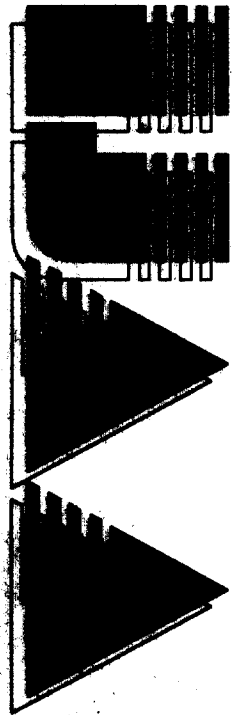


INTERNATIONAL JOURNAL

HEFT 1

Jg. 5, (1997)

AUTOMATION AUSTRIA



INHALT

	<i>Seite</i>
HESSELBACH, J. Neue Anwendungsbereiche der Montagetechnik: Mikromontage - Demontage	1
VOICU, M. / MORGAN, B.-L. Variable Structure Control System Characterization and Design Via Plant Invariance Method	12
SCHLAGLICHER	25
BUCHBESPRECHUNG	31
DISSERTATIONSKURZFASSUNG	33
VERANSTALTUNGSKALENDER	35

Neue Anwendungsbereiche der Montagetechnik Mikromontage - Demontage

J. Hesselbach

Kurzfassung: Im ersten Teil dieses Beitrages wird die Montage von Kleinstteilen (Mikromontage) behandelt. Dieses Thema ist im Zusammenhang mit der Fertigung von Produkten der Mikrosystemtechnik zu sehen. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Demontage am Beispiel der Zerlegung von elektronischen Altgeräten.

1. EINLEITUNG

Die Montage ist (auch kostenmäßig) ein wesentlicher Teilbereich der Produktion. Ähnlich wie die anderen Bereiche unterliegt daher auch die Montage ständigen Rationalisierungsbemühungen, u.a. auch der Automatisierung einzelner Montageverrichtungen. Im Unterschied zur Teilefertigung gibt es je nach Produkt/Branche die unterschiedlichsten Methoden, Organisationsformen und Techniken. Dabei haben sich bestimmte Standardkomponenten, wie z.B. Handhabungsgeräte, Verkettungs- oder Zuführeinrichtungen, die in produktspezifischen Montagesystemen zusammengefaßt werden, herausgebildet.

Innovationen auf diesem Gebiet ergeben sich aus den Möglichkeiten neuer Technologien oder den Anforderungen neuer Anwendungen bzw. Produkte. Ein Beispiel dafür ist die Miniaturisierung von Produkten durch die Mikrosystemtechnik bei der signalverarbeitende, sensorische und aktorische Elemente auf der Basis unterschiedlichster Technologien für die unterschiedlichsten Anwendungen verknüpft werden. Bisher sind Mikrosysteme jedoch erst in geringer Anzahl realisiert. Inzwischen steht die Mikrosystemtechnik aber an der Schwelle zur industriellen Umsetzung. Eine Voraussetzung dafür sind auch geeignete Montagetechniken für den hybriden Aufbau derartiger Produkte.

Ein anders gelagertes neues Anwendungsfeld der Montagetechnik stellt die Demontage von Altgeräten mit dem Ziel der Gewinnung von Komponenten für die Wiederverwendung oder die Wertstoffrückgewinnung dar. Demontage ist dabei nicht die Umkehrung der Montage bzw. des Fügevorgangs sondern beinhaltet i.d.R. auch zerstörende Trennverfahren. Insbesondere hierfür sind spezielle Einrichtungen erforderlich.

2. MIKROMONTAGE

2.1 BEDEUTUNG DER MONTAGE BEI DER HERSTELLUNG VON MIKROSYSTEMEN

Zur Herstellung von Mikrosystemen kann der Technologievorrat der Mikroelektronik genutzt werden, solange es möglich ist, das gesamte Mikrosystem monolithisch in Siliziumtechnik zu fertigen. Die Vielfalt möglicher Funktionalitäten von Mikrosystemen läßt sich durch alleinige monolithische Integration jedoch nicht realisieren (Büttgenbach, Hesselbach, 1994). Außerdem

wird der größte Teil der Mikrosystemprodukte im Bereich kleiner bis mittlerer Stückzahlen liegen, so daß diese Produkte auch in Zukunft durch einen hybriden Aufbau gekennzeichnet sein werden, der eine Montage der Komponenten erfordert. Die Bedeutung der Mikromontage und insbesondere der Handhabung als Schlüssel zum wirtschaftlichen Erfolg der miniaturisierten Systeme wurde auch in einer Umfrage unter 80 Firmen und Instituten im Jahr 1995 bestätigt (Hesselbach, Kühn, 1995).

