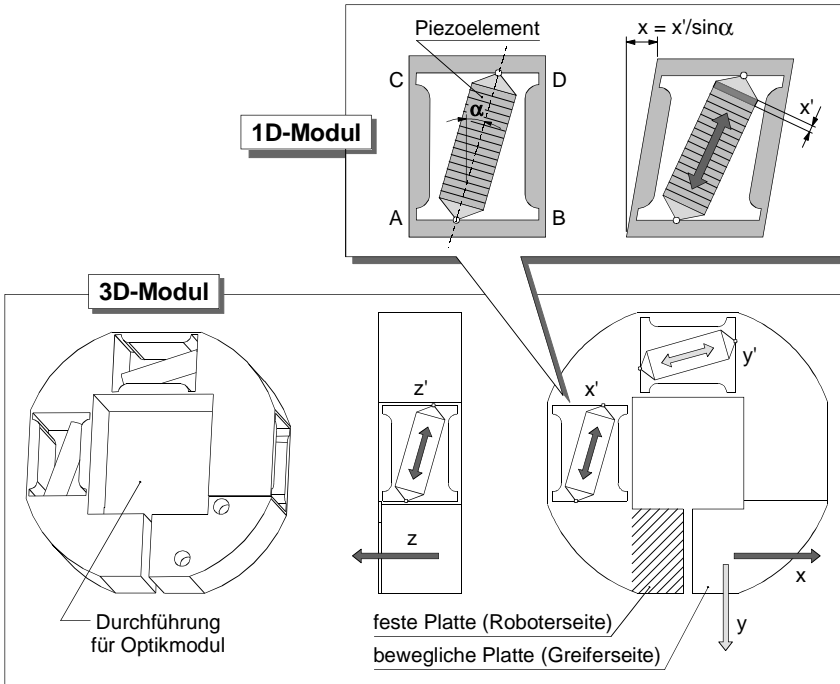


Bild 4.19: Schematischer Aufbau des piezoelektrischen Feinpositioniermoduls

Die **Systemkomponente Elektronik & Sensorik** beinhaltet Steuer- und Regelfunktionen. Der Piezoantrieb wird mittels eines 3-Kanal-Spannungsverstärkers im Bereich von -10 bis 150 Volt angesteuert. Für die laterale Feinpositionierung in der x - und y -Richtung wird die Nullstellung des Antriebs bei 70 Volt (Stellbereich $\pm 100 \mu\text{m}$) gewählt. Um ein Verrutschen des Bauteils am Greifer aufgrund zu hoher Beschleunigungen des Antriebs zu vermeiden, wird die Spannung nicht als Sprung, sondern in langsam ansteigenden Spannungsinkrementen beaufschlagt (Piezo-Stepper-Betrieb).

Das Positionierverhalten von Piezoaktoren ist durch eine Hysteresekurve, d.h. eine nichtlineare Abhängigkeit der Auslenkung von der Steuerspannung, geprägt. Aufgrund dieser Hysterese ist der Absolutwert der Dehnung des Piezoelementes nur ungenau bekannt, wodurch die (absolute) Positioniergenauigkeit eines unregulierten Antriebs auf ca. 10 Prozent des Stellweges (20 μm) beschränkt wird. Unabhängig von der Hysterese zeigt der Piezoeffekt als Festkörpereffekt eine sehr hohe Wegauflösung. Diese wird im Wesentlichen durch das Rauschverhalten und die Restwelligkeit der Ansteuerspannung begrenzt und liegt bei dem verwendeten Spannungsverstärker bei ca. 10 nm.

Bei der *lagegeregelten Relativpositionierung mittels Bildverarbeitung* (vgl. S. 37) wirkt sich die Hysterese nicht nachteilig aus, da die Ist-Position nach jedem Feinkorrekturschritt extern durch das Vision-System gemessen und rückgeführt wird. Der Piezoantrieb wird also in einem übergeordneten, geschlossenen Regelkreis mit Bildverarbeitung (closed loop by vision) betrieben, der eine Ausregelung hystereseebedingter Positionierungenauigkeiten ermöglicht. Entscheidend für die Genauigkeit der Positionierung ist die Wegauflösung des Antriebs.

Die Strategien für die *gesteuerte Relativpositionierung mittels Bildverarbeitung* (vgl. S. 37) erfordern dagegen eine hohe absolute Genauigkeit der Feinpositionierung, da die tatsächlich erreichte Endposition nicht mehr extern durch das Vision-System kontrolliert wird. Der Antrieb muss daher mit einem internen Wegmesssystem zur Erfassung der Ist-Position ausgestattet werden. Zum Einsatz kommen Dehnungsmessstreifen (DMS), die auf die Parallelogrammstruktur appliziert sind (Bild 4.20). Damit lassen sich in einem internen Lageregelkreis (inner loop) die Hysterese kompensieren und eine hohe Positioniergenauigkeit des Antriebs erreichen. Hierbei wird der durch das Bildverarbeitungssystem ermittelte Lagesollwert über eine serielle Schnittstelle am Spannungsverstärker vorgegeben. Die Regelelektronik des Verstärkers reagiert auf die mit den Dehnungsmessstreifen gemessenen Positionsänderungen und regelt entsprechend dem vorgegebenen Sollwert nach.

Für das integrierte DMS-Wegmesssystem und die interne Lageregelung fallen Mehrkosten von ca. 36 Prozent gegenüber dem unregulierten Piezoantrieb an.

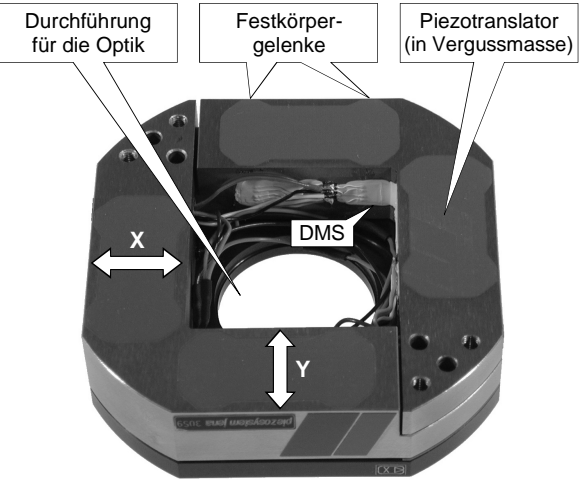


Bild 4.20: Piezo-Finpositioniermodul mit applizierten Dehnungsmessstreifen (DMS)

Tabelle 4.3 fasst die wichtigsten Leistungsmerkmale des Piezoantriebs zusammen.

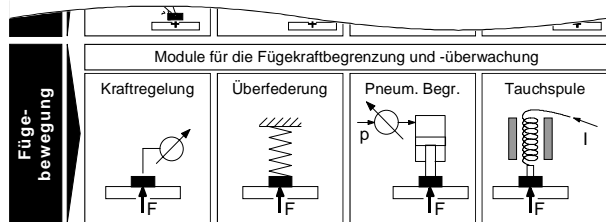
Piezo-Finpositioniermodul

Freiheitsgrade	x/y/z	
Stellweg der Piezoelemente	28,8 μm	
Übersetzungsverhältnis	1 : 7	
Stellbereich des Antriebs	200 μm	
Hysterese	ca. 10% des Stellweges	
Absolute Positioniergenauigkeit	Ungeregelt:	ca. 20 μm
	Geregelt mit DMS:	0,4 μm
Wiederholgenauigkeit	< 1 μm	
Wegauflösung	10 nm	

Tabelle 4.3: Charakteristische Kenndaten des Piezo-Finpositioniermoduls

4.7 Module für die Fügekraftbegrenzung und -überwachung

Der letzte Ablaufschritt des Positionierprozesses ist die vom Handhabungsgerät oder Feinpositioniermodul durchgeführte Fügebewegung in der z-Koordinate,



bei der das Bauteil in Kontakt mit dem Substrat tritt. Die zuverlässige Begrenzung und Dosierung der dabei auf die Bauteile einwirkenden Kräfte ist einerseits für den Schutz empfindlicher Strukturen vor Beschädigungen und andererseits für die Gewährleistung der Montagequalität unerlässlich.

4.7.1 Anforderungen

Mit reduzierten Bauteilabmessungen werden auch die zur Verfügung stehenden Kontaktflächen kleiner. Dies führt zu einer erheblichen Zunahme der Flächenpressung beim Fügevorgang. Eine allgemein gültige Angabe der maximal zulässigen Bauteilbelastung ist nicht sinnvoll möglich, da diese neben den Kontaktbedingungen durch Material und Struktur der Bauteile limitiert wird. Daher werden zwei Empfindlichkeitsstufen unterschieden:

- ♦ Bei Bauelementen der Mikrosystemtechnik mit sehr kleinen Abmessungen ($< 200 \mu\text{m}$), zerbrechlicher Struktur (z.B. dünne Ätzquerschnitte oder gedünnte Chips aus spröden Materialien, wie GaAs) oder empfindlichen Funktionsoberflächen (Strukturierung, Beschichtung) ist eine hochfeine Dosierung der Fügekraft notwendig, die nur durch einen Regelkreis gewährleistet werden kann. Der Bereich der minimal dosierbaren Kräfte wird, basierend auf den Arbeiten von HANKES (1998), HESSELBACH & PITTSCHELLIS (1995) und MA (1999), zwischen 5 mN und 50 mN angesetzt. Neben der Erfassung veränderlicher Kräfte (Kraftanstieg beim Aufsetzen des Bauelementes auf das Substrat) müssen auch statische Kräfte zuverlässig kontrolliert werden können, um z.B. beim Aushärten eines Klebers für eine Zeit eine konstante Anpresskraft aufzubringen⁵².

⁵² Bei Klebprozessen können durch das Abbinden des Klebers Spannungen in der Klebefuge entstehen, die (bei vernachlässigbarem Eigengewicht der mikroskopischen Montageobjekte) zu einem Wegdriften des Bauelementes führen können. Ein Ansatz, um diesem Effekt entgegen-

- ♦ Bauelemente der klassischen Halbleitertechnik mit kleinen Abmessungen bis herunter zu 0,2 mm Kantenlänge, aber vergleichsweise fester Struktur weisen dagegen eine geringere Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Belastungen auf. Die Fügekräfte sind hier in einem Bereich von etwa 0,3 N bis 2 N zu begrenzen, wie er für Die-Bonder typisch ist (vgl. S. 23).

4.7.2 Wirkprinzipien und Modulgestaltung

Um die oben geforderten, unterschiedlichen Empfindlichkeitsstufen bei angemessenen Kosten abzudecken, erscheint eine Gliederung der Wirkprinzipien in passive (ohne Sensorunterstützung) und aktive Verfahren (mit Sensorunterstützung) für die Fugekraftbegrenzung sinnvoll (Bild 4.21).

Die **passiven Verfahren** basieren auf einer in der z-Koordinate nachgiebigen Lagerung des Greifers. Sie genügen den Anforderungen bei der Montage von miniaturisierten Bauelementen mit in sich fester Struktur. Durch die Vermeidung zusätzlicher Sensorik sind sehr kostengünstige Lösungen realisierbar.

Im einfachsten Fall kann die Nachgiebigkeit durch eine mechanische Feder realisiert werden, wodurch die Fugekraft beim Aufsetzen des Bauteils aber nur innerhalb eines bestimmten Toleranzbandes, das vom Federweg und somit von den auszugleichenden Toleranzen in der Fugerichtung abhängt, begrenzt wird. Dieses einfache Prinzip eignet sich aufgrund seiner guten Miniaturisierbarkeit vor allem zur Überfederung einzelner Greifer oder Fügewerkzeuge und wird beispielsweise bei dem in Bild 4.17 dargestellten Stempel als Überlastschutz eingesetzt.

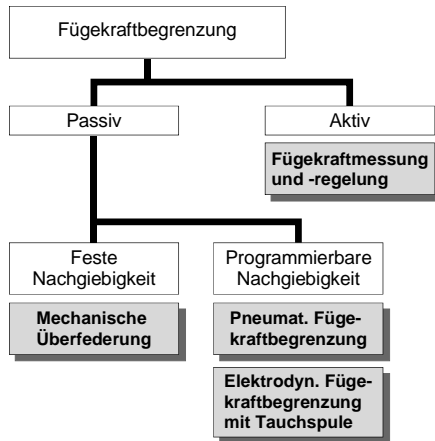


Bild 4.21: Verfahren für die Fugekraftbegrenzung

genzuwirken besteht darin, sehr kleine Bauelemente während des Polymerisierungsvorgangs durch den Greifer unter kontinuierlicher Kraftüberwachung niederzuhalten. Weiterhin ist durch die Regelung der Fugekraft die Schichtdicke der Klebefuge und damit die Genauigkeit der Montage beeinflussbar.

Eine über den Fügeweg annähernd konstante und anwendungsspezifisch programmierbare Fügekraft kann dagegen durch eine elektrodynamische oder pneumatische Kraftbegrenzung erreicht werden.

Die elektrodynamische Fügekraftbegrenzung wird bei Die-Bondern (vgl. Kap. 2.3.2) durch ein Tauchspulensystem realisiert. Die Fügekräfte sind, entsprechend der Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld, dem Spulenstrom proportional einstellbar. Dieses Prinzip lässt sich jedoch aufgrund des Bauraums und Gewichtes des Tauchspulensystems nur schwer in kompakte Mikromontagewerkzeuge integrieren und soll daher nicht weiter betrachtet werden.

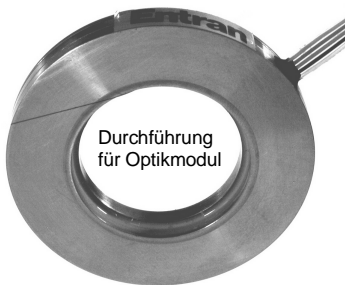
Das pneumatische Wirkprinzip vermeidet diese Nachteile. Die Kraftbegrenzung erfolgt über einen mit der zulässigen Fügekraft korrespondierenden und variabel einstellbaren Druck, der auf den Greifer wirkt. Die Ausarbeitung dieses Ansatzes steht in Wechselbeziehung zu anderen Werkzeugkomponenten und wird daher später, im Rahmen der Synthese der Einzelmodule zu Werkzeugsystemen, ausführlicher dargestellt.

Beim Fügen sehr empfindlicher, mikrosystemtechnischer Bauelemente muss die kostengünstige passive Fügekraftbegrenzung durch eine **aktive Fügekraftmessung und -regelung** ersetzt werden. Durch einen Fügekraftregelkreis, bestehend aus einem hochauflösenden Kraftsensor und der z-Achse des Piezo-Feinpositioniermoduls, lässt sich die Fügekraft kontinuierlich erfassen und die Fügebewegung positionsunabhängig beim Erreichen der geforderten bzw. zulässigen Kraftgrenze beenden. Die Kraftgrenze muss dabei entsprechend dem jeweiligen Anwendungsfall einstellbar sein.

Kraftsensoren basieren auf der Messung einer elastischen Verformung, die ein Körper bei Einleitung einer Kraft erfährt. Die Verformung kann kapazitiv, induktiv, optisch, piezoelektrisch oder mittels Dehnungsmessstreifen erfasst werden. Dehnungsmessstreifen (DMS) besitzen als Messelemente einige Vorteile, deren Nutzung zu einer hochentwickelten Kraftsensortechnologie geführt hat (WEILER 1993). Sie benötigen wenig Platz für ihre Installation und ihre Rückwirkung auf die Federsteifigkeit des Verformungskörpers ist vernachlässigbar klein. Ihre geringe Masse prädestiniert sie für die dynamische Messung des Kraftanstiegs beim Aufsetzen des Bauteils auf das Substrat. Andererseits können, im Gegensatz zu den ebenfalls weit verbreiteten piezoelektrischen Aufnehmern, auch statische und quasistatische Kräfte beim Anpressen der Bauelemente mit hoher Nullpunkt Konstanz und Linearität erfasst werden.

Zur Erzielung eines möglichst kurzen Kraftflusses und damit einer hohen Empfindlichkeit verfolgen einige Arbeiten den Ansatz, die DMS direkt auf den Greifer zu applizieren (HANKES 1998, PITTSCHELLIS 1998). Bei dem hier betrachteten Modulkonzept, das den Greifer als bauteilspezifisch adaptierbares und austauschbares Modul (vgl. Kap. 4.5.2) definiert, wäre damit allerdings eine Vervielfachung der Sensorkosten mit der Zahl der Greifervarianten verbunden. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Flexibilität wird daher der Integration eines Kraftsensormoduls in den Werkzeugträger der Vorzug gegeben.

Das Kraftsensormodul wurde von der Fa. ENTRAN nach Vorgaben bezüglich geometrischer Einbauverhältnisse gebaut (Bild 4.22). Es handelt sich um einen sehr kompakten und hochauflösenden Ringkraftaufnehmer, durch den das Optikmodul zentrisch hindurchgeführt werden kann.



Verformungselement	Ringmembran mit Halbleiter-DMS
Außen-/Innendurchmesser	41 / 22 mm
Bauhöhe	5,1 mm
Messbereich	10 N
Überlastbarkeit	20 N
Empfindlichkeit	8,47 mV/N
integrierte Temperaturkompensation	

Bild 4.22: Kenndaten des Kraftsensormoduls für die aktive Fügekraftüberwachung

5 Werkzeug- und Systemsynthese

Im vorangehenden Kapitel wurden den Elementarfunktionen der Positionierstrategien flexibel konfigurierbare Funktionsmodule zugeordnet, die in der Übersicht nach Bild 5.1 zusammenfassend dargestellt sind.

Anhand von ausgewählten Realisierungsbeispielen soll nun in diesem Abschnitt die Synthese der Module zu Werkzeugen und Systemen für die Mikromontage demonstriert werden. Einen Schwerpunkt nimmt dabei die konstruktive Ausarbeitung und prototypenhafte Realisierung ein.

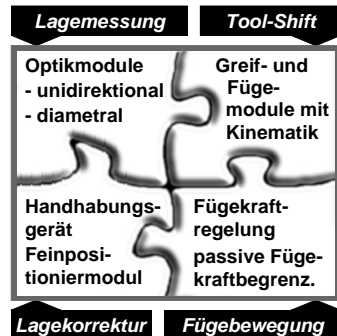


Bild 5.1: Funktionsmodule

5.1 Übersicht

Die Werkzeug- und Systemsynthese erfolgt durch Kombination der Funktionsmodule aus der Modulematrix (Bild 5.2). Dabei wird der einzuschlagende Pfad, also die Entscheidung, welche Module miteinander zu kombinieren sind, aus der anwendungsspezifisch zur Umsetzung bestimmten Positionierstrategie abgeleitet. Dieses Vorgehen kann durch Einzeichnen der zu den jeweiligen Positionierstrategien korrespondierenden Modulkombinationen in Bild 5.2 veranschaulicht werden.

Für die prototypenhafte Realisierung werden exemplarisch vier Modulkombinationen ausgewählt, die in Bild 5.2 mit Verweis auf die entsprechenden Umsetzungskapitel skizziert sind. Dabei werden zwei grundlegende Richtungen eingeschlagen: 1.) die Konfiguration sensorgeführter Roboterwerkzeuge und 2.) die Realisierung eines Positioniersystems auf der Basis der Strahlteileroptik.

- 1.) Die Roboterwerkzeuge ergeben sich durch die Kombination einer werkzeugabhängigen Optik mit unterschiedlichen Modulen für die Lagekorrektur. Die Beispiele wurden so gewählt, dass sie die Umsetzung der entwickelten Strategien für die Relativpositionierung anhand verschiedener Ausbaustufen der Werkzeuge verdeutlichen und die betrachteten Montageszenarien (vgl. Kap. 3.3.1) abdecken.

Endpoint sensing: In Kap. 5.2 werden in einer ersten Ausbaustufe zunächst

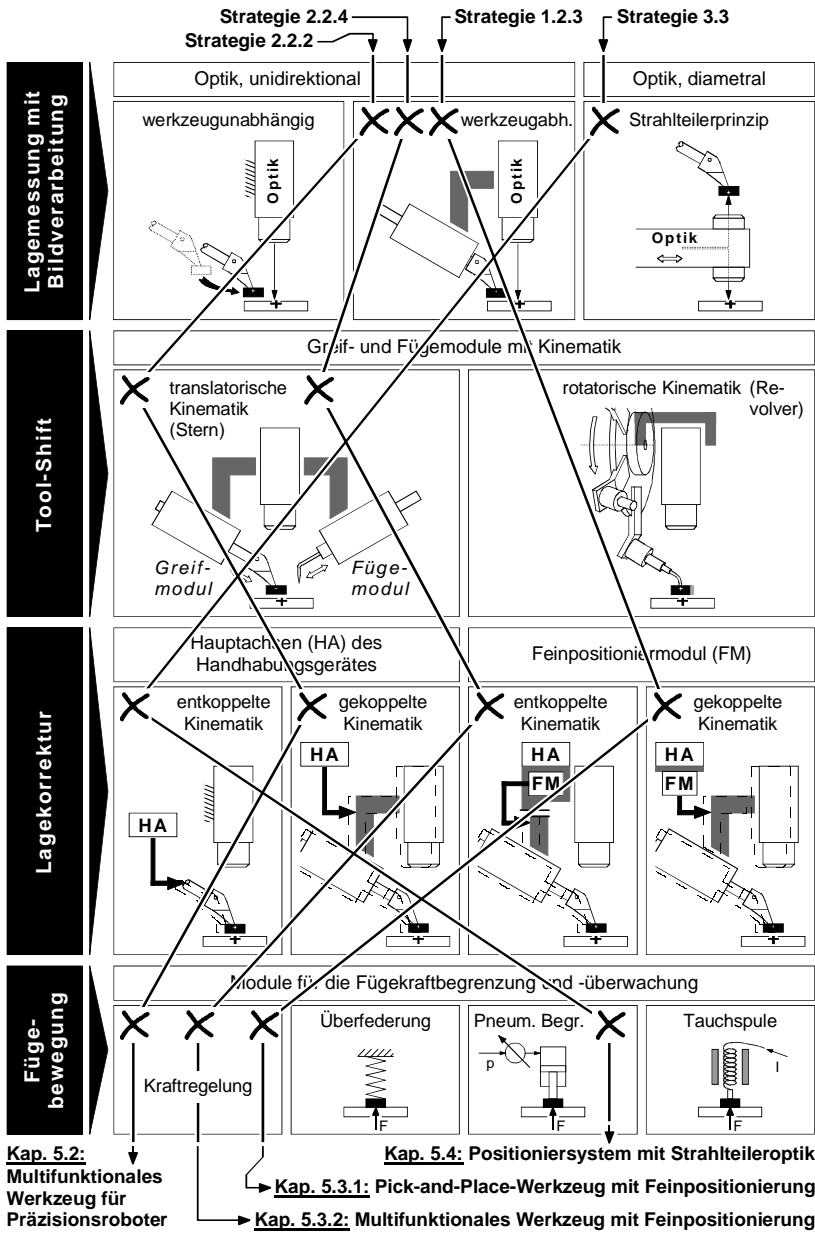


Bild 5.2: Zur Umsetzung beispielhaft ausgewählte Modulkombinationen

nur die sensorischen Funktionen in das Montagewerkzeug integriert, während die Lagekorrektur durch die Hauptachsen des Handhabungsgerätes erfolgt. Das resultierende Werkzeug versetzt den Anwender in die Lage, die Strategien für die bildverarbeitungsbasierte Relativpositionierung auf gängige Handhabungsgeräte der Halbleiter- und Elektronikproduktion zu übertragen und damit zu schnell umsetzbaren Automatisierungslösungen für die Mikromontage zu gelangen.

