

Lehrstuhl für
Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik

Dirk Jacob

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. Heinzl

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Spath,
Universität Fridericiana zu Karlsruhe

Die Dissertation wurde am 17.01.2002 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 18.04.2002
angenommen.

Forschungsberichte



Band 167

Dirk Jacob

***Verfahren zur Positionierung
unterseitenstrukturierter
Bauelemente in der
Mikrosystemtechnik***

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

Herbert Utz Verlag



Forschungsberichte iwvb

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 (iwvb)

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2002

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 2002

ISBN 3-8316-0142-9

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

Wer aufgehört hat, etwas werden zu wollen,
hat aufgehört, etwas zu sein.

Sokrates

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen 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 o. Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Technischen Hochschule Karlsruhe, möchte ich mich für die Übernahme des Koreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit recht herzlich bedanken. Ebenso danke ich Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Joachim Heinzl, Leiter des Lehrstuhls Feingerätebau und Mikrotechnik der Technischen Universität München, für die Übernahme des Vorsitzes.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die durch zahlreiche Diskussionen und vielfältige Anregungen zum Gelingen der Arbeit beigetragen habe. Insbesondere danke ich Herrn Dr.-Ing. Michael Höhn, der durch seine Vorarbeiten am Institut meine Begeisterung für das Themenfeld Mikromontage geweckt hat, sowie den zahlreichen Studenten und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus den Servicecentern des Instituts, die durch ihre Unterstützung meine Arbeit erst ermöglicht haben.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und damit den Grundstein zu dieser Arbeit gelegt haben. Ebenso danke ich meinen Schwiegereltern für ihre stete Hilfe. Meiner Frau Julia, die durch ihre unermüdliche Geduld mir eine ständige mentale Unterstützung und Motivation war, widme ich diese Arbeit.

München, im Mai 2002

Dirk Jacob

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Innovationen durch Mikrosystemtechnik	1
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	5
2	Stand der Technik	7
2.1	Mikrosystemtechnik	7
2.2	Montagestrategien in der Mikrosystemtechnik.....	10
2.3	Montageproblemstellungen in der Mikrosystemtechnik	12
2.4	Unterseitenstrukturierte Bauteile	13
2.4.1	Überblick	13
2.4.2	Flip-Chip-Bauelemente	15
2.5	Automatisierte Mikromontage	23
2.5.1	Positionierverfahren	23
2.5.2	Sensoren zur Lageerkennung	24
2.5.3	Greifer.....	25
2.5.4	Handhabungsgeräte	26
2.6	Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente	27
2.6.1	Automatisierte Anlagen zur absolutgenauen Positionierung	28
2.6.2	Automatisierte Anlagen zur Relativpositionierung.....	28
2.6.3	Manuelle Anlagen zur Relativpositionierung.....	29
2.7	Einsatzbereiche während eines Produktlebenszyklus.....	30
2.7.1	Laboreinsatz	30
2.7.2	Klein- und Mittelserienfertigung	31
2.7.3	Großserienfertigung.....	32
2.8	Zusammenfassung und Auswertung des Stands der Technik.....	33
2.9	Präzisierung der Aufgabenstellung und Anforderungen.....	34
3	Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente	37
3.1	Grundsätzliche Strategien zur Positionierung von Flip-Chip-Bauelementen	37
3.1.1	Passive Ausrichtung mit Hilfe von Formschluss	37

3.1.2	Strategien mit feststehender Unterseitenkamera.....	39
3.1.3	Relativpositionierung mit IR-Kamera.....	46
3.1.4	Relativpositionierung mit direkter Unterseitenvermessung über dem Substrat.....	49
3.2	Geometrischer Aufbau von Montagesystemen.....	54
3.2.1	Handhabungsmodule.....	54
3.2.2	Platzierung der Optiken.....	58
3.2.3	Zuführtechnik.....	60
3.3	Bewertungskriterien.....	61
3.3.1	Kriterien für Anlagen.....	61
3.3.2	Kriterien für Positionierstrategien.....	62
3.3.3	Kriterien für Strategien und Anlagen.....	63
3.3.4	Entwicklung der Anforderungsprofile für Montagesysteme.....	65
3.4	Bewertung der Varianten.....	66
3.4.1	Bewertung der Handhabungssysteme.....	66
3.4.2	Vergleich der unterschiedlichen Positionierstrategien.....	68
3.4.3	Kombination und Zuordnung zu Anwendungsfeldern.....	69
4	Konzeption der Optik.....	73
4.1	Grundsätzlicher Aufbau der Optik.....	73
4.2	Grobkonzeption der Umlenkoptik.....	76
4.2.1	Optische Bauelemente.....	76
4.2.2	Optiken mit Strahlteiler.....	78
4.2.3	Optiken mit bewegten optischen Elementen.....	79
4.2.4	Optiken mit parallel aufgenommenen Bildern.....	81
4.3	Entscheidungskriterien.....	82
4.3.1	Empfindlichkeit der Optik auf Lagetoleranzen.....	82
4.3.2	Einflüsse durch optische Bauelemente.....	88
4.3.3	Konstruktive Einflüsse.....	93
4.3.4	Sonstige Einflüsse.....	96
4.4	Anwendung der Entscheidungskriterien auf die Varianten.....	98
4.4.1	Nutzwertanalyse.....	98
4.4.2	Ergebnis.....	99

5	Feinkonzeption des Optikmoduls	101
5.1	Anforderungen für die Umsetzung	101
5.2	Entwicklung des Doppelkameramoduls.....	102
5.2.1	Optische Grundlagen	103
5.2.2	Optische Auslegung.....	111
5.2.3	Mechanische Konstruktion und Umsetzung.....	114
5.3	Optische Vermessung	116
5.4	Justage des Optikkopfs.....	118
6	Aufbau und Betrieb einer Pilotanlage.....	123
6.1	Produktbeispiel Radarabstandssensor	123
6.2	Systemkomponenten der Anlage	125
6.2.1	Handhabungssystem und Positionieroptik	126
6.2.2	Materialbereitstellung.....	127
6.2.3	Greiferwechselsystem.....	129
6.2.4	Sonstige periphere Einrichtungen	130
6.3	Verifizierung der Genauigkeit der Anlage.....	131
6.3.1	Vermessung des Handhabungsgeräts	131
6.3.2	Vermessung der weiteren Komponenten	132
6.3.3	Vermessung der einzelnen Handhabungsschritte.....	134
6.4	Realisierter Montageprozess	136
6.4.1	Bestimmung der Kalibrierparameter	136
6.4.2	Montageablauf.....	137
6.4.3	Montageergebnisse	138
6.5	Bewertung des Systems	140
6.5.1	Technologische Bewertung	140
6.5.2	Wirtschaftliche Bewertung	141
6.5.3	Einsatz in stückzahlflexibler Montage	144
7	Zusammenfassung.....	147
	Anhang	150
	Literaturverzeichnis.....	165

Abkürzungen

AKF	Autokollimationsfernrohr
BGA	Ball Grid Array
BV	Bildverarbeitung
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charged Coupled Device
COB	Chip on Board
CSP	Chip Size Package
DRAM	Dynamic Random Access Memory
FC	Flip-Chip
GaAs	Galliumarsenid
HF	Hochfrequenz
HOE	Holografisch optisches Element
IC	Integrated Curcuit (integrierter Schaltkreis aus der Mikroelektronik)
IR	Infrarot
M ³ ICs	Monolithische Millimeterwellen ICs
MEMS	Microelectromechanical Systems
MOEMS	Microoptoelectromechanical Systems
MST	Mikrosystemtechnik
MTF	Modulation Transfer Function
NC	Numerical Control
NF	Niederfrequenz
QFP	Quad Flat Pack
REM	Rasterelektronenmikroskop
Si	Silizium
SMD	Surface Mount Device
TAB	Taped-Automated-Bonding
TC	Thermokompression

Formelzeichen

A	Numerische Apertur
a	Abstand der Objektfelder
b, b'	Arbeitsabstand des Optikmoduls
b_F	Führungsbreite einer Linearführung
b_r	Schärfentiefebereich eines Objektivs
D	Normierte Kantenlänge eines optischen Elements
d	Optische Weglänge in einem Medium
D	Durchmesser der Blende
d_{CCD}	Kantenlänge eines Pixels eines CCD-Sensors
d_{Mat}	Gesamte optische Weglänge innerhalb eines Materials
d_{Ref}	Optische Weglänge der Referenzangabe
e_F	Radialspiel einer Linearführung
e_P	Planparallelität einer Linearführung
f, f'	Brennweite (gegenstands-, bildseitig)
G	Pfeilhöhe
h	Durchstoßhöhe eines Strahls
k	Blendenzahl
l_{Achse}	Länge einer Linearachse
l_F	Führungslänge einer Linearführung
l_{Hebel}	Länge des Hebelarms einer Rotationsachse
M	Modulation
n, n'	Brechzahl in zwei unterschiedlichen Medien
NA, NA'	Numerische Apertur (gegenstands-, bildseitig)
n_G	Brechzahl von Glas
n_{Gk}	Brechzahl von Glaskitt
n_L	Brechzahl von Luft
$P_{1,2} (X_{BV1, BV2}, Y_{BV1, BV2})$	BV-Punkte
R	Ortsfrequenz
r_{EP}	Einlasspupillenradius
S	Schnittweite

s_{min}	Auflösung des Handhabungssystems
T, T', T''	Positionen des Substrats im Schärfentiefebereich eines Objektivs
U	Auflösungsvermögen
V	Versatz zwischen zwei optischen Achsen
X, Y, Z	kartesisches Koordinatensystem
y, y'	Gegenstands- bzw. Bildgröße
α_{BV-R}	Versatzwinkel BV-Koordinatensystem zu Roboterkoordinatensystem
α	Objektivöffnungswinkel
$\beta_{BV1, BV2}$	Winkellage Bauteil am Greifer
β, β'	Abbildungsmaßstab (gegenstands-, bildseitig)
Δx_R	Standardverfahrwert linear des Roboters für Kalibrierung
$\Delta \varphi_R$	Standardverfahrwert rotatorisch des Roboters für Kalibrierung
ΔT	Messunsicherheit aufgrund schräger optischer Achse
ε	Winkel der optischen Achse zum Substrat
Φ	Lichtstrom
ψ_{BV-R}	Umrechnungsfaktor rotatorisch BV-Koordinatensystem zu Roboterkoordinatensystem
ψ, ζ	rotatorische Achsen mit Hebelarm für Bewegungen in X -, Y -Ebene
φ	Rotation um die Z -Achse
$\varphi_{x, y, z}$	Verkipfung der Optik um die X -, Y -, Z -Achse
λ	Wellenlänge
\prod	Produkt
$\bar{\rho}$	Reflexionsgrad einer ebenen Fläche
ρ_{Sp}	Reflexionsgrad einer Spiegelfläche
ρ_{ST}	Reflexionsgrad eines Strahlteilers
τ_{Ges}	Gesamttransmissionsgrad
τ_{GG}	Transmissionsgrad der Grenzfläche Glas/Glas
τ_{GL}	Transmissionsgrad der Grenzfläche Glas/Luft
τ_{Mat}	Materialtransmissionsgrad
τ_{Ref}	Transmissionsgrad der Referenzangabe
ξ_{BV-R}	Umrechnungsfaktor linear BV-Koordinatensystem zu Roboterkoordinatensystem

1 Einleitung

1.1 Innovationen durch Mikrosystemtechnik

Seit den ersten realisierten Mikrosystemen in den 70er Jahren fand im Bereich der Mikrosystemtechnik (MST) eine rasante Weiterentwicklung statt. Marktstudien, beispielsweise der europäischen NEXUS Organisation, gehen auch weiterhin von jährlichen Umsatzsteigerungen von konstant ca. 20 % in diesem Bereich (WECHSUNG & WICHT 2001) aus. Ebenso stieg die Anzahl der Patente, die weltweit im Bereich der Mikrosystemtechnik angemeldet werden, in den letzten Jahren exponentiell (GRACE 2001). Tatsächlich haben schon viele Systeme der Mikrosystemtechnik ihren Platz im Alltag gefunden. So sind in der Kfz-Technik mikrosystemtechnische Sensoren und teils auch Aktoren nicht mehr zu ersetzen. Vom Beschleunigungssensor für die Auslösung der Airbags, über Drehratensensoren zur Regelung des elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) und für die Ortsbestimmung mittels Navigationssystems, bis hin zu Sitzbelegungssensoren werden diese Systeme zur Erhöhung der Sicherheit und des Komforts in modernen Automobilen verbaut. Mikrosysteme kommen aber nicht nur in der Kfz-Technik zum Einsatz. Ihre Verbreitung steigt unter anderem auch in der Medizintechnik (Abb. 1-1) (WIDMANN 2000), der Unterhaltungsindustrie und der Telekommunikationsindustrie.

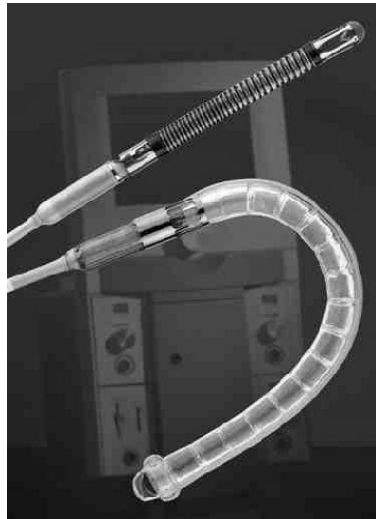


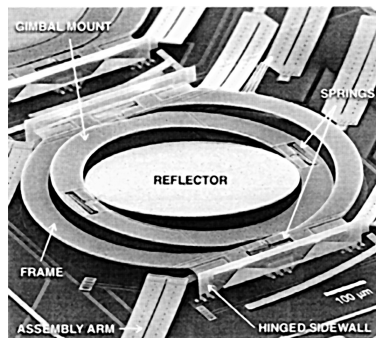
Abb. 1-1: Pumpe zur Unterstützung der Herztätigkeit während Operationen (Quelle: Impella)

Die derzeitigen Einsatzbereiche sind dadurch gekennzeichnet, dass in ihnen entweder hohe Stückzahlen, wie in der Kfz-Technik und der Telekommunikationsindustrie, oder ein hohes Qualitäts- und Preisniveau (Medizintechnik) realisiert werden können. Der Grund dafür ist hauptsächlich in den hohen Kosten für die Herstellung und Montage von Mikrosystemen zu sehen. Dabei spielen

sowohl die zur Verfügung stehende Produktionstechnik als auch die Anforderungen der Anwendungen an die Mikrosysteme eine große Rolle. Werden Mikrosysteme in hohen Stückzahlen hergestellt, wie beispielsweise in der Sensortechnik, so geschieht dies überwiegend mit Techniken der Halbleiterfertigung als **monolithische Systeme¹ aus Halbleitermaterialien**, wie Silizium (Si) oder Galliumarsenid (GaAs). Dabei wird die Fertigung mit modifizierten Maschinen der Halbleiterindustrie und den für diesen Bereich entwickelten Prozesstechniken wie z.B. Lithographie, Nassätzen etc. durchgeführt. Die Parallelfertigung von vielen Systemen auf einem Wafer (Fertigung im Batch) machen diese kostenintensiven Fertigungsverfahren bei hohen Stückzahlen rentabel. Treten allerdings Änderungen im Design und in der Funktion der gefertigten Mikrosysteme auf, dann entstehen, zum Beispiel durch das Erstellen neuer Belichtungsmasken, hohe Kosten, so dass diese Herstelltechnologie unflexibel ist.

Um dreidimensionale Strukturen, wie z.B. bewegliche Spiegel in monolithischer Technik zu erzeugen, werden auf dem Wafer unterschiedliche Materialschichten aufgebracht, geätzt und z.T. innere Spannungen eingebracht (z.B. über Ionenimplantation) (VAN SPENGEN U. A. 2000, PIZZI U. A. 2001). Damit entstehen über Reaktionen der einzelnen Strukturen der aufgetragenen Schichten dreidimensionale Aufbauten. Diese Technik ist exemplarisch an dem Spiegelarray von Lucent Technologies (AKSVUK U. A. 2000) in Abb. 1-2

dargestellt. Mit den eingesetzten Halbleiter-Fertigungstechniken ist die Materialauswahl für Mikrosysteme, stark eingeschränkt, woraus eine verringerte Funktionalität durch die verwendbaren Materialien folgt. Deshalb muss das Design monolithischer Mikrosysteme für die Herstellung auf dem Wafer optimiert sein.



*Abb. 1-2: Mikrospiegelarray für die optische Telekommunikation
(Quelle: Lucent Technologies)*

¹ Monolithische Mikrosysteme werden durch Strukturierungs- und Aufbauverfahren aus einem Stück auf Basis von Halbleitermaterialien hergestellt, so dass für den Aufbau der Systeme keine Montageschritte benötigt werden.

Für viele Anwendungen besitzen die Materialien aus der Halbleitertechnik aber nicht die benötigten Eigenschaften. So werden im Bereich der Mikrooptik beispielsweise Linsen aus Glas benötigt. Dafür müssen die Mikrosysteme aus mehreren Teilen, die aus den jeweiligen funktionsoptimierten Materialien gefertigt sind, hergestellt und montiert werden. In dieser Technik gefertigte Systeme werden **hybride Mikrosysteme** genannt. Sowohl in der Strukturierung der Grundmaterialien als auch für die Montage der Systeme müssen zum Großteil neue Technologien entwickelt werden, da für diesen Bereich bisher nur wenige Erfahrungen und Techniken vorliegen. Die hybriden Mikrosysteme bedingen bei größeren Stückzahlen neue Automatisierungstechnologien für die Montage, da die Anforderungen sich von denen der konventionellen Montagesysteme unterscheiden.

Bei kleinen und mittleren Stückzahlen in der Mikromontage ist der Anteil an **manuellen Arbeitsplätzen** derzeit sehr hoch. Für die Bereiche der großen Stückzahlen werden spezialisierte Fertigungsautomaten eingesetzt. Diese technisch aufwändigen Maschinen, die für das Erreichen der erforderlichen hohen Genauigkeiten z.T. mit Luftlagertechnik, Direktantrieben und Granitgestellen ausgestattet sind, werden in der Regel speziell für das zu montierende Produkt optimiert. Dadurch entstehen bei der Montage nach CHOLLET & JACOT (1999) mehr als 80 % der gesamten Produktionskosten eines hybriden Mikrosystems.

Um die hohen Kosten im Bereich der Montage zu reduzieren, beschäftigen sich in den letzten Jahren immer mehr Hersteller und Institute mit der **Normierung und Modularisierung** im Bereich der Mikrosystemtechnik. Dabei gehen die Bemühungen grundsätzlich in zwei Richtungen.

Der erste Ansatz zur Verringerung der Kosten beim industriellen Einsatz von Mikrosystemen ist der Aufbau eines **Baukastensystems** für die Mikrosystemtechnik. Dabei werden einzelne Funktionsbausteine hybrider Mikrosysteme in eine standardisierte Verpackung (Package) eingebracht, die über ebenfalls standardisierte Schnittstellen verfügt, über die Informationen, Energie und Medien mit anderen Bausteinen ausgetauscht werden können (WESTKÄMPER 2000, WESTKÄMPER 2001A, HJR 1998, LENK 1999). Die Funktionalität des gesamten Mikrosystems ergibt sich durch die Kombination der unterschiedlichen Bausteine.

Der zweite Ansatz besteht darin, die Fertigungssysteme, die für die Herstellung hybrider Mikrosysteme eingesetzt werden, modular und somit flexibel zu

gestalten. Dabei wurden einerseits Überlegungen angestellt, spezialisierte Fertigungssysteme über Verbindungssysteme zu sog. Clustern zusammenzusetzen (WESTKÄMPER 2001B, KÄM 2001). Mit dieser Technik, die bis jetzt nur im Frontend- Bereich² der Halbleiterfertigung für die automatisierte Verknüpfung mehrerer Prozessierungsschritte eingesetzt wird, würde über die Kombination der im Cluster integrierten unterschiedlichen Fertigungsschritte eine Fertigung ermöglichen, die flexibel auf Änderungen in den Anforderungen der Montage reagieren kann.

Andererseits wird schon bei dem Entwurf von Montagesystemen darauf geachtet, eine hohe Flexibilität bei geringen Investitionskosten zu erreichen. Der Fokus liegt auf der Entwicklung von **modular aufgebauten Werkzeugen**. So werden bei GENGENBACH U. A. (2001) modulare Greiferschnittstellen vorgestellt und in HÖHN (2001) werden unterschiedliche modular aufgebaute Werkzeuge zur automatisierten Mikromontage vorgestellt. Erste Überlegungen für **modular aufgebaute Mikromontagesysteme**, die kostengünstig für die jeweiligen Aufgaben umgerüstet werden können, sind im Bereich der Feinwerktechnik von DIERSELHUIS & KOLKMAN (2000) vorgestellt worden.

Durch die fortschreitende Miniaturisierung steigen die Anforderungen an die Packungsdichte beim Aufbau von Mikrosystemen. So verringert sich die zur Verfügung stehende Fläche für mechanische und elektrische Kontaktierung und für Referenzmarken, die für die bei der Positionierung eingesetzte Bildverarbeitung nötig sind. Gleichzeitig erhöhen sich die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit und die Qualität der elektrischen Kontaktierung. Aus diesen Gründen werden immer mehr Mikrosysteme so aufgebaut, dass die Funktionsstrukturen des zu montierenden Bauteils auf der Bauteilunterseite liegen und direkt zu der Oberfläche des Substrats ausgerichtet und auf dieser montiert werden müssen. Diese sog. **unterseitenstrukturierten Bauelemente** der MST müssen mit Hilfe spezieller Positioniertechniken montiert werden, da in diesem Fall konventionelle Positionierstrategien nicht geeignet sind. Bei den geforderten Montagegenauigkeiten sind insbesondere die optischen Komponenten zur Lagevermessung und die Bildverarbeitung die

² Front-End Bereich ist der Bereich der Fertigung in der Halbleiterindustrie, in dem die Bauelemente auf dem Wafer parallel prozessiert werden. Im Anschluss folgt der Back-End Bereich, in dem Vereinzelung, Kontaktierung und Packaging stattfindet.

Schlüsselkomponenten eines Montagesystems, um die auftretenden Toleranzen im Bereich der Teilebereitstellung und –fertigung zu kompensieren.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Die Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik wird derzeit über singuläre Lösungsansätze realisiert. Für die Verwirklichung eines modularen Mikromontagesystems müssen für die unterschiedlichen Montageszenarien und –aufgaben die dazugehörigen Module entwickelt werden. Für die Montage von unterseitenstrukturierten Bauelementen kann nicht auf konventionelle Positionierstrategien zurückgegriffen werden, die bei Standardbauteilen verwendet wird. Im Rahmen der Arbeit sollen **Positionierstrategien**, die für diese Aufgabenstellung geeignet sind, untersucht und bewertet werden.

Konventionelle Positionierverfahren arbeiten auf der Basis der **absolutgenauen Positionierung** von Bauelementen und sind auf ein temperaturstabiles Handhabungssystem sowie Hochpräzisionsachsen angewiesen. Die mit diesen Systemen erreichbare Positioniergenauigkeit beträgt ca. $12\text{ }\mu\text{m}$ bei $3\text{ }\sigma$. Bei höheren Genauigkeitsanforderungen ist die absolutgenaue Positionierung nicht mehr geeignet, so dass **Relativpositionierverfahren** verwendet werden müssen. Diese ermöglichen prinzipiell eine höhere Genauigkeit durch den Aufbau eines geschlossenen Lageregelkreises über dem Substrat. Allerdings stehen für diese Positionierverfahren noch nicht die dazu benötigten Strategien und Komponenten für die optische Lageerkennung zur Verfügung.

Neben den unterschiedlichen Positionierverfahren soll auch die Eignung unterschiedlich aufgebauter **Handhabungssysteme** untersucht und in Hinsicht auf den flexiblen Einsatz innerhalb eines **Produktlebenszyklus** eines Mikrosystems bewertet werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen soll ein automatisiertes Mikromontagesystem realisiert werden, das für die wirtschaftliche Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente mit einer Montagegenauigkeit von kleiner als $10\text{ }\mu\text{m}$ in kleinen Stückzahlen ausgelegt ist. Gleichzeitig werden die Anforderungen an einen modularen Aufbau berücksichtigt, um die Entwicklung zukünftiger modularer Mikromontagesysteme voranzutreiben. Als **Kernkomponente** der Montageanlage soll eine Spezialoptik dienen, die eine Relativpositionierung unterstützt. Darüber hinaus soll deren Gestaltung als eigenständige

Einheit den Einsatz in unterschiedlichen Handhabungssystemen, wie manuellen, halbautomatischen und vollautomatischen Systemen, unterstützen.

Die Vorgehensweise, um dieses Ziel zu erreichen, ist in drei Hauptabschnitte unterteilt.

Im ersten Hauptabschnitt in **Kapitel 2** werden der Stand der Technik und die daraus ersichtlichen Defizite bestehender Systeme dargestellt, woraus sich die Anforderungen an die Gestaltung von Montagesystemen ergeben.

Im zweiten Hauptabschnitt in **Kapitel 3 und 4** wird die Konzeption von Montageanlagen mit ihren Komponenten auf Grundlage der in Kapitel 2 erarbeiteten Anforderungen dargestellt. In **Kapitel 3** werden im Rahmen einer Grobkonzeption Montageanlagen an Hand der Untersuchung von einzelnen Funktionsmodulen wie Handhabungssystemen, Positionierstrategien und Zuführsystemen entwickelt und auf Grundlage unterschiedlicher Anforderungsprofile ein Auswahlkatalog aufgestellt. In der folgenden Feinkonzeption in **Kapitel 4** steht die Entwicklung der für die Positionierstrategie erforderlichen Spezialoptik im Vordergrund. Es werden Bewertungskriterien für die unterschiedlichen Optikkonzepte erarbeitet. Die verschiedenen Optiken werden sowohl rechnerisch als auch in Simulationen untersucht. Durch eine anschließende Nutzwertanalyse wird das zu realisierende Optikkonzept bestimmt. In **Kapitel 5** erfolgt die Ausarbeitung und Realisierung des ausgewählten Optikkonzepts, wobei auch die Verifizierung der Optikgenauigkeit betrachtet wird.

Das **Kapitel 6** befasst sich mit der Umsetzung des Montagesystems in einer Pilotanlage. An Hand eines Applikationsbeispiels wird die Bewertung des Systems mit Hilfe der Versuchsergebnisse und einer betriebswirtschaftlichen Berechnung durchgeführt.

Kapitel 7 fasst die vorliegende Arbeit kurz zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Entwicklungen.

2 Stand der Technik

Als Hinführung zum Thema wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Mikrosystemtechnik und der Mikromontage gegeben, bevor auf den Stand der Technik im Bereich der Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente eingegangen wird. Darüber hinaus erfolgt eine Darstellung der Einteilung der unterschiedlichen Ausbaustufen der Fertigung, die ein Produkt im Verlauf seines Lebenszyklus durchläuft. Auf diesen Grundlagen erfolgt dann die Erarbeitung der derzeitigen Defizite, woraus sich Rückschlüsse auf zukünftige Verfahren zur Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente ziehen lassen.

2.1 Mikrosystemtechnik

Für den Bereich der **Mikrosystemtechnik (MST)** existiert bis heute noch keine einheitliche Definition. Im allgemeinen werden unter Mikrosystemen miniaturisierte Bauteile und Techniken verstanden, die erheblich kleiner als „normale“ Bauelemente sind. FLUITMAN (1999) beschreibt MST als: „Micro System Technology can be seen as the meeting of disciplines, a product of convergence along different lines. Apart from the traditional and ever developing line on ‘classical’ precision engineering, there is a line along microelectronics, microsensors and microactuators.” In MENZ & MOHR (1997, S.3) wird die MST als „konsequente Weiterentwicklung der Mikroelektronik auf nicht-elektronische Gebiete“ beschrieben, die durch die Verknüpfung von mikrostrukturierten Elementen für unterschiedliche Funktionen realisiert wird.

Über den Begriff MST hinaus existieren weitere Beschreibungen aus dem Amerikanischen, die die Interdisziplinarität, die in der MST im Gegensatz zur Mikroelektronik herrscht, besser zur Geltung bringen. So definieren BRYCEK U. A. (1994) den Begriff MEMS (Microelectromechanical Systems): „A miniature device or an array of devices combining electrical and mechanical components fabricated with IC batch-processing techniques.“ Als Erweiterung des Begriffs MEMS sind die MOEMS (Microoptoelectromechanical Systems) zu sehen, bei denen neben der Mechanik und der Elektronik auch noch optische Funktionen in die Mikrosysteme integriert sind.

Wie aus der Definition von BRYCEK U. A. (1994) hervorgeht, ist die Fertigung von Mikrosystemen insbesondere mit Produktionstechnologien aus den Bereichen der Halbleitertechnik bzw. der Mikroelektronik vorangetrieben

worden. Deshalb ist der Grundwerkstoff vieler konventioneller Mikrosysteme Silizium. Die Fertigungsverfahren der **Silizium-Mikromechanik**³ (MENZ & MOHR 1997, S. 197) führen zu dreidimensionalen Strukturen, wobei gleichzeitig auch elektronische Schaltkreise integriert werden können. Die entstehenden Mikrosysteme werden als halbleiterbasierte monolithische Mikrosysteme bezeichnet (MENZ & MOHR 1997, S. 395). Mit Hilfe der z.T. weiterentwickelten Technologien aus der Halbleitertechnik wird mittels der parallelisierten **Herstellung im Batch** (d.h. viele Systeme werden gleichzeitig auf einer Halbleiterscheibe, einem Wafer, hergestellt) eine wirtschaftliche Fertigung bei großen Stückzahlen möglich (FISCHER 2000, S. 120). Beispiele dafür sind Sensoren aus dem Bereich der Automobiltechnik (Gierratensensor, Beschleunigungssensor, vgl. Abb. 2-1) (SEIDEL U. A. 2001) und Systeme aus dem Bereich der optischen Kommunikation, wie Shutterarrays (PIZZI U. A. 2001, MOSELEYA U. A. 2000) oder Mikrospiegelarrays (SCHWEIZER U. A. 2000, AKSVUK U. A. 2000) (vgl. Abb. 1-2). Die Integration neuer Materialien in die Fertigung halbleiterbasierter MST bringt entweder eine größere Vielfalt von Bearbeitungsschritten oder eine Integration zusätzlicher Sonderprozesse (KERGEL U. A. 1995) mit sich, die wiederum mit extrem hohen Investitionskosten einhergehen.

Um die Potentiale der MST besser auszunutzen, werden über Halbleiterwerkstoffe hinaus immer mehr Materialien in Mikrosystemen eingesetzt, die spezifisch an die jeweiligen Anforderungen angepasst sind. So werden z.B. bei MOEMS auch strahlführende und strahlformende Elemente wie Glasfasern oder Mikrolinsen in die Systeme integriert (GERLACH U. A. 2001), die aus Glas, bzw. Kunststoff bestehen.

Auch in anderen Bereichen, wie der Mikrofluidik, sind funktionsoptimierte Materialien für eine bessere Aufgabenerfüllung nötig (BARTOS U. A. 2001). Aus

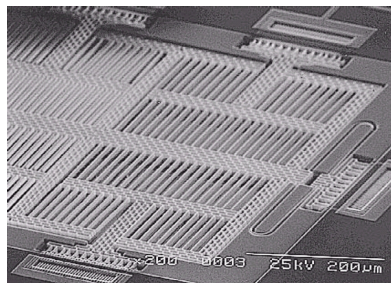


Abb. 2-1: Beschleunigungssensor für die Airbagauslösung (Quelle: TEMIC)

³ 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).

diesem Grund sind weitere Technologien für die Fertigung von Mikrobauteilen entwickelt worden, wie die LIGA-Technik (EHRFELD & MÜNCHMEYER 1991; FISCHER 2000, S. 117, EHRFELD U. A. 1997), das Heißprägen von Mikrostrukturen (HACHELE U. A. 1997, GERLACH U. A. 2001), sowie das Mikrospritzgießen (MICHAELI U. A. 1998). Weitere Technologien, die insbesondere auch das Fertigen von kleineren und mittleren Stückzahlen unterstützen, sind die Mikrostereolithographie (GÖTZEN 1998), die Laserstrukturierung (BASTING & ENDERT 1997, BUCHNER U. A. 2000, DICKMANN U. A. 1998, GILLNER 2000), sowie die spanende Bearbeitung von Mikrostrukturen (GEBHARDT 1998, KLEIN U. A. 1997, WEINERT U. A. 1998). Die dabei entstehenden einzelnen Komponenten müssen zu Gesamtsystemen montiert werden, die man als hybride Mikrosysteme bezeichnet.

Die für den Aufbau von hybriden Mikrosystemen benötigten Montagetechniken lassen sich in Positionier- und Fügetechnologien unterscheiden und werden unter dem Begriff Mikromontage zusammengefasst. Der Übergang von Mikromontage zur **Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)** gestaltet sich dabei fließend. NIENHAUS 1999A beschreibt die Mikromontage als den Bereich, in dem die Montagevorgänge eher seriell stattfinden, während im Bereich der AVT die Montage- und Fügeprozesse eher parallelisiert auf Chip- oder Waferebene realisiert werden (vgl. Abb. 2-2).

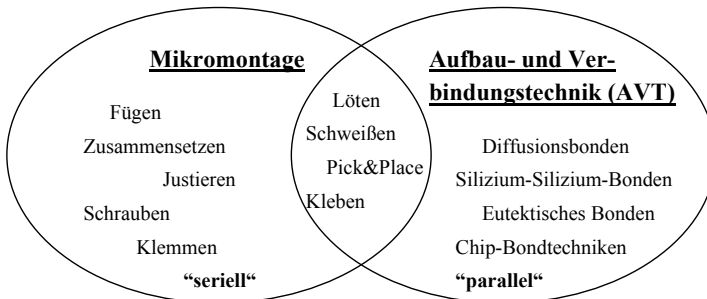


Abb. 2-2: Abgrenzung Mikromontage gegenüber Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) (NIENHAUS 1999A)

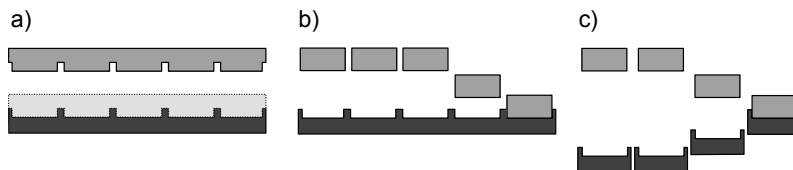
Neben wirtschaftlichen und informationstechnischen Engpässen sieht WICHT (1999) die Montage sowie die Aufbau- und Verbindungstechnik als die technologische **Diffusionsbarriere**, die eine größere Verbreitung von Mikrosystemen verhindert. Dabei sind seiner Studie nach keine Anlagen für die

wirtschaftliche automatisierte Fertigung kleiner und mittlerer Stückzahlen ($< 1.000.000$ St./a) verfügbar. Im Bereich der flexiblen Fertigung sind in der Industrie dafür noch nicht einmal Ansätze vorhanden. Laut Aussage von BINDRA (1997) werden bis zu 75 % der Kosten von MSTs für den Bereich Packaging und Test veranschlagt. Andere Untersuchungen (siehe auch S. 3) gehen von einem Kostenanteil der Montage von bis zu 80% der Wertschöpfung aus.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch den Einsatz von aufgabenoptimierten Materialien die Anwendungsgebiete für Mikrosysteme wachsen. Es müssen aber parallel dazu Montage-, sowie Aufbau- und Verbindungstechnologien entwickelt werden, damit die Systeme auch in kleinen und mittleren Stückzahlen wirtschaftlich gefertigt werden können.

2.2 Montagestrategien in der Mikrosystemtechnik

Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, sind für den Aufbau hybrider Mikrosysteme Montagevorgänge nötig. Nach SPATH & THIES (1996) lassen sich zwei grundlegende Montagestrategien in der Mikromontage unterscheiden. Dies ist zum einen die **serielle Montage**, bei der diskrete Einzelkomponenten nacheinander auf ein oder mehrere Substrate montiert werden, zum anderen die **parallele Montage**, bei der gleichzeitig eine Vielzahl an Bauteilen auf ein Substrat montiert wird (Abb. 2-3). Darüber hinaus existiert noch eine Mischform der seriellen und parallelen Montage, bei der eine serielle Montage von Bauteilen auf einen sogenannten Nutzen⁴ stattfindet.



*Abb. 2-3: Unterschied parallele und serielle Montage: a) parallele Montage
b) Mischform c) serielle Montage (SPATH & THIESS 1996)*

Bei der **parallelen Montage** halbleiterbasierter Mikrosysteme kommen Wafer zum Beispiel aus Silizium, Galliumarsenid oder Glas zum Einsatz, die in mehreren Schichten aufeinander gefügt werden. Dabei werden Fügeverfahren

⁴ Ein Substrat auf dem parallel mehrere gleichartige Bauteile vorhanden sind.

zum Waferbonden wie z.B. Silicon-Fusion-Bonding, Glass-Fritt-Bonden (HÜLSMANN 2001) verwendet. Die parallele Montage (Abb. 2-3 a), häufig auch als Nutzenmontage bezeichnet, findet sich insbesondere in der Großserienproduktion, wie beispielsweise bei der Fertigung von Beschleunigungssensoren für den Kfz-Bereich (Abb. 2-1). Bei dieser Anwendung werden z.B. fünf Wafer aufeinander gebondet und die empfindlichen Strukturen, die zur Aufnahme der Beschleunigungen aus dem mittleren Wafer freigeätzt wurden, durch die darüber und darunter aufgetragenen Schichten geschützt (HÜLSMANN 2001). In NIENHAUS (1999B) wird darüber hinaus auch die parallelisierte Montage von Mikrotrieben dargestellt, bei der die Einzelteile in einem Mikrospritzgussverfahren gefertigt und danach durch gleichzeitiges Herausdrücken aus dem Nutzen parallel montiert werden.

Der Einsatz der parallelen Montage ist jedoch technologisch und wirtschaftlich begrenzt. Nach HÖHN (2001) ergeben sich folgende Nachteile:

- ◆ Eingeschränkte Gestaltungsmöglichkeiten bezüglich Material, Design und damit auch Funktion
- ◆ Hohe Temperaturbelastung der Bauelemente beim Waferbonden
- ◆ Hohe Prozesskosten, die nur über entsprechende Stückzahlen wirtschaftlich werden

Diese Einschränkungen bedingen den Einsatz serieller Montageprozesse, da nur so die Möglichkeiten hybrider Mikrosysteme ausgeschöpft werden können. Hierbei werden die einzelnen Bauteile nacheinander auf Substrate gesetzt und mit diesen verbunden (Abb. 2-3 c). Der Großteil der Mikrosysteme ist in Schichten aufgebaut, weshalb von **2½-dimensionalen** Mikrosystemen gesprochen wird. Als Fügeverfahren kommen unterschiedlichste Verfahren zum Einsatz, die der jeweiligen Aufgabe angepasst sind. Die verwendeten Verfahren basieren zum einen auf konventionelle Fügeverfahren, die auch in der Elektronikfertigung eingesetzt werden, wie Löten oder Wire-Bonden. Zum anderen werden aber auch spezielle Verfahren implementiert, wie das Verkleben von optischen Bauteilen wie Linsen und Glasfasern mit Klebstoff, dessen Brechungsindex dem der optischen Elemente angepasst ist (GERLACH U. A. 2001).

In GRAMANN (1999) und REINHART U. A. (2001) werden Beispiele für die serielle Montage von Bauteilen zum Nutzen hin beschrieben (Abb. 2-3 b). Der Vorteil dieser Technik ist, dass die Bauteile auf dem Nutzen für einen nachgeordneten

Prozessschritt, der parallelisiert durchgeführt werden kann, zur Verfügung stehen.

2.3 Montageproblemstellungen in der Mikrosystemtechnik

Eine Kernproblematik bei der Montage hybrider Mikrosysteme stellt die präzise Positionierung der Bauteile dar. Im Gegensatz zur Präzisionsmontage in der Elektronikproduktion (z.B. Bestückungstechnik), bei der Positioniergenauigkeiten von typ. 50 - 100 μm gefordert sind, müssen im Bereich der Montage hybrider Mikrosysteme Positioniergenauigkeiten bis zu einem Mikrometer erreicht werden. In Tab. 2-1 sind die Unterschiede der Montageaufgabenstellung aus der Mikroelektronik und der MST exemplarisch dargestellt.

	Montageanforderungen aus der Mikroelektronik	Montageanforderungen aus der MST
Bauteileigenschaften	Quaderförmige Bauteile mit fester Struktur Unempfindliche Oberflächen i.d.R. definierte Greifflächen hohe Standardisierung bei SMD-Bauteilen	Funktion bestimmt die Geometrie (Chips, Linsen etc.) Bruchempfindliche Materialien (GaAs, Glas etc.) 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 Fügeichtung normal zur Montageebene	Montage in mehreren Ebenen (2,5-D) Unterschiedliche Fügerichtungen
Stückzahlen	i.d.R. hoch	Häufig kleine Losgrößen, typ. 10 bis 100 St./d (THOBEN 1999, S. 8)

Tab. 2-1: Unterschiede zwischen Montageanforderungen aus der Mikroelektronik und der MST (HÖHN 2001, S. 14)

Zur Montage der Mikrokomponenten müssen Strukturen zueinander ausgerichtet werden. Derartige **Referenzstrukturen** können Außenstrukturen von Bauteilen, Funktionsstrukturen auf Bauteilen oder aber auch spezielle Marken sein, die für die Detektion des Bauteils aufgebracht wurden (KIP 1999, VIKRAMADITYA 1995, VIKRAMADITYA & NELSON 1997). Je nach Lage der Strukturen, die zueinander ausgerichtet werden müssen, klassifiziert HÖHN (2001, S. 43 ff) drei unterschiedliche Montageszenarien. Dabei betrachtet er die zu montierenden Bauteile aus der Position eines sich über dem Montageort befindlichen Beobachters.

Bei den **Montageszenarien** der 1. Art und der 2. Art sind die Referenzstrukturen jeweils von oben sichtbar. Der Unterschied besteht dabei in der Lage der Referenzmarken auf dem Substrat, die bei dem Szenario der 1. Art ebenfalls von oben sichtbar sind, während sie im zweiten Fall vom Bauteil verdeckt werden (vgl. auch Abb. 2-4). Beim Montageszenario der 3. Art befinden sich die Referenzstrukturen des Bauteils auf der Unterseite und sind somit von einem über dem Montageort befindlichen Beobachter nicht zu erkennen. Im folgenden werden Bauteile, die dem Montageszenario der 3. Art zugeordnet werden können, als **unterseitenstrukturierte Bauelemente** beschrieben.

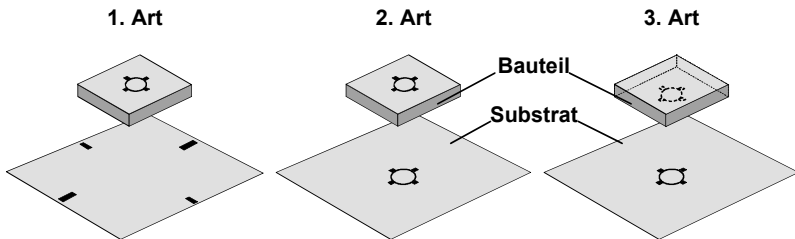


Abb. 2-4: Schematische Darstellung von Montageszenarien zur Klassifizierung an Hand der Sichtbarkeit von Referenzstrukturen (HÖHN 2001)

2.4 Unterseitenstrukturierte Bauteile

2.4.1 Überblick

Die Anforderung, unterseitenstrukturierte Bauteile zu einem Substrat auszurichten, ist eine häufige Aufgabenstellung im Bereich der MST. So müssen **Wafer** beim Waferbonden (vgl. Abschnitt 2.2) zueinander ausgerichtet werden

(Abb. 2-5 a). Dies geschieht mit Hilfe von auf dem Wafer befindlichen Referenzstrukturen.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist der Aufbau von **mikrochemischen und mikrobiologischen Reaktoren** (Abb. 2-5 b). So werden für den Aufbau von mikrochemischen Reaktoren mehrere Schichten mit mikrostrukturierten Platten übereinander zusammengesetzt (EHRFELD U. A. 1997, HESSEL U. A. 1995, BAUER U. A. 2001). Dabei muss gewährleistet sein, dass die Flüssigkeiten zwischen den Ebenen ausgetauscht werden können. Dafür müssen die Durchlässe der oberen Schicht zu den Strukturen der darunter liegenden Schicht präzise ausgerichtet werden.

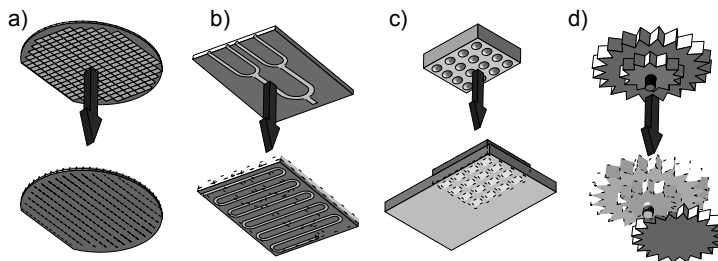


Abb. 2-5: Schematische Darstellung typischer Aufgabenstellungen zur Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente in der MST

NIENHAUS (1999B) und HÖHN (2001) beschreiben als Anwendungsbeispiele für die Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente halbleiterbasierte Bauteile, sogenannte **Flip-Chip-Bauteile**, die mit elektrischen Kontakten auf ein Substrat aufgesetzt werden (Abb. 2-5 c). Dabei handelt es sich bei NIENHAUS (1999B, S. 20 ff.) um eine Anwendung aus der Hochfrequenztechnik, bei der Bauelemente eines Radarsensors montiert werden. HÖHN (2001, S. 132 ff.) beschreibt eine Anwendung aus dem Bereich der optoelektronischen MST, bei der Flip-Chip-Laserdioden positioniert werden. Die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit liegen dabei jeweils bei unter 10 µm.

Eine weitere Aufgabenstellung, bei der zur Reduzierung der Toleranzkette eine Ausrichtung von gegenüberliegenden Strukturen zweckmäßig ist, ist die Montage von **Mikrogetrieben** (Abb. 2-5 d). Allgemein wird dies als Bolzen-Loch-Problem bezeichnet. Im Rahmen der Montage von Mikrogetrieben müssen aber meist nicht nur eine Achse in ein Lager eingeführt, sondern auch Zahnräder ineinander eingeführt werden, wobei durch Mehrstellenkontakte erhebliche

Schwierigkeiten auftreten können (NIENHAUS 1999b, S. 75 ff., BARTH 2000, S. 60 ff., WIDMANN 2000, S.90 ff., THÜRIGEN 2000).

Aufgrund der Vielzahl von möglichen Anwendungen wird im Folgenden der Fokus auf die in der MST am häufigsten auftretende Aufgabe, die präzise Positionierung und Ausrichtung von Flip-Chip-Bauelementen, gelegt. Die nachfolgend beschriebenen Verfahren sind jedoch prinzipiell auf die anderen in Abb. 2-5 betrachteten Aufgabenstellungen übertragbar.

2.4.2 Flip-Chip-Bauelemente

Der Begriff Flip-Chip wird sowohl in der Mikrosystemtechnik als auch in der Mikroelektronik verwendet, aus der diese Technik für die MST übernommen wurde. Als Flip-Chip wird ein Silizium-Chip bezeichnet, dessen elektrische Kontakte auf der Bauteilunterseite liegen und deren Kontaktierung simultan durchgeführt wird (REICHL 1986, S. 215, RUTTERSCHMIDT 1997). Damit ist die kürzest mögliche Strecke zur elektrischen Kontaktierung des Bauteils verwirklicht. Im Gegensatz zu den in der Mikroelektronik oft eingesetzten Ball-Grid-Array (BGA) oder Chip-Size-Package (CSP)⁶ liegt das Bauteil hier als „nackter Chip“ (Bare-Die) vor und ist somit noch nicht in ein Gehäuse verpackt. Gegenüber dem BGA und dem CSP werden also eine noch geringere Baugröße und eine höhere Packungsdichte erreicht (Abb. 2-6).

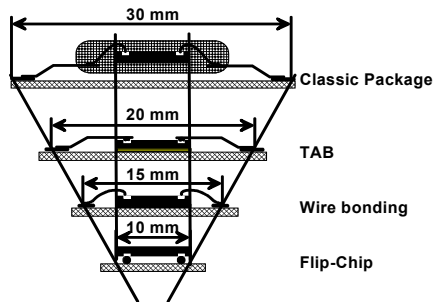


Abb. 2-6: Vergleich üblicher Packages⁵ in der Mikroelektronik

⁵ Als Package wird die Bauform beschrieben, in dem ein Elektronikbaustein verarbeitet wird. Übliche Packages sind Taped-Automated-Bonding (TAB), Chip Size Package (CSP), Chip on Board (COB), Flip-Chip (FC).

⁶ Weiterführende Informationen zu unterschiedlichen Packungsformen in der Elektronikindustrie sind HACKE (2000), PATTERSON U. A. (1999), TÖPPER & REICHL (1997), PETTER (1997) zu entnehmen.

2.4.2.1 Gründe für den Einsatz von Flip-Chip-Bauelementen in der MST

Der Einsatz der Flip-Chip Technologie in der MST bringt mehrere Vorteile mit sich. Zum einen beanspruchen Flip-Chip-Bauelemente im Vergleich zu anderen Kontaktierungsformen aus dem Bereich der Mikroelektronik das **geringste Bauvolumen**. Zum Vergleich sind in Abb. 2-6 Packagingvarianten, die heute in der Mikroelektronik zum Einsatz kommen, dargestellt.

Zum anderen spielen neben den rein volumetrischen Vorteilen der Flip-Chip-Technik insbesondere **Leistungsvorteile** in der MST eine wichtige Rolle bei dem Einsatz der Flip-Chip-Technik. Bei Mikrosystemen für die **Hochfrequenztechnik** bspw. wirkt jeder Draht wie eine separate Antenne. Werden bei solchen Frequenzen konventionelle Verfahren der Mikroelektronik zur Kontaktierung von Bauteilen wie Wire-Bonding verwendet, kann die Funktion des Systems durch parasitäre Effekte der einzelnen Drahtverbindungen gestört werden. In Tab. 2-2 sind elektrische Kenngrößen der Wire-Bond-Technologie im Vergleich zur Flip-Chip-Technik dargestellt. Die elektrischen Kennwerte der Flip-Chip-Technik sind um ein Vielfaches besser als bei der konventionellen Kontaktierung. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Leistungsvorteile der Flip-Chip-Technologie insbesondere im Bereich der MST zur Geltung kommen.

	Konventionelle Technik (Wire-Bond)	Flip-Chip-Technik
Selbstinduktivität	1,7 nH	0,05 nH
Koppelinduktivität	0,01 nH	0,001 nH
Erdkapazität	0,02 pF	0,01 pF
Widerstand	30 mΩ	0,3 mΩ
Dämpfung	0,31 dB/m	0,05 dB/m
Grenzfrequenz	10 GHz	> 20 GHz

Tab. 2-2: Vergleich der elektrischen Eigenschaften von Flip-Chip-Verbindungen mit konventionellen Wire-Bond-Verbindungen
(PATTERSON U. A. 2000, REICHL 1998, S. 227)

2.4.2.2 Fertigung von Flip-Chip-Bauelementen

Die Fertigung von Flip-Chip-Bauelementen entspricht im Front-End Bereich der Fertigung von Bauelementen in der Halbleitertechnik. Dabei werden durch Auftragen von Fotolack, der dann über fotolithografische Prozesse belichtet wird, Bereiche auf dem Halbleitermaterial maskiert. In den darauf folgenden Prozessen werden die nicht maskierten Bereiche geätzt und so strukturiert. Darüber hinaus können Opferschichten, Ätzstoppschichten und andere Funktionsschichten auf den Wafer aufgebracht werden, d.h. dass die Strukturen und elektrischen Funktionen innerhalb mehrerer Prozessschritte appliziert werden. Genauere Informationen über die Möglichkeiten der **Silizium-Mikromechanik** können FISCHER (2000) und MENZ & MOHR (1996) entnommen werden.

In einem letzten Schritt werden die elektrischen Kontakte, mit denen das Bauteil auf das Substrat aufgesetzt wird, die sogenannten **Bumps**, auf den Wafer aufgebracht. Für die Herstellung der Bumps wird eine Vielzahl an Techniken eingesetzt, die vom Elektroplating (DIETRICH U. A. 1999) über Conductive Polymer Bumps (LIN U. A. 1997) bis hin zu umgeschmolzenen Pb Bumps (QUINONES U. A. 2000) oder goldbeschichteten Kupferbumps (VARDAMAN 1999) reicht. Welche Bump-Art auf den Wafer aufgebracht wird, ist abhängig von dem nachfolgenden Fügeverfahren.

Nach dem Bumping wird der Wafer mit seiner unstrukturierten Seite auf eine adhäsive Folie, ein sogenanntes Bluetape, aufgeklebt und mit einer Wafersäge in einzelne Chips zersägt (**dicing**). Dabei bleiben die Bauteile geordnet auf dem Bluetape, das beim Sägeprozess nicht durchtrennt wird. Zum Vereinzeln der Bauelemente wird mit einem sog. Die-Ejector mit einer oder mehreren Nadeln das Bluetape von der Unterseite durchstoßen und dabei das Bauteil nach oben weggedrückt, so dass dieses mit einem Sauggreifer aufgenommen werden kann. Bevor das Bauteil auf das Substrat montiert werden kann, muss es noch um 180° gedreht (geflippt) werden, damit die Bumps auf die Kontakte des Substrats (Pads) aufgesetzt werden können. Aufgrund dieses Flip-Vorgangs werden derartige Bauelemente als **Flip-Chips** bezeichnet.