Der Montage innerhalb des Fertigungsprozesses von Mikrosystemen messen 53% der Befragten zumindest eine hohe Bedeutung bei, weitere 39% sehen sie gar als entscheidend an (**Bild 1**).

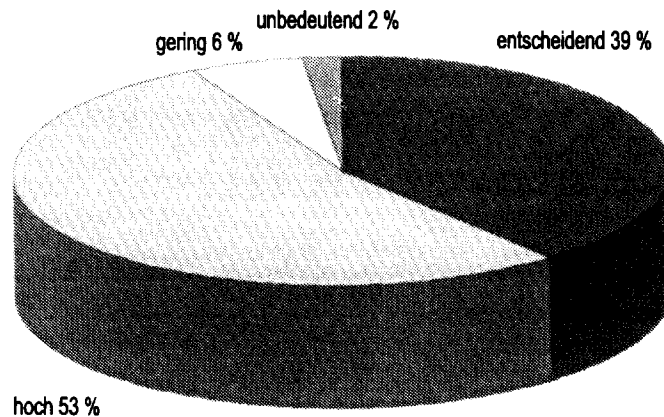


Bild 1: Bedeutung der Montage

Die Montage umfaßt im wesentlichen die Handhabung und das Fügen der Mikrokomponenten und wird im allgemeinen im Rahmen einer produktspezifischen Gesamtlösung zusammengefaßt werden. Dabei ist hier zu unterscheiden zwischen einer Montage im Nutzen, bei der gleichartige Mikrokomponenten parallel auf dem Wafer montiert werden, und der diskreten Montage von Mikrokomponenten, bei der diese Bauteile seriell montiert werden.

Für die Montage im Nutzen gibt es beispielsweise im Bereich des anodischen Bondens von Komponenten eines Beschleunigungssensors erste Automatisierungsansätze. Dazu werden zur Ausrichtung der Wafer konventionelle Handhabungssysteme verwendet. An dieser Stelle ist die hochgenaue Justierung von zwei Wafern zueinander notwendig, die über eine optische Ausrichtung und eine entsprechende Kopplung mit dem Handhabungssystem auch automatisierbar ist.

Bei der diskreten Montage von mikrotechnischen Bauteilen findet hingegen eine überwiegend manuelle Montage mit einfachen Hilfsmitteln wie z.B. Pinzetten statt. Die manuelle Montage von Mikrosystemen, deren Einzelteile Abmessungen unter einem Millimeter besitzen, stellt an die menschliche Arbeitskraft besonders hohe Anforderungen, die durch das Arbeiten am Mikroskop und den Einsatz von Manipulationshilfen gekennzeichnet sind. Unter solchen Bedingungen ist eine wirtschaftliche Herstellung mikrotechnischer Produkte in höheren Stückzahlen mit gleichbleibender Qualität nur schwer möglich.

Dies soll anhand einer konkreten Aufgabe, der Montage einer Baugruppe eines Tasters für 3-D-Koordinatenmeßmaschinen skizziert werden. Neuartige, hochpräzise Taster arbeiten mit schwingenden Taststiften, die aus einem Stimmgabelquarz, zwei Glasfasern und einer Rubinkugel bestehen (**Bild 2**).

Bei der Herstellung des Tasters werden die Glasfasern (Durchmesser von ca. $70\ \mu\text{m}$) jeweils mit einem Ende auf den Quarz geklebt. Anschließend wird die Rubinkugel (Durchmesser $130\ \mu\text{m}$) auf das andere Ende einer Glasfaser geklebt. Diese Tätigkeiten werden manuell von einem hochqualifizierten Feinmechaniker durchgeführt.