Endpoint sensing & actuating: In einer weiteren Ausbaustufe, beschrieben in Kap. 5.3, wird schließlich in letzter Konsequenz auch die Aktorik für die Lagekorrektur in das Montagewerkzeug und damit unmittelbar an den Prozessort verlagert. Dies führt zu Roboterwerkzeugen mit integriertem Feinpositioniermodul für die kosteneffiziente Durchführung hochgenauer und schneller Mikromontageprozesse mit einem Standard-Industrieroboter. Dabei wird das Hauptaugenmerk bei der Konfiguration der Werkzeuge in Kap. 5.3.1 auf die Durchführung schneller Pick-and-Place-Prozesse und in Kap. 5.3.2 auf eine flexible Prozessführung gelegt.

- 2.) Die Konfiguration von Positioniersystemen auf der Basis der diametral abbildenden Strahlteileroptik ist Gegenstand des Kapitels 5.4. Nach der Diskussion unterschiedlicher Systemkonzepte wird ein Laboraufbau vorgestellt, der die Lageerkennung mittels Strahlteileroptik anhand realer Bildaufnahmen verdeutlicht.

5.2 Werkzeug für die Mikromontage mit Präzisionsroboter

In diesem ersten Realisierungsbeispiel soll ein multifunktionales Roboterwerkzeug entwickelt werden, das durch prozessnah integrierte sensorische Funktionen die Relativpositionierung über die Hauptachsen des Handhabungsgerätes unterstützt. Das Werkzeug soll damit in bestehende Präzisionspositioniersysteme (vgl. Kap. 2.3) integrierbar sein und deren Einsatzmöglichkeiten hinsichtlich einer flexiblen Prozessführung für die Montage hybrider Mikrosysteme erweitern. Das Aufbauen auf bewährte Handhabungsgerätetechnik erscheint besonders im Hinblick auf eine rasche Umsetzung der entwickelten Positionierstrategien in industrielle Mikromontageapplikationen zielführend. Durch die relative Positionierung werden die Genauigkeitsanforderungen an das Handhabungsgerät und somit der notwendige Investitionsaufwand reduziert (vgl. Kap. 3.2.2).

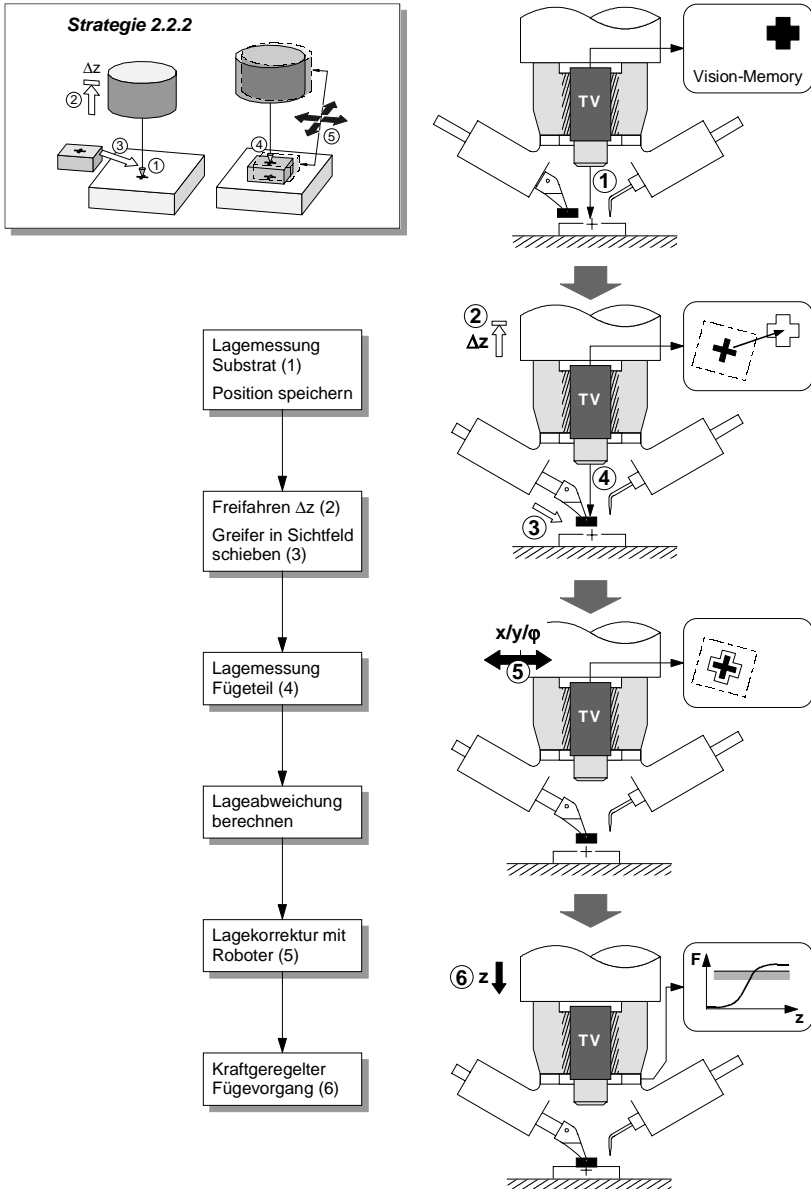


Bild 5.3: Umsetzung der Positionierstrategie 2.2.2 (lagegesteuerte Relativpositionierung)

Der Werkzeugentwurf soll in diesem Beispiel die Problematik verdeckter Substratstrukturen (vgl. S. 42) berücksichtigen. Er ist daher für das Montageszenario 2. Art durchzuführen.

5.2.1 Werkzeugkonfiguration

Bei der Feinpositionierung des Werkzeuges mit integrierter Kamera über die Hauptachsen des Handhabungsgerätes liegt eine gekoppelte Kinematik⁵³ vor. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingung kann die Funktionsweise des Werkzeuges prinzipiell aus den beiden Positionierstrategien 2.2.2 (lagegesteuerte Relativpositionierung) und 2.2.3 (lagegeregelter Relativpositionierung) abgeleitet werden, vgl. Bild 3.10. Dabei ist zu beachten, dass das Werkzeug zur flexiblen Integration in bestehende Präzisionspositioniersysteme möglichst kompakt ausgeführt werden soll. Hierfür eignet sich bevorzugt die lagegesteuerte Positionierstrategie (2.2.2), deren Umsetzung in ein korrespondierendes Werkzeugkonzept in Bild 5.3 dargestellt ist. Sie begünstigt einen kompakten Werkzeugaufbau dadurch, dass Endlagenfehler des Greifers nach dem Einschieben in das Sichtfeld mittels Bildverarbeitung erfasst und bei der Positionierung berücksichtigt werden können. Diese Fehlerkompensation erlaubt den Einsatz eines einfach aufgebauten Kinematikmoduls, das aufgrund seiner geringen Komplexität nur wenig Bauraum beansprucht.

5.2.2 Prototypenhafte Realisierung

Bild 5.4 zeigt die konstruktive Gestaltung des Roboterwerkzeuges. Es besteht im Wesentlichen aus dem Werkzeugkopf, der das Optikmodul und optional das Kraftsensormodul für die Fügekraftüberwachung enthält, sowie verschiedenen anwendungsspezifischen Greif- und Fügemodulen.

Das Optikmodul (vgl. Bild 4.8) wird zentrisch in das Werkzeug integriert, indem es mittels einer Spannhülse axial in dem hohlgebohrten Werkzeugträger geklemmt wird.

Als Rotationsantrieb dient beim Prototypen die vierte Achse eines kartesischen Roboters (vgl. Bild 5.5), die ihr Drehmoment über einen Zahnriemen auf den Werkzeugkopf überträgt. Letzterer wird in einer vorspannbaren Gleitlagerung mit Lagerschalen

⁵³ Entsprechend den Positionierstrategien ist zwischen einer gekoppelten Kinematik, bei der die Optik synchron mit der Lagekorrekturbewegung mitgeführt wird, und einer entkoppelten Kinematik, bei der das Fügeteil unabhängig von der bezüglich des Substrates feststehenden Kamera manipuliert wird, zu unterscheiden (vgl. Bild 3.8)

aus Teflon spielfrei geführt. Die Drehachse des Werkzeuges ist mit der optischen Achse des Messobjektives identisch. Damit ist gewährleistet, dass sich das Substrat bei einer rotatorischen Lagekorrektur nicht aus dem Kamerasichtfeld bewegt.

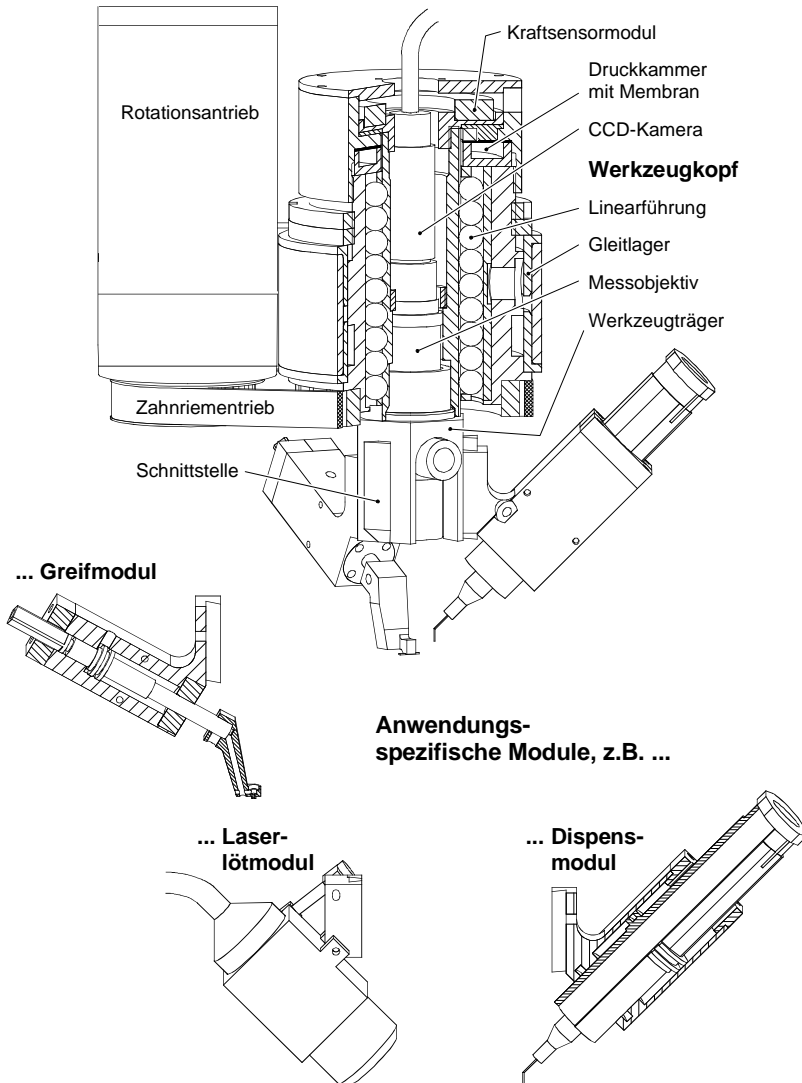


Bild 5.4: Konstruktiver Aufbau des Roboterwerkzeuges

Durch anwendungsspezifisch einsetzbare Greif- und Fügemodule (vgl. Kap. 4.5) kann das Werkzeug flexibel an unterschiedliche Montageaufgaben angepasst werden. Beim realisierten Prototypen stehen z.B.

- ◆ verschiedene bauteilspezifische Sauggreifer,
- ◆ das Dispensmodul für den Klebstoff- oder Lotpastenauftrag,
- ◆ eine Lichtleitfaser zum Aushärten lichtaktivierbarer Klebstoffe mittels UV-Strahlung
- ◆ und das Lasermodule für Weichlötprozesse

zur Verfügung.

Greifer und Dispenser sind jeweils pneumatisch in das Sichtfeld der Optik einsehbar. So lassen sich alle Teilprozesse der Montage, wie Pick-up, Positionieren, Klebstoffauftrag und Lasern, konsequent unter direkter optischer Kontrolle des Bildverarbeitungssystems durchführen.

Die einzelnen Module werden über mechanische Schnittstellen an den Werkzeugträger angekoppelt. Die Gestaltung der Schnittstellen ermöglicht es, die Module feinfühlig auf die Fokusebene der Messoptik zu justieren und in dieser Lage zu fixieren. Um Nebenzeiten durch Werkzeugwechsel zu reduzieren, können bis zu drei Module simultan mitgeführt werden. Der Austausch der Module erfolgt beim realisierten Prototypen noch manuell, ist aber prinzipiell automatisierbar. Die Genauigkeit der Schnittstelle hat bei der gewählten Positionierstrategie keinen Einfluss auf die Montagegenauigkeit, weil die Endlage des aktuell im optischen Sichtfeld befindlichen Moduls (Greiferspitze, Dispensernadel) beim Positionierprozess mittels der integrierten Bildverarbeitung automatisch eingemessen wird (Schritt ④ in Bild 5.3).

Für sehr anspruchsvolle Montageprozesse, die eine aktive Fügekraftmessung und -überwachung erfordern (vgl. Kap. 4.7), ist der Werkzeugkopf mit dem Kraftsensormodul (vgl. Bild 4.22) ausrüstbar. Die Krafteinleitung erfolgt lotrecht und ohne Querkräfte über den Greifer und den Werkzeugträger auf den Sensor. Um die Kräfte annähernd reibungs- und stick-slip-frei zu übertragen, wird der Werkzeugträger spielfrei und verdrehsicher in einer Präzisions-Kugelumlaufbuchse linear geführt. Zur Vermeidung von Fugenelastizitäten, die zu einer Verfälschung der Messung führen, wird der Kraftsensor durch ein pneumatisches System vorgespannt. Dieses besteht aus einer Druckkammer und einer Kautschuk-Latex-Membran. Bei Beaufschlagung der Kammer mit Druckluft wölbt sich die Membran und drückt über eine bewegliche Zwischenplatte auf die Sensoraufnahme am oberen Ende des Werkzeugträgers. Das

Prinzip gewährleistet eine feinfühlig einstellbare, variable und wegunabhängige Vorspannung des Sensors.

Alternativ zur aktiven Fügekraftüberwachung mittels Kraftsensormodul kann das pneumatische System zur passiven Begrenzung der Fügekraft (vgl. Kap. 4.7.2) eingesetzt werden. Damit steht für weniger sensible Fügeprozesse eine kostengünstigere Ausbaustufe des Werkzeuges ohne Kraftsensor zur Verfügung, die für viele Montageaufgaben hinreichend ist. Ohne das Kraftsensormodul ermöglicht die Kugelumlauführung eine lineare Bewegung des Werkzeugträgers bis zu 3 mm für den Ausgleich von Höhentoleranzen in der Fügerichtung. Druckkammer und Membran dienen nun dazu, den Werkzeugträger anzuheben, um dessen Gewichtskraft zu kompensieren. Auf diese Weise kann die Fügekraft als Differenz aus Gewichts- und Druckkraft über den pneumatischen Druck bis ca. 4 N eingestellt und bei Verwendung eines Servoventils variabel und wegunabhängig programmiert werden.

Bild 5.5 zeigt das entwickelte Prototypenwerkzeug mit zwei Sauggreifern und dem Dispensmodul, das in einer Versuchsanlage für die Montage von Laserdiodenbarren (REINHART U.A. 2000) beispielhaft von einem vierachsigen, kartesischen Roboter geführt wird. Der Roboter weist in einem Arbeitsbereich von 150 x 150 x 75 mm eine Achsauflösung von 4,7 μm und eine (experimentell ermittelte) Wiederholgenauigkeit von $\pm 1,9 \mu\text{m}$ (3σ) auf. Die Baugröße des Werkzeugsystems beträgt 65 mm im Durchmesser und 140 mm in der Höhe (incl. Greifer bzw. Dispenser).

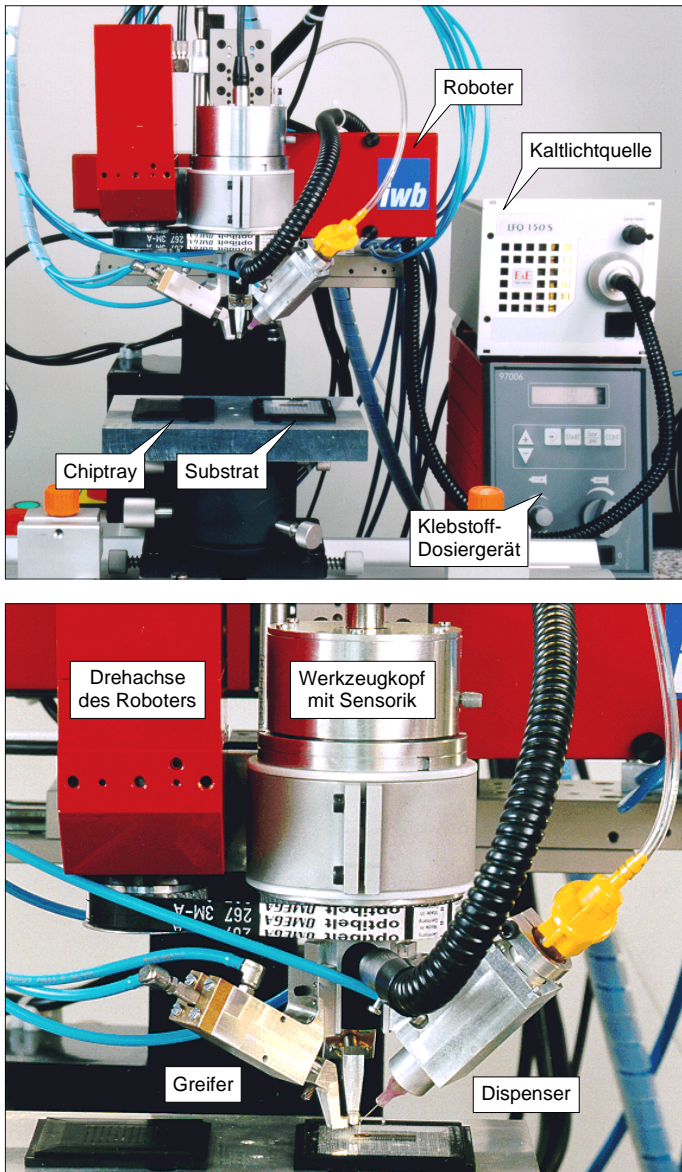


Bild 5.5: Versuchsanlage mit Prototypenwerkzeug

5.3 Feinpositionierbare Werkzeuge für die Mikromontage mit Standardroboter

In den beiden folgenden Realisierungsbeispielen wird die Funktionalität der Roboterwerkzeuge um das Modul für die Feinpositionierung erweitert. Damit können sehr kurze Positions- und Kraftregelkreise aufgebaut werden, die eine online-Messung und -korrektur der Lage und Fügkraft direkt am Endeffektor ermöglichen. Da die feinpositionierbaren Werkzeuge von einem Standard-Industrieroboter oder einem einfachen Achssystem geführt werden können (vgl. Kap. 4.6), lassen sich die Investitionskosten des Gesamtsystems weiter reduzieren.

5.3.1 Pick-and-Place-Werkzeug

Das Prinzip der Grob-/Feinpositionierung soll zunächst am Beispiel eines Pick-and-Place-Werkzeuges für das Montageszenario 1. Art demonstriert werden. Der geplante Einsatz des Werkzeugs für schnelle Pick-and-Place-Prozesse erfordert eine Minimierung der Zykluszeit. Dies soll mit einem möglichst kostengünstigen Werkzeugaufbau erreicht werden.

5.3.1.1 Werkzeugkonfiguration

Unter Berücksichtigung der o.g. exemplarischen Anforderungen wird aus den Positionierstrategien für das Montageszenario 1. Art (vgl. Bild 3.9) die Strategie 1.2.3 ausgewählt. Ihre Umsetzung in das korrespondierende Werkzeugkonzept verdeutlicht Bild 5.6. Sie eignet sich einerseits für schnelle Positionierprozesse, da sie eine Lokalisierung des gegriffenen Fügeteils bereits während der Zuführbewegung zum Fügeort (on fly) ermöglicht. Dadurch lassen sich Mess- und Nebenzeiten parallelisieren, was sich günstig auf die erzielbaren Zykluszeiten auswirkt. Andererseits bietet sie die Möglichkeit, die Relativpositionierung im lagegeregelten Modus mit Bildverarbeitung durchzuführen, um eine hohe - nur von der Auflösung des Feinpositioniermoduls abhängige - Genauigkeit der Lagekorrektur zu erreichen. Der Piezoantrieb kann daher, im Sinne geringer Werkzeugkosten, sehr einfach, d.h. ohne integriertes Wegmesssystem, ausgeführt werden (vgl. Kap. 4.6.2).

Weiterhin lässt sich aus der Positionierstrategie die Festlegung des Optikmoduls im Werkzeugsystem ableiten. Da die gewählte Strategie eine gekoppelte Kinematik (vgl. Bild 3.8) voraussetzt, ist die Optik fest mit der bewegten Plattform des Feinpositioniermoduls zu verbinden.