2.4.2.3 Verbindungstechnik für Flip-Chips

Zur Befestigung und Kontaktierung von Flip-Chip-Bauelementen auf einem Substrat werden, wie in Abschnitt 2.4.2.2 angesprochen, unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Diese reichen von Löt- über Klebe- bis hin zu anodischen Bondprozessen. In den folgenden Abschnitten soll ein kurzer Überblick über die wichtigsten Verfahren zur elektrischen Kontaktierung gegeben werden.

◆ Lötprozesse

Löten wurde als erster Prozess für die elektrische Kontaktierung von Flip-Chips entwickelt. Dabei kommt häufig der sogenannte C4 Prozess (Controlled Collapse Chip Connection) zum Einsatz, der von IBM im Jahr 1965 entwickelt wurde (FRIESWIJK U. A. 1997). Der Flip-Chip wird mit seinen Bumps, die aus lötfähigem Material bestehen, auf die Pads des Substrats aufgesetzt. Durch das Erhitzen des Bauteils und des Substrats über die Schmelztemperatur des Lots wird dieses flüssig und benetzt die Pads. Durch die Oberflächenspannungen des Lots kommt es zu einem **Selbstzentrierungseffekt** des Bauteils, durch den der Chip mittig auf die Pads gezogen wird. Dadurch können Ungenauigkeiten in der Positioniertechnik ausgeglichen werden. Der Prozess wurde im Lauf der Jahre weiter entwickelt und verfeinert, wobei Details der weiterführenden Literatur (KUHMANN 1997, TEUTSCH U. A. 2000) zu entnehmen sind. Im Anschluss daran wird in der Regel noch ein sogenannter Underfill-Prozess durchgeführt (CAMELOT 1999). Durch das Einbringen eines Adhäsivs in die Fuge zwischen Chip und Substrat werden Spannungen, die durch die unterschiedlichen Temperaturausdehnungskoeffizienten von Chip und Substrat entstehen, aufgenommen. Darüber hinaus verbessert das Underfillmaterial den Wärmeübergang zwischen Bauteil und Substrat.

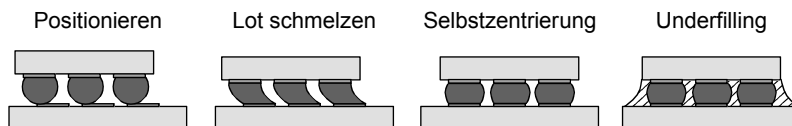


Abb. 2-7: Schematischer Ablauf beim Kontaktieren von Flip Chip Bauelementen durch Löten

◆ Klebprozesse

Eine weitere zunehmend häufig gebrauchte Möglichkeit zur Kontaktierung von Flip-Chips ist der Einsatz von Klebstoffen (vgl. Abschnitt 6.1). Dabei werden Klebstoffe verwendet, die nichtleitend, elektrisch leitfähig oder elektrisch gerichtet leitfähig sind.

Nichtleitende Klebstoffe können bei Bump-Arten verwendet werden, die eine elektrische Kontaktierung der Pads durch die aufgetragene Klebstoffschicht ermöglichen (VRANA U. A. 1999). Durch den beim Aushärten leicht schrumpfenden Klebstoff wird ein Zug auf das Bauteil in Richtung Substrat ausgeübt (ASCHENBRENNER U. A. 1999). In diesem Fall kann auf einen Underfiller verzichtet werden, da der Klebstoff diese Funktion übernimmt (Abb. 2-8 d). Darüber hinaus kann der Klebstoff flächig aufgetragen werden.

Wird **leitender** Klebstoff (Isotropic Conductive Adhesive ICA) eingesetzt und sollen mehrere elektrische Kontakte hergestellt werden, müssen diese separat mit Klebstoff benetzt werden. Leitender Klebstoff ist ein mit Silberflakes⁷ gefüllter Klebstoff, der aufgrund der Füllstoffe sowohl thermisch als auch elektrisch gut leitfähig ist. Das Aufbringen des Klebstoffs kann dabei mit unterschiedlichen Techniken geschehen. Er kann über einen Stempelprozess, bei dem ein Stempel, der über Stempelspitzen in der Anordnung der Pads des Substrates verfügt, auf das Substrat aufgebracht werden (Abb. 2-8 b). Der Klebstoff kann auch über einen Klebstoffdispenser in dem erforderlichen Muster aufgetragen werden. Da hierbei im Bereich der MST sehr geringe Volumina appliziert werden, kommen hauptsächlich Volumendispenser⁸ in Frage, da Druck-Zeit Dispenser nicht in der Lage sind, die benötigten kleinen Volumina reproduzierbar zu erzeugen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Bauteil mit den Bumps in ein „Klebstoffbad“ einzutauchen (dippen), so dass die benötigte Menge Klebstoff an jedem Bump anhaftet (Abb. 2-8 a). Im Anschluss an den Klebeprozess mit Leitleber muss in den meisten Fällen, wie auch beim Lötten, ein Underfillprozess durchgeführt werden.

⁷ Silberpartikel, die einen Durchmesser von bis zu 30 µm haben

⁸ Schrauben- und Kolbendispenser (Positive-Displacement-Dispenser); eine Übersicht mit Funktionsprinzipien findet sich z.B. in GESANG U. A. (1997).

Gerichtet leitfähige Klebstoffe (Anisotropic Conductive Adhesives ACA) sind ebenfalls mit leitenden Partikeln gefüllt (Abb. 2-8 c). Diese sind aber nicht in so hoher Dichte wie in ICA Klebstoffen vorhanden, so dass die einzelnen Partikel untereinander keinen Kontakt haben. Erst beim Aufbringen von Druck und der Verringerung des Abstands zwischen Bump und Pad auf ca. die Dicke der im Klebstoff enthaltenen Leitpartikel wird der elektrische Kontakt zwischen Bauteil und Substrat hergestellt (MIEBNER U. A. 2000). Um die Prozesssicherheit zu erhöhen, wurden Klebstoffstreifen entwickelt, die beidseitig haften und in denen die Leitpartikel in geordneter Form vorliegen (ELLSÄBER 2000).

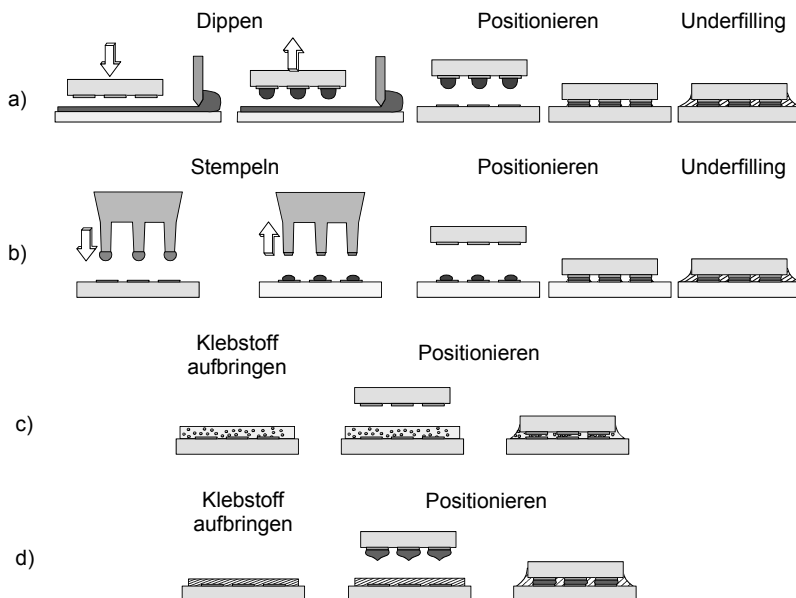


Abb. 2-8: Ablauf bei der Kontaktierung von Flip-Chip-Bauelementen durch Kleben a) Leitklebstoff dippen b) Leitklebstoff stempeln c) gerichtet leitfähiger Klebstoff d) nicht leitfähiger Klebstoff

◆ Thermokompressionsbonden (TC-Bonden)

Neben dem Kleben und dem Löten von Flip-Chips können die Bauteile auch über einen Thermokompressionsbondprozess mit den Pads des Substrats verbunden werden. Die Verbindung wird durch die Einwirkung von Druck und Temperatur erreicht, wobei die Korngrenzen der beiden Fügepartner miteinander verschweißen (REICHL 1998, S. 191). Die Pads und die Bumps bestehen meist aus Gold, es sind aber auch andere Materialkombinationen möglich.

Auch bei der Kontaktierung des Flip-Chip Elements durch TC-Bonden ist ein nachgelagerter Underfill-Prozess nötig, der für mechanische Stabilität und bessere Wärmeableitung des Bauteils sorgt (REICHL 1986, S. 217, BUCHALI U. A. 2000).

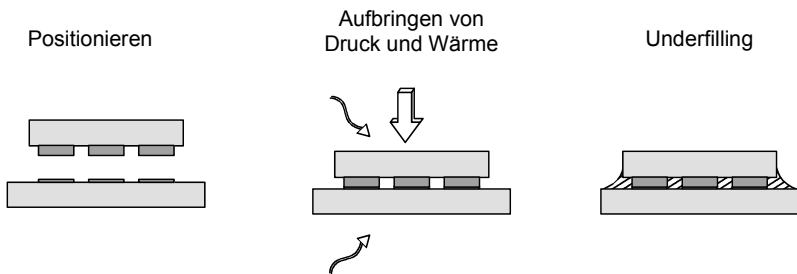


Abb. 2-9: Ablauf bei der Kontaktierung von Flip-Chip Bauelementen durch TC-Bonden

2.4.2.4 Übersicht über die Verbindungstechniken für Flip-Chip-Bauelemente

In Tab. 2-3 sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Fügeverfahren bei ihrem Einsatz in der MST zusammengefasst. Die in Abschnitt 2.4.2.3 dargestellten Verfahren bilden die Grundlage für die Tabelle.

	Vorteile	Nachteile	
Löten	Ausgereifter Prozess	Nicht für Mikrooptik geeignet	
	Selbstzentriereffekt	Großer Pitchabstand ⁹	
	Gute elektrische Kontaktierung	Hohe thermische Belastung von Bauteil und Substrat	
		Underfill- Prozess nötig	
Kleben	Nicht leitfähig	Für Mikrooptik geeignet	Kein Selbstzentriereffekt
		Kein Underfill- Prozess nötig	Spezielle Bumpform und geeigneter Klebstoff nötig
		Keine bis geringe thermische Belastung	Elektrische Kontaktierung unsicherer
		Geringer Pitchabstand	
	ICA	Gute elektrische Kontaktierung	Genaue Dosierung kleinster Volumina nötig
		Keine bis geringe thermische Belastung	Kein Selbstzentriereffekt
		Geringer Pitchabstand	Underfill- Prozess nötig
			Für Mikrooptik bedingt geeignet
	ACA	Einfachere Dosierung als bei ICA	Genaue Einstellung der Klebstoffdicke nötig
Keine bis geringe thermische Belastung		Elektrische Kontaktierung unsicher	
Kein Underfill- Prozess nötig		Kein Selbstzentriereffekt	
Geringer bis mittlerer Pitchabstand		Für Mikrooptik bedingt geeignet	
TC-Bonden	Gute elektrische Kontaktierung	Hohe thermische und mechanische Belastung	
	Geringer Pitchabstand	Underfill- Prozess nötig	
		Kein Selbstzentriereffekt	
		Nicht für Mikrooptik geeignet	

Tab. 2-3: Vergleich von Fügeverfahren für die Montage von Flip-Chip-Bauelementen

⁹ Als Pitchabstand wird der Abstand zwischen den Pads, bzw. den Bumps bezeichnet.

2.5 Automatisierte Mikromontage

2.5.1 Positionierverfahren

Die präzise Positionierung einzelner Bauteile spielt eine zentrale Rolle im Rahmen des Aufbaus von hybriden Mikrosystemen. Von der genauen Lage der einzelnen Bauteile zueinander hängt die Funktionalität und die Qualität der Systeme direkt ab. Prinzipiell können zwei unterschiedliche Positionierverfahren voneinander unterschieden werden. In den derzeit auf dem Markt erhältlichen Montageanlagen wird überwiegend die **absolutgenaue Positionierung** von Bauteilen durchgeführt.

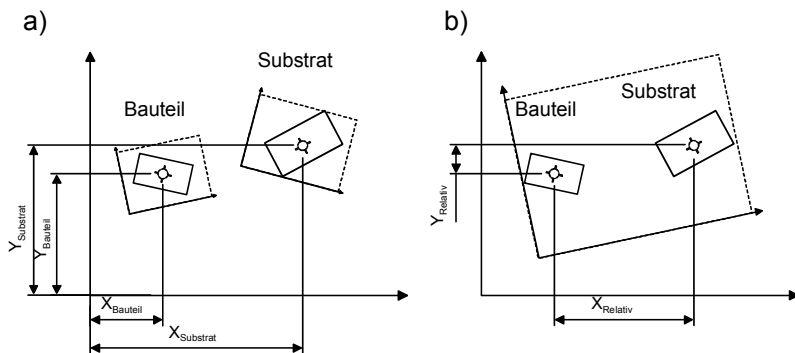


Abb. 2-10: Unterscheidung von Positionierverfahren:

a) Absolutgenaue Positionierung b) relative Positionierung

Abb. 2-10 a stellt das Prinzip der absolutgenauen Positionierung dar. Dabei werden Bauteil und Substrat von zwei unabhängigen Lagemesssystemen vermessen und die jeweilige Lage in das Bezugskoordinatensystem des Handhabungsgeräts zurückgerechnet. Die Positionierung erfolgt in einem einmaligen absolutgenauen Verfahrensschritt. Um die Umrechnung der Koordinatensysteme zueinander realisieren zu können, muss die genaue Lage der Koordinatensysteme der Lagemesssysteme im Handhabungskoordinatensystem bekannt sein. Kommt es zu Lageänderungen der Koordinatensysteme zueinander, wie beispielsweise aufgrund von Längenänderungen im Handhabungssystem durch thermische Einflüsse, ergeben sich zwangsläufig Ungenauigkeiten bei der Positionierung, die nicht korrigiert werden.

Während die absolutgenaue Positionierung dem Stand der Technik entspricht, kommen **relative Positionierverfahren** bis jetzt nur vereinzelt zur Anwendung.

Im Rahmen der relativen Positionierung (Abb. 2-10 b) werden sowohl die Positionen des Bauteils als auch die des Substrats von einem Lagemesssystem ermittelt. Dadurch kann die relative Abweichung der Bauteile zueinander als Grundlage für die Korrekturbewegung herangezogen werden. Nach dem Korrekturschritt ist darüber hinaus noch eine Lagekontrolle über eine zweite Vermessung der Lage der Bauteile zueinander möglich. Damit kann ein geschlossener Lageregelkreis zur Positionierung der Bauteile zueinander aufgebaut werden, durch den äußere Störeinflüsse eliminiert werden.

2.5.2 Sensoren zur Lageerkennung

Die für die automatisierte Montage benötigten Informationen über die Lage von Substrat und Bauteil werden überwiegend mit Hilfe von **digitalen Bildverarbeitungssystemen** gewonnen. Die Objektive, die für die Bildakquisition zum Einsatz kommen, sowie die Kameras müssen über eine hohe optische Qualität und Auflösung verfügen, da die erreichbare Positioniergenauigkeit direkt von der Genauigkeit der Bildaufnahme abhängig ist.

Für das Vermessen kommen insbesondere **telezentrische Objektive** in Frage, da durch sie keine perspektivischen Verzerrungen auftreten (NAVITAR 2000, ECKERL U. A. 1999, JENOPTIK 2000). Hochauflösende CCD- Kameras und digitale Bildverarbeitungssysteme, die auch über Subpixelalgorithmen¹⁰ verfügen, ermöglichen je nach Größe des Kamerasichtfelds eine Auflösung von bis zu unter 1 μm (JENNER 1999). Für die Erkennung von dreidimensionalen Strukturen kann aus Bilderfolgen mit unterschiedlicher Fokuslage die jeweilige Bildstruktur, die im Bereich der Schärfentiefe des Objektivs liegt, extrahiert werden. Über eine nachfolgende Berechnung ist es möglich, die dreidimensionale Struktur des Bauteils zu bestimmen (GENGENBACH & VOIGT 2001). Für Auflösungen, die über das optische Auflösungsvermögen hinaus gehen, sind auch Mikromontagevorgänge unter dem Elektronenmikroskop realisiert worden (WECK & PETERSEN 1998).

¹⁰ Weiterführende Informationen zu Algorithmen der digitalen Bildverarbeitung in WAHL (1984), JAHNE (1989) und HABERÄCKER (1985).

2.5.3 Greifer

Die Greiftechnik stellt die Schnittstelle zwischen Handhabungsgerät und Mikrobauteil dar und ist somit eine Kernkomponente bei der Montage von Mikrosystemen. In VDI-RICHTLINIE 2860 wird das Greifen als vorübergehendes Sichern eines Körpers in einer bestimmten Orientierung und Position definiert und in die Unterfunktionen Halten und Lösen aufgeteilt. Dabei stellen die physikalischen Effekte und die besonderen Eigenschaften von Mikrosystemen spezielle Anforderungen an die Greiftechnik. Bei den physikalischen Effekten ist die Zunahme des Einflusses von Oberflächenkräften wie Van-der-Waals-Kräfte, Oberflächenspannungen und elektrostatischen Kräften gegenüber Volumenkräften, insbesondere die der Gewichtskraft, zu nennen (MABOUDIAN & HOWE 1997). Das hat zur Folge, dass ein entsprechend kleines Bauteil beim Öffnen eines Greifers sich unter Umständen nicht von diesem löst, sondern an dem Greifer haften bleibt.

Darüber hinaus dürfen die zum Teil sehr spröden Materialien (GaAs, Glas, Keramik) nicht zu großen Kräften ausgesetzt werden, da sonst die Gefahr besteht, dass die Bauteile beschädigt werden. Dabei ist auch zu beachten, dass durch die sehr kleinen Kontaktflächen zwischen Greifer und Bauteil auch bei geringen Greifkräften sehr schnell hohe Flächenpressungen auftreten können. Aus diesem Grund wurde insbesondere bei der Entwicklung von Backengreifern (meist Zweibackengreifer) versucht, **Kraftsensorik** zur Überwachung der auftretenden Kräfte zu integrieren (ZÖPPIG 1998, S. 109 ff, HANKES 1998, S. 31, BRÖCHER 2000, S. 101 ff) oder die Greifer so zu gestalten, dass die Kräfte passiv über nachgiebige Strukturen begrenzt wurden (NIENHAUS 1999A, S. 85 ff, HENSCHKE 1994, S. 36). Die **Antriebe der Greifer** werden dabei beispielsweise durch Elektromagnete (ZÖPPIG 1998, S. 82), Pneumatik (SCHLICK & ZÜHLKE 2001), Piezoelemente (DÜNN & WURMUS 1999, PETERSEN 1999, WAGNER 1998), Formgedächtnislegierungen (HESSELBACH 1995) und Elektromotoren (FISCHER U. A. 1997, ZÜHLKE U. A. 1997) realisiert. Darüber hinaus wurden für das Greifen von empfindlichen Bauelementen Adhäsionsgreifer (FISCHER U. A. 1997, WESTKÄMPER U. A. 1996, HENSCHKE 1994, S. 44 ff, GRUTZECK 2000) entwickelt, die die Bauteile mit Hilfe erhöhter Oberflächenspannungen halten. OH (1998) erzielt mit der Verwendung elektrostatischer Greifer ebenso eine gezielte Erhöhung der Oberflächenkräfte gegenüber der Volumenkraft, um damit Bauteile aufnehmen zu können. Für den Einsatz bei empfindlichen Bauelementen existieren Ansätze für Greifsysteme, die eine **berührungslose Handhabung** der

Bauteile ermöglichen (HÖHN & JACOB 1999, AHN & ALLEN 1994, REINHART & HÖPPNER 1999). Ebenso werden auch **Unterdruckgreifer** eingesetzt (HÖHN 2001, NIENHAUS 1999A, ZÖPPIG 1998, S.98 ff), die durch eine flexible Gestaltung und einfache Bauweise gut an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden können. Einen ausführlichen Überblick über aktuelle Greiferentwicklungen ist VAN BRUSSELS U. A. 2000 zu entnehmen.

2.5.4 Handhabungsgeräte

Im Bereich der Hochpräzisionsmontage lassen sich unterschiedliche Systeme unterscheiden. Während in der Elektronikbestückung für die SMD- Bestückung sogenannte Pick-and-Place Automaten oder Chip-Shooter zum Einsatz kommen, die die standardisierten Bauelemente in hoher Stückzahl auf PCBs aufsetzen, werden im industriellen Backend-Bereich sogenannte **Die-Bonder** verwendet. Diese werden für die hochpräzise Montage von ungehäuteten Bauelementen eingesetzt. Einen Überblick über die unterschiedliche Klassifizierung der Positioniersysteme geben BACHMANN U. A. (1999), MÜHLBAUER (1999) und HÖHN (2001, S. 20 ff).

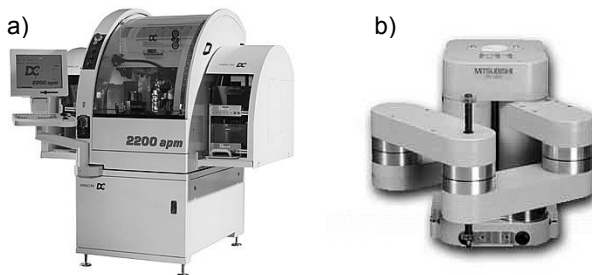


Abb. 2-11: Handhabungsgeräte im Bereich der Präzisions-/ Mikromontage:

a) Hochpräzisionsdiebonder b) Präzisions- SCARA Roboter

(Quelle: Datacon & Mitsubishi)

Handhabungsgeräte, die speziell für den Bereich der hochpräzisen Mikromontage entwickelt wurden, sind bis jetzt auf dem Markt nur begrenzt zu erhalten. Dabei kommen überwiegend **kartesische Aufbauten** (SYSMELEC 1999, SYSMELEC 2000, EPSON 2000, HOFMANN 2001, FELDMANN U. A. 1999) zum Einsatz (Abb. 2-11 a). Auch im Bereich der oben genannten Handhabungsgeräte für die SMD-Bestückung und das Die-Bonden wird überwiegend mit kartesischen Aufbauten gearbeitet (DATACON 2001, SÜSS 2000, ESEC 2000). **Vierachsige**

Knickarmroboter (SCARA Roboter) haben sich im Hochpräzisionsbereich bis jetzt nicht durchsetzen können, obwohl auch hier zumindest Modelle (EPSON 2000, BATTENBERG 2000) mit einer Wiederholgenauigkeit bis 5 µm angeboten werden (Abb. 2-11 b). Sechssachsige Knickarmroboter konnten sich auf dem Markt bis heute noch nicht etablieren, obwohl auch hier schon ein System kommerziell angeboten wurde (JENOPTIK 1994).

Die oben angesprochenen Aufbauten können alle der Gruppe der offenen Kinemattketten zugeordnet werden. Im Gegensatz dazu bieten Handhabungssysteme auf der Grundlage geschlossener Kinemattketten (**Parallelkinemattiken**) eine vergleichsweise höhere Steifigkeit bei geringen bewegten Massen an. Dabei wurden speziell von HESSELBACH U. A. (1996), THOBEN (1999) und PI (1998) Parallelkinemattiken für die Mikromontage entwickelt. Das systemimmanente Problem von Parallelkinemattiken des im Vergleich zum Bauraum stark eingeschränkten Arbeitsraums wird durch neueste Entwicklungen von HESSELBACH U. A. (2000) und REINHART U. A. (2000) gelöst. Weitere Fortschritte in diesem Bereich sind zu erwarten.

Im Gegensatz zu den obigen Ansätzen, bei denen die **Grob- sowie die Feinpositionierung** jeweils durch das gleiche Achssystem durchgeführt werden, trennt HÖHN (2001, S. 93 ff) die Grob- und die Feinpositionierung voneinander. Dabei stellt ein kostengünstiges Standard-Handhabungsgerät, beispielsweise ein SCARA - Industrieroboter, einen großen Arbeitsraum zur Verfügung, während eine zusätzliche, am Handhabungsgerät befestigte Feinpositioniereinheit lokal eine hohe Positioniergenauigkeit erreicht.

2.6 Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente

Für die Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente in der MST ist sowohl eine absolutgenaue, als auch eine relative Positionierung möglich. Die bereits realisierten Lösungen lassen sich in drei Hauptgruppen einteilen:

1. Automatisierte Anlagen zur absolutgenauen Positionierung
2. Automatisierte Anlagen zur Relativpositionierung
3. Manuelle Geräte zur Relativpositionierung

2.6.1 Automatisierte Anlagen zur absolutgenauen Positionierung

Da der Bereich der Montage von Mikrosystemen noch eine Marktnische darstellt, wird im kommerziellen Bereich versucht, vorhandene Anlagen den neuen Bedürfnissen der Mikrosystemtechnik anzupassen. Die Entwicklung wird dabei aus zwei Richtungen vorangetrieben. Aus dem Bereich der Elektronikfertigung erfolgt die Weiterentwicklung absolutgenauer Positioniersysteme.

Für die Montage mikrotechnischer Produkte im Großserienbereich werden optimierte Anlagen aus dem Bereich der Bestückungssysteme eingesetzt. Dabei wird mit hohem mechanischen Aufwand versucht die Genauigkeit der Anlagen zu verbessern. Als Beispiele für derartige Anlagen sind Die-Bonder von DATACON (2001), MRSI (2001), sowie ESEC (2000) zu nennen. Allerdings liegt die maximale Positioniergenauigkeit der Anlagen, die alle mit Hilfe der absolutgenauen Positionierverfahren die Bauteile platzieren, im besten Fall bei $12\text{ }\mu\text{m}$ bei 3σ , so dass sie den gewachsenen Ansprüchen der MST nicht mehr genügen. Die geforderten Positioniergenauigkeiten im Prozess in der MST liegen derzeit bei unter $10\text{ }\mu\text{m}$.

Die Hauptproblematik dieser Anlagen liegt in der absolutgenauen Positionierung. Selbst massiver Aufwand im Bereich des Maschinendesigns, insbesondere beim Gestelldesign, um zum Beispiel den Einfluss von Wärmedehnungen, die durch Wärmeentwicklung der Antriebe im Maschinengestell erzeugt werden, genügt nicht, um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen. Der Einfluss von inneren Wärmequellen auf ein entsprechendes Handhabungssystem wurde von KRIMI (2001, S.73 ff) untersucht, der ausgehend von der Erwärmung der Antriebe Verlagerungen am Bestückkopf eines SMD-Bestückautomaten untersucht hat. Die Verlagerungen betrugen über einen Versuchszeitraum von 10 Stunden ca. 10 bis $15\text{ }\mu\text{m}$ in *X*- bzw. *Y*-Richtung.

2.6.2 Automatisierte Anlagen zur Relativpositionierung

Die zweite Entwicklungsrichtung der automatisierten Montage von Flip-Chips in der MST erfolgt aus dem Bereich der Halbleitertechnik. Von der Fa. SÜSS (2000) wurde ein Flip-Chip Bonder entwickelt, der sich für höchste Genauigkeitsanforderungen von $< 1\text{ }\mu\text{m}$ eignet. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung von Anlagen, die für die Ausrichtung der Belichtungsmasken zu Wafern vor dem Belichtungsprozess (Mask Aligner) oder für die Ausrichtung von Wafern zueinander vor dem Waferbonden verwendet werden. Da die

Anwendungen aus der Halbleitertechnik von Haus aus eine extrem hohe Präzision benötigen, sind diese Anlagen in der Lage, die in der MST geforderten Genauigkeiten zu erreichen. Diese werden mit Hilfe einer großen Mikroskopoptik in Verbindung mit einem Hochpräzisions- Handhabungsgerät erreicht. Dieses basiert auf einem luftgelagerten X- / Y-Tisch, der über Linear-direktantriebe verfügt und auf einem temperaturstabilen Granitgestell gelagert ist. Die Anlage stellt eine Einzellösung für den Laborbetrieb und die Kleinserienfertigung dar, die aufgrund ihres Aufbaus nicht in eine Fertigungslinie integriert werden kann. Die aufwändige Konstruktion führt darüber hinaus zu sehr hohen Investitionskosten.

Im Bereich der Forschung wurden ebenfalls erste Ansätze für eine automatisierte Relativpositionierung von unterseitenstrukturierten Bauelementen entwickelt. Insbesondere HÖHN (2001) stellt in seiner Arbeit zwei Strategien vor, die Lösungen für typische Aufgabenstellungen der MST bieten. Auch in NIENHAUS (1999), PAN U. A. (2001) und KUHMANN (1997) werden Lösungsansätze für die Montage mikrosystemtechnischer unterseitenstrukturierter Bauelemente dargestellt.

2.6.3 Manuelle Anlagen zur Relativpositionierung

Manuelle Positioniervorrichtungen sind überwiegend in der Elektronikfertigung für die Montage und Nacharbeit von BGAs und CSPs entwickelt worden (SCHUTZRECHT DE 195 24 475 C1, FINETECH 2000, PESL 1999). Um die Unterseite des elektronischen Bauteils relativ zum Substrat zu positionieren, werden die beiden Bilder über ein Spiegelsystem mit einem halbdurchlässigen Spiegel überlagert und dann zueinander ausgerichtet. Die Hersteller geben Genauigkeiten von bis zu 1 μm an. Der Operator an der Positioniervorrichtung sorgt für die Steigerung der Genauigkeit, wobei er aufgrund seiner Erfahrung die beiden Teilbilder über manuelle Vorrichtungen zueinander ausrichten muss.

Da diese Geräte für die Positionierung flächiger Bauteile der Mikroelektronik entwickelt wurden, sind sie nur begrenzt für Bauelemente aus der MST mit ihren kleinen Abmessungen und variablen Geometrien einsetzbar. Zudem genügen diese Laborgeräte bezüglich ihrer Produktivität nicht den Anforderungen einer modernen mikrotechnischen Produktion.

2.7 Einsatzbereiche während eines Produktlebenszyklus

Im Rahmen der Fertigung durchläuft ein Produkt unterschiedliche Phasen. Diese Absatzkurve wird als **Produktlebenszyklus** bezeichnet, wobei für diesen Begriff unterschiedliche Definitionen existieren. Von COX (1967) stammt die Definition, dass der Produktlebenszyklus „die Entwicklung eines Produkts in einem spezifischen Produkt-Markt-Rahmen, ausgedrückt in der Umsatzentwicklung“ darstellt. Der klassische Produktlebenszyklus ist von AURICH & SCHRÖDER (1977) in fünf Phasen unterteilt worden.

In der **Einführungsphase** wird das Produkt langsam mit niedrigen Stückzahlen in den Markt eingeführt. Dabei treten unterschiedliche Hemmnisse auf, wie hohe Investitionen, Marktwiderstand und Anlaufschwierigkeiten, die einen schnellen Anstieg der Fertigungszahlen verhindern. Nach der Einführungsphase folgt eine **Wachstumsphase**, die durch hohe Wachstumsraten im Bereich der Stückzahlen gekennzeichnet ist. Dieser Boom wird durch die Erfassung breiter Abnehmerschichten erreicht. Im Rahmen dieser Stückzahlsteigerung müssen Rationalisierungsmaßnahmen in der Fertigung für eine überproportionale Stückkostensenkung durchgeführt werden, damit die Gewinnspanne maximiert werden kann. Am Ende der Wachstumsphase folgt die **Reifephase** des Produkts, die durch eine weitere Steigerung der Absatz und- Umsatzzahlen gekennzeichnet ist, wobei gegen Ende der Reifephase infolge des Konkurrenzdrucks eine Stagnation der Umsatzzahlen eintritt. In der folgenden **Sättigungsphase** sinken die Umsatzzahlen leicht, um am Ende im Rahmen der **Degenerationsphase** gegen Null zu sinken.

Diese fünf Phasen lassen sich zusammenfassen in die drei Bereiche **Einführung und Wachstum**, in der steigende Stückzahlen vorherrschen, **Reife und Sättigung**, bei der über einen längeren Zeitraum eine annähernd gleichbleibende Stückzahl an Produkten gefertigt wird, und den **Auslauf**, bei dem die Stückzahlen stark abnehmen und am Ende auf Null zurückgehen (REINHART U. A. 1999). Die in den Modellen abstrahierten Phasen sollen als Grundlage für Einsatzbereiche von Montagesystemen dienen, die in den folgenden Unterabschnitten definiert werden (siehe auch Abb. 6-10).

2.7.1 Laboreinsatz

Der Laboreinsatz stellt einen Montagearbeitsplatz mit kleinsten Stückzahlen (< 10 St./d) dar. Dieser Montageplatz ist als reine Versuchsplattform zu sehen, in

der einzelne Bauteile als Funktionsmuster montiert werden, um die neu entwickelten Bauteile oder Aufbauten zu testen. Der **Laboreinsatz** steht ganz am Anfang der Einführungs- und Wachstumsphase. Die Montage der Bauteile im Labor wird meist von einem Spezialisten bzw. dem Entwickler der Aufbauten durchgeführt, der über hohe Fachkenntnisse verfügt.

Diese Voraussetzungen bedingen eine überwiegend manuelle Manipulation der Bauteile, auch wenn dabei mechanische Übersetzungsmechanismen zum Einsatz kommen. Nur in den seltensten Fällen, wenn z.B. die Positionierbewegungen zu klein sind, werden einfache motorisch betriebene Manipulatoren eingesetzt. In der Regel ist der Einsatz von automatischer Bildverarbeitung zu aufwändig, da sich die Programmierung spezieller Algorithmen oder das „Einlernen“ (Teachen) der Programme für die geringen Stückzahlen zu umständlich gestaltet und keinen Vorteil erbringt. Weil die zu montierenden Bauteile stark variieren, soll die Anlage möglichst flexibel konfigurierbar sein. Dabei sollten die Kosten für neue Betriebsmittel wie Spezialgreifer, spezielle Optiken etc. möglichst gering sein.

2.7.2 Klein- und Mittelserienfertigung

Während der Einführungs- und Wachstumsphase steigen die Stückzahlen an. Dieser Stückzahlbereich kann als der Bereich der Fertigung kleiner und mittlerer Stückzahlen angesehen werden. Dabei sind unterschiedliche Angaben für die zu fertigenden Stückzahlen in der entsprechenden Literatur zu finden. Aus dem Bereich der Halbleiterfertigung erachtet MARINGER (1992, S. 13) zum Beispiel Stückzahlen bis zu 150 Mio. St./a als Einführungs- und Wachstumsphase für die Fertigung von 16k-DRAM Speicherbausteinen. In DÜRRSCHMIDT (1999) wird der Stückzahlbereich bis 80.000 St./a (entspricht ca. 400 St./d) für die Fertigung von Elektronikschaltern als kleine Stückzahl bezeichnet, während die Großserienfertigung ab 1 Mio. St./a (entspricht ca. 5.000 St./d) beginnt. Bei einer Befragung von MST-produzierenden Unternehmen (THOBEN 1999, S. 8) nannten 76 Prozent der befragten Unternehmen den Bereich bis 20.000 St./a (entspricht 100 St./d) als typische Fertigungszahl. Im Rahmen dieser Studie wurden von den Unternehmen Stückzahlen bis zu über 20 Mio. St./a (entspricht 100.000 St./d) genannt.

In der vorliegenden Arbeit wird demzufolge der Bereich mit Stückzahlen zwischen 2.000 und 100.000 St./a (entspricht 10 St./d bis 500 St./d) als der Bereich bezeichnet, in dem kleine und mittlere Stückzahlen gefertigt werden.

Allgemein lässt sich festhalten, dass der Bereich der niedrigeren Produktionszahlen stellvertretend **Klein- und Mittelserienfertigung** genannt wird. In diesem Gebiet ist auch die anwendungsspezifische Fertigung von den Systemen angesiedelt, die nur in kleinen und mittleren Stückzahlen gefertigt werden. Wird dabei eine Vorserienfertigung auf einer solchen Anlage durchgeführt, dient dieser Prozess schon als Referenz für die spätere Fertigung. Das bedeutet, dass die **Kernprozesse** wie Positionierung und Fügen schon möglichst dem geplanten späteren Prozess entsprechen müssen, während Bauteilzuführung und Fertigteilabführung noch nicht in vollem Umfang in die Anlage integriert sind. Die Montage auf einer derartigen **seriennahen Anlage** sollte schon weitgehend automatisiert durchgeführt werden, während die Zuführung noch manuell erfolgt. Für eine automatisierte Montage ist der Einsatz eines BV-Systems für die Mikromontage unabdingbar, da auch für den Fall einer Positionierung über Formschluss die Lage des Substrats ermittelt und das Bauteil so genau vorpositioniert werden muss, dass die Komplienz des Greifers wirksam werden kann.

Da die Anlage aber nicht nur für eine Montageaufgabe konzipiert sein sollte, muss sie ohne großen Aufwand für unterschiedliche Montageanforderungen umrüstbar sein. So sollten unterschiedliche Betriebsmittel, wie Greifer und Zuführeinrichtungen, leicht auszutauschen sein. Das bedeutet, dass ein möglichst modularer und flexibler Aufbau der Gesamtanlage und eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche der Anlagensteuerung realisiert werden sollte.

2.7.3 Großserienfertigung

Die Anforderungen für Montageanlagen in der Großserienfertigung (> 100.000 St./a) zielen auf eine möglichst prozesssichere und kostengünstige Fertigung ab. Bei Stückzahlen dieser Größenordnung ist der Aufbau einer Sondermaschine, die für den Montageprozess optimiert ist, meistens wirtschaftlich. In der Anlage sind sowohl der Montageprozess, als auch die Zuführeinheiten vollkommen automatisiert. Der Arbeitsraum der Anlage ist für die Aufgabe so optimiert, dass möglichst geringe Taktzeiten erreicht werden.

2.8 Zusammenfassung und Auswertung des Stands der Technik

Die Zusammenfassung und die Defizite der einzelnen Teilbereiche des derzeitigen Stands der Technik lassen sich wie folgt darstellen:

I Montageszenario

Ein häufig auftretendes Montageszenario in der MST besteht darin, dass die Unterseite eines Bauteils zu einem Substrat ausgerichtet werden muss. Exemplarisch sind hierbei die Ausrichtung von zwei Wafern vor dem Bonden, der Aufbau mehrlagiger, mikrochemischer und mikrobiologischer Reaktoren, die Montage von Flip-Chip-Bauelementen, sowie das Bolzen-Loch-Problem bei der Montage von Mikrogetrieben und Mikromotoren zu nennen.

Die Montage von Flip-Chip-Bauelementen kann stellvertretend für die Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik betrachtet werden. Die dabei auftretenden Anforderungen an die Positioniergenauigkeit liegen bei unter 10 μm .

II Automatisierte Mikromontage

Die automatisierte Mikromontage spielt eine zentrale Rolle bei der Fertigung von hybriden Mikrosystemen dar. Das derzeit überwiegend eingesetzte absolutgenaue Positionierverfahren genügt nicht den Genauigkeitsanforderungen der MST. Für diese hohen Anforderungen ist die Entwicklung von Relativpositionierverfahren nötig.

Im Rahmen mehrerer Forschungsvorhaben wurden sowohl unterschiedliche Greifsysteme als auch Spezialwerkzeuge für die Montage von Mikrosystemen entwickelt. Dabei stand die Integration der benötigten Sensoren zur Positionserfassung sowie die Konzeption einer Montageanlage im Hintergrund. Erst durch die Betrachtung des gesamten Systems, bestehend aus Positionierverfahren, Handhabungssystem und Positionserfassungssystem, kann aber eine optimale Anlagenauslegung erfolgen.

III Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente

Die vorhandenen Anlagen für die Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente genügen nicht den Anforderungen an eine wirtschaftliche Montage von hybriden Mikrosystemen. Während automatisierte Anlagen mit

absolutgenauen Positionierverfahren zu ungenau sind, ist die realisierte Anlage mit Relativpositionierverfahren (SÜSS 2000) als Einzellösung anzusehen, die aufgrund ihrer Bauart nicht in eine automatisierte Fertigung integriert werden kann. Darüber hinaus ist die Anlage wegen ihrer aufwändigen Bauart zu teuer, um eine wirtschaftliche Fertigung zu ermöglichen. Manuelle Anlagen, die mit Hilfe von Relativpositionierverfahren arbeiten, sind für eine wirtschaftliche Serienfertigung nicht geeignet.

IV Einsatzbereiche während des Produktlebenszyklus

Es können im Verlauf eines Produktlebenszyklus unterschiedliche Einsatzbereiche identifiziert werden. Für die einzelnen Phasen liegen derzeit keine systematischen Lösungsvorschläge zur Gestaltung angepasster Montagesystemen und Positionierstrategien vor, so dass keine gezielte Auswahl der für den Einsatzbereich idealen Anlage möglich ist.

2.9 Präzisierung der Aufgabenstellung und Anforderungen

Aus den in Abschnitt 2.8 dargestellten Defiziten kann die Zielsetzung der Arbeit aus Abschnitt 1.2 konkretisiert werden:

- ◆ Entwicklung und Vergleich von Positionierstrategien für die Montage von Flip-Chip-Bauelementen
- ◆ Abschätzung der auftretenden Toleranzen
- ◆ Entwicklung einer Komponente für das Schlüsselproblem Lagemessung für die Relativpositionierung
- ◆ Untersuchung möglicher Handhabungssysteme bezüglich ihrer Eignung für die automatisierte Mikromontage
- ◆ Erstellung eines Leitfadens für an das Einsatzgebiet angepasste Montagesysteme

Für die Umsetzung des zu entwickelnden Konzepts sind darüber hinaus noch weitere Anforderungen zu erfüllen:

- ◆ Flexibilität des Montagesystems bezüglich unterschiedlicher Aufgabenstellungen
- ◆ Erreichbare Montagegenauigkeit unter $5\text{ }\mu\text{m}$ (3σ) (Abb. 2-12)

- ◆ Verwendung der Komponente Lagemessung als Kernkomponente
- ◆ Handhabung von Bauteilen mit einer Kantenlänge bis minimal 200 μm
- ◆ Genügender Arbeitsabstand für den Aufbau von Mikrosystemen innerhalb von Gehäusen
- ◆ 2½- dimensionaler Aufbau von Mikrosystemen

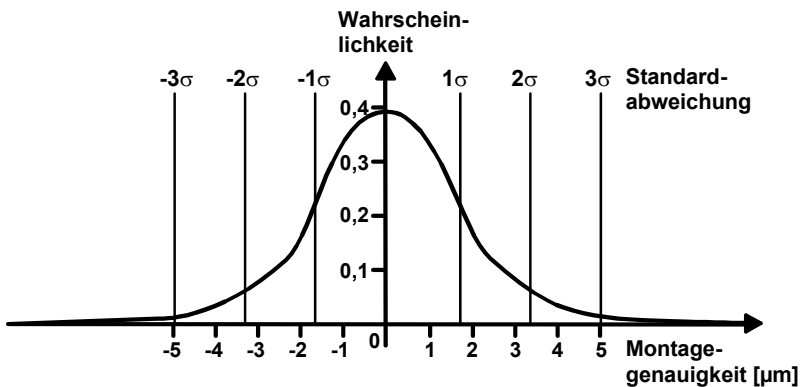


Abb. 2-12: Normalverteilung bei einer Montagegenauigkeit von 5 μm mit einer Standardabweichung von 3σ , die einer Wahrscheinlichkeit von 99,73 % entspricht (SACHS 1984, S. 49-54)

3 Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden unterschiedliche **Strategien zur Positionierung** von Flip-Chip-Bauelementen aufgezeigt. Dabei wird auch eine Abschätzung der erreichbaren Positioniergenauigkeit durchgeführt. Anschließend werden unterschiedliche **Anlagenkonfigurationen** vorgestellt. Nach der Definition von Kriterien, die als Grundlage für die Bewertung sowohl von Positionierstrategien als auch von Montagesystemen dienen, werden die jeweiligen Anforderungsprofile typischer Einsatzgebiete von **Montagesystemen** entwickelt. In Verbindung mit diesen Profilen findet eine Bewertung der Positionierstrategien sowie der Anlagenkonfigurationen statt.

3.1 Grundsätzliche Strategien zur Positionierung von Flip-Chip-Bauelementen

Im Folgenden soll ein systematischer Überblick über Strategien für die Montage von unterseitenstrukturierten Bauelementen gegeben werden. Diese können in passive und aktive Positionierung unterteilt werden. Bei der **passiven Positionierung** wird die endgültige Lage des Bauelements durch geometrische Randbedingungen, wie Anschläge oder Formschrägen, definiert. Eine **aktive Positionierung** stellt hingegen die Position des Bauteils und des Substrats mit Hilfe von Lageerkennungssensoren fest und platziert das Bauteil auf dem Substrat mit Hilfe der Messergebnisse. Bei der aktiven Positionierung kann wiederum zwischen **absolutgenauer** und **Relativpositionierung** (vgl. 2.5.1) unterschieden werden.

3.1.1 Passive Ausrichtung mit Hilfe von Formschluss

Die passive Ausrichtung von Bauteil zu Substrat stellt die geringste Anforderung an die Handhabungs- und Positioniertechnik. Dabei finden Formschrägen oder Anschläge an Bauteilen und Substrat Verwendung, die die endgültige Position des Bauelements bestimmen. Die Grundvoraussetzung dafür ist die genaue Herstellung der geometrischen Elemente, mit deren Hilfe die Positionierung stattfindet. Sollen halbleiterbasierte Mikrosysteme wie Flip-Chip-Bauelemente auf diese Art positioniert werden, muss in Betracht gezogen werden, dass beim

Dicen der Bauteile Ungenauigkeiten im Randbereich von mehreren μm bis hin zu $\pm 10 \mu\text{m}$ entstehen. Soll das Bauteil an Hand der Kante orientiert werden, so wie KWANG & CHONG (1998) vorschlagen, müssen die Bauteile hochpräzise gediced werden.

Der Ablauf der Montage von Bauelementen, die mit Hilfe von Formschluss positioniert werden, wird folgendermaßen durchgeführt (Abb. 3-1):

- ◆ Das Bauteil wird mit Hilfe eines Greifers aufgenommen. Wenn das Bauteil an den Außenkanten ausgerichtet werden kann, ist es möglich, das Bauteil von vornherein so am Greifer auszurichten, dass es sich in einer definierten Lage am Greifer befindet.
- ◆ Soll das Bauteil durch mechanische Anschläge ausgerichtet werden (GERLACH U. A. 2001, KWANG 1997), so wird es neben diese gesetzt und danach gegen die Anschläge verschoben. Das Erreichen der Endposition kann dadurch erkannt werden, dass ein Kraftsensor im Werkzeug beim Überschreiten einer Kraftschwelle - das Bauteil befindet sich an den mechanischen Anschlägen - ein weiteres Verschieben des Bauteils beendet. Andererseits kann der Greifer auch gezielt nachgiebig gelagert werden, so dass das Werkzeug nach dem Aufsetzen des Bauteils neben den Anschlägen über die Position dieser Anschläge hinaus bewegt wird. Trifft das Bauteil auf Widerstand, gibt der Greifer lateral nach, so dass keine zu hohen Anpresskräfte am Bauteil entstehen.
- ◆ Verfügt das Bauteil oder das Substrat über Einführschrägen (TAKEUCHI U. A. 2001, NELSON U. A. 1998), so muss die Vorpositionierung des Bauteils so genau sein, dass das Bauteil über die Einführschrägen in die Endposition gebracht werden kann. Darüber hinaus sollte der Greifer oder das Substrat nachgiebig gelagert sein, so dass die Ungenauigkeiten der Positionierung über die nachgiebige Lagerung ausgeglichen werden können.

Ein Vorteil der Positionierung durch passive Ausrichtung mittels geometrischem Formschluss ist ein verhältnismäßig geringer Aufwand für die Sensorik. Durch die passive Ausrichtung ist die Genauigkeitsanforderung an das Handhabungsgerät erheblich geringer, falls im Greifer eine entsprechende Nachgiebigkeit vorgesehen ist.

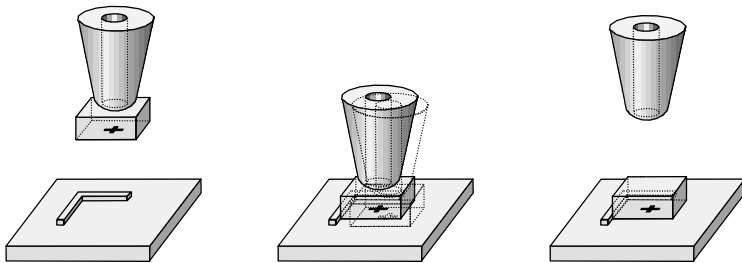


Abb. 3-1: Passive Positionierung mit Hilfe von Formschluss

Den größten Nachteil der passiven Positionierung mittels Formschluss stellen die geometrischen Einschränkungen dar, die durch die Positionierhilfen entstehen, da in vielen Fällen nicht genügend Raum für derartige Geometrien zur Verfügung steht oder die Fertigung der Positionierhilfen prozessbedingt nicht möglich ist. Darüber hinaus muss bei der Montage gewährleistet sein, dass keine Beschädigung der Ausrichtelemente vorliegt oder dass während der Positionierung des Bauelements gegen die Ausrichtelemente keine zu großen Anpresskräfte entstehen und dadurch Beschädigungen am Bauteil oder Substrat verursacht werden.

3.1.2 Strategien mit feststehender Unterseitenkamera

Im Gegensatz zur passiven Ausrichtung mit Hilfe geometrischer Anschläge werden in den folgenden Abschnitten Strategien dargestellt, die aktiv mit Hilfe einer digitalen Bildverarbeitung die Positionen von Bauteil und Substrat erkennen und diese zueinander ausrichten. Dabei werden für die Positionierung die genaue Position des Bauteils am Greifer vermessen sowie die genaue Lage des Substrats ermittelt. Für die Erkennung des Bauteils am Greifer wird bei den folgenden Strategien eine sog. Unterseitenkamera eingesetzt, während die Positionserkennung des Substrats mit Hilfe der Oberseitenkamera erfolgt.

3.1.2.1 Absolutpositionierung

Die Strategie der Absolutpositionierung (siehe auch 2.5.1) basiert darauf, dass die Lage der beiden Kameras, die für die Vermessung von Bauteil und Substrat benötigt werden, innerhalb des Maschinenkoordinatensystems bekannt ist (DATACON 2001, ESEC 2000). Der Ablauf zur Positionierung eines Bauelements läuft wie folgt ab (Abb. 3-2):

- ◆ Das Flip-Chip-Bauelement wird gegriffen und mit Hilfe des Handhabungssystems über die Unterseitenkamera zur Vermessung des Bauteils am Greifer gefahren.
- ◆ Die Lage des Bauteils wird im Unterseitenkamerakoordinatensystem erfasst und in das Maschinenkoordinatensystem umgerechnet.
- ◆ Mit Hilfe einer zweiten Kamera, der Oberseitenkamera, wird die Position des Substrats erfasst. Dabei wird ebenfalls die Lage des Substrats aus dem Kamerakoordinatensystem in das Maschinenkoordinatensystem übertragen.
- ◆ Mit Hilfe der beiden Vermessungen lässt sich ein Korrekturvektor errechnen, der die Abweichungen von der Sollposition des Bauteils auf dem Substrat korrigiert.
- ◆ In einem absolutgenauen Positionierschritt fährt das Handhabungssystem den Offset der beiden Kameras sowie den berechneten Korrekturvektor über den Montageort und setzt das Bauteil auf dem Substrat ab.

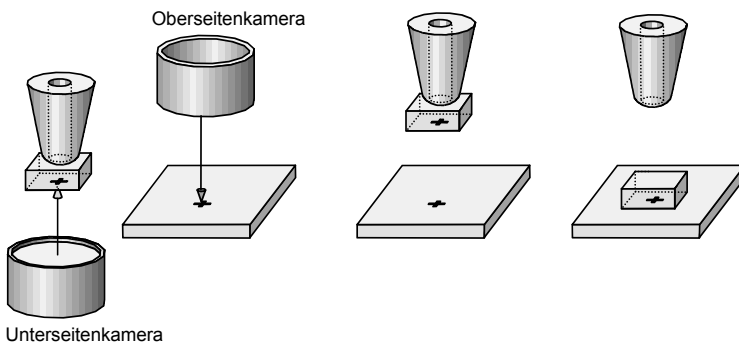


Abb. 3-2: Ablauf der Absolutpositionierung mit feststehender Unterseitenkamera

Die Hauptvorteile dieser Strategie sind, dass sie mit Präzisionspositioniergeräten, die auf dem Markt erhältlich sind, kompatibel sind und geringe Taktzeiten durch den einmaligen Positionier- und Korrekturschritt ermöglicht werden. Diese können durch Parallelisierung von Bildaufnahme und -auswertung weiter reduziert werden, so dass diese Positionierstrategie insbesondere bei hohen Stückzahlen vorteilhaft ist. Darüber hinaus ist die Strategie geeignet, Bauteile, die größer als das Sichtfenster der Unterseitenkamera sind, zu positionieren. Dies wird durch einen zusätzlichen Verfahrensschritt bei der Vermessung des Bauteils am

Greifer ermöglicht. Dadurch werden die beiden Eckpunkte des Bauelements vermessen. Diese in der Elektronikbestückung eingesetzte Maßnahme ist aber auf Grund der geringen Bauteilgröße in der MST nicht relevant.

Ein weiterer Vorteil der Absolutpositionierung liegt darin, dass durch eine gestellfeste Montage der Objektive der Einsatz von hochauflösenden und damit großen Objektiven möglich ist, weil geringe räumliche Einschränkungen für die Objektive bestehen. Dadurch ist eine optimale Gestaltung der Objektive und der Beleuchtungseinrichtungen möglich, womit die Genauigkeit der Bildverarbeitung erhöht werden kann.