Um den enormen Präzisions- und Qualitätsanforderungen gerecht zu werden, sind nicht nur geometrisch enge Toleranzen einzuhalten, sondern darüber hinaus auch die Gewichtsverhältnisse der schwingenden Teile im

Mikro-Gramm-Bereich abzustimmen. Hierfür sind mehrere Stunden Montagezeit erforderlich. Damit stehen die Lohnkosten des spezialisierten Personals in erheblichem Ungleichgewicht zu den vergleichsweise niedrigen Materialkosten. Handlungsbedarf ergibt sich somit insbesondere im Bereich der diskreten Montage von Mikrobauteilen.

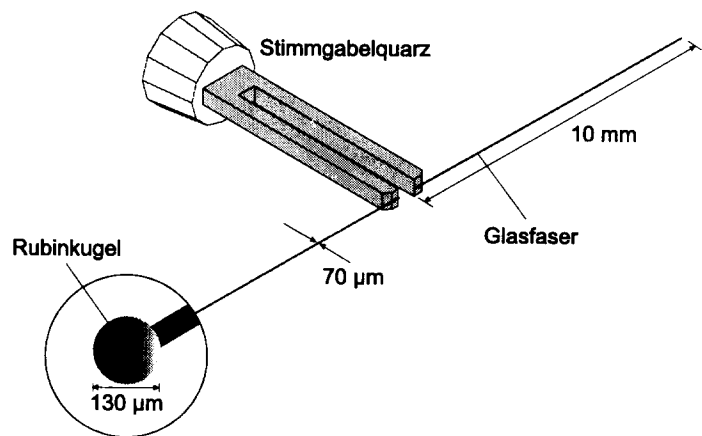


Bild 2: Meßtaster

2.2 PROBLEME DER MIKROMONTAGE

Die Bauelemente der Mikrosystemtechnik sind durch einen hohen Miniaturisierungsgrad gekennzeichnet. Wie die erwähnte Untersuchung ergab, besitzen bereits heute fast 60% der industriell verwendeten Bauteile Abmessungen von weniger als 5 mm.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß die Entwicklung hin zu noch kleineren Strukturen weiter anhält. Dies führt zu folgenden, in der makroskopischen Montage bedeutungslosen oder zumindest vernachlässigbaren, für die Mikromontage jedoch wesentlichen Problemen:

- **Positioniergenauigkeit:** Die Mikroteile müssen während des Produktionsprozesses hochpräzise positioniert und orientiert werden. Die Toleranzen bei der Positionierung liegen hierbei zwischen $0,1$ und $2\ \mu\text{m}$.
- **Unterschiedliche Geometrien:** Während die Bauteile der Mikroelektronik hinsichtlich der Geometrie einen hohen Standardisierungsgrad aufweisen, haben die Bauteile der Mikrosystemtechnik unterschiedliche Geometrien.
- **Flächenpressung:** Da die für die Handhabung zur Verfügung stehenden Greifflächen an den Mikroteilen kleiner werden, kann es zu einer signifikanten Erhöhung der Flächenpressungen kommen.
- **Oberflächenkräfte:** Bei Mikroteilen tritt ein geändertes Teilverhalten auf, das durch Abnahme von Volumen- und Zunahme von Oberflächeneffekten gekennzeichnet ist (Fearing, 1995). Dies hat zur Folge, daß elektrostatische und van-der-Waals-Kräfte gegenüber Gewichts- und Trägheitskräften dominieren. Elektrostatische Kräfte haben ihre Ursache in unterschiedlichen elektrischen Ladungen der beiden in Kontakt stehenden Oberflächen.

Kapillarkräfte treten auf, wenn ein Flüssigkeitstropfen zwei Oberflächen berührt. Auf-

grund der Oberflächenspannung der Flüssigkeit entsteht eine Anziehungskraft zwischen den beiden Oberflächen. Im Größenbereich um 1 mm und bei Anwesenheit genügender Feuchtigkeitsmengen sind diese Kapillarkräfte wesentlich größer als elektrostatische oder Van-der-Waals-Kräfte. Sie können jedoch relativ einfach unterdrückt werden, wenn die Montageumgebung trocken ist.