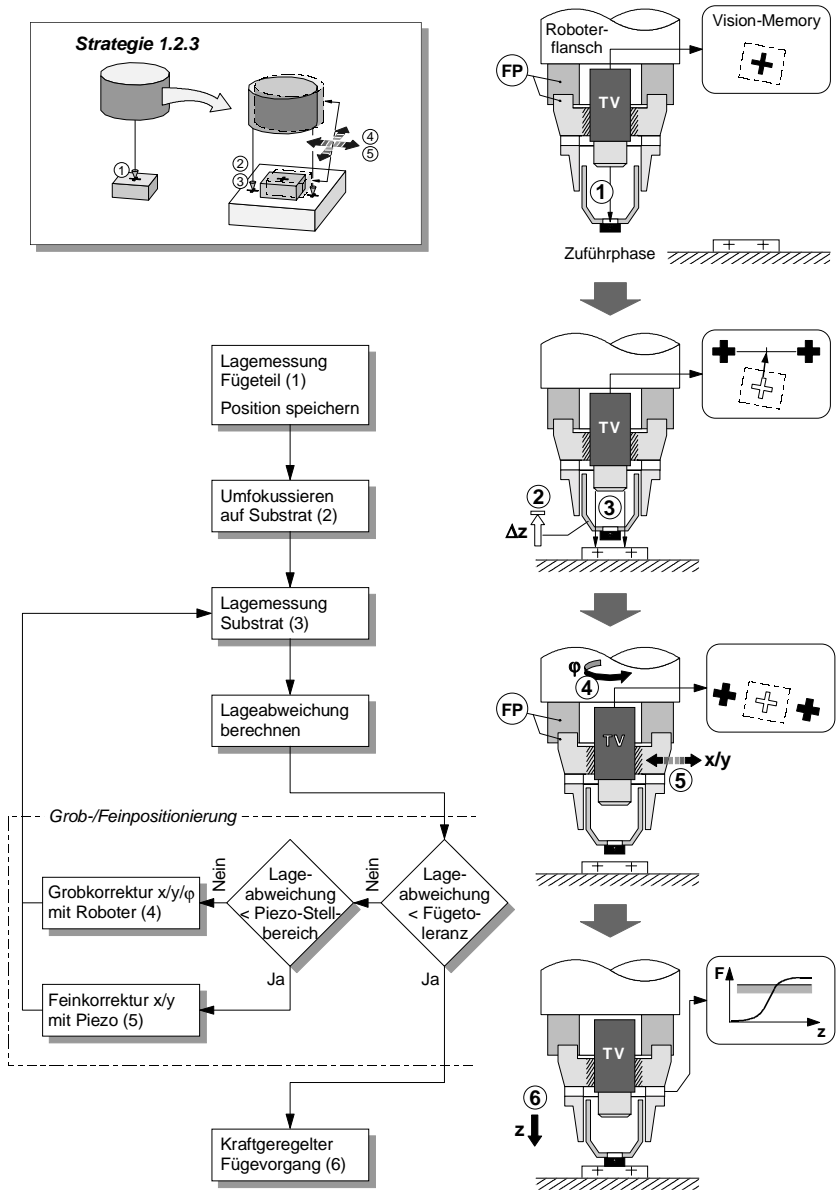


Bild 5.6: Umsetzung der Positionierstrategie 1.2.3 (lagegeregelte Relativpositionierung)

Beim Entwurf des Werkzeuges für das Montageszenario 1. Art kann auf das Kinematikmodul zum Ein- und Ausschwenken des Greifers in das optische Sichtfeld verzichtet werden, da die Referenzstrukturen des Substrates am gegriffenen Bauteil vorbei beobachtet werden können. Allerdings muss, wie die Beurteilung der Schärfentiefe des Messobjektives gezeigt hat (vgl. S. 77), eine Möglichkeit zur Umfokussierung zwischen Fügeteil und Substrat vorgesehen werden, um auch Bauelemente mit hohem Aspektverhältnis präzise zu den darunter liegenden Substratstrukturen positionieren zu können. Die Fokussierung kann durch eine Relativbewegung zwischen der Optik und dem Greifer in Richtung der optischen Achse realisiert werden. Aufgrund des geringeren konstruktiven Aufwandes wird der Bewegung des Greifers gegenüber einer Verstellung des optischen Systems im Werkzeug der Vorzug gegeben, d.h. bei der Lageerkennung des Substrats soll der Greifer mit dem Fügeteil durch einen automatischen Hubmechanismus nach oben aus der Fokusebene, in der sich das Substrat befindet, gezogen werden (Schritt ② in Bild 5.6).

Wie Bild 5.6 zeigt, wird der mit Bildverarbeitung gemessene Positionsversatz zunächst rotatorisch, dann translatorisch mit dem Roboter korrigiert, bis die verbleibende Abweichung im Stellbereich des Feinpositioniermoduls von $\pm 100 \mu\text{m}$ liegt. Das Abbruchkriterium für die anschließende Feinpositionierung mit dem Piezoantrieb ist erfüllt, wenn der in x-/y-Richtung verbleibende Positionsversatz die zulässige Füge-toleranz unterschreitet.

5.3.1.2 Prototypenhafte Realisierung

Bild 5.7 zeigt den konstruktiven Aufbau des Pick-and-Place-Werkzeuges. Es besteht aus den Modulen Optik, Piezo-Feinpositionierantrieb und Kraftsensor sowie dem Fokussiermechanismus mit Sauggreifer. Um eine möglichst kompakte Bauweise zu erreichen, sind alle Module konzentrisch um die optische Achse angeordnet.

Das Optikmodul kann durch einen manuellen, klemmbaren Fokuseinstellring mit Gewindegzug längs der optischen Achse verdrehfrei im Werkzeug verschoben werden. Diese Justagemöglichkeit ist notwendig, um die Optik beim Einrichten des Werkzeuges an die Höhe der zu fügenden Bauelemente zu adaptieren. Der Einstellvorgang wird auf S. 119 beschrieben. Für Einstellungen an der Optik (z.B. Blende) können Kraftsensormodul und Fokussiermechanismus mit wenigen Handgriffen nach unten abgezogen werden.

Das Piezo-Feinpositioniermodul ist fest mit der Roboterschnittstelle verbunden und überträgt die Lagekorrekturbewegung auf den unteren Teil des Werkzeuges inklusive

der Optik. In Verbindung mit dem Kraftsensormodul ermöglicht der Piezoantrieb eine hochauflösende kraftgeregelte Fügebewegung in der z-Achse.

Das Kraftsensormodul ist für einen kurzen Kraftfluss im unteren Teil des Werkzeuges integriert. Der Sensor wird querkraftfrei zwischen zwei Gehäusehälften eingebaut, die axial (in Kraftmessrichtung) durch ein Gleitlager geführt sind.

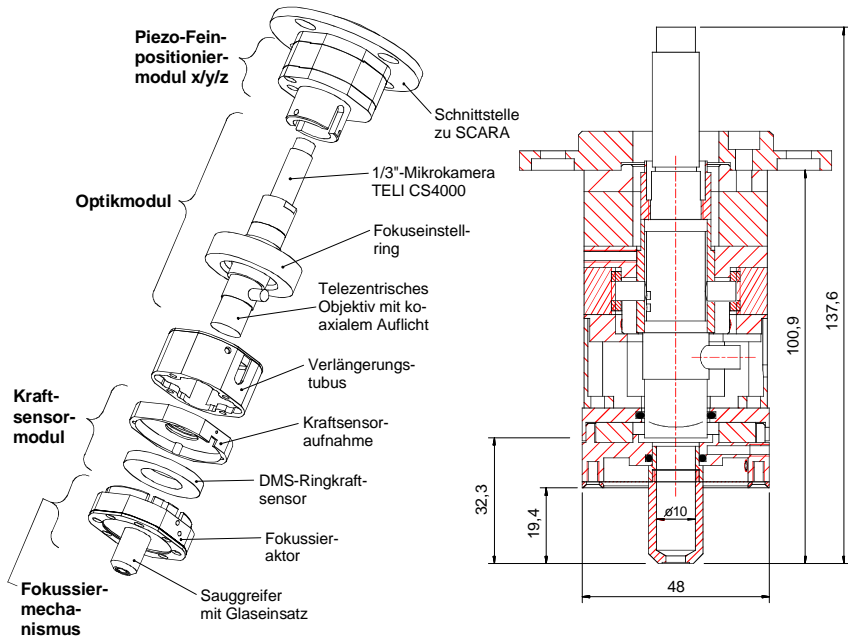


Bild 5.7: Konstruktiver Aufbau des Pick-and-Place-Werkzeuges

Pneumatischer Fokussiermechanismus

Der Fokussiermechanismus dient dazu, die Fokusslage im ersten Bildeinzug auf das gegriffene Bauelement und im zweiten Bildeinzug auf das Substrat einzustellen (vgl. Bild 5.6). Dazu ist ein spielfreier Relativhub des Greifers gegenüber der Optik von einigen 1/10 Millimetern in Richtung der optischen Achse bei möglichst kompakten Abmessungen zu realisieren.

Diese Anforderungen lassen sich durch Verformung elastischer Konstruktionselemente erfüllen. Als Verformungselement dient eine Membran aus Federstahl. Wird diese mit Druckluft beaufschlagt, so verschiebt sie den Greifer in Richtung der opti-

schen Achse (Bild 5.8). Dieses Funktionsprinzip ermöglicht eine konzentrische Anordnung des Fokussiermechanismus um die optische Achse bei minimalen Abmessungen und eine absolut spielfreie Bewegungserzeugung.

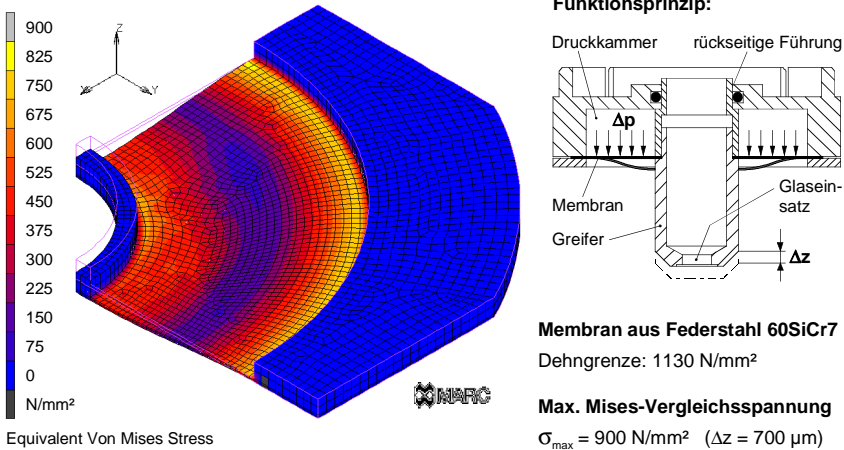


Bild 5.8: Funktionsprinzip des Fokussiermechanismus (rechts) und Dimensionierung der Membran mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (links)

Um eine bleibende Verformung der Stahlmembran zu vermeiden, darf diese nicht über den elastischen Bereich hinaus beansprucht werden. Die Dimensionierung wurde daher mit Hilfe einer FE-Analyse durchgeführt. Demnach treten die maximalen Spannungen an den Einspannstellen der Membran auf. Bezogen auf einen maximalen Greiferhub von etwa 700 μm liegen sie mit ca. 900 N/mm² noch unterhalb der Dehngrenze des verwendeten Federstahls von 1130 N/mm², wodurch eine plastische Verformung der Membran ausgeschlossen ist.

Der pneumatische Fokussiermechanismus weist im Bereich bis 7 bar einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen dem Druck und der Auslenkung auf. In Abhängigkeit von der Dimensionierung der Membran ergibt sich beispielsweise bei einem Druck von 5 bar eine Auslenkung von 458 μm .

Mittels einer Messuhr wurde die Wiederholgenauigkeit der Greiferbewegung in den beiden Endlagenstellungen bestimmt. Diese liegt in allen drei Richtungen x, y und z unterhalb 2 μm .

Einstellung der Fokuslage

Vor dem Montageprozess müssen Fokuslage und Fokussierhub in Abhängigkeit von der Höhe der zu handhabenden Bauelemente angepasst werden. Die Vorgehensweise zeigt Bild 5.9.

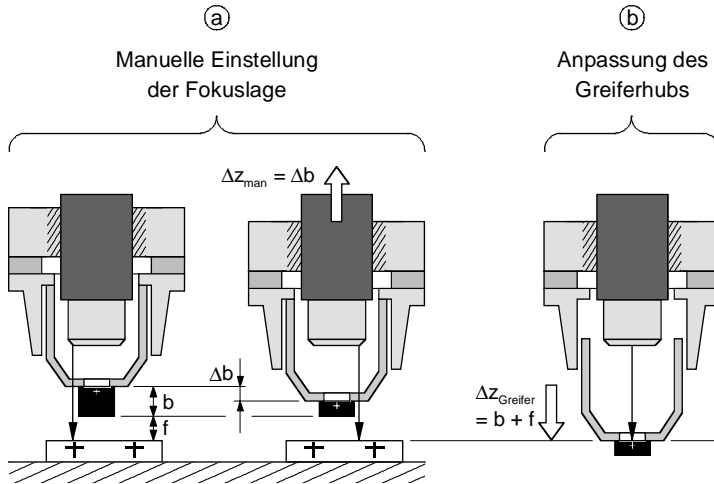


Bild 5.9: Anpassung der Fokuslage beim Pick-and-Place-Werkzeug

In einem ersten Schritt wird die Bildaufnahme-position des Werkzeuges für die Lageerkennung des Substrates mit dem Roboter geteacht. Diese Position ist dadurch gekennzeichnet, dass der Fügeabstand f innerhalb des Stellbereiches des Piezoantriebs in der z-Richtung liegt, d.h. $f < 200 \mu\text{m}$. Andernfalls reicht der Piezo-z-Hub nicht zur Durchführung der kraftgeregelten Fügebewegung aus. Der Greifer befindet sich dabei in seiner oberen Endlage, die durch einen festen Anschlag vorgegeben ist. Beim kraftgeregelten Fügevorgang wird die Fügekraft über diesen Anschlag auf den Kraftsensor übertragen.

Das Teachen wird durch die Kraftsensorik unterstützt. Dabei wird das Werkzeug mit dem gegriffenen Bauteil vom Roboter kraftregelt auf das Substrat aufgesetzt und die über dem Kontaktpunkt um den Betrag f darüber liegende Position abgespeichert.

Im zweiten Schritt wird die Fokuslage des Objektives auf die Messebene des Substrats mit Hilfe der manuellen Fokuseinstellung angepasst (Bild 5.9-a). Bei kleineren Bauteilen ergibt sich eine tiefere Bildaufnahme-position des Werkzeuges, die zur An-

passung der Fokuslage auf die Substratebene eine Verstellung der Optik mit Hilfe der manuellen Fokuseinstellung um den Differenzbetrag Δb der Bauteilhöhe entgegen der optischen Achse erfordert.

Im letzten Einstellschritt wird der Fokussierhub des Greifers $\Delta z_{\text{Greifer}}$ durch Variation des pneumatischen Drucks p so gewählt, dass das gegriffene Bauteil bei ausgefahrenem Greifer in der Fokusebene liegt, d.h. $\Delta z_{\text{Greifer}} = f(p) = b + f$ (Bild 5.9-b).

Greifergestaltung und -fertigung

Die Sicht auf das gegriffene Bauteil und das Substrat wird durch einen Sauggreifer mit transparentem Saugeinsatz aus optischem Glas ermöglicht. Es wurden mehrere Glaseinsätze mit einer zentralen Saugbohrung im Durchmesserbereich von 200 bis 500 μm hergestellt. Dabei kamen drei Fertigungsverfahren zum Einsatz:

- ◆ Glasbohren mit Ultraschall
- ◆ anisotropes Ätzen der Saugbohrung in Foturan® (SCHOTT 1994), ein fotostrukturierbares Glas
- ◆ Laserbohren von Quarzglas mit CO₂-Laser

Das Ultraschallverfahren erwies sich aufgrund von Muschelausbrüchen am Bohrungsrand als nicht geeignet für die Herstellung von Glaseinsätzen mit Bohrungsdurchmessern unterhalb von 400 μm . Die Muschelausbrüche betragen ca. 10% des Bohrungsdurchmessers und treten an der Austrittsseite des Ultraschallwerkzeugs auf.

Die Mikrostrukturierung von Foturan (DIETRICH 1996) ermöglicht sehr kleine Bohrungen mit hoher Genauigkeit und Oberflächenqualität. Dieses Batchverfahren ist aber infolge der Masken- und Prozesskosten nur bei höheren Stückzahlen wirtschaftlich nutzbar.

Mittels CO₂-Laser können auch einzelne Greifeinsätze kostengünstig hergestellt werden. Das Verfahren eignet sich für Bohrungen in einem Durchmesserbereich von 300 - 500 μm . Als Material wurden Quarzglasrohlinge (SQ1) mit einer Dicke von 1,2 mm verwendet. Allerdings werden durch den Laserbearbeitungsprozess thermische Spannungen im Glas induziert, die zu Beugungseffekten führen und die optische Qualität des Glases einschränken. Die Spannungen ließen sich im Wesentlichen durch Tempern beseitigen. Im letzten Prozessschritt wurde der Glasrohling dann beidseitig auf eine Dicke von 0,8 mm geschliffen und poliert, um den bei der Laserstrukturierung entstandenen Krater am Rand der Saugbohrung zu beseitigen.

Werkzeugprototyp

Bild 5.10 zeigt einen Prototyp des Pick-and-Place-Werkzeuges. Als Handhabungsgerät für die Grobpositionierung dient beispielhaft ein Scara-Roboter. Die nach oben aus dem Werkzeug herausragende Kamera (vgl. Bild 5.7) wird in der hohlgebohrten z-Achse des Roboters versenkt.



Bild 5.10: Prototyp des Pick-and-Place-Werkzeuges mit integrierter Optik, Kraftsensorik, Piezo-Feinpositionierantrieb und Fokussiermechanismus

5.3.2 Multifunktionales Werkzeug für flexible Prozessführung

In diesem Umsetzungsbeispiel soll das Grob-/Feinpositionierprinzip für eine flexible Prozessführung qualifiziert werden. Dies impliziert eine Erweiterung des Werkzeugkonzeptes auf die Problematik verdeckter Referenzstrukturen (Montageszenario 2. Art) und die Integration von flexibel einsetzbaren Greif- und Fügemodulen.

5.3.2.1 Werkzeugkonfiguration

Da der Werkzeugentwurf wiederum für das Montageszenario 2. Art erfolgt, ergibt sich eine ähnliche Systemkonfiguration wie bei dem bereits in Kap. 5.2 beschriebenen Werkzeug für Präzisionsroboter (vgl. Bild 5.2). Im Unterschied dazu bieten die zusätzlichen Achsen des Feinpositioniermoduls jedoch die Möglichkeit, die Lagekorrekturbewegung von der Optik zu entkoppeln. Damit ist, zur Minimierung der Fehlerinflüsse auf die Montagegenauigkeit, sowohl eine Fehlerkompensation der Greiferendlage als auch die Durchführung der Lagekorrektur im geregelten Modus entsprechend der Positionierstrategie 2.2.4 realisierbar. Bild 5.11 verdeutlicht die Umsetzung dieser Strategie in das Werkzeugkonzept. Die Optik ist demnach an der roboterfesten Plattform des Feinpositioniermoduls anzuordnen.

Andererseits ermöglicht diese Systemkonfiguration auch eine zeitoptimale Positionierung unter Anwendung der Strategie 2.2.1. (vgl. Bild 3.10), wenn bei der spezifischen Montageapplikation die Taktzeit gegenüber der Genauigkeit im Vordergrund steht. Allerdings ist der Piezo-Feinpositionierantrieb dann mit dem internen DMS-Wegmesssystem auszustatten (vgl. Kap. 4.6.2), um hysteresebedingte Positionierfehler bei der bildgesteuerten Lagekorrektur⁵⁴ zu vermeiden.

Durch Verwendung eines zusätzlichen unidirektionalen Optikmoduls und eines Greifers mit Hilfsmarken lässt sich der Einsatzbereich des Werkzeuges auch auf das Montageszenario 3. Art erweitern. Der Positionierprozess basiert dann auf der Strategie 3.2 (vgl. Bild 3.11).

Diese Strategienvariabilität befähigt den Anwender, das Werkzeug einerseits an unterschiedliche Produkte (z.B. Montage oberseitenstrukturierter Bauelemente, Flip-Chip-Montage ...) und andererseits optimal an die fallspezifischen Anforderungen im Spannungsfeld zwischen Genauigkeit und Zykluszeit anzupassen.

⁵⁴ Wie in Kap. 3.2.2 ausführlich dargestellt, findet bei der bildgesteuerten Lagekorrektur keine optische Überprüfung der erreichten Position durch das Bildverarbeitungssystem statt.

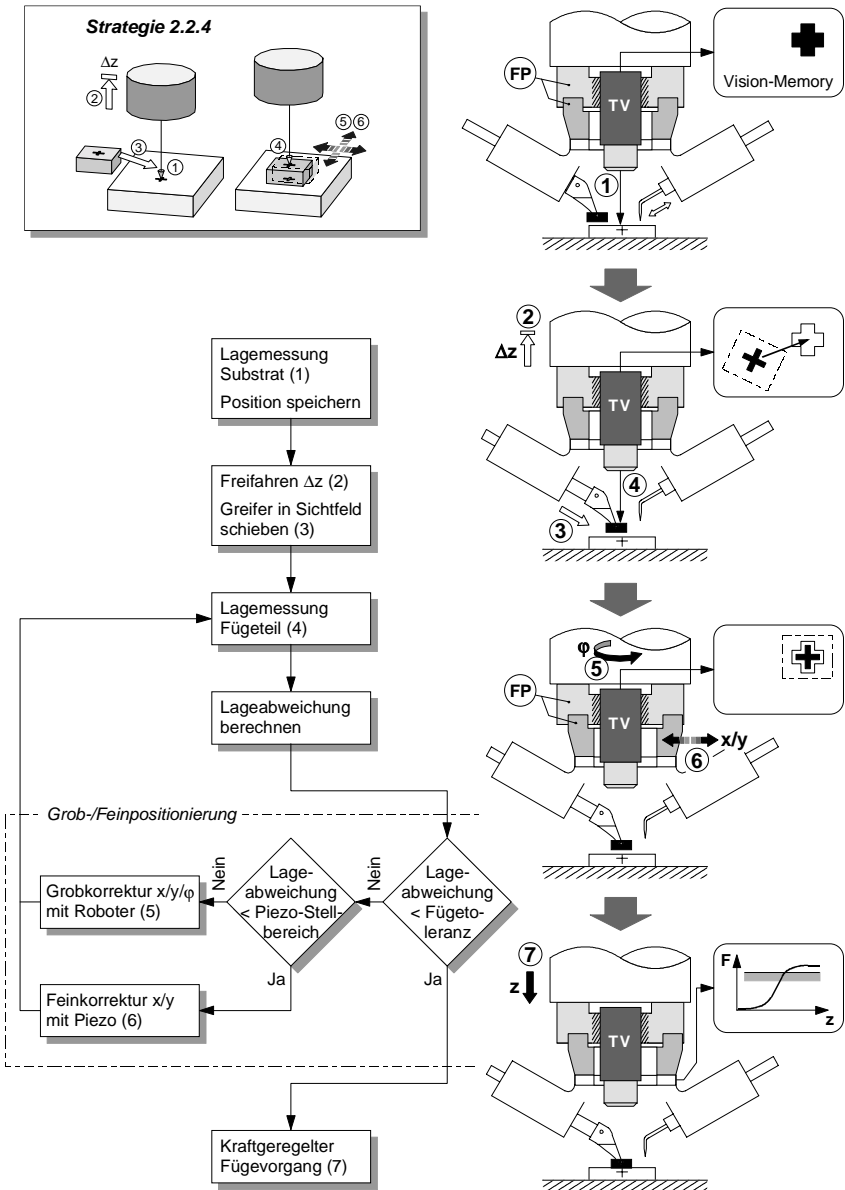


Bild 5.11: Umsetzung der Positionierstrategie 2.2.4 (lagegeregelter Relativpositionierung)

5.3.2.2 Prototypenhafte Realisierung

Bild 5.12 zeigt den schematischen Aufbau und die konstruktive Gestaltung des Werkzeugsystems.