Allerdings wird beim absolutgenauen Korrekturschritt davon ausgegangen, dass sich die Lage der beiden Kamerakoordinatensysteme und des Maschinenkoordinatensystems zueinander nicht verändert. Die Lage der Koordinatensysteme zueinander, die in Kalibrierverfahren ermittelt wird, hängt aber davon ab, dass an der gesamten Maschine keine Formänderungen auftreten. Durch Wärmeeinbringung in das Maschinengestell zum Beispiel werden Längenänderungen hervorgerufen, so dass sich die Lage der Koordinatensysteme zueinander verändert und Ungenauigkeiten erzeugt werden. Wegen der räumlich voneinander getrennten Positionen der Bildaufnahme von Bauteil am Greifer und dem Substrat sind relativ große Verfahrenswege für die Positionierung des Bauteils nötig, die absolutgenau durchgeführt werden müssen. Aus diesem Grund müssen die Handhabungsgeräte, bei denen diese Positionierstrategie zum Einsatz kommen soll, eine hohe Absolutpositioniergenauigkeit garantieren.

3.1.2.2 Relativpositionierung

Um die Ungenauigkeiten bei der Absolutpositionierung zu vermeiden, hat HÖHN (2001) Strategien für die **Relativpositionierung** entwickelt. Er baut direkt über dem Fügeort einen **Lageregelkreis** auf, um die Position des Bauteils iterativ zu optimieren (SCHUTZRECHT DE 100 12 081.4-34).

Hierbei ist ein spezieller Greifer notwendig. Dieser Greifer enthält zwei Referenzmarken, die sowohl von der Unterseitenkamera als auch von der Oberseitenkamera zu detektieren sind. Nachfolgend werden die wichtigsten Schritte des Positioniervorgangs stichpunktartig dargestellt (Abb. 3-3):

- ◆ Das Flip-Chip-Bauelement wird gegriffen und mit Hilfe des Handhabungsgeräts über eine Unterseitenkamera verfahren.

- ◆ Die Unterseitenkamera vermisst das Bauteil am Greifer relativ zu den zwei Referenzmarken.
- ◆ Bevor der Greifer über das Substrat verfahren wird, wird die Lage des Substrats mit der Oberseitenkamera ermittelt.
- ◆ Der Greifer wird über das Substrat verfahren und mit Hilfe der Oberseitenkamera werden die Positionen der beiden Referenzmarken detektiert und daraus die Lage des Bauteils rekonstruiert.
- ◆ In einem Berechnungsschritt wird aus der zuerst gemessenen Lage des Substrats und der berechneten Lage des Bauteils der Vektor ermittelt, der für die Positionskorrektur notwendig ist.
- ◆ Die Positionskorrektur wird unter der feststehenden Oberseitenkamera durchgeführt.
- ◆ Nach dem Korrekturschritt durch das Handhabungsgerät kann durch eine zweite Detektierung der Referenzmarken mit der Oberseitenkamera und einem Vergleich von Soll- und Ist-Position der Regelkreis über dem Montageort geschlossen und bei Bedarf eine iterative Lagekorrektur durchgeführt werden.

Der größte Vorteil dieses Positionierverfahrens liegt darin, dass durch den Aufbau eines geschlossenen Regelkreises zur Lageerkennung und -positionierung äußere Einflüsse auf die Endpositioniergenauigkeit minimiert werden können. So werden z.B. Längenänderungen, die durch Wärmeeinbringung im Maschinengestell verursacht werden, egalisiert. Ebenso verringern sich die Anforderungen an die Genauigkeit des Achssystems, da keine großen absolutgenauen Verfahrbewegungen gefordert sind, sondern nur kleine Korrekturbewegungen. Damit hängt die Platziergenauigkeit nicht mehr von der Absolutgenauigkeit der Achsen ab, sondern wird durch die wesentlich bessere Auflösung beeinflusst.

Die Nachteile der in HÖHN (2001) beschriebenen Strategie sind insbesondere längere Taktzeiten, eine spezielle Greifergestaltung und der Bedarf mehrerer Positionsbestimmungen (Greifermarken und Bauteil von unten, Substrat von oben und Greifermarken von oben) mit Hilfe von Bildverarbeitung. Für jede Bildaufnahme und -auswertung muss dabei ein Zeitaufwand von ca. 150 bis 500 ms gerechnet werden, je nachdem ob für die Erkennung der Strukturen zusätzliche Filterfunktionen in den Bildverarbeitungsprogrammen notwendig sind.

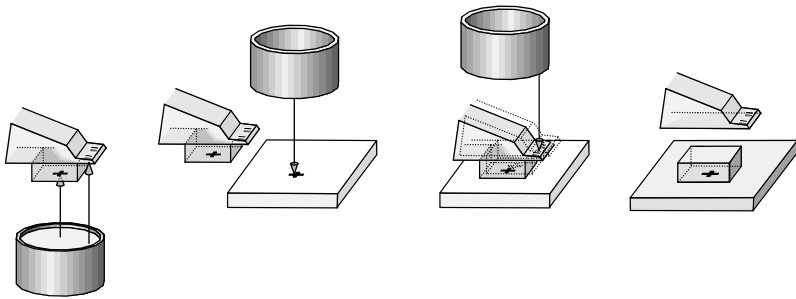


Abb. 3-3: Ablauf der Relativpositionierung bei feststehender Unterseitenkamera

Die Berechnung der Lage des gegriffenen Bauelements im Sichtfeld der Oberseitenkamera wird mit Hilfe der Referenzmarken durchgeführt. Mit der Unterseitenkamera wird dafür die Lage des Bauelements relativ zu den zwei Referenzmarken bestimmt. Zur Festlegung der Relativposition wird ein Dreieck zwischen dem Mittelpunkt des Bauteils und den beiden Referenzmarken aufgespannt (Abb. 3-4a). Von diesem Dreieck werden die Innenwinkel an das Bildverarbeitungsprogramm der Oberseitenkamera übertragen. Nach dem Erkennen der beiden Referenzmarken aus Sicht der Oberseitenkamera kann nun die Lage des gegriffenen Bauelements im Koordinatensystem der Oberseitenkamera auf Grundlage ähnlicher Dreiecke rekonstruiert werden (Abb. 3-4b).

Damit eine Relativvermessung des Flip-Chip-Bauelements zu Referenzmarken und die spätere Erkennung der Referenzmarken mit Hilfe der Oberseitenkamera möglich ist, müssen diese Referenzmarken in einen speziellen Greifer integriert werden. Dabei besteht die Notwendigkeit, die Bestimmung der Lage der Referenzmarken durch Ober- und Unterseitenkamera jeweils hochpräzise durchzuführen. Bei der Realisierung¹¹ weist HÖHN (2001) darauf hin, dass die genaue Strukturierung und wiederholgenaue Erkennung der Referenzmarken eine wesentliche Voraussetzung für die Realisierung hoher Positioniergenauigkeiten ist.

Die notwendige Anzahl an Bildverarbeitungsschritten birgt dabei die Gefahr von Ungenauigkeiten bei der Gesamtgenauigkeit. Für die Bestimmung der Relativposition des Bauteils am Greifer ist die Lagebestimmung von drei Positionen nötig, bei denen jeweils eine Messungenauigkeit auftritt. Zur Rekonstruktion der Lage des Bauelements aus Sicht der Oberseitenkamera müssen zwei weitere Positionsbestimmungen durchgeführt werden, die

¹¹ Die Referenzmarken wurden durch Bohrungen, die mit Hilfe eines Lasers in eine Siliziumplatte eingebracht wurden, realisiert.

wiederum mit einer Messunsicherheit ausgeführt werden. Insgesamt können sich die dabei auftretenden Fehler summieren und zu einer Ungenauigkeit führen, die eine nicht zu vernachlässigende Größe im Rahmen der Systemgenauigkeit darstellt. In Abb. 3-4 a sind die zwei Referenzpunkte $P_{ur1}(X_{ur1}, Y_{ur1})$, $P_{ur2}(X_{ur2}, Y_{ur2})$, das Bauteil $P_{up}(X_{up}, Y_{up})$, sowie das zu errechnende Dreieck mit den Innenwinkeln $\alpha_u, \beta_u, \gamma_u$ aus der Perspektive der Unterseitenkamera dargestellt.

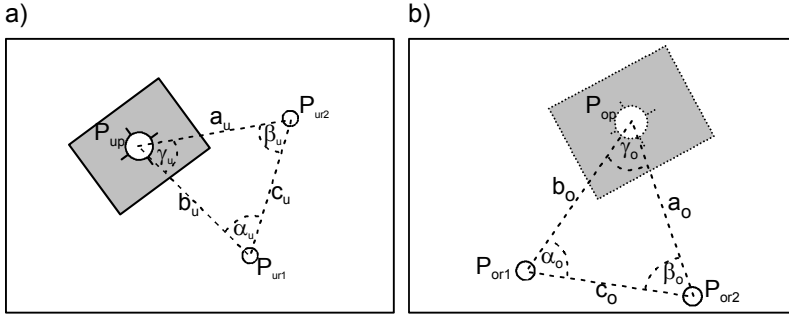


Abb. 3-4: Abbildung der Bauteillage

a) Sicht der Unterseitenkamera b) Sicht der Oberseitenkamera

Die Seitenlängen a_u, b_u und c_u berechnen sich aus

$$(3-1) \quad a_u = \sqrt{(X_{ur2} - X_{up})^2 + (Y_{ur2} - Y_{up})^2},$$

$$(3-2) \quad b_u = \sqrt{(X_{ur1} - X_{up})^2 + (Y_{ur1} - Y_{up})^2},$$

$$(3-3) \quad c_u = \sqrt{(X_{ur2} - X_{ur1})^2 + (Y_{ur2} - Y_{ur1})^2}.$$

Abb. 3-4 b stellt das Sichtfeld der Oberseitenkamera auf die beiden Referenzpunkte $P_{or1}(X_{or1}, Y_{or1})$, $P_{or2}(X_{or2}, Y_{or2})$, das rekonstruierte Dreieck $\alpha_o, \beta_o, \gamma_o$ und die rückberechnete Lage des Bauelements $P_{op}(X_{op}, Y_{op})$ dar. Die Innenwinkel $\alpha_u, \beta_u, \gamma_u$ und somit auch die Winkel $\alpha_o, \beta_o, \gamma_o$ ergeben sich aus:

$$(3-4) \quad \alpha_u = \arccos \frac{b_u^2 + c_u^2 - a_u^2}{2b_u c_u} = \alpha_o$$

$$(3-5) \quad \beta_u = \arccos \frac{a_u^2 + c_u^2 - b_u^2}{2a_u c_u} = \beta_o$$

$$(3-6) \quad \gamma_u = 180^\circ - \alpha_u - \beta_u = \gamma_o$$

Nach der Erkennung der beiden Referenzmarken ergeben sich die Punkte P_{or1} , P_{or2} , aus denen in Verbindung mit den Winkeln α_o , β_o , γ_o der Punkt $P_{op}(X_{op}, Y_{op})$

$$(3-7) \quad X_{op} = X_{or1} + b_u \frac{c_o}{c_u} \cos \left(\arctan \frac{Y_{or2} - Y_{or1}}{X_{or2} - X_{or1}} + \alpha_o \right)$$

$$(3-8) \quad Y_{op} = Y_{or1} + b_u \frac{c_o}{c_u} \sin \left(\arctan \frac{Y_{or2} - Y_{or1}}{X_{or2} - X_{or1}} + \alpha_o \right)$$

berechnet wird. Wird ein Messfehler von Δ_1 , der als Vereinfachung für alle Messpunkte gleich hoch angenommen wird, mit einbezogen, so ergeben sich als Abschätzung für die maximalen Fehler in X - und Y -Richtung:

$$(3-9) \quad \Delta X_{op} = \left| \frac{\partial X_{op}}{\partial X_{ur1}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial X_{op}}{\partial X_{ur2}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial X_{op}}{\partial X_{up}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial X_{op}}{\partial Y_{ur1}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial X_{op}}{\partial Y_{ur2}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial X_{op}}{\partial Y_{up}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial X_{op}}{\partial X_{or1}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial X_{op}}{\partial X_{or2}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial X_{op}}{\partial Y_{or1}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial X_{op}}{\partial Y_{or2}} \cdot \Delta_I \right|$$

$$(3-10) \quad \Delta Y_{op} = \left| \frac{\partial Y_{op}}{\partial X_{ur1}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial Y_{op}}{\partial X_{ur2}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial Y_{op}}{\partial X_{up}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial Y_{op}}{\partial Y_{ur1}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial Y_{op}}{\partial Y_{ur2}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial Y_{op}}{\partial X_{or1}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial Y_{op}}{\partial X_{or2}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial Y_{op}}{\partial Y_{or1}} \cdot \Delta_I \right| + \left| \frac{\partial Y_{op}}{\partial Y_{or2}} \cdot \Delta_I \right|$$

Wird von einer Konfiguration ausgegangen, wie sie HÖHN (2001) beschrieben hat, dann verfügt die Optik bei einem Sichtfenster von 2,4 x 1,8 mm über eine optische Auflösung am CCD-Chip von 3 μm . Durch entsprechende Algorithmen in der Bildverarbeitung über Subpixelinterpolation kann eine in etwa 4-mal bessere Auflösung erreicht werden. Sind darüber hinaus die Referenzmarken gut mit der Bildverarbeitung zu erkennen, kann die Position der Marken mit einer Genauigkeit von $a = \pm 0,75 \mu\text{m}$ (3σ) ermittelt werden¹². Mit entsprechenden Werten für die Punkte der Referenzmarken und des Bauelements ergibt sich eine maximale Messunsicherheit von $\Delta P_{op} = 5,1 \mu\text{m}$ sowohl in X - als auch in

¹² Vgl. Abschnitt 5.3

Y-Richtung. Zu einer Verringerung der Messungenauigkeit sollten die Referenzmarken möglichst weit auseinander liegen.

Ein weiterer Nachteil bei dieser Art der Positionierung ist, dass nach der Vermessung des Bauteils am Greifer noch Beschleunigungen durch die Verfahrbewegung des Handhabungssystems auftreten. Verändert das Bauteil auf Grund der Beschleunigungen seine Lage am Greifer, können die daraus resultierenden Ungenauigkeiten nicht bei der Positionierung berücksichtigt werden, da die Position des Bauteils am Greifer nach der lateralen Verfahrbewegung nicht mehr vermessen wird.

3.1.3 Relativpositionierung mit IR-Kamera

Die in halbleiterbasierten Mikrosystemen eingesetzten Materialien wie Si, InP, GaAs haben die Eigenschaft, dass sie oberhalb einer bestimmten Wellenlänge transparent werden. So liegt der Transparenzbereich für Si zwischen $\lambda = 1.200$ und ca. 1.500 nm, während er bei GaAs bereits bei $\lambda \sim 890$ nm beginnt und bei 1.700 nm endet (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, HOFFMANN 1997). Daraus ergibt sich die Möglichkeit, dass bei entsprechender IR-Beleuchtung, einer IR-sensitiven Lagemessensorik und einem im infraroten Wellenlängenbereich transparenten Greifer ein „Durchleuchten“ der Bauteile möglich ist. Damit können die auf der Unterseite der Flip-Chip Elemente aufgebrachten Referenzmarken, die aus für den Wellenlängenbereich nichttransparenten Materialien bestehen, ebenso wie das darunter befindliche Substrat erkannt werden. Auf diesem Weg ist eine direkte Ausrichtung von Bauteil zu Substrat möglich.

Der Ablauf bei der Positionierung gestaltet sich dabei wie folgt (Abb. 3-5):

- ◆ Das Flip-Chip-Bauelement wird von der Bereitstellungsposition aufgenommen.
- ◆ Mit Hilfe des Handhabungsgeräts verfährt das Bauteil über den Montageort.
- ◆ Die Bauteilposition am Greifer wird mit der Substratposition verglichen und ein Korrekturvektor wird errechnet.
- ◆ Das Handhabungssystem korrigiert den von der Bildverarbeitung berechneten Korrekturwert.

- ◆ Nach einer nachgeordnete Kontrollaufnahme der Position kann bei Bedarf die Lage des Bauteils über dem Substrat weiter verbessert werden.
- ◆ Nach dem Ausrichten von Bauteil zu Substrat folgt das Absetzen des Bauteils auf dem Substrat.

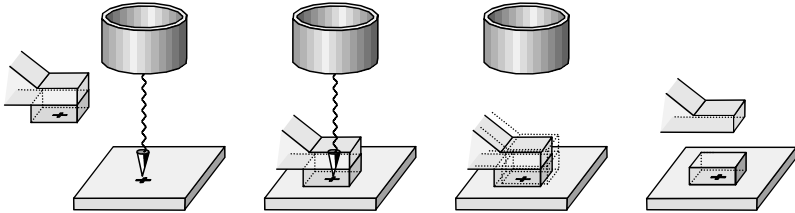


Abb. 3-5: Ablauf der Relativpositionierung mit IR-Kamera

Die Fähigkeit eines vergrößernden optischen Systems, Details darstellen zu können, wird durch das Auflösungsvermögen U beschrieben. Nach Abbe (1873) wird U für kohärent beleuchtete Objekte mit

$$(3-11) \quad U = \frac{A}{\lambda}$$

berechnet. Dabei wird mit A die numerische Apertur der Optik, die direkt proportional zum Öffnungswinkel α der Optik ist, mit λ die Wellenlänge des verwendeten Lichts bezeichnet¹³. Das bedeutet, dass mit steigender Wellenlänge das Auflösungsvermögen einer Optik sinkt und somit die Messgenauigkeit verringert wird. Bei einer Verdoppelung der Wellenlänge aus dem sichtbaren Bereich mit einer Wellenlänge von $\lambda = 600 \text{ nm}$ auf eine Wellenlänge von $\lambda = 1.200 \text{ nm}$ in den nahen IR-Bereich sinkt bei gleichen geometrischen Parametern der Optik das Auflösungsvermögen U auf die Hälfte. Durch eine Anpassung der Geometrie der Optik an die optischen Anforderungen im Infrarotbereich kann dieser Auflösungsverlust aber ausgeglichen werden. Um die Effekte der Transparenz von Halbleitermaterialien ausnützen zu können, muss auch der Greifer für den zum Einsatz kommenden Wellenlängenbereich transparent sein.

Ein weiteres Problem bei der Detektierung der IR-Wellen besteht darin, dass hochauflösende IR-Kameras für den nahen IR-Bereich verfügbar sein müssen.

¹³ Siehe auch Abschnitt 4.1

Normale CCD-Kameras mit einem CCD-Chip auf Si Basis sind für den nahen IR-Bereich bis $\lambda \approx 1.000 \text{ nm}$ ohne den normalerweise vor dem CCD-Chip befindlichen IR-Filter empfindlich (BOBEY 1997), wobei ab 650 nm die Sensitivität stark abnimmt. Um im Bereich über 1.000 nm Bildaufnahmen durchführen zu können sind spezielle Sensoren nötig. Als Sensormaterialien können die Halbleiter InSb^{14} und $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}^{15}$ als Fotoelemente¹⁶ zum Einsatz kommen. Soll der Fotowiderstandseffekt ausgenutzt werden, bei dem die einzelnen Lichtquanten zu einer Verringerung des inneren Widerstandes des Sensormaterials führen, können PbS^{17} und PbSe^{18} Sensoren eingesetzt werden. Die Verfügbarkeit hochauflösender Flächensensoren für den IR-Bereich ist allerdings sehr begrenzt¹⁹.

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 3.1.2 dargestellten Positionierstrategien wird hier die Lage des Bauteils am Greifer direkt über dem Substrat vermessen, so dass keine nachfolgenden lateralen Beschleunigungen durch ein Verfahren des Handhabungsgeräts von der Unterseitenkamera zum Montageort auftreten. Damit ist eine exakte Ausrichtung von Bauteil zu Substrat möglich. Außerdem kann mit Hilfe der IR-Kamera eine dem Fügen nachgeordnete Qualitätskontrolle durchgeführt werden.

Sowohl in Abschnitt 3.1.2.2 als auch in diesem Abschnitt ist die Problematik der Nachfokussierung außer Acht gelassen worden. Es muss berücksichtigt werden, dass eine Optik nur über einen begrenzten Bereich verfügt, in der die abgebildeten Objekte scharf dargestellt werden (Tiefenschärfebereich). Liegen die Bildebenen, die nacheinander aufgenommen werden, weiter auseinander als der Bereich der Schärfentiefe, muss ein Fokussierschritt durchgeführt werden. Das heißt, dass die Optik, sofern sie über eine Fokussiereinrichtung verfügt, nachfokussiert, bzw. die gesamte Optik um den Abstand der beiden Bildebenen nach oben bzw. nach unten bewegt werden muss.

¹⁴ λ – Bereich $1,5 - 5 \text{ }\mu\text{m}$ bei einer Arbeitstemperatur von 77 K (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 569)

¹⁵ λ – Bereich $6 - 12 \text{ }\mu\text{m}$ bei einer Arbeitstemperatur von 77 K (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 569)

¹⁶ Bei Fotoelementen löst die eintreffende Strahlung eine Spannungserhöhung aus

¹⁷ λ – Bereich $1 - 3 \text{ }\mu\text{m}$ bei einer Arbeitstemperatur von 293 K (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 569)

¹⁸ λ – Bereich $1 - 5 \text{ }\mu\text{m}$ bei einer Arbeitstemperatur von 195 K (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 569)

¹⁹ Derzeit auch dem Markt verfügbare Sensoren verfügen über eine Pixelzahl von bis zu 320×240 Pixeln, bei einer Pixelgröße von $48,5 \times 48,5 \text{ }\mu\text{m}$ (POLYTEC 2001, S. 9)

3.1.4 Relativpositionierung mit direkter Unterseitenvermessung über dem Substrat

Die oben dargestellten Verfahren basieren darauf, dass im letzten Abschnitt des Positionierablaufs direkt vor dem Absetzen des Bauelements das Bauteil sowie das Substrat nur durch eine Kamera von oben beobachtet werden. Über dem Substrat wird eine **direkte Beobachtung** der Flip-Chip-Unterseite nicht durchgeführt. Soll die Unterseite des Flip-Chip-Bauelements über dem Substrat direkt vermessen werden, müssen sich Optikelemente zwischen dem Bauteil und dem Substrat befinden.

3.1.4.1 Optik mit schrägen optischen Achsen

Damit die Unterseite eines gegriffenen Bauteils von einer darüber befindlichen Kamera betrachtet werden kann, muss die Kamera zum Bauteil seitlich versetzt angebracht werden. Durch einen Spiegel, der schräg in die optische Achse der Optik eingeschoben wird, sieht man die Unterseite des Bauteils. Wenn anstelle des Spiegels die Optik verkippt wird, können sowohl das gegriffene Bauteil als auch Substrat mit der Optik betrachtet werden (REICHL 1986, S. 217). Die Optik ist auf den Montageort gerichtet und der Spiegel wird horizontal zwischen Bauteil und Substrat eingeschoben (Abb. 3-6). Der Abstand zwischen Bauteil und Spiegel muss genauso groß sein wie der zwischen Spiegel und Substrat. Eine Überlagerung der beiden Bilder ist möglich, wenn ein halbdurchlässiger Spiegel²⁰ verwendet wird. Somit ist eine Relativpositionierung von Bauteil zu Substrat realisierbar.

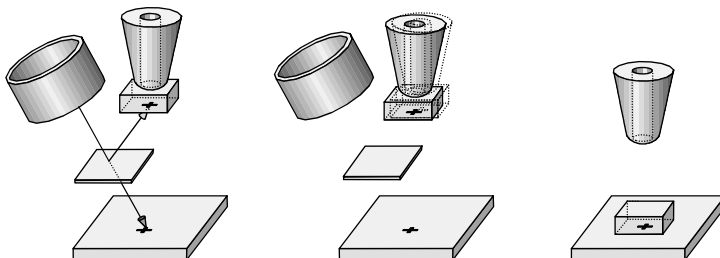


Abb. 3-6: Ablauf der Relativpositionierung mit Optik mit schrägen optischen Achsen

²⁰ genauere Erläuterungen zu der Funktionsweise eines halbdurchlässigen Spiegels in Abschnitt 4.2.1 / S. 76

Soll mit dieser Strategie hochpräzise positioniert werden, treten durch die Schrägstellung der Optik mehrere Probleme auf. Wird bei der Bildaufnahme eine nicht an die Schiefstellung angepasste Optik eingesetzt, ergeben sich durch die gekippte Lage der Bildebene relativ zur Objektebene innerhalb des Bildes unterschiedliche Schärferebenen. Das bedeutet, dass das Bild des Substrats auf der einen Seite scharf dargestellt wird, während die gegenüberliegende Seite unscharf ist. Diesem Problem kann aber begegnet werden, indem die Bildebene so weit gekippt wird, bis das Bild komplett in einer Ebene abgebildet wird. Durch die schräge Sicht auf das Substrat können allerdings bei dreidimensionalen Aufbauten Teile des Bildbereichs verdeckt werden. Darüber hinaus ergeben sich innerhalb der Schärfentiefe des Messobjektivs nicht zu vernachlässigende Messfehler (Abb. 3-7).

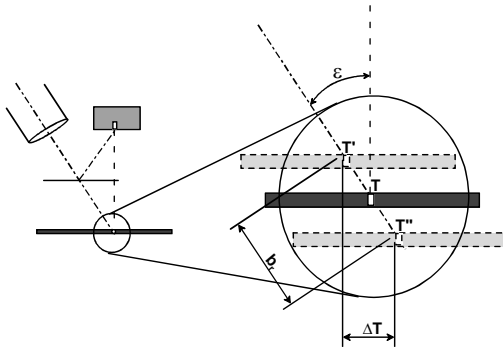


Abb. 3-7: Messungenauigkeit durch die Schärfentiefe b_r der Messoptik

Verschiebt man das Substrat entlang der optischen Achse der Messoptik innerhalb deren Schärfentiefebereich b_r , ergibt sich in der Bildebene keine Änderung des Messwerts. Allerdings stimmt nur die mittlere Position (Punkt T) mit der Idealposition überein, während T' und T'' die Maximalpositionen am Rand des Tiefenschärfebereichs darstellen. Der Fehler lässt sich rechnerisch über

$$(3-12) \quad \Delta T = b_r \cdot \sin \varepsilon$$

bestimmen. Bei einer Schiefstellung der Achse $\varepsilon = 5^\circ$ und einer Schärfentiefe von $b_r = \pm 300 \mu\text{m}$ ²¹ ergibt sich eine horizontale Messunsicherheit von

²¹ Siehe auch Abschnitt 5.2.2

$\Delta T = \pm 17,4 \mu m$, die für die angestrebte Positioniergenauigkeit unzureichend ist. Daraus lässt sich ableiten, dass für eine präzise Vermessung die optische Achse senkrecht auf den zu vermessenden Bildflächen stehen muss.

3.1.4.2 Optik mit lotrechten optischen Achsen

An einem halbdurchlässigen Spiegel passiert ein Halbbild den Spiegel nahezu ungehindert, während das zweite um 90° abgelenkt wird. Somit stehen die beiden Bildebenen der zu betrachtenden Objekte lotrecht aufeinander. Über eine Drehbewegung um die gemeinsame Schnittachse können sie aufeinander abgebildet werden.

Damit wird die Fügebewegung des Bauteils auf das Substrat nicht wie bei den anderen Positionierstrategien durch eine geradlinige Bewegung realisiert, sondern durch ein Schwenken des Bauteils an der Optik vorbei. Eine derartige Vorrichtung ist in SCHUTZRECHT DE 195 24 475 C1 realisiert worden. Der Montageablauf besteht aus den folgenden Teilschritten (Abb. 3-8):

- ◆ Das Bauteil wird vom Greifer aufgenommen und in die obere Position geschwenkt.
- ◆ Das Substrat wird in der unteren Bildebene vorpositioniert, so dass sowohl das Bauteil als auch das Substrat durch den halbdurchlässigen Spiegel zu erkennen sind.
- ◆ Die überlagerten Bilder werden durch eine Justage von Substrat oder Bauteil in Deckung gebracht.
- ◆ Durch ein Schwenken des Greifarms wird das Bauteil auf das Substrat abgesetzt.

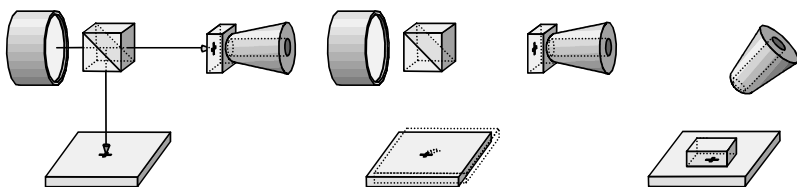


Abb. 3-8: Ablauf der Relativpositionierung mit Optik mit lotrechten optischen Achsen

Sowohl die oben dargestellte Positionierstrategie als auch die Strategie mit der IR-Kamera gestatten die direkte Positionierung des Bauteils über dem Substrat.

Dadurch wird eine Relativpositionierung ermöglicht, die über Vorteile verfügt, wie z.B. geringeren technischen Aufwand für die Positioniereinheiten oder minimale Empfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen, wie thermische Dehnungen des Maschinengestells²². Darüber hinaus ist ein rein manuelles Ausrichten des Bauteils zum Substrat wegen der Überlagerung der beiden Bilder möglich.

Allerdings treten Beschleunigungen beim Schwenken des Greifarms am Bauteil auf, die tangential zum Greifer wirken. Das Bauteil kann dadurch eventuell am Greifer verrutschen. Weiterhin wirkt sich negativ aus, dass die dargestellte Positionierstrategie eine Spezialkinematik nötig macht, die nur schwer in übliche Positioniergeräte integriert werden kann. Durch die Schwenkbewegung wird das Bauteil nicht exakt senkrecht auf das Substrat aufgesetzt, wodurch es zu Verkipnungen des Bauteils und ein ungleichmäßiges Aufsetzen auf dem Substrat kommen kann. Das gleiche Problem tritt auf, wenn Substrate oder Bauteile, die nacheinander montiert werden sollen, über unterschiedliche Dicke verfügen.

3.1.4.3 Optik mit diametralen optischen Achsen

Um die Nachteile des geschwenkten Greifers zu vermeiden, kann eine Optik konzipiert werden, die über zwei diametrale optische Achsen verfügt, d.h. die Optik ist in der Lage, zwei gegenüberliegende Bildfelder zu betrachten. Die beiden optischen Achsen liegen in einer Flucht (SÜSS 2000, COOPER U. A. 1999, HÖHN 2001, S. 56, SCHUTZRECHT DE 100 12 043.1-34, REINHART & JACOB 2000). Damit befindet sich die Optik zwischen dem gegriffenen Bauteil und dem Substrat. Um das Bauteil abzusetzen, muss entweder die Optik aus der Fügeachse entfernt oder das Bauteil um die Optik, z.B. mit Hilfe einer Parallelogrammführung, herum bewegt werden. Der Ablauf der Montage mit Hilfe der Optik mit diametralen Achsen enthält also folgende grundlegenden Arbeitsschritte:

- ◆ Das Bauteil wird mit dem Greifer aufgenommen.
- ◆ Nach dem Verfahren mit dem Handhabungsgerät zum Substrat wird die Optik zwischen Bauteil und Substrat eingeschoben.
- ◆ Die Bilder von Substrat und Bauteil werden aufgenommen und in Deckung gebracht.

²² siehe Abschnitt 3.1.2.2

- ◆ Das Bauteil wird abgesetzt, indem es entweder um die Optik herum bewegt wird oder, nachdem die Optik entfernt wurde, senkrecht auf das Substrat abgesetzt wird.

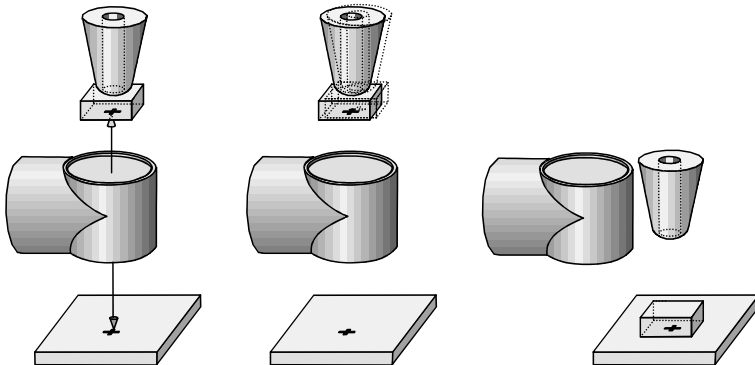


Abb. 3-9: Ablauf der Relativpositionierung mit Optik mit diametralen optischen Achsen

Wie bei den übrigen Positionierstrategien, die zur Justage der Bauteilposition über dem Substrat auf eine Relativpositionierung zurückgreifen, minimiert sich auch bei der Optik mit diametralen optischen Achsen die Beeinträchtigung des Prozesses durch äußere Einflüsse. Ebenso ist die Absolutgenauigkeit der Handhabungsachsen über große Verfahrswege nicht entscheidend für die Positioniergenauigkeit. Wird die Optik aus der Fügeachse zurückgezogen, kann das Bauteil senkrecht abgesetzt werden, so dass während der letzten Phase des Positionierungsvorgangs keine lateralen Beschleunigungen mehr auf das gegriffene Bauteil wirken. Im Gegensatz zu den Relativpositionierungen mit Hilfe der Unterseitenkamera und der IR-Optik können hier alle Greiferarten sowie unterschiedlichste Greifer- und Bauteilmaterialien zum Einsatz gelangen. Durch die gleichzeitige Bildaufnahme der Oberseite des Substrats und der Unterseite des Bauteils ist sowohl ein manueller als auch ein automatisierter Einsatz der Optik realisierbar. Wird die Optik in die Fügeachse eingeschoben, sind außer ihr keine zusätzlichen technischen Einrichtungen wie weitere Antriebe, spezielle Greifergestaltung etc. mehr nötig. Damit lässt sich diese Strategie auch im Nachhinein in bestehende Anlagen integrieren.

Weil sich das Optikmodul zur Positionierung zwischen dem Bauteil und dem Substrat befindet, ist allerdings ein größerer Abstand zwischen Greifer und Substrat notwendig.

3.2 Geometrischer Aufbau von Montagesystemen

Neben den Positionierstrategien und den dafür benötigten optischen Komponenten zur Bildaufnahme, stellt das Handhabungssystem den zweiten großen Komplex beim Aufbau von Montageanlagen dar. Darüber hinaus spielt noch die Zuführtechnik eine große Rolle bei der Gestaltung eines Montagesystems.

3.2.1 Handhabungsmodule

Prinzipiell lassen sich Handhabungssysteme bezüglich ihres geometrischen Aufbaus in zwei Hauptgruppen unterscheiden. Auf der einen Seite sind die Handhabungssysteme als **serielle Systeme** aufgebaut, die durch eine Aneinanderreihung kinematischer Glieder und eine Kombination aus **linearen** und **rotatorischen** Bewegungseinheiten am Endeffektor die gewünschte Bewegung erzeugen. Serielle kinematische Strukturen sind geometrisch bestimmt, während Handhabungssysteme, die als parallele Strukturen aufgebaut sind, über eine geometrisch überbestimmte Struktur verfügen. Serielle Strukturen stützen sich aufeinander ab, so dass sich Fehler und Ungenauigkeiten bis zum Endeffektor fortpflanzen und aufsummieren.

Auf dem Markt ist derzeit nur eine **Parallelkinematik** (PI 1998) erhältlich und Parallelstrukturen können nicht aus vorhandenen Standardmodulen aufgebaut und den Anforderungen eines Benutzers angepasst werden. Deswegen soll in dieser Arbeit der Fokus auf dem Aufbau eines Handhabungssystems mit seriellen Strukturen liegen. Der Einsatz von Parallelstrukturen in der Mikromontage wird detailliert in der Arbeit von THOBEN (1999) dargestellt.

3.2.1.1 Aufbau serieller Kinematiken

Beim Aufbau von halbleiterbasierten Mikrosystemen müssen überwiegend $2\frac{1}{2}$ - dimensionale Aufgabenstellungen gelöst werden. Das bedeutet, dass die Position der Bauteile der Mikrosysteme durch die Parameter X , Y , Z und φ_z definiert sind. Demzufolge muss das Handhabungssystem in der Lage sein, diesen Freiheitsgrad zu erfüllen.

Serielle Kinematiken bestehen aus Kombinationen von rotatorischen und linearen Bewegungseinheiten (VOLMER 1992, S. 34). Dabei können durch eine Hintereinanderschaltung aus zwei rotatorischen Achsen mit jeweils einem Hebelarm lineare Bewegungen in einer Ebene realisiert werden. Beispiel hierfür

ist der Aufbau eines vierachsigen Knickarm- Roboters, bei dem durch die Kombination von zwei rotatorischen Achsen die Bewegungen in X - und Y -Richtung erzeugt werden.

Um den geforderten Freiheitsgrad zu ermöglichen, können drei prinzipiell unterschiedliche Kinematikaufbauten zum Einsatz kommen.

♦ Kartesisches Handhabungssystem

Ein kartesisches Handhabungssystem besteht aus drei hintereinander angeordneten Linearmodulen und einer rotatorischen Bewegungseinheit (Abb. 3-10 a).

♦ Knickarm- Handhabungssystem aus rotatorischen Achsen

Ein Knickarm- Handhabungssystem ist aus drei rotatorischen Achsen und einer linearen Bewegungseinheit aufgebaut. Von den drei rotatorischen Antrieben sind zwei mit einem Hebelarm ausgestattet (Abb. 3-10 b).

♦ Abgesetzte Kinematik

Wird das Handhabungssystem aus voneinander abgesetzten Bewegungseinheiten aufgebaut, verringern sich die Einflüsse der Achsen untereinander. So summieren sich die Ungenauigkeiten der Achsen nicht über die kinematische Kette und thermische Einflüsse der Achsen untereinander sind geringer. Darüber hinaus verringern sich die bewegten Massen, da durch die Trennung der Achsen nicht so hohe Massen durch die untenliegenden Achsen beschleunigt werden müssen (Abb. 3-10 c).

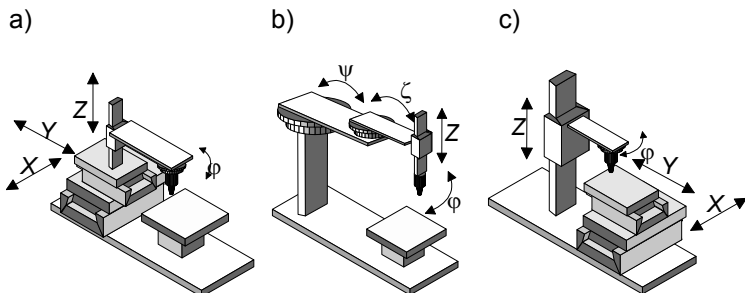


Abb. 3-10: Unterschiedliche Umsetzung von Handhabungssystemen
a) Kartesischer Aufbau b) Aufbau mit rotatorischen Achsen c) Abgesetzter Aufbau

3.2.1.2 Genauigkeitsabschätzung

Generell ist festzustellen, dass ein Unterschied in der erreichbaren Genauigkeit bei vergleichbarem Arbeitsraum zwischen einem rotatorischen und einem translatorischen Konzept besteht. Während bei linearen Achsen über den gesamten Bereich die gleiche Auflösung zur Verfügung steht, nimmt bei rotatorischen Achsen mit Hebel die erreichbare Auflösung mit der Länge des Hebels ab. Wird eine lineare Achse eingesetzt, so kann die Auflösung innerhalb des Verfahrenswegs von beispielsweise $l_{Achse} = 1000 \text{ mm}$ bei einem Mikrometer liegen. Durch eine Kombination zweier Achsen dieser Größenordnung kann ein Arbeitsraum von $1000 * 1000 \text{ mm}^2$ mit einer Auflösung von $1 \text{ }\mu\text{m}$ in beiden Koordinaten abgedeckt werden. Soll ein derartiger Arbeitsraum von einer Kombination aus 2 rotatorischen Achsen mit zwei gleich langen Hebelarmen abgedeckt werden, müssen die Hebel eine Länge von

$$(3-13) \quad l_{Hebel} = \frac{1}{4} l_{Achse} \sqrt{2} = 353,55 \text{ mm}$$

aufweisen. Um auch in den äußeren Randbereichen des Arbeitsraums eine Auflösung von $s_{min} = 1 \text{ }\mu\text{m}$ garantieren zu können, muss die Winkelauflösung der ψ - Achse

$$(3-14) \quad \psi_{min} = \arcsin \frac{s_{min}}{l_{Achse}} = 0^{\circ}00'00,3''$$

betragen. Die typische Winkelauflösung eines SCARA-Roboters beträgt $\psi = 0^{\circ}00'18''$ (EPSON 2000). Daraus folgt bei den angenommenen Hebellängen eine Auflösung am TCP von $s_{min} = 87 \text{ }\mu\text{m}$, die somit erheblich schlechter ist, als die von translatorischen Achsen. Aus diesem Grund sind translatorische Handhabungssysteme im Bereich der Mikromontage rotatorischen vorzuziehen.

3.2.1.3 Zusätzliche Feinpositioniereinheiten

Durch den Einsatz zusätzlicher Feinpositioniereinheiten können Ungenauigkeiten von Handhabungssystemen beim Einsatz spezieller Positionierstrategien verringert werden. Dabei findet eine Entkopplung des Handhabungssystems, das den großen Arbeitsraum ermöglicht, von dem Handhabungssystem, das für die genaue Justage verantwortlich ist, statt. Der Arbeitsraum des Feinpositionierantriebs muss so bemessen sein, dass die Positioniertoleranzen des Grobpositionier-

systems geringer sind als der Arbeitsraum des Feinpositionierantriebs. Durch die Verringerung der bewegten Massen bei der Feinpositioniereinheit können die Korrekturen hier mit höheren Beschleunigungen und somit in geringerer Zeit realisiert werden als bei einem Handhabungssystem, bei dem für kleine Verfahrensschritte die gesamte Masse des Positioniersystems beschleunigt werden muss.

3.2.1.4 Untersuchte Handhabungssysteme

Auf Grundlage der in den Abschnitten 3.2.1.1 bis 3.2.1.3 vorgestellten Bewegungseinheiten lassen sich verschiedene Handhabungssysteme entwickeln, die über unterschiedliche Eigenschaften bezüglich ihres geometrischen Aufbaus, ihres konstruktiven Aufwands und ihrer Genauigkeit verfügen.

◆ **Kartesischer Aufbau**

Dieses Handhabungssystem arbeitet mit drei hochauflösenden Linearachsen und einer Rotationsachse und wird auf einem normalen Maschinengestell aufgebaut. Dieses ist nicht speziell gedämpft und temperaturstabilisiert ausgeführt, so dass das Positioniersystem nicht von äußeren Einflüssen abgeschirmt wird.

◆ **Kartesischer Aufbau optimiert für Hochpräzisionsaufgaben**

Der Aufbau entspricht dem vorher genannten, zusätzlich sind aber das gesamte Maschinengestell und sämtliche Lagerungen auf Hochpräzisionspositionieraufgaben optimiert, d.h. das Maschinengestell ist thermisch stabil aufgebaut und so ausgeführt, dass auch mechanische Schwingungen möglichst stark gedämpft werden. Ebenso sind die eingesetzten Antriebe und Lagerungen auf höchste Präzision optimiert. Üblicherweise werden in solchen Handhabungsgeräten Granitgestelle, Luftlagerungen und Lineardirektantriebe und direkte Glasmaßstäbe eingesetzt. Eine weitere Maßnahme ist eine gezielte Klimatisierung des gesamten Maschinenaufbaus.

◆ **Kartesischer Aufbau mit zusätzlicher Feinpositioniereinheit**

Auch hier kommt ein kartesischer Aufbau, bestehend aus drei Lineareinheiten und einem Rotationsantrieb, zum Einsatz. Die Lineareinheiten sind allerdings Standardantriebseinheiten, die über geringe Auflösung und Wiederholgenauigkeit verfügen. Als Ergänzung dazu ist lokal im Werkzeug des Roboters eine Feinpositioniereinheit angebracht. Diese Positioniereinheit

verfügt über einen ausreichenden Arbeitsraum, um die Positioniertoleranzen des Handhabungssystems auszugleichen. Innerhalb dieses lokalen Arbeitsraums weist die Zusatzeinheit eine hohe Auflösung und Absolutgenauigkeit auf.

◆ **Aufbau mit rotatorischen Achsen**

Der Aufbau eines Handhabungssystems mit den vier Freiheitsgraden X , Y , Z und φ_z mit rotatorischen Achsen entspricht einem SCARA Roboter. D.h. für die Realisierung der X -, Y - und φ -Bewegung werden Rotationsachsen z.T. mit Hebelarm eingesetzt, während die Z -Bewegung über eine Linearachse realisiert wird. Das Handhabungssystem ist für präzise Handhabungsaufgaben optimiert.

◆ **Aufbau mit rotatorischen Achsen und zusätzlicher Feinpositioniereinheit**

Dem kinematischen Aufbau mit rotatorischen Achsen wird hier zur Erhöhung der lokalen Genauigkeit eine Feinpositioniereinheit am Handgelenk des Roboters angebracht.

Ergänzend zu den in Abschnitt 3.2.1 aufgeführten Systemen sind zwei weitere Handhabungssysteme in dem Bewertungsschema aufgeführt:

◆ **Manuell bewegter Substratträger**

Darunter versteht man eine rein manuelle Vorrichtung, mit der über ein Verschieben des Substratträgers die Ausrichtung von Bauteil zu Substrat durchgeführt wird

◆ **Spezialkinematik für den Einsatz der Optik mit lotrechten optischen Achsen**

Diese Spezialkinematik besteht aus einem Schwenkarm, an dem der Greifer für das Bauteil befestigt ist und der um 90° geschwenkt werden kann, sowie einer Präzisionspositioniereinheit, mit der in einem geringen Arbeitsraum eine Ausrichtung des Substrats in X -, Y - und φ - Richtung möglich ist.

3.2.2 Platzierung der Optiken

Grundsätzlich kann man die Optiken zur Vermessung von Bauteil bzw. Substrat ortsflexibel oder ortsfest platzieren. Für eine Parallelisierung von Vermessungsvorgängen mit ortsfester Optik müssen mehrere Optiken eingesetzt werden. Dies

entfällt, wenn eine Vermessung während eines Bewegungsvorganges durch eine mitgeführte Kamera durchgeführt werden kann.

Sind die Vermessungsoptiken ortsfest angebracht, beschränkt sich deren Arbeitsgebiet auf ihr Gesichtsfeld. Das bedeutet, dass Montageoperationen immer an dem gleichen Ort durchgeführt werden müssen. Wird zum Beispiel eine Bauteil-zu-Nutzen-Montage durchgeführt, so muss eine zusätzliche Bewegungsvorrichtung dafür sorgen, dass der Nutzen unterhalb der Vermessungsoptik so verfahren wird, dass sich der Montageort im Gesichtsfeld der Vermessungsoptik befindet.

Im Gegensatz dazu kann eine mitgeführte Vermessungsoptik im gesamten Arbeitsraum eingesetzt werden. So ist beispielsweise der Einsatz der Optik auch bei der Bauteilaufnahme zur Detektierung und Vermessung der Bauteile an der Zuführstation möglich. Allerdings bringt eine mitgeführte Optik auch Nachteile mit sich. Zum einen ist damit eine Parallelisierung von Abläufen nur begrenzt möglich, so dass die Taktzeiten nicht minimiert werden können. Zum anderen erhöhen sich die zu beschleunigenden Massen, wodurch sich wiederum Nachteile für die Taktzeiten ergeben. Darüber hinaus sind die Belastungen für eine mitgeführte Optik durch die ständigen Beschleunigungen relativ hoch, so dass die Optik widerstandsfähig gegen diese Wechselbelastungen sein muss.

	Ortsfeste Optik	Mitgeführte Optik
Vorteile	Parallelisierung von Vermessungsvorgängen an unterschiedlichen Orten möglich. Geringe bewegte Massen Geringe geometrische Einschränkungen für Optik und Beleuchtung	Bauteilvermessung während einer Verfahrensbewegung möglich Hohe Ortsflexibilität Geringere Anzahl an Optiken nötig
Nachteile	Mehrere Optiken nötig Geringe Ortsflexibilität	Höhere bewegte Massen Beschränkter Bauraum für Optik und Beleuchtung

Tab. 3-1: Vergleich der unterschiedlichen Varianten zur Befestigung der Optik am Handhabungsgerät

Die in Tab. 3-1 dargestellten Eigenschaften der Optikbefestigung am Handhabungsgerät gelten prinzipiell für alle in Abschnitt 3.1 vorgestellten Positionierstrategien.

3.2.3 Zuführtechnik

Die Integration der Zuführtechnik in ein Montagesystem ist insbesondere für den Aufbau von Großserienanlagen von Interesse. Aber auch im Bereich der Vorserienfertigung und der Montage kleiner und mittlerer Stückzahlen spielt die Zuführtechnik eine Rolle.

Die Zuführung der Bauelemente kann entweder vereinzelt oder vereinzelt auf dem Nutzen stattfinden. Bei der letztgenannten Variante liegt der Wafer schon gediced vor, die Bauteile befinden sich aber noch geordnet auf dem Bluetape. Das bedeutet, dass die Bauteile, bevor sie montiert werden können, vom Bluetape abgelöst und geflippt werden müssen. Dafür sind zusätzliche Vorrichtungen wie ein Die-Ejector zum Ablösen des Bauteils vom Bluetape, eine Flipeinheit, die das abgelöste Bauteil um 180° wendet und dann dem Greifer des Handhabungsgeräts bereitstellt, sowie ein Kreutztisch zum Positionieren des Wafers über dem Die-Ejector nötig.

Werden die Bauteile vereinzelt zugeführt, können unterschiedliche Varianten der Bauteilbereitstellung zum Einsatz kommen. Eine Möglichkeit ist die Zuführung in sog. Chip-Trays, d.h. Transportbehältern, in denen die Bauteile vereinzelt in separaten Taschen liegen. Dabei können die Bauteile geflippt oder nicht geflippt vorliegen. Ebenso können die Bauteile vereinzelt auf adhäsiven Folien angeordnet zur Verfügung gestellt werden (sog. Gel-Paks), wobei in diesem Fall vor der Aufnahme der Bauteile mit dem Greifer die Adhäsionskraft der Folie überwunden werden muss.

Für die Zuführung der Bauteile in großen Stückzahlen ist es außerdem noch möglich, die Bauteile auf Gurte aufgeklebt zur Verfügung zu stellen. Dabei können spezielle, für Flip-Chip-Bauelemente optimierte Gurte zum Einsatz kommen, durch die vermieden werden kann, dass ein Flippen der Bauteils nach der Entnahme aus dem Gurt nötig ist (GUTENTAG & SIERRA 2000).

Ebenso wie für Bauteile gibt es für Substrate unterschiedliche Zuführtechniken. Je nachdem ob die Substrate im Nutzen, auf speziellen Haltern oder gegurtet vorliegen, können speziell angepasste Zuführeinrichtungen zum Einsatz kommen. Eine typische Zuführtechnik für Substrate in der MST sind die sog. Auer-Boote (AUER 2001). Dabei werden mehrere Substrate präzise auf einem standardisierten Substratträger befestigt und damit nacheinander in den Arbeitsraum eingebracht.

	Im Nutzen auf Bluetape	Vereinzel im Chiptray	Vereinzel auf Gel-Pak	Vereinzel gegurtet
Hohe Stückzahlen	+	O	-	+
Kein zusätzlicher Geräteaufwand	+	-	O	+
Keine vorgelagerten Bearbeitungsschritte (Vereinzel / Gurten)	+	-	-	-
Hohe Prozesssicherheit	O	O	-	+

Tab. 3-2: Übersicht über Eigenschaften von Zuführvarianten für Flip-Chip-Bauelemente in der MST

(+ gut geeignet, O bedingt geeignet, - nicht geeignet)

3.3 Bewertungskriterien

Aufbauend auf den Anforderungen aus Abschnitt 2.9 können unterschiedliche Bewertungskriterien für Positionierstrategien und Montagesysteme definiert werden. Dabei treten Kriterien auf, die sowohl für die Bewertung der Positionierstrategien bzw. der Anlagen zutreffend sind, als auch solche, die nur für einen Bereich anzuwenden sind.

3.3.1 Kriterien für Anlagen

◆ Hohe Wiederholgenauigkeit

Die Wiederholgenauigkeit von Robotern wird nach VOLMER (1992, S. 434) in Anlehnung an die Arbeits- und Positioniergenauigkeit numerischer Werkzeugmaschinen definiert (VDI/DGQ-RICHTLINIE 3441). Dabei wird unter Wiederholgenauigkeit insbesondere die Genauigkeit bei der Positionierung und dem Nachfahren einer Bahn verstanden. Diese setzt sich unter anderem aus der mittleren Positionsabweichung, der Positionsstreuweite, der Umkehrspanne und der Positionsunsicherheit zusammen²³.

²³ Weiterführende Literatur zur Definition und Prüfung dieser Kenngrößen sind in VOLMER (1992 S. 433 ff), VDI/DGQ-RICHTLINIE 3441, VDI-RICHTLINIE 2861A, VDI-RICHTLINIE 2861B und VDI-RICHTLINIE 2861C zu finden.

◆ **Hohe Positionsauflösung**

Die Auflösung eines Handhabungssystems hängt von mehreren Parametern ab. Zum einen ist das zum Einsatz kommende Messsystem, wie z.B. Glasmaßstab, Winkencoder etc. für die erreichbare Auflösung verantwortlich. Dabei ist die Wegauflösung, bzw. Winkelauflösung als die kleinste vom Messsystem auswertbare Weg- oder Winkeländerung einer Bewegungsachse definiert (VOLMER 1992, S. 352). Zum anderen spielen auch die eingesetzten Antriebe und Antriebsstränge eine entscheidende Rolle, da durch Gelenkspiel, minimale Verfahrinkremente des Motors, Stick-Slip-Effekte etc. das Auflösungsvermögen eines Handhabungsgeräts begrenzt wird.

◆ **Eignung für Absolut- und / oder Relativpositionierstrategie**

Durch den geometrischen Aufbau und die konstruktive Ausführung eines Handhabungssystems ändern sich seine Eigenschaften und beeinflussen somit seine Eignung für die Anwendung unterschiedlicher Positionierstrategien. Um eine absolutgenaue Positionierung zu gewährleisten, muss das Handhabungssystem zum einen über ein hochpräzises Antriebssystem verfügen, zum anderen muss das Maschinengestell gegenüber äußeren Einflüssen, wie z.B. Temperaturschwankungen, extrem stabil sein, da sonst Toleranzen auftreten. Wird eine Relativpositionierstrategie durchgeführt, tritt die Empfindlichkeit des Handhabungssystems gegenüber äußeren Einflüssen in den Hintergrund.

