

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik

Von Dr.-Ing. Jürgen Staud
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

D 93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, 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 3-8316-0175-5

Printed in Germany

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

Kurzfassung

Die Mikrosystemtechnik wird als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts angesehen. Dem gegenüber steht die häufig noch fehlende automatisierte Fertigung von Mikrosystemen. Dies ist unter anderem bedingt durch die teilweise extrem hohen Anforderungen an die Montagegenauigkeit, aber auch durch ungewohnte Gesetzmäßigkeiten bei der Handhabung dieser sehr kleinen Bauteile wie z.B. starke Oberflächenkräfte.

In dieser Arbeit wird nun ein Montagekonzept für eine Präzisionsmontage vorgestellt, das auf der Verwendung von Positionsmarken auf dem Bauteil sowie auf der Montagefläche beruht, die mittels Bildverarbeitung detektiert werden. Die Ergebnisse der Positionsdetektion werden von einer Regelung zur Anlagensteuerung verwendet, um eine sehr hohe Positioniergenauigkeit zu erreichen. Dazu wurde das Konzept der sensitiven Greifer entwickelt, das aufgrund der lokalen Positionsmessung von Bauteil sowie Montagefläche ein interessantes und vor allem wirtschaftliches Anlagenkonzept ermöglicht. Die Montage von Laserdioden zur Laser-Faserkopplung ist bei dieser Arbeit von zentralem Interesse.

Die Greifwerkzeuge werden in einem Schichtaufbau, bestehend aus lasergeschnittenen Keramikplatten, realisiert. Dieser Schichtaufbau erlaubt zum einen die Adaption der Saugöffnung an das zu transportierende Bauteil, zum anderen die Integration von optischen Komponenten. Die Greifer werden so auf das Bauteil abgestimmt, daß durch einen oder mehrere optische Kanäle (GRIN-Linse + Bildleitfaser) die Abbildung der Positionsmarken der Bauteile, aber auch die der Montagefläche auf eine CCD-Kamera erfolgt. Um die Montageanlage möglichst preiswert aufzubauen, wird eine Trennung in Fein- und Grobpositionierung durchgeführt. Da durch den Einsatz der Bildverarbeitung und der sensitiven Greifwerkzeuge zur Montage eine Relativ- anstatt einer Absolutpositionierung verwendet wird, konnten die Anforderungen an die Achsen bezüglich absoluter Positioniergenauigkeit, aber auch bezüglich Steifigkeit stark reduziert werden. Für das Fügen der Bauteile wurde ein Laser-Mikrolötprozeß in die Montageanlage integriert, da dieser eine lokale Erwärmung sowie sehr schnelle Aufheiz- und Abkühlrampen ermöglicht. Die Temperaturregelung erfolgt mit Hilfe eines Pyrometers.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Extended Abstract	11
1 Einleitung	15
2 Stand der Technik	18
2.1 Montageanlagen	18
2.2 Mikrooptische Systeme	19
2.3 Greifer	22
3 Aufgabenstellung	26
4 Montagekonzept für Mikrokomponenten	29
4.1 Montageprinzip	29
4.2 Funktionsprinzipien der Abbildung	32
4.2.1 Markentypen	32
4.2.2 Beleuchtungsvarianten für Bauteile	34
4.2.3 Abbildung auf die Kamera	37
4.3 Markendetektion	39
4.3.1 Theoretische Beschreibung	39
4.3.2 Meßgenauigkeit und Bildfeld	43
4.3.3 Bestimmung der Vergrößerung	46
4.3.4 Zweidimensionale Messungen	48
4.3.5 Messungen mit verschiedener Vergrößerung	49
5 Fertigungstechniken für Greifer	52

