

Forschungsberichte

iwb

Band 167

Dirk Jacob

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

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

Herbert Utz Verlag

UTZ

Forschungsberichte iwb

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

herausgegeben von

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

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

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

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 μm bei 3 ω . 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 μm 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.