Die Werkzeugträgerplatte stellt die Schnittstelle zu den aufgabenspezifisch einsetzbaren Greif- und Fügemodulen (vgl. Kap. 4.5) dar. Es können bis zu vier manuell austauschbare Module simultan am Werkzeug mitgeführt werden. Bei dem dargestellten Prototypenwerkzeug wurden zwei bauteilspezifische Sauggreifer und zwei Stempel für die Applikation von Leitlebstoff realisiert.

Das Optikmodul (vgl. Bild 4.8) ist fest mit der Schnittstelle zum Handhabungsgerät verbunden. Die am Prozess beteiligten Greif- und Fügemodule werden also durch das Feinpositioniermodul (vgl. Bild 4.20) relativ gegenüber der feststehenden Optik bewegt.

Das Kraftsensormodul (vgl. Bild 4.22) ist wiederum im unteren Teil des Werkzeuges integriert, um ein gutes Ansprechverhalten zu erzielen. Die Vorspannkraft wird, wie bei dem in Kap. 5.2 beschriebenen Werkzeug für Präzisionsroboter, auf pneumatischem Weg aufgebracht. Dabei wird eine Membran über ein Proportionalventil mit Druck beaufschlagt. Die Verformung der Membran wirkt auf eine Hubplatte, die ihrerseits über eine Linearführung die Werkzeugträgerplatte gegen den Kraftsensor drückt. Auch bei diesem Werkzeug kann die aktive Fügekraftüberwachung durch die einfachere und kostengünstigere passive Fügekraftbegrenzung ersetzt werden, wenn der Prozess dies zulässt. Toleranzen in der z-Koordinate werden dann durch die Linearführung des Werkzeugträgers, dessen Gewichtskraft pneumatisch kompensiert wird, ausgeglichen. Diese Funktionsintegration von aktiver Fügekraftüberwachung und passivem Toleranzausgleich vereinfacht die Konstruktion und nutzt den vorhandenen Bauraum optimal aus.

Bild 5.13 zeigt zwei Gestaltungsvarianten von Sauggreifern für unterschiedliche Positionierstrategien. Die Variante A ist für die Positionierung von oberseitenstrukturierten Bauelementen (Montageszenario 2) entsprechend der Strategien 2.2.1 oder 2.2.4 konzipiert. Dabei ermöglichen ein Sichtglas und ein transparenter Saugeinsatz die Lageerkennung der Justagemarken auf der Oberseite des gegriffenen Bauelementes durch den Greifer hindurch.

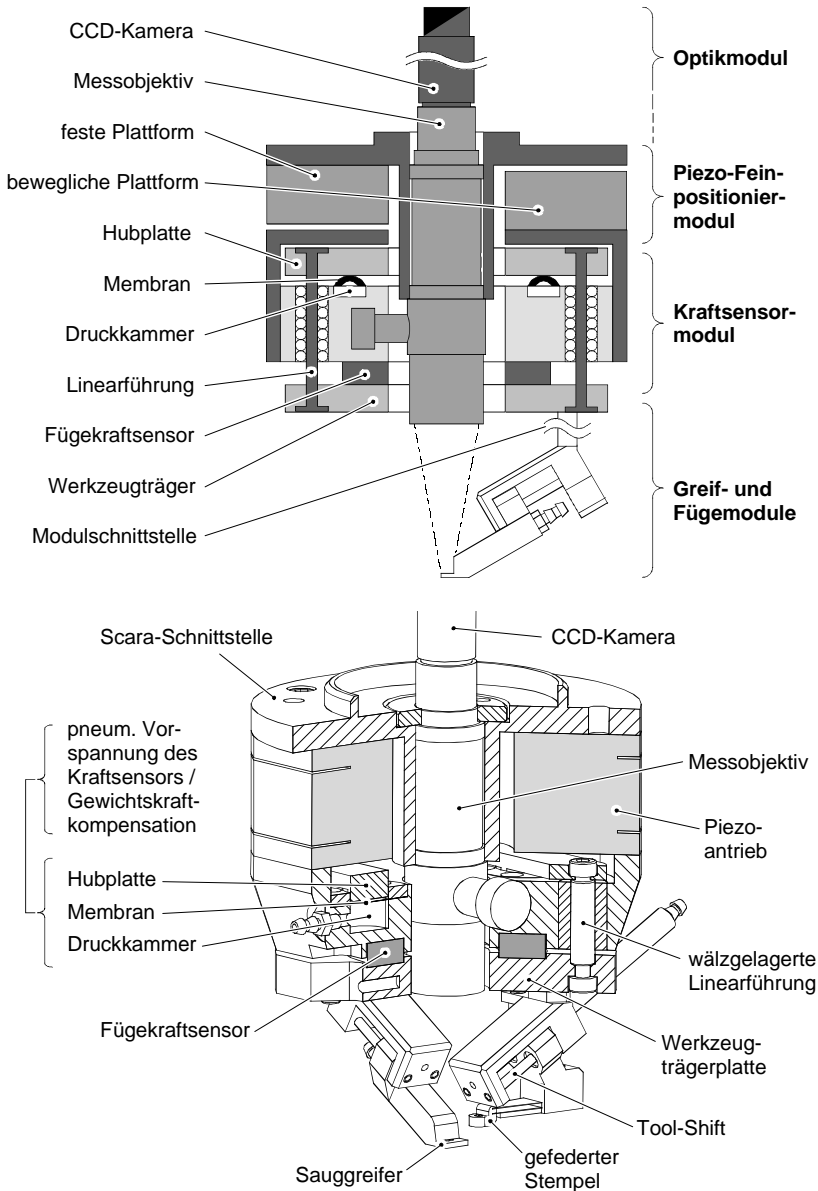


Bild 5.12: Schematische Darstellung (oben) und konstruktive Umsetzung (unten) des flexiblen Mikromontagewerkzeuges

Die Variante B hingegen ermöglicht eine Positionierung nach der Strategie 3.2 und eignet sich damit für unterseitenstrukturierte Bauelemente, z.B. Flip-Chips. Bei dem Greifereinsatz handelt es sich um ein Silizium-Plättchen, das neben der Saugbohrung (Durchmesser z.B. 150 μm) zwei Referenzbohrungen mit einem Durchmesser von je 100 μm aufweist. Die Referenzbohrungen liegen innerhalb des Sichtfensters des Greifergrundkörpers und sind damit sowohl von der Werkzeugoptik als auch von einer zusätzlichen Unterseitenkamera sichtbar. Damit kann die Lage des gegriffenen Bauelementes mit der Unterseitenkamera relativ zu den Referenzbohrungen des Greifereinsatzes bestimmt und in das Sichtfeld der Werkzeugoptik projiziert werden (vgl. Kap. 3.3.5).

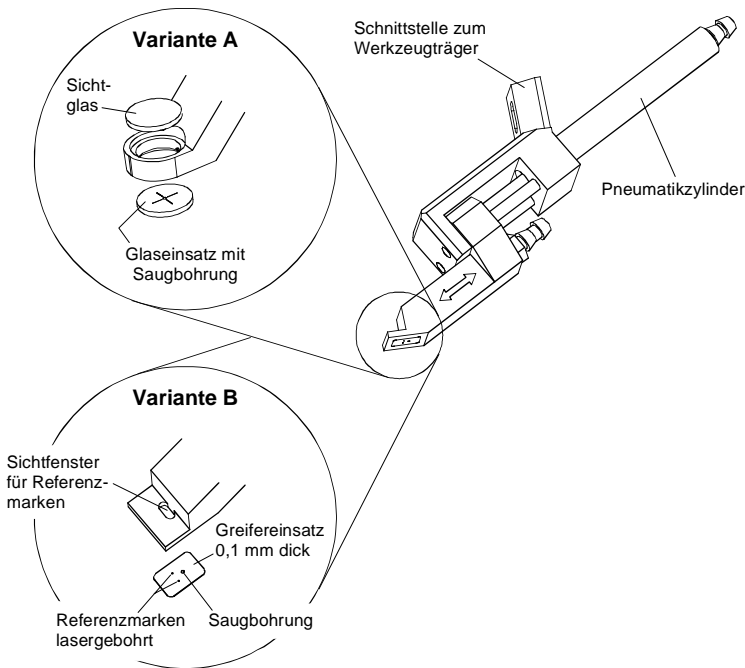


Bild 5.13: Flexibel einsetzbare Greifer; Variante A: Sauggreifer für oberseitenstrukturierte Bauelemente (Montageszenario 2. Art), Variante B: Sauggreifer für unterseitenstrukturierte Bauelemente (Montageszenario 3. Art)

Bild 5.14 zeigt das realisierte Versuchswerkzeug. Die Anwendung und Erprobung dieses Werkzeuges wird in Kapitel 6 ausführlich beschrieben.



Bild 5.14: Prototyp des flexiblen, feinpositionierbaren Werkzeugsystems an einem Scara-Roboter

5.4 Positioniersystem mit Strahlteileroptik

Das letzte Realisierungsbeispiel zielt auf die Integration des Strahlteileroptikmoduls in Positioniersysteme, um unterseitenstrukturierte Bauelemente entsprechend der Strategie 3.3. zu positionieren. Dabei müssen die einander zugewandten Strukturen auf der Bauteilunterseite und dem Substrat mittels Bildverarbeitung erkannt und abgeglichen werden.

Wie bereits erwähnt, ist dieses Positionierproblem prinzipiell auch mit Hilfe der zuvor beschriebenen Roboterwerkzeuge und eines zweiten unidirektionalen Optikmoduls nach der Strategie 3.2 (vgl. Bild 3.11) lösbar. Durch diese Option kann der Einsatzbereich der Werkzeuge erweitert werden⁵⁵. Die Positionierung mittels Strahlteileroptik bietet demgegenüber jedoch den Vorteil, dass nach der Lageerkennung keine Lateralbeschleunigungen des Handhabungsgerätes mehr auf die Bauelemente einwirken

⁵⁵ Aus diesem Grund werden beide Lösungswege verfolgt: Die Doppelkamera-Strategie (3.2) wird bei der Erprobung der feinpositionierbaren Roboterwerkzeuge im nächsten Kapitel noch näher beschrieben.

(vgl. Kap. 3.3.5). Mögliche Störeinflüsse (Verrutschen des Bauteils) werden damit minimiert.

5.4.1 Systemkonfiguration

Um flexibel an mehreren Substratpositionen (bzw. Fügepositionen innerhalb eines Substrats) montieren zu können, bieten sich zwei Lösungsvarianten für die Integration der Strahlteileroptik in das Positioniersystem an. Entweder werden die Bauelemente durch einen Positioniertisch unter der ortsfest angeordneten Optik und Fügeachse platziert oder aber Optik und Fügeachse werden ortsflexibel an den jeweiligen Prozessort geführt. Damit erscheinen die in Bild 5.15 dargestellten Systemkonfigurationen praktikabel.

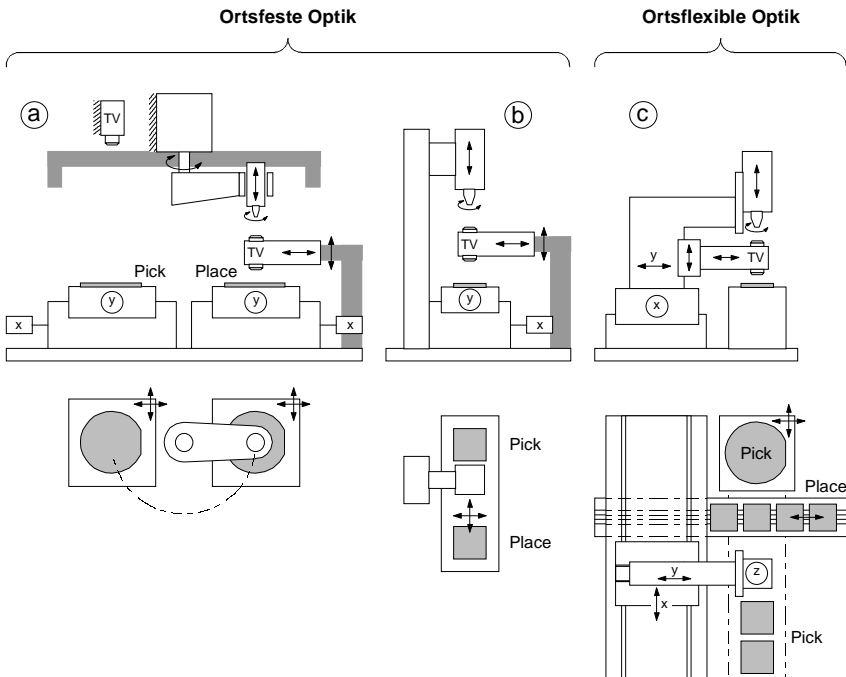


Bild 5.15: Beispielhafte Montagesystemkonfigurationen mit Strahlteileroptik:
 a) Schwenkarmkinematik mit stationärer Optik für hohe Produktivität;
 b) System mit x/y-Tisch und ortsfester Fügeachse/Optik;
 c) Flexibles System mit 4-Achsroboter und mitgeführter Optik

Für die Montage größerer Stückzahlen bietet sich die Integration der Strahlteileroptik in ein Anlagenkonzept auf der Basis eines schnellen Pick-and-Place-Automaten, z.B. eines Schwenkarm-Die-Bonders (ein solches Maschinenkonzept findet sich z.B. in GRAMANN (1999)), an (Bild 5.15-a). Diese Klasse von Die-Bondern ist aufgrund ihrer einfachen Kinematik für sehr hohe Montagegeschwindigkeiten geeignet. Bei großen Stückzahlen erfolgt die Montage direkt von Wafer zu Wafer. Die Pick-Station muss hierzu mit einem Chip-Flipper (in der Schemaskizze nicht dargestellt) ausgestattet sein, der die Flip-Chips nach dem Abgriff vom Bauelemente-Wafer um 180 Grad wendet und an den Bondarm übergibt. Bauelemente-Wafer und Substrat-Wafer werden jeweils durch einen hochpräzisen x/y-Tisch unter dem Bondarm positioniert. Die Strahlteileroptik ist stationär an der Place-Position angeordnet und wird durch einen Linearantrieb in die Messposition über dem Wafer eingefahren. Über eine weitere Achse ist die Optik vertikal verfahrbar, um die Fokusslage auf die Montageebene des Substratwafers einzustellen. Zur Vermessung der Pick-Position ist eine zusätzliche Kamera erforderlich. Die Parallelisierung von Messschritten, der Schwenkbewegung des Bondarms und der Positionierbewegung der x/y-Tische ermöglicht kurze Zykluszeiten. Während sich der Schwenkarm in der Place-Position befindet, werden mit der oberhalb des Bauelemente-Wafers angebrachten Kamera bereits die Pick-Position vermessen, der Bauelemente-Wafer positioniert und das Bauelement mit dem Chip-Flipper gegriffen, gewendet und lagerichtig für den Bondarm bereitgestellt.

Bei dem System nach Bild 5.15-b ist die Strahlteileroptik relativ zur ortsfesten Fügeachse angeordnet. Bauelemente und Substrate werden auf einem gemeinsamen x/y-Tisch z.B. in Chip-Trays bereitgestellt und unter der Fügeachse positioniert. Die Strahlteileroptik kann damit sowohl für die Bauteilaufnahme als auch für die Bauteilplatzierung eingesetzt werden. Diese Systemkonfiguration führt zu geringeren Investitionskosten, aber höheren Zykluszeiten.

Die Systemkonfiguration nach Bild 5.15-c zeichnet sich durch eine sehr große Flexibilität aus. Die Verwendung eines 4-Achs-Roboters ermöglicht die Integration von unterschiedlichsten Peripherie- und Bereitstellungseinrichtungen, wie z.B. Wafer-Handler mit Die-Ejector, Chip-Flipper, interne Transfereinheiten etc.. Damit kann die Anlage sehr flexibel an unterschiedliche Produkte angepasst werden. Die Strahlteileroptik wird ortsflexibel am Roboter mitgeführt. Darüber hinaus kann der Roboter zusätzlich mit dem Feinpositioniermodul (vgl. Kap. 4.6) ausgestattet werden, wodurch die Anforderungen an die Roboter Genauigkeit zugunsten geringerer Investitionskosten der Anlage reduziert werden.

5.4.2 Laboraufbau

Anhand des in Bild 5.16 dargestellten Laboraufbaus wurde die Bildüberlagerung bei der als Funktionsmuster realisierten Pentagonprisma-Optik qualitativ untersucht.

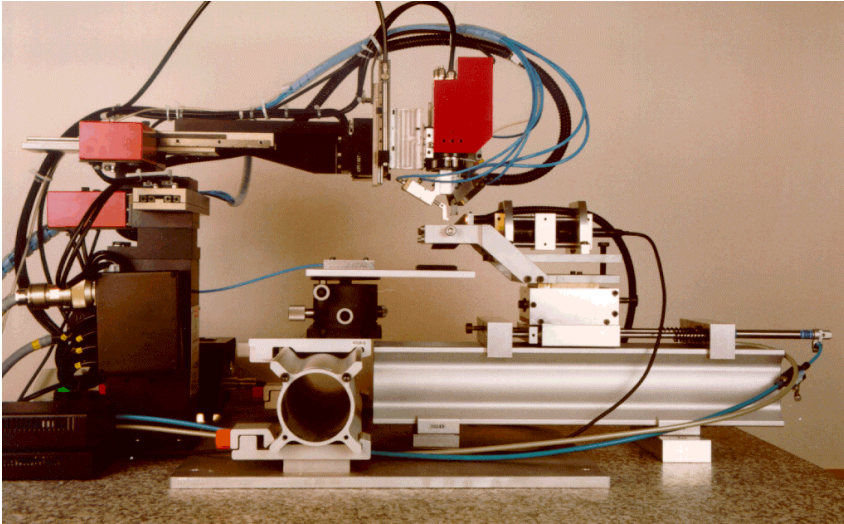


Bild 5.16: Laboraufbau mit kartesischem Roboter und Strahlteileroptik

Das Optikmodul befindet sich auf einem pneumatisch angetriebenen Schlitten, der zur Bildaufnahme in die Fügeachse eines vierachsigen kartesischen Roboters eingefahren werden kann. Durch entsprechende Justagevorrichtungen kann die Optik in drei rotatorischen Freiheitsgraden (Nick-, Gier- und Rollwinkel) gegenüber der Fügeachse ausgerichtet werden.

Als Referenzobjekte zur Darstellung der Abbildungsqualität bei der Bildüberlagerung dienen ein Keramiksubstrat und ein LED-Barren. Um die beiden Bauteile auch getrennt voneinander abbilden zu können, sind die beiden Teilstrahlengänge (unten/oben) der Optik mit jeweils einer Blende ausgestattet.

Das Substrat ist auf der Montageplattform fixiert und weist „hammerförmige“ Referenzstrukturen für die optische Lageerkennung auf. Der LED-Barren wird vom Roboter mit Hilfe eines Sauggreifers aus einem Chip-Tray aufgenommen und mit den zu erkennenden Strukturen nach unten in der Bildaufnahmeposition über der Strahl-

teileroptik vorpositioniert. Bild 5.17 zeigt eine reale Bildersequenz, die mit der Prototypenoptik aufgenommen wurde.

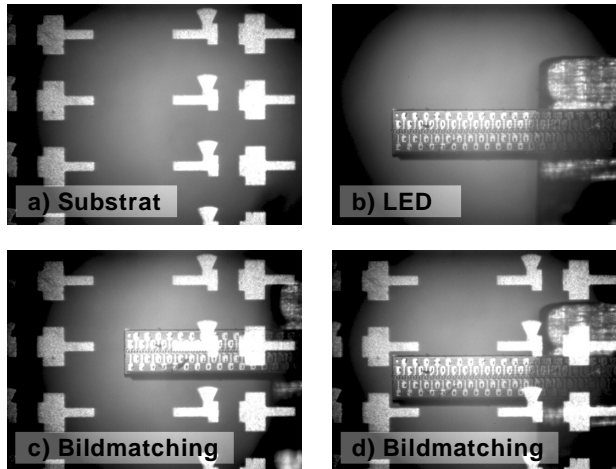


Bild 5.17: Optische Überlagerung von Substrat- und Bauteilstrukturen mit dem Funktionsmuster der Pentagonprisma-Optik

Zunächst wurden beide Objekte getrennt voneinander abgebildet, indem nur jeweils ein Teilstrahlengang durch die Blenden freigegeben wurde (Teilbilder a und b). In Teilbild b ist der Sauggreifer zur Handhabung des quaderförmigen LED-Barrens erkennbar. Anschließend wurden beide Blenden gleichzeitig geöffnet und die beiden Objekte optisch überlagert. Hierbei zeigt Teilbild c den LED-Barren in Bezug auf die Substratstrukturen dejustiert, während die beiden Objekte in Teilbild d zueinander ausgerichtet sind.

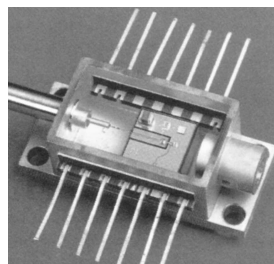
6 Exemplarische Anwendung und Erprobung

Die entwickelten Positionierstrategien wurden exemplarisch, am Beispiel der beiden feinpositionierbaren Roboterwerkzeuge, in einer Pilotanlage unter praxisnahen Bedingungen getestet. Als konkrete industrielle Anwendung diente die Montage halbleiterbasierter Mikrosysteme für die optische Datenübertragung. Die Untersuchungen ermöglichen Aussagen über Zykluszeiten und Montagegenauigkeiten und sind damit Grundlage für eine technische und wirtschaftliche Bewertung.

6.1 Anwendungsbeispiel: Mikrosysteme für die optische Datenübertragung

Die rapide Zunahme von Telekommunikationsdiensten hat zu einem sprunghaft angestiegenen Datenaufkommen geführt. Multimediaanwendungen in Fernnetzen erfordern bereits Übertragungsraten bis zu einigen 10 Gigabit/sec. Auch im Privatanwenderbereich wird ein stürmisches Wachstum prognostiziert. Während bis vor kurzem noch Datenraten von einigen 10 kbit/sec (Modem) ausreichend waren, wird in den nächsten zehn Jahren von einer stark steigenden Datenflut bis in den Bereich von 100 Mbit/sec ausgegangen (MOHR u.A. 2000). Derartige Datenmengen lassen sich mit elektrischen Nachrichtennetzen auf Kupferbasis nicht mehr bewältigen. Aufgrund der höheren Übertragungsgeschwindigkeit und –kapazität kommt in zunehmendem Maße die optische Datenübertragung durch modulierte Licht, das über Glasfasern geleitet wird, zum Einsatz. Bisher vor allem im Langstreckenbereich eingesetzt, wird sich die optische Datenübertragung zukünftig auch auf Kurzstrecken etablieren.

Für die optische Datenübertragung sind optoelektronische Schnittstellenmodule notwendig, die als Sender elektrische in optische Signale wandeln und in eine Glasfaser einkoppeln sowie als Empfänger die ankommenden Lichtimpulse wieder in elektrische Signale umsetzen (Bild 6.1). Die optische Hybridtechnik, unter der man die Integration von optischen und elektronischen Komponenten auf einem gemeinsamen Substrat als Mikrosystem versteht, stellt die Grundlage für die Realisierung optoelektronischer Sende- und Empfangsmodule dar. Als signalwandelnde Halbleiterbauelemente werden



*Bild 6.1: Empfangsmodul
(Quelle: Alcatel)*

Laserdioden für Sender und Fotodioden für Empfänger verwendet. Mit steigenden Übertragungsraten nimmt das Layout der Baugruppen einen wachsenden Einfluss auf die Qualität der Übertragung. Die wandelnden Halbleiterbauelemente werden kleiner und die Positionierung zwischen Faser und Diode ist ein technologisch aufwendiger und kritischer Montageschritt.