5.1	Auslegung von Mikrowerkzeugen	52
5.1.1	Aufbau eines einfachen Vakuumgreifers	53
5.1.2	Adaption der Saugfläche	55
5.1.3	Tragkraft von Vakuumgreifern	57
5.1.4	Sensitive Greifer	59
5.2	Fertigung der Schichten	63
5.2.1	Vorbereitung der Keramikplatten	63
5.2.2	Entwurf der Schichten	63
5.2.3	Fertigungsverfahren Schichtprinzip basierend auf Laser- Mikrostrukturierung	65
5.2.4	Bearbeitungsanlage	67
5.2.5	Alternative Fertigungsverfahren	71
5.3	Fasern	72
5.4	Endmontage des Greifers	73
5.4.1	Montagestrategie	73
5.4.2	Reinigung der Schichten	73
5.4.3	Auswahl und Aufdampfen des Lotes	74
5.4.4	Stapeln der Schichten	75
5.4.5	Verbinden der Schichten	76
5.4.6	Polieren des Greifers	76
5.4.7	Einbau der Optiken	77
5.5	Integriertes Montagewerkzeug	79
6	Montageanlage	81
6.1	Maschinenkonzept	81
6.2	Anlagenbeschreibung	83
6.2.1	Aufbau der Anlage	83
6.2.2	Schnittstellen zum Greifer	85
6.2.3	Achsen	85
6.2.4	Peripherie	87
6.3	Anlagensteuerung	90
6.4	Überprüfung der Positionsregelung	91

7	Montage von Laserdioden	95
7.1	Mikrooptische Systeme	96
7.2	Vorbereitende Experimente zum Laser-Mikrolöten	98
7.2.1	Bestimmung der Pyrometerkennlinien	98
7.2.2	Bestimmung der notwendigen Laserleistung	99
7.2.3	Regelung der Laserleistung	102
7.3	Laser-Mikrolöten	103
7.3.1	Montage von Kantenemittern	103
7.3.2	VCSEL-Montage	105
8	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis	109

1 Einleitung

Während heutzutage mikroelektronische Systeme sehr ausgereift und weitverbreitet sind, stehen mikromechanische Systeme oder allgemeiner MEMS (micro electro mechanical systems) noch vor ihrem großen Durchbruch.

Die Bezeichnung MEMS wird üblicherweise sehr allgemein verwendet. Dazu kann ein rein mechanisches Mikrosystem ohne elektronische Funktionen gehören, aber auch mikrooptische Systeme werden zu den MEMS gezählt (eventuell mit der Abkürzung MOEMS für micro opto electro mechanical systems). Um zusätzlich auch Systeme mit fluidischen oder chemischen Komponenten zu erfassen, hat sich der Begriff Mikrosystemtechnik MST (Micro System Technologies) eingebürgert, siehe auch [1] oder [2]. Ein schöner Überblick über die Mikrosystemtechnik ist in [3] gegeben.

Mikrosysteme haben seither nur in wenigen Anwendungen Fuß gefaßt. Zur Zeit sehr bekannte Beispiele sind der Drehratesensor und der Beschleunigungssensor, die im Automobilbau zur Fahrdynamikregelung zum Einsatz kommen. Weitere Beispiele sind Abtastköpfe für CD-Spieler, die als hybrid integrierte Systeme Laserdiode, Mikrooptik, Optoelektronik und ein mechanisches Nachführsystem enthalten, oder Druckköpfe für Tintenstrahldrucker.

Im Gegensatz zu ihrem noch relativ geringen Verbreitungsgrad wird die Mikrosystemtechnik als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts angesehen. Neben den oben genannten verkehrs- und datentechnischen Anwendungen ermöglicht sie durch die Miniaturisierung und Kombination von mechanischen, elektrischen und optischen Komponenten innovative Produkte in den Anwendungsbereichen Sensorik, Medizintechnik, Umwelttechnik oder Telekommunikation.

Ein Grund für die erschwerte Verbreitung von Mikrosystemen ist die oft noch fehlende automatisierte Fertigung solcher Systeme. Klein- und Mittelserien von Mikrosystemen werden üblicherweise manuell montiert. Bei der hybriden Integration müssen in manchen Fällen die einzelnen Teile mit extrem hoher Genauigkeit (im Mikrometerbereich, teilweise sogar darunter) zueinander montiert werden. Dies ist ein größtenteils ungelöstes Problem.

