

Michael Schilp

**Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen  
zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile  
in der Mikromontage**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 199

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2006

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die  
der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von  
Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechani-  
schem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in  
Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur  
auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2007

ISBN 978-3-8316-0631-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## Geleitwort der Herausgeber

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 sowie von 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 Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in 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.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Vorgehensweise	3
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Mikrosystemtechnik – Überblick und Definitionen	5
2.2 Montageaufgabenstellungen in der Mikrosystemtechnik	8
2.2.1 Bauteilspektrum der Mikrosystemtechnik	8
2.2.2 Einschränkende Bauteileigenschaften für die Montage	11
2.3 Greifertechnologien	15
2.3.1 Grundlegende Klärung der Begriffe	15
2.3.2 Wirkprinzipien, Greifphasen und notwendige Subsysteme	16
2.3.3 Anforderungen an Greifer für die Mikromontage	17
2.3.4 Stand der Technik bei taktilen, mechanischen Greifern	18
2.3.5 Stand der Technik bei taktilen fluidischen Greifern	20
2.3.6 Nachteile taktilen Greifens	21
2.4 Bekannte Beispiele für Technologien zur berührungslosen Kraftaufbringung	22
2.4.1 Definition „berührungslose Handhabung“	22
2.4.2 Elektrostatische Systeme	22
2.4.3 Magnetsysteme	23
2.4.4 Konventionelle Luftlager und Luftkissensysteme	24
2.4.5 Bernoulli-Prinzip, hydrodynamisches Paradoxon	26
2.4.6 Ultraschallsysteme	27
2.4.7 Adhäsive Systeme	30
2.5 Defizite bekannter Lösungen aus dem Stand der Technik	31
<b>3 Mögliche Prinzipien zum berührungslosen Aufbringen von Zug- und Druckkräften</b>	<b>33</b>
3.1 Grundsätzliche nichttaktile physikalische Prinzipien	33
3.1.1 Aerostatische Lager	33

---

3.1.2	Anziehende Kräfte durch Unterdruck	38
3.1.3	Selbsterregte aerodynamische Lager	38
3.1.4	Hydrodynamisches Paradoxon (Bernoullieffekt)	38
3.1.5	Luftlager durch Ultraschallanregung	41
3.1.6	Elektrostatische Kräfte	44
3.1.7	Magnetische Kräfte	45
3.2	Entscheidungskriterien	46
3.2.1	Möglichkeiten der Umsetzung bei sehr kleinen oder schweren Bauteilen	46
3.2.2	Materialabhängigkeit	46
3.2.3	Beeinträchtigung der Integrität der Bauteile	47
3.2.4	Umsetzungsaufwand der einzelnen Lösung	47
3.2.5	Verschmutzung	47
3.2.6	Konstruktive Einflüsse	48
3.2.7	Wirtschaftliche Überlegungen	48
3.2.8	Analyse der einzelnen Varianten	48
<b>4</b>	<b>Einsatz des Luftkissenprinzips für Greifprozesse</b>	<b>51</b>
4.1	Gründe für die Entscheidung für den Einsatz von Luftkissen	51
4.2	Das Verhalten des vorgespannten Luftkissengreifers	52
4.3	Gestaltung des Luftlager-Vakuumgreifers	53
4.4	Gestaltung des Ultraschall-Vakuumgreifers	55
4.4.1	Erzeugung der Ultraschallschwingung	55
4.4.2	Schallausbreitung in Festkörpern und Fluiden	56
4.4.3	Schallwandlung in festen Körpern	60
4.4.4	Schalleitung und Schalltransport	63
4.4.5	Unterdruckschnittstelle für anziehende Haltekräfte	65
4.5	Zusammenfassung	66
<b>5</b>	<b>Prinzipien zum Aufbringen lateraler Zentrierkräfte</b>	<b>67</b>
5.1	Betrachtung der physikalischen Prinzipien	67
5.2	Beeinträchtigung durch Zentriervorrichtungen	69
5.3	Untersuchung lateraler fluidischer Zentrierkräfte	70
5.3.1	Beschreibung des Modells und Versuchsaufbau	70
5.3.2	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	73

---

5.3.3	Fazit	78
<b>6</b>	<b>Konzeption und Gestaltung eines Greifers</b>	<b>79</b>
6.1	Vorgehen	79
6.2	Konzept	79
6.3	Auslegung einer Ultraschallsonotrode	80
6.4	Auslegung der vertikalen Haltekraft	81
6.5	Laterale Zentrierkräfte	85
6.5.1	Messtechnik für die lateralen Zentrierkräfte	85
6.5.2	Einfluss unterschiedlicher Kantengestaltung der Sonotrode	86
6.6	Entwicklung eines Gütekriteriums für das berührungslose Greifen	88
6.6.1	Bewertungsgrundlage	88
6.6.2	Experimentelle Evaluierung von Sonotrodenform und Stirnflächengestaltung	91
<b>7</b>	<b>Anwendungsbeispiele und Umsetzung</b>	<b>97</b>
7.1	Anwendungsbeispiel Luftmassensensor	97
7.1.1	Berührungsloser Greifer für Luftmassensensoren	98
7.1.2	Test des Greifers in der Systemeanlage	99
7.1.3	Bewertung des Systems	104
7.2	Anwendungsbeispiel beschichtete Linsen	106
7.2.1	Eigenschaften der Linsen	107
7.2.2	Entwickelter Greifer	108
7.2.3	Versuchsergebnisse	109
7.2.4	Abschließende Bewertung des Linsengreifers	111
7.3	Blechrohlinge für Miniaturkugellager-Käfige	114
7.3.1	Anforderungen durch Bauteil und Prozess	114
7.3.2	Auslegung und Konstruktion der Sonotrode für das Krallenteil	115
7.3.3	Auslegung des schwingenden Balkens	117
7.3.4	Versuchsergebnisse für den schwingenden Balken	124
7.3.5	Versuchsergebnisse des Balkens mit Sonotrode	125
7.3.6	Vorversuche mit einem schwebenden geschlossenen Plättchen	126
7.3.7	Stabilität des Greifvorganges des Plättchens	128
7.3.8	Bewertung des Krallenteilaufnehmers	129