- *Randbedingungen:* Mit der fortschreitenden Miniaturisierung der Mikrostrukturen muß eine Reduzierung der Defektdichte sowie der Defektgröße in der Produktionsumgebung bei gleichzeitig kontrollierter Temperatur und Luftfeuchtigkeit erreicht werden, d.h. der Produktionsprozeß muß in einer Reinraumatmosfera erfolgen.

2.4 ANFORDERUNGEN UND LÖSUNGSANSÄTZE

Um kostengünstigere Produktionstechniken und damit einen höheren Automatisierungsgrad bei der Produktion der Mikrosysteme zu erreichen, sind bei nahezu allen Komponenten automatisierbarer Montagesysteme Entwicklungen erforderlich. Von industrieller Seite im Bereich der Anlagen- und Gerätetechnik werden besonders Entwicklungen bei Handhabungsgeräten, Fügeeinrichtungen, Greifern, Kontrolleinrichtungen und Zuführeinrichtungen als notwendig angesehen (Hesselbach, Kühn, 1995).

2.4.1 HANDHABUNGSGERÄTE FÜR DIE MIKROMONTAGE

Für die Handhabung und Montage der Einzelteile sowie für die Kopplung des Mikrosystems mit der makroskopischen Umgebung sind hochpräzise Handhabungssysteme notwendig. Notwendige Genauigkeiten ergeben sich aus vorhandenen Produkten bzw. den geringen Bauteilabmessungen und Toleranzen und liegen zwischen 1 und 10 μm . Weiterhin ist zu beachten, daß Reinraumbedingungen eine Voraussetzung zur Gewährleistung der Funktionalität und Lebensdauer der zu montierenden Systeme sind. Dabei ist ein Trend zum lokalen Reinraum aufgrund der geringen Investitions- und Betriebskosten zu erkennen (Gath, et al., 1991).

Als weitere Randbedingungen sind der begrenzte Arbeitsraum von einigen cm^3 (Gengenbach, et al., 1995), die geringen notwendigen Tragfähigkeiten aufgrund ebenfalls miniaturisierter Greifersysteme und die kleinen Verfah- und Fügebewegungen zu nennen. Die Anforderungen an Roboter in der Mikromontage sind in **Tabelle 1** zusammengefaßt.

Kriterium	Anforderungen aus der Mikromontage
Arbeitsraum	klein
Bauraum	vernachlässigbar
Genauigkeit	sehr hoch
Trägheit	klein
Tragfähigkeit	gering
Geschwindigkeiten	gering bis mittel
Reinraumanforderungen	sehr hoch

Tabelle 1: Anforderungen an einen Roboter in der Mikromontage

Zur Zeit werden für diese Aufgaben noch vorwiegend konventionelle Handhabungsgeräte basierend auf seriellen kinematischen Strukturen mit relativ großen Arbeitsräumen und hohem konstruktivem Aufwand verwendet. Aus den bisherigen Ausführungen wird aber deutlich, daß der Miniaturisierung der Produkte zwangsläufig eine Miniaturisierung der Handhabungsgeräte folgen sollte. Damit wird der Aufwand und somit die Kosten für die Erreichung hoher Genauigkeiten reduziert.

Roboter auf der Basis geschlossener kinematischer Ketten bieten sich für dieses Aufgabenfeld an, da sie hohe Auflösungen ermöglichen, über die Isolierung der Antriebe vom Arbeitsraum einen lokalen Reinraum ermöglichen und der Bauraum dieser Roboter aufgrund des kleinen Arbeitsraums vernachlässigbar wird (Hesselbach, Thoben, Plitea, 1996).

Am Institut für Fertigungsautomatisierung und Handhabungstechnik (IFH) in Braunschweig wurde ein Prototyp nach dem HEXA-Prinzip (Pierrot, et al., 1990) entwickelt und umgesetzt, der sechs Freiheitsgrade auf der Basis rotatorischer Antriebe bietet (**Bild 3**). Angesteuert werden diese Antriebe über eine kommerzielle Steuerung, in die die notwendigen Transformationsgleichungen sowie die notwendigen Arbeitsraumüberwachungen integriert worden sind. Dieser Labor-Prototyp wird für die grundlegenden Untersuchungen z.B. die Hochgenauigkeitsmontage mit Parallelstrukturen und deren industrielle Umsetzung genutzt.