3.3.2 Kriterien für Positionierstrategien

◆ **Hohe Flexibilität bezüglich Automatisierungsgrad**

Positionierstrategien können sowohl mit als auch ohne ein automatisiertes Bildverarbeitungssystem umgesetzt werden. Wenn eine Positionierstrategie auch ohne ein automatisiertes Bildverarbeitungssystem eingesetzt werden kann, verfügt es über eine hohe Flexibilität bezüglich des Automatisierungsgrades. Demgegenüber können die Positionierstrategien mit feststehender Unterseitenkamera nicht ohne den Einsatz eines Bildverarbeitungssystems durchgeführt werden.

◆ **Einsatz von Standardgreifern**

Werden besondere Greifer benötigt, die zum Beispiel über spezielle Referenzmarken verfügen oder nur aus bestimmten Materialien gefertigt sein

dürfen, wird der Einsatzbereich der Positionierstrategien eingeschränkt und die Investitionskosten steigen durch Sonderanfertigungen.

◆ **Materialunabhängigkeit**

Mit dem Bewertungskriterium Materialunabhängigkeit wird bewertet, ob eine Positionierstrategie nur bei speziellen Materialien oder Materialeigenschaften der Bauteile bzw. Substrate angewandt werden kann. Zum Beispiel kann die in Abschnitt 3.1.3 beschriebene Strategie, bei der für die Positionierung eine IR-Kamera eingesetzt wird, nur für Materialien eingesetzt werden, die für IR-Licht transparent sind.

◆ **Vermeidung lateraler Beschleunigungen nach der Lagemessung**

Kann nach einem Vermessungsvorgang das Bauteil senkrecht abgesetzt und montiert werden, so dass keine Gefahr besteht, dass das Bauteil durch eine weitere laterale Bewegung und somit Beschleunigung am Greifer nach dem letzten Ausrichtungsvorgang verrutscht, ist die Prozessgenauigkeit höher.

◆ **Integrierbar in Standardhandhabungssysteme**

Durch die Möglichkeit eine Positionierstrategie in verfügbaren Handhabungssystemen zum Einsatz zu bringen ist es möglich, vorhandene Anlagen entsprechend umzurüsten.

3.3.3 Kriterien für Strategien und Anlagen

◆ **Großer Arbeitsraum**

Der Arbeitsraum (VDI-RICHTLINIE 2861B, GZIK & SCHOLZ 1986) stellt den Raum dar, der vom Mittelpunkt der Schnittstelle zwischen den Nebenachsen und dem Endeffektor (Greifer, Werkzeug) mit der Gesamtheit aller Achsbewegungen erreicht werden kann. D.h. es ist der Raum, in dem die Werkzeuge, die von einem Handhabungssystem bewegt werden, zum Einsatz gebracht werden können.

Der benötigte Arbeitsraum ist stark vom vorgesehenen Einsatzgebiet abhängig. Während im Laboreinsatz i.d.R. ein Arbeitsraum von wenigen Kubikzentimetern genügt, liegen im Bereich der Kleinserien- und Prototypenfertigung oft größere Verfahrestrecken vor. Hier erfordern die vielfältigen zu erfüllenden Aufgaben eine große Anzahl an Komponenten wie Zuführ-

systemen, Messsystemen, unterstützende Peripherien, Dosieranlagen etc.. Diese sind meist noch nicht so angeordnet, dass möglichst geringe Verfahrswege erzielt werden, woraus sich für die Kleinserien- und Prototypenfertigung der Bedarf eines großen Arbeitsraums ergibt. Für den Aufbau von Großserieranlagen ist ein möglichst kleiner Arbeitsraum anzustreben, um die Verfahrswege und damit die Taktzeiten möglichst zu reduzieren und um eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Dafür werden die nötigen Zuführeinrichtungen und die übrigen Peripherieeinrichtungen geometrisch optimiert und ihre Lage im Arbeitsraum wird auf die Verfahrbewegungen hin ausgelegt.

◆ **Geringe Taktzeit**

Die Taktzeit ist die Zeit, die nötig ist, um einen kompletten Montageprozess durchzuführen, d.h. die Zeit vom Start der ersten Montagoperation bis zum Start des zweiten gleichartigen Montagevorgangs. Für die Großserienmontage ist eine möglichst geringe Taktzeit anzustreben. Im Bereich der Positionierstrategien muss bewertet werden, inwieweit eine Parallelisierung von Prozessen möglich ist, bzw. ob sich durch einen iterativen Vorgang die Taktzeit verlängert. Bei den Anlagen kann die mögliche Verfahrgeschwindigkeit in die Bewertung mit einbezogen werden.

◆ **Geringe Investitionskosten**

Die Untersuchung der nötigen Investitionskosten ist insbesondere für die Bewertung der unterschiedlichen Montagesystemtypen relevant. Während im Bereich der Labormontage die Produktivität zugunsten geringer Investitionskosten für ein Handhabungsgerät in den Hintergrund tritt, sind in der Serienfertigung höhere Investitionskosten durch entsprechend höhere Stückzahlen amortisierbar. Bietet ein Handhabungsgerät bei hohen Kosten beispielsweise eine höhere Flexibilität bezüglich der möglichen Montageaufgaben, kann diese Investition durch geringere Folgekosten bei der Montage unterschiedlicher Mikrosysteme rentabel sein.

Eine direkte Abschätzung der Investitionskosten für die Umsetzung der unterschiedlichen Positionierstrategien ist nur bedingt möglich, indem der Aufwand für die nötigen technischen Einrichtungen bewertet wird.

◆ **Hohe Positioniergenauigkeit**

Die Fähigkeit eine hohe Positioniergenauigkeit zu ermöglichen, ist im Bereich der MST sowohl für die Positionierstrategie, als auch für die Handhabungssysteme ein wichtiges Kriterium. Im Bereich der Positionierstrategien werden dafür die in Abschnitt 3.1 aufgeführten Genauigkeitsabschätzungen als Bewertungsgrundlage herangezogen. Die Handhabungssysteme werden auf Grundlage der in Abschnitt 3.2.1.2 durchgeführten Analyse bewertet.

◆ **Hohe Flexibilität der Anlagenkonfiguration**

Eine hohe Flexibilität des Gesamtsystems, das sich aus der Kombination von Handhabungssystem und Positionierstrategie ergibt, ermöglicht eine Anpassung des Montagesystems an die Montage unterschiedlicher Mikrosysteme. Durch eine modulare Gestaltung des Gesamtsystems ist eine wirtschaftliche Adaption an unterschiedliche Aufgabenstellungen möglich.

3.3.4 Entwicklung der Anforderungsprofile für Montagesysteme

Mit Hilfe der in Abschnitt 3.3.3 dargestellten Bewertungskriterien und den in Abschnitt 2.7 beschriebenen Einsatzgebieten der Labor-, Klein- und Mittelserien, sowie der Großserienmontage lassen sich Anforderungsprofile entwickeln, die für die Entwicklung von Montagesystemen eine Orientierungshilfe darstellen.

Als Bewertungskriterien für die Anforderungsprofile werden die Minimierung des Arbeitsraums, eine geringe Taktzeit, die hohe Positioniergenauigkeit, die geringen Investitionskosten, sowie die flexible Anlagenkonfiguration herangezogen. Die Skala zur Bewertung der einzelnen Kriterien reicht dabei von 0 (sehr schlecht / Kriterium wird nicht benötigt) bis 10 (sehr gut / Kriterium wird zu 100 % benötigt). In einem Netzdiagramm aufgetragen ergeben sich die in Abb. 3-11 dargestellten Anforderungsprofile.

Definition der Anforderungsprofile

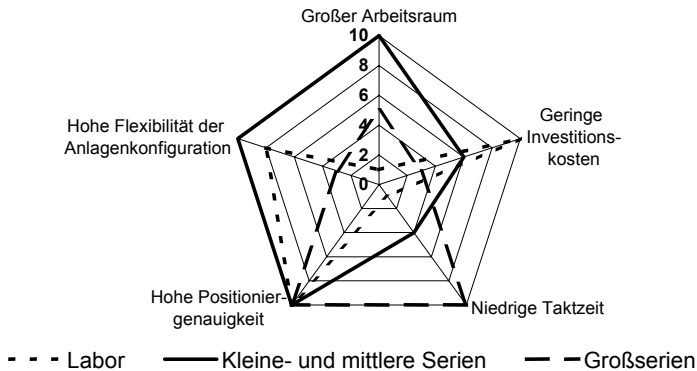


Abb. 3-11: Anforderungsprofile für Einsatzgebiete von Mikromontagesysteme

3.4 Bewertung der Varianten

Im Folgenden sollen die jeweiligen Entscheidungskriterien aus Abschnitt 3.3 auf Handhabungssysteme und Positionierstrategien angewandt werden, um daraus Kombinationsmöglichkeiten abzuleiten. Diese werden dann nach den Anforderungsprofilen aus Abschnitt 3.3.4 bewertet und zugeordnet.

3.4.1 Bewertung der Handhabungssysteme

Da den einzelnen Parametern keine quantitativ erfassbaren Größen zugeordnet sind, kann die Bewertung der Handhabungssysteme nur rein qualitativ durchgeführt werden. Als Handhabungssysteme werden dabei die in Abschnitt 3.2.1.4 entwickelten Systeme in die Bewertung einbezogen.

	Kartesischer Aufbau	Kartesischer Aufbau optimiert für Hochpräzisionsaufgaben	Kartesischer Aufbau mit zusätzlicher Feinpositioniereinheit	Aufbau mit rotatorischen Achsen	Aufbau mit rotatorischen Achsen und zusätzlicher Feinpositioniereinheit	Manuell frei verschiebbarer Substraträger	Spezialkinematik für den Einsatz der Optik mit lotrechten Achsen
Großer Arbeitsraum	+	O	+	O	+	O	-
Geringe Taktzeit	+	+	-	O	-	-	O
Geringe Investitionskosten	O	-	O	+	O	+	+
Hohe Positioniergenauigkeit	+	+	+	O	+	-	+
Hohe Genauigkeit im Arbeitsraum	O / + ²⁴	+	O / + ²⁵	-	- / + ²⁵	O	+
Hohe Wiederholgenauigkeit	O	+	+	-	+	O	+
Hohe Positionsauflösung	+	+	+	-	+	O	+
Geeignet für Absolutpositionierung	O	+	-	-	-	-	O
Geeignet für Relativpositionierung	+	+	+	O	+	+	+

Tab. 3-3: Übersicht über Eigenschaften von Handhabungssystemen
(+ gut geeignet, O bedingt geeignet, - nicht geeignet)

Die Auswertung der Tabelle ergibt, dass das kartesische Handhabungssystem, das für die Anwendung im Hochpräzisionsbereich optimiert ist, für die Hochpräzisionsmontage die besten Voraussetzungen bietet. Nachteile gegenüber anderen Systemen treten hauptsächlich wegen hoher Investitionskosten und eines geringeren Arbeitsraums auf. Aber auch die Spezialkinematik für den Einsatz der Optik mit lotrechten optischen Achsen bietet gegenüber Standardhandhabungssystemen bei der hochpräzisen Montage Vorteile. Auffällig ist, dass sich nur das hochpräzise kartesische System gut für eine Absolutpositionierung eignet.

²⁴ absolutgenaue Positionierung / relativgenaue Positionierung

3.4.2 Vergleich der unterschiedlichen Positionierstrategien

Wie bei der Bewertung der Handhabungssysteme wird die Bewertung der Positionierstrategien nur qualitativ durchgeführt (Tab. 3-4).

Kriterien	Passive Positionierung mit Formschluss	Mit fester Unterseitenkamera		Mit IR-Kamera	Mit direkter Unterseitenvermessung über dem Substrat		
		Absolutpositionierung	Relativpositionierung		Schräge optische Achsen	Lotrechte optische Achsen	Diametrale optische Achsen
Geringe Taktzeit	O	+	- / O ²⁵	O	O / + ²⁶	O / + ²⁶	O / + ²⁶
Hohe Positioniergenauigkeit	O	O	O	O	-	+	+
Hohe Flexibilität bzgl. Automatisierungsgrad	+	-	-	+	+	+	+
Einsatz von Standardgreifern	-	+	-	-	+	O	+
Materialunabhängig	O	+	+	-	+	+	+
Direkte Montage nach Vermessen	X	-	-	+	+	-	+ / - ²⁶
Integrierbar in vorhandene Anlagen	O	+	O / - ²⁷	O	O	-	O

Tab. 3-4: Bewertung der Positionierstrategien für unterseitenstrukturierte Bauelemente

(+ gut geeignet, O bedingt geeignet, - nicht geeignet, keine Wertung möglich)

²⁵ Vermessung des Bauteils und des Substrats wird seriell durchgeführt / Vermessung des Bauteils und des Substrats wird parallel durchgeführt.

²⁶ Optik wird aus der Fügeachse zurückgezogen / Bauteil wird um die Optik herum geführt.

²⁷ Je nachdem, ob zusätzliche Positionierantriebe benötigt werden (Oberseitenkamera gestellfest / mitgeführt).

Diese Tabelle zeigt, dass die Strategie, die eine Optik mit diametralen optischen Achsen vorsieht, die besten Bewertungen erreicht. Sie ermöglicht die für die Genauigkeit günstige direkte Relativpositionierung und kann als abgeschlossenes Modul aufgebaut werden, das in vorhandene Anlagen integrierbar ist, wenn der nötige Arbeitsabstand zwischen Bauteil und Substrat vorhanden ist. Ein senkrechtes Absetzen ohne Lateralbeschleunigungen nach dem Vermessen des Bauteils am Greifer ist möglich, wenn die Optik aus der Fügeachse entfernt wird. Es werden keine speziellen Greifer benötigt. Die erreichbare Messgenauigkeit ist wegen der verwendbaren normalen Wellenlänge, der geringen Anzahl aufeinander basierender Messvorgänge und dem senkrechten Auftreffen der optischen Achsen auf den Bildebenen hoch. Im Bereich der Materialien für Bauteile und Substrat liegen keine Einschränkungen vor.

3.4.3 Kombination und Zuordnung zu Anwendungsfeldern

Werden die Handhabungssysteme mit den Positionierstrategien kombiniert, erhält man eine Matrix mit unterschiedlichen Anlagen und Positionierstrategien. Bewertet man dann diese Anlagen mit den in Abschnitt 3.3.4 für die Entwicklung der Anwendungsprofile herangezogenen Kriterien und vergleicht die Ergebnisse mit den Anwendungsprofilen, ergeben sich Anlagenkonfigurationen, die für bestimmte Einsatzgebiete zugeschnitten sind. Beispielsweise ist in Abb. 3-12 die Bewertung des Montagesystems bestehend aus einem kartesischen Handhabungssystem und der Positionierstrategie mit diametralen optischen Achsen.

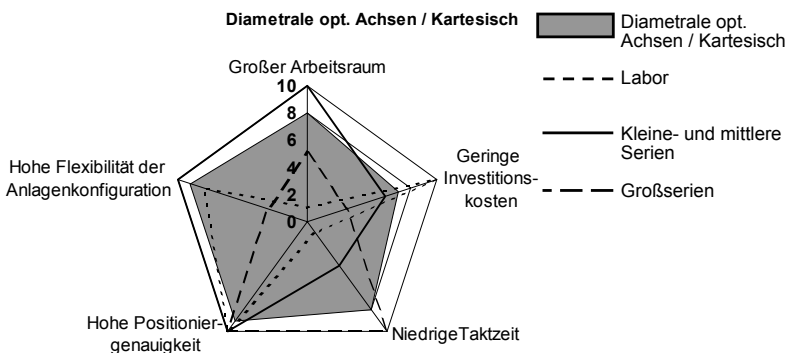


Abb. 3-12: Bewertung des Montagesystems bestehend aus der Kombination kartesisches Handhabungssystem und der Positionierstrategie mit diametralen optischen Achsen

Aufgrund der Überdeckung der Bewertungsfläche mit den in Abschnitt 3.3.4 entwickelten Anwendungsprofilen ist dieses Montagesystem während aller Abschnitte eines Produktlebenszyklus in der Fertigung einzusetzen. Die restlichen Auswertungen für die einzelnen Ergebnisse sind im Anhang (S. 150 ff) zu finden. Die Tab. 3-5 stellt die Ergebnisse der Netzdiagramme zusammengefasst dar.

<div> <div>Handhabungssysteme</div> <div>Positionierstrategien</div> </div>		Kartesischer Aufbau	Kartesischer Aufbau optimiert für Hochpräzisionsaufgaben	Kartesischer Aufbau mit zusätzlicher Feinpositioniereinheit	Aufbau mit rotatorischen Achsen	Aufbau mit rotatorischen Achsen und zusätzlicher Feinpositioniereinheit	Manuell frei verschiebbarer Substraträger
Passive Positionierung mit Formschluss		N (L)	(N, S)	L (N)	N (L)	L (N)	L
Mit fester Unterseitenkamera	Absolutpositionierung	S(N)	S	X	(S)	X	X
	Relativpositionierung	L, N	(S)	N	(S)	N, L	(L)
Mit IR- Kamera		N (S)	S	N (S)	(S)	(N)	(L)
Mit direkter Unterseitenvermessung über dem Substrat	Schräge optische Achse	N (L)	(S)	N (S, L)	(N)	N, L	(L)
	Diametrale optische Achsen	L, N, S	S (N)	L, N (S)	(L, N, S)	L, N (S)	L

Tab. 3-5: Zusammenfassung der Zuordnung zu Anwendungsprofilen (L: Geeignet für Laborbetrieb, N: Geeignet für Null- / Kleinserienfertigung, S: Geeignet für Serienfertigung, X: Kombination ergibt keine sinnvolle Lösung, Angabe in Klammern: bedingt geeignet)

Die Optik mit lotrechten optischen Achsen ist ausgegliedert, da für sie eine Spezialkinematik, mit der eine Ausrichtung von Bauteil zu Substrat möglich ist, benötigt wird. Diese besteht aus einem Schwenkarm, an dem der Greifer für das Bauteil befestigt ist und der um 90° geschwenkt werden kann, sowie einer Positioniereinheit, mit der eine Ausrichtung des Substrats in X -, Y - und φ -Richtung möglich ist. Die Positionierausrichtung kann zum einen manuell, zum anderen motorisiert mit Hilfe von Hochpräzisionsantrieben ausgeführt werden. Vergleicht man die Eigenschaften der beiden Varianten der Spezialkinematiken mit den Anforderungsprofilen aus Abb. 3-11, ergibt sich, dass beide für den Einsatz im Bereich der Laborfertigung geeignet sind, wobei die motorisierte Variante für eine höhere Positioniergenauigkeit ausgelegt und die Möglichkeit der Teilautomatisierung für den Bereich der Kleinserienmontage offen lässt.

Die Auswertung der Tab. 3-5 ergibt, dass Kombinationen aus Positionierstrategien und Handhabungssystemen vorliegen, die nur in speziellen Anwendungsbereichen sinnvoll anzuwenden sind. So sind sämtliche Kombinationen mit manuellen Handhabungssystemen nur für den Laborbetrieb einsetzbar. Die Positionierstrategie, die mit einem hochpräzisen kartesischen Aufbau kombiniert wird, eignet sich aufgrund der hohen Investitionskosten am ehesten für den Serieneinsatz. Montagesysteme, die auf der Basis von Grob-/Feinpositioniersystemen aufgebaut sind, sind jedoch auf Grund der erhöhten Taktzeiten am ehesten für Kleinserienfertigung einsetzbar. Am flexibelsten in unterschiedlichen Einsatzbereichen zeigen sich Anlagen, in denen Optiken mit diametralen optischen Achsen als Positionierstrategie eingesetzt werden. Aufgrund der damit möglichen Relativpositionierung erreichen auch Anlagen, die über keine hohe Absolutgenauigkeit im gesamten Arbeitsraum dafür aber über eine hohe Auflösung verfügen, eine hohe Positioniergenauigkeit. Bei entsprechender Anordnung der Optik werden auch gute Taktzeiten erreicht, so dass ein Einsatz in der Großserienfertigung realisierbar ist.

Aufgrund der deutlichen Vorteile, die das Optikkonzept mit diametralen optischen Achsen in den unterschiedlichen Einsatzbereichen verspricht, wird in den folgenden Kapiteln eine derartige Optik entwickelt und in eine Anlage auf Basis eines kartesischen Handhabungssystems integriert. Im Rahmen des Anwendungsbeispiels wird dieses Montagesystem dann für den Bereich der Klein- und Mittelserienfertigung verifiziert.

4 Konzeption der Optik

Neben dem Handhabungssystem und der Software zur Bildverarbeitung ist die Optik, mit deren Hilfe die Lagemessung durchgeführt wird, die Kernkomponente für den Aufbau eines bildverarbeitungsbasierten Montagesystems. Da von ihr die Genauigkeit der Lagemessung abhängt und alle nachfolgenden Schritte wie Bildverarbeitung und -auswertung, sowie die daraus folgenden Verfahrensschritte des Handhabungssystems auf den Bildaufnahmen basieren, stellt die richtige Auswahl des Optiksystems auch die Grundlage für die spätere Positioniergenauigkeit des Gesamtpositioniersystems dar. Für die Optik sollen konventionelle optische Bauelemente eingesetzt werden, da Sonderlösungen wie zum Beispiel HOEs²⁸ nicht den vorliegenden Genauigkeitsanforderungen entsprechen.

In den folgenden zwei Kapiteln sollen unterschiedliche Konzepte einer Optik mit diametralen optischen Achsen entwickelt werden. Von diesen Optiken wird die für die Montage von Mikrosystemen am besten geeignete ermittelt und realisiert.

4.1 Grundsätzlicher Aufbau der Optik

In Abschnitt 2.9 sind die Anforderungen an das zu entwickelnde Optikmodul erläutert. Aus diesen Anforderungen kann in einem ersten Schritt der grundsätzliche Aufbau des Optikmoduls aus mehreren möglichen Varianten ermittelt werden. Eine Optik, die zwischen ein gegriffenes Bauteil und ein Substrat eingeschoben wird, um im Anschluss die Unterseite des Bauteils und das Substrat zu vermessen, muss aus **strahlführenden** und **strahlformenden** optischen Elementen aufgebaut werden.

Unter strahlführenden Elementen sind optische Bauelemente zu verstehen, die keinen Einfluss auf den Abbildungsmaßstab des Objektivs haben. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass die Funktionsflächen, wie Spiegel oder Grenzflächen zwischen Glas und Glas bzw. Glas und Luft, eben sind und das verwendete Glas einen homogenen Brechungsindex besitzt. Strahlführende Elemente dienen nur zur Strahlumlenkung (Spiegel) oder -teilung (Strahlteiler oder halbdurchlässiger Spiegel). Im Folgenden wird die gesamte Anordnung der strahlführenden optischen Elemente **Umlenkoptik** genannt.

²⁸ Holografisch optische Elemente (HOE) sind in NAUMANN & SCHRÖDER (1992, S. 583 ff) beschrieben.

Als strahlformende Elemente werden in dieser Arbeit optische Bauelemente bezeichnet, die durch ihre Form und die entsprechenden Brechungsgesetze der geometrischen Optik einen Einfluss auf den Abbildungsmaßstab des Objektivs haben. Beispiele für strahlformende Elemente sind Hohlspiegel, Sammell- und Zerstreuungslinsen und Bauelemente mit variablem Brechungsindex. Die Gesamtkombination der strahlformenden Elemente wird als **Objektiv** bezeichnet. Aus der Kombination von Umlenkeoptik und Objektiv entsteht das **Optikmodul**.

Die beiden prinzipiellen Varianten zur Anordnung der Umlenkeoptik und des Objektivs bzw. der Objektive in dem Optikmodul sind in Abb. 4-1 dargestellt.

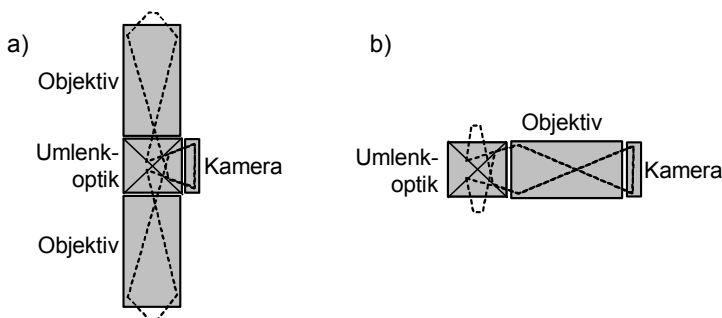


Abb. 4-1: Varianten zur Anordnung der Umlenkeoptik und der Objektive für den Aufbau einer Optik mit diametralem Strahlengang

In Abb. 4-1 a sind in der ersten Variante die Objektive vor der Umlenkeoptik angebracht (COOPER U. A. 1999). Durch den bei dieser Anordnung möglichen hohen Öffnungswinkel α der Objektive wird ein sehr hohes Auflösungsvermögen U erreicht. Mit Gleichung (3-11) ergibt sich der Zusammenhang zwischen U , A und λ . Dabei steht A für die numerische Apertur des eingesetzten Objektivs, die sich aus

$$(4-1) \quad A = n \cdot \sin \alpha$$

berechnet. Als n wird die Brechzahl des Mediums, das sich vor dem Objektiv befindet, bezeichnet. α ist der Öffnungswinkel des Objektivs, der sich aus

$$(4-2) \quad \tan \alpha = \frac{h}{s+g} = \frac{r_{EP}}{s-z}$$

berechnen lässt, wobei h die Durchstoßhöhe des Strahls an der ersten Linse des Objektivs, s die Schnittweite, g die Pfeilhöhe, r_{EP} den Durchmesser der

Einlassblende und z den Abstand der Einlassblende von der ersten Linse bezeichnet (Abb. 4-2). Um ein möglichst hohes Auflösungsvermögen zu erreichen, muss nach Formel (3-11) λ möglichst klein oder A möglichst groß sein. Da λ im sichtbaren Bereich liegen soll, kann das Auflösungsvermögen durch eine Verkleinerung nicht beliebig erhöht werden. Die Vergrößerung von A kann folglich in der Praxis nur durch eine Vergrößerung von $\sin \alpha$ erreicht werden, da die Brechzahl n bei Luft als Medium konstant ist. Der Öffnungswinkel α kann zum einen durch eine Vergrößerung der Durchstoßhöhe h vergrößert werden, was in der Praxis einer Vergrößerung des Einlasspupillenradius r_{EP} entspricht. Zum anderen kann der Wert $s + g$ verringert werden, wodurch der Arbeitsabstand verkürzt wird.

Die zweite Möglichkeit ist die Anordnung von Umlenkoptik und Objektiv wie in Abb. 4-1 b dargestellt. Durch die Platzierung der Umlenkoptik vor dem Objektiv ergibt sich eine horizontale Lage des Objektivs, bei der sich der Arbeitsabstand des Objektivs vergrößert und damit bei gleichem Objektivdurchmesser wie bei der Variante a eine geringere optische Auflösung erreichbar ist.

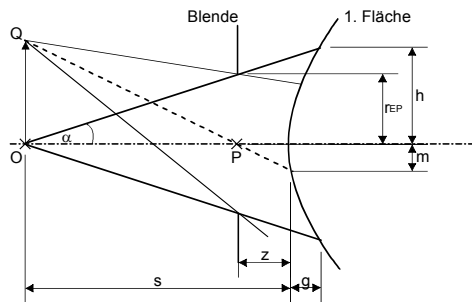


Abb. 4-2: Geometrie auf der Objektseite eines Objektivs nach BERGMANN & SCHÄFER (1993, S. 103)

In Abschnitt 2.9 wurde gefordert, dass die Optik neben der guten optischen Qualität insbesondere als kompaktes eigenständiges Modul konzipiert sein soll, das auch in unterschiedliche, bereits bestehende Anlagen integriert werden kann. Daraus ergibt sich, dass ein möglichst geringer Abstand zwischen den beiden Objektfeldern des Optikmoduls erreicht werden soll, da insbesondere bestehende Anlagen nur über geringe Verfahrenswege in Z-Richtung verfügen.

Aus diesem Zielkonflikt - hohe optischer Auflösung (Variante Abb. 4-1 a) gegen geringe Baugröße (Variante Abb. 4-1 b) - wird die zweite Variante weiter entwickelt, da damit die Forderung nach einer kompakten Bauform ermöglicht wird und ein flexibel einsetzbares Optikmodul entsteht.

4.2 Grobkonzeption der Umlenkoptik

Im zweiten Schritt zur Auslegung des Optikmoduls wird eine den Anforderungen entsprechende Umlenkoptik ausgewählt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Konzeption der Umlenkoptik zunächst unabhängig von der Auslegung des Objektivs erfolgen kann. Diese Voraussetzung kann für die erste Auswahl der Umlenkoptiken aufrecht erhalten werden. Im Verlauf der Untersuchung wird sich zeigen, dass die Art der Umlenkoptik Einflüsse auf das zu verwendende Objektiv hat (vgl. Abschnitt 5).

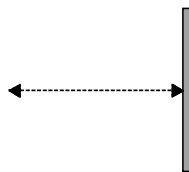
In Abschnitt 4.2 werden unterschiedliche Varianten der Umlenkoptik dargestellt, mit denen eine Spezialoptik realisiert werden kann, die zwei gegenüberliegende Objektfelder auf ein senkrecht dazu liegendes Bildfeld abbildet. In Abschnitt 4.3 werden die Entscheidungskriterien, die für die Auswahl der Optik in Abschnitt 4.4 als Grundlage dienen, erläutert.

4.2.1 Optische Bauelemente

Für die Strahlführung können unterschiedliche optische Bauelemente zum Einsatz kommen, indem mehrere **Grundelemente** kombiniert werden. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Grundelemente dargestellt.

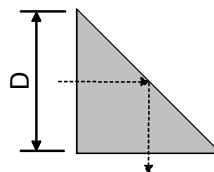
◆ Planspiegel

Ein planarer Spiegel ist eine ebene, reflektierende Fläche. Im Allgemeinen besteht ein Planspiegel aus einer oberflächenverspiegelten polierten Glasplatte. Die Spiegelschicht kann aus Metall oder aus nichtleitenden Mehrfachschichten bestehen, mit denen eine hohe Reflexion durch Interferenz erreicht werden kann. Der Abbildungsmaßstab beträgt $\beta'=1$ (HAFERKORN 1994, S. 453).



◆ Halbwürfel mit einer Reflexion

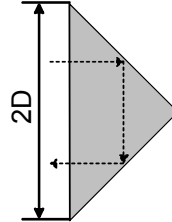
Der Halbwürfel mit einer Reflexion entspricht einem Planspiegel, wobei das Prisma aus einem Glas-element besteht. Das Licht dringt durch eine Kathetenfläche mit der Kantenlänge D ein und tritt nach der Totalreflexion an der Hypotenusenfläche durch die andere Kathetenfläche wieder aus dem Prisma aus.



Der Glasweg d des Lichts ist dabei genauso lang wie die Kantenlänge D der Kathete des Prismas.

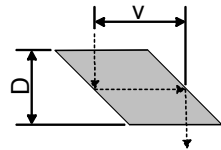
◆ Halbwürfel mit zwei Reflexionen

Beim Halbwürfel mit zwei Reflexionen werden die beiden Katheten als Spiegelflächen verwendet. Das Licht tritt durch die eine Hälfte der Hypotenuse in den Glaskörper ein, wird durch die beiden Spiegelflächen um 180° abgelenkt und verlässt das Prisma durch die zweite Hälfte der Hypotenuse. Der Glasweg d beträgt dabei die Länge $2D$ der Hypotenuse des Prismas.



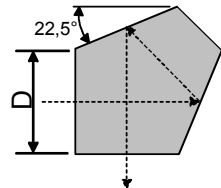
◆ Rhomboidprisma

Das Rhomboidprisma besteht aus zwei einfach reflektierenden Halbwürfeln, sowie einem zwischen den beiden Würfeln befindlichen Verlängerungsstück. Durch das Rhomboidprisma wird ein Versatz der optischen Achse um den Betrag v erreicht. Der Glasweg d beträgt dabei $D+v$.



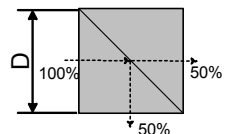
◆ Pentaprisma

Das Pentaprisma entspricht zwei Planspiegeln, die mit 45° gegeneinander geneigt angeordnet sind. Dabei wird eine Umlenkung des Lichtstrahls um 90° erreicht. Um an den um $22,5^\circ$ geneigten Flächen den Strahl reflektieren zu können, müssen diese Flächen verspiegelt sein. Eine kleine Drehung um eine zum Hauptschnitt senkrechte Achse hat dabei keine Wirkung auf den Ablenkungswinkel. Der Glasweg beträgt beim Pentaprisma $d = 2D + D\sqrt{2} = 3,41D$.



◆ Strahlteilerwürfel

Der Strahlteilerwürfel besteht aus zwei Halbwürfeln, die an ihrer Hypotenuse aufeinanderge kittet sind. In der Kittungsfuge der beiden Halbwürfel befindet sich eine teildurchlässige Schicht, deren Brechungsindex höher als der der Halbwürfel ist. An dieser



Grenzfläche kommt es zu einer gestörten inneren Totalreflexion (FTIR)²⁹. Dabei wird die Energie der ankommenden Welle teilweise von der Zwischenschicht aufgenommen und teilweise reflektiert. Nach Durchdringung der Zwischenschicht des nichtreflektierten Teils setzt dieser im zweiten Halbwürfel seinen Weg fort. Durch die Kombination verschiedener Beschichtungen in der Zwischenschicht kann der Anteil des reflektierten und der nichtreflektierten Lichts eingestellt werden. Durch einen Strahlteiler wird die Leuchtdichte des eintreffenden Strahls verändert, während der Bündelquerschnitt des eintreffenden Strahls unverändert bleibt. Der Glasweg beim Strahlteiler beträgt $d_I = d_T = D$.

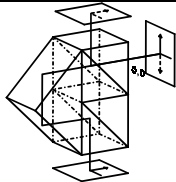
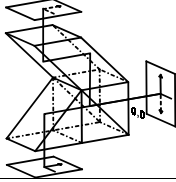
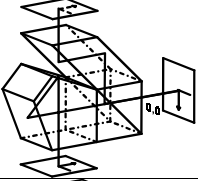
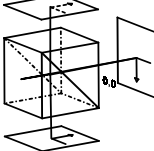
4.2.2 Optiken mit Strahlteiler

In der ersten Gruppe der Optiken wird der Strahlengang der Optik durch einen in der optischen Achse angebrachten **Strahlteiler** in zwei Teile aufgeteilt. Während 50 % des Strahlgangs um 90° abgelenkt werden, passiert die andere Hälfte des Lichts den Strahlteiler unbeeinflusst. Durch unterschiedliche Anordnung der nachgelagerten optischen Elemente, mit denen die beiden Teilstrahlen auf eine optische Achse ausgerichtet werden, ergeben sich die verschiedenen Optikvariationen.

In Tab. 4-1 werden unterschiedliche Aufbaumöglichkeiten für Optiken mit Strahlteiler aus den jeweiligen oben genannten Grundelementen abgeleitet. Die abgewinkelten Pfeile repräsentieren jeweils die Orientierung der Teilbilder. Werden die Pfeile aufeinander abgebildet, findet eine seitenrichtige Überlagerung der beiden Teilbilder statt, ansonsten sind die Teilbilder gespiegelt. Darüber hinaus ist in den Abbildungen die jeweils untere linke Ecke des CCD-Chips mit 0,0 gekennzeichnet, um bei eventuellen Bewegungen unterschiedliche Lagen des CCD-Chips zu markieren. Dieses Schema wird in den Tabellen Tab. 4-2 und Tab. 4-3 beibehalten.

Die Optik mit Würfel-Prisma nimmt eine Sonderstellung ein: Ein Planspiegel wird einem Strahlteilerwürfel direkt nachgeordnet. Dafür wird die Rückseite des

²⁹ FTIR = frustrated total inner reflection (HECHT 1998, S. 113f)

Bezeichnung	Verwendete optische Grundelemente	Optischer Aufbau und Strahlengang
Porro-Prisma	1 Strahlteilerwürfel 1 Halbwürfel mit zwei Reflexionen 1 Halbwürfel mit einer Reflexion	
Rhomboid-Prisma	1 Strahlteilerwürfel 1 Rhomboid-Prisma 1 Halbwürfel mit einer Reflexion	
Penta-Prisma	1 Strahlteilerwürfel 1 Penta-Prisma 1 Rhomboid-Prisma	
Würfel-Prisma	1 Strahlteilerwürfel 1 Planspiegel	

Tab. 4-1: Aufbau der Optiken mit Strahlteiler

Strahlteilerwürfels mit einer reflektierenden Schicht versehen, so dass der Teil des Strahlgangs, der die halbdurchlässige Schicht passiert, direkt reflektiert wird und wieder auf die halbdurchlässige Schicht trifft. Dabei wird wiederum die Hälfte des Strahls um 90° abgelenkt, während die andere Hälfte die Grenzschicht passiert und somit in die ursprüngliche Richtung reflektiert wird.

4.2.3 Optiken mit bewegten optischen Elementen

Im Gegensatz zu den Optiken mit Strahlteiler wird bei den Optiken mit **bewegten optischen Elementen** ein optisches Bauelement bzw. die gesamte Optik bewegt. Durch die Umschaltung ist es nicht möglich, die beiden Teilbilder

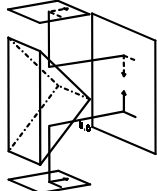
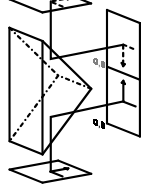
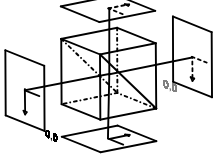
simultan zu betrachten. Einen Überblick über verschiedene Varianten für Optiken mit bewegten optischen Elementen zeigt die Tabelle Tab. 4-2. Dabei ist insbesondere bei der rotatorisch bewegten Gesamtoptik die unterschiedliche Ausrichtung des CCD-Chips bei den beiden Bildaufnahmen zu beachten.

Bezeichnung	Verwendete optische Grundelemente	Optischer Aufbau und Strahlengang
Rotatorisch bewegter Spiegel	1 Planspiegel	
Horizontal translatorisch bewegter Spiegel	2 Planspiegel in 90° Anordnung	
Vertikal translatorisch bewegter Spiegel	2 Planspiegel in 90° Anordnung oder 1 Halbwürfel mit verspiegelten Katheten	
Rotatorisch bewegte Gesamtoptik	1 Planspiegel	

Tab. 4-2: Aufbau der Optiken mit bewegten optischen Bauelementen

4.2.4 Optiken mit parallel aufgenommenen Bildern

Bei Optiken dieses Typs werden **zwei Bilder gleichzeitig** aufgenommen, wobei die Bildaufnahme in zwei getrennten Bildern erfolgt. Damit können die Bilder zwar nicht direkt übereinander, jedoch beide gleichzeitig dargestellt werden. Sollen die Bilder übereinander gelegt werden, ist dies über den Einsatz eines elektronischen Mischpultes möglich, das die Videosignale kombiniert. Dabei ist auch eine eventuell nötige Spiegelung eines Teilbildes auf elektronischem Weg möglich. Die Tab. 4-3 gibt eine Übersicht über die Optiken, die beide Teilbilder parallel aufnehmen.

Bezeichnung	Verwendete optische Grundelemente	Optischer Aufbau und Strahlengang
Split-Chip 2 Bilder auf einem CCD-Chip	2 Planspiegel in 90° Anordnung oder 1 Halbwürfel mit verspiegelten Katheten	
Paralleloptik	2 Planspiegel in 90° Anordnung oder 1 Halbwürfel mit verspiegelten Katheten	
Koaxialoptik	1 doppelseitig wirkender Planspiegel oder ein aus zwei Halbwürfeln mit verspiegelten Katheten zusammengesetzter Würfel	

Tab. 4-3: Aufbau der Optiken mit parallel aufgenommenen Bildern

4.3 Entscheidungskriterien

Für die in Abschnitt 4.2 dargestellten Umlenksystemen muss ein Bewertungssystem gefunden werden, mit dem die beste Optik ermittelt werden kann. Die Entscheidungskriterien dafür erfassen alle relevanten Parameter der unterschiedlichen Optikkonzepte, so dass ein Vergleich dieser Konzepte ermöglicht wird. Die Kriterien können in vier grobe Kategorien eingeteilt werden.

Für die Bewertung der erreichbaren Messgenauigkeit stellen die Empfindlichkeit der Optiken gegenüber **Verkipnungen** (Abschnitt 4.3.1), sowie die **optischen Einflüsse** der unterschiedlichen Optikkonfigurationen (Abschnitt 4.3.2) die Hauptkriterien dar. Daneben sind **konstruktive Einflüsse** (Abschnitt 4.3.3), sowie **sonstige Einflüsse**, die in Abschnitt 4.3.4 erläutert werden, von Bedeutung.

Die Ergebnisse der Berechnung der quantitativ erfassbaren Kennwerte der unterschiedlichen Optiken sind tabellarisch im Anhang auf S. 156 ff zusammengefasst. Beispielhaft wird im Folgenden das Untersuchungsergebnis der Penta-Prisma-Optik für den jeweiligen Einflussfaktor in kursiver Schrift dargestellt. Um die einzelnen Optiken vergleichen zu können, wird ein prozentualer Vergleichswert ermittelt. Für diese Bewertung wird bei einer vollen Erfüllung des Idealwerts 100 % angegeben, während das schlechteste Ergebnis erhält 20 %. Alle dazwischen liegenden Ergebnisse sind linear interpoliert bewertet.

4.3.1 Empfindlichkeit der Optik auf Lagetoleranzen

Für die Messgenauigkeit der Optik sind insbesondere die Fehlereinflüsse, die während des Einsatzes der Optik wirksam werden, wichtig. Systematische Fehler wie z.B. Fertigungsungenauigkeiten der Optik oder nicht optimal ausgerichtete Führungen können durch Justage optischer Elemente bzw. durch eine Kalibrierung der Optik ausgeglichen werden. Dagegen haben stochastische Fehler wie beispielsweise Ungenauigkeiten, die beim Einschwenken oder Einschieben der Optik in die Fügeachse entstehen, einen unmittelbaren Einfluss auf die erreichbare Messgenauigkeit. Aus diesem Grund sollen hier einerseits die Größenordnung der Fehler, die beim Verfahren einer Optik entstehen können, abgeschätzt werden, andererseits sollen die unterschiedlichen optischen Konfigurationen auf ihre Empfindlichkeit gegenüber den Ungenauigkeiten untersucht werden.

4.3.1.1 Abschätzung der Lagetoleranzen beim Verfahren

Für eine Abschätzung der Ungenauigkeiten beim Verfahren der Optik kann zwischen dem rotatorischen und dem translatorischen Verfahren der Optik unterschieden werden. Beim rotatorischen Verfahren wird die Optik um eine Achse geschwenkt und somit zwischen Bauteil und Substrat eingebracht (Abb. 4-3 a). Beim translatorischen Verfahren wird die Optik geradlinig in die Fügeachse eingeschoben (Abb. 4-3 b). Da einerseits der Platzbedarf beim rotatorischen Einschwenken der Optik sehr groß ist, weil eine große Fläche von der Optik überstrichen werden würde, und andererseits aufgrund des längeren Hebelarms größere Ungenauigkeiten entstehen (vgl. auch Abschnitt 3.2.1.2), wird im Folgenden nur das translatorische Einschchieben der Optik weiter behandelt.

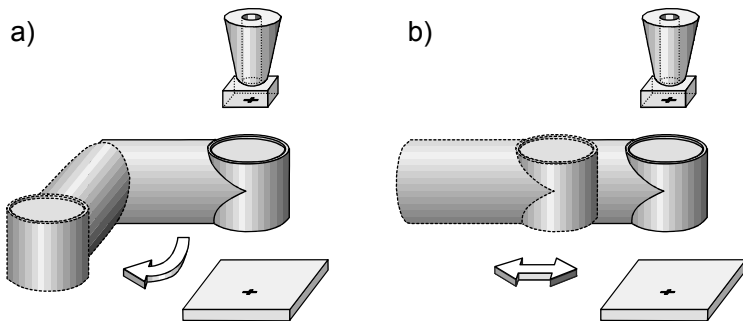


Abb. 4-3: Einschwenken der Optik in die Fügeachse:
a) rotatorisch b) translatorisch

Beim Einschieben der Optik in die Fügeachse wird eine Linearführung als Führungselement benötigt. In der Endposition sind dabei insbesondere die stochastischen Fehler in der Winkellage der Optik von Interesse, da die systematischen Fehleranteile durch entsprechende Kalibriermaßnahmen kompensiert werden können.

Um eine Abschätzung der Fehlergröße zu treffen, kann aus den herstellerüblichen Angaben für Präzisionsführungen der stochastische Winkelfehler für die Winkel φ_x und φ_y ermittelt werden. Die üblichen Angaben für die Genauigkeit einer Führung sind Laufparallelität sowie das Radialspiel. Die Laufparallelität e_P ist ein Maß für die Ebenheit einer Führung. Sie ist mit der Einheit $\mu\text{m}/100\text{ mm}$ Verfahrensweg angegeben. Das Radialspiel e_R entspricht dem Spiel des Führungsschlittens auf der Führung sowohl seitlich als auch vertikal. Darüber hinaus sind noch die Länge l_F und die Breite b_F der Schlittens bekannt.

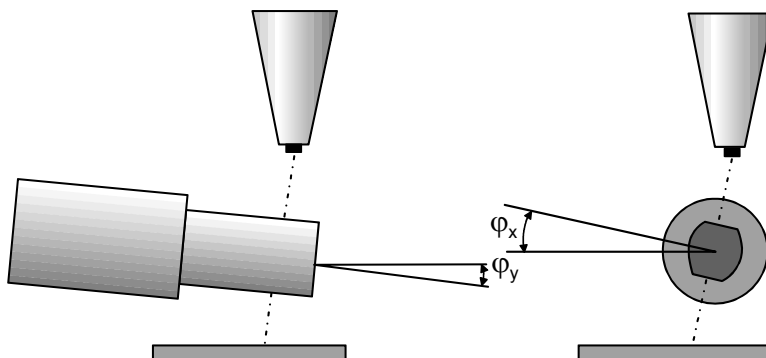


Abb. 4-4: Stochastische Winkelfehler beim Einschieben der Optik zwischen Bauteil und Substrat

Im ungünstigsten Fall tritt die Ungenauigkeit der Laufparallelität über die Länge der Führung auf, woraus sich eine Verkippung des Führungsschlittens ergibt. Zusätzlich kann sich noch eine Verkippung durch das Radialspiel einstellen, so dass sich der jeweils maximale stochastische Winkelfehler aus

$$(4-3) \quad \varphi_{x \max} = \arctan \left(\frac{e_p + e_R}{l_F} \right),$$

sowie

$$(4-4) \quad \varphi_{y \max} = \arctan \left(\frac{e_p + e_R}{b_F} \right)$$

ergibt. Werden reale Werte, beispielsweise aus THK (2000), eingesetzt, so ergeben sich für die angegebenen Präzisionsführungen die in Tab. 4-4 dargestellten Werte.

Präzisions- klasse	Laufpa- rallelität e_p [mm]	Radial spiel e_R [mm]	Führungs- länge l_F [mm]	Schienen- breite b_F [mm]	$\varphi_{x \max}$ [°]	$\varphi_{y \max}$ [°]
Normale Genauigkeit	0,007	0,006	27	18	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$12,6 \cdot 10^{-6}$
Hohe Genauigkeit	0,003	0,006	27	18	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$
Höchste Genauigkeit	0,002	0,006	27	18	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$

Tab. 4-4: Berechnung von $\varphi_{x \max}$ und $\varphi_{y \max}$ an Hand von Daten aus THK (2000)

Die Ergebnisse für die maximalen stochastischen Verkippwinkel $\varphi_{x\ max}$ und $\varphi_{y\ max}$ sind so gering, dass bei einer Verwendung von Präzisionsachsen durch die Verkipfung der Führung keine Einflüsse auf die Messgenauigkeit zu erwarten sind.

4.3.1.2 Modellierung der Optiken

Um eine quantitative Bewertung der einzelnen optischen Varianten bezüglich ihres Verhaltens gegenüber rotatorischen und translatorischen Ungenauigkeiten beim Einschwenken durchzuführen, wurden die in Abschnitt 4.2 dargestellten Optikvarianten in einem 3D-CAD-System inklusive ihres Strahlengangs modelliert. Die Optiken wurden dafür in vergleichbaren dimensionslosen Größen konstruiert. Die Voraussetzungen für die Modellierung der Konzepte sind:

- ◆ Die Kantenlänge eines optischen Elements ist eine normierte Einheit, d.h. jedes optische Element besitzt eine normierte Kantenlänge (Abb. 4-5).
- ◆ Im Abstand von einer Einheit ist die Bildebene der Optik angebracht.
- ◆ Der Mindestabstand einer Objektebene vom Ende der Umlenkoptik beträgt $\frac{1}{4}$ Einheit. Bei einer Optik mit einem asymmetrischen Strahlengang (z.B. Penta-Prisma) wird der jeweils kürzere der beiden Strahlgänge verlängert, da das Objektiv über einen festen Arbeitsabstand verfügt. Dadurch entfernt sich die Objektebene des kürzeren Strahlgangs von der Optik und der Abstand zwischen den beiden zu betrachtenden Objekten vergrößert sich.

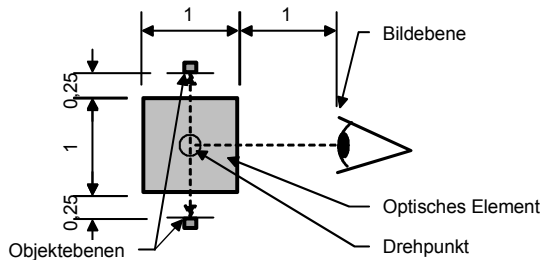


Abb. 4-5: Grundlagen zur geometrischen Untersuchung der Optiken

- ◆ Die Bildebene und die Umlenkoptik sind zueinander ortsfest in einem Koordinatensystem (Optikkordinatensystem) angebracht, während die Objektebenen in einem eigenen Koordinatensystem (Objektkordinatensystem) modelliert sind. Der Nullpunkt der beiden Koordinatensysteme befindet sich

im Schnittpunkt der horizontalen optischen Hauptachse und der vertikalen optischen Hauptachse.

Die auf diesen Grundlagen modellierten Optiken werden auf folgende Kriterien hin untersucht:

◆ **Kleine Einschwenkfehler translatorisch**

Als translatorischer Fehler wird der Abstand der beiden sich ergebenden Bildpunkte auf der Bildebene bezeichnet, der dann auftritt, wenn die Optik aufgrund stochastischer Fehler nicht die translatorische Endposition beim Einschieben erreicht.

Bei der Penta-Prisma-Optik treten keine Messfehler aufgrund translatorischer Einschwenkfehler auf. Die Bewertung beträgt somit 100 %.

◆ **Kleine Einschwenkfehler rotatorisch**

Im Gegensatz zu den translatorischen Fehlern entstehen die rotatorischen Fehler aufgrund von stochastisch auftretenden Winkelfehlern beim Einschieben der Optik in die Fügeachse.

Als Vergleichswert gegenüber den übrigen Optiken wird der auftretende Messfehler bei einer Verkippung von $\varphi_x=0,1^\circ$ herangezogen der 0,395 beträgt, woraus sich eine Bewertung der Optik zu 20 % ergibt.

Die Untersuchungen ergeben, dass translatorische Endlagenfehler keinerlei Einfluss auf die Genauigkeit haben. Die Objekte werden nur auf den Bildflächen verschoben, wobei sich die Verschiebungen gegenseitig jeweils aufheben.

Bei der Untersuchung der Winkelfehler ergeben sich zum Teil erhebliche Unterschiede. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-5 dargestellt. Zur Charakterisierung der Winkelfehler sind jeweils aus der Simulation Wertetabellen erstellt worden, aus denen sich Kennfelder für die Abweichung der beiden Bilder zueinander auf der Bildebene erstellen lassen. Als Beispiel ist in Abb. 4-6 das Kennfeld für die Verkippung des Penta-Prismas dargestellt, wobei die Winkel φ_x und φ_y zwischen $-0,1^\circ$ und $0,1^\circ$ in Schritten von $0,02^\circ$ variieren.