Bild 6.2 zeigt schematisch den Aufbau dieser optoelektronischen Mikrosysteme. Die Montageaufgabe wird am Beispiel des Empfangsmoduls erläutert.

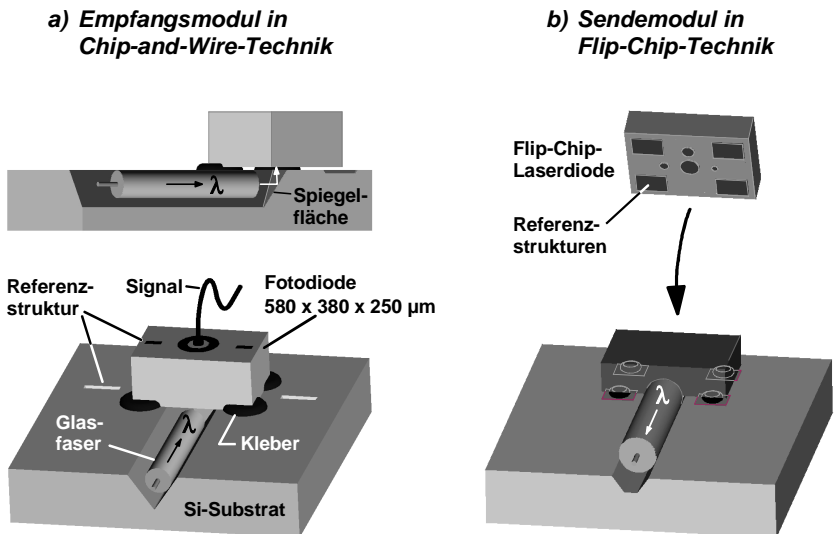


Bild 6.2: Schematischer Aufbau von Mikrosystemen für die optische Datenübertragung

Das Empfangsmodul besteht aus einem dreidimensional strukturierten Siliziumsubstrat mit vergoldeter Oberfläche. Zur Aufnahme der Glasfaser dient ein V-Graben. In diesem Graben wird die Faser passiv lagegenau positioniert und mittels Klebstoff fixiert. Der V-Graben wird in einem anisotropen Ätzprozess mit hoher Präzision bezüglich Lage und Geometrie in das Siliziumsubstrat strukturiert, wodurch eine hohe Genauigkeit bei der Faserpositionierung gewährleistet ist. Entsprechend der Gitterebene des (100)-Siliziums weisen alle geätzten Flächen einen exakten Winkel von 54,74 Grad zur Substratoberfläche auf. Die Breite des Grabens wird durch die vorausgehende Lithographie genau bestimmt und beträgt 244 µm. Bei der verwendeten Glasfaser handelt es sich um eine Monomode-Faser mit einem Außendurchmesser

(ohne Coating) von 125 μm und einem Kerndurchmesser von 8,3 μm für einen Übertragungsbereich zwischen den Wellenlängen $\lambda = 1310$ bis 1550 nm.

Als Bauelement für die optoelektronische Signalwandlung dient eine Halbleiter-Fotodiode aus Indiumphosphid (InP) mit den Abmessungen 580 x 380 x 250 μm^3 . Das über die Faser übertragene optische Empfangssignal wird durch die Spiegeleigenschaften der vergoldeten Ätzfläche am Ende des V-Grabens vertikal umgelenkt und in die Unterseite der Fotodiode eingekoppelt.

Der Umfang der nachfolgenden Prozessuntersuchungen wird auf die Montage der Halbleiterdiode eingegrenzt. Die bildverarbeitungsbasierte Montage der Glasfaser mit den entwickelten Werkzeugen gestaltet sich auf der Basis von Grundsatzversuchen von SCHMITZ (1998) prinzipiell ähnlich, erfordert jedoch andere Greifmodule.

Die Fotodiode für den Empfänger wird in Chip-and-Wire-Technik (vgl. Kap. 2.2.2) montiert. Sie weist auf ihrer Oberseite Referenzstrukturen auf, die bei der Montage relativ zu 25 μm breiten, komplementären Strukturen auf dem Substrat auszurichten sind. Als Verbindungsmedium zwischen Fotodiode und Substrat dient ein Silberleitkleber, der an den vier Eckpunkten zu applizieren ist. Die elektrische Signalleitung erfolgt durch einen Bonddraht auf der Oberseite der Diode. Das Drahtbonden ist ein beherrschter Prozess und wird hier nicht weiter betrachtet.

Neben der Chip-and-Wire-Technik wird bei Sendemodulen auch die Flip-Chip-Technik (vgl. Kap. 2.2.3) für die Montage der Bauelemente eingesetzt (Bild 6.2-b). Beim Positioniervorgang muss die Flip-Chip-Laserdiode mit den Justagestrukturen nach unten auf die entsprechenden Strukturen des Substrats gesetzt werden. Die mechanische und elektrische Verbindung der Flip-Chip-Pads mit den Substratpads erfolgt durch einen isotrop leitfähigen Klebstoff.

6.2 Pilotanlage

6.2.1 Systemüberblick

Ausgangsbasis für die Durchführung der Montageversuche mit den feinpositionierbaren Werkzeugen ist eine Pilotanlage, die aus den in Tabelle 6.1 und Bild 6.3 dargestellten Teilsystemen besteht.

Die Werkzeuge werden von einem Scara-Roboter geführt. Für die Grobpositionierung ist eine geringe Regelschwingung am Handgelenkflansch des Roboters im Still-

stand erforderlich. Die Ruheschwingungsamplitude des Roboters wurde mit einem Laservibrometer berührungslos gemessen und beträgt ca. 1 μm .

Handhabungsgerät	Bosch Turboscara SR6 Bosch Robotersteuerung IQ 200
Feinpositionierbare Roboterwerkzeuge	Pick-and-Place-Werkzeug (Kap. 5.3.1) Multifunktionales Werkzeug für flexible Prozessführung (Kap. 5.3.2)
Bildverarbeitungssysteme	Adept-Vision-VME mit MV-10-Controller für Boundary Analysis Neurocheck 4.1 mit Cognex/PatMax Mustererkennung auf Industrie-PC (Pentium III, 450 MHz)
Beleuchtung	Helligkeitsprogrammierbare Kaltlichtquellen FOSTEC
Fügekraftmonitoring	DC-Messverstärker Hottinger-Baldwin MGT 31 12-Bit-A/D-Wandlerkarte Eagle PC30FS4 Messsoftware LabVIEW auf Pentium-PC 166 MHz
Piezo-Ansteuerung	3-Kanal-Piezoverstärker Piezosystem Jena ENV 150

Tabelle 6.1: Systemkomponenten der Pilotanlage

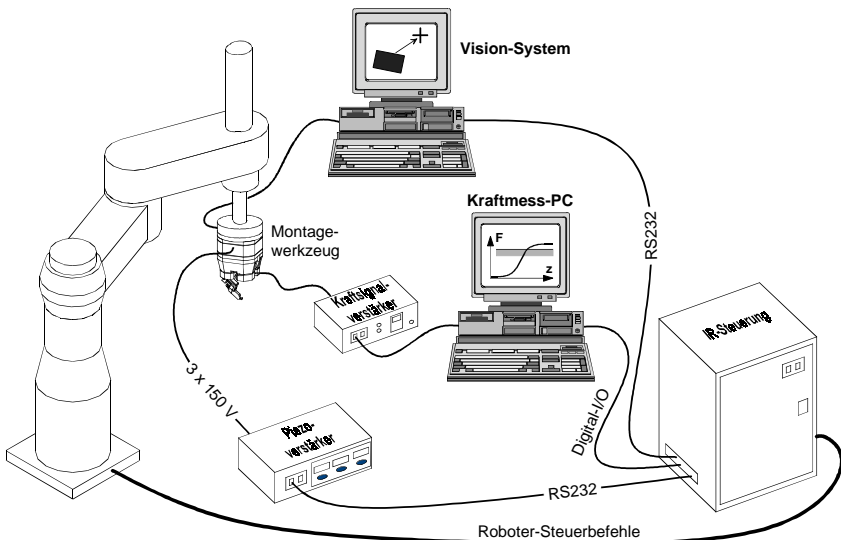


Bild 6.3: Systemarchitektur der Pilotanlage

Um die wesentlichen, in der industriellen Praxis eingesetzten Bildverarbeitungsmethoden abzudecken, wurden die Montageversuche mit zwei unterschiedlichen Bildverarbeitungssystemen durchgeführt. Mit dem Adept-Vision-System wurde die Lage der Objekte durch flächenorientierte Auswertelgorithmen bestimmt, die nach einer Binarisierung und Segmentierung des Bildes den Flächenschwerpunkt der identifizierten Objekte berechnen (Boundary Analysis). Das Cognex-Vision-System wertet dagegen Graustufenbilder mit Algorithmen für die Mustererkennung aus. In beiden Fällen kommuniziert die Bildverarbeitung über eine serielle Schnittstelle mit der Robotersteuerung. Das entsprechende Bildverarbeitungsprogramm wird durch Senden der zugehörigen Programmnummer von der Robotersteuerung aus gestartet. Als Ergebnis werden die extrahierten Objektkoordinaten an die Robotersteuerung zurückgesendet.

Über eine weitere serielle Schnittstelle empfängt der Piezoverstärker die Daten für die Spannungsansteuerung des werkzeugintegrierten Feinpositionierantriebs.

Die Auswertung des Fügekraftsignals erfolgt bei den Versuchen mit LabVIEW, einem grafischen PC-Programmiersystem für die Messwerterfassung und -verarbeitung⁵⁶. Das Sensorsignal wird durch einen Gleichspannungsverstärker auf den Eingangsreich von +/- 5 Volt einer 12-Bit-A/D-Wandlerkarte angepasst. Unter Berücksichtigung dieser Komponenten wurde die Empfindlichkeit des im Werkzeug eingebauten Kraftsensormoduls (nach der Signalverstärkung) experimentell mittels geeichten Gewichten zu 1,2 V/N ermittelt. Der Messbereich reicht bis etwa 8 N. Die minimale Ansprechschwelle der Fügekraftmessung liegt bei 3 mN und erfüllt damit die in Kap. 4.7.1 gestellten Anforderungen an die Kraftüberwachung. Bei Überschreiten der programmierten Kraftgrenze wird ein Eingang der Robotersteuerung gesetzt und die Fügebewegung beendet (Bild 6.4).

⁵⁶ Im Versuchsstadium ermöglicht LabVIEW eine hohe Flexibilität bei der Verarbeitung und Visualisierung der Messwerte. Für den industriellen Einsatz der Werkzeuge wird die Fügekraftüberwachung derzeit auf einen Prozesssteuerungsbaustein portiert.

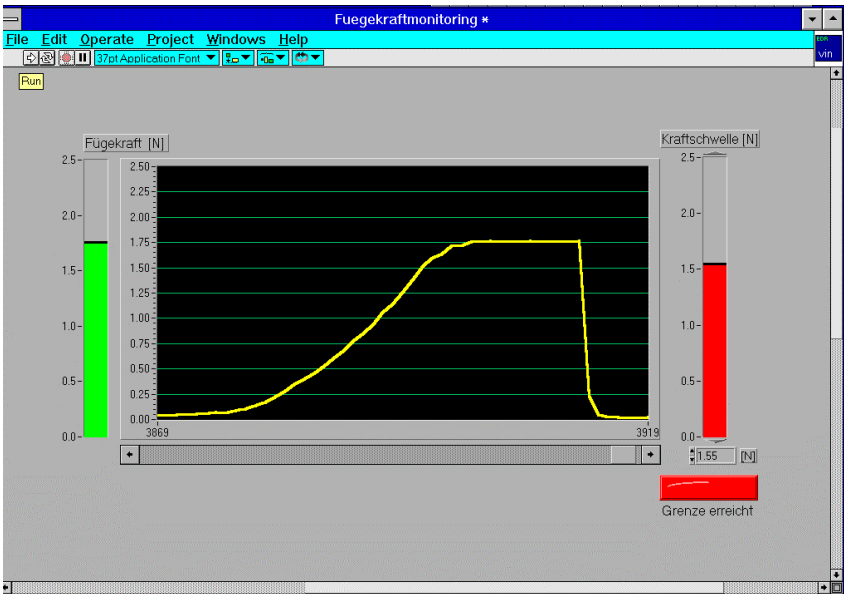


Bild 6.4: Bedienoberfläche für die Fügekraftüberwachung

Bild 6.5 zeigt eine Ansicht der Pilotanlage, die unter einer Laminar-Flow-Box der Reinraumklasse 1000 auf einer schwingungsgedämpften Plattform aufgebaut wurde. Im Arbeitsraum des Roboters befindet sich eine Montageplattform, auf der die Halbleiterbauelemente in einem Chip-Tray bereitgestellt werden. Für die Lageerkennung der Flip-Chip-Bauelemente am Greifer ist unterhalb der Montageplattform eine Unterseitenkamera mit einem 3-fachen Vergrößerungsobjektiv angeordnet. Weiterhin kann ein auswechselbarer Substrathalter mit hoher Wiederholgenauigkeit ($2\text{ }\mu\text{m}$) in die Montageplattform eingesetzt werden. Dieser nimmt wahlweise die Silizium-Substrate oder ein hochpräzises 4x4“-Glassubstrat mit aufgedampften Referenzmarken auf. Das Glassubstrat dient als Referenz für den Genauigkeitsnachweis. Mittels einer zweiten, unterhalb des Glassubstrates angeordneten Kamera kann bei der Flip-Chip-Montage die Platziergenauigkeit der Bauelemente durch das Glas hindurch mit dreifacher optischer Vergrößerung automatisiert vermessen werden.

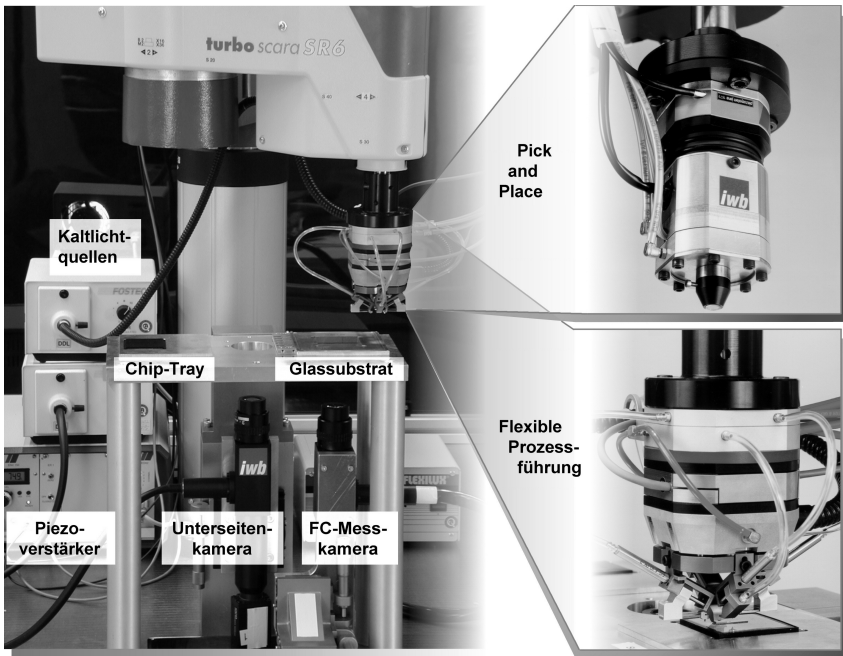


Bild 6.5: Aufbau der Pilotanlage

6.2.2 Inbetriebnahme und Einrichten der Montagewerkzeuge

Vor dem Montageprozess ist auch bei der relativen Positionierung eine a-priori-Kalibrierung⁵⁷ des Systems notwendig, die sich jedoch gegenüber der heute vorwiegend eingesetzten Positionierung in Absolutkoordinaten aufgrund der geringeren Zahl der Kalibrierparameter deutlich vereinfacht (vgl. Kap. 3.2). Zudem ist es ausreichend, die Kalibrierdaten nur näherungsweise zu bestimmen, da die Güte der Kalibrierung bei der Positionierung im geschlossenen Regelkreis mit Bildverarbeitung keinen Einfluss auf die Montagegenauigkeit hat. Sie wirkt sich lediglich auf die Zyklus-

⁵⁷ Für das Verständnis der Kalibrierung sei auf das Kapitel 3.2 verwiesen, in dem die theoretischen Zusammenhänge bei absoluter und relativer Positionierung sowie deren Auswirkungen auf die Kalibrierung detailliert dargestellt sind.

zeit aus, indem sie die Anzahl der Mess- und Korrekturschritte bestimmt (vgl. Bild 3.3), die zum Erreichen der geforderten Füge­toleranz notwendig sind⁵⁸.

Die Kalibrierung beinhaltet die experimentelle Bestimmung der in Kapitel 3.2.2 hergeleiteten Rotationsmatrix ${}^V\mathbf{R}_T$ (Gleichung 3.4), die die Transformation der in Visionkoordinaten gemessenen Lageabweichung in Toolkoordinaten für die Lagekorrektur beschreibt. Diese Matrix enthält neben dem Verdrehwinkel α zwischen Vision- und Toolkoordinatensystem (vgl. Bild 3.2) implizit auch den Skalierungsfaktor γ für die Umrechnung der Pixelwerte in die entsprechenden Steuergrößen (Roboter: mm; Piezoantrieb: Volt) der Lagekorrekturbewegung. Bei der Grob-/Feinpositionierstrategie werden die Toolkoordinaten neben dem Roboterkoordinatensystem für die Grobpositionierung zusätzlich durch das Koordinatensystem des werkzeugintegrierten Piezo-Feinpositioniermoduls repräsentiert. Damit sind folgende Kalibrierparameter zu bestimmen, Tabelle 6.2:


	Grobpositionierung mit dem Roboter	Feinpositionierung mit dem Piezoantrieb
Rotationsmatrix 	${}^V\mathbf{R}_R = \gamma_R \begin{bmatrix} \cos \alpha_R & -\sin \alpha_R \\ \sin \alpha_R & \cos \alpha_R \end{bmatrix}$	${}^V\mathbf{R}_P = \gamma_P \begin{bmatrix} \cos \alpha_P & -\sin \alpha_P \\ \sin \alpha_P & \cos \alpha_P \end{bmatrix}$
Kalibrierparameter		
Skalierungsfaktor	γ_R [mm/Pixel]	γ_P [mm/Volt]
Verdrehwinkel	α_R : Winkel zwischen Vision- und Roboterkoordinatensystem	α_P : Winkel zwischen Vision- und Piezokoordinatensystem

Tabelle 6.2: Zusammenstellung der Kalibrierparameter; die Indizes R und P beschreiben das Roboter- und das Piezokoordinatensystem

Bei der Bestimmung der Parameter wird für beide Werkzeuge ähnlich vorgegangen. Zur Kalibrierung des Roboterkoordinatensystems auf das Visionkoordinatensystem (Parameter γ_R und α_R) wird jeweils vor und nach der Durchführung einer Roboterbewegung in positiver x-Richtung ein Bild eines ortsfesten Referenzobjekts (z.B. Fotodiode oder Substratstrukturen) mit der Werkzeugkamera aufgenommen und ausge-

⁵⁸ Bei ungenauen Startwerten für die Kalibrierung kann der Montagevorgang beschleunigt werden, indem die Kalibrierfehler durch die wiederholte Lagemessung während des iterativen Positionierungsvorganges erfasst und zur Verbesserung der Kalibrierdaten herangezogen werden.

wertet. Bei bekanntem, programmiertem Fahrweg Δx_R des Roboters lassen sich aus den Visionkoordinaten des Referenzobjekts $P_1(x_{v1}, y_{v1})$ vor und $P_2(x_{v2}, y_{v2})$ nach der Bewegung der Skalierungsfaktor γ_R [mm/Pixel] und der Verdrehwinkel α_R zwischen Roboter- und Visionkoordinatensystem berechnen (Bild 6.6).

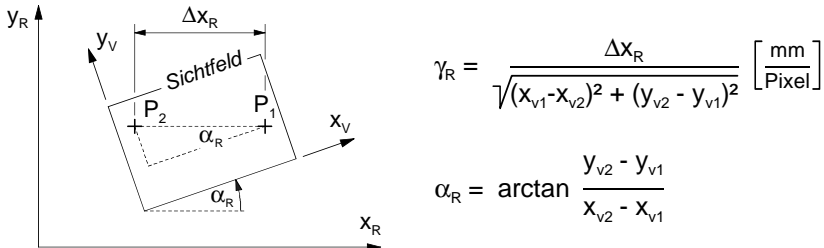


Bild 6.6: Zur Bestimmung der Kalibrierparameter

Analog wird zur Ermittlung der Parameter γ_P und α_P für die Transformation zwischen Vision- und Piezokoordinatensystem verfahren, wobei die Referenzbewegung vor und nach der Bildaufnahme des Objektes mit dem Piezoantrieb durchgeführt wird. Aufgrund ihres unterschiedlichen kinematischen Aufbaus unterscheidet sich die Vorgehensweise für die beiden Werkzeuge in Bezug auf das Referenzobjekt. Während bei dem Pick-and-Place-Werkzeug wiederum ein ortsfestes Referenzobjekt (z.B. Substrat) zum Einsatz kommt, werden bei dem flexiblen Werkzeug Bildaufnahmen des Greifers vor und nach der Piezobewegung zur Parameterbestimmung ausgewertet.

6.3 Montageablauf und Versuchsergebnisse

6.3.1 Klebstoffauftrag

Vor dem Fügen der Bauelemente muss der Leitklebstoff auf das Substrat aufgetragen werden. Dies kann, wie in Kap. 2.2.4 erläutert, durch Dippen oder Stempeln erfolgen. Das Dippen kann mit dem Pick-and-Place-Werkzeug durchgeführt werden. Mit dem multifunktionalen Werkzeug ist sowohl Dippen als auch Stempeln möglich.

Der für diesen Prozess entwickelte Stempel weist vier erodierte Spitzen auf, um die vier Klebstoffpunkte simultan zu applizieren. Bild 6.7 zeigt den Prozess und das gefertigte Bauelement. Die Klebstoffpunkte haben einen Durchmesser von ca. 220 μm .