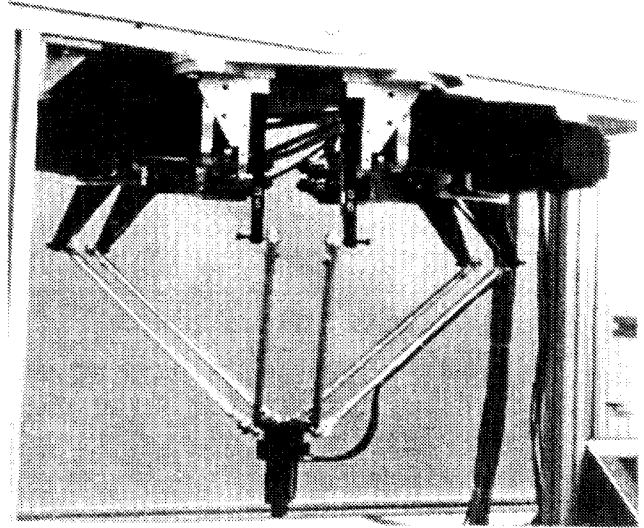


Bild 3: HEXA-Roboter am IFH

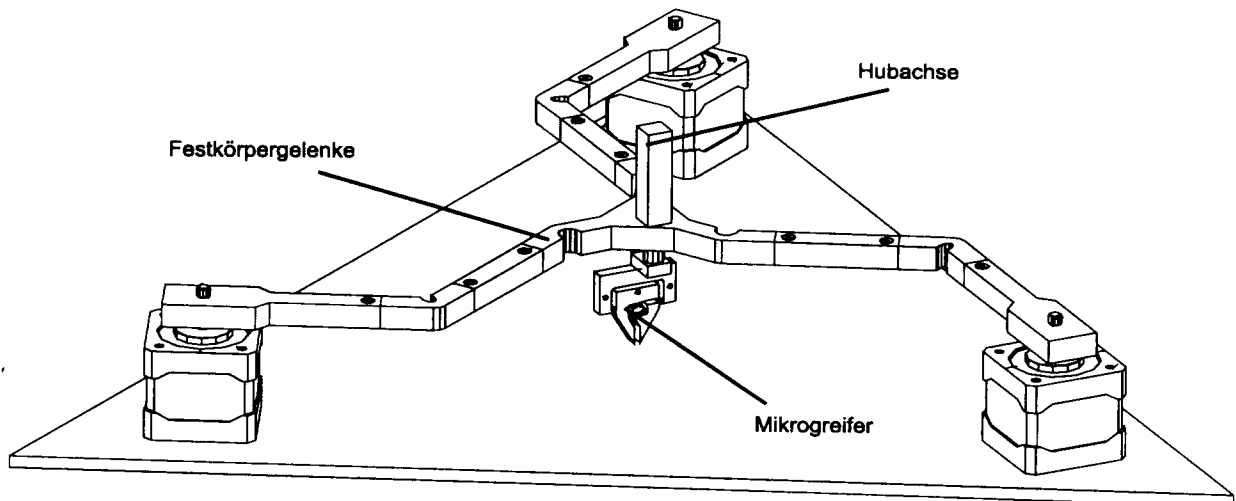


Bild 4: Handhabungsgerät mit Festkörpergelenken für die Mikromontage

Die Reinraumtauglichkeit der Parallelroboter kann noch durch den Einsatz von sogenannten Festkörpergelenken gesteigert werden (Hesselbach, Thoben, Pittschellis, 1996). Dies ist bei Parallelrobotern insbesondere deshalb möglich, da diese Strukturen passive Gelenke enthalten, die in Form von Festkörpergelenken ausgeführt werden können. Die Festkörpergelenke bieten die Vorteile der Spiel- und Reibungsfreiheit und der Abriebfreiheit. Diese Eigenschaften können sehr gut im Bereich der Mikromontage für hohe Genauigkeiten und Reinraumtauglichkeit genutzt werden (**Bild 4**).