Bezeichnung	Bilddarstellung	Winkelfehler		
		$\varphi_x = 0,1^\circ$	$\varphi_y = 0,1^\circ$	$\varphi_z = 0,1^\circ$
Porro-Prisma	Horizontal gespiegelt Bilder aufeinander Bilder gleichzeitig	0,262	0,262	0
Rhomboid-Prisma	Horizontal gespiegelt Bilder aufeinander Bilder gleichzeitig	0,262	0,262	0
Penta-Prisma	Seitenrichtig Bilder aufeinander Bilder gleichzeitig	0,395	0,395	0
Würfel-Prisma	Seitenrichtig Bilder aufeinander Bilder gleichzeitig	0,21	0,21	0
Rotatorisch bewegter Spiegel	Horizontal gespiegelt Bilder aufeinander Bilder nacheinander	0,104	0,104	0
Horizontal translatorisch bewegter Spiegel	Horizontal gespiegelt Bilder aufeinander Bilder nacheinander	0,104	0,104	0
Vertikal translatorisch bewegter Spiegel	Horizontal gespiegelt Bilder aufeinander Bilder nacheinander	0,104	0,104	0
Rotatorisch bewegte Gesamtoptik	Vertikal gespiegelt Bilder aufeinander Bilder nacheinander	0,104	0,104	0
Split-Chip	Horizontal gespiegelt Bilder übereinander Bilder gleichzeitig	0,104	0,104	0
Paralleloptik	Horizontal gespiegelt Bilder parallel Bilder gleichzeitig	0,157	0,157	0
Koaxialoptik	Vertikal gespiegelt Bilder parallel Bilder gleichzeitig	0,104	0,104	0

Tab. 4-5: Ergebnisse der Modellierung der Optiken

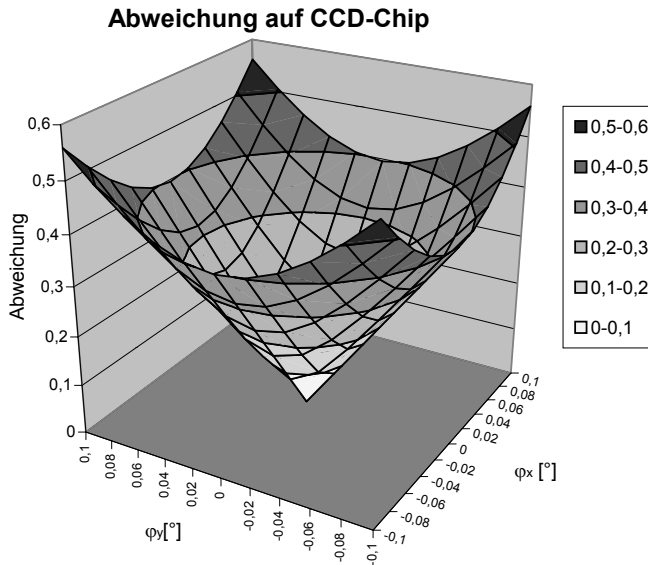


Abb. 4-6: Kennfeld für die Abweichung der beiden Bilder auf dem CCD-Chip bei der Verwendung des Penta-Prisma-Konzepts

4.3.2 Einflüsse durch optische Bauelemente

Die optischen strahlführenden Bauelemente haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Bildqualität. Die Qualität der Abbildung wird geringer, wenn die Strahlen durch Glaselemente durchtreten, da das Medium Lichtstrahlen absorbiert. Um eine quantitative Bewertung durchführen zu können, sind die einzelnen Einflussfaktoren auf die optische Qualität so weit wie möglich identifiziert und bewertet worden.

◆ Geringe optische Weglänge

Die optische Weglänge beschreibt die Länge des Strahlengangs von der Bildfläche bis zur Objektebene. Der Einfluss der optischen Weglänge auf die optische Qualität geht aus den Gleichungen (3-11), (4-1) und (4-2) hervor. Dabei ist das optische Auflösungsvermögen U indirekt proportional der optischen Weglänge vor dem Objektiv.

Die optische Weglänge der Penta-Prisma-Optik beträgt 5,16 und erreicht somit eine Bewertung von 21,4 %.

◆ Symmetrischer Strahlengang

Durch die Verwendung eines Objektivs für beide Objektebenen muss der Arbeitsabstand des Objektivs bzw. die optische Weglänge für beide Objektebenen gleich sein. Ist ein Strahlengang durch eine größere Anzahl an Spiegelungen länger als der zweite, muss die zweite Objektebene von der Optik entfernt werden, damit die Brennweite des Objektivs eingehalten werden kann. In diesem Fall treten außerdem noch variierende optische Weglängen innerhalb von Glaselementen auf, woraus sich eine unterschiedliche Bildqualität ergibt. Durch zusätzliches Einfügen von Glaselementen in den optischen Weg kann ein Ausgleich der unsymmetrischen Strahlgänge erfolgen, allerdings auf Kosten der optischen Weglänge im Glas.

Die Länge der beiden Strahlengänge im Glas beträgt 3 bzw. 4,41. Daraus ergibt sich ein Verhältnis von 0,66 und eine Bewertung von 82,4 %.

◆ Geringer Objektebenenabstand

Der Objektebenenabstand bezeichnet den Abstand der beiden Objektebenen voneinander (Abb. 4-5). Der minimale Objektabstand beträgt mit den unter Abschnitt 4.3.1.2 angegebenen Voraussetzungen für die Modellierung der Optiken 1,5 Einheiten. Je nach Aufbau der Optik und den daraus folgenden Strahlverläufen verändert sich dieser Abstand. Ein möglichst geringer Objektabstand hat positive Einflüsse einerseits auf die Genauigkeit beim Absetzen des Bauteils, da eine kürzere und somit genauere Führung der Z-Achse eingesetzt werden kann. Andererseits wird durch eine Verringerung des Objektabstands die Taktzeit positiv beeinflusst.

Der Objektabstand beträgt 3,16, was einer Bewertung von 54,0 % entspricht.

◆ Geringe optische Verluste durch Glas

Innerhalb von Medien findet eine Absorption von Lichtstrahlen statt. Dabei wird die elektromagnetische Strahlung innerhalb des Materials absorbiert. Die Stärke der Absorption, das Transmissionsvermögen τ_{Mat} , ist abhängig von der Materialart, der Weglänge im Glas und von der Wellenlänge des Lichts. Angaben zum Reintransmissionsvermögen τ_{Ref} müssen damit immer mit der Wellenlänge und der zugehörigen Materialdicke d_{Ref} versehen sein. Die Umrechnung auf eine andere Materialstärke d_{Mat} erfolgt nach HOFFMANN (1997, S. 165):

$$(4-5) \quad \log(\tau_{Mat}) = \frac{d_{Mat}}{d_{Ref}} \log(\tau_{Ref}) \quad \text{oder} \quad \tau_{Mat} = (\tau_{Ref})^{\frac{d_{Mat}}{d_{Ref}}}$$

Unter optischen Grenzflächen werden alle Flächen verstanden, an denen der optische Strahlengang von einem in ein zweites Medium wechselt (Luft/Glas, Glas/Glas, Glas/Luft) oder reflektiert wird (Spiegelfläche).

Falls eine elektromagnetische Welle auf eine Grenzfläche zu einem transparenten Medium trifft, so wird ein Teil der Strahlung reflektiert, während der Rest in das Medium eindringt. Während des Durchgangs durch das Medium wird ein weiterer Teil der Strahlungsleistung absorbiert³⁰. Beim Übergang der Welle aus dem Medium zurück an die Umgebung findet wieder eine Reflexion und damit eine Verringerung der Strahlungsleistung statt. Die Stärke der Reflexion wird vom spektralen Fresnelschen Reflexionsgrad beschrieben, der vom Brechzahlunterschied der beiden Materialien n' , n an der Grenzfläche, dem Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle und der dem Polarisationszustand der Welle abhängig ist. Genaue Angaben zur Berechnung des Fresnelschen Reflexionsgrades sind NAUMANN & SCHRÖDER (1992, S. 31 ff), BERGMANN & SCHÄFER (1987, S. 246 ff) zu entnehmen. Zur Vereinfachung kann bei senkrechtem oder nahezu senkrechtem Auftreffen der elektromagnetischen Welle auf eine Ebene der Reflexionsgrad $\bar{\rho}$ mit

$$(4-6) \quad \bar{\rho} = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2$$

berechnet werden. Bei einem Brechungsindex der Luft von $n_L = 1$ und dem eines niedrig brechenden Glases von $n_G = 1,5$ ergeben sich pro Übergang (Glas/Luft, Luft/Glas) Reflexionsverluste von 4 %. Diese Reflexionsverluste können durch zusätzliches Aufbringen von reflexmindernden Schichten³¹ auf unter 1 % gesenkt werden. Daraus resultiert ein Transmissionsgrad τ_{GL} für die Grenzfläche Glas/Luft bzw. Luft/Glas von $\tau_{GL} = 99$ %.

Auch bei der Reflexion von elektromagnetischen Wellen an Spiegeln treten Verluste auf. Die Werte sind hier vom Einfallswinkel, der Wellenlänge und

³⁰ Siehe auch Gleichung (4-5), S. 90

³¹ Weiterführende Erläuterungen zu diesem Themengebiet sind der Spezialliteratur wie NAUMANN & SCHRÖDER (1992), HERRMANN (1986), HAFERKORN (1994) und BERGMANN & SCHÄFER (1987) zu entnehmen

dem Spiegelmaterial sowie der Güte der Spiegeloberfläche abhängig. Im sichtbaren Bereich ($\lambda = 380 \text{ nm} - 780 \text{ nm}$) schwankt der Reflexionsgrad zum Teil beträchtlich (siehe auch Abb. 4-7). Wird Silber als Spiegelmetall verwendet und eine mittlere Wellenlänge von $\lambda = 550 \text{ nm}$ angenommen, so ergibt sich ein Reflexionsgrad ρ_{Sp} von 98,3 %.

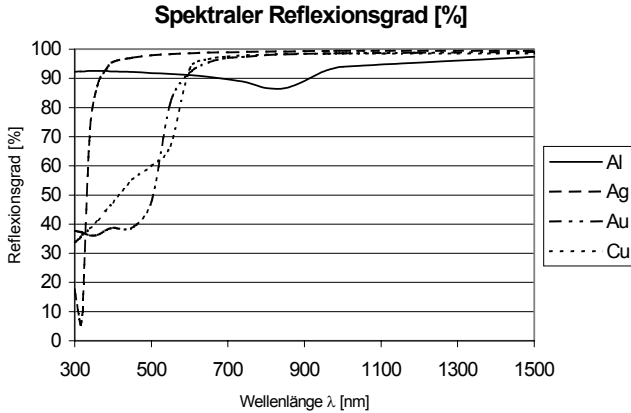


Abb. 4-7: Spektraler Reflexionsgrad frisch aufgedampfter Metalle bei senkrechtem Strahleinfall (nach NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 67)

Beim Übergang zwischen zwei Glaskomponenten wird der Zwischenraum mit einem optischen Kitt aufgefüllt, der die beiden Komponenten miteinander verbindet und eine homogene Fortsetzung des Glaskörpers ermöglichen soll. Üblicher Glaskitt hat einen Brechungsindex von $n_{Gk} = 1,53$ bis $1,55$ (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, 80 f). Mit der Gleichung (4-6) ergeben sich damit Reflexionsverluste beim Übergang vom Glas in die Kittschicht und wieder zurück, die zwischen 0,02 % und 0,06 % liegen. Somit besteht ein Transmissionsgrad $\tau_{GG} = 99,98\%$ bis $99,94\%$.

Der gesamte Transmissionsgrad τ_{Ges} der Kombination der optischen Bauelemente berechnet sich durch eine Multiplikation der jeweiligen Transmissionsgrade der Grenzflächen τ_{GL} und τ_{GG} bzw. der optischen Materialien τ_{Mat} , sowie der Reflexionsgrade der Spiegelungen ρ_{Sp} . Für einen Strahlteiler gilt dabei ein Reflexions- bzw. Transmissionsgrad von $\rho_{ST} = 0,5$. Damit ergibt sich τ_{Ges} zu

$$(4-7) \quad \tau_{Ges} = \prod \tau_{GL} * \prod \tau_{GG} * \prod \rho_{Sp} * \prod \rho_{ST} * \tau_{Mat} .$$

Der längere Weg der beiden Strahlgänge innerhalb des Glaskörpers beträgt 4,41. Als Referenzbauelemente werden Glaskörper mit einer Kantenlänge von $D=10\text{ mm}$ herangezogen, woraus sich eine Materialstärke von $d_{\text{Mat}}=44,1\text{ mm}$ ergibt. Als Material für die Optik wird handelsübliches BK 7 Glas mit $d_{\text{Ref}}=5\text{ mm}$ und $\tau_{\text{Ref}}=0,999$, woraus sich das Transmissionsvermögen zu $\tau_{\text{Mat}}=99,1\%$ berechnen lässt. Die Anzahl der Grenzflächen Glas-Luft bei der Penta-Prisma-Optik pro Strahlgang beträgt zwei, die der Grenzflächen Glas-Glas eins. Darüber liegen je zwei Spiegelflächen und der Strahlteiler in den Strahlgängen. Mit τ_{Mat} errechnet sich der Gesamttransmissionsgrad zu

$$\tau_{\text{Ges}}=0,99^2*0,9996^1*0,983^2*0,5^1*0,99^1=0,469.$$

Im Vergleich zu den anderen Optiken ergibt sich eine Bewertung von 44,1 %.

◆ Paraxialer Strahlengang

Bei der Abbildung eines Objektfelds mit einem Objektiv treten Abbildungsfehler auf. Typische Abbildungsfehler sind dabei Schärfefehler wie sphärische Aberration (Öffnungsfehler), Koma (Asymmetriefehler), Astigmatismus (Zweischalenfehler), sowie Lagefehler wie Bildfeldwölbung und Verzeichnung³². Die Abbildungsfehler nehmen mit steigendem Abstand zur optischen Achse eines Objektivs zu. Deshalb sollte der Strahlengang der Objektfelder möglichst auf der optischen Achse des Objektiv liegen.

Da die Forderung nach einem paraxialem Strahlengang erfüllt ist, beträgt die Bewertung 100 %.

◆ Hohe thermische Stabilität

Aufgrund von Wärmequellen kann es zu einer Erwärmung der optischen Komponenten kommen und die optischen Eigenschaften verändern. Der Begriff **thermische Stabilität** der Optik beschreibt die Unempfindlichkeit des Optikmoduls gegenüber thermischen Schwankungen. Berücksichtigt werden hierbei der symmetrische Aufbau der Optik sowie die Anzahl und das Volumen der Bauteile, die bei einer Erwärmung den Strahlengang der Optik beeinflussen.

Die thermische Stabilität der Optik ist eine qualitative Angabe, die auf Basis von Erfahrungswerten mit 90 % bewertet wird.

³² Erläuterungen zu Abbildungsfehlern siehe Abschnitt 5.2.1

4.3.3 Konstruktive Einflüsse

Neben den rein optischen Parametern, die zur Beurteilung der Optikvarianten herangezogen werden, spielen auch konstruktive Einflüsse bei der Bewertung der unterschiedlichen Optiken eine Rolle. Die nachfolgenden konstruktiven Parameter dienen zur späteren Bewertung der unterschiedlichen Varianten.

♦ Geringe Baugröße

Von der Baugröße der Optik hängt einerseits der Abstand der Objektfelder (siehe auch Abschnitt 4.3.2), andererseits der benötigte Freiraum für das Ein- und Ausfahren der Optik ab. Je kleiner eine Optik ist, desto besser kann sie in vorhandene Anlagen integriert werden. Dabei sinkt auch die Länge des Fahrweges, die zum Absetzen des Bauteils nötig ist, womit wiederum die Genauigkeit und die Taktzeit positiv beeinflusst werden. Darüber hinaus verringern sich bei einer kleineren Baugröße die bewegten Massen, womit höhere Verfahrensgeschwindigkeiten der Optik und somit kürzere Taktzeiten ermöglicht werden.

Die mögliche kompakte Bauform der Penta-Prisma-Optik (keine Antriebe etc. nötig) ergibt eine Bewertung von 80 %.

♦ Geringer Justageaufwand

Für den Einsatz in der Fertigung von mikrosystemtechnischen Komponenten sollte das gesamte Optikmodul möglichst einfach und robust aufgebaut sein. Besteht ein Modul aus einer Vielzahl fragiler Bauelemente, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass während des Dauerbetriebs eine Dejustierung oder ein Versagen auftritt.

Darüber hinaus sind in diesem Bewertungskriterium die möglichen Toleranzen während der Fertigung des Optikmoduls enthalten. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der Anzahl der optischen Bauelemente, die für die Umlenkung und Ausrichtung der beiden Strahlengänge eingesetzt werden müssen, zu einer Erhöhung der Fertigungsungenauigkeiten führt. Beispiele für mögliche Fertigungsfehler, die beim Zusammensetzen von optischen Bauelementen auftreten können, sind in Abb. 4-8 an Hand der Elemente der Porro-Prisma-Optik dargestellt. Die abgebildeten Fehler sind nur zweidimensionaler Natur. Werden diese Untersuchungen auf dreidimensionale Fehler erweitert, treten zusätzlich zu Verschiebungen der

beiden Bilder gegeneinander mehrdimensionale Verzeichnungen auf. Darüber hinaus kann jedes optische Bauelement nur mit einer endlichen Genauigkeit in sich selbst gefertigt werden, so dass eine größere Zahl an optischen Komponenten die Genauigkeit des gesamten optischen Systems senkt.

Die Umlenkoptik der Penta-Prisma-Optik besteht aus drei optischen Einzel-elementen (Strahlteiler, Penta-Prisma, Rhomboid-Prisma), die miteinander verkittet werden. Die bei der Fertigung auftretenden Toleranzen sind voraus-sichtlich relativ gering. Die Umlenkoptik besteht danach aus einem Teil, das während der Fertigung durch die auftretenden Belastungen nicht dejustiert werden kann. Die Penta-Prisma-Optik erreicht somit eine Bewertung von 70 %.


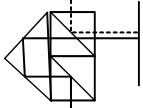
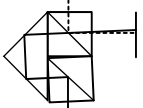
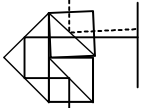

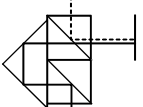
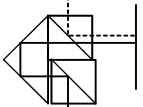
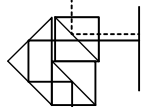
Bauteil	Halbwürfel mit zwei Reflektionen	Halbwürfel mit einer Reflektion	Strahlteiler
Fehler			
verdreht 			
ver-schoben 			

Abb. 4-8: Einflüsse von Fertigungsfehlern bei Porro-Prisma-Optik

◆ Variable Beleuchtungseinrichtungen

Ein entscheidender Faktor bei der automatischen Bildverarbeitung ist die Beleuchtung der Objektfelder. Je weniger ein Bild im digitalisierten Zustand nachbearbeitet werden muss, desto genauer sind Vermessungen, die am Bild durchgeführt werden. Mit jeder Filterfunktion, die nötig ist, um Informationen aus einem Bild zu extrahieren, werden im Bild vorhandene Informationen unterdrückt oder verändert. Durch eine von Anfang an optimierte Objektfeldbeleuchtung kann gezielt das Detail, das vermessen werden soll, hervorgehoben werden.

Aus diesem Grund sind unterschiedliche Beleuchtungstypen für die Objektfeldbeleuchtung entwickelt worden, wie z.B. das diffuse Auflicht, das

Durchlicht, das Ringlicht, das koaxiale Auflicht etc.³³. Die Ringlicht-Beleuchtung ist eine Auflichtbeleuchtung, die um ein Objektiv herum angeordnet ist. Sie wird insbesondere bei der Beleuchtung im Rahmen von Vermessungen eingesetzt, da dabei eine diagonale Projektion von Schatten vermieden wird (TIS 2000). Sollen mit Ätzverfahren strukturierte Halbleiterwerkstoffe vermessen werden, kann ein koaxiales Auflicht zum Einsatz kommen. Dabei wird über einen halbdurchlässigen Spiegel das Licht, das zur Beleuchtung des Objektfelds benötigt wird, in den Strahlengang eines Objektivs eingespiegelt. Daraus ergibt sich eine gerichtete gleichmäßige Ausleuchtung des Objektfelds. Halbleitermaterialien haben die Eigenschaft, dass sie über sehr gute Reflexionseigenschaften verfügen. Sind die zu detektierenden Strukturen in das Material isotrop geätzt, entstehen schräge Ebenen. Wenn das Licht durch die gerichtete senkrechte Beleuchtung auf das Material auftrifft, wird der Teil, der auf die nichtstrukturierte Ebene trifft, direkt in das Objektiv zurück reflektiert. Das Licht, das auf die schrägen Ebenen trifft, wird vom Objektiv weg reflektiert. Der damit entstehende starke Kontrast kann sehr gut für die Auswertung des Bildes herangezogen werden. Ein Nachteil dieser Beleuchtung ist, dass schon eine leichte Verkipfung des zu detektierenden Bauteils dazu führen kann, dass es nicht mehr erkannt wird, da das gerichtete Licht durch die Schrägstellung am Objektiv vorbei reflektiert wird und damit nicht zur Bildebene gelangt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine möglichst flexible Beleuchtung eine Grundvoraussetzung für wechselnde Aufgaben bei der digitalen Bildverarbeitung ist. Insbesondere die Integration von koaxialem Auflicht sowie von Ringlichtern, die, wenn möglich, für beide Objektfelder unterschiedlich anzupassen sind, sollte ohne Einschränkung bei den jeweiligen Optikmodulen möglich sein.

Die Penta-Prisma-Optik ermöglicht den Einbau von Ringlichtern, wobei aufgrund des eingeschränkten Einbauraums geringe Abstriche von der Maximalwertung auf 90 % gemacht werden. Bei der koaxialen Auflichtbeleuchtung müssen Einschränkungen hingenommen werden, da die Beleuchtungsstärke nicht getrennt für beide Objektebenen eingestellt werden kann, woraus sich eine Bewertung von 50 % ergibt.

³³ Genaue Beschreibungen der unterschiedlichen Beleuchtungsvarianten können der Fachliteratur, wie bspw. TIS (2000, S. 6-8), entnommen werden.

4.3.4 Sonstige Einflüsse

Neben optischen und konstruktiven Einflüssen spielen auch wirtschaftliche Überlegungen und Kriterien, die insbesondere die Taktzeit beeinflussen, bei der Bewertung der unterschiedlichen Konzepte eine Rolle.

◆ Niedrige Kosten

Obwohl eine Abschätzung der jeweiligen Kosten für ein Optiksystem schwer zu treffen ist, insbesondere wenn das System in Serie gefertigt werden soll, empfiehlt es sich doch eine derartige Abschätzung durchzuführen. Diese wird überwiegend auf der Grundlage des Konstruktions- und erwarteten Fertigungsaufwands für die Systeme erstellt, so dass die Ergebnisse nur als qualitativ angesehen werden können.

Aufgrund des hohen Aufwands bei der Fertigung, um Ungenauigkeiten beim Verkitten der einzelnen Bauelemente zu minimieren, sind hohe Fertigungskosten zu erwarten. Die Bewertung liegt deshalb bei 50 %.

◆ Geringe bewegte Masse

Durch ein hohes Gewicht der Optik wird die Taktzeit negativ beeinflusst. Zum einen muss dann eine große Masse beim Einschieben in die Fügeachse beschleunigt werden, zum anderen verringert eine große Masse des Gesamtmoduls das Beschleunigungsvermögen des Handhabungssystems, wenn das Modul am System mitgeführt wird. Darüber hinaus ist bei einem großen Gewicht des optischen Moduls auch die Anforderung an die Lagerung zur Führung der Optik höher, so dass auch in diesem Bereich Einflüsse wie Schwingungen und Erschütterungen durch eine Vergrößerung der Optikmasse zu erwarten sind.

Der Einfluss den die erwartete Masse des Prisma-Optikmoduls auf die Taktzeit hat, wird mit 80 % bewertet.

◆ Geringe Bewegungszeit zwischen oberer und unterer Bildaufnahme

Wenn zwischen den Bildaufnahmen der beiden Objektfelder entweder optische Elemente oder Blenden bewegt werden müssen, erhöht sich die Prozesszeit. Darüber hinaus hat auch der Weg, den ein optisches Element bewegt werden muss, um zwischen den beiden Bildern umzuschalten, einen Einfluss auf die Bewegungszeit.

Um getrennte Bilder der beiden Bildebenen aufzunehmen, müssen zwar keine optischen Bauelemente bewegt werden. Allerdings müssen in diesem Fall Blenden geöffnet bzw. geschlossen werden, so dass sich hier eine Bewertung von 50 % ergibt.

◆ **Geringer Aufwand zur Bildvorbereitung**

Ist vor der Bildverarbeitung ein zusätzlicher Berechnungsschritt notwendig, um Informationen aus den beiden Bildern der Objektebenen zu erhalten, erhöht sich ebenfalls die benötigte Prozesszeit.

Für die Bildvorbereitung ist kein zusätzlicher Aufwand notwendig, was eine Bewertung von 100 % zur Folge hat.

◆ **Möglichkeit der Bildüberlagerung**

Durch die Art und Anordnung der optischen Elemente können die Objekte seitenrichtig oder spiegelverkehrt zueinander auf der Bildebene dargestellt werden. Bei der Spiegelung kann noch unterschieden werden, ob sie um die horizontale oder die vertikale Achse erfolgt. Bei einer lagerichtigen Darstellung ist eine manuelle Ausrichtung des Bauteils zum Substrat möglich. Bei einer gespiegelten Abbildung kann durch zusätzliche elektronische Einrichtungen ein Teilbild gespiegelt werden, womit auch eine Bildüberlagerung ermöglicht werden würde.

Die Abbildung der beiden Objektfelder erfolgt lagerichtig aufeinander. Die Bewertung beträgt wiederum 100 %.

◆ **Simultane Bildaufnahme**

Neben der seitenrichtigen Abbildung ist insbesondere eine simultane Aufnahme der beiden Objektebenen notwendig, um eine manuelle Ausrichtung von Bauteil zu Substrat zu ermöglichen. Bei bewegten optischen Bauelementen ist nur eine serielle Bildaufnahme möglich, so dass eine Bildverarbeitung zur Bildauswertung nötig ist.

Die Penta-Prisma-Optik ermöglicht eine simultane Bildauswertung und erhält deshalb auf dieses Bewertungskriterium 100 %.

4.4 Anwendung der Entscheidungskriterien auf die Varianten

Analog zu den unter den jeweiligen Entscheidungskriterien in Abschnitt 4.3 aufgeführten Bewertungen der Penta-Prisma-Optik wurden die anderen in Abschnitt 4.2 entwickelten Optikvarianten analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Anhang auf S. 156 ff dargestellt.

4.4.1 Nutzwertanalyse

Die Gewichtung der einzelnen Bewertungskriterien ist in Abb. 4-9 dargestellt.

Gesamt	Einfüsse Einschwenken		Einschwenkfehler translatorisch		Einschwenkfehler rotatorisch	
	10,0%	10,0%	5,0%	50,0%	5,0%	50,0%
	Einfüsse durch optische Bauelemente		Geringe optische Weglänge		Symmetrischer Strahlengang	
			6,0%	15,0%	6,0%	15,0%
	40,0%		Paraxialer Strahlengang		Geringer Objekt-ebenenabstand	
			10,0%	25,0%	6,0%	15,0%
	40,0%		Geringe Baugröße		geringer Justageaufwand	
			3,3%	33,0%	3,3%	33,0%
	100%		Beleuchtungsmögl. Ringlicht		Beleuchtungsmögl. koax. Auflicht	
			1,7%	17,0%	1,7%	17,0%
Gesamt	Konstruktive Einflüsse		Simultane Bildaufnahme		Geringe bewegte Masse	
	10,0%	10,0%	4,0%	10,0%	10,0%	25,0%
	40,0%		Bewegungszeit zw. oben und unten		Geringer Objekt-ebenenabstand	
			4,0%	10,0%	12,0%	30,0%
	40,0%		Möglichkeit zur Bildüberlagerung		Geringer Aufwand zur Bildvorbereitung	
			4,0%	10,0%	2,0%	5,0%
	40,0%		Therm. Stabilität der Optik		Niedrige Kosten	
			6,0%	15,0%	4,0%	10,0%
	40,0%		Geringe optische Verluste durch Glas			
			6,0%	15,0%		

Abb. 4-9: Übersicht über die Gewichtungen der einzelnen Bewertungsparameter

Der Gewichtungsbau besteht aus drei Ebenen, wobei die erste Ebene die Gesamtbewertung des Systems enthält. In einer ersten Untergliederungsebene werden die vier Hauptkriterien gewichtet:

- ◆ Einflüsse durch Lagetoleranzen der Optik (Abschnitt 4.3.1)
- ◆ Einflüsse durch optische Bauelemente (Abschnitt 4.3.2)
- ◆ konstruktive Einflüsse (Abschnitt 4.3.3)
- ◆ sonstige Einflüsse, die in Abschnitt 4.3.4 erläutert sind

Eine weitere Unterteilung dieser Hauptkriterien findet innerhalb der Unterkriterien statt. Die rechte untere Kennziffer innerhalb jedes Kriteriums entspricht der Gewichtung innerhalb der jeweiligen Untergruppe, während die linke Zahl die Gewichtung im Gesamtsystem angibt. Diese entspricht dem Produkt aus Gewichtung innerhalb der Untergruppe mit der Gewichtung des im Gesamtsystem übergeordneten Punktes.

4.4.2 Ergebnis

Werden die Ergebnisse der Bewertung der jeweiligen Optikkonzepte auf Grundlage der Einzelparameter sowie die Ergebnisse aus der Erstellung des Gewichtungsbauums zur Ermittlung der Gewichtung der Einzelparameter kombiniert, so ergibt sich daraus die Gesamtbewertung der Nutzwertanalyse³⁴ (Abb. 4-10). Diese zeigt deutlich, dass die Optikvariante mit zwei parallel angebrachten Objektiven gegenüber der Split-Chip-Variante und der Optik mit koaxial angeordneten Objektiven die beste Wertung erreicht. Im Rahmen der Feinkonzeption im Abschnitt 5 wird diese Optikvariante konstruktiv umgesetzt.

³⁴ Einzelergebnisse siehe Anhang S. 158

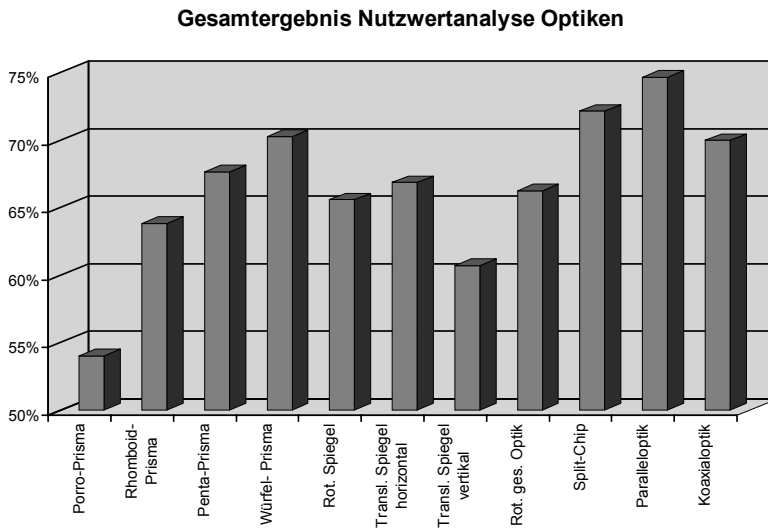


Abb. 4-10: Gesamtergebnis der Nutzwertanalyse über die Optikvarianten

5 Feinkonzeption des Optikmoduls

5.1 Anforderungen für die Umsetzung

Die Optik muss ebenso wie andere Komponenten den Anforderungen an den Aufbau eines Systems, das für die Montage unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik geeignet ist (siehe Abschnitt 2.9), entsprechen. Darüber hinaus sind für die Entwicklung weitere Anforderungen zu spezifizieren, damit ein Lastenheft für die Konstruktion des Optikmoduls erstellt werden kann. In der folgenden Tabelle Tab. 5-1 sind sowohl die optischen als auch die mechanischen Eigenschaften, die die Optik erfüllen muss, aufgeführt.

Um die in Abschnitt 2.9 geforderte Positioniergenauigkeit von unter $\pm 5 \mu\text{m}$ mit Hilfe der relativen Positionierstrategie und der Optik mit diametralen Achsen zu erreichen, muss die optische Auflösung besser sein als die Positioniergenauigkeit. Die Kameras, die eingesetzt werden sollen, verfügen über eine sensitive Fläche von 752×582 Pixeln bei einer aktiven Sensorfläche von $4,8 \times 3,6 \text{ mm}$. Daraus ergibt sich eine Pixelgröße von $6,8 \mu\text{m}$ Kantenlänge, die das physikalische Auflösungsvermögen des CCD-Chips darstellt. Durch Subpixelinterpolation³⁵ wird das Auflösungsvermögen um das Vier- bis Zehnfache verbessert³⁶, so dass dadurch eine rechnerische Auflösung am CCD-Chip von $1,7 \mu\text{m}$ erreicht wird. Bei einem Abbildungsmaßstab von $\beta = -2$, der einer Vergrößerung der Objektfelder auf die doppelte Größe entspricht, kann eine theoretische Messauflösung der Optik von $0,85 \mu\text{m}$ erreicht werden. Wird von $\beta = -2$ ausgegangen, dann entspricht das einem Bildfenster objektseitig von $2,4 \times 1,8 \text{ mm}$, womit sich bei Bauteilgrößen mit bis zu $1.000 \mu\text{m}$ Kantenlänge ein ausreichend großer Spielraum für Bereitstellungstoleranzen ergibt.

³⁵ Durch eine Interpolation zwischen den Grauwerten zweier benachbarter CCD-Zellen kann die Auflösung eines CCD-Chips rein rechnerisch erhöht werden. Dabei kann eine Verbesserung der physikalischen Auflösung um ca. das Vierfache (Abhängig vom Messalgorithmus) erreicht werden.

³⁶ Siehe auch Abschnitt 2.5.2

Mechanische Anforderungen	
Arbeitsabstand b und b' (siehe Abb. 5-7)	$> 13 \text{ mm}$
Abstand der Objektfelder a	$< 100 \text{ mm}$
Optische Anforderungen³⁷	
Strahlengang	Jeweils objektseitig telezentrisch
Vergrößerung β'	1,8 – 2,2
Summe der Abbildungsfehler (siehe Abschnitt 5.2.1)	$< 0,1 \%$
Schärfentiefe	$> 0,15 \text{ mm}$
Beleuchtung	Ringlicht oder koaxiales Auflicht müssen möglich sein. Die Intensität muss auf beiden Seiten getrennt gesteuert werden können. LED und Kaltlicht sollen möglich sein.
Wellenlängenbereich	Optimiert über Filter auf $\lambda = 520 - 580 \text{ nm}$
Eingesetzter CCD-Chip	1/3“ mit $752 * 582 \text{ Pixel}$ (Pixelgröße $d_{CCD} = 6,8 \times 6,8 \text{ }\mu\text{m}$)
Kamera	1/3“ Mikrokamera Teli CS 4300

Tab. 5-1: Lastenheft für das Optikmodul

Aus Platzgründen werden CCD-Kameras mit abgesetztem Kopf eingesetzt. Im Kamerakopf, der einen Durchmesser von 12 mm aufweist, ist ein 1/3“ CCD-Chip integriert, während die Auswerteeinheit mit der Ansteuerung des Chips extern davon angebracht ist. Dadurch kann ein möglichst kompakter Aufbau des Optikmoduls trotz des Einsatzes zweier Kameras gewährleistet werden.

5.2 Entwicklung des Doppelkameramoduls

Bevor die optische und mechanische Auslegung und die Justage des Optikmoduls erläutert werden, sollen wichtige Grundbegriffe der Optik, die zum Verständnis der Problematik nötig sind, erläutert werden.

³⁷ Erläuterungen zu optischen Fachbegriffen siehe Abschnitt 5.2.1.

5.2.1 Optische Grundlagen

Im Abschnitt 4 wurden optische Elemente behandelt, die keinen Einfluss auf den Abbildungsmaßstab haben und bei denen nur eine Umlenkung der optischen Strahlen auftritt. In diesem Kapitel stehen nun die Eigenschaften von **umformenden optischen** Systemen im Mittelpunkt.

In Abb. 5-1 werden die wichtigsten Definitionen und Vorzeichen bei einem abbildenden optischen System dargestellt. Der Abbildungsmaßstab ergibt sich aus

$$(5-1) \quad \beta' = \frac{y'}{y}.$$

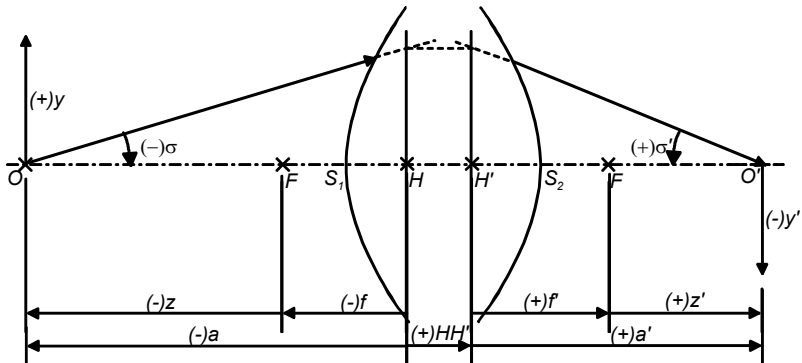


Abb. 5-1: Geometrische Größen zur Beschreibung eines Objektivs
(NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 91, HAFERKORN 1994, S. 193)

Im Gegensatz zu den bisherigen Betrachtungen, bei denen von einer rein linearen Ausbreitung von Licht ausgegangen wurde, müssen bei Betrachtungen der optischen Auflösung eines Objektivs der Wellencharakter und damit Beugungserscheinungen des Lichts mit in Betracht gezogen werden. Bei der Beugung an einer kreisförmigen Blende entsteht ein typisches Beugungsmuster, das in der Mitte das sog. Airy-Scheibchen³⁸ und umgebende konzentrische Kreise enthält. Als minimal auflösbare Strukturen gelten nach dem Kriterium von

³⁸ Bei einer Beugung von Licht an einer kreisförmigen Öffnung entsteht ein Beugungsmuster aus konzentrischen Kreisen mit einem hellen Zentrum (Airy- Scheibchen). Dabei sind im Airy- Scheibchen 83,8 % des Lichtstromanteils Φ/Φ_{ges} enthalten (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 22 f)

Rayleigh³⁹ zwei benachbarte Strukturen, die gerade um den Radius des Beugungsscheibchens

$$(5-2) \quad \rho'_{1,Min} = 1,22 * \frac{\lambda}{D} * f',$$

d.h. dem ersten Minimum des Beugungsmusters, gegeneinander verschoben sind. Dabei entspricht D dem Durchmesser der kreisförmigen Blende. Wird statt der Brennweite und des Blendendurchmessers die numerische Apertur⁴⁰ (NA , NA') als kennzeichnende Größe für das Objektiv verwendet, gilt

$$(5-3) \quad \rho'_{1,Min} = 0,61 * \frac{\lambda}{NA'} = 0,61 * \frac{\lambda * |\beta'|}{NA}.$$

Das maximale optische Auflösungsvermögen eines CCD-Chips entspricht der Größe d_{CCD} eines CCD-Pixels. Da die maximale optische beugungsbegrenzte Auflösung eines Objektivs nicht größer sein muss als die Kamera, die zusammen mit dem Objektiv zum Einsatz kommt, kann der Radius des Beugungsscheibchens mit d_{CCD} gleichgesetzt werden. Bei einer gegebenen Wellenlänge λ und einem angestrebten Abbildungsmaßstab β' kann die minimal benötigte numerische Apertur des Objektivs berechnet werden.

$$(5-4) \quad NA = n * \sin u \geq 0,61 * \frac{\lambda * |\beta'|}{d_{CCD}}$$

Um die Messgenauigkeit, die sich aus der optischen Auflösung ergibt, nicht durch perspektivische Einflüsse zu verringern, muss objektseitig ein telezentrischer Strahlenverlauf des Objektivs gegeben sein. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass gleich große Objekte, die sich innerhalb des Schärfentiefebereichs aber in unterschiedlicher Entfernung von der Optik befinden, auch

³⁹ Bei dem von Lord Rayleigh aufgestelltem Kriterium zur optischen Auflösung können zwei Punkte voneinander unterschieden werden, wenn sich der Abstand der beiden Punkte voneinander gerade dem Radius bis zum ersten Beugungsminimum entspricht und somit die addierte Lichtstromdichte $\Phi_{Ges} = \Phi_1 + \Phi_2$ zwischen den beiden Punkten bis auf ca. 75 % des Maximums abfällt. (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 23)

⁴⁰ Die Apertur bezeichnet den Sinus des halben Öffnungswinkels u . Bei Mikroobjektiven, bei denen sich der Gegenstand auch in einem anderen Medium als Luft befinden kann, wird die Apertur zusätzlich mit dem Brechungsindex n dieses Mediums multipliziert, woraus sich die numerische Apertur NA ergibt. (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 99)

in der Bildebene gleich groß dargestellt werden (Abb. 5-2). Diese Eigenschaft ist im Fall der zu entwickelnden Optik nötig, da damit Lagetoleranzen in Z-Richtung oder der Aufbau von mehrlagigen Mikrosystemen keine Messungenauigkeiten durch perspektivische Verzerrungen hervorruft. Dabei ist der Telezentriebereich nach ECKERL U.A. (1998) „das Maß der zulässigen Objektverschiebung, welches einen Maßfehler einer beliebigen Struktur von max. 1 μm erzeugt.“

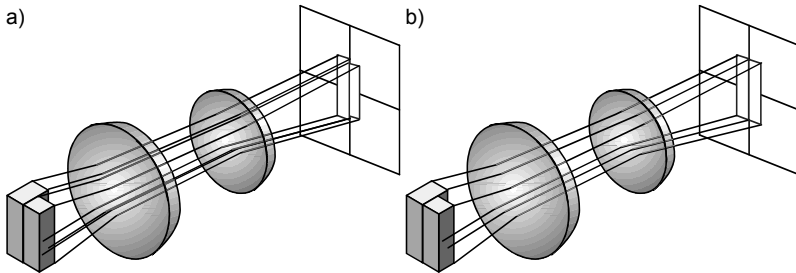


Abb. 5-2: Unterschied zwischen a) entozentrischem und b) telezentrischem Strahlengang

Der Telezentriebereich sollte größer als der Schärfentiefebereich des Messobjektivs sein. Der Schärfentiefebereich $a_h - a_v$ eines Objektivs ist der Bereich, um den ein Objekt im Objektraum verschoben werden kann, um in der Bildebene innerhalb gewisser Toleranzen scharf abgebildet zu werden. Im Nahbereich kann der Wert nach NAUMANN & SCHRÖDER (1992, S. 124)

$$(5-5) \quad a_h - a_v = 2u'k * \frac{\beta'^2 - 1}{\beta'^2}$$

herangezogen werden. Die Gleichung kann unter Zuhilfenahme von (5-3) und mit

$$(5-6) \quad NA' = n \sin u'$$

gelöst werden, unter der Voraussetzung, dass die Sinusbedingung⁴¹ erfüllt wird.

Um die wirkliche Abbildungsqualität eines Objektivs zu charakterisieren, eignet sich die Modulationsübertragungsfunktion MTF. Bei der Berechnung der MTF wird neben der theoretisch möglichen optischen Auflösung auch der Kontrast der zu betrachtenden Elemente berücksichtigt. Es findet eine Bewertung der Abbildungsqualität eines Messgitters statt, das grobe und feine Bilddetails repräsentiert. Je feiner die Strukturen des Messgitters sind, desto höher ist seine Ortsfrequenz. Als Maß der Ortsfrequenz R dient dabei der Quotient aus der Zahl der Perioden einer sinusförmigen Verteilung und Länge, wobei die Benennung in Linienpaaren pro mm [LP/mm] erfolgt. Ein Linienpaar ist dabei die Abfolge aus einer hellen und einer dunklen Linie (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 408).

Als Modulation M wird der abgebildete Kontrast bezeichnet, der mit

$$(5-7) \quad M = \frac{\Phi_{Max} - \Phi_{Min}}{\Phi_{Max} + \Phi_{Min}}$$

berechnet wird. M kann maximal den Wert 1 erreichen, wobei $\Phi_{Min} = 0$ sein muss, was z.B. einem lichtdurchstrahlten Dia mit lichtundurchlässigen Streifen entspricht. Diese maximale Modulation kann bei einer Abbildung mit einem optischen System nie erreicht werden, da schon durch die Beugung der Kontrast verringert wird. Als Maß für die Abbildungsqualität kann der Quotient aus der Modulation M' im Objektbereich in Abhängigkeit von der jeweiligen Ortsfrequenz R , zur Modulation M im Bildbereich, ebenfalls in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz R dienen.

$$(5-8) \quad T(R) = \frac{M'(R)}{M(R)}$$

Dieser Quotient wird als Modulationsübertragungsfaktor $T(R)$ bezeichnet. Bei steigender Ortsfrequenz nimmt $T(R)$ ab, so dass das System einen Frequenzgang aufweist. Die nur durch Beugung begrenzte Modulationsübertragung eines „idealen“ optischen Systems ist abhängig vom Produkt aus $R * k * \lambda$. Bei Systemen

⁴¹ Soll ein optisches System auf der gesamten Öffnung ein scharfes Bild liefern, so gilt bei einem System, das endliche Schnittweiten benutzt, die Sinusbedingung, d.h. die Hauptflächen um Ding- und Bildpunkt sind kugelförmige Flächen, wobei $\sin \sigma / \sin \sigma' = \beta'$ sein muss (NAUMANN & SCHRÖDER 1992, S. 111).

bei denen $\beta' \neq 0$ muss die effektive Blendenzahl k_{eff} eingesetzt werden, die sich aus

$$(5-9) \quad k_{eff} = \frac{a'}{D_{EP}} = k * (1 - \beta')$$

errechnet. Damit ergibt sich für den Modulationsübertragungsfaktor bei Kreisapertur

$$(5-10) \quad T = \frac{2}{\pi} * \left[\arccos(Rk_{eff}\lambda) - Rk_{eff}\lambda \sqrt{1 - (Rk_{eff}\lambda)^2} \right].$$

Fällt T auf den Wert 0, kann die entsprechende Ortsfrequenz nicht mehr aufgelöst und somit die Details nicht mehr abgebildet werden. Neben der reinen Veränderung von T über R ändert sich bei einem realen Objektiv T auch, wenn man sich von der optischen Achse entfernt und zum Rand des Bildfensters geht. Ebenso haben die meridionale oder sagittale Orientierung⁴² des Messgitters und die Defokussierung auf die MTF eine Auswirkung. Somit kann ein Objektiv nur mit mehreren angepassten Darstellungen von T über den Variablen bei variablen Ortsfrequenzen charakterisiert werden. In Abb. 5-3 sind unterschiedliche Darstellungen der MTF eines Objektivs abgebildet. Dabei sind die beiden unteren Diagramme als Ergänzungen des darüber abgebildeten Diagramms zu verstehen. Links unten wird T über der Defokussierung bei einer Ortsfrequenz von 10 LP/mm aufgetragen. Die senkrechte Linie bei 10 LP/mm im oberen Diagramm zeigt die Lage dieses Diagramms an. Die untere rechte Kurve stellt T innerhalb des Bildfensters bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen dar. Diese Messpunkte sind durch die Kreise im oberen Diagramm markiert. Aus der Kombination der drei Diagramme kann die Abbildungsqualität des Objektivs entnommen werden.

Für eine gute Erkennung von Einzelstrukturen mit digitalen Bildverarbeitungssystemen wird für T ein minimaler Wert von 30 % empfohlen. Liegt T unter 30 %, sind die Kontraste im Bild nicht hoch genug, um die Details sicher voneinander trennen zu können.

⁴² Meridionale Orientierung bedeutet, dass das Messgitter senkrecht zum Radius steht. Das bedeutet, dass es im oberen und unteren Bereich des Objektivs eine horizontale und an den beiden Seiten eine senkrechte Orientierung aufweist. Im Gegensatz dazu steht die sagittale Orientierung, die sich immer an der Richtung des Radius orientiert. Siehe auch Abb. 5-4.

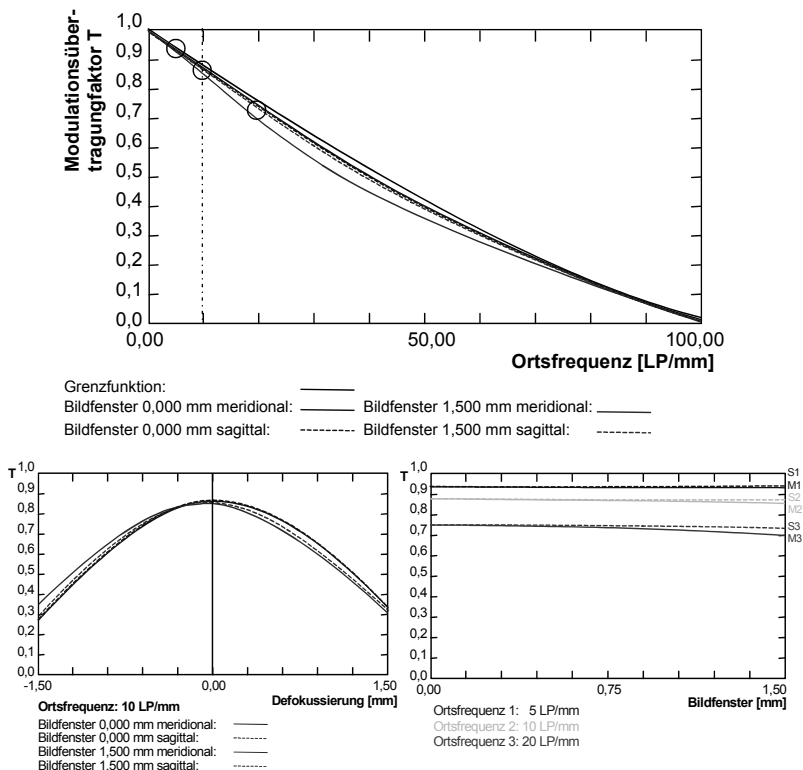


Abb. 5-3: Unterschiedliche Darstellungsformen der MTF eines Objektivs

Bei der Berechnung und Herstellung von Objektiven kann kein ideales⁴³ optisches Abbildungssystem entstehen. Aus diesem Grund ist jedes optische System mit Abbildungsfehlern behaftet.

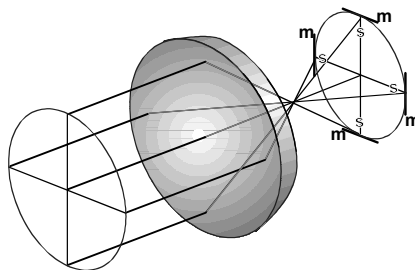
Eine ideale geometrisch-optische Abbildung ordnet jedem Punkt des Objektraums umkehrbar eindeutig einen Bildpunkt zu und transformiert geometrische Figuren in ähnliche Figuren. Eine punktförmige Abbildung liegt vor, wenn homozentrische Bündel in homozentrische Bündel übergeführt

⁴³ Ein ideales oder perfektes optisches Abbildungssystem zeichnet sich dadurch aus, dass nur eine negative Beeinflussung der optischen Qualität durch Beugung, nicht aber durch Abbildungsfehler stattfindet (BERGMANN & SCHÄFER 1993, S. 152).

werden. Die ideale geometrisch-optische Abbildung ist nur mit ebenen Oberflächenspiegeln weitgehend anzunähern (HAFERKORN 1994, S. 300). Treten Brechungen auf, die bei jedem Übergang von Licht von einem Medium in ein anderes Medium auftreten, ist grundsätzlich keine ideale geometrisch-optische Abbildung möglich (BERGMANN & SCHÄFER 1993, S. 60).

Abweichungen von der ideal geometrisch-optischen Abbildung werden als **Aberrationen** oder Abbildungsfehler bezeichnet, wobei Fehler durch den Einfluss der Dispersion Farbfehler oder **chromatische** Fehler genannt werden. Abweichungen, die auch mit monochromatischem Licht auftreten, werden als Geometriefehler bezeichnet. Da der Wellenlängenbereich für die zu entwickelnde Optik über ein Filterpaket auf $\lambda = 520 - 580 \text{ nm}$ begrenzt ist, brauchen Abbildungsfehler, die durch polychromatisches Licht⁴⁴ entstehen, nicht näher betrachtet werden.

Um die Fehler einer Optik quantitativ erfassen zu können, werden die Abweichung der Strahlkoordinaten von den Bezugskoordinaten verwendet. Diese Strahlaberrationen können in zwei Gruppen, die Quer- sowie die Längsabweichungen, aufgeteilt werden. Zur genaueren Beschreibung der Querabweichungen wird in kartesischen Koordinaten zwischen der sagittalen Querabweichung $\Delta x'$ und der meridionalen Querabweichung $\Delta y'$ unterschieden,



wobei die Meridionalebene in der y-z Ebene liegt (Abb. 5-4).

Abb. 5-4: Unterscheidung in meridionale (m) und sagittale (s) Richtung im Bildfenster einer Optik

⁴⁴ Weiterführende Informationen zu diesen Abbildungsfehlern sind der Fachliteratur wie BERGMANN & SCHÄFER (1993, S. 103 ff), NAUMANN & SCHRÖDER (1992, S. 112 ff), DÖRBAND (1997, S. 84 ff) zu entnehmen.

In Abschnitt 4.3.2 sind die auftretenden Abbildungsfehler einer Optik schon angesprochen worden. Es handelt sich dabei um **Lagefehler** wie Bildfeldwölbung und Verzeichnung, sowie **Schärfefehler** wie sphärische Aberration (Öffnungsfehler), Koma (Asymmetriefehler), Astigmatismus (Zweischalenfehler).

Lagefehler verändern die Geometrie des Bildes in Bezug auf Ebenenlage und Maßstabstreue. Deswegen sollten diese Abbildungsfehler insbesondere bei Vermessungsobjektiven vermieden werden. Die Bildfeldwölbung beschreibt Fehler, die entstehen, wenn es gelingt, die beiden Bildschalen beim Astigmatismus auf eine Bildschale zu korrigieren. Ist das möglich, so wird ein ebenes Objekt als gewölbtes Bild dargestellt (Abb. 5-5 a). Die Verzeichnung beschreibt Maßstabsfehler bei der Abbildung eines Objekts über dem Bildfenster. Durch den nicht einheitlichen Maßstab wird das Bild kissenförmig - bei nach außen hin zunehmenden Abstand - oder tonnenförmig - bei nach außen hin abnehmendem Maßstab - abgebildet (Abb. 5-5 b und c).