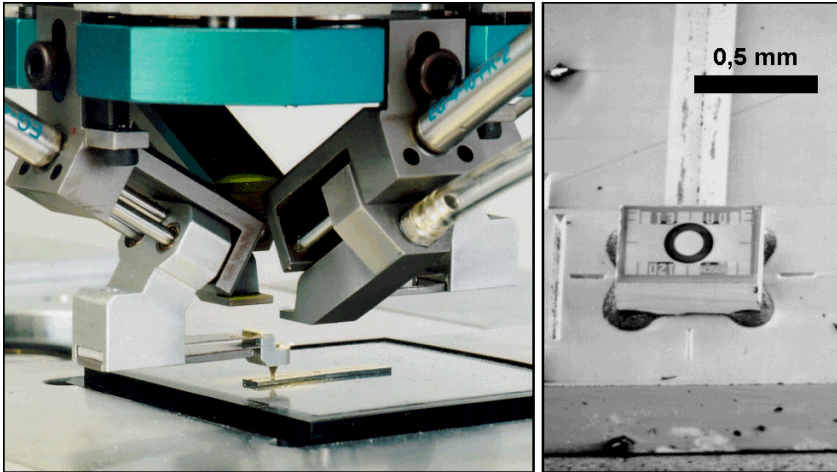


Bild 6.7: Füge-technik bei der Montage der Fotodiode; links: Stempeln von Leitklebstoff mit dem multifunktionalen Roboterwerkzeug; rechts: REM-Aufnahme der montierten Diode in 40-facher Vergrößerung

Beim thermischen Aushärten (Curing) des Klebstoffes ist mit einem sehr geringen Wegdriften des Bauelementes zu rechnen. Untersuchungen haben gezeigt, dass dieses unterhalb von $1\ \mu\text{m}$ liegt (JEREMIAS 1998).

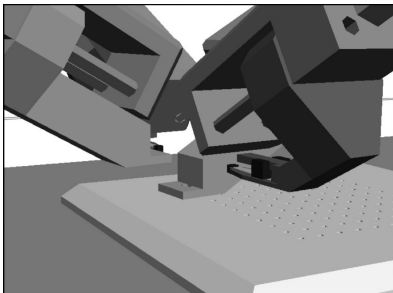
6.3.2 Zeitanalyse des Montageprozesses

In Bild 6.8 ist der Positionierablauf anhand einer Simulation der Flip-Chip-Montage der Laserdiode mit dem multifunktionalen Roboterwerkzeug dargestellt. Die Flip-Chip-Montage erfordert gegenüber der Montage der oberseitenstrukturierten Fotodiode zusätzliche Verfahrensschritte zur Lageerkennung der Strukturen auf der Bauteilunterseite und stellt damit den technologisch aufwendigeren Prozess dar. Dem betrachteten Ablauf liegt die in Bild 3.11 hergeleitete Positionierstrategie 3.2 zugrunde. In den Versuchen werden die Flip-Chip-Bauelemente bereits geflippt, d.h. mit den Strukturen nach unten in einem Chip-Tray bereitgestellt.

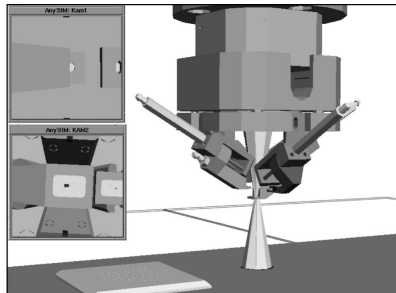
Die in Bild 6.8 angegebenen Montagezeiten für eine Pick-and-Place-Sequenz wurden experimentell aus Versuchen mit der Pilotanlage gewonnen. Demnach beträgt die durchschnittliche Taktzeit für die Flip-Chip-Montage ca. 9,3 Sekunden.

In den meisten Fällen war ein Korrekturzyklus für die Feinpositionierung des Bauteils ausreichend. Ein weiterer Zyklus (Wiederholung der Ablaufschritte 6.3 und 6.4 in Bild 6.8) erhöht die Montagezeit um 0,45 Sekunden.

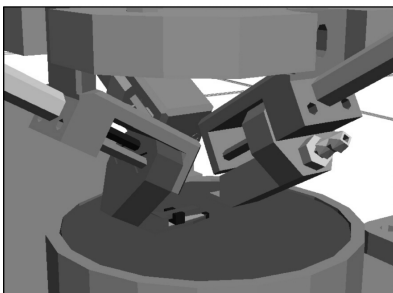
Einsparpotentiale ergeben sich durch Verwendung einer zusätzlichen stationären Kamera über der Pick-Position, die eine Parallelisierung der Lagebestimmung des Bauelementes im Chip-Tray ermöglicht, sowie das Fügen ohne Kraftüberwachung mit passivem Toleranzausgleich (vgl. S. 124). Dadurch kann die Zykluszeit um ca. 17 Prozent reduziert werden.



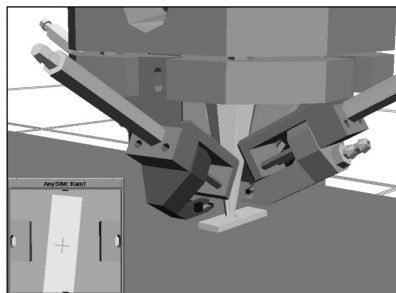
- | | |
|---|----------|
| 1. Pick-up | t (sec.) |
| 1.1 Lagemessung Bauteil * | 0,15 |
| 1.2 Lagekorrektur mit Roboter | 0,5 |
| 1.3 Sauggreifer einschieben und Bauteil aufnehmen | 0,2 |
- * Flip-Chip liegt bereits geflippt im Chip-Tray



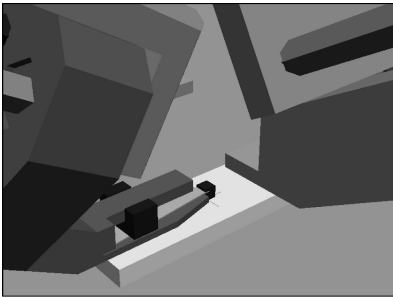
- | | |
|--|----------|
| 2. Optische Zentrierung (relativ) | t (sec.) |
| 2.1 Über Unterseitenkamera fahren | 0,8 |
| 2.2 Relativmessung Flip-Chip-Strukturen zu Greifermarken | 0,3 |



- | | |
|-------------------------------|----------|
| 3. Klebstoffaufnahme | t (sec.) |
| 3.1 Über Klebstofffilm fahren | 0,5 |
| 3.2 Stempel eintauchen | 0,3 |



- | | |
|---------------------------------------|----------|
| 4. Grobpositionierung | t (sec.) |
| 4.1 Über Substrat fahren | 0,9 |
| 4.2 Lagemessung Substrat | 0,25 |
| 4.3 Grobkorrektur (x,y,φ) mit Roboter | 0,5 |



5. Klebstoff stempeln	t (sec.)
5.1 Stempel einschieben	0,1
5.2 Klebstoff auf Substrat applizieren	0,8



6. Feinpositionierung	t (sec.)
6.1 Lagemessung Substrat	0,25
6.2 Greifer in Messpos. einschieben	0,1
6.3 Messung Greifermarken & Kalkulation Lageabweichung	0,3
6.4 Feinkorrektur (x,y) mit Piezo	0,15
6.5 Bauteil kraftgeregelt fügen	1,6
6.6 (Zurück zur Pick-Position [1.1])	1,6

Bild 6.8: Ablauf der Flip-Chip-Montage mit anteiligen Zeiten der Einzelschritte

Bei der Montage der oberseitenstrukturierten Fotodiode entfällt die optische Zentrierung des Bauelementes über der Unterseitenkamera, wodurch ca. weitere 12 Prozent der Zykluszeit eingespart werden können.

6.3.3 Genauigkeitsnachweis

Für den Genauigkeitsnachweis werden die Bauelemente auf das Glassubstrat positioniert. Die Lage- und Formgenauigkeit der Referenzmarken auf dem Glas ist besser als $0,5\ \mu\text{m}$. Eine Anordnung von jeweils vier Referenzmarken, die außerhalb der Fläche des positionierten Bauelementes angeordnet sind, repräsentiert die Sollposition auf dem Glassubstrat.

6.3.3.1 Positionierung oberseitenstrukturierter Bauelemente

In diesem Versuch wurde die Genauigkeit bei der Montage von oberseitenstrukturierten Bauelementen mit dem Pick-and-Place-Werkzeug bestimmt. Die Lagebestimmung der Montageobjekte mittels Bildverarbeitung wurde nach dem Verfahren der Boundary Analysis (vgl. S. 136) durchgeführt.

Für den Nachweis der Gesamtgenauigkeit wurden 30 Fotodioden auf das Glassubstrat positioniert und durch eine dünne, transparente Adhäsionsfolie auf dem Glas

gegen Verrutschen gesichert. Anschließend wurde der Substrathalter mit dem Glassubstrat aus der Montageplattform entnommen und die Abweichung der tatsächlichen Bauteilposition von der vorgegebenen Sollposition auf dem Substrat unter einem Leitz-Messmikroskop vermessen.

Bild 6.9 zeigt das Ergebnis der Positionierungsversuche. Beim vollständigen Montageablauf wurde eine Positioniergenauigkeit von $\pm 7,6 \mu\text{m}$ (3σ) in der x-Richtung und $\pm 5,8 \mu\text{m}$ (3σ) in der y-Richtung erreicht⁵⁹.

Bei diesen Werten ist zu berücksichtigen, dass die Vermessung einer größeren Stichprobe unter dem Mikroskop sehr aufwendig und aufgrund der Akkommodation des Auges mit einem subjektiven Fehler behaftet ist. Wiederholungsmessungen an einem Referenzobjekt haben gezeigt, dass der Messfehler bis zu $\pm 1,5 \mu\text{m}$ betragen kann.

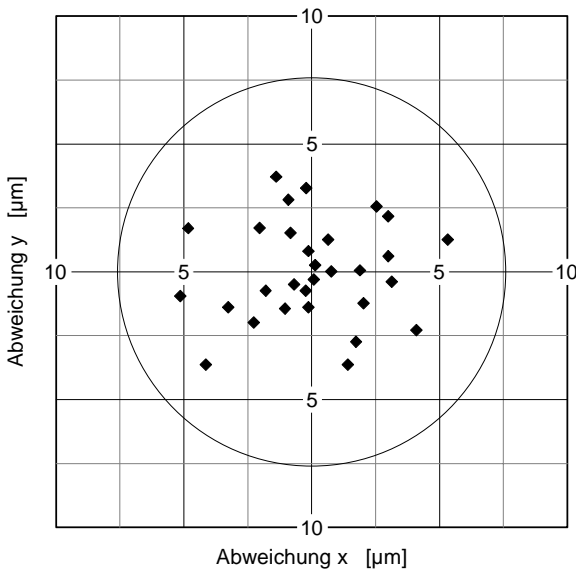


Bild 6.9: Positioniergenauigkeit bei der Montage oberseitenstrukturierter Bauelemente

⁵⁹ Die Angabe der Positioniergenauigkeit bezieht sich auf die 3-fache Standardabweichung (3σ).

6.3.3.2 Positionierung von Flip-Chip-Bauelementen

Ein weiterer Versuch wurde zur Ermittlung der Genauigkeit bei der Montage von Flip-Chip-Bauelementen mit dem multifunktionalen Roboterwerkzeug durchgeführt. Die Bildverarbeitung erfolgte hierbei auf der Basis von Mustererkennung.

Entsprechend dem in Bild 6.8 dargestellten Verfahrensablauf, jedoch ohne den Klebprozess, wurden 50 Flip-Chip-Bauelemente relativ zu den Marken des Glassubstrates feinpositioniert. Nach jedem Positionierzyklus wurde mit der unterhalb der Montageplattform angeordneten Messkamera (vgl. Bild 6.5) die Abweichung der Flip-Chip-Strukturen von der Sollposition auf dem Substrat bestimmt, Bild 6.10. Die mit dem Prototypenwerkzeug erreichte Positioniergenauigkeit lag bei $\pm 7,9 \mu\text{m}$ (3σ) in der x-Richtung und $\pm 6,7 \mu\text{m}$ (3σ) in der y-Richtung.

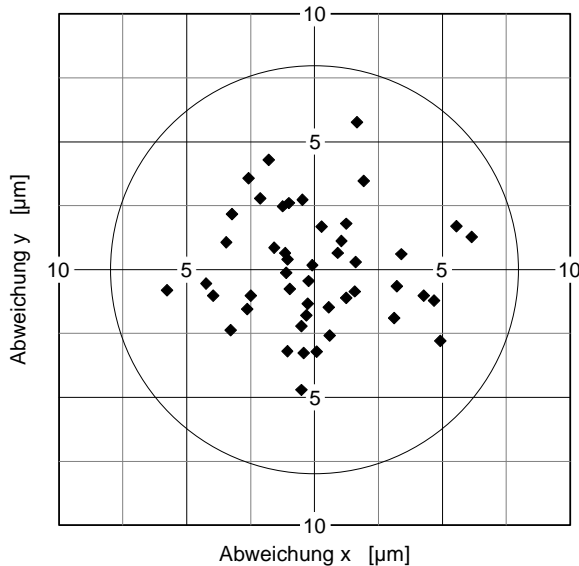


Bild 6.10: Positioniergenauigkeit bei der Flip-Chip-Montage

6.4 Bewertung

Abschließend wird, basierend auf dem beschriebenen Anwendungsbeispiel, der technische und wirtschaftliche Nutzen der entwickelten Verfahren dargestellt.

6.4.1 Technischer Nutzen

Die Entkopplung der sich mit fortschreitender Miniaturisierung verschärfenden Montagetoleranzen von dem mit zunehmenden Präzisionsanforderungen drastisch steigenden Investitionsaufwand für Positioniersysteme ist für eine kosteneffiziente, automatisierte Mikromontage unumgänglich. Die Versuche verdeutlichen, dass durch den Einsatz spezieller Positionierstrategien eine hohe Montagegenauigkeit auch mit vergleichsweise einfacher und damit kostengünstiger Montageausrüstung erreicht werden kann.

Die mit den feinpositionierbaren Roboterwerkzeugen erreichte Montagegenauigkeit von etwa $\pm 8 \mu\text{m}$ liegt im Bereich kapitalintensiver Präzisionspositioniersysteme (Die-Bonder) für die Chipmontage in der Halbleitertechnik (vgl. Kap. 2.3.2). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die für den Genauigkeitsnachweis eingesetzten Versuchswerkzeuge noch einen prototypenhaften Charakter aufweisen. Sie werden derzeit im Rahmen einer industriellen Erprobung konstruktiv überarbeitet. Durch diese Maßnahmen und durch eine Optimierung der Bildverarbeitungsalgorithmen erscheinen zukünftig Montagetoleranzen unterhalb $\pm 5 \mu\text{m}$ realisierbar.

Präzisionspositioniersysteme der Halbleitertechnik bieten zwar prinzipiell die für die Mikrosystemtechnik erforderlichen Genauigkeiten, sind jedoch hinsichtlich ihres Anwendungsbereiches zu stark spezialisiert. Dagegen ist mit den entwickelten Werkzeugen eine flexible Montage von Mikrosystemen in mehreren Ebenen (2,5D-Montage), bei unterschiedlichen Fügerichtungen oder sogar im Raum (bei Verwendung eines handelsüblichen Sechssachsroboters) möglich.

Weiterhin ist der Einsatzbereich der erarbeiteten Positionierstrategien nicht nur auf die Handhabung und Montage mikroskopischer Halbleiterbauelemente beschränkt. Die in Kapitel 3.3.1 vorgenommene Klassifizierung von Montageszenarien ist vielmehr als Abstraktion zu verstehen, die eine Übertragbarkeit der Strategien auch auf nicht halbleiterbasierte Mikrosysteme gewährleistet. Ein Beispiel ist die Anwendung der Positionierstrategien auf die Montage miniaturisierter Zahnräder eines Funkarmbanduhrgetriebes (Bild 6.11). Diese Montageaufgabe wird durch das Montageszenario 2. Ordnung (vgl. Bild 3.5) charakterisiert, da das zu fügende Zahnrad bei der Feinpositionierung den Fügeort, die Lagerstelle in der Uhrwerksplatte, verdeckt. Die Lösung dieser Aufgabe kann demzufolge durch die Strategien des Bildes 3.10 erfolgen.

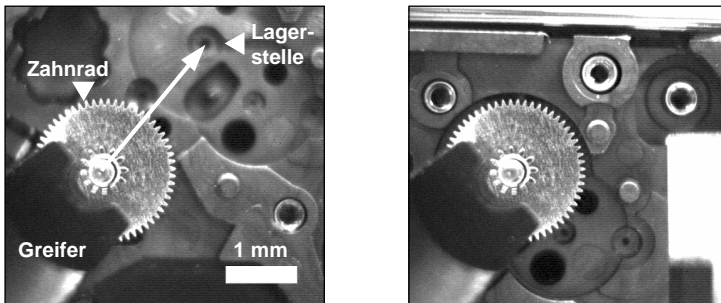


Bild 6.11: Übertragung der Positionierstrategie 2.2.2 (vgl. Bild 3.10) auf die Montage von Mikrogetrieben; links: Grobpositionierung, rechts: Feinpositionierung (Beobachtung des Montageprozesses mit integrierter Werkzeugoptik)

6.4.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Eine wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Strategien ist exemplarisch für das Automatisierungskonzept mit Scara-Roboter und feinpositionierbarem Werkzeug (vgl. Bild 6.5) anhand der Flip-Chip-Montage in der Form einer statischen Kostenvergleichsrechnung möglich.

Dabei werden die spezifischen Montagekosten für einen Positionierzyklus mit dem feinpositionierbaren Roboterwerkzeug ermittelt und denen eines konventionellen Die-Bonders der Genauigkeitsklasse $\pm 12 \mu\text{m}$ gegenübergestellt. Der prinzipielle Aufbau des hier betrachteten Die-Bonders kann Bild 2.6 (unten) entnommen werden. Der wirtschaftliche Vergleich ist zulässig, da Erfahrungswerte eines industriellen Anwenders für einen nahezu identischen Prozess auf dem Diebonder vorliegen. Auch der Die-Bonder entnimmt die bereits geflippten Bauelemente einem Chip-Tray, führt eine Lageerkennung über einer Unterseitenkamera durch und positioniert sie nach der Lageerkennung des Substrats in den zuvor per Stempel aufgetragenen Leitleber. Für diesen Zyklus werden ca. 4,5 Sekunden benötigt. Demgegenüber steht eine durchschnittlich benötigte Zeit von 9,3 Sekunden für einen Positionierzyklus mit dem Roboterwerkzeug, die in den Versuchen mit der Pilotanlage ermittelt wurde (Kap. 6.3.2).

Für die Roboterzelle werden - basierend auf der Konfiguration der Pilotanlage - folgende Investitionskosten veranschlagt:

Scara-Roboter	54.000,-
Montagewerkzeug mit Optik, Piezoaktorik und Kraftsensor	16.000,-
Bildverarbeitungssystem	30.000,-
Unterseitenkamera und Beleuchtungseinrichtungen	9.000,-
Kraftsignalauswertung auf Prozesssteuerungsbaustein	10.000,-
Piezo-Verstärker	10.000,-
Gestell und Schutzeinrichtungen	22.000,-
Gesamt	151.000,-

Die Investitionskosten für den Die-Bonder betragen 700.000 DM. Davon fließen jedoch nur 500.000 DM⁶⁰ in die Wirtschaftlichkeitsrechnung ein, da die Kosten für periphere Einrichtungen (z.B. für ein Lineartransfersystem) ausgeklammert bleiben, um eine hinsichtlich der Ausstattung vergleichbare Kostenbasis mit der betrachteten Pilotanlage zu schaffen.

Die während der Nutzungsdauer anfallenden Kosten setzen sich im Wesentlichen aus folgenden Faktoren zusammen:

- ♦ Kapitalkosten: kalkulatorische Abschreibung, kalkulatorischer Zins
- ♦ Betriebskosten (im Reinraum)
- ♦ Anteilige Personalkosten (Bedienung, Nachfüllen der Bauelemente)
- ♦ Instandhaltungskosten: Materialkosten, Personalkosten

Die Betriebskosten werden maßgeblich durch den Einsatz der Systeme unter Reinraumbedingungen beeinflusst. So sind, bezogen auf einen Quadratmeter Fläche, Reinraumkosten von ca. 1.100,- DM pro Jahr anzusetzen⁶¹. Darin enthalten sind Energiekosten für die Luftaufbereitung und Klimatisierung, Filterkosten sowie Raumkosten. Bei einer Stellfläche von jeweils etwa 5 m² (unter Berücksichtigung der Zugänglichkeit) ergeben sich damit für beide Systeme Reinraumkosten von 5.500,- DM pro Jahr.

⁶⁰ Angenommene Kosten für das Grundgerüst, bestehend aus Achssystem, Bondkopf, Kameras, Vision-System und Beleuchtungseinrichtungen

⁶¹ Erfahrungswerte eines industriellen Betreibers für einen Reinraum der Klasse 10.000 mit einer Gesamtfläche von 250 m²

Bei der Ermittlung der Kosten für das Bedienpersonal ist zu berücksichtigen, dass die reine Überwachung der Anlage inklusive Nachfüllen der Bauelemente keine ganze Arbeitskraft, sondern nur einen gewissen Anteil der möglichen Arbeitsleistung erfordert. Demnach ist nur ein Teilbetrag des vollen Personalstundensatzes den Bedienkosten für die Anlage zuzuordnen. Als anteiliger Personalstundensatz werden für die weiteren Betrachtungen ein Betrag von 8,- DM für die Roboterzelle und ein Betrag von 16,- DM für den Die-Bonder zugrunde gelegt. In der Differenz spiegelt sich die gegenüber der Roboterzelle (387 BE/h) höhere Produktivität des Die-Bonders (800 BE/h) wider, die ein entsprechend häufigeres Nachfüllen der Bauelemente bedingt.

Weiterhin ist anzumerken, dass sich die Darstellungen lediglich auf die reinen Montagekosten beziehen, die Montagekosten quasi isoliert vom restlichen betriebswirtschaftlichen Umfeld betrachtet werden. Ferner werden die durch das organisatorische Umfeld bedingten Mehrkosten (nichtproduktive Stillstandszeiten, z.B. Rüstzeiten, Ausfall etc.) sowie die Entwicklungskosten vernachlässigt. Nach WARNECKE U.A. (1990) kann somit folgendes Kalkulationsschema aufgestellt werden (Tabelle 6.3):

			Roboterzelle	Die-Bonder
Investitionskosten	I	[DM]	151.000,-	500.000,-
Nutzungsdauer	T _n	[Jahre]	5	5
Kalk. Abschreibung	AB = I/T _n	[DM/Jahr]	30.200,-	100.000,-
Zinssatz	Z	[%]	10	10
Kalkulatorischer Zins	KZ = Z · I/2	[DM/Jahr]	7.550,-	25.000,-
Betriebskosten im Reinraum (Stellfläche 5 m²)	R	[DM/Jahr]	5.500,-	5.500,-
Instandhaltungskosten	W = 0,07 · I	[DM/Jahr]	10.570,-	35.000,-
Fixkosten	F = AB+KZ+R+W	[DM/Jahr]	53.820,-	165.500,-
Nutzungszeit (220 Arbeitstage/Jahr x 16 h/Tag)	T _a	[h/Jahr]	3.520	3.520
Maschinenstundensatz	M = F/T _a	[DM/h]	15,29	47,02
Anteiliger Personalstundensatz	P	[DM/h]	8,-	16,-
Gesamtstundensatz	G = M+P	[DM/h]	23,29	63,02
Spez. Montagekosten pro Sekunde	S = G/3600	[DM/sec]	0,0065	0,0175
Zykluszeit Flip-Chip	t	[sec/BE]	9,3	4,5
Theoret. Kapazität	L = 3600/t	[BE/h]	387	800
Stückkosten (pro BE)	B = t · S	[DM/BE]	0,060	0,079

Tabelle 6.3: Kalkulation der Stückkosten (Montagekosten pro Bauelement)

Gemäß dieser Stückkostenabschätzung ist die Montage mittels Roboter und feinpositionierbarem Werkzeugsystem im betrachteten Produktivitätsbereich bis ca. 400 Bauelemente pro Stunde um ca. 24% kostengünstiger als mit einem Präzisions-Die-Bonder.