Nachteil sind allerdings die eingeschränkten Drehwinkel, die zu einer Einschränkung des möglichen Arbeitsraumes führen und zu konstruktiven Einschränkungen, die bei der Umsetzung des Roboters für die Mikromontage beachtet werden müssen.

2.4.2 GREIFER

Greifer für die Handhabung von Mikrobautteilen müssen hinreichend klein sein, damit die Greifer die Fügestellen überhaupt erreichen können und reinraumtauglich gestaltet werden.

Ein besonderes Problem sind hier auch die Oberflächenkräfte. Das Verhalten von Teilchen mit Abmessungen unterhalb von 1 mm wird von den Oberflächenkräften dominiert: Die Teilchen lösen sich nicht mehr von allein vom Greifer. Ist die Montageumgebung hinreichend trocken und die Oberflächen der Greifer rau genug, haben Kapillar- und Van-der-Waals-Kräfte nur geringen Einfluß; von entscheidender Bedeutung ist daher die Beherrschung der elektrostatischen Kräfte beim Greifprozeß.

Während Van-der-Waals-Kräfte immer störend wirken, können Kapillar- und elektrostatische Kräfte auch gezielt zum Greifen ausgenutzt werden. Adhäsionsgreifer sind schon lange bekannt. Der Vorteil dieser Greifer ist die äußerst geringe Bauteilbelastung, so daß neuerdings das Adhäsionsprinzip in der Mikromontage durchaus interessant ist. So wurden Adhäsionsgreifer entwickelt, die Alkoholtropfen als Haftmedium verwenden. Der Vorteil elektrostatischer Greifer liegt vor allem im extrem einfachen Aufbau, der im wesentlichen aus einer Elektrode besteht. Allerdings lösen sich die Bauteile nur schlecht vom Greifer, weil die Ladungen auch nach Abschalten der Spannung nur langsam abfließen. Die Prinzipskizze eines am IFH entwickelten Prototyps eines elektrostatischen Miniaturgreifers zeigt **Bild 5** /Hesselbach, Pittschellis, Thoben, Oh, 1996/.

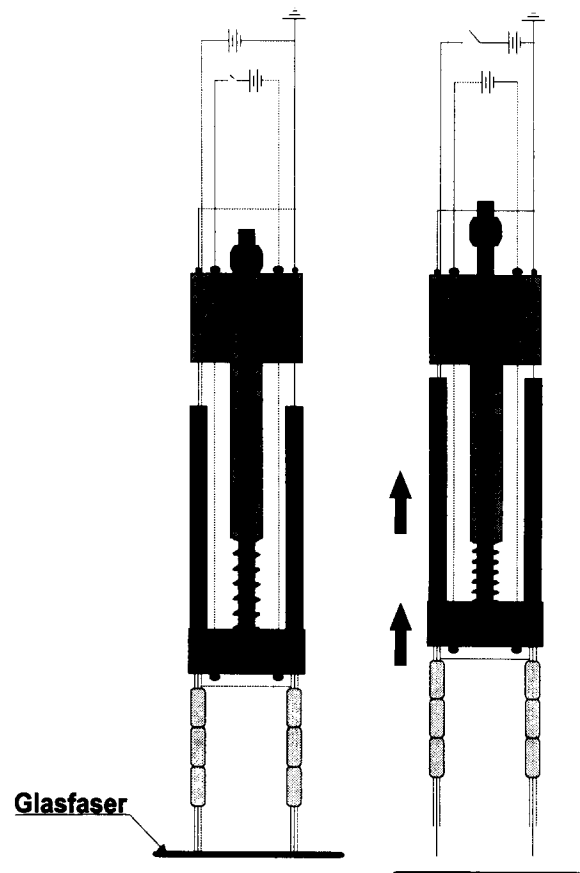


Bild 5: Elektrostatischer Greifer

Wesentlicher Bestandteil sind die beiden ineinandergeschobenen, nadelförmigen Elektroden, die ein starkes elektrisches Feld aufbauen, das die Objekte (hier speziell Glasfasern) festhält. Je nach Gestalt des Handhabungsobjekts können mehrere nadelförmige Elektroden benutzt werden. Zum Lösen des Objekts wird die Spannung abgeschaltet und die beiden röhrenförmigen Elektroden werden zurückgezogen, wodurch das elektrische Feld zusammenbricht und das Objekt sich wieder vom Greifer löst.