Bei Mikrosystemen gelten in manchen Bereichen zudem andere Gesetzmäßigkeiten als gewohnt, die erst gelernt werden müssen. So können bei der Montage von Bauteilen, die kleiner als 1 mm sind, Oberflächenkräfte wie Adhäsion gegenüber der Gewichtskraft (Volumenkräfte) dominieren, da das Volumen mit der dritten Potenz, die Oberfläche eines Bauteils dagegen mit der zweiten Potenz der Größe skaliert. Solche kleinen Bauteile können an glatten Flächen haften bleiben und fallen nicht notwendigerweise nach unten. Ein anderes Beispiel ist die Mikroaktorik. In vielen Fällen ist es nicht möglich, makroskopische Antriebe einfach zu verkleinern. Dagegen können im Mikrobereich Wirkprinzipien wie Formgedächtnislegierungen oder magnetostruktive Legierungen [4] eine Rolle spielen (z.B. für Klemmgreifer, siehe Kapitel 2.3), die im Makrobereich unbedeutend sind.

Seit 1997 beschäftigt sich beispielsweise der SFB 440 (Montage hybrider Mikrosysteme) an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen mit den montage- und fügetechnischen Grundlagen für die Herstellung von Mikrosystemen in hybrider Bauweise¹. Sein Ziel ist, mit einer Prozeßüberwachung eine Automatisierung der Montage solcher Systeme in Klein- und Mittelserien zu ermöglichen.

Als Beispiel eines Mikrosystems, das derzeit von wachsendem Interesse ist, sei die Faserkopplung von Halbleiter-Laserdioden mit hohem Einkopplungsgrad aufgeführt. Dabei kann es sich um Hochleistungs-Laserdioden (meist kantenemittierende Laserdioden), aber auch um Laserdioden mit niedriger Ausgangsleistung für optische Verbindungen (z.B. oberflächenemittierende Laserdioden) handeln.

Der hohe Wirkungsgrad von Laserdioden ($> 30\%$) macht sie interessant für Direktanwendungen wie die Lasermaterialbearbeitung. Die vergleichsweise geringe Ausgangsleistung einer einzelnen Laserdiode kann durch Verwenden einer großen Anzahl von Dioden ausgeglichen werden (Leistungsskalierung, siehe dazu [5] sowie [6]). Allerdings sind Singlemode-Laserdioden mit ihrer hohen Strahlqualität notwendig, um gleichzeitig auch hohe Leistungsdichten ($> 10^6 \text{ W/cm}^2$) zu erreichen; die mit Multimode-Laserdioden erzielbaren Leistungsdichten von ca. 10^4 W/cm^2 reichen beispielsweise für das Schneiden und Tiefschweißen metallischer Werkstoffe (10^6 W/cm^2) nicht aus [6], [7]. Bei diesen Singlemode-Laserdioden ist im Vergleich zu

¹ <http://www.rwth-aachen.de/isf/Ww/sfb440/>

Multimode-Laserdioden eine sehr hohe Montagegenauigkeit ($< 1 \mu\text{m}$) relativ zur Faser erforderlich, wenn ein hoher Koppelwirkungsgrad erreicht werden soll.

Für optische Netzwerke sind zweidimensionale Anordnungen von oberflächenemittierenden Laserdioden (VCSEL = vertical cavity surface emitting laser) von Bedeutung. Dabei können beispielsweise 100×100 VCSELs in Glasfasern eingekoppelt werden. Ebenso sind Anordnungen (Arrays) mit einer großen Anzahl von Detektoren notwendig.