Vor dem Hintergrund der erläuterten Annahmen darf diese Kalkulation nicht als absolute, quantitative Kostenaussage interpretiert werden. Die Ergebnisse zeigen vielmehr eine deutliche **Tendenz** zu geringeren Stückkosten bei der Roboterzelle und belegen damit, dass die entwickelte Lösung vor allem in der flexiblen Klein- und Mittelserienfertigung eine technologisch **und wirtschaftlich** interessante Alternative zu konventionellen Präzisionspositioniersystemen darstellt.

Ein Nachteil des Roboters ist seine geringe dynamische Steifigkeit, die zu erhöhten Wartezeiten zur Beruhigung von Schwingungen führt. Gelingt es jedoch, die Zykluszeit durch den Übergang auf ein steiferes Handhabungssystem (z.B. Low-Cost-Achssystem) bei vergleichbar geringen Investitionskosten zu reduzieren, so werden Wirtschaftlichkeit und Produktivität weiter erhöht.

6.4.3 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich anmerken, dass sowohl der technische als auch der wirtschaftliche Nutzen positiv bestätigt werden konnte:

- ♦ Hohe Montagegenauigkeit unterhalb $\pm 8 \mu\text{m}$ (3σ), bisher nur mit kapitalintensiven Präzisionspositioniersystemen (Die-Bonder) erreichbar
- ♦ Höhere Flexibilität, z.B. Erweiterbarkeit auf 2,5D- und 3D-Montage (Verwendung eines Sechssachsroboters)
- ♦ Möglichkeit zur Ausdehnung des Einsatzbereichs über die Montage von halbleiterbasierten Mikrosystemen hinaus (vgl. Bild 6.11)
- ♦ Höhere Wirtschaftlichkeit im Bereich kleiner bis mittlerer Stückzahlen

Die Folge ist ein rascher Transfer der erzielten Forschungsergebnisse in die industrielle Anwendung. Derzeit befinden sich die zum Patent angemeldeten Verfahren und Werkzeugsysteme (SCHUTZRECHT 1999B, SCHUTZRECHT 2000A, SCHUTZRECHT 2000B) in der industriellen Erprobung im Rahmen einer Musterfertigung von mikrosystemtechnischen Sensoren aus dem Bereich der Hochfrequenztechnik.

In zukünftigen Entwicklungsarbeiten ist geplant, den Modulansatz konsequent auf die Zellenebene zu übertragen. Damit entsteht ein modulares Mikromontagesystem, des-

sen Grundgerüst eine kostengünstige Basisplattform bildet, die aus einer schnellen und schwingungssteifen Handhabungskinematik, jedoch ohne besondere Maßnahmen zur Erhöhung der Präzision, besteht (Bild 6.12).

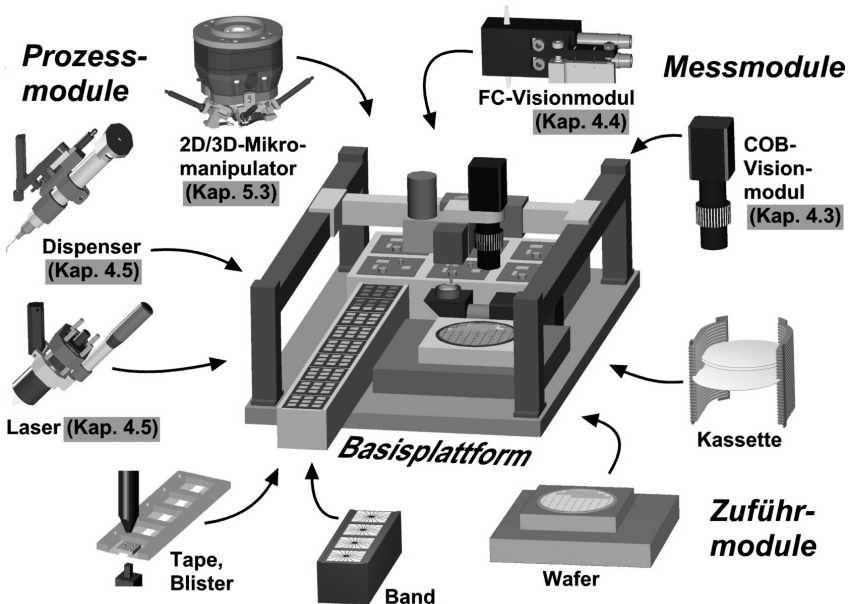


Bild 6.12: Vision eines modularen Mikromontagesystems mit Beispielmödule

Über applikationsspezifische Module wird diese Basisplattform

- ♦ genauigkeitsskalierbar (Grob-/Feinpositionierung mit Mikromanipulatoren),
- ♦ geschwindigkeitsskalierbar (verschiedene Mess- und Positionierstrategien)
- ♦ und prozessflexibel (Prozessmodule wie Dispenser, Laser etc.; Messmodule für Flip-Chip, Chip on Board etc.; 3D-Mikromanipulator für räumliche Montageaufgaben).

Sie kann damit für unterschiedlichste Montageaufgaben aus dem Bereich der Mikrosystemtechnik angepasst werden. Dabei trägt der hohe Wiederverwendungsgrad der Module in verschiedenen Applikationen zur Reduzierung der Entwicklungszeiten und -kosten für das Montagesystem bei.

In Bild 6.12 ist durch Verweise auf die entsprechenden Kapitel dargestellt, in welchen Bereichen die Ergebnisse dieser Arbeit unmittelbar in die Entwicklung dieses Systems einfließen können. Daraus wird ersichtlich, dass vor allem im Bereich der Gestaltung und Integration modularer Zuführsysteme für Mikrobauteile noch Entwicklungsbedarf besteht. Weiterhin sollen die einzelnen Module im Sinne von „plug and produce“ zu einem System konfiguriert werden können, so dass zukünftig der Gestaltung standardisierter Schnittstellen und der Entwicklung von automatischen Selbstkalibrierungs- und Initialisierungsmethoden eine hohe Bedeutung zukommt.

Hervorzuheben ist die Ausbaubarkeit dieses Systemkonzeptes in Bezug auf technologische Trends, die zukünftige Produktentwicklungen beeinflussen. Dazu zählen beispielsweise die Erhöhung der Integrationsdichte zukünftiger Mikrosysteme durch Montage gedünnter Halbleiterchips auf flexible Foliensubstrate sowie durch eine dreidimensionale Aufbautechnologie („Flip Chip on Molded Interconnect Devices - MID“, MICHEL 1999). Das anvisierte modulare Mikromontagesystem kann einen Beitrag zur schnellen Umsetzung derartiger Trends in innovative und marktfähige Produkte leisten.

7 Zusammenfassung

Ausgangspunkt der Arbeit war der bei innovativen Produkten unverkennbare Trend zur Miniaturisierung und die damit verbundenen Herausforderungen bei deren Produktion. Als Kernproblem hat sich die Montage der im Sub-Millimeterbereich liegenden Bauteile herauskristallisiert, die einen bedeutenden Anteil der Herstellkosten eines Mikrosystems verursacht. Sie ist durch hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit und durch eine große Empfindlichkeit filigraner Mikrostrukturen gegenüber Handhabungs- und Montagekräften charakterisiert. Im Unterschied zur klassischen Halbleiter- und Elektronikproduktion sind hybride Mikrosysteme durch eine Vielfalt anwendungsspezifischer Bauelemente gekennzeichnet. Die daraus resultierenden zumeist kleinen Lose erfordern Montagekonzepte, die bei großer Präzision kostengünstig einen hohen Grad an Automatisierung und Flexibilität vereinen.

Die Analyse des Standes der Präzisionspositioniertechnik hat verdeutlicht, dass dieser Bereich ein grundlegendes Defizit an adäquaten Montagetechniken und Automatisierungskomponenten für Mikrosysteme aufweist. Erkennbar ist eine progressive Korrelation des Investitionsaufwandes mit den durch die fortschreitende Miniaturisierung zunehmenden Genauigkeitssanforderungen. Den heute verfügbaren Präzisionspositioniersystemen liegt eine evolutionäre Entwicklungsphilosophie zugrunde, die unter Verwendung einer immer präziseren und aufwendigeren Mechanik und Antriebstechnik auf die Steigerung der Leistungsmerkmale Genauigkeit und Geschwindigkeit zielt. Dies spiegelt sich in den Investitionskosten wider, wodurch der Einsatz dieser Systeme nur bei entsprechend großen Stückzahlen oder sehr hochwertigen Produkten wirtschaftlich vertretbar ist. Hinzu kommt, dass die aus der Halbleiter- und Elektronikproduktion bekannten Positionier- und Montagesysteme nur unzureichend auf die flexible Montage hybrider Mikrosysteme übertragbar sind, da sie auf ein weitgehend standardisiertes und eingeschränktes Bauteilspektrum und auf planare Prozesse ausgerichtet und spezialisiert sind.

Ausgehend von diesen Defiziten wurden in der vorliegenden Arbeit Automatisierungslösungen für eine flexible und kosteneffiziente Montage hybrider Mikrosysteme in kleinen bis mittleren Stückzahlen entwickelt und exemplarisch erprobt. Dabei wurde der Ansatz verfolgt, durch die Konzeption fehlerkompensierender Positionierstrategien den Investitionsaufwand von teurer Präzisionsmechanik zu kostengünstigeren Steuerungs- und Kompensationsmethoden zu verlagern.

Auf der Basis einer analytischen Untersuchung genauigkeitsbegrenzender Einflussfaktoren auf den Positionierprozess wurde ein Grundkonzept für die Positionierung mittels Bildverarbeitung vorgestellt, das die Anforderungen an die Präzision der Me-

chanik durch den Übergang von absoluter zu relativer Positionierung reduziert. Dieses Grundkonzept wurde anhand einer kinematischen Analyse des Positionierablaufs auf problemadäquate Strategien für die Montage hybrider Mikrosysteme erweitert. Grundlegend für die dabei gewählte Vorgehensmethodik ist die abstrakte Strukturierung des Positionierprozesses in elementare Ablaufschritte geringer Komplexität, die in variabler Reihenfolge und Kombination auf verschiedene, charakteristische Montageszenarien anwendbar sind.

In einem weiteren Schritt wurden den einzelnen Ablaufschritten der Positionierstrategien Funktionsmodule zugeordnet, die - entsprechend der jeweiligen Strategie - flexibel zu applikationsspezifischen Automatisierungslösungen konfigurierbar sind. Einen Schwerpunkt nahm dabei die Konzeption und Ausarbeitung der Module ein. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um zwei Optikmodule für die Lagemessung, verschiedene anwendungsspezifische Greif- und Fügemodule, ein piezobasiertes Aktormodul für die Feinpositionierung und ein Sensormodul für die Fügekraftbegrenzung und -überwachung.

Anhand von beispielhaft ausgewählten Modulkombinationen wurde die Umsetzung der Positionierstrategien in sensorgeführte Werkzeug- und Geräteprototypen aufgezeigt. Dabei wurden folgende Richtungen eingeschlagen:

- ♦ Konfiguration eines multifunktionalen Roboterwerkzeuges, das sich flexibel in bestehende Handhabungssysteme integrieren lässt und durch prozessnah integrierte Vision- und Kraftsensorik die Relativpositionierung über die Hauptachsen des Handhabungsgerätes unterstützt
- ♦ Konfiguration von Roboterwerkzeugen mit integriertem Feinpositioniermodul für die kostenminimierte Durchführung anspruchsvoller Mikromontageaufgaben mit flexibel einsetzbaren Low-Cost-Handhabungsgeräten (z.B. Scara-Roboter)
- ♦ Konfiguration eines Positioniersystems mit Strahlteileroptik für die optische Erkennung / Überlagerung und den Abgleich der zu fügenden Bauelementestrukturen direkt in der Montageposition oberhalb des Substrats

Die Erprobung der feinpositionierbaren Roboterwerkzeuge an einem konkreten industriellen Anwendungsbeispiel unterstreicht sowohl den technischen als auch den wirtschaftlichen Nutzen der entwickelten Strategien und Gerätetechnik.

8 Literaturverzeichnis

ALAVI 1998

Alavi, M.: Multifunktionale Mikromontagestation. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg.): Entwicklung und Erprobung von fertigungsgerechten Montage- und Fügeverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen. Teltow, 1998. (Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 60).

ALAVI & BURGER 1997

Alavi, M.; Burger, V.: Aufbau und elektrische Kontaktierung mikromechanischer Drucksensoren. In: Proceedings Micro Engineering. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft, 1997.

AZADEH U.A. 2000

Azadeh, R.; Jung, E.; Aschenbrenner, R.; Reichl, H.: Flipchip-Montage mit konventionellen SMT-Bestückungsautomaten. Productronic 3/2000.

BACHMANN U.A. 1999

Bachmann u.a.: Die Welt der Surface Mount Technology. München: Siemens AG, 1999.

BASTING & ENDERT 1997

Basting, D.; Ender, H.: UV-Laser für die Mikrobearbeitung. F&M 105 (1997) 9, S. 610-612.

BAUER U.A. 1997

Bauer, A.; Novotny, M.; Schwaab, G.; Gramann, U.: Präzisionsdispensen von Leitlebstoff: Erfahrungen im industriellen Umfeld. In: Proceedings Micro Engineering. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft, 1997.

BAUER U.A. 1999

Bauer, G.; Schlenker, D.; Stock, A.; Schünemann, M.; Schäfer, W.: Flexibles Montagesystem für die Feinwerk- und Mikrotechnik. Maschinenmarkt 105 (1999) 18, S. 30-35.

BEHRINGER 1998

Behringer, U.: Kostenreduzierung in der Mikrofertigung. F&M 106 (1998) 3, S. 142-145.

BEHRINGER 1999

Behringer, U.: Lithographie heute und morgen. F&M 107 (1999) 4, S. 57-60.

BERGMANN-SCHAEFER 1993

Bergmann; Schaefer (Begr.): Lehrbuch der Experimentalphysik. 9. Aufl. Berlin: De Gruyter Verlag, 1993. (Optik, Band 3).

BIERHALS U.A. 1999

Bierhals, R.; Cuhls, K.; Hüntrop, V.; Schünemann, M.; Thies, U.; Weule, H.: Wirtschaftliche Potentiale der Miniaturisierung aus industrieller Sicht. Studie im Auftrag des Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg. Karlsruhe: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe (wbk), 1999.

BLANK 1998

Blank, G.: High Speed durch Luftführung. KEM (1998) 8, S. 93-95.

BMBF 1997

BMBF (Hrsg.): Zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands, Aktualisierung und Erweiterung 1997. Bonn, 1997.

BOTTHOF U.A. 1998

Botthof, A.; Claußen, W.; Schütze, A.; Sturm, H.: Innovation durch Mikrointegration - Intelligente Produkte über Systemintegration von Mikro-, Bio- und Nanotechniken. Teltow: VDI/VDE-Technologiezentrum, 1998.

BOY 1998

Boy: Leichter als ein Granulat Korn. SMM (1998) 49, S. 20-23.

BÖTTCHER & MEUSEL 1992

Böttcher, M.; Meusel, E.: Modulare Montagetechnik für Mikrosysteme. Mikroelektronik 6 (1992) 5, S. 274-276.

BRAND 1996

Brand, S.: Piezoelektrische Aktoren in Fertigungssystemen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996. (VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2, Nr. 390).

BRAUNSCHWEILER & WEISENER 1996

Braunschweiler, A.; Weisener, T.: Mikrobearbeitung mit dem Funkenerosionsverfahren am Beispiel einer Zahnringpumpe. In: Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Produktionstechnik für Mikrosysteme. Stuttgart: Fraunhofer IPA-Kongress, 1996.

BUCH & ZEPPENFELD 1998

Buch, S.; Zeppenfeld, A.: Mikrosensoren im Kraftfahrzeug. F&M 106 (1998) 7-8, S. 534-536

BÜTTGENBACH 1994

Büttgenbach, S.: Mikromechanik. Stuttgart: Teubner-Verlag, 1994.

CAMELOT 1997

Camelot Systems Inc. (Hrsg.): Dispensing Technology: Manufacturer's Guide. Haverhill/USA, 1997.

CHOLLET & JACOT 1999

Koelemeijer Chollet, S.; Jacot, J.: Cost Efficient Assembly of Microsystems. MST-News (1999) 1, S. 30-32.

DAENZER & HUBER 1997

Daenzer, W. F.; Huber, F.: Systems Engineering. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1997.

DATACON 1998

Datacon Semiconductor Equipment GmbH (Hrsg.): Multi-Flip-Chip-Diebonder. Radfeld/Österreich, 1998.

DICKMANN U.A. 1998

Dickmann, K.; Gerlasch, K. H.; Jersch, J.; Hildenhagen, J.: Präzisions-Mikrobearbeitung mit Excimerlaser. F&M 106 (1998) 3, S. 138-141.

DIETRICH U.A. 1996

Dietrich, T.; Ehrfeld, W.; Lacher, M.; Speit, B.: Mikrostrukturprodukte aus fotostrukturierbarem Glas. F&M 104 (1996) 7-8, S. 520-524.

DIN 1335

DIN 1335: Technische Strahlenoptik in der Photographie; Zeichen, Benennungen.

DIN 58185

DIN 58185: Optische Übertragungsfunktion; T1 Formelzeichen, Begriffe, mathematische Zusammenhänge.

DÜNN & WURMUS 1999

Dünn, C.; Wurmus, H.: Winzlinge packen und halten – Mikrogreifer aus Glas mit zwei Antrieben. F&M 107 (1999) 1-2, S. 65-66.

EBERHARDT & SCHELLER 1999

Eberhardt, R.; Scheller, T.: Montage mikrooptischer Systeme. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Automatisierte Mikromontage. München: Utz Verlag, 1999. (iwb-Seminarberichte Nr. 44).

ECKERL 1998

Eckerl, K.: Entwicklung des Messobjektives TZ 3. Hutthurm: IB/E Ing.-Büro Klaus Eckerl Optische Systeme & Bildverarbeitung, 1998.

ECKERL & PRENZEL 1994

Eckerl, K.; Prenzel, W. D.: Telezentrische Meßoptik für die digitale Bildverarbeitung. F&M 102 (1994) 5-6, S. 270-273.

EHRFELD & MÜNCHMEYER 1991

Ehrfeld, W.; Münchmeyer, D.: Three-dimensional microfabrication using synchrotron radiation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 303 (1991), S. 523-532.

EHRKE & GABRIEL 1999

Ehrke, H.-U.; Gabriel, M.: Schutzkappe für Mikrosysteme. F&M 107 (1999) 4, S. 74-76.

ESEC 1999

Esec Europe SA (Hrsg.): Micron 2, the high accuracy pick & place system for flip chip and multi chip module assembly. Cham/Schweiz, November 1999.

FISCHER 1997

Fischer, R.: Entwicklung von Greif- und Spannvorrichtungen für die automatisierte Montage von Mikrobauteilen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997. (VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 1, Nr. 292).

FRICK 1994

Frick, O.: Robots for the Precision Engineering Industry. In: Proceedings of the 25th Int. Symposium on Industrial Robots 1994, S. 621-626.

GENGENBACH U.A. 1997

Gengenbach, U.; Engelhardt, F.; Scharnowell, R.: Montagesystem für die Duplexermontage. In: Proceedings Micro Engineering. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft, 1997.

GENGENBACH 1998

Gengenbach, U.: Standardisierung für die Produktionsgerätetechnik für Mikrosysteme. In: Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Produktionstechnik für Mikrosysteme. Stuttgart: Fraunhofer IPA-Kongress, 1998.

GENGENBACH U.A. 1998A

Gengenbach, U.; Engelhardt, F.; Scharnowell, R.: Montagesystem für die Duplexermontage. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg.): Entwicklung und Erprobung von fertigungsgerechten Montage- und Fügevorfahren zum Aufbau von Mikrosystemen. Teltow, 1998. (Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 60).

GENGENBACH U.A. 1998B

Gengenbach, U.; Engelhardt, F.; Ruther, P.; Scharnowell, R.; Seidel, D.: Montage hybrider Mikrosysteme. SMM (1998) 49, S. 16-18.

GERLACH & DÖTZEL 1997

Gerlach, G.; Dötzel, W.: Grundlagen der Mikrosystemtechnik. München: Carl Hanser, 1997.

GESANG U.A. 1997

Gesang, T.; Fastenau, V.; Wulf, A.; Schäfer, H.; Heßland, A.; Hennemann, O.-D.; Kriebel, F.: Industrieller Einsatz von Verbindungstechniken für Mikro-/Millimeterwellenkomponenten, Teilvorhaben Klebtechnik. In: Proceedings Micro Engineering. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft, 1997.

GEßNER U.A. 1994

Geßner, T. u.a.: Mikromechanik für kinetische Sensoren. Abschlussbericht des Verbundprojektes (Förderkennzeichen 13 MV 0150), TU Chemnitz, 1994.

GILLNER 1998

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

GÖTZEN 1998

Götzen, R.: 3D-Strukturen schnell umgesetzt. F&M 106 (1998) 3, S. 134-136.

GRAMANN 1999

Gramann, W.: Industrielle Montage mikrooptischer Halbleiterbauelemente. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Automatisierte Mikromontage. München: Utz Verlag, 1999. (iwb-Seminarberichte Nr. 44).

GREITMANN 1998

Greitmann, G.: Taktile Mikrogreifer mit Auge. In: Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Produktionstechnik für Mikrosysteme. Stuttgart: Fraunhofer IPA-Kongress, 1998.

GROßER & REICHL 1996

Großer, V.; Reichl, H.: Modularisierung von Mikrosystemen. In: Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Produktionstechnik für Mikrosysteme. Stuttgart: Fraunhofer IPA-Kongress, 1996.

GRUTZECK & KIESEWETTER 1996

Grutzeck, H.; Kieseewetter, L.: Greifen mit Kapillarkräften. In: Tagungsband zum 41. Int. wissenschaftliches Kolloquium Illmenau. Illmenau: Technische Universität Illmenau, 1996, Band 1, S. 103-108.

GUYENOT U.A. 1996

Guyenot, V.; Eberhardt, R.; Tittelbach, G.; Risse, S.: Mounting, Cementing and Handling of Microoptical Elements. In: Proceedings SPIE Vol. 2683. Besancon, 1996.