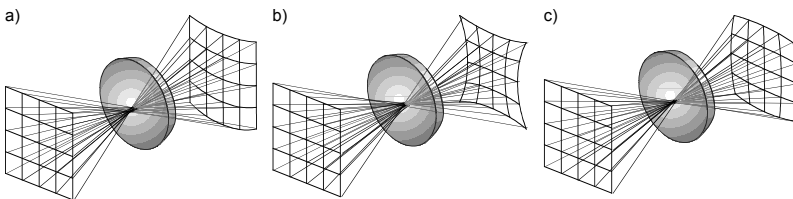


Abb. 5-5: Lagefehler die bei Optiken auftreten können:

a) Bildfeldverwölbung b) kissenförmige Verzeichnung c) tonnenförmige Verzeichnung

Die sphärische Aberration beschreibt die Fehler, die dadurch entstehen, dass an einer Linse die achsfernen Strahlen stärker als die achsnahen Strahlen gebrochen werden. Dadurch entsteht bei der Abbildung eines parallelen Strahlenbündels mittels einer Sammellinse kein einzelner Bildpunkt, sondern ein Zerstreungskreis (Abb. 5-6 a). Asymmetriefehler, auch Koma genannt, bezeichnen Fehler, die bei der Abbildung von Objekten, die sich nicht auf der optischen Achse befinden, entstehen (Abb. 5-6 b). Astigmatismus, auch Zweischalenfehler genannt, tritt ebenfalls bei außermittigen Abbildungen auf und führt dazu, dass ein Objekt in zwei zueinander senkrechten „Bildlinien“, die sich darüber hinaus noch auf unterschiedlichen Schärferebenen befinden (Abb. 5-6 c), abgebildet wird.

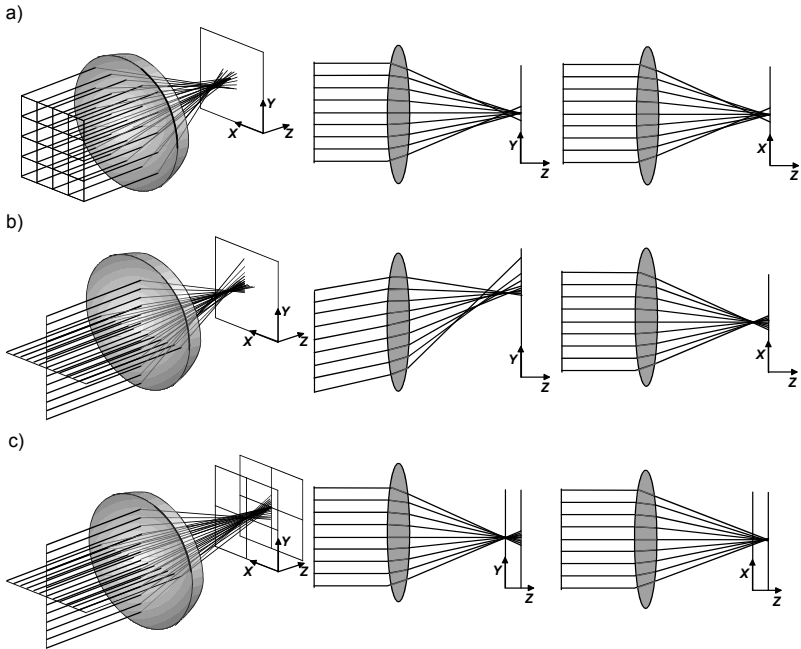


Abb. 5-6: Schärfeffehler, die bei Optiken auftreten können:
a) sphärische Aberration b) Asymmetriefehler c) Astigmatismus

5.2.2 Optische Auslegung

Für die optische Auslegung des Objektivs wird in einem ersten Schritt die theoretisch nötige Apertur berechnet. Mit der angestrebten Vergrößerung von $\beta' = -2$, einer mittleren Wellenlänge von $\lambda = 550 \text{ nm}$ sowie einer Kantenlänge eines Pixels von $d_{\text{CCD}} = 6,8 \text{ }\mu\text{m}$ folgt aus der Gleichung (5-4) die angestrebte numerische Apertur von $NA = 0,099$. Daraus errechnet sich für den halben Öffnungswinkel der Wert $u = 5,7^\circ$. Bei dem geforderten Objektfelddurchmesser von $2y = 3 \text{ mm}$ ergibt sich jeweils der Strahlkegel an den Objektfeldern.

Auf der Grundlage der Skizze des Optikaufbaus (Abb. 5-7) werden für eine erste Kalkulation des Arbeitsabstands a eines Objektivs die Dimensionen des Gehäuses und des Objektivs grob abgeschätzt. Die zu beachtende Dimension des Gehäuses ist die Wandstärke d_G , die auf ca. 10 mm festgelegt wird. Die Dimensionierung geschieht hier mit Rücksicht auf die zu integrierenden LED-Ringlichter, die rund um die Öffnungen des Optikmoduls angebracht werden

müssen. Die zweite Größe, die durch das Gehäuse beeinflusst wird, ist die Zwischenwand zwischen den beiden Objektiven, die mit $d_z = 2$ mm festgelegt wird. Darüber hinaus wird der Abstand zwischen der ersten Linse des Objektivs und der Spitze des Umlenkprismas auf $d_{OP} = 5$ mm gesetzt. Als Erfahrungswert weist ein Objektiv mit den geforderten Eigenschaften einen Durchmesser von ca. $d_O = 15$ mm auf (siehe auch HÖHN 2001, S. 72). Dieser Wert kann nur ein grober Anhaltswert sein, da der Durchmesser des Objektivs eine Rückwirkung auf den benötigten Arbeitsabstand a des Objektivs hat und umgekehrt. Steigt a , ergibt sich bei gleichbleibender numerischer Apertur, Objektfelddurchmesser und Vergrößerung ein größerer Objektivdurchmesser d_O . Damit erhöht sich aber wiederum der Arbeitsabstand, so dass die endgültigen Maße im Verlauf eines iterativen Prozesses festzulegen sind.

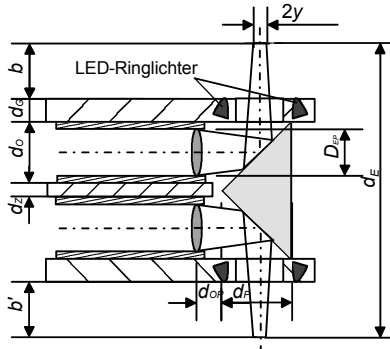


Abb. 5-7: Skizze des Optikaufbaus für die Auslegung der Objektive

Mit Hilfe der oben angegebenen Anhaltswerte und b bzw. b' aus Tab. 5-1 kann ein vorläufiger Arbeitsabstand eines Objektivs berechnet werden

$$(5-11) \quad a = d_G + d_O + d_{OP} + b = 45 \text{ mm},$$

sowie der vorläufige Abstand der beiden Objektebenen

$$(5-12) \quad d_E = 2b + 2d_G + 2D_O + d_z = 82 \text{ mm}.$$

Aus dem Durchmesser des Objektfelds $2y = 3$ mm, dem Arbeitsabstand der Objektive $a = 45$ mm und dem halben Öffnungswinkel der Objektive $u = 5,7^\circ$ kann der Durchmesser der Eintrittspupille D_{EP} berechnet werden.

$$(5-13) \quad D_{EP} = 2 * (y + a * \tan u) = 12,9 \text{ mm}$$

Da für die Fassung der Linsen die Wandstärke des Objektivgehäuses mit ca. 4 mm zu veranschlagen ist, ergibt sich ein Objektivdurchmesser d_O von ca. 21 mm, der wieder Rückwirkungen auf den Arbeitsabstand der Objektive hat (siehe Gleichung (5-11)).

Nach mehreren Iterationsschritten, bei denen auch Einbußen bei der optischen Auflösung zugunsten einer kompakt bauenden Optik in Kauf genommen werden, ergeben sich die in Tab. 5-1 dargestellten Kennwerte für ein Objektiv. Die Hauptkurven der MTF eines Objektivs sind in Abb. 5-3 und im Anhang auf S. 160 ff dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass bei dem für Bildverarbeitungsoperationen empfohlenen minimalen Wert von $T = 30 \%$ eine Auflösung von 60 LP/mm erreicht wird.

Für die koaxiale Beleuchtung wird über einen Strahlteiler, der sich im Strahlengang der Optik befindet, das Licht aus einer Glasfaser, die an eine Kaltlichtquelle gekoppelt ist, eingespiegelt. Mit Hilfe der integrierten Irisblende ist es möglich, die Einlasspupille der Optik zu verringern, womit sich eine Erhöhung der Tiefenschärfe ergibt. Dadurch verringert sich allerdings die optische Auflösung der Optik.

Bezeichnung	TZ3_2x_42_MA
Objektfeld bei $1/3^\circ$ [mm]	2,4 x 1,8 mm ²
Maßstab β'	2 : 1
Arbeitsabstand a [mm]	42 mm
Numerische Apertur NA	0,06
Telezentriebereich im Objektraum [mm] bei Bildgröße Änderung [µm]	± 0,2 mm → 10 µm
Objektseitige Schärfentiefe [mm] bei 25% MTF ca. 50 Graustufen im Bildraum	± 0,3 bei 20 LP/mm
Spektralbereich [nm]	520 - 600
MTF 30% Achsnah Zone bei lp / mm	60 LP/mm
Max. Verzeichnung [%]	< 0,015

Tab. 5-2: Kennwerte eines Objektivs für das Optikmodul

5.2.3 Mechanische Konstruktion und Umsetzung

Der Optikkopf hat eine Höhe von 50 mm und eine Breite von 30 mm. Der Abstand der beiden Objektfelder a beträgt 80 mm, der Arbeitsabstand b und b' jeweils 15 mm. Für die Umlenkung des Strahlengangs wird ein Halbwürfelprisma mit verspiegelten Katheten eingesetzt. Dieses ist auf einer justierbaren Prismenhalterung im vorderen Teil des Gehäuses untergebracht, in dem sich auch die LED-Ringlichtbeleuchtungen befinden. Um den Arbeitsabstand des Objektivs so gering wie möglich zu gestalten, wird bei dem LED-Ringlicht ($\lambda = 567 \text{ nm}$), das durch seine Kreisteilung von 45° auf 8 LEDs ausgelegt ist, auf diejenige LED verzichtet, die den Objektiven am nächsten liegt. Dadurch ist es möglich, den Abstand d_{OP} zu verringern und somit auch den Arbeitsabstand a des Objektivs zu minimieren.

Der vordere Teil des Gehäuses wird über Passstifte mit dem Gehäuse der Objective indexiert und mit Schrauben fixiert. Eine Seite des vorderen Gehäuses dient auch als Referenzfläche für die senkrechte Ausrichtung der optischen Achsen zum Gehäuse sowie der optischen Achsen zueinander. Eine genauere Erläuterung, wie die optischen Achsen und die CCD-Flächen zueinander ausgerichtet werden, erfolgt in Abschnitt 5.4.

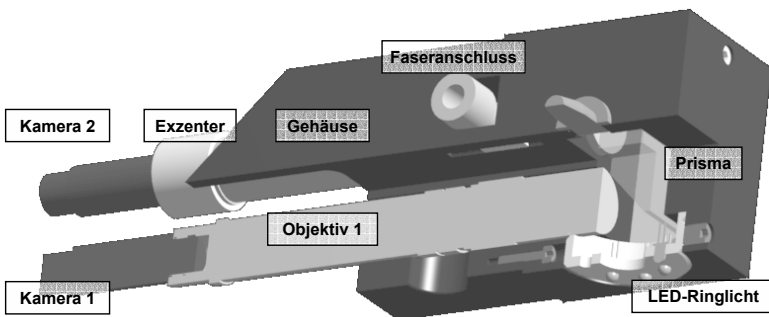


Abb. 5-8: Schnitt durch das Optikmodul

Das Gehäuse der Objective ist mit zwei hochpräzisen parallelen Passbohrungen mit einem Achsabstand von 20 mm für die Aufnahme der Objective versehen. Die Optiken werden im Gehäuse mit Hilfe coaxialer Klemmmuttern fixiert. Dadurch werden seitliche Belastungen auf die Objective vermieden, die zu Verformungen der Objective und damit zu Ungenauigkeiten führen könnten. Im

Gehäuse sind darüber hinaus noch zwei verschließbare Öffnungen vorhanden, die einen Zugang zur Blendenverstellung der Objektive gewähren.

Auf der Bildseite der Objektive sind Kamerahalterungen für die Mikrokameras angebracht. Während die erste Halterung keine Justagemöglichkeit für die Kamera vorsieht, ist an der zweiten Kamerahalterung ein Versatzausgleich der Kamera in der X - Z Ebene um $\pm 0,1$ mm möglich. Dieser Ausgleich wird durch die Kombination von zwei klemmbaren Exzentern, die sich zwischen Objektiv und Kamera befinden, ermöglicht. Der Versatzausgleich ist für die genaue Ausrichtung der CCD-Sensoren zueinander nötig. In Abb. 5-8 ist ein Schnitt durch das Optikmodul dargestellt.

Der in sich justierte optische Kopf des Optikmoduls muss mit einer einstellbaren Halterung an der Einschiebevorrichtung, die zum Verfahren der Optik in die Fügeachse dient, befestigt werden. Dabei ist besonders wichtig, die Winkellage der Optik verstellen zu können, um die optische Achse des Optikmoduls auf die Fügeachse des Handhabungsgeräts auszurichten. Zur Ausrichtung der Achsen zueinander müssen die Winkel φ_x und φ_y der Optik justiert werden können.

Bei der Winkeljustage des Optikkopfs soll ein möglichst geringer Versatz der beiden Gesichtsfelder entstehen. Dafür muss sich der Drehpunkt, um den die Optik justiert wird, möglichst nahe am Schnittpunkt der diametralen optischen Achsen des Optikkopfs mit der Achse, die sich parallel mittig zwischen den beiden optischen Achsen der Objektive befindet, liegen (Abb. 5-9).

Um eine gegen äußere Einflüsse möglichst widerstandsfähige Lagerung zu ermöglichen, wird ein Kugelgelenkkopf eingesetzt, der sich seitlich des Optikmoduls in der Höhe der Mittelachse der beiden Objektive befindet. Daraus ergibt sich eine kompakte und steife Lagerung des Optikmoduls, die den Freiraum des Moduls nicht einschränkt. Durch die achsnahe Anbringung der Lagerung wird der laterale Versatz der beiden Gesichtsfelder zueinander bei einer Winkeljustage der Optik minimiert. Die Winkelstellung der Optik kann mit klemmbaren Feinjustageschrauben justiert und fixiert werden.

Um einen großen Arbeitsabstand unterhalb der Optik gewährleisten zu können, kann die Lagerung umgedreht werden, so dass der Optikkopf abgehängt wird. Durch den Einsatz von Federn wird der Optikkopf gegen die Lagerung spielfrei vorgespannt.

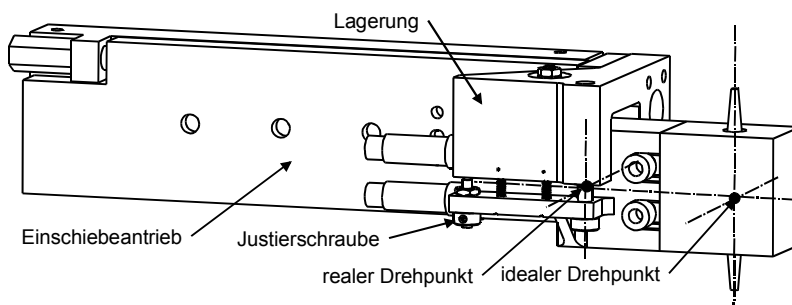


Abb. 5-9: Lagerung der Optik und Anbringung des Einschiebeantriebs

Die Einschiebevorrichtung wird seitlich an der Halterung befestigt. Als Antrieb eignet sich eine präzisionsgelagerte, pneumatisch angetriebene Schlitteneinheit. Der Verfahrweg kann je nach Anforderung angepasst werden. Um die Erschütterung der Optikeinheit beim Ein- und Ausfahren der Optik zu verringern und um den Einfahrweg zu justieren, ist die Einheit mit gedämpften und feinjustierbaren Anschlägen ausgerüstet.

5.3 Optische Vermessung

Im Anschluss an die Fertigung der einzelnen Objektive wurden mehrere Untersuchungen zur Verifizierung der optischen Qualität durchgeführt. Dabei wurde sowohl die Auflösung der Objektive an einem Siemensstern mit 36 Feldern und einem Durchmesser von 2,4 mm gemessen, als auch die Verzeichnung mit Hilfe eines Karéemusters untersucht (Abb. 5-10 a). Die Untersuchungen wurden visuell und mit der vorgesehenen Kamera getestet.

Die Vermessung mittels Siemensstern ergab, dass die optische Auflösung der Objektive über der des Siemenssterns liegt (Abb. 5-10 b). Dies ist daran zur erkennen, dass keine Phasenverschiebungen auftreten, die zu einem Vertauschen der hellen und dunklen Strukturen des Siemenssterns führen und auf einen Öffnungsfehler des Objektivs hindeuten würden⁴⁵.

⁴⁵ siehe auch NAUMANN & SCHRÖDER (1992, S. 409)

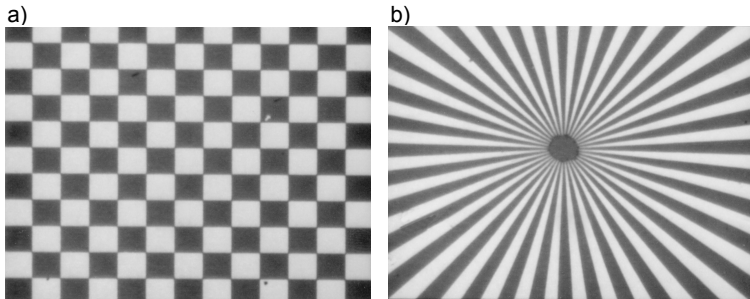


Abb. 5-10: Testmuster zur Verifizierung der optischen Qualität:

a) Karréemuster b) Siemensstern

Bei der optischen Untersuchung des Karéemusters kann keine Verzeichnung der Optik festgestellt werden, da auch hier die Fehler unterhalb der Messtoleranzen liegen. Aus diesem Grund wurde eine genauere Untersuchung der Verzeichnungen mit Hilfe eines Referenzmusters durchgeführt. Dafür wird ein definiertes Punktemuster mit dem Objektiv aufgenommen und die genaue Lage jedes Punkts vermessen. Die vermessenen Positionen der Referenzpunkte werden jeweils mit der Sollposition verglichen. Die Abweichung zwischen der Soll- und der Ist- Position kann als Vektor angegeben werden und stellt die Verzeichnung der Optik an dem Referenzpunkt dar (Abb. 5-11). Die Messung ergibt, dass im gesamten Bildfenster die Verzeichnungen unter einem Mikrometer liegen. Darüber hinaus ist mit Hilfe dieses Versuchsaufbaus eine Bestimmung der Vergrößerung innerhalb des Schärfentiefebereichs sowie die Vermessung der MTF möglich. Die Zusammenstellung der Daten ist in den Diagrammen im Anhang S. 162 enthalten.

An Hand von Referenzgittern, die zur Bestimmung der möglichen optischen Auflösung dienen, wurde die maximale Auflösung der Optik mit Hilfe eines Mikroskops mit 125 LP/mm ermittelt. Der Einsatz der vorgesehenen Kamera reduziert die Auflösung auf eine Ortsfrequenz von max. 80 LP/mm, womit Strukturen der Größenordnung von $6,25\ \mu\text{m}$ erfasst werden können. Weitere Untersuchungen zur Messgenauigkeit des gesamten Optikkopfs wurden im Rahmen der Anwendung (siehe Abschnitt 6.3) durchgeführt.

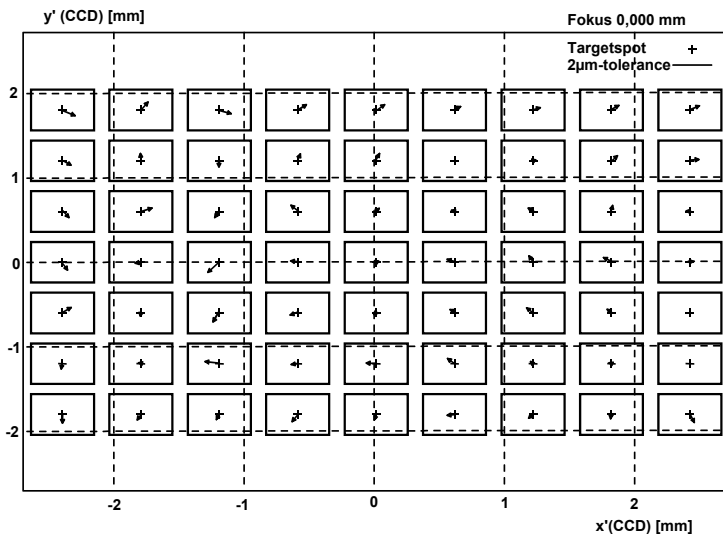


Abb. 5-11: Verzeichnung eines Objektivs über das Bildfenster

5.4 Justage des Optikkopfs

Vor dem Einbau des Optikmoduls in ein Montagesystem muss die Optik in sich justiert werden. Diese Justage, die nur einmal durchgeführt werden muss, erfolgt in mehreren Stufen. In einem ersten Schritt werden die beiden diametralen optischen Achsen der Objektive über die Justage des Prismas fluchtend ausgerichtet. Danach erfolgt die Positionierung der beiden Kameras zueinander, so dass die beiden Teilbilder, die mit den CCD-Sensoren aufgenommen werden, deckungsgleich sind. Als Referenzfläche für die Ausrichtung der diametralen optischen Achsen dient die Unterseite des Prismengehäuses.

Der Justagevorgang wird auf einer eigens entwickelten Justiervorrichtung durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Grundplatte, auf der rechtwinklig drei parallele Halterungen mit orthogonal geschliffenen Anschlagflächen angebracht sind. Davon dienen zwei Halterungen zur Aufnahme von Justagestrichplatten und dem Optikmodul, während an der dritten Halterung ein

Autokollimationsfernrohr⁴⁶ (AKF) angebracht wird. Die Justagestrichplatten sind jeweils im Schärfentiefebereich des Optikkopfs angebracht.

In einem ersten Schritt wird die optische Achse des AKFs senkrecht zur Referenzfläche der Halterung 1, an der die Referenzfläche des Optikkopfs während der späteren Justage anliegt, ausgerichtet. Dafür wird ein rückseitenverspiegelter Planspiegel an der Halterung 1 angebracht. Die Marken im AKF werden über eine Winkeljustage des AKF aufeinander ausgerichtet (Abb. 5-12). Die optische Achse des AKF bildet nach diesem Ausrichtvorgang die Referenzachse für sämtliche weiteren Justageschritte.

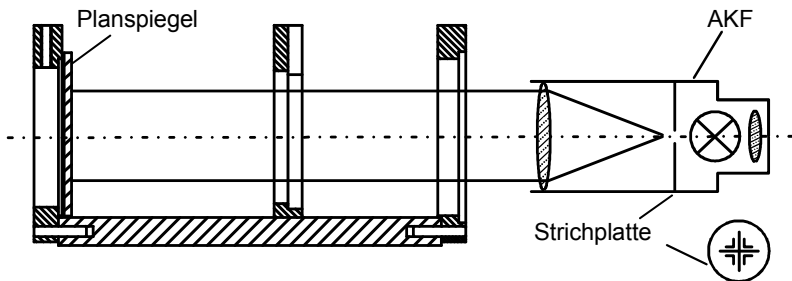


Abb. 5-12: Ausrichtung des AKF auf senkrecht zur Referenzebene

Für die Ausrichtung der ersten Referenzmarke, einem Fadenkreuz, das im ersten Objektfeld des Optikkopfs liegt, wird das AKF ohne Kollimationsvorrichtung als fokussierbares Fernrohr verwendet. Dieses wird nicht auf unendlich fokussiert, sondern auf die Ebene der Referenzmarke 1, nachdem dieses in die erste Halterung eingesetzt wurde. Danach wird durch eine Winkel- und Lagejustage das Fadenkreuz der Referenzmarke 1 auf das des Fernrohres ausgerichtet (Abb. 5-13).

⁴⁶ Mit Hilfe eines Autokollimationsfernrohrs (AKF) können Richtungsabweichungen bestimmt werden. Dabei wird eine Marke (z.B. ein Fadenkreuz) über einen halbdurchlässigen Spiegel in den Strahlengang eines auf unendliche Entfernung scharfgestellten Fernrohrs eingespiegelt. Eine zweite Marke, die sich vor dem halbdurchlässigen Spiegel im Strahlengang des Fernrohrs befindet, wird auf die Brennebene des Fernrohrs geworfen. Richtet man das Fernrohr auf einen Planspiegel, überlagern sich die beiden Marken. Wenn der Planspiegel genau senkrecht zur optischen Achse des AKF steht, liegen die beiden Marken exakt übereinander. Genauere Informationen zum Aufbau und Verwendung eines AKF's sind in NAUMANN & SCHRÖDER (1992, S. 422 ff) enthalten.

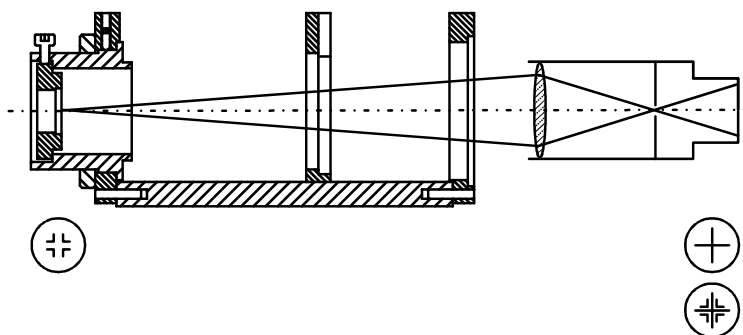


Abb. 5-13: Ausrichten der ersten Referenzmarke auf die Achse des AKF

Nach dem Einsetzen der zweiten Referenzmarke, auf der ebenfalls ein Fadenkreuz abgebildet ist, wird das Fernrohr auf diese Ebene fokussiert und die Referenzmarke 2 über Rotation und Translation auf das Fadenkreuz des Fernrohrs ausgerichtet (Abb. 5-14).

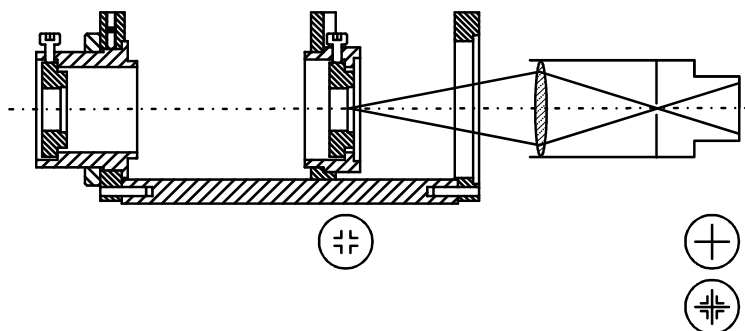


Abb. 5-14: Ausrichten des zweiten Zielobjekt auf die Achse des AKF

Nach diesem Justageschritt liegen die beiden Referenzmarken auf der optischen Achse des AKF, womit auch die Achse zwischen den beiden Objektfeldern orthogonal zu die Referenzflächen an der Halterung ausgerichtet ist.

Anschließend wird das Optikmodul in die Justiervorrichtung eingesetzt (Abb. 5-15). Wie in Abschnitt 5.2.2 dargestellt, verfügt eine Optik über eine justierbare Kameraaufnahme (Kamera 2), während die Kamera 1 ohne Justageadapter an ihrem Objektiv befestigt wird. Über die Justage des Prismas wird das erste Zielobjekt auf die Mitte des CCD-Sensors der Kamera 1 justiert und danach fixiert. Im nächsten Schritt wird das Bild des Zielobjekts, das mit dem CCD-Sensor der Kamera 2 aufgenommen wird, mit Hilfe des Doppelexzentrers auf das Bild der Kamera 1 ausgerichtet. Dafür werden die beiden Bilder mit einer elektronischen Hilfsvorrichtung auf einem Monitor überlagert dargestellt. Nach der Fixierung der Kamera 2 ist der Optikkopf in sich justiert. Das bedeutet, dass die diametralen optischen Achsen zueinander und senkrecht zur Referenzebene am Optikkopf ausgerichtet sind. Ebenso sind die beiden CCD-Sensorflächen der Kameras rotatorisch und translatorisch zueinander justiert.

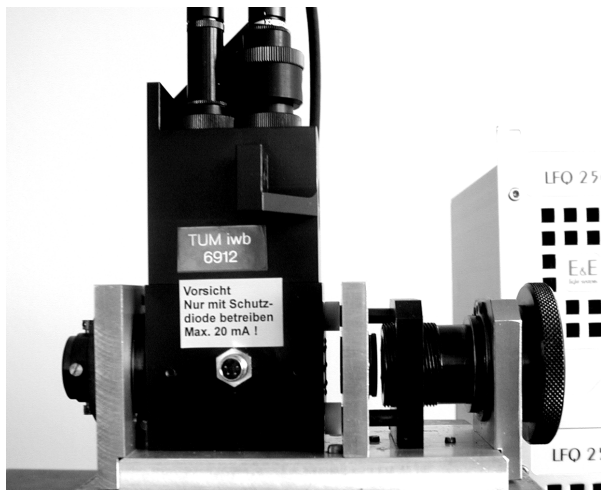


Abb. 5-15: Optikmodul im Justageaufbau

6 Aufbau und Betrieb einer Pilotanlage

Das entwickelte Optikmodul soll abschließend in einer Pilotanlage für die Montage von Flip-Chip-Bauelementen, die in **Radarabstandssensoren** aus der Automobilindustrie benötigt werden, getestet. Dabei soll der Montageprozess komplett automatisiert durchgeführt werden. Bei der Inbetriebnahme der Anlage soll insbesondere die Positioniergenauigkeit, die mit Hilfe der Anlage realisiert werden kann, im Vordergrund stehen.

6.1 Produktbeispiel Radarabstandssensor

Steigende Anforderungen zur Verbesserung der aktiven und passiven Sicherheit im Kraftfahrzeug haben zur Entwicklung eines weitreichenden, schnellen und genauen Abstandsmesssystems geführt. Es arbeitet auf Basis der Radartechnologie, bei der Entfernungen mit Hilfe hochfrequenter elektromagnetischer Strahlen gemessen werden. Diese werden durch entsprechende Linsen gebündelt. Ein solches System wird auch als **Adaptive Cruise Control (ACC)** bezeichnet, bei der der Sicherheitsabstand eines Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug automatisch eingehalten wird. Weiterhin kann die Radartechnologie aber auch auf geringere Entfernungen eingesetzt werden, z.B. um als Pre-Crash-Sensor vor einem Unfall die Sicherheitssysteme eines Fahrzeugs, wie Airbag oder Gurtstraffer, optimal zu aktivieren. Ebenso kann sie als fortgeschrittene Einparkhilfe dienen, die beispielsweise beim Passieren einer Parklücke erkennt, ob diese groß genug für das Auto ist. Im Idealfall wird der Einparkvorgang automatisiert durchgeführt.

Die Sensoren arbeiten in einem Frequenzbereich zwischen 20 und 100 GHz. In den letzten Jahren wurde durch die Integration ganzer Höchstfrequenzschaltungen auf M³ICs (**Monolithische Millimeterwellen ICs**) die Voraussetzung geschaffen, die hochkomplexen Schaltungen kostengünstig und damit für breite Anwendungen geeignet zu fertigen (BAUER & JEREMIAS 1997, NIENHAUS 1999, S. 16 ff, VDI/VDE-IT 1999).

Für den Aufbau eines Radarsensors in FMCW-Technik (**F**requency **M**odulated **C**ontinuous **W**ave) sind mehrere Funktionsbaugruppen nötig. Die für die Messung nötige hochfrequente Schwingung wird in einem elektrischen Schwingkreis erzeugt, der aus einem Oszillator besteht, der in seiner Eigenfrequenz zum Schwingen angeregt wird. Mit Hilfe eines

Frequenzmodulators wird die HF-Schwingung moduliert. Dieses Signal wird über ein Antennenfeld abgestrahlt und, wenn nötig, über eine Linse gebündelt. Die am vorausfahrenden Fahrzeug reflektierten Strahlen werden wiederum von einer Antenne empfangen und in einem hochfrequenten (HF-) Schaltkreis ausgewertet, indem die reflektierte Welle mit der ausgesandten Welle verglichen wird. Die Ergebnisse werden in einem niederfrequenten (NF-) Schaltkreis weiterverarbeitet⁴⁷.

Während im NF-Schaltkreis die Anforderungen an die Montagegenauigkeiten nicht über denen normaler elektronischer Baugruppen liegt, sind die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit im Bereich des HF-Schaltkreises ungleich höher. Dabei haben auch Positionierungsungenauigkeiten im Bereich weniger Mikrometer einen Einfluss auf das Schwing- und Abstrahlverhalten des HF-Schaltkreises. Den elektrischen Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten kommt eine Schlüsselrolle zu. Wie in Abschnitt 2.4.2 dargestellt, eignet sich die Flip-Chip-Technologie als Aufbau-Verbindungstechnologie für HF-Schaltungen am besten.



*Abb. 6-1: Radarbasiertes Kfz-
Abstandsmesssystem ACC
(Quelle: Robert Bosch GmbH)*

Aus diesem Grund sind wichtige Komponenten des weitreichenden Radarabstandssensors (Abb. 6-1) in dieser Technik montiert. Neben Widerständen im Sendeteil zum Abgleich der Leistung des HF-Schwingkreises werden Mischerdioden zur Frequenzumwandlung der empfangenen Welle benötigt. Die Abmaße einer Diode betragen $450 \times 240 \times 180 \mu\text{m}^3$. Die Diode wird auf eine Wellenleiterstruktur aufgesetzt, die in Dünnschichttechnik auf ein Keramiksubstrat aufgebracht wurde. Die Kontaktierung wird mit einem ICA-Leitklebstoff hergestellt. Aufgrund der hohen Frequenz im HF-Schaltkreis, im

⁴⁷ Detaillierte Informationen über die Funktionsweise von Abstandsradar ist DETLEFSEN U. A. (1992), SCHMIDTHAMMER U. A. (1995), HUDER, B. (1999, S. 77-92) und KEDERER & DETLEFSEN (2000) zu entnehmen.

Anwendungsbeispiel 77 GHz, ist eine Positioniergenauigkeit des Bauteils von lateral $< 5 \mu\text{m}$ nötig. In Abb. 6-2 ist eine Prinzipskizze des Bauteils sowie des Substrats vor und nach der Montage dargestellt.

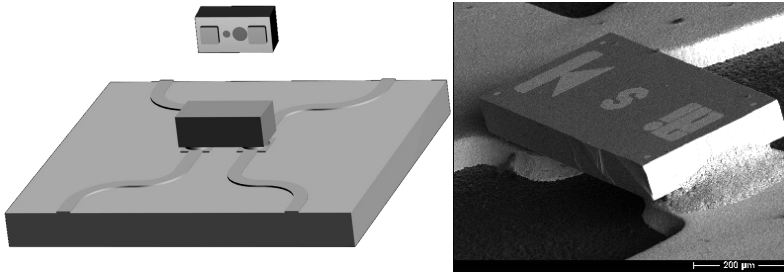


Abb. 6-2: Schematische Montage der Mischdiode und REM-Aufnahme einer platzierten Diode

6.2 Systemkomponenten der Anlage

Die Montageanlage soll im Bereich der Prototypenfertigung eingesetzt werden. Die vorgesehenen Stückzahlen betragen insgesamt mehrere hundert Bauteile. Im Rahmen der Pilotanlage sollen die Handhabungs- und Fügeprozesse beispielhaft realisiert werden, um die relevanten Prozesse für die Serienfertigung zu verifizieren. Dieses Szenario entspricht einer Vorserienfertigung oder auch der Fertigung einer kleinen Serie von Mikrosystemen, die bis jetzt überwiegend in manueller Montage durchgeführt wurden, wobei die Fertigungskosten aufgrund der hohen Personalkosten sehr hoch waren.

Eine Kinematik, die durch ihren großen Arbeitsraum flexibel an unterschiedliche Montageaufgaben angepasst werden kann, kommt aufgrund des Anforderungsprofils der Kleinserien- / Nullserienfertigung zum Einsatz. Periphere Einheiten können somit einfach in den Arbeitsraum eingebracht werden (Abb. 6-3). Um Einflüsse durch Verschmutzungen von außen zu reduzieren, befindet sich die gesamte Anlage unter einer sog. Laminar-Flow-Box. Dieser lokal begrenzte Reinraum ermöglicht das Arbeiten unter Reinraumbedingungen der Klasse 3⁴⁸.

⁴⁸ Qualifizierung der Reinraumbedingungen nach VDI-RICHTLINIE 2083

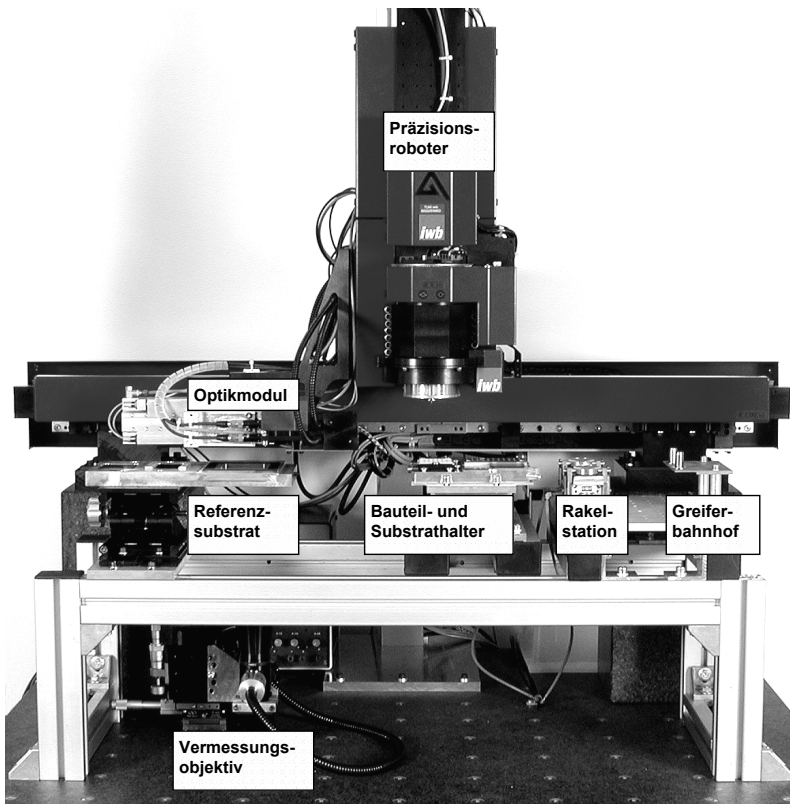


Abb. 6-3: Aufbau der Pilotanlage

6.2.1 Handhabungssystem und Positioneroptik

Als Handhabungsgerät für die Pilotanlage findet ein Hochpräzisionsroboter Verwendung. Das Robotersystem Autoplace 411 der Fa. Sysmelec (SYSMELEC 1999) ist ein kartesisch aufgebautes Handhabungssystem mit den vier Freiheitsgraden X , Y , Z und φ . Die Linearachsen werden von Lineardirektmotoren angetrieben. Zur Lagemessung werden Glasmaßstäbe eingesetzt, deren Abnehmer jeweils direkt an den Schlitten befestigt ist. Der Antrieb der φ -Achse erfolgt mit einem vorgespannten Riemenantrieb. Auch die Winkelstellung der Rotationsachse wird mit einem direkt angebrachten Glasmaßstab bestimmt. Die technischen Daten sind in Tab. 6-1 enthalten. Zur Überprüfung der

Herstellerangaben wurden zusätzlich Vermessungen zur Genauigkeit des Robotersystems durchgeführt, deren Ergebnisse in Abschnitt 6.3.1 dargestellt sind.

Technische Daten Sysmelec Autoplace 411	
Arbeitsraum ($X * Y * Z * \varphi$)	1000 * 150 * 100 mm ³ * 365°
Achsauflösung (X, Y, Z)	0,5 µm
Achsauflösung (φ)	0,001°
Wiederholgenauigkeit (X, Y, Z)	± 1 µm
Wiederholgenauigkeit (φ)	0,002°
Max. Beschleunigungsvermögen (X, Y, Z)	8 m/s ²
Max. Verfahrensgeschwindigkeit (X, Y, Z)	0,8 m/s
Max. Belastung Z-Achse	5 kg

Tab. 6-1: Technische Daten Robotersystem Sysmelec Autoplace 411

Das Handhabungssystem ist auf einer Präzisionsmessplatte als Grundgestell aufgesetzt. Diese dient als steifes und schwingungsdämpfendes Maschinengestell.

Die Messoptik, die zur Positionierung der Bauteile eingesetzt wird, ist mit einer Halterung an der zweiten Achse des Handhabungssystems befestigt, so dass sie in X - und Y - Richtung mit dem Roboter verfährt. An der Halterung ist ein Präzisionsschlitten mit pneumatischem Antrieb für das Einschieben und das Zurückziehen des Optikmoduls zwischen Greifer und Substrat angebracht. Aufgrund des großen Durchmessers der Z -Achse des Robotersystems muss der Präzisionsschlitten den Optikkopf um 125 mm bewegen. Als Anschläge dienen feinjustierbare Öldämpfer, die die Belastungen des Optiksystems beim Anfahren der Endpositionen reduzieren.

6.2.2 Materialbereitstellung

Die Materialbereitstellung wird durch Chip-Trays realisiert, in denen die Bauteile der Anlage in einem definierten Ordnungszustand zur Verfügung gestellt werden. Da die Bauteile lose in den größeren Einzeltaschen des Chip-Trays liegen, sind Zuführtoleranzen von ± 100 µm und $\pm 15^\circ$ beim Greifen der Bauteile auszugleichen. Darüber hinaus kann es bei zu starken Erschütterungen während des Transports und des Bereitstellens der Chip-Trays dazu kommen, dass einzelne

Bauteile mit der Unterseite nach oben in ihrer Tasche liegen, so dass vor dem Greifvorgang eine Lageerkennung der Bauteile nötig ist.

Zwei unterschiedliche Substrate stehen zur Verfügung. Die Bauteile können auf die Originalsubstrate positioniert werden, die mittels einer geometrisch flexiblen Halterungsvorrichtung wiederholgenau im Arbeitsraum des Handhabungssystems fixiert werden. Da hierbei die Positionierung der Substrate über die Außenkanten durchgeführt wird, ist auch die Lage der Substrate Toleranzen unterworfen, die bei der Positionierung der Bauteile ausgeglichen werden müssen.

Das zweite Substrat ist ein spezielles Glassubstrat für Genauigkeitsuntersuchungen (Abb. 6-4 und Abb. 6-8). Da bei der Positionierung der Flip-Chip-Bauelemente die aktiven Strukturen sowie die Referenzstrukturen direkt auf das Substrat gesetzt werden, ist eine nachträgliche genaue Vermessung der Lage der Bauteile an Hand der Referenzstrukturen nicht mehr möglich. Die Lagevermessung an Hand der Außenstrukturen des Bauteils ist ebenfalls nicht möglich, da durch den normalen Dicingprozess (siehe auch Abschnitt 2.5.2) die Kanten der Bauteile zu stark variieren. Aus diesem Grund wird für Genauigkeitsvermessungen bei der Positionierung von Flip-Chip-Bauelementen das Glassubstrat eingesetzt. Dieses ermöglicht eine Lagevermessung der gesetzten Bauelemente relativ zu den auf dem Substrat befindlichen hochpräzisen Referenzstrukturen (Genauigkeit $< 0,1 \mu\text{m}$) mit einer darunter befindlichen Messoptik.

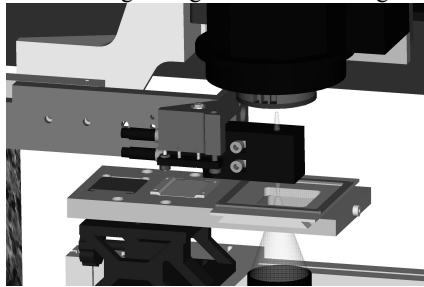


Abb. 6-4: Zur Vermessung eingeschobener Optikkopf über dem Referenzsubstrat

Durch die Befestigung des Optikkopfs an der Y -Achse des Handhabungssystems können gegriffene Bauteile in den Schärfentiefebereich der nach oben gerichteten Kamera mit Hilfe der Z -Achse gebracht werden. Die Bauteile, die sich in den Chip-Trays befinden, sowie die Substrate, die mit Hilfe des nach unten gerichteten Kamerasystems vermessen werden, müssen ebenfalls im Schärfentiefebereich des Optikkopfs liegen. Dies wird durch den Einsatz von höhenverstellbaren Tischen, auf denen sich sowohl die Chip-Tray-, als auch die Substrathalterungen befinden, ermöglicht.

6.2.3 Greiferwechselsystem

Da das Montagesystem als Versuchsanlage für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt werden soll, werden an das Greifersystem hohe Anforderungen bezüglich der Flexibilität gestellt. Deshalb wird ein automatisiertes Greiferwechselsystem eingesetzt. Damit können aufgabenspezifische Greifer und andere für den Montage- und Fügevorgang benötigte Werkzeuge mit dem Handhabungssystem manipuliert werden. In der Pilotanlage werden neben Greifeinsätzen auch Klebstoffstempel für das präzise Aufbringen von Adhäsiven verwendet. Die Geometrie der Greifer und der Klebstoffstempel lehnt sich an die Geometrie von Standard-Tools für Die-Bonder an (SPT 2000). Die einzelnen Greifer und Stempel sind zur Begrenzung der Kräfte in Z-Richtung überfedert in den jeweiligen Wechseleinsätzen gelagert. Die Federkraft kann durch den Austausch von Vorspannfedern mit unterschiedlichen Federraten und Längen sowie durch eine Variation der Vorspannung selbst mit einer Einstellschraube den jeweiligen Ansprüchen angepasst werden. Die eingesetzten Greifer sind Vakuumbreuer, die die Bauteile mit Hilfe von Unterdruck halten. Die Greifer werden vom Hersteller in unterschiedlichen Geometrien, wie Greiferdurchmesser und Sauglochdurchmesser, angeboten und können den jeweiligen Bauteilanforderungen angepasst werden. Bei speziellen Bauteilanforderungen können auch individuelle Greifer in die Wechseleinsätze eingebaut werden.

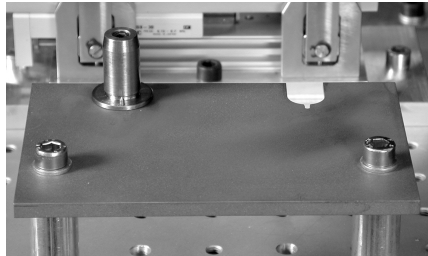


Abb. 6-5: Greiferbahnhof mit zwei Wechseleinsätzen

Die Wechseleinsätze werden im Roboterarbeitsraum in einem Greiferbahnhof bereitgehalten, aus dem sie automatisiert für die jeweiligen Aufgaben entnommen werden können (Abb. 6-5). Die Wechseleinsätze werden im Wechselsystem am Roboter über eine Präzisionspassung und einem Verdrehsicherungspassstift ausreichend wiederholgenau aufgenommen. Lagetoleranzen von mehreren Mikrometern beim Werkzeugwechsel spielen keine Rolle, da die Lage der Werkzeuge jeweils bei der Relativpositionierung neu eingemessen wird. Die Verriegelung der Wechseleinsätze erfolgt ausschließlich über Dauermagnete, die roboterseitig in die Schnittstelle integriert sind. Aufgrund des geringen

Eigengewichts der Wechseleinsätze ist diese Verriegelung ausreichend. Über eine Luftdurchführung werden die Vakuumgreifer mit dem nötigen Unterdruck versorgt.

6.2.4 Sonstige periphere Einrichtungen

Wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, werden die Bauteile mit einem ICA- Leitkleber auf dem Substrat befestigt. Dabei müssen Klebstofftropfen mit einem reproduzierbaren Tropfendurchmesser auf das Substrat aufgebracht werden. Der Klebstoff wird in diesem Fall über einen Stempelprozess appliziert, da das benötigte Tropfenvolumen so gering ist, dass es nicht mit einem Nadeldispenser aufgebracht werden kann und gefüllte Leitklebstoffe für berührungslose Dispenser, die mit Hilfe von Piezoaktoren arbeiten, nicht einsetzbar sind. Dafür wird ein Hartmetallstempel, der über erodierte Spitzen in dem benötigten Kontaktiermuster verfügt, in eine Klebstoffschicht mit definierter Dicke eingetaucht. An den Spitzen lagern sich Klebstofftropfen mit einem bestimmten Volumen an, die durch ein Aufsetzen des Stempels auf das Substrat appliziert werden. Der gesamte Vorgang kann etwa 5 – 8 mal wiederholt werden, bevor sich so viel Restklebstoff an den Klebstoffspitzen angelagert hat, dass der Stempel gereinigt werden muss.

Zur Vorbereitung der definierten Klebstoffschicht dient eine Rakelstation (Abb. 6-6). Der Klebstoff wird in einem kleinen Behälter bevorratet, der an der Unterseite geöffnet ist und dessen Unterkante als plane Abziehkante ausgebildet ist. Dieser Behälter wird auf eine geschliffene Platte gedrückt, in die eine Kavität erodiert ist, die die Tiefe der definierten Klebstoffschicht aufweist. In der Ruheposition befindet sich die Kavität unterhalb des Vorratsbehälters, so dass sie sich mit dem im Vorratsbehälter befindlichen Klebstoff füllt. Soll dieser mit dem Stempel aufgenommen werden, wird die Platte unter dem Vorratsbehälter verschoben, so dass der Klebstoff über die Abziehkante

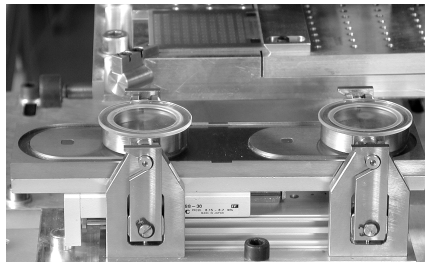


Abb. 6-6: Rakelstation zur Vorbereitung der Klebstoffschicht

an der Unterseite des Behälters über der Kavität abgezogen wird und damit die definierte Klebstoffschicht zur Verfügung stellt, in die der Stempel eintauchen

kann. Nach dem Stempelvorgang wird die Kavität wieder unter den Vorratsbehälter verfahren, damit der Klebstoff nachgefüllt wird.

Zur Vermessung der auf dem Glassubstrat positionierten Bauteile wird ein telezentrisches Zoomobjektiv eingesetzt. Der Vergrößerungsbereich erstreckt sich von 0,16 bis 1,94 -fach, wobei bei $\beta' = 1,94$ die Auflösung bei 84 LP/mm liegt und somit die kleinsten erkennbaren Strukturen eine Größe von 6 μm haben können (NAVITAR 2000). Als Messkamera kommt eine 1/3"- Kamera mit einem CCD-Chip mit 752 x 582 Pixeln zum Einsatz. Die Beleuchtung des Messfelds des Objektivs wird mit einer integrierten koaxialen Auflichtbeleuchtung realisiert, so dass die Optik auch für die Vermessung von stark spiegelnden Oberflächen geeignet ist.

6.3 Verifizierung der Genauigkeit der Anlage

Um die Teileinflüsse der einzelnen Komponenten auf die Gesamtgenauigkeit des Systems zu überprüfen, wurden die Komponenten der Anlage sowie die Messschritte, die zur Durchführung des Montageprozesses nötig sind, in eigenen Messungen auf ihre Genauigkeit hin überprüft.

6.3.1 Vermessung des Handhabungsgeräts

Um die technischen Eigenschaften des Handhabungsgeräts (siehe Tab. 6-1) zu verifizieren, wurden Untersuchungen bezüglich der Wiederholgenauigkeit sowie des Auflösungsvermögens des Roboters in der X -, Y -Ebene durchgeführt. Zur Vermessung wurde ein Kreuzgittermessgerät der Fa. Heidenhain eingesetzt. Dabei handelt es sich um einen Glasmaßstab, der in der Lage ist, Positionen zweidimensional aufzunehmen und damit Bahnkurven von NC-Maschinen oder Robotern zu vermessen (HEIDENHAIN 1999).

Die Vermessung des kleinsten verfahrbaren Inkrements ergab sowohl in X -, als auch in Y -Richtung einen Wert von 0,5 μm , wobei die Untersuchungen mit unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten und -beschleunigungen durchgeführt wurden. Zur Verifizierung der Absolutgenauigkeit wurden zwei Punkte, die in Absolutkoordinaten angegeben waren, angefahren und die bis zu 10 cm langen Messstrecken mehrmals hintereinander in beide Richtungen durchfahren.

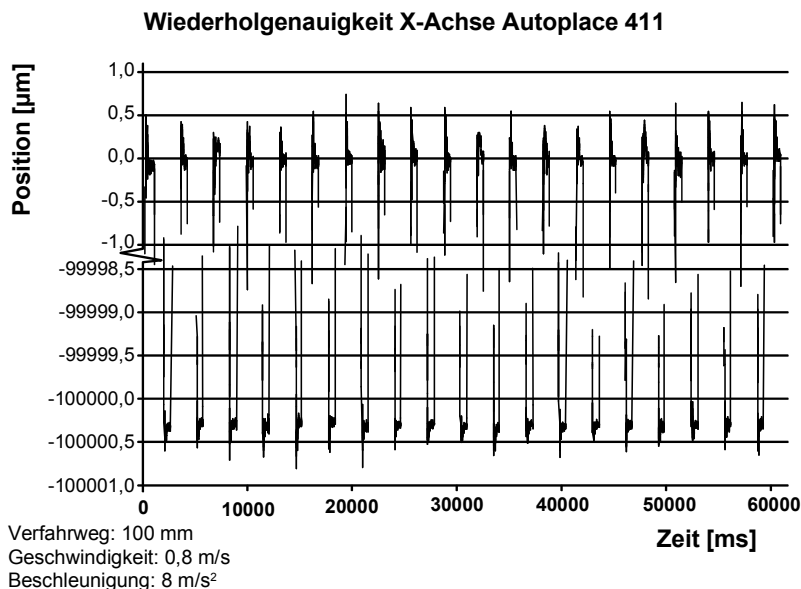


Abb. 6-7: Vermessung der Absolutgenauigkeit des Handhabungsgeräts

Dabei wurde die Position des an der Z-Achse befestigten Messkopfs registriert. Abb. 6-7 stellt die Ergebnisse der Untersuchung für die X-Achse bei der maximalen Verfahrgeschwindigkeit und der maximalen Beschleunigung dar. Die beiden Punkte, die 10 cm auseinander lagen, wurden je 20 mal absolutgenau angefahren. Aus den beiden Ausschnitten der Orts- Zeitkurve des Diagramms lässt sich erkennen, dass die Absolutgenauigkeit unter $1\ \mu\text{m}$ liegt.