Mechanische Greifer sind in der konventionellen Montage weit verbreitet. Viele ihrer Eigenschaften sind auch für die Mikromontage vorteilhaft, wie z.B.

- Unabhängigkeit von den Umgebungsbedingungen (z.B. Vakuum).
- Zentrierung der gegriffenen Objekte
- Viele Ausführungsformen hinsichtlich Greifbewegung (Innen- oder Außengreifer, Scheren-, Schwenk- oder Parallelgreifer) und Greifkraftverlauf (progressiv, degressiv, linear).

Bild 6 zeigt einen mechanischen Miniaturgreifer, der speziell für die Erfordernisse der Mikromontage entwickelt wurde (Hesselbach, Pittschellis, 1996).

Den Forderungen nach Einfachheit, Reinraumtauglichkeit, Objektzentrierung und kleinen Abmessungen wird durch den Formgedächtnisantrieb und die mit Festkörpergelenken realisierte Greiferkinematik entsprochen. Mit Formgedächtnislegierungen lassen sich abriebsfreie und sehr kompakte Aktoren realisieren. Beim vorgestellten Greifer genügt je ein Formgedächtnis-

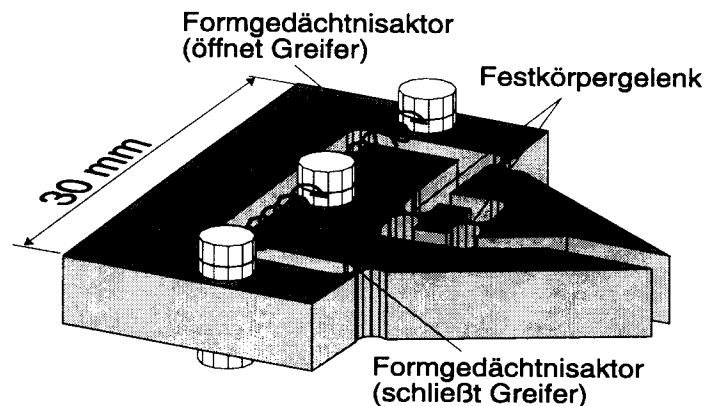


Bild 6: Mechanischer Greifer für die Mikromontage

draht zum Schließen und Öffnen des Greifers. Formgedächtnisaktoren sind als thermisch aktivierte Aktoren prinzipiell in der Dynamik begrenzt, weil sie nach jedem Hub erst wieder abkühlen müssen. Bei den Größenverhältnissen dieses Greifers erreichen die Formgedächtnisaktoren auch ohne aktive Kühlung eine ausreichende Dynamik. Die in diesem Greifer verwirklichte Kinematik sorgt für eine Zentrierung des gegriffenen Objekts auf die Greiferlängsachse. Die Beweglichkeit der Getriebeglieder ist bei diesem Greifer jedoch nicht durch Gleitpaarungen, sondern durch Festkörpergelenke realisiert. Das sind einfach biegsame Stellen des Greiferkörpers, die entsprechende Drehungen zulassen. Diese Gelenke sind ebenso wie die Formgedächtnislegierungen abriebsfrei und deshalb hervorragend für den Einsatz im Reinraum geeignet. Zudem kann der gesamte Greifer sehr preiswert und in kleinsten Abmessungen durch Spritzguß hergestellt werden. Um Probleme durch elektrostatische Adhäsion zu vermeiden, können Greifbacken aus geeigneten Materialien und Geometrien angeschraubt, abgeklebt oder angegossen werden.

Die vorgestellten Prinzipien für Roboter und Greifer sind erste Ansätze für Handhabungsgeräte, die den Besonderheiten der Mikromontage entsprechen. Aber auch im Bereich der Sensorführung, Zuführtechnik oder Montageorganisation verbleibt noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die Probleme der Mikromontage wirtschaftlich zu lösen.