HAFERKORN 1994

Haferkorn, H.: Optik – physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen. 3. Aufl. Leipzig: Barth Verlagsgesellschaft, 1994.

HANKES 1998

Hankes, J.: Sensoreinsatz in der automatisierten Mikromontage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998. (VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2, Nr. 459).

HECHT 1991

Hecht, E.: Optik. Addison-Wesley Verlag, 1991.

HECKELE U.A. 1997

Heckele, M.; Bacher, W.; Blum, H.; Müller, L.; Ünal, N.: Heißprägen von Mikrostrukturen als Fertigungsprozeß. F&M 105 (1997) 9, S. 598-602.

HENSCHKE 1994

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

HENTSCHEL & MÜLLER 1997

Hentschel, K.; Müller, M.: Telezentrische Objektive für die Bildverarbeitung. F&M 105 (1997) 10, S. 738-740.

HERR 1998

Herr, R.: 5-Achs-Präzisionspositioniersystem. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg.): Entwicklung und Erprobung von fertigungsgerechten Montage- und Fügeverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen. Tel-tow, 1998. (Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 60).

HESELBACH & PITTSCHELLIS 1995

Hesselbach, J.; Pittschellis, R.: Greifer für die Mikromontage. wt-Produktion und Management 85 (1995), S. 595 - 600.

HESELBACH & PITTSCHELLIS 1996

Hesselbach, J.; Pittschellis, R.: Miniaturgreifer für die Mikromontage. In: Tagungsband zum 41. Int. wissenschaftliches Kolloquium Illmenau. Illmenau: Technische Universität Illmenau, 1996, Band 1, S. 115-120.

HESELBACH & POKAR 1999

Hesselbach, J.; Pokar, G.: Handhabungstechnik für die Mikromontage. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Automatisierte Mikromontage. München: Utz Verlag, 1999. (iwb-Seminarberichte Nr. 44).

HESELBACH U.A. 2000

Hesselbach, J.; Helm, M.; Kerle, H.; Krefft, M.; Reinhart, G.; Jacob, D.; Höppner, J.; Schmid, H. A.: Ein neuer Parallelroboter mit Spreizbandantrieben. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Arbeitsgenauigkeit von Parallelkinematiken. Chemnitz: Wissenschaftliche Skripten, 2000, S. 397-404. (Berichte aus dem IWU Band 7).

HEUBERGER 1989

Heuberger, A. (Hrsg.): Mikromechanik – Mikrofertigung mit Methoden der Halbleiterfertigung. Berlin: Springer, 1989.

HEUBERGER 1996

Heuberger, A.: Der weite Weg zur Mikrosystemtechnik. Spektrum der Wissenschaft (1996) Dossier 4 Mikrosystemtechnik, S. 98-101.

HOFFMANN 1998

Hoffmann, M.: Wirtschaftliche Montage von Mikrosystemen - Konzepte für die automatisierte Montage von Funkarmbanduhren. In: Tagungsband Deutscher Montagekongress. München, Landsberg: mi-Verlag, 1998.

HOLLIS & HAMMER 1992

Hollis, R. L.; Hammer, R.: The Fine Positionier. Industrial Robot Vol. 19 (1992) 5, S. 22-25.

HÖHN U.A. 1998

Höhn, M.; Reiländer, U.; Robl, C.; Blum, S.; Schäfer, B.; Krimi, S.: Mikropositioniereinrichtung für die Präzisionsmontage. Abschlussbericht des Teilprojektes 5 des Bayerischen Forschungsverbundes Mikrosystemtechnik. München: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München, 1998.

HÖHN & ROBL 1999

Höhn, M.; Robl, C.: Qualification of Standard Industrial Robots for Micro-Assembly. In: Proceedings of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation. Detroit, 1999, S. 3085-3090.

HÖHN 1999

Höhn, M.: Sensorbasierte Werkzeuge für die Mikromontage. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Automatisierte Mikromontage. München: Utz Verlag, 1999. (iwb-Seminarberichte Nr. 44).

HÜMMLER 1998

Hümmeler, J.: Mikroproduktionstechnik im Großkammer-Rasterelektronenmikroskop: Analyse der Fertigung und der Montage. Aachen: Shaker-Verlag, 1998.

ILLING 1996

Illing, M.: Foundry Service – Oberflächenmikromechanik. In: Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Produktionstechnik für Mikrosysteme. Stuttgart: Fraunhofer IPA-Kongress, 1996.

ILLING U.A. 1997

Illing, M.; Offenberger, M.; Vossenberger, H.G.; Münzel, H.; Marek, J.: Industrielle Foundry für Oberflächenmikromechanik. In: Proceedings Micro Engineering. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft, 1997.

JACOB & HÖHN 2000

Jacob, D.; Höhn, M.: Assembly of semiconductor based microsystems with sensor guided tools. In: Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid. Nürnberg, 2000.

JENDRITZA 1995

Jendritza, D. J. (federführender Autor): Technischer Einsatz neuer Aktoren. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 1995.

JENOPTIK 1998

Jenoptik GmbH (Hrsg.): Geometrietreuer Bildeinzug und Bildverarbeitung - Komponenten-katalog. Jena, 1998.

JEREMIAS 1998

Jeremias, M.: Mikromontage von Mikrowellen- und Millimeterwellenmodulen. In: Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Produktionstechnik für Mikrosysteme. Stuttgart: Fraunhofer IPA-Kongress, 1998.

KEFERSTEIN & BRAAS 1989

Keferstein, C. P.; Braas, J.: Präzisionsmontage und Qualitätsprüfung, flexibel mit Roboter und Bildverarbeitung. QZ Qualität und Zuverlässigkeit 34 (1989) 9, S. 469-472.

KERDEL U.A. 1995

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

KOEK 1998

Koek, B.: Herausforderungen der Halbleiter-Lithographie. F&M 106 (1998) 9, S. 636-638.

KOPP 1997

Kopp, H.: Ein bildverarbeitungsbasierendes Verfahren zur dreidimensionalen Präzisionslageerkennung mikrooptischer Bauteile. In: Proceedings Micro Engineering. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft, 1997.

KROY 1992

Kroy, W.: Mikrosystemtechnik auf dem Weg in neue Dimensionen und Anwendungen. Mikroelektronik 6 (1992) 6, S. 336-341.

LAUX 1997

Laux, T.: Piezo-Aktuatoren mit großem Stellweg in aktiven Lagerungen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997. (VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 634).

LECARPENTIER 1999

Lecarpentier, G.: Production Flip Chip Bonding at 1 μm . In: Vortrag auf der SMT/ES&S/Hybrid. Nürnberg, 1999.

LENHARDT 1997

Lenhardt, K.: Ein Bildaufnahmesystem für die Photogrammetrie im Makrobereich. In: Proceedings Micro Engineering. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft, 1997.

LENZ 1987

Lenz, R.: Linsenfehlerkorrigierte Eichung von Halbleiterkameras mit Standardobjektiven für hochgenaue 3D-Messungen in Echtzeit. In: Informatik Fachberichte 149, Proc. 9. DAGM-Symposium. Braunschweig, 1987, S. 212-216.

LÖFFLER 1993

Löffler, H.: Linearantriebe und Aktuatoren. F&M 101 (1993) 11-12, S. 449-455.

MA 1999

Ma, K.: Greif- und Fügekraftmessung mit faseroptischen Sensoren in der Mikromontage. Dissertation TU Braunschweig. Essen: Vulkan-Verlag, 1999.

MENZ 1995

Menz, W.: Physikalische Mikrokomponenten für die Mikrosystemtechnik. In: Tagungsband zum 2. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 1995, S. 11-14.

MENZ 1997

Menz, W.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. Weinheim: VCH-Verlag, 1997.

MICHAELI U.A. 1998

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

MICHEL 1999

Michel, B. (Hrsg.): IZM Annual Report 1998. Berlin: Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration, 1999.

MOCTEZUMA 1996

Moctezuma, J. L.: Ein durchgängiges System zur computer- und roboterunterstützten Chirurgie. Berlin: Springer, 1996. (iwb-Forschungsberichte Nr. 99).

MOHR U.A. 2000

Mohr, J.; Krippner, P.; Wallrabe, U.: Die Anwendung der Mikrooptik in der Tele- und Datenkommunikation. In: Tagungsband zum 4. Statuskolloquium des Programms Mikrosystemtechnik. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 2000, S. 171-177.

MÜHLBAUER 1999

Mühlbauer AG (Hrsg.): Super High Speed Die Bonder DB 200. Roding, März 1999.

NAUMANN 1992

Naumann, H.; Schröder, G.: Bauelemente der Optik: Taschenbuch der technischen Optik. München: Carl Hanser, 1992.

NIENHAUS 1999A

Nienhaus, M.: Moderne Verfahren und Werkzeuge für die industrielle Montage hybrider Mikrosysteme. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Automatisierte Mikromontage. München: Utz Verlag, 1999. (iwb-Seminarberichte Nr. 44).

NIENHAUS 1999B

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

OH 1998

Oh, H.-S.: Elektrostatische Greifer für die Mikromontage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998. (VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 702).

OPUS 1999

Opus SA (Hrsg.): OptoBonder. Le Poizat/ Frankreich, 1999.

OSSIG U.A. 1998

Ossig, F.; Schumann, B.; Senitz, E.: Montagesystem für optische Fasern. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg.): Entwicklung und Erprobung von fertigungsgerechten Montage- und Fügeverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen. Teltow, 1998. (Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 60).

PAHL & BEITZ 1993

Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung. Berlin: Springer, 1993.

PANTENBERG U.A. 1998

Pantenberg, F. J.; Achenbach, S.; Sesterhenn, M.: LIGA-Strukturen mit Strukturrhöhen von mehreren Millimetern durch ultratiefe Röntgenlithographie. In: Tagungsband zum 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 1998, S. 77-82.

PAUL 1999

Paul, H. (Hrsg.): Lexikon der Optik. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1999.

PITTSCHELLIS 1998

Pittschellis, R.: Mechanische Miniaturgreifer mit Formgedächtnisantrieb. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998. (VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 714).

REICHL 1988

Reichl, H. (Hrsg.): Hybridintegration: Technologie und Entwurf von Dickschichtschaltungen. Heidelberg: Hüthig-Verlag, 1988.

REICHL 1998

Reichl, H. (Hrsg.): Direktmontage: Handbuch für die Verarbeitung ungehäuster ICs. Berlin: Springer, 1998.

REINHART & HÖHN 1997A

Reinhart, G.; Höhn, M.: Flexible Montage von Miniaturbauteilen. F&M 105 (1997) 1-2, S. 43-45.

REINHART & HÖHN 1997B

Reinhart, G.; Höhn, M.: Flexible Microassembly Automation. In: Annals of the CIRP, Vol. 46/1 1997, S. 7-10.

REINHART U.A. 1998A

Reinhart, G.; Höhn, M.; Ross, P.: Die Zukunft mit automatisierten Systemen. In: Reinhart, G. (Hrsg.): TCW-Report Montage-Management - Lösungen zum Montieren am Standort Deutschland. München: Transfer-Centrum 1998, S. 49-53.

REINHART U.A. 1998B

Reinhart, G.; Gräser, R.-G.; Klingel, R.: Qualification of Standard Industrial Robots to Cope with Sophisticated Assembly Tasks. In: Annals of the CIRP, Vol. 47/1 1998, S. 1-4.

REINHART & HÖHN 1999A

Reinhart, G.; Höhn, M.: Mikrointegration erfordert neue Montagetechnologien. VDI/VDE-Magazin Technik in Bayern (1999) 3, S. 10-11.

REINHART & HÖHN 1999B

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

REINHART & HÖPPNER 1999

Reinhart, G.; Höppner, J.: Berührungslose Handhabung mit Leistungsschall - Ein neuer Ansatz für die Mikromontage. wt Werkstattstechnik 89 (1999) 9, S. 429-432.

REINHART U.A. 2000

Reinhart, G.; Höhn, M.; Jacob, D.; Schilp, M.: Sensorbasierte Montage hybrider Mikrosysteme. Maschinenmarkt 106 (2000) 4, S. 26-28.

RIZVI 1999

Rizvi, N.: Microstructuring with Excimer Lasers. MST-News 1/99, S. 18-21.

RÖNNEBERG & WEIßMANTEL 1996

Rönneberg, G.; Weißmantel, H.: Mikrostrukturen im Fokus. F&M 104 (1996) 10, S. 715-720.

SALIM & WURMUS 1996

Salim, R.; Wurmus, H.: Kleinste Objekte im Griff - Siliziumgreifer für die Mikro-
montage. F&M 104 (1996) 9, S. 637-640.

SCHELLER U.A. 1997

Scheller, T.; Eberhardt, R.; Tittelbach, G.; Damm, Ch.: Entwicklung eines mo-
dularen Mikromontagesystems zum Fügen mikrooptischer Komponenten. In:
Proceedings Micro Engineering. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressge-
sellschaft, 1997.

SCHMIDT & HÜNTRUP 1998

Schmidt, J.; Hüntrup, V.: Mikrozerspanung – ein Fertigungsverfahren zur wirt-
schaftlichen Herstellung von Einzelstücken und Kleinserien. In: Fraunhofer-
Gesellschaft (Hrsg.): Produktionstechnik für Mikrosysteme. Stuttgart: Fraunho-
fer IPA-Kongress, 1998.

SCHMITZ 1998

Schmitz, G.: Grundsatzversuche zur Fasermontage. In: VDI/VDE-
Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg.): Entwicklung und Er-
probung von fertigungsgerechten Montage- und Fügeverfahren zum Aufbau von
Mikrosystemen. Teltow, 1998. (Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik,
Band 60).

SCHOTT 1994

Schott AG (Hrsg.): Foturan – ein Werkstoff für die Mikrosystemtechnik (Pro-
duktinformation der Firma Schott und des Instituts für Mikrotechnik Mainz).
Mainz, 1994.

SCHUTZRECHT 1992

Schutzrecht US005084959A United States Patent (1992-02-04). Matsushita E-
lectric Industrial Co. - Ando, T.; Kabeshita, A.: Chip mounting apparatus.

SCHUTZRECHT 1993

Schutzrecht DE 42 22 283 C1 Patentschrift (1993-08-05). Siemens AG. - Men-
gel, P.; Hepp, F.: Verfahren zur Justierung der Anschlußbeinchen eines Chips
relativ zu den Pads.

SCHUTZRECHT 1996

Schutzrecht DE 195 24 475 C1 Patentschrift (1996-11-14). Fraunhofer-
Gesellschaft. - Monno, B.; Treusch, G.; Biesenbach, J.: Optische Zentriervor-
richtung zum lagegenauen Bestücken eines Bauelementes in Oberflächen-
montagetechnik sowie deren Verwendung zur Montage von Laserdioden.

SCHUTZRECHT 1998A

Schutzrecht EP 0 877 544 A1 Patentanmeldung (1998-11-11). Esec Management SA. - Vischer, D.: Einrichtung und Verfahren zur Montage von Halbleiterchips auf einem Substrat.

SCHUTZRECHT 1998B

Schutzrecht DE 196 44 502 A1 Offenlegungsschrift (1998-05-07). Fraunhofer Gesellschaft. - Wagner, T.; Ruck, K.: Greifervorrichtung für die Mikromontage kleiner Werkstücke mit wenigstens zwei Greiferelementen.

SCHUTZRECHT 1999A

Schutzrecht DE 198 06 306 A1 Offenlegungsschrift (1999-09-09). Siemens AG. - Niklaus, F.; Honsberg-Riedl, M.; Höhn, M.: Vorrichtung zum berührungslosen Greifen und Halten eines Gegenstandes und Anwendungen der Vorrichtung.

SCHUTZRECHT 1999B

Schutzrecht EP 1 022 099 A2 Europäische Patentanmeldung (1999-10-21). Robert Bosch GmbH. - Höhn, M.; Schreier, K.; Steegmüller, B.: Verfahren und Greifersystem zur Durchführung des Verfahrens zur präzisen Handhabung und Montage von kleinen Bauteilen.

SCHUTZRECHT 2000A

Schutzrecht DE 100 12 081.4-34 Patentanmeldung (2000-03-14). Robert Bosch GmbH. - Höhn, M.; Steegmüller, B.: Verfahren und Vorrichtung zur automatischen Feinpositionierung.

SCHUTZRECHT 2000B

Schutzrecht DE 100 12 043.1-34 Patentanmeldung (2000-03-14). Robert Bosch GmbH. - Jacob, D.; Höhn, M.; Schilling, U.; Schilp, M.: Vorrichtung zur Ausrichtung von Referenzmarken tragenden Objekten zueinander.

SCHÜNEMANN U.A. 1998

Schünemann, M.; Bauer, G.; Schäfer, W.; Großer, V.; Leutenbauer, R.: Modulare Mikrosysteme für kleine und mittlere Stückzahlen. In: Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Produktionstechnik für Mikrosysteme. Stuttgart: Fraunhofer IPA-Kongress, 1998.

SCHWEIGERT 1992

Schweigert, U.: Toleranzausgleichssysteme für Industrieroboter am Beispiel des feinwerktechnischen Bolzen-Loch-Problems. Berlin: Springer, 1992.

SIA 1997

Semiconductor Industry Association (SIA): The National Technology Roadmap for Semiconductors 1997. Austin, 1997.

SLOCUM 1992

Slocum, A. H.: Precision Machine Design. Prentice Hall, 1992.

SPATH & THIES 1996

Spath, D.; Thies, U.: Automatisierte Montage von Mikrostrukturen. wt - Produktion und Management 86 (1996), S. 588-590.

STAUDT & KRAUSE 1999

Staudt, E.; Krause, M.: Nach einer euphorischen Phase dominiert jetzt Realismus. Handelsblatt, 24.11.1998.

STEINER 1998

Steiner, M.: SMA 1000 - Das Back-End Montagekonzept für die Mikrosystemtechnikfertigung. In: Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Produktionstechnik für Mikrosysteme. Stuttgart: Fraunhofer IPA-Kongress, 1998.

SZE 1981

Sze, S.: Physics of Semiconductor Devices. New York: Wiley, 1981.

THOBEN 1999

Thoben, R.: Parallelroboter für die automatisierte Mikromontage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999. (VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 758).

TILLE U.A. 1999

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

TÖNSHOFF U.A. 1990

Tönshoff, H.K.; Janocha, H.; Gerstmann, U.: Robotergenauigkeit - Erwartungen der Anwender und Realisierbarkeit. VDI-Z 132 (1990) 6, S. 93-97.

TSAI 1987

Tsai, R.: A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses. In: IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, Nr. 4, S. 323-344, August 1987.

TZM-REPORT 1999

o.V.: Mikrosystemtechnik – Wann kommt der Durchbruch? In: Transferzentrum Mikroelektronik e.V. (Hrsg.): TZM-Report 41 (1999) 5-6.

VDE 1998

VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (Hrsg.): VDE-Mikroelektronik-Studie 1998 - Trends der Mikroelektronik und Ihrer Anwendungen 1997-2002. Frankfurt, 1998.

VDI 1998

o.V.: Mikrosystemtechnik - Fördermaßnahmen sind immer noch umstritten. VDI-Nachrichten, Sonderenteil, Nr. 16, 17.4.1998.

VDI-RICHTLINIE 2225 1977

VDI-Richtlinie 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Düsseldorf: VDI-Verlag 1977.

VOIGT 1999

Voigt, K.: Piezo-Power mit höchster Lebensdauer. F&M 107 (1999), S. 30-33.

VONDERHAGEN 1997

Vonderhagen, H.: Modulare, automatisierte Montagesysteme zur Qualitätsgesicherten Fertigung von Mikroprodukten. In: Proceedings Micro Engineering. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft, 1997.

WANG 1992

Wang, C.C.: Extrinsic Calibration of a Vision Sensor Mounted on a Robot. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8 (1992) Nr. 2, S. 161-175.

WARNECKE U.A. 1990

Warnecke, H. J.; Bullinger, H.-J.; Hichert, R.; Voegele, A.: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. 2. Aufl. München: Hanser, 1990.

WECK U.A. 1996

Weck, M. u.a.: Herstellung von Mikrobauteilen – Perspektiven für den Maschinenbau. In: Weck, M.; Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachen: Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 1996.

WECK & PETERSEN 1998

Weck, M.; Petersen, B.: Grippers for the Assembly of Micro Systems in a Scanning Electron Microscope. Annals of the German Academic Society for Production Engineering, Vol. 5/1 1998, S. 67-70.

WEILER 1993

Weiler, W. (Hrsg.): Handbuch der physikalisch-technischen Kraftmessung. Wiesbaden: Vieweg-Verlag, 1993.

WEINERT U.A. 1998

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

WENG U.A. 1992

Weng, J.; Cohen, P.; Herniou, M.: Camera Calibration with Distortion; Models and Accuracy Evaluation. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14 (1992) Nr. 10, S. 965-980.

WENK 1999

Wenk, B.: Kundenspezifische Entwürfe - Das Foundry-Konzept der Mikrosystemtechnik. *F&M* 107 (1999) 5, S. 53-54.

WESTKÄMPER U.A. 1996

Westkämper, E.; Schraft, R. D.; Bark, C.; Vögele, G.; Weisener, T.: Adhesive Gripper – a new approach to handling MEMS. In: *Proceedings of the 5th Int. Conference on New Actuators*. Bremen, 1996, S. 100-103.

WESTKÄMPER U.A. 1998

Westkämper, E.; Schünemann, M.; Schlenker, D.; Bauer, G.; Grimme, R.; Schäfer, W.: Produktionskonzepte für die Mikrotechnik. In: *Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Produktionstechnik für Mikrosysteme*. Stuttgart: Fraunhofer IPA-Kongress, 1998.

ZÖPPIG 1998

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

ZÖPPIG U.A. 1997

Zöppig, V.; Gramsch, T.; Pfefferkorn, H.; Christen, G.: Greifersysteme für die automatisierte Mikromontage. In: *Proceedings Micro Engineering*. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft, 1997.

ZÜHLKE U.A. 1996

Zühlke, D.; Fischer, R.; Hanks, J.: Mikrometergenau positioniert. *SMM* (1996) 35, S. 18-20.

ZÜHLKE U.A. 1997

Zühlke, D.; Fischer, R.; Hanks, J.: Increasing Micro-Assembly Accuracy. *Proceedings of the Int. Robots & Vision Conference*. Detroit, 1997.

iwb Forschungsberichte Band 1–121

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

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

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

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und 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 Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht forms stabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schräfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wissbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeeinrichtungen**
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 Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrieroboteinsatzes**
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 *Kugelman, F.*
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
**Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
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 *Zettlmeier, H.*
**Verfahren zur simulationsgestützten
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 *Raith, P.*
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung**
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
**Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation**
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanner, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen**
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen**
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionszellen**
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement**
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
**Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen**
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen**
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *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 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krämer, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermeier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgel leitete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

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

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

- 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
- 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
- 31 Engineering Data Management (EDM) · Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 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

Forschungsberichte iwb

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

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

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

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0 · lieferbar ab ca. 02/01
- 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
 lieferbar ab ca. 05/01
- 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
 lieferbar ab ca. 08/01
- 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, Jörg
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
 lieferbar ab ca. 08/01
- 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
 lieferbar ab ca. 09/01