6.3.2 Vermessung der weiteren Komponenten

Ein Glassubstrat wird eingesetzt, um die Positioniergenauigkeit der Flip-Chip-Komponenten, sowie die Wiederholgenauigkeit der Bildverarbeitung und der Vermessungsoptiken zu bestimmen. Das Substrat besteht aus einer 2" x 2" großen Kronglasplatte, auf die Chrommarken als Referenzmarken strukturiert

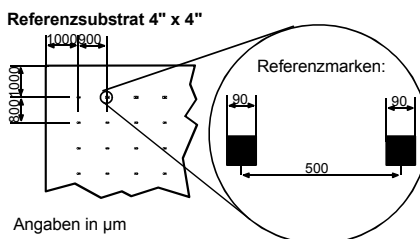


Abb. 6-8: Referenzmarken auf dem Glassubstrat

sind (Abb. 6-8). Diese Marken sind Quadrate, die über eine Kantenlänge von 90 µm verfügen und von Mittelpunkt zu Mittelpunkt 500 µm Abstand aufweisen. Von diesen Referenzmarken, die sowohl der rotatorischen als auch der translatorischen Ausrichtung dienen, ist ein Raster mit insgesamt 100 Marken auf dem Substrat aufgebracht. Nach der Fertigung des Glassubstrates wurde die Genauigkeit der Marken vermessen und mit $\pm 0,1$ µm zertifiziert.

Um die Auflösung und die Wiederholgenauigkeit der Unterseitenkamera zu ermitteln, wurde mit Hilfe der Bildverarbeitung⁴⁹ der Abstand der beiden Quadrate einer Referenzmarke in der größten Vergrößerungsstufe des Vermessungsobjektivs gemessen. Der Mittelpunkt eines Quadrates wird durch die Berechnung seines Schwerpunkts bestimmt. Der direkte Abstand der beiden Punkte lag bei 100 Vermessungen gemittelt bei 184,35 Pixeln, wobei die Spannweite zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert 0,03 Pixel betrug, mit einer Standardabweichung von $\pm 0,01$ Pixeln (3σ). Daraus ergibt sich der Umrechnungsfaktor für die Berechnung der Messgrößen in µm aus

$$(6-1) \quad \text{Umrechnungsfaktor} = \frac{\text{Abstand der Marken} [\mu\text{m}]}{\text{Anzahl der Pixel}} = 4,34 \frac{\mu\text{m}}{\text{Pixel}}.$$

Dieser Umrechnungsfaktor wurde sämtlichen Vermessungen, die mit Hilfe der Unterseitenkamera durchgeführt wurden, zugrundegelegt. Um die Wiederholgenauigkeit der Kamera bei der Erkennung sowohl des Substrats als auch eines auf dem Substrat befindlichen Bauteils zu überprüfen, wurde jeweils der Mittelpunkt der Referenzmarken im Abstand von einer Sekunde 100 mal gemessen. Die erreichte Standardabweichung lag bei $\pm 0,08$ µm (3σ), was weit unterhalb der optischen Auflösung liegt.

Die gleichen Vermessungen (je 100 mal) wurden für die Kamera-Objektiveinheiten durchgeführt, die sich in der Messoptik befinden. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für alle weiteren Angaben in Bezug auf Vermessungen mit Hilfe des Optikmoduls und sind der Tab. 6-2 zu entnehmen.

⁴⁹ Bei allen Versuchen kam das Bildverarbeitungssystem NeuroCheck 4.0 zum Einsatz.

	Kamera 1 (nach unten)	Kamera 2 (nach oben)
Abstand der Marken [Pixel]	269,83	269,84
Spannweite [Pixel]	0,11	0,12
Standardabweichung 3σ [Pixel]	$\pm 0,04$	$\pm 0,04$
Umrechnungsfaktor [$\mu\text{m}/\text{Pixel}$]	2,96	2,96
Wiederholgenauigkeit Erkennung Bauteil Standardabweichung 3σ [μm]	$\pm 0,16$	$\pm 0,18$

Tab. 6-2: Ergebnisse der Genauigkeitsvermessungen des Optikmoduls

6.3.3 Vermessung der einzelnen Handhabungsschritte

Um die Fehlerquellen, die bei einem Montageprozess auftreten, einzeln zu erfassen, wurde der gesamte Prozess in einzelne Schritte zerlegt. Sämtliche Versuche wurden 100 mal durchgeführt und danach statistisch ausgewertet.

◆ Wiederholgenauigkeit Schlitten

Der Schlitten wird in die Messposition eingeschoben. Nach einer Wartezeit von 1 s oder 10 s erfolgt die Bildaufnahme des Substrats, wobei der Mittelpunkt der Referenzmarke ermittelt wird. Danach wird die Optik wieder aus der Fügeachse herausgezogen. Die unterschiedlich langen Wartezeiten vor der Bildaufnahme ermöglichen Aussagen über Setzungsvorgänge des Dämpfers nach dem Anfahren des Schlittenanschlags.

◆ Einfluss der Wiederholgenauigkeit des Schlittens auf die Bildüberlagerung

Ein Bauteil befindet sich am Greifer in der oberen Messposition. Die Messoptik wird in die Messposition eingeschoben und die Lage des Bauteils am Greifer, sowie die Lage der Referenzmarken des Substrates werden ermittelt und überlagert. Die Differenz der beiden Positionen wird errechnet, um eine Aussage über die Empfindlichkeit der Vermessungen im Bezug auf Lagetoleranzen des Optikkopfs zu gewinnen.

◆ Wiederholgenauigkeit der Z-Achse in den Koordinaten X und Y

Mit einem gegriffenen Bauteil verfährt die Z-Achse von der oberen Messposition über das Glassubstrat, so dass sich die Referenzmarken sowohl des Substrats als auch die des Bauteils innerhalb des Schärfentiefebereichs

der Unterseitenkamera befinden. Der direkte Abstand von der Mitte des Bauteils bis zur Mitte der Referenzmarken wird vermessen. Danach verfährt die Achse wieder in die obere Position. Das Ergebnis der Vermessung ergibt die stochastische Toleranz der Z-Achse in den Koordinaten X und Y .

♦ **Einfluss Ein-/ Ausfahren des Optikkopfs auf X - / Y -Lage**

Dieser Vorgang wird ebenso wie die Vermessung der Wiederholgenauigkeit der Z-Achse durchgeführt, nur dass in der oberen Lage des Greifers die Messoptik jeweils aus- und eingeschoben wird. Das Ziel dabei ist, eventuell entstehende Lagetoleranzen der X - oder Y -Achse, die durch die Impulse beim Verfahren der Messoptik entstehen, zu ermitteln.

Die Ergebnisse sind in Tab. 6-3 zusammengefasst. Daraus geht hervor, dass nach dem Einfahren des Optikkopfs ein gewisser Setzungsvorgang des Schlittens stattfindet, bis er in einer endgültigen Position steht. Die stochastischen Lagetoleranzen beim Verfahren der Z-Achse liegen im Bereich der Messgenauigkeit des Systems.

	Lage im Bildfenster [μm]		Spannweite [μm]		Standardabweichung 3σ [μm]	
	X -Wert	Y -Wert	X -Wert	Y -Wert	X -Wert	Y -Wert
Wiederholgenauigkeit Schlitten 1 s Pause	1664,68	726,82	2,82	11,62	$\pm 0,91$	$\pm 3,78$
Wiederholgenauigkeit Schlitten 10 s Pause	1662,09	726,44	1,6	4,00	$\pm 0,79$	$\pm 1,45$
Einfluss der Wiederholgenauigkeit des Schlittens auf die Bildüberlagerung	1663,04	726,63	1,1	0,9	$\pm 0,38$	$\pm 0,34$
Wiederholgenauigkeit der Z-Achse	29,23	-39,53	0,36	0,33	$\pm 0,63$	$\pm 0,55$
Einfluss Ein- und Ausfahren des Optikkopfs auf die X- und Y-Lage	31,45	-37,77	0,38	0,45	$\pm 0,62$	$\pm 0,74$

Tab. 6-3: Ergebnisse der Vermessungen der Einzelschritte
(Mittelwerte aus je 100 Messungen)

6.4 Realisierter Montageprozess

6.4.1 Bestimmung der Kalibrierparameter

Die Bestimmung der Kalibrierparameter muss nur einmal nach der Inbetriebnahme des Robotersystems durchgeführt werden und dient dazu, Faktoren für die Umrechnung des Kamerakoordinatensystems in das Roboterkoordinatensystem zu ermitteln. Für den Winkelversatz zwischen den Koordinatensystemen wird der Winkel α_{BV-R} benötigt. Der Umrechnungsfaktor ξ_{BV-R} gibt die unterschiedliche Skalierung der Koordinatensysteme an und ψ_{BV-R} stellt einen Umrechnungsfaktor für die Winkelangaben in der Robotersteuerung und dem Bildverarbeitungssystem dar.

Für die Ermittlung der Faktoren α_{BV-R} und ξ_{BV-R} wird das Handhabungssystem jeweils in X - und in Y -Richtung um einen festgelegten Wert Δx_R bzw. Δy_R bewegt. Zwischen den Verfahrensschritten wird jeweils der Mittelpunkt einer Referenzmarke auf dem Substrat erfasst. Aus dem bekannten Verfahrenswert des Roboters Δx_R und den beiden mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems bestimmten Punkten $P_1(x_{BV1}, y_{BV1})$ und $P_2(x_{BV2}, y_{BV2})$ können die Werte mit

$$(6-2) \quad \xi_{BV-R} = \frac{\Delta x_R}{\sqrt{(x_{BV1} - x_{BV2})^2 + (y_{BV1} - y_{BV2})^2}} \left[\frac{\text{Inkrement}}{\text{Pixel}} \right]$$

und

$$(6-3) \quad \alpha_{BV-R} = \arctan \frac{y_{BV2} - y_{BV1}}{x_{BV2} - x_{BV1}}$$

berechnet werden.

Für die Ermittlung des Umrechnungsfaktors für die Rotationsachse wird ein Referenzbauteil mit dem Greifer aufgenommen und seine Winkellage β_{BV1} am Greifer bestimmt. Nach dem Verdrehen des Greifers um $\Delta \varphi_R$ wird eine zweite Winkellage β_{BV2} des Bauteils am Greifer ermittelt. Der Umrechnungsfaktor ψ_{BV-R} für die Inkrement- Winkelumrechnung ergibt sich aus

$$(6-4) \quad \psi_{BV-R} = \frac{\Delta \varphi_R}{\beta_{BV2} - \beta_{BV1}} \left[\frac{\text{Inkrement}}{\circ} \right].$$

6.4.2 Montageablauf

Vor der Positionierung des Bauteils muss der Klebstoff auf das Substrat aufgebracht werden. Dafür wird der Wechseleinsatz mit einem Stempelsatz aus dem Greiferbahnhof entnommen. Der Stempel verfügt über zwei erodierte Spitzen, die dem aufzubringenden Klebstoffmuster entsprechen. Die Spitzen haben einen Abstand von 350 μm , eine Länge von 350 μm und einen Durchmesser von jeweils 120 μm . Nach der Entnahme aus dem Greiferbahnhof wird der Stempel in die auf 140 μm abgezogene Klebstoffschicht an der Rakelstation eingetaucht. Über dem Substrat wird die Messoptik zwischen Stempel und Substrat eingefahren und die Winkellage des Stempels wird relativ zur Winkellage des Substrats vermessen und korrigiert. Durch eine zweite Bildaufnahme wird die korrigierte Winkellage überprüft und bei Bedarf wiederholt korrigiert. Nach dieser Korrektur folgt die iterative Lagekorrektur in X- und Y-Richtung. Wenn die erforderliche Genauigkeit erreicht ist, wird die Optik zurückgezogen und die an den Spitzen anhaftenden Klebstofftropfen werden auf das Substrat appliziert. Durch das Aufstempeln werden zwei Klebstofftropfen mit je ca. 200 μm Durchmesser und einem Abstand von 350 μm auf das Substrat aufgebracht. Danach wird der Stempel wieder im Greiferbahnhof abgelegt.

Um das Bauteil aus dem Chip-Tray zu entnehmen, wird ein Wechseleinsatz mit Vakuumgreifer mit einem Greiferflächendurchmesser von 350 μm und einem Sauglochdurchmesser von 150 μm aufgenommen. Über dem Chip-Tray wird mit Hilfe des in die Fügeachse eingeschobenen Messkopfes ermittelt, ob ein Bauteil in der Tasche des Chip-Trays vorhanden ist und ob es richtig liegt. Falls die Erkennung des Bauteils ein negatives Ergebnis liefert, verfährt das Robotersystem zur nächsten Tasche, an der wieder eine Prüfung durchgeführt wird. Wird das Bauteil erfolgreich erkannt, erfolgen eine Relativvermessung des Greifers zum Bauteil und nach der Berechnung des Korrekturvektors der benötigte Korrekturschritt. Auch hier kann die Korrektur iterativ erfolgen, allerdings wird für die Aufnahme des Bauteils mit dem Greifer keine so hohe Genauigkeit wie bei der Positionierung des Bauteils auf dem Substrat benötigt, so dass üblicherweise nach einem Korrekturschritt die Lage des Greifers genau genug ist, um das Bauteil aufzunehmen.

Nach der Entnahme des Bauteils aus dem Chip-Tray verfährt der Roboter wieder über das Substrat, wo der schon aus der Positionierung des Stempels bekannte iterative Korrekturprozess zur Winkel- und Lagekorrektur durchgeführt wird.

Nach dem Zurückziehen der Messoptik aus der Fügeachse wird das Bauteil auf die Klebstofftropfen aufgesetzt, die sich auf dem Substrat befinden. Der gesamte Positionierablauf ist auch in Tab. 6-4 dargestellt.

Die Aushärtung des Klebstoffs geschieht thermisch mit Hilfe eines Aushärteofens. Die Lageänderungen des positionierten Bauteils durch die Aushärtung liegen unter $1\text{ }\mu\text{m}$ (JEREMIAS 1997).

6.4.3 Montageergebnisse

Für die Untersuchung der Gesamtgenauigkeit des Systems wurden Bauteile auf das Glassubstrat abgesetzt, auf das eine dünne Schicht wiederablösbaren Klebstoffs aufgebracht wurde. Auf den Stempelprozess des Klebstoffs konnte damit verzichtet werden. Es wurden 100 Bauteile abgesetzt und vermessen. Die Abbruchgrenze für die iterative Ausrichtung wurde mit einer Genauigkeit von $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ angegeben.

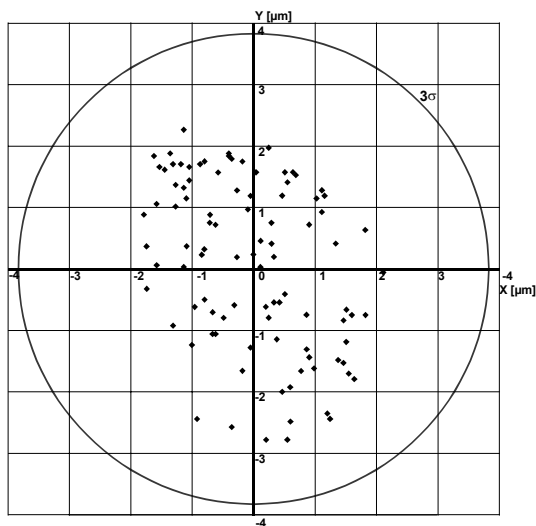


Abb. 6-9: Vermessung positionierter Bauelemente

Die gefügten Bauteile wurden mit der Unterseitenkamera vermessen. Die Lage der Bauteile sowie des Substrats wurde durch die Vermessung des Mittelpunkts der jeweiligen Referenzmarken bestimmt. Bei einer Standardabweichung von 3σ betrug die Positioniergenauigkeit $\pm 3,84\text{ }\mu\text{m}$. Abb. 6-9 gibt die Lage der

positionierten Bauteile auf dem Substrat wieder, wobei der Kreis als die errechnete dreifache Standardabweichung zu verstehen ist.

Wird der Gesamtablauf in einzelne Schritte aufgeteilt, kann über eine Messung der jeweils benötigten Zeit eine Abschätzung zur möglichen Taktzeit getroffen werden. Der gesamte Montageprozess wurde dafür in folgende Schritte unterteilt:

Klebstoffapplikation		Bauteilaufnahme		Bauteilpositionierung	
Schritt	Zeit [s]	Schritt	Zeit [s]	Schritt	Zeit [s]
Aufnahme Stempel aus Greiferbahnhof	4,0	Aufnahme Greifer aus Greiferbahnhof	4,0		
Anfahren Raketstation	1,2				
Klebstoffaufnahme	2,8				
Anfahren Substrat	1,0	Anfahren Chip-Tray	1,1	Anfahren Substrat	0,8
Einfahren der Optik	0,5	Einfahren der Optik	0,5	Einfahren der Optik	0,5
Bildaufnahme, -auswertung und Berechnung des Winkelversatzes	0,3	Bildaufnahme, -auswertung und Berechnung des Versatzvektors	0,3	Bildaufnahme, -auswertung und Berechnung des Winkelversatzes	0,3
Winkelkorrektur	0,2	Lagekorrektur	0,2	Winkelkorrektur	0,2
Bildaufnahme, -auswertung und Berechnung des Versatzvektors	0,3	Bildaufnahme, -auswertung und Berechnung des Versatzvektors	0,3	Bildaufnahme, -auswertung und Berechnung des Versatzvektors	0,3
Lagekorrektur	0,2			Lagekorrektur	0,2
Bildaufnahme, -auswertung und Berechnung des Versatzvektors	0,3			Bildaufnahme, -auswertung und Berechnung des Versatzvektors	0,3
Lagekorrektur	0,2			Lagekorrektur	0,2
Bildaufnahme, -auswertung und Berechnung des Versatzvektors	0,3			Bildaufnahme, -auswertung und Berechnung des Versatzvektors	0,3
Rückziehen der Optik	0,5	Rückziehen der Optik	0,5	Rückziehen der Optik	0,5
Applizieren des Klebstoffs	2,0	Aufnahmen des Bauteils	2,2	Absetzen des Bauteils	2,2
Ablegen des Stempels im Greiferbahnhof	4,0			Ablegen des Greifers im Greiferbahnhof	4,0
Summe Abschnitt:	17,8		9,1		9,8
Summe Gesamt:					35,9

Tab. 6-4: Ermittlung der Prozesszeit für die einzelnen Prozessschritte

Die Auswertung der obigen Tabelle zeigt, dass der Hauptanteil der gesamten Prozesszeit aus unproduktiven Verfahrensschritten entsteht, wie z.B. der Aufnahme und dem Ablegen der Greifer aus dem Greiferbahnhof. Darüber hinaus ergibt sich bei den Messungen, dass für die Winkelkorrektur durchschnittlich ein Iterationsschritt ausreicht, während für die Lagekorrektur über dem Substrat durchschnittlich zwei Iterationsschritte benötigt werden. Zur Bauteilaufnahme aus dem Chip-Tray muss der Winkel nicht korrigiert werden, da der Greifer über eine rotationssymmetrische Greiffläche verfügt. Ebenso ist durch die geringere Genauigkeitsanforderung bei der Bauteilaufnahme normalerweise nur ein Iterationsschritt zur Lagerkorrektur erforderlich.

Mit einer günstigeren Anordnung der einzelnen peripheren Teile der Anlage und eine Optimierung der Verfahrensgeschwindigkeiten und der Fahrwege des Handhabungssystems ist eine Verringerung von ca. 50 % im Bereich Nebenzeiten erreichbar, da die oben angegebenen Zeiten für einen zeitlich und geometrisch nicht optimierten Ablauf gemessen wurden. Damit verringert sich die Gesamtzeit für die Montage eines Bauteils, bestehend aus Klebstoffapplikation, Bauteilaufnahme und Bauteilpositionierung, auf ca. 22 Sekunden.

6.5 Bewertung des Systems

6.5.1 Technologische Bewertung

Mit dieser Montageanlage wurde eine hochgenaue automatisierte Montage von Flip-Chip-Bauelementen aufgebaut. Die erreichbare Montagegenauigkeit für Bauteile mit einer Kantenlänge von 400 μm liegt bei $\pm 3,84 \mu\text{m}$ (3σ). Diese Anlage übertrifft damit die derzeit auf dem Markt befindlichen Die-Bonder⁵⁰ um das drei bis vierfache in der Positioniergenauigkeit. Das Antriebssystem des verwendeten Handhabungsgeräts entspricht mit seinen Lineardirektantrieben, Direktglasmaßstäben und einer Achsauflösung von 0,5 μm dem der Hochpräzisions-Die-Bonder. Deswegen kann die Steigerung der Positioniergenauigkeit gegenüber den Hochpräzisions-Die-Bondern darauf zurückgeführt werden, dass eine relative Positionierstrategie anstatt der absoluten Positionierstrategie verwendet wurde.

⁵⁰ Die-Bonder, die für Präzisionsmontage von elektronischen Chips optimiert wurden (ESEC 2000, DATACON 2001).

Weil der Arbeitsraum des eingesetzten Robotersystems groß ist, können unterschiedliche periphere Einrichtungen in den Arbeitsraum des Systems eingebracht werden. Damit können unterschiedliche Anforderungen bezüglich der Bauteilzuführung, der Substratbereitstellung und Zusatzeinrichtungen wie Messtechnik und Fügechnik erfüllt werden. Der Einsatz eines automatisierten Greiferwechselsystems, dessen zwangsläufige Genauigkeitstoleranzen aufgrund der Relativpositionierstrategie keine Rückwirkung auf die Positioniergenauigkeit des Systems haben, ermöglicht die Erfüllung unterschiedlichster Anforderungen bezüglich Greifertechnik und Fügechnologie.

Die verwendete Positionieroptik ist als eigenständiges Modul ausgebildet, das aus der Pilotanlage herausgelöst und sowohl in einer anderen automatisierten Anlage, als auch in einer manuellen Positioniervorrichtung eingesetzt werden kann. Bei der Verwendung in einer manuellen Positioniervorrichtung ergeben sich zweierlei Möglichkeiten: Erstens kann ein Bildverarbeitungssystem als Auswerteeinheit dienen. Zweitens können die Videosignale der beiden Messkameras mit Hilfe eines Videomischpults übereinander gelegt und auf einem Bildschirm dargestellt werden, um eine Online-Positionierung des Bauteils zum Substrat durchzuführen. Damit ist insbesondere die Kernkomponente des Systems, die Positionieroptik, die den überwiegenden Einfluss auf die hohe Positioniergenauigkeit hat, flexibel einsetzbar.

6.5.2 Wirtschaftliche Bewertung

Um eine wirtschaftliche Bewertung der Anlage durchzuführen, ist ein Vergleich mit einem auf dem Markt erhältlichen vergleichbaren System nötig. Präzisions-Die-Bonder können dafür nicht herangezogen werden, da deren Positioniergenauigkeit den Anforderungen nicht genügen. Ein Flip-Chip-Bonder, der aus dem Bereich der Halbleitertechnik (siehe Abschnitt 2.6.1) entwickelt wurde, entspricht am ehesten den Anforderungen und kann somit als Anlage mit vergleichbarer Genauigkeit herangezogen werden.

Die aus dem Abschnitt 6.4.3 optimierten Taktzeiten für den realisierten Montageprozess bilden die Grundlage bei der Berechnung. Die gegenübergestellte Taktzeit für die Montage eines Bauteils mit dem Flip-Chip-Bonder beträgt ca. 15 s (SÜSS 1999).

Für die realisierte Montageanlage werden folgende Investitionskosten veranschlagt:

Robotersystem inkl. Gestell	€	140.000,-
Messoptikmodul	€	15.000,-
Greiferwechselsystem mit Greifern und Stempeln	€	1.700,-
Bildverarbeitungssystem	€	12.500,-
Peripherieeinrichtung (Rakelstation, Halterungen)	€	6.000,-
Beleuchtungssystem	€	1.300,-
Integrations- / Engineeringkosten	€	<u>15.000,-</u>
Gesamt	€	<u>193.500,-</u>

Als Investitionskosten für den Flip-Chip-Bonder (SÜSS 2000) können insgesamt ca. € 600.000,- veranschlagt werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass mit der Anlage unterschiedliche Fügeverfahren, wie z.B. auch das TC-Bonden (siehe Abschnitt 2.4.2.3), realisiert werden können. Dafür werden zum Teil spezielle technische Vorrichtungen benötigt.

Darüber hinaus sind in der Anlage auch sicherheitstechnische Schutzeinrichtungen integriert, die in einer Versuchsanlage nicht notwendig sind. Aus diesem Grund werden die Investitionskosten in der Wirtschaftlichkeitsberechnung für den Die-Bonder reduziert und mit € 500.000,- angesetzt. Unter diesen Voraussetzungen ist ein Vergleich mit der realisierten Pilotanlage zulässig.

Als Grundlage für den Vergleich der beiden Anlagen dient die Berechnung des Maschinenstundensatzes nach VDI-RICHTLINIE 3258A und VDI-RICHTLINIE 3258B und dem daraus folgenden Arbeitsstundensatz. Bei einer Nutzungsdauer von 5 Jahren wird ein Zinssatz von 10 % angenommen. Um die Raumkosten für die Geräte, die im Reinraum betrieben werden müssen, zu ermitteln, wurden die jährlichen Betriebskosten des Reinraums mit 550 €/m² verwendet (HÖHN 2001, S. 148). Energiekosten werden über 0,10 €/kWh angesetzt und Instandhaltungskosten mit jährlich 7 % der Investitionskosten kalkuliert. Die Einsatzzeit im Zweischichtbetrieb bei 80 % Anlagenausnutzung liegt bei ca. 2.400 h. Aus den durchschnittlichen Taktzeiten der Anlage und dem Arbeitsstundensatz berechnen sich die Stückkosten pro Bauteil (Tab. 6-5).

	Formelzeichen / Formel	Einheit	Pilotanlage	Flip-Chip-Bonder
Wiederbeschaffungswert	W_{BW}	€	193.500,00	500.000,00
Nutzungsdauer	N_D	a	5	5
Arbeitszeit im Jahr	E_Z	h/a	2.400,00	2.400,00
Verfügbarkeit	V		80 %	80 %
Abschreibekosten	$K_A = \frac{W_{BW}}{N_D * E_Z * V}$	€/h	16,13	41,67
Zinssatz	Z		10 %	10 %
Kalk. Zinskosten	$K_Z = \frac{W_{BW} * Z}{2 * E_Z * 100 * V}$	€/h	4,03	10,42
Flächenbedarf	F_B	m²	8	8
Betriebskosten	B_K	€/m²a	550,00	550,00
Raumkosten	$K_R = \frac{F_B * B_K}{E_Z}$	€/h	1,83	1,83
Nennleistung	P_N	kW	5	5
Strompreis	K_{St}	€/kWh	0,10	0,10
Nutzungsfaktor	N_F		60 %	60 %
Energiekosten	$K_E = P_N * K_{St} * N_F$	€/h	0,30	0,30
Instandhaltungskostensatz	I_{KS}		7 %	7 %
Instandhaltungskosten	$K_I = \frac{W_{BW} * I_{KS}}{N_D * 100 * E_Z * V}$	€/h	1,13	2,92
Maschinenstundensatz	$K_{MH} = K_A + K_Z + K_R + K_E + K_I$	€/h	23,42	57,13
Anteilige Bedienerkosten	K_B	€/h	10,00	10,00
Arbeitsstundensatz	$K_{AH} = K_{MH} + K_B$	€/h	33,42	67,13
Spezifische Montagekosten pro Sekunde	$K_S = \frac{K_{AH}}{3600}$	€/s	0,00928	0,01865
Taktzeit Bauteil	T_T	s/BE	22	15
Stückkosten pro BE	$K_{St} = T_T * K_S$	€/BE	0,204	0,280

Tab. 6-5: Vergleich der Montagekosten zwischen der Pilotanlage und einem verfügbaren Flip-Chip-Bonder

Die Berechnungen ergeben, dass trotz einer höheren Taktzeit die Stückkosten pro Bauteil auf der Pilotanlage um ca. 27 % kostengünstiger gefertigt werden können.

6.5.3 Einsatz in stückzahlflexibler Montage

Wie in der technologischen Bewertung des Systems schon angesprochen, wird durch die Ausführung des Optikkopfs als eigenständiges Modul der Einsatz der Optik als Kernkomponente während eines gesamten Lebenszyklus eines Produkts in der Mikrosystemtechnik unterstützt (Abb. 6-10).

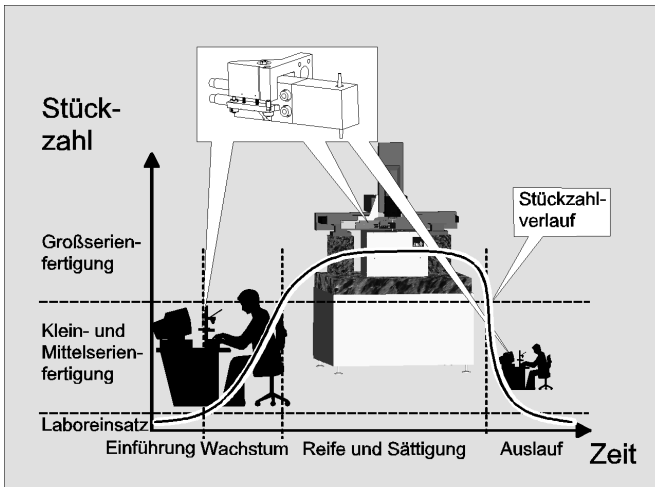


Abb. 6-10: Einsatz des Optikmoduls als Kernkomponente bei der Montage im Verlauf des Lebenszyklus eines Produkts

Mit dem Einsatz der Optik im Laborbetrieb können in der manuellen Montage die notwendigen Prozesse entwickelt und erste Funktionsmuster aufgebaut werden. Unter Beibehaltung dieser Prozesse und der dafür notwendigen Schlüsselkomponenten kann die Optik in ein Handhabungssystem für die Fertigung der Nullserie bzw. der Vorserie adaptiert werden. An dieser Anlage wird die Bildverarbeitung programmiert und optimiert und schließlich Untersuchungen zum automatisierten Montagevorgang durchgeführt. Auch Voruntersuchungen für den Serienanlauf können auf dieser Anlage stattfinden. Bei steigenden Stückzahlen wird die Optik in eine vollautomatisierte Anlage integriert. Dabei werden weitgehend die gleichen Bildverarbeitungssysteme eingesetzt, so dass schon entwickelte Programme übernommen werden können. Die vollautomatisierte Anlage ist über die Gestaltung des Arbeitsraums, die Optimierung der Verfahrenswege, die Wahl der Zu- und Abführtechnik und durch eine Parallelisierung von Arbeitsschritten auf die Ausbringung hoher

Stückzahlen optimiert, so dass eine möglichst kostengünstige Fertigung großer Stückzahlen ermöglicht wird.

Werden nur kleine und mittlere Stückzahlen benötigt, ist der Aufbau einer vollautomatisierten Anlage aufgrund der hohen Investitionskosten unrentabel. Durch die Relativpositionierstrategie und den Modulcharakter der Optik wird aber der Einsatz eines kostengünstigen Handhabungssystems, mit dem auch kleine Stückzahlen wirtschaftlich mit hoher Genauigkeit gefertigt werden können, realisierbar.

7 Zusammenfassung

Für die Montage von unterseitenstrukturierten Bauelementen gibt es im Bereich der Mikrosystemtechnik eine Vielzahl von Anwendungen. Sowohl die Ausrichtung ganzer Wafer zueinander, als auch die Montage einzelner Bauelemente, die hochpräzise mit ihrer Unterseite zu Strukturen auf einem Substrat ausgerichtet werden müssen, sind typische Aufgabenstellungen. Weitere Beispiele sind der schichtweise Aufbau von chemischen und biologischen Reaktoren oder die Montage von Mikrogetrieben, bei denen gegenüberliegende Strukturen zueinander ausgerichtet werden müssen. Eine in der MST sehr häufige Aufgabenstellung ist die Montage von unterseitenstrukturierten Halbleiterbauelementen, sog. Flip-Chips, bei der insbesondere die Genauigkeitsanforderungen an die Positioniergenauigkeit der Bauelemente im Bereich der Hochfrequenztechnik oder der optischen Datenübertragung extrem hoch sind.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Positionierstrategien, die besonders für die Montage von Halbleiter-Bauelementen geeignet sind, entwickelt und die dabei auftretenden Toleranzen untersucht und bewertet. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Konfigurationen aus Handhabungssystemen und Positionierstrategien auf ihre Eigenschaften bezüglich Geschwindigkeit, Genauigkeit und Aufgabenflexibilität, sowie Investitionskosten hin analysiert.

Nach der Bewertung der Positionierstrategien wurde beispielhaft ein Optikmodul entwickelt, das den Zielvorstellungen eines hochflexiblen Systems, das in der manuellen, der halbautomatischen und der vollautomatischen Montage für die hochpräzise Positionierung eingesetzt werden kann, erfüllt. Dabei handelt es sich um ein Optikmodul mit zwei diametralen Strahlengängen. Diese wird zwischen ein gegriffenes Bauelement und ein Substrat eingeschoben und eine Überlagerung der Bilder findet statt. Dadurch wird eine Relativpositionierung des Bauteils zum Substrat ermöglicht, bei der direkt über dem Fügeort ein geschlossener Lageregelkreis aufgebaut werden kann. Dies ermöglicht eine Reduzierung der äußeren Einflüsse, wie thermische Dehnungen oder Bereitstellungstoleranzen, und erlaubt eine genauere Positionierung, da nicht die Absolutpositioniergenauigkeit der Antriebssysteme sondern die Achsauflösung für die Endpositioniergenauigkeit ausschlaggebend ist.

Für die Realisierung eines derartigen Optikmoduls wurde eine methodische Untersuchung der zur Verfügung stehenden optischen Varianten durchgeführt. Dabei wurde ein optischer Aufbau mit zwei parallel angeordneten Objektiven,

deren Strahlengang über ein Halbwürfelpisma nach oben und unten jeweils um 90° abgelenkt wird, als bestes Optikkonzept ermittelt. Bei der Bewertung wurden eine hohe optische Qualität und eine hohe Einsatzflexibilität als vorrangige Ziele gewichtet.

Für den Aufbau einer Pilotanlage wurde eine derartige Optik realisiert. Es wurde ein Optikkopf entwickelt, der über kompakte äußere Maße verfügt und einen großen Arbeitsabstand bei hoher optischer Qualität verfügt. Weil unterschiedliche Beleuchtungseinrichtungen für die beiden Objektfelder der Optik, jeweils ein koaxiales Auflicht und ein LED-Ringlicht, die getrennt einstellbar sind, integriert wurden, kann für unterschiedliche Montageszenarien die optimale Objektfeldbeleuchtung realisiert werden. Dies ist für eine hohe Messqualität beim Einsatz eines automatischen Bildverarbeitungssystems von großer Bedeutung.

Mit der Pilotanlage, die aus einem Hochpräzisionsroboter, dem entwickelten Optikmodul, einem Greiferwechselsystem, sowie peripheren Einrichtungen wie Chip-Tray-Halter, Substrat-Halter und einer Rakelstation zur Erzeugung definierter Klebstoffschichten besteht, wurde ein vollautomatisierter Montagevorgang eines anspruchsvollen Flip-Chip-Prozesses in der MST am Beispiel von Kfz- Radarabstandssensoren realisiert. Die Bauteile wurden mit einem elektrisch leitfähigen Klebstoff, der mit einem Klebstoffstempels auf das Substrat appliziert wurde, befestigt und kontaktiert. Die Genauigkeitsanforderungen lagen dabei bei $\pm 5 \mu\text{m}$ (3σ).

Um die Positioniergenauigkeit der Anlage für den Anwendungsfall zu vermessen, wurden in vorgelagerten Untersuchungen die Einzelschritte des Montageprozesses und die Gesamtgenauigkeit mit Hilfe eines speziellen Glassubstrats ermittelt. Versuche zur Endpositioniergenauigkeit ergeben, dass die Pilotanlage eine Gesamtpositioniergenauigkeit von $\pm 3,84 \mu\text{m}$ (3σ) erreicht.

Durch den Aufbau der Positionieroptik als eigenständiges Modul kann dieses auch unabhängig von der vorgestellten Pilotanlage eingesetzt werden. Dabei ist der Einsatz sowohl in einer manuellen Montageanlage, bei der die beiden Videosignale überlagert auf einem Monitor dargestellt werden, als auch in einem vollautomatisierten Montagesystem im Serieneinsatz möglich. Damit eignet sich die entwickelte Optik als Kernkomponente innerhalb des Lebenszyklus eines Produktes in allen Ausbaustufen einer Montageanlage.

Die Entwicklung dieses Optikmoduls kann als Ausgangspunkt für weitere Forschungen im Bereich der automatisierten Montage von Mikrosystemen verwendet werden. Dabei sollte durch einen möglichst modularen Aufbau der Montagesysteme eine optimale und kostenoptimierte Anpassung der Systeme an die Montageaufgaben der Anwender gewährleistet sein. Ein echter Durchbruch der anwenderorientierten Mikrosystemtechnik ist nur dann erreichbar, wenn weiter konsequent an der Entwicklung solcher Montageanlagen gearbeitet wird, mit denen der Anteil der Montagekosten an den Gesamtkosten eines Mikrosystems besonders bei kleinen und mittleren Stückzahlen reduziert werden kann.

Anhang

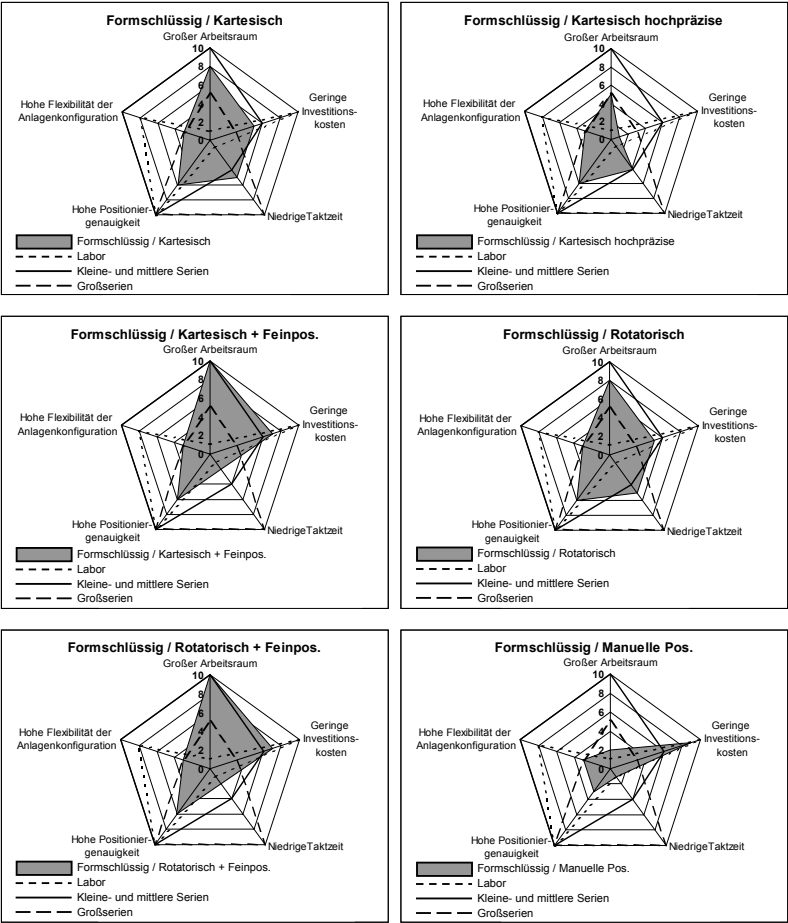


Abb. A-1: Bewertung der Kombinationen formschlüssige Positionierung mit unterschiedlichen Handhabungssystemen

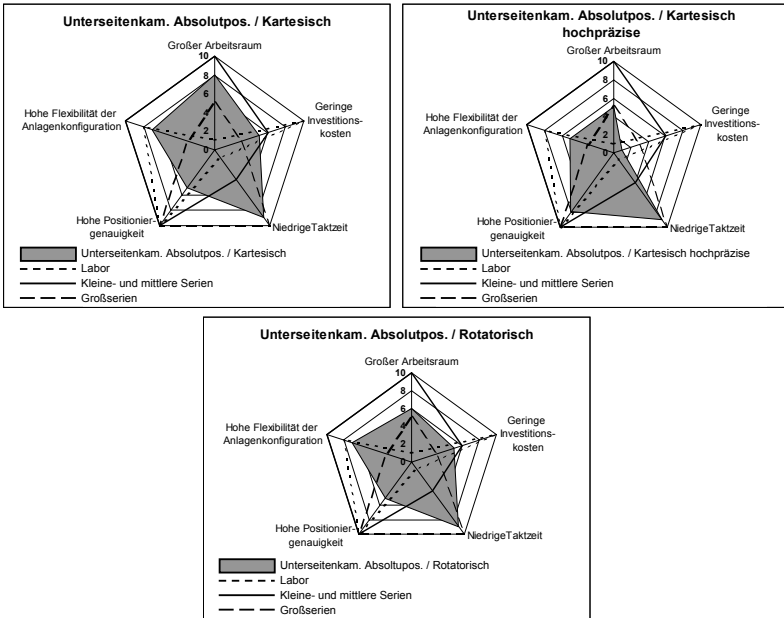


Abb. A-2: Bewertung der Kombinationen absolutgenaue Positionierung mit unterschiedlichen Handhabungssystemen

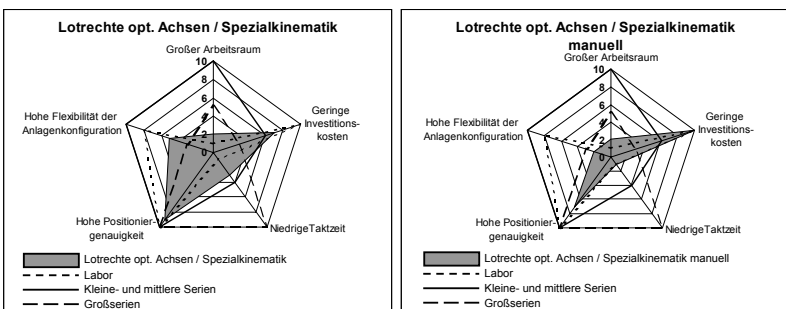


Abb. A-3: Bewertung der Kombinationen Positionierung mit Hilfe lotrechter optischer Achsen mit unterschiedlichen Handhabungssystemen

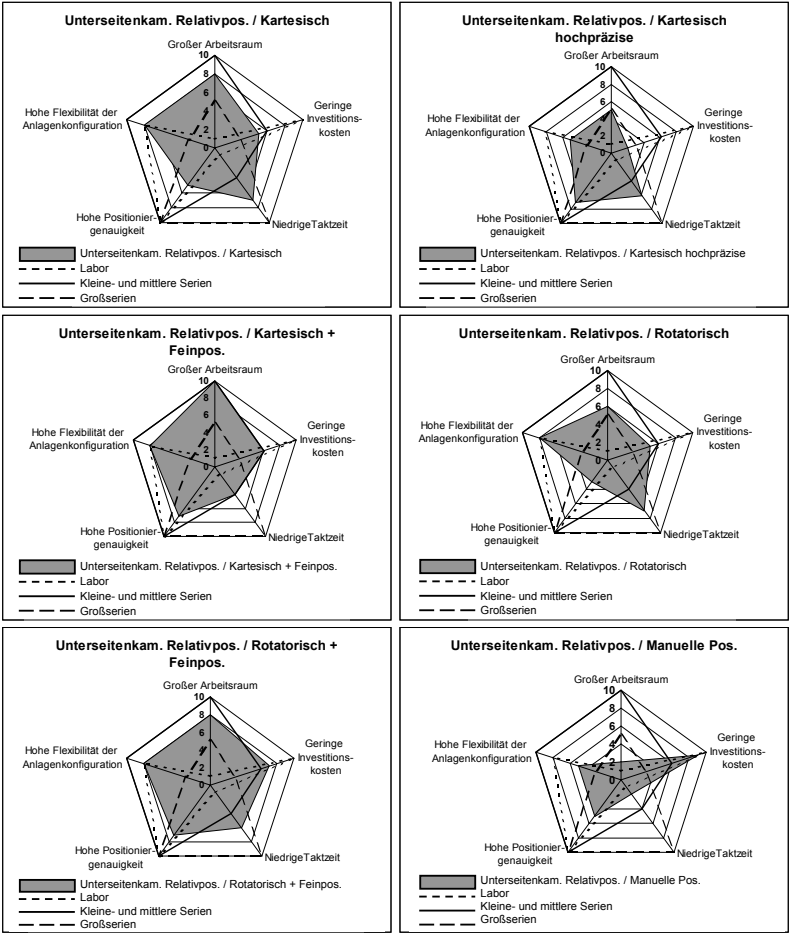


Abb. A-4: Bewertung der Kombinationen Relativpositionierung mit feststehender Unterseitenkamera mit unterschiedlichen Handhabungssystemen

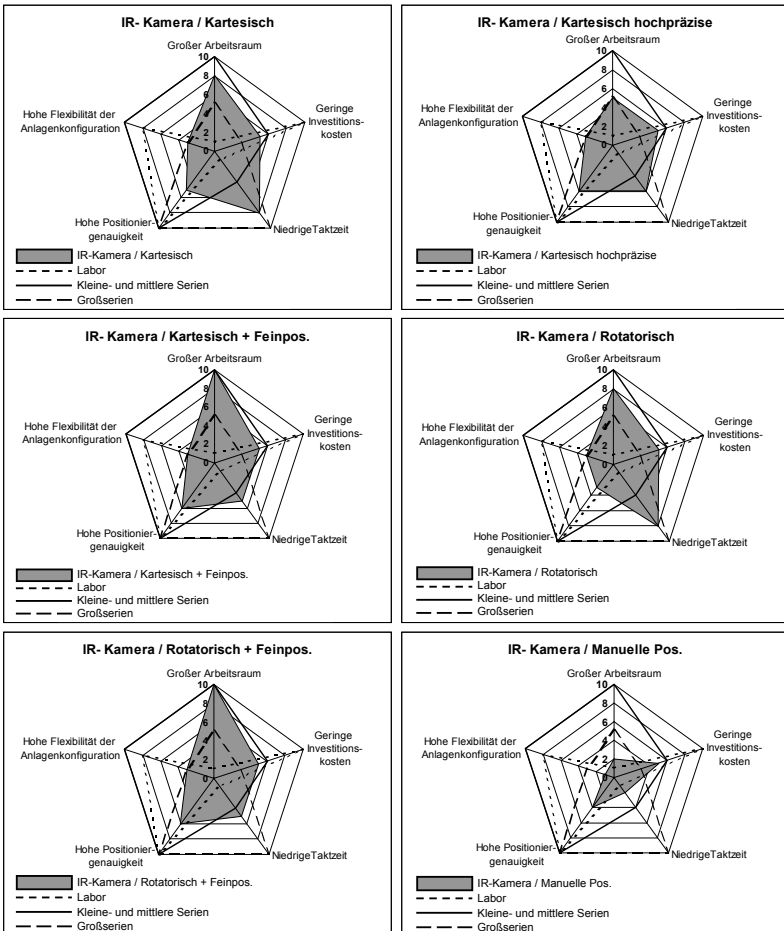


Abb. A-5: Bewertung der Kombinationen Positionierung IR-Kamera mit unterschiedlichen Handhabungssystemen

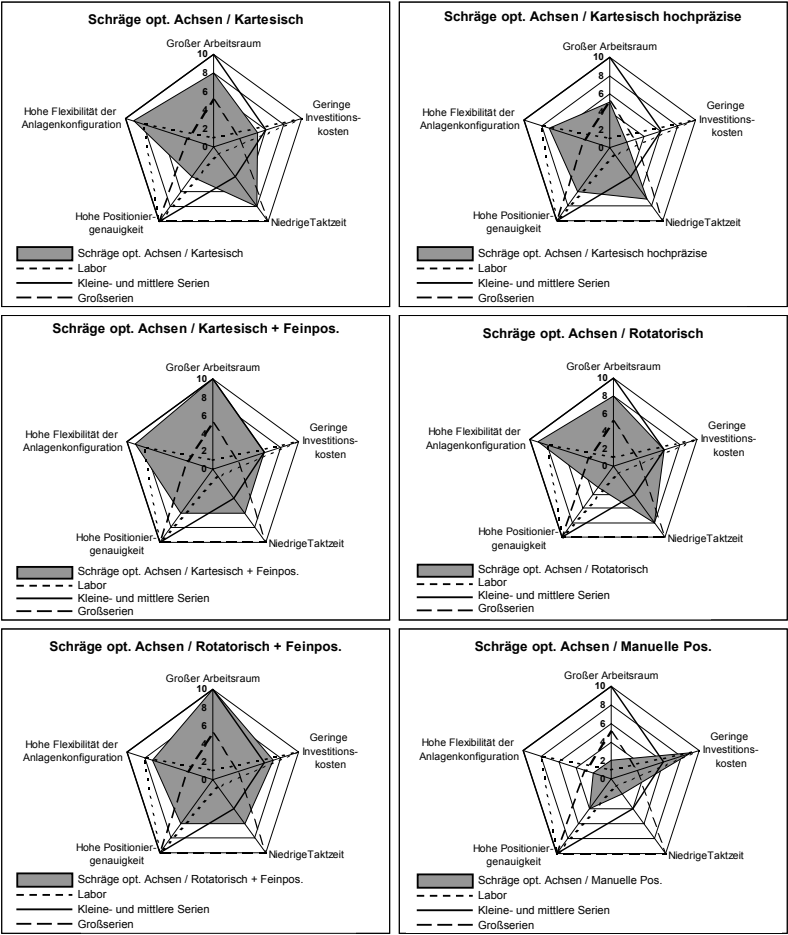


Abb. A-6: Bewertung der Kombinationen Positionierung mit Hilfe schräger optischer Achsen mit unterschiedlichen Handhabungssystemen

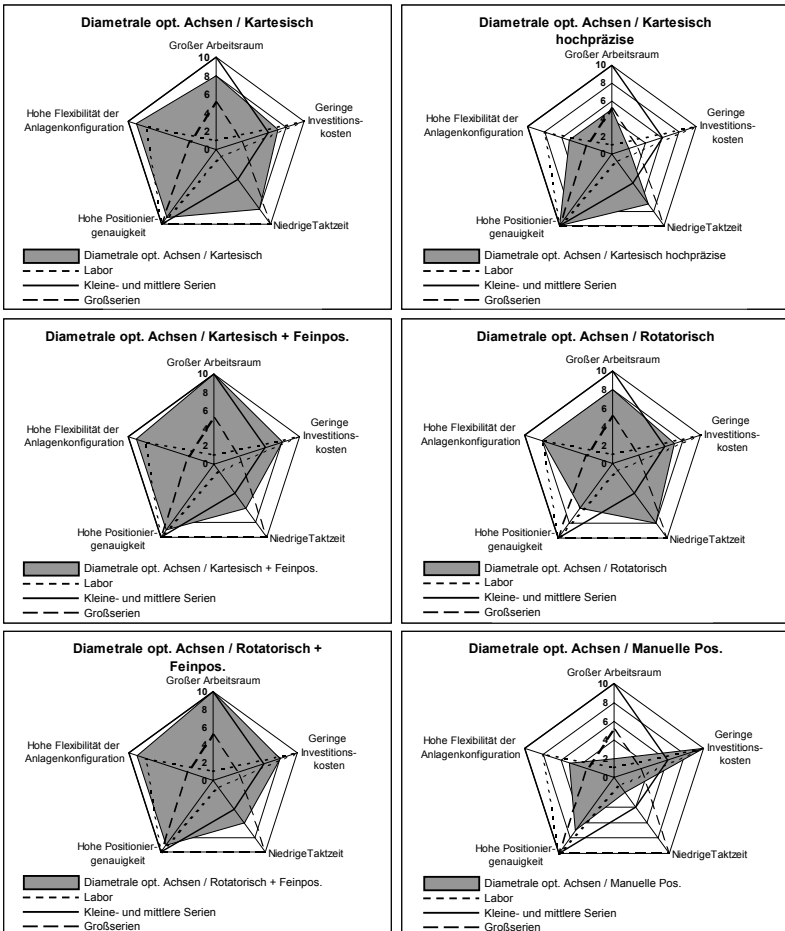


Abb. A-7: Bewertung der Kombinationen Positionierung mit Hilfe diametraler optischer Achsen mit unterschiedlichen Handhabungssystem

	Strahlengang	Grenzflächen GL	Grenzflächen GG	Spiegelflächen	Strahlteiler	Glasweg (D=10mm)	$\prod \tau_{GL}$	$\prod \tau_{GG}$	$\prod \rho_{Sp}$	$\prod \rho_{ST}$	$\prod \tau_{Mat}$	τ_{Ges}	kleinerer Wert von τ_{Ges}
Porro-Prisma	oben	2	0	0	1	10	98,0%	100%	100%	50%	99,8%	48,9%	46,1%
	unten	2	2	3	1	40	98,0%	100%	95,0%	50%	99,2%	46,1%	
Rhomboid-Prisma	oben	2	1	2	1	30	98,0%	100%	96,6%	50%	99,4%	47,1%	47,1%
	unten	2	1	1	1	20	98,0%	100%	98,3%	50%	99,6%	48,0%	
Penta-Prisma	oben	2	1	2	1	30	98,0%	100%	96,6%	50%	99,4%	47,1%	46,9%
	unten	2	1	2	1	44,1	98,0%	100%	96,6%	50%	99,1%	46,9%	
Würfel-prisma	oben	2	0	0	1	10	98,0%	100%	100%	50%	99,8%	48,9%	24,0%
	unten	2	0	1	2	20	98,0%	100%	98,3%	25%	99,6%	24,0%	
Rot. Spiegel	oben	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	98,3%
	unten	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	
Transl. Spiegel horizontal	oben	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	98,3%
	unten	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	
Transl. Spiegel vertikal	oben	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	98,3%
	unten	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	
Rot. ges. Optik	oben	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	98,3%
	unten	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	
Split-Chip	oben	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	98,3%
	unten	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	
Paralleloptik	oben	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	98,3%
	unten	0	0	1	0	0	100%	100%	98,3%	100%	100%	98,3%	
Koaxialoptik	oben	2	0	1	0	10	98,0%	100%	98,3%	100%	99,8%	96,2%	96,2%
	unten	2	0	1	0	10	98,0%	100%	98,3%	100%	99,8%	96,2%	