In dieser Arbeit wird nun ein Montagekonzept für eine Präzisionsmontage vorgestellt, das auf der Verwendung von Positionsmarken auf dem Bauteil sowie auf der Montagefläche beruht, die mittels Bildverarbeitung detektiert werden. Die Ergebnisse der Positionsdetektion werden von einer Regelung zur Anlagensteuerung verwendet, um eine hohe Positioniergenauigkeit zu erreichen. Dazu wurde das Konzept der sensitiven Greifer entwickelt, das aufgrund der lokalen Positionsmessung von Bauteil sowie Montagefläche ein interessantes und vor allem wirtschaftliches Anlagenkonzept ermöglicht. Diese neuartige Montageanlage erlaubt die Montage von Arrays unterschiedlicher Bauteile wie elektronische Chips mit hoher Integrationsdichte und kleinen Kontaktflächen, Mikrosensoren, Leuchtdioden, Detektoren oder Laserdioden; die Montage von Laserdioden ist bei dieser Arbeit von zentralem Interesse.

Da sich der Laser selbst als vielseitiges Werkzeug [7] für die verschiedensten bei dieser Konzeptverfolgung notwendigen Bearbeitungsschritte herausgestellt hat – angefangen von der Fertigung der einzelnen Schichten für die Greifer oder die Gehäuseteile eines Mikrosystems, über die Herstellung von Positionsmarken, der Strukturierung von elektrischen Verbindungen in mikrooptischen Systemen bis hin zur Montage der Laserdioden mit Hilfe eines Diodenlasers (Laser-Mikrolöten) – wird er bei der Erarbeitung dieses Konzepts eingehend berücksichtigt.

2 Stand der Technik

An dieser Stelle sind einige Beispiele für intelligente Montageanlagen, Mikrosysteme sowie unterschiedliche Greifwerkzeuge aufgeführt. Ein Großteil der Beispiele wurde von verschiedenen Forschungsinstituten entwickelt, einige Greifer bzw. Montageanlagen sind bereits auch kommerziell erhältlich.

2.1 Montageanlagen

Konventionelle, rein mechanische Montageanlagen wie Die-Bonder, Flip-Chip-Bonder oder PCB-Bestückungsanlagen (printed circuit board) erreichen eine Montagegenauigkeit von ca. 30 μm [8]. Üblicherweise befindet sich ein Maßstab in der Positioniereinheit (z.B. ein Glasmaßstab der Firma Heidenhain [9]), um eine hohe absolute Positioniergenauigkeit der Achse ($< 1 \mu\text{m}$) zu erreichen. Die Maschine ist als mechanisch hochstabile Einheit ausgelegt, damit die Positioniergenauigkeit am Werkzeug selbst nicht deutlich schlechter ausfällt. Trotzdem verringern thermische Drifts, Umkehrspiel in Gelenken oder ähnliches die Genauigkeit. Eine Reduzierung dieser Anlageneffekte für eine Präzisionspositionierung ist aufwendig und teuer.

Damit die zu montierenden Bauteile exakt aufgenommen und positioniert werden, gibt es die Möglichkeit, die Teile gegen einen Anschlag zu fahren oder an einem gesonderten Meßplatz auszumessen. Eine weitere Möglichkeit, die sich immer mehr durchsetzt, ist der Einsatz von Bildverarbeitungssystemen. Dabei wird mit einer externen CCD-Kamera und meist mit hochwertigen Objektiven (da bei großem Arbeitsabstand eine hohe Vergrößerung benötigt wird) die Montageposition aufgenommen und von einem Computer überwacht. Aufwendige Bildverarbeitungssysteme sind in der Lage, selbst anhand eines perspektivisch schräg aufgenommenen Bildes die genaue Position eines Bauteils auf der Montagefläche zu ermitteln und so eine dreidimensionale Lageerkennung durchzuführen [10].

Eine Realisierung einer solchen Anlage ist das „Sensorbasierte Mikromontagewerkzeug SATURN“ des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften iwB der TU München. Diese Anlage zum Aufbau hybrider Mikrosysteme enthält neben einem Kraftsensor eine Bilderfassung, die senkrecht auf