Tab. A-1: Berechnung des optischen Gesamttransmissionsgrades τ_{Ges}

		Geringe optische Weglänge	Geringer Objektebenenabstand	Geringe optische Weglänge in Glas (100 % - τ_{Ges})	Symmetrischer Strahlengang	Kleine Einschwenkfehler rotatorisch
Porro-Prisma	Wert	5,25	5,5	53,9%	3	0,262
	Gew.	20,0%	20,0%	43,3%	20,0%	46,9%
Rhomboid-Prisma	Wert	4,25	3,5	52,9%	1	0,262
	Gew.	35,2%	49,1%	44,3%	73,3%	46,9%
Penta-Prisma	Wert	5,16	3,16	53,1%	0,66	0,395
	Gew.	21,4%	54,0%	44,1%	82,4%	20,0%
Würfel- prisma	Wert	3,5	2,5	76,0%	1	0,209
	Gew.	46,7%	63,6%	20,0%	73,3%	57,7%
Rot. Spiegel	Wert	2,91	1,91	1,7%	0	0,104
	Gew.	55,7%	72,2%	98,2%	100,0%	78,9%
Transl. Spiegel horizontal	Wert	2,25	1,5	1,7%	0	0,104
	Gew.	65,7%	78,2%	98,2%	100,0%	78,9%
Transl. Spiegel vertikal	Wert	3,25	3,5	1,7%	0	0,104
	Gew.	50,5%	49,1%	98,2%	100,0%	78,9%
Rot. ges. Optik	Wert	2,25	1,5	1,7%	0	0,104
	Gew.	65,7%	78,2%	98,2%	100,0%	78,9%
Split-Chip	Wert	2,25	2,5	1,7%	0	0,104
	Gew.	65,7%	63,6%	98,2%	100,0%	78,9%
Paralleloptik	Wert	2,25	2,5	1,7%	0	0,157
	Gew.	65,7%	63,6%	98,2%	100,0%	68,2%
Koaxialoptik	Wert	2,25	1,5	3,8%	0	0,104
	Gew.	65,7%	78,2%	95,9%	100,0%	78,9%

Tab. A-2: Berechnung der quantitativen Bewertungen

	Kleine Einschwenkfehler translatorisch	Kleine Einschwenkfehler rotatorisch	Geringe optische Weglänge	Symmetrischer Strahlengang	Geringer Objektebenenabstand	Geringe optische Verluste durch Glas	Paraxialer Strahlengang	Hohe thermische Stabilität der Optik	Geringer Baugröße	Geringer Justageaufwand	Übertrag
Gewichtung	5,0%	5,0%	6,0%	6,0%	18,0%	6,0%	10,0%	6,0%	3,3%	3,3%	68,6%
Porro-Prisma	100%	46,9%	20,0%	20,0%	20,0%	43,3%	100%	90,0%	80,0%	70,0%	
	5,0%	2,3%	1,2%	1,2%	3,6%	2,6%	10,0%	5,4%	2,6%	2,3%	36,3%
Rhomboid-Prisma	100%	46,9%	35,2%	73,3%	49,1%	44,3%	100%	90,0%	80,0%	70,0%	
	5,0%	2,3%	2,1%	4,4%	8,8%	2,7%	10,0%	5,4%	2,6%	2,3%	45,7%
Penta-Prisma	100%	20,0%	21,4%	82,4%	54,0%	44,1%	100%	90,0%	80,0%	70,0%	
	5,0%	1,0%	1,3%	4,9%	9,7%	2,6%	10,0%	5,4%	2,6%	2,3%	45,0%
Würfel- prisma	100%	57,7%	46,7%	73,3%	63,6%	20,0%	100%	90,0%	80,0%	90,0%	
	5,0%	2,9%	2,8%	4,4%	11,5%	1,2%	10,0%	5,4%	2,6%	3,0%	48,7%
Rot. Spiegel	100%	78,9%	55,7%	100%	72,2%	98,2%	100%	60,0%	50,0%	40,0%	
	5,0%	3,9%	3,3%	6,0%	13,0%	5,9%	10,0%	3,6%	1,7%	1,3%	53,7%
Transl. Spiegel horizontal	100%	78,9%	65,7%	100%	78,2%	98,2%	100%	70,0%	30,0%	40,0%	
	5,0%	3,9%	3,9%	6,0%	14,1%	5,9%	10,0%	4,2%	1,0%	1,3%	55,4%
Transl. Spiegel vertikal	100%	78,9%	50,5%	100%	49,1%	98,2%	100%	70,0%	30,0%	40,0%	
	5,0%	3,9%	3,0%	6,0%	8,8%	5,9%	10,0%	4,2%	1,0%	1,3%	49,2%
Rot. ges. Optik	100%	78,9%	65,7%	100%	78,2%	98,2%	100%	60,0%	30,0%	60,0%	
	5,0%	3,9%	3,9%	6,0%	14,1%	5,9%	10,0%	3,6%	1,0%	2,0%	55,4%
Split-Chip	100%	78,9%	65,7%	100%	63,6%	98,2%	20,0%	90,0%	80,0%	90,0%	
	5,0%	3,9%	3,9%	6,0%	11,5%	5,9%	2,0%	5,4%	2,6%	3,0%	49,2%
Paralleloptik	100%	68,2%	65,7%	100%	63,6%	98,2%	100%	90,0%	80,0%	70,0%	
	5,0%	3,4%	3,9%	6,0%	11,5%	5,9%	10,0%	5,4%	2,6%	2,3%	56,1%
Koaxialoptik	100%	78,9%	65,7%	100%	78,2%	95,9%	100%	50,0%	10,0%	70,0%	
	5,0%	3,9%	3,9%	6,0%	14,1%	5,8%	10,0%	3,0%	0,3%	2,3%	54,4%

Tab. A-3: Gesamtauswertung Nutzwertanalyse Optiken Teil 1

	Übertrag	Beleuchtungsmöglichkeit Ringlicht	Beleuchtungsmöglichkeit Koaxial	Niedrige Kosten	Kurze Bewegungszeit zw. Bild oben/unten	Bewegte Masse (Taktzeit)	Geringer Aufwand zur Bildvorbereitung	Möglichkeit zur Bildüberlagerung	Simultane Bildaufnahme möglich	Gesamtwert
Gewichtung	68,6%	1,7%	1,7%	4,0%	4,0%	10,0%	2,0%	4,0%	4,0%	100%
Porro-Prisma		90,0%	70,0%	50,0%	50,0%	80,0%	50,0%	0,0%	50,0%	
	36,3%	1,5%	1,2%	2,0%	2,0%	8,0%	1,0%	0,0%	2,0%	54,0%
Rhomboid-Prisma		90,0%	70,0%	60,0%	50,0%	80,0%	50,0%	0,0%	50,0%	
	45,7%	1,5%	1,2%	2,4%	2,0%	8,0%	1,0%	0,0%	2,0%	63,8%
Penta-Prisma		90,0%	70,0%	50,0%	50,0%	80,0%	100%	100%	50,0%	
	45,0%	1,5%	1,2%	2,0%	2,0%	8,0%	2,0%	4,0%	2,0%	67,7%
Würfel-prisma		90,0%	0,0%	50,0%	50,0%	80,0%	100%	100%	50,0%	
	48,7%	1,5%	0,0%	2,0%	2,0%	8,0%	2,0%	4,0%	2,0%	70,3%
Rot. Spiegel		90,0%	100%	70,0%	20,0%	40,0%	50,0%	0,0%	0,0%	
	53,7%	1,5%	1,7%	2,8%	0,8%	4,0%	1,0%	0,0%	0,0%	65,6%
Transl. Spiegel horizontal		70,0%	100%	70,0%	20,0%	40,0%	50,0%	0,0%	0,0%	
	55,4%	1,2%	1,7%	2,8%	0,8%	4,0%	1,0%	0,0%	0,0%	66,9%
Transl. Spiegel vertikal		70,0%	100%	70,0%	20,0%	40,0%	50,0%	0,0%	0,0%	
	49,2%	1,2%	1,7%	2,8%	0,8%	4,0%	1,0%	0,0%	0,0%	60,7%
Rot. ges. Optik		90,0%	100%	70,0%	20,0%	30,0%	50,0%	0,0%	0,0%	
	55,4%	1,5%	1,7%	2,8%	0,8%	3,0%	1,0%	0,0%	0,0%	66,3%
Split-Chip		90,0%	70,0%	80,0%	100%	80,0%	50,0%	0,0%	100%	
	49,2%	1,5%	1,2%	3,2%	4,0%	8,0%	1,0%	0,0%	4,0%	72,2%
Paralleloptik		90,0%	100%	60,0%	100%	20,0%	50,0%	50,0%	100%	
	56,1%	1,5%	1,7%	2,4%	4,0%	2,0%	1,0%	2,0%	4,0%	74,7%
Koaxialoptik		90,0%	100%	10,0%	100%	10,0%	50,0%	50,0%	100%	
	54,4%	1,5%	1,7%	0,4%	4,0%	1,0%	1,0%	2,0%	4,0%	70,0%

Tab. A-4: Gesamtauswertung Nutzwertanalyse Optiken Teil 2

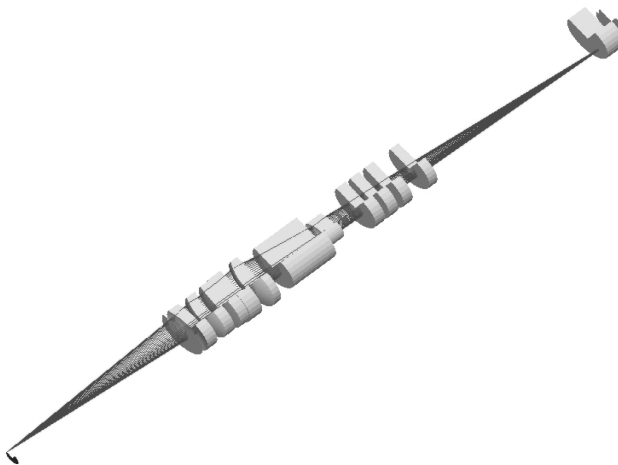


Abb. A-8: 3-D Darstellung des Strahlenverlaufs innerhalb eines Objektivs

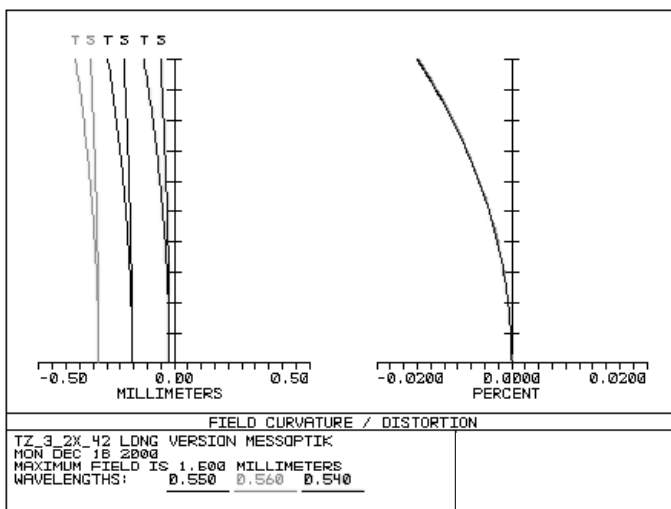


Abb. A-9: Verzeichnung über die Bildhöhe

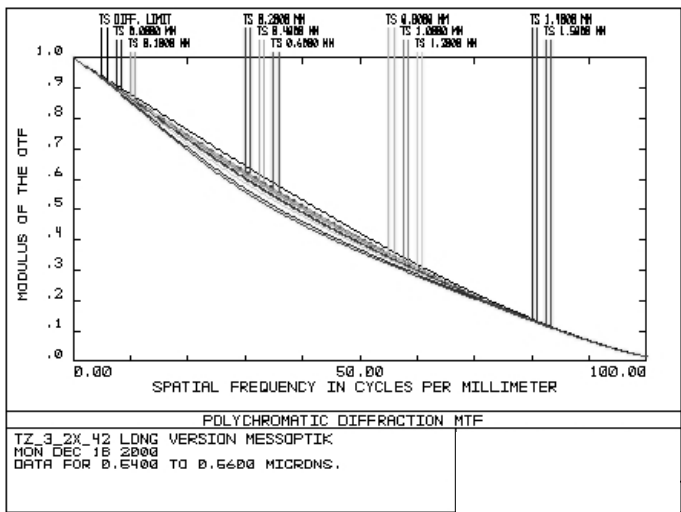


Abb. A- 10: MTF der Optik: Darstellung von T über R

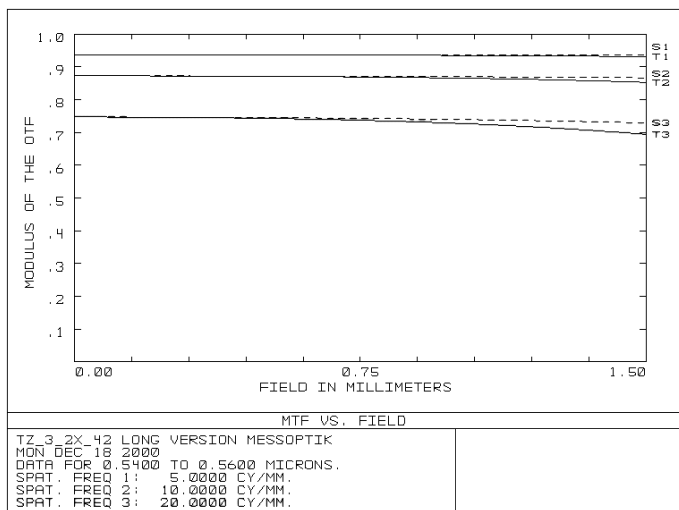


Abb. A-11: MTF der Optik: T über Bildfeldhöhe

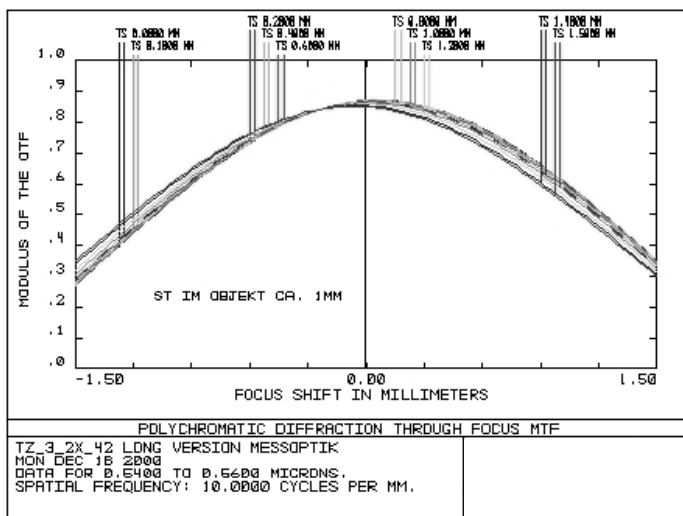


Abb. A-12: MTF der Optik: T über Fokusverschiebung

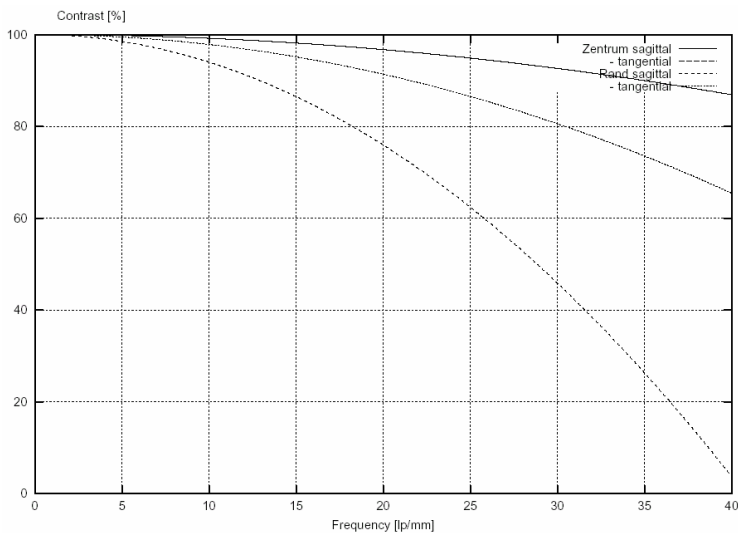


Abb. A-13: Gemessene MTF der Optik: Darstellung T über R

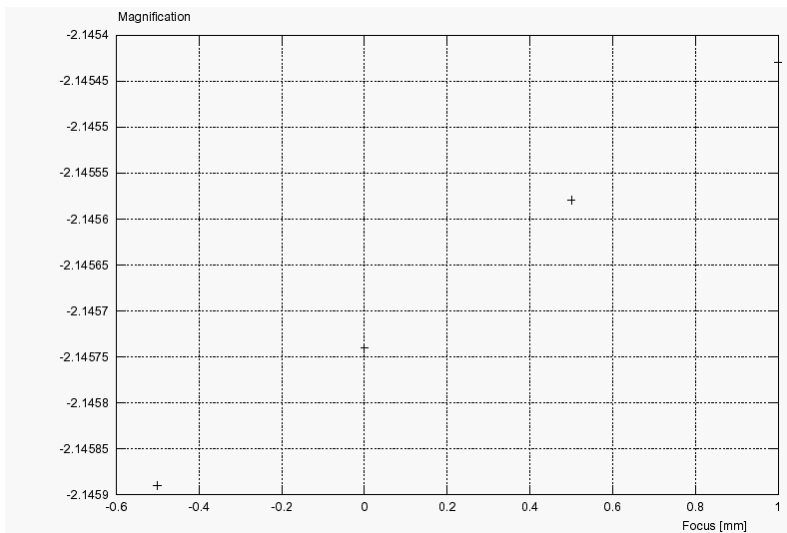


Abb. A-14: Gemessene Vergrößerung innerhalb des Schärfentiefebereichs

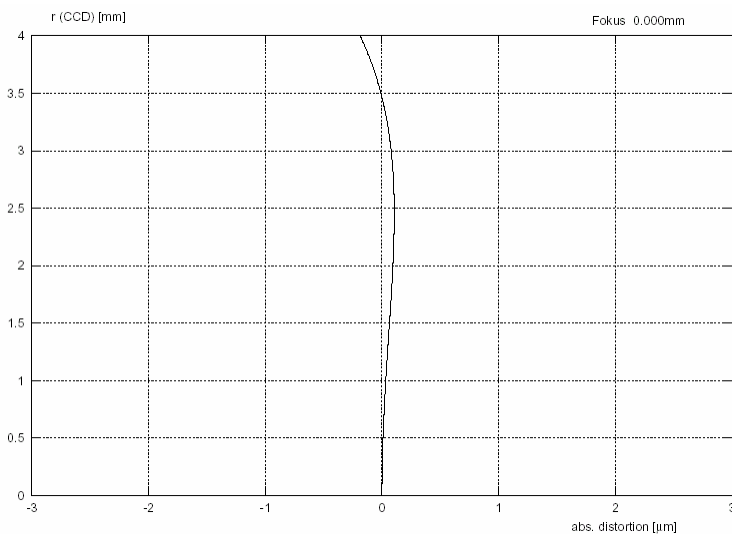


Abb. A-15: Gemessene Verzeichnung im Fokus über die Bildhöhe

Literaturverzeichnis

AHN & ALLEN 1994

Ahn, C.-H.; Allen, M.-G.: A Fully Integrated Micromachined Magnetic Particle Manipulator and Separator. Proceedings IEEE MEMS. 1994, S. 91-94.

AKSVUK U. A. 2000

Aksvuk, V.-A.; Pardo, F.; Bolle, C.-A.; Arney, S.; Giles, C.-R.; Bishop, D.-J.: Lucent Microstar TM Micromirror Array Technology for Large Optical Crossconnects. In: Motamedi, M.; Goering, R. (Hrsg.): Proc. of SPIE Vol. 4178, MOEMS and Miniaturized Systems, (Sep, 2000). Santa Clara: SPIE 2000, S. 320-324.

ASCHENBRENNER U. A. 1999

Aschenbrenner, R.; Gwiasda, J.; Eldring, J.; Zakel, E.; Reichl, H.: Gold Ball Bumps For Adhesive Flip Chip Assembly. In: Karl Suss (Hrsg.): Suss Technical Bulletin Flip Chip. The Media Group 1999, S. 53-58.

AURICH & SCHRÖDER 1977

Aurich, W.; Schröder, H.-U.: Unternehmensplanung im Konjunkturverlauf. München: 1977, S. 23.

AUER 2001

Auer Process Equipment 2001: <<http://www.auerprecision.com>>

BACHMANN U. A. 1999

Bachmann u.a.: Die Welt der Surface Mount Technologie. München: Siemens 1999.

BARTH 2000

Barth, O.: Miniaturisierter Schrittantrieb mit Piezoaktoren und Harmonic Drive Getriebe. Heimsheim: Jost Jetter 2000. (Berichte aus dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart)

BARTOS U. A. 2001

Bartos, H.; Berndt, M.; Hempel, M.; Peters, R.-P.: Analytical Chemistry: A new application field for microstructured devices. In: Reichl, H. (Hrsg.): Micro System Technologies, Düsseldorf, March 27-29, 2001. Berlin: VDE 2001, S. 149-150.

BASTING & ENDERT 1997

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

BATTENBERG 2000

Battenberg (Hrsg.): Scara-Roboter für die Mikrosystemtechnik und die Präzisionsmontage. Marburg: 2000.

BAUER & JEREMIAS 1997

Bauer, A.; Jeremias, M.: Randbedingungen für die automatisierte Produktion von Radarsensoren in Chip & Wire Technik. In: Eder, A. (Hrsg.): Surface mount technologie, electronic systems. Berlin: 1997.

BAUER U. A. 1998

Bauer, G.; Schuenemann, M.; Schlenker, D.; Schaefer, W.: Mikrosystemtechnik - Werkzeugsystem für die Montage. wt Werkstatttechnik 88 (1998) 11/12, S. 490-494.

BAUER U. A. 2001

Bauer, G.; Götz, G.; Schuenemann, M.; Großer, V.; Hillmann, V.: Modular Fluidic Devices and Fluidic Interfaces. In: Reichl, H. (Hrsg.): Micro System Technologies, Düsseldorf, March 27-29, 2001. Berlin: VDE 2001, S. 595-600.

BERGMANN & SCHÄFER 1987

Bergmann, C.; Schäfer, L.: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III (Optik). In: Gobrecht, H. (Hrsg.): 8. Aufl. Berlin: de Gruyter 1987.

BINDRA 1997

Bindra, A.: Sensors: It's a package deal. Electronic Engineering Times. May 12, 1997, S. 45.

BOBEY 1997

Bobey, K.: Optoelektronik-Komponenten. In: Litfin, G. (Hrsg.): Technische Optik in der Praxis. Berlin: Springer 1997, S. 191-220.

BRÖCHER 2000

Bröcher, B.: Fasersoptische Sensoren zur Prozeßüberwachung in der Mikrosystemtechnik. Aachen: Shaker 2000. (Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 2000, 19)

BRYCEK U. A. 1994

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

BUHALI U. A. 1999

Buchali, F.; Richter, A.; Hierl, R.; Gutu-Nelle, A.; Florjancic, M.; Ferling, D.: RF and Thermal Behavior of Flip Chip Mounted GaAs Power Devices. In: Karl Süss (Hrsg.): Suss Technical Bulletin Flip Chip. The Media Group 1999, S. 3-8.

BUCHNER U. A. 2000

Buchner, C.; Heyl, P.; Wijnaendts, R.-W.: Herstellung von Mikrostanzen- und Mikroprägewerkzeugen mit Laserstrahlung. Aachener Kolloquium für Lasertechnik '2000. Aachen: 2000, S. 199-207.

CAMELOT 1999

Camelot Systems, Inc. (Hrsg.): Flip Chip Underfill. Libertyville, IL, USA: IHS Publishing Group 1999, S. 1-2.

CHOLLET & JACOT 1999

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

CONNER 2000

Conner, R.: MEMS/MEOMS Metrology and Machine Vision. In: <www.newport.com>

COOPER U. A. 1999

Cooper, K.-A.; Yang, R.; Mottet, J.-S.; Lecarpentier, G.: Flip Chip Equipment for High End Electro-Optical Modules. In: Karl Süss (Hrsg.): Suss Technical Bulletin Flip Chip. The Media Group 1999, S. 59-64.

COX 1967

Cox, W.-E.: Product life cycles as marketing models. Journal of Business. 40 (1967) 4, S. 375.

DATACON 2001

Datacon Semiconductor Equipment GmbH (Hrsg.): Multichip - Die Bonder 2200 apm. Radfeld / Österreich, 2001.

DETLEFSEN U. A. 1992

Detlefsen, J.; Troll, T.; Rozmann, M.; Zeilinger, W.: System Aspects and Design of an Automotive Collision Warning PN Code Radar Using Wavefront Reconstruction. Proc. IEEE MTT-Symposium 1992, Albuquerque, New Mexico, 1-5 June 1992, Vol. 2. Albuquerque: IEEE 1992, S. 625-628.

DICKMANN U. A. 1998

Dickmann, K.; Gerlach, K.-H.; Jersch, J.; Hildenhausen, J.: Präzisions-Mikrobearbeitung. Anlagenkonzeption und Fertigung von Keramikspinnndüsen. F&M Feinwerktechnik 106 (1998) 3, S. 138-141.

DIERSELHUIS & KOLKMAN 2000

Dierselhuis, M.-F.; Kolkman, G.-W.-A.: The amas advanced micro assembly system. In: <<http://www.micromontage.com>> (06.07.2000)

DIETRICH U. A. 1999

Dietrich, L.; Wolf, J.; Ehrmann, O.; Reichl, H.: Wafer Bumping Technique Using Electroplating for High-Dense Chip Packaging. In: Karl Suss (Hrsg.): Suss Technical Bulletin Flip Chip. The Media Group 1999, S. 13-20.

DÖRBAND 1997

Dörband, B.: Abbildungsfehler und optische Systeme. In: Litfin, G. (Hrsg.): Technische Optik in der Praxis. Berlin: Springer 1997, S. 73-102.

DÜNN & WURMUS 1999

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

DÜRRSCHMIDT 1999

Dürrschmidt, S.: Stückzahlflexibles Montagesystem für Schnappschalter. Stückzahlflexible Montagesysteme - Lösungen für eine bedarfsgerechte Montage. München: Herbert Utz Wissenschaft 1999, S. 1-1 - 1-23. (iwb-Seminarberichte 42)

ECKERL U. A. 1999

Eckerl, U.; Harendt, N.; Eckerl, K.: Quantifizierung der Abbildungstreue von Meßobjektiven. Jahrbuch für Optik 1998. 1999, S. 1-11.

EHRFELD & MÜNCHMEYER 1991

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

EHRFELD U. A. 1997

Ehrfeld, W.; Hessel, V.; Löwe, H.; Schulz, C.; Weber, L.: Materials of LIGA Technology. Institute of Microtechnology Mainz. Mainz: 1997.

ELLSÄßER 2000

Ellsäßer, C.: Ordered conductive Particles – the revolution for Flip-Chip Assembly? In: Electronic Forum (Hrsg.): Flip-Chip & Chip Scale Europe 2000, Sindelfingen. Backnang: Electronic Forum 2000.

EPSON 2000A

Epson Deutschland GmbH (Hrsg.): Epson Roboter: die E-Serie. Düsseldorf: 2000.

EPSON 2000B

Epson Deutschland GmbH (Hrsg.): XM-3000-Serie. Düsseldorf: 2000.

ESEC 2000

Esec Europe SA (Hrsg.): Micron 2, The flexible, High Accuracy Platform for MCM and Flip Chip Assembly. November 2000. Cham/Schweiz: 2000.

FELDMANN U. A. 1999

Feldmann, K.; Krimi, S.; Reichenberger, M.: Assembly: Electronics. In: Nof, S.-Y. (Hrsg.): Handbook of Industrial Robotics. 2. Aufl. John Wiley & Sons Inc. 1999, S. 997-1012.

FINETECH 2000

Finetech GmbH (Hrsg.): Flip Chip Bonder and Rework Systeme für Flip Chip, BGA, CSP... Berlin: 2000.

FISCHER U. A. 1997

Fischer, R.; Hanks, J.; Zühlke, D.: Greifer für automatisierte Mikro-montage. F&M Feinwerktechnik 105 (1997) 11-12, S. 814-818.

FISCHER, W.-J. 2000

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

FLUITMAN 1994

Fluitman, J.: Micro Systems Technology. IEEE 1994 Custom integrated Circuits. 1994, S. 471-478.

FRIESWIJK U. A. 1997

Frieswijk, T.-A.; Bielen, J.-A.; Rutten, W.-L.-C.; Bergveld, P.: Development if a solder bump technique for contacting a three-dimensional multi electrode array. MST Microsystem Technologies 3 (1997) 2, S. 48-52.

GEBHARDT 1998

Gebhardt, A.: Spanende Mikrobearbeitung für die Mikrooptik. F&M Feinwerktechnik 106 (1998) 4, S. 260-263.

GENGENBACH & VOIGT 2001

Gengenbach, U.; Voigt, S.: Rechnergestützte Mikrofertigungssysteme. <http://www.fzk.de/pmt/systemtechniken/datenblaetter_deutsch/mikrohandhabung.htm> (03.09.2001)

GENGENBACH U. A. 2001

Gengenbach, U.; Hofmann, A.; Engelhardt, F.; Scharnowell, R.; Köhler, B.: Microgripper construction kit. Proc. of SPIE Vol. 4568, Microrobotics and Microassembly III, (Oct, 2001). Boston: SPIE 2001, S. 24 - 31.

GERLACH U. A. 2001

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

GESANG U. A. 1997

Gesang, T.; Fastenau, V.; Wulf, A.; Schäfer, H.; Heßland, A.; Henne-
mann, O.-D.; Kriebel, F.: Industrieller Einsatz von Verbindungs-
techniken für Mikro-/Millimeterwellenkomponenten - Teilvorhaben
Klebertechnik. Proceedings Microengineering '97, Messe Stuttgart 24.-
26. September 1997. Stuttgart: Stuttgarter Messe- und Kongress-
gesellschaft 1997.

GILLNER 2000

Gillner, A.: Trends bei Laseranwendungen in Mikro- und Elektro-
technik. In: Fraunhofer Institut für Lasertechnik (Hrsg.): Aachener
Kolloquium für Lasertechnik '2000. Aachen: 2000, S. 241-252.

GÖTZEN 1998

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

GRACE 2001

Grace, R.-H.: Commercialization of MEMS/MST/Micromachines: An
Updated Industry Report Card on the Barriers to Commercialization
with a Focus on the US Market. In: Reichl, H. (Hrsg.): Micro System
Technologies 2001, Düsseldorf, March 27-29, 2001. Düsseldorf: VDI
2001, S. 507-513.

GRAMANN 1999

Gramann, G.: Industrielle Montage mikrooptischer Halbleiter-
bauelemente. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Automatisierte Mikromontage.
München: Utz 1999, S. 5-1 - 5-18. (iwb-Seminarberichte Nr. 44)

GRUTZECK 2000

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

GUTENTAG & SIERRA 2000

Gutentag, C.-E.; Sierra, R.-A: Selecting Methods For Packing, Shipping And Handling Of Low Cost Good Die. TechLead Corporation. o.A.: 2000, S. 1-8.

GZIK & SCHOLZ 1986

Gzik, H.; Scholz, H.-J.: Arbeitsraumkenngrößen für Industrieroboter. In: 108 (1986) 33 (Hrsg.): Industrieanzeiger. 1986, S. 31-32.

HABERÄCKER 1985

Haberäcker, P.: Digitale Bildverarbeitung (Grundlagen und Anwendungen). München: Hanser 1985.

HACKE 2000

Hacke, H.-J.: A survey of CSP – and waverlevel CSP – Solutions. In: Electronic Forum (Hrsg.): Flip-Chip & Chip Scale Europe 2000, Sindelfingen. Backnang: Electronic Forum 2000.

HACKELE U. A. 1997

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

HAFERKORN 1994

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

HANKES 1998

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

HECHT 1998

Hecht, E.: Optik. 1998. Aufl. Bonn: Addison-Wesley 1998.

HEIDENHAIN 1999

Heidenhain (Hrsg.): Kreuzgittermessgerät KGM 182. Traunreut: 1999.

HENSCHKE 1994

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

HERRMANN 1986

Herrmann, R.: Reflexmindernde Schichten in der Feinoptik. Jahrbuch für Optik und Feinmechanik. 1986, S. 236-269.

HESEL U. A. 1995

Hessel, V.; Ehrfeld, W.; Möbius, H.; Richter, T.; Russow, K.: Potentials and Realisation of Microreactors. In: Tani, E.-J. (Hrsg.): Proc. of International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, Sendai, Japan, September 1995. 1995, S. 37-40.

HESELBACH 1995

Hesselbach, J.: Einsatz- und Entwicklungspotentiale von Formgedächtnisaktoren als Milli- und Mikroaktoren. 1. Adaptronik-Workshop Saarbrücken-Dudweiler, 08.-09.11.1995. 1995.

HESELBACH U. A. 1996

Hesselbach, J.; Thoben, R.; Pittschellis, R.: Parallelroboter für hohe Genauigkeiten. wt-Produktion und Management. Springer 86 (1996), S. 591-595.

HESELBACH U. A. 2000

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

HJR 1998

hjr: Baukastenstandards senken die Produktionskosten. Produktion 47 (19.11.1998).

HOFFMANN 1997

Hoffmann, H.-J.: Optische Werkstoffe. In: Litfin, G. (Hrsg.): Technische Optik in der Praxis. Berlin: Springer 1997, S. 137-172.

HOFMANN U. A. 2001

Hofmann, A.; Engelhardt, F.; Gengenbach, U.; Scharnowell, R.; Bär, M.: A concept for modular fabrication equipment for fluidic microsystems. In: Reichl, H. (Hrsg.): Micro System Technologies 2001, Düsseldorf, 27.-29.03.2001. Berlin: VDE 2001, S. 357-362.

HÖHN & JACOB 1999

Höhn, M.; Jacob, D.: Montagetechnik für Mikrosysteme. iw-newsletter. 7 (1999) 1-2, S. 2-3.

HÖHN 2001

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

HUDER 1999

Huder, B.: Einführung in die Radartechnik. Stuttgart: Teubner 1999.

HÜLSMANN 2001

Hülsmann, T.: Wafer Bonding: Application, Processes, Machines. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik, Garching 27.09.2001. München: Herbert Utz Wissenschaft, S. 7-1 - 7-24. (iwb Seminarberichte 59)

JÄHNE 1989

Jähne, B.: Digitale Bildverarbeitung. Berlin: Springer 1989.

JENNER 1999

Jenner, O.: Elektronische Bildhauer - Wie die Bildverarbeitung läuft und welche Software es gibt. LABO 06(1999), S. 8-24.

JENOPTIK 1994

JenoptikTechnologie GmbH (Hrsg.): μ KRoS 316 - Robotersystem für hohe Präzision und große Beweglichkeit. Jena: 1994.

JENOPTIK 2000

Jenoptik (Hrsg.): Telezentrie auf den Punkt gebracht: JENmetarTM.. Jena: 2000.

JEREMIAS 1998

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

KÄM 2001

Käm: Mikrotechnik aus der Minifabrik. VDI nachrichten. VDI Nr. 9 (2.3.2001), S. 13.

KEDERER & DETLEFSEN 2000

Kederer, W.; Detlefsen, J.: Sensor-based Determination of Angular Misalignment and Lane Configuration of a Radar Sensor for ACC-Applications. German Radar Symposium Proceedings, Berlin, October 2000. Berlin: 2000.

KERDEL U. A. 1995

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

KIP 1999

Kip: Vision-Systeme verfeinern die Montage im Mikrobereich. VDI. VDI nachrichten, 25.6.99.

KLEIN U. A. 1997

Klein, W.; Haberland, R.; Böffgen, M.: Ultrapräzisionsbearbeitung vom Feinsten. F&M Feinwerktechnik 105 (1997) 7-8, S. 536-537.

KRIMI 2001

Krimi, S.: Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion. Bamberg: Meisenbach, 2001. (Fertigungstechnik – Erlangen; 115)

KRÜGER 1999

Krüger, A.: Gestaltung stückzahlflexibler Montagesysteme. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Stückzahlflexible Montagesysteme - Lösungen für eine bedarfsgerechte Montage. München: Herbert Utz Wissenschaft 1999. (iwb-Seminarberichte 42)

KUHMAN 1997

Kuhmann, J.-F.: Untersuchungen zu einer flussmittelfreien selbstjustierenden Flip-Chip Bondtechnologie für photonische Komponenten. Berlin: o. Verlag 1997.

KWANG & CHONG 1998

Kwang, W.-O.; Chong, H.-A.: Development of an Innovative Flip-Chip Bonding Technique using Micromachined Conductive Polymer Bumps. Solid State and Actuator Workshop (Hilton Head Islands, SC). IEEE 1998.

KWANG 1997

Kwang, W.-O.: Developement of a photodiode and it's flip-chip bonding technology for optical MEMS. Cincinnati: 1997.

LENK 1999

Lenk, P.: Systemlösungen für die Mikrosystemtechnik. Productronic. (1999) 4/5, S. 126-130.

LIN U. A. 1996

Lin, J.-K.; Drye, J.; Lytle, W.; Scharr, T.; Subrahmanyam, R.; Sharma, R.: Conductive Polymer Bump Interconnects. In: IEEE (Hrsg.): Electronic Components and Technology Conference. 1996, S. 1059-1068.

MABOUDIAN & HOWE 1997

Maboudian, R.; Howe, R.-T.: Critical Review: Adhesion in surface micromechanical structures. J. Vac. Sci. Technol. B. 15/1, S. 1-20.

MARINGER 1992

Maringer, A.: Lebenszyklus-Modell einer Hi-Tech-Industrie. 1992.

MENZ & MOHR 1997

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

MICHAELI U. A. 1998

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

MIEßNER U. A. 2000

Mießner, R.; Aschenbrenner, R.; Reichl, H.: Flip Chip Interconnections with Anisotropic Adhesives. In: Electronic Forum (Hrsg.): Flip-Chip & Chip Scale Europe 2000, Sindelfingen. Backnang: Electronic Forum 2000.

MOSELEYA U. A. 2000

Moseleya, S.-H.; Fettig, R.-K.; Kuttyrev, A.-S.; Mott, D.-B.; Woodgate, B.-E.: Status of the Development of a 128 x 128 Microshutter Array. In: M. Motamedi; M.Goering, R. (Hrsg.): Proc. of SPIE Vol. 4178, MOEMS and Miniaturized Systems, (Sep, 2000). Santa Clara: SPIE 2000, S. 51-58.

MRSI 2001

MRSI Group (Hrsg.): MRSI-505 Advanced Packaging. Billerica/USA: 2001.

MÜHLBAUER 1999

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

NAUMANN & SCHRÖDER 1992

Naumann, H.; Schröder, G.: Bauelemente der Optik: Taschenbuch der technischen Optik. 6. Aufl. München: Carl Hanser 1992.

NAVITAR 2000

Navitar (Hrsg.): 12X Telecentric Zoom. <<http://www.navitar.com/zoom/12x/12xtele.htm>> (05.04.2001)

NELSON U. A. 1998

Nelson, B.; Zhou, Y.; Vikramaditya, B.: Sensor-Based Microassembly of Hybrid MEMS Devices. Control Systems (1998) 12, S. 35 - 45.

NIENHAUS 1999A

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

NIENHAUS 1999B

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

OH 1998

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

PAN U. A. 2001

Pan, L.-W.; Lin, L.; Ni, J.: A flip-chip LIGA assembly technique via electroplating. Microsystem Technologies 7 (2001) 1, S. 40-43.

PATTERSON U. A. 1999

Patterson, D.-S.; Elenius, P.; Leal, J.: Wafer Bumping-Technologies: A Comparative Analysis of Solder Deposition Processes and Assembly Considerations. In: Karl Süß (Hrsg.): Süß Technical Bulletin Flip Chip. The Media Group 1999, S. 21-34.

PESL 1999

Pesl (Hrsg.): Ultrasonic Flip Chip Bonder DB5-TS. Uckfield, Großbritannien: 1999.

PETERSEN 1999

Petersen, B.: Modulare Systeme ersetzen die Handarbeit. Industrie-anzeiger. 1999, S. 47.

PETTER 1997

Petter, F.: Realisierung von Multichip-Modulen mit QFP und BGA. F&M Feinwerktechnik 105 (1997) 7, S. 528-531.

PI 1998

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co (Hrsg.): NanoPositioning 1998. Waldbronn: 1998.

PIZZI U. A. 2001

Pizzi, M.; Koniachkine, V.; Nieri, M.; Sinesi, S.; Perlo, P.: Electrostatic microshutters array for display applications.. In: Reichl. H. (Hrsg.): Micro Systems Technologies, Düsseldorf, March 27 - 29, 2001. Berlin: VDE 2001, S. 163-168.

POLYTEC GMBH 2001

Polytec GmbH (Hrsg.): Optische Strahlungsmessung Laserdiagnose. Waldbronn: 2001.

QUINONES U. A. 2000

Quinones, H.; Babiarz, A.-J.; Adamson, S.-J.: Flip Chip and Chip Scale Packaging Technologies: a Historical Perspective and Future Challenges. SEMICON China 2000, Technical Symposium China 2000. SEMICON 2000, S. A-1 - A-10.

REICHL 1986

Reichl, H.: Hybridintegration - Technologie und Entwurf von Dickschichtschaltungen. 1. Aufl. Heidelberg: Hüthig 1986.

REICHL 1998

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

REINHART & HÖPPNER 1999

Reinhart, G.; Höppner, J.: Berührungslose Handhabung mit Leistungsschall. wt Werkstattstechnik 89 (1999) 9, S. 429-432.

REINHART & JACOB 2000

Reinhart, G.; Jacob, D.: Positioning Strategies and Sensor Integration in Tools for Assembly MOEMS. In: M. Motamedi, M; Goering, R. (Hrsg.): Proc. of SPIE Vol. 4178, MOEMS and Miniaturized Systems, (Sep. 2000). Santa Clara: SPIE 2000, S. 395-402.

REINHART U. A. 1999

Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Krüger, A.: Stückzahlflexible Montage- und Logistiksysteme. wt Werkstattstechnik. 89 (1999) 9, S. 413-418.

REINHART U. A. 2000

Reinhart, G.; Jacob, D.; Zimmermann, J.; Soetebier, S.: Mikro-montage als Schlüsseltechnologie. wt Werkstattstechnik. 9 (2000) 90, S. 340-345.

REINHART U. A. 2001

Reinhart, G.; Jacob, D.; Fouchier, M.: Automated Assembly of Holder Chips to AFM probes. Proc. of SPIE Vol. 4568, Microrobotics and Microassembly III, (Oct, 2001). Boston: SPIE 2001. S. 310 - 317

RUTTERSCHMIDT 1997

Rutterschmidt, H.: Innovationen bei der Flip-Chip-Technik. F&E Feinwerktechnik 105 (1997) 11-12, S. 795-798.

SACHS 1984

Sachs, L.: Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden. 6. Aufl. Berlin: Springer, 1984.

SCHLICK & ZÜHLKE 2001

Schlick, J.; Zühlke, D.: Design and application for microparts using flexure hinges and pneumatic actuation. Proc. of SPIE Vol. 4568, Microrobotics and Microassembly III, (Oct, 2001). Boston: SPIE 2001. S. 1-11.

SCHMIDHAMMER U. A. 1995

Schmidhammer, E.; Kees, N.; Detlefsen, J.: Evaluierung eines 4- bzw. 8-kanaligen phasencodierten Abstandswarnradars. Mikrowellen und Optronik, 8. Kongreßmesse für Hochfrequenztechnik, Sindelfingen, 30.5. - 1.6.95. Sindelfingen: 1995, S. 375-381.

SCHRÖDER 1998

Schröder, G.: Technische Optik. 8. Aufl. Heidelberg: Vogel 1998.

SCHUTZRECHT DE 100 12 043.1-34

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

SCHUTZRECHT DE 100 12 081.4-34

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

SCHUTZRECHT DE 195 24 475 C1

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

SCHWEIZER U. A. 2000

Schweizer, S.; Cousseau, P.; Schiesser, S.; Lammel, G.; Calmes, S.; Renaud, P.: Thermally actuated microprojector for optical display applications. In: Motamedi, M.; Goering, R. (Hrsg.): Proc. of SPIE Vol. 4178, MOEMS and Miniaturized Systems, (Sep, 2000). Santa Clara: SPIE 2000, S. 165-175.

SEIDEL U. A. 2001

Seidel, H.; Aikele, M.; Rose, M.; Toelg, S.: Safety Relevant Microsystems for Automotive Applications. In: Reichl, H. (Hrsg.): Micro System Technologies, Düsseldorf, March 27-29, 2001. Berlin: VDE 2001, S. 29-36.

SPATH & THIES 1996

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

SPT 1999

Small Precision Tools (Hrsg.): Die Bonding Tools. Lyss/Schweiz: 1999.

SÜSS 1999

Karl Süss KG (Hrsg.): Flip Chip Bonders. Garching: 1999.

SÜSS 2000

Karl Süss KG (Hrsg.): High Accuracy Automated Flip Chip Bonder FC 150. Garching: 2000.

SYSMELEC 1999

Sysmelec SA (Hrsg.): Autoplace 411. Neuchâtel, Schweiz: 1999.

SYSMELEC 2000

Sysmelec SA (Hrsg.): SMA 1000 - Microsystems and Chip Assembler. Neuchâtel, Schweiz: 2000.

TAKEUCHI U. A. 2001

Takeuchi, Y; Miyagawa, O.; Kawai, T.; Sawada, K.; Sata, T.: Non-adhesive direct bonding of tiny parts by means of ultraprecision trapezoid microgrooves. Microsystem Technologies 7 (2001) 1, S. 6-10.

TEUTSCH U. A. 2000

Teutsch, T.; Oppert, T.; Zakel, E.; Klusmann, E.; Meyer, H.; Schulz, R.; Schulze, J.: Low Cost Bumping and Wafer Level CSP using Electroless Plating and Leadfree Solder. In: Electronic Forum (Hrsg.): Flip-Chip & Chip Scale Europe 2000, Sindelfingen. Backnang: Electronic Forum 2000.

THK 2000

THK Co. (Hrsg.): LM System Linearführungssysteme. Ratingen: 2000.

THOBEN 1999

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

THÜRIGEN 2000

Thürigen, C.: Zahnradgetriebe für Mikromotoren. Düsseldorf: VDI 2000. (Fortschritt Berichte VDI Reihe 1 Nr. 326)

TIS 2000

The Imaging Source (Hrsg.): Digitale Bildverarbeitung. Bremen: 2000.

TÖPPER & REICHL 1997

Töpper, M.; Reichl, H.: Der Weg zum Chip-Size-Package. F&M Feinwerktechnik 105 (1997) 11-12, S. 790-794.

VAN BRUSSELS U. A. 2000

Van Brussel, H.; Peirs, J.; Reynaerts, D.; Delchambre, A.; Reinhart, G.; Roth, N.; Weck, M.; Zussman, E.: Assembly of microsystems. In: Annals of the CIRP, 49(2000)2, S. 451-472

VAN SPENGEN U. A. 2000

van Spengen, W.-M.; De Wolf, I.; Knechtel, R.: Experimental one- and two-dimensional mechanical stress characterization of silicon microsystems using micro-Raman spectroscopy. In: Vladimirovsky, Y.; Coane, P. (Hrsg.): Proc. of SPIE Vol. 4175, Materials and Device Characterization in Micromachining III, (Sep, 2000). Santa Clara: SPIE 2000, S. 132-139.

VARDAMAN 1999

Vardaman, J.-E.: Worldwide Trends in Flip Chip Developments. In: Karl Süss (Hrsg.): Süss Technical Bulletin Flip Chip. The Media Group 1999, S. 1-2.

VDI/GDQ-RICHTLINIE 3441

VDI/GDQ-Richtlinie 3441: Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen - Grundlagen. Düsseldorf: VDI.

VDI/VDE-IT 1999

VDI/VDE-IT (Hrsg.): Industrieller Einsatz von Verbindungstechniken für Mikro-/Millimeterwellenkomponenten (MikroMilli), Industrielle Produktion von Mini- und hochintegrierten Endoskopen (MEP). Teltow: VDI/VDE-IT 1999, S. Innovationen in der Mikrosystemtechnik Band 67.

VDI-RICHTLINIE 2083

VDI-Richtlinie 2083: Bl. 2: Reinraumtechnik - Grundlagen, Definitionen und Festlegung der Reinheitsklassen. Düsseldorf: VDI 1996.

VDI-RICHTLINIE 2860

VDI-Richtlinien 2860 Bl. 1: Handhabungsfunktionen - Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: VDI 1980.

VDI-RICHTLINIE 2861A

VDI-Richtlinie 2861 Bl. 1: Montage- und Handhabetechnik, Kenngrößen für Industrieroboter, Achsenbezeichnungen. Düsseldorf: VDI.

VDI-RICHTLINIE 2861B

VDI-Richtlinie 2861 Bl. 2: Montage- und Handhabetechnik, Kenngrößen für Industrieroboter, Einsatzspezifische Kenngrößen. Düsseldorf: VDI.

VDI-RICHTLINIE 2861C

VDI-Richtlinie 2861 Bl. 3: Montage- und Handhabetechnik, Kenngrößen für Industrieroboter, Prüfung der Kenngrößen. Düsseldorf: VDI.

VDI-RICHTLINIE 3258A

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

VDI-RICHTLINIE 3258B

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

VIKRAMADITYA & NELSON 1997

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

VIKRAMADITYA 1995

Vikramaditya, B.: Micropositioning Using Active Vision Techniques. Chicago: 1995.

VOLMER 1992

Volmer, J.: Industrieroboter - Funktion und Gestaltung. 1. Aufl. Berlin: Verlag Technik 1992.

VRANA U. A. 1999

Vrana, M.; De Baets, J.; Van Claster, A.; Allaert, B.: Flip Chip Assembly for Chips with Gold Stud Bumps on High Density Thick Film Substrates. In: Karl Süss (Hrsg.): Süss Technical Bulletin Flip Chip. The Media Group 1999, S. 9-12.

WAGNER 1998

Wagner, T.: Miniteile so sicher handhaben wie große: Piezogreifer fassen Kleinstteile wiederholgenau. Industrieanzeiger. 120 (1998) 38, S. 54-57.

WAHL 1984

Wahl, F.-M.: Digitale Bildsignalverarbeitung. 1. Aufl. Berlin: Springer 1984.

WECHSUNG & WICHT 2001

Wechsung, R.; Wicht, H.: NEXUS Task force MST Market Analysis - Wevaluation and Update of the 1998 Report. In: Reichl, H. (Hrsg.): Micro System Technologies 2001, Düsseldorf, March 27-29, 2001. Düsseldorf: VDI 2001, S. 497-499.

WECK & PETERSEN 1998

Weck, M.; Petersen, B.: Grippers for the Assembly of Micro Systems in an Scanning Electron Microscope. Production Engineering. Vol. V/1 (1998), S. 67-70.

WEINERT U. A. 1998

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

WESTKÄMPER 2000

Westkämper, E.: Miniaturisierung und Mikrosystemtechnik. wt Werkstattstechnik 90 (2000) 11/12, S. 469.

WESTKÄMPER 2001A

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

WESTKÄMPER 2001B

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

WESTKÄMPER U. A. 1996

Westkämper, E.; Schraft, R.-D.; Bark, C.; Vögele, G.; Weisener, T.: Adhesive Gripper - a new approach to handling MEMS. In: AXON Technology Consult GmbH (Hrsg.): ACUATOR 96. 5th International Conference on New Actuators, 26.-28.6.96 Bremen. 1996, S. 100-103.

WICHT 1999

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

WIDMANN 2000

Widmann, M.: Dilatationskatheter mit integrierter Mikropumpe zur aktiven Blutstromuntersützung. Heimsheim: Jost Jetter 2000. (IPA-IAO Forschung und Praxis Nr. 318)

ZÖPPIG 1998

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

ZÜHLKE U. A. 1997

Zühlke, D.; Hanks, J.; Fischer, R.: Gripping technology for automated microassembly. Proceedings of SPIE: Microrobotics and Microsystem Fabrication, Pittsburgh PA, USA 14.-17.10.1997, Vol. 3202-02.

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. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reikhofer, 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 *Groha, 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 formstabilen 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 *Schrüfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wiesbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helml, 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 *Strohmayer, R.*
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringereinrichtungen**
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware**
1993 · 80 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen**
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung**
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme**
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *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 *Zetlmayer, H.*
**Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion**
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer
flexiblen Fertigung**
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung**
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
**Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation**
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen**
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen**
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionszellen**
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement**
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
**Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen**
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen 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 Qualitätsmanagment 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 *Krönert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung · ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Plöb, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgeleitete 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 Leitechnik 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 Rationale 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
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7

Forschungsberichte iw b

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

Forschungsberichte iw b 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 Mößmer, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelman, 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 Sprenzel, 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
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
 lieferbar ab ca. 09/01
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
 2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6

- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7
- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
lieferbar ab ca. 12/01
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
lieferbar ab ca. 12/01
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
lieferbar ab ca. 12/01