---

<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>133</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>144</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Seit einigen Jahren schreitet die Verkleinerung von Produkten und Prozessen in vielen Bereichen der täglichen Freizeit- und Arbeitswelt stetig voran, was drei Beispiele aus Unterhaltungstechnik, Life Sciences und Automobilindustrie zeigen. Benutzte man vor 15 Jahren unterwegs noch 500 Gramm schwere („Klein“)Kassettenrecorder (Walk-Man), lässt sich heute gespeicherte Musik mittels Geräten hören, die kleiner als eine Streichholzschachtel sind. Ein Handy mit einer Masse von über 150 Gramm wird überhaupt nicht mehr angeboten. Lediglich das Benutzerinterface ist hier noch die größtenbestimmende Einschränkung für das Gerät. Gleichzeitig werden immer neue Möglichkeiten in den so genannten „Life Sciences“ entwickelt. Minimalmengendosierung, neue Analyseverfahren und die Weiterentwicklung in der Sensorik ermöglichen Fortschritte in der Gentechnik, der Pharmazie und der Biotechnologie. Den von der Öffentlichkeit nicht wahrgenommenen, wahrscheinlich technologisch größten Schritt hat in diesem Zeitraum die Automobiltechnik vollzogen: Elektronik-, Sensor- oder miniaturisierte Mechanikkomponenten finden sich in mittlerweile jedem für das Fahren, die Sicherheit und den Umweltschutz zuständigen System.

Dieser in den drei Beispielen deutliche Trend der aktuellen Technikentwicklung zur Miniaturisierung hin impliziert auf der Seite der Industrie den Zwang zu immer kleineren, meist spezialisierteren Bauteilen und höherer Integration innerhalb der Geräte. Als Folge für die Produktionstechnik lassen sich drei Zwänge ableiten:

- höhere Präzision,
- beschädigungsfreie Handhabung, Reinigung und Montage der immer empfindlicheren Strukturen und
- saubere, kontaminationsfreie, manchmal auch sterile Arbeitsumgebung, oft in Reinräumen.

Damit entsteht ein neues Aufgabenfeld nicht nur für Herstellungsverfahren, sondern auch für alle umgebenden produktionstechnischen Prozesse. Die Bauteilbereitstellung und die Logistik müssen ebenso auf diese neuen Anforderungen abgestimmt werden wie die Fügeprozesse und die Qualitätssicherung. Beispiele dafür sind erstens grundsätzliche Probleme bei der Handhabung von Bauteilen mit empfindlichen Oberflächen, die in der Halbleiterindustrie aus der Prozessfolge (Beschichtung, Belackung, Strukturierung) vorübergehend entstehen, oder auch funktionelle Oberflächen spezieller Produkte in der Mikrosystemtechnik (MST). Zweitens tendieren weite Bereiche der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik zur Verarbeitung und Prozessierung immer dünnerer Halbleiterscheiben. Durch die Ausdünnung werden nicht nur kleinere Bauteile, sondern auch ganz neue Anwendungsbereiche erschlossen. So wird eine optimale Kühlung von Leistungshalbleitern durch Ausdünnung der Wafer auf unter 100  $\mu\text{m}$  und damit eine bessere Wärmeabfuhr durch die Minimierung des elektrischen und thermischen Widerstands erreicht. Drittens führt die stetige Verkleinerung auf dem Gebiet der tragbaren

Konsumelektronik zu doppelseitig strukturierten Bauteilen und beidseitig bestückten Substraten. Neue Bauformen wie Bauteilstapel (Tajima 2000) oder Chip-Size-Packages und „embedded systems“ stellen neue Herausforderungen an die Handhabungs-, Montage- und Aufbautechniken, die mit heute verfügbaren Automatisierungskomponenten nur unzureichend erfüllt werden können. Yole (2004) schreibt zwar in seiner Marktstudie, dass erst die 15 größten Halbleiterfabriken (Fabs) nach Vollautomatisierung beim Wafertransport und den Fertigungsprozessen streben, bestätigt aber grundsätzlich den weiterhin großen Handlungsbedarf bei angepassten Handhabungs-, Säge- (Dicing-) und Aufbauprozessen. Vor dem Hintergrund eines weiteren Wachstums der MST ist zu erwarten, dass zunehmend auch für kleine Losgrößen teilautomatisierte Montageprozesse aufgrund der stetig fortschreitenden Verkleinerung eingeführt werden müssen (Bark 1998).

Die möglichen Montageabläufe, meist Pick-and-Place-Vorgänge, erfordern dabei in der Regel ein Greifen von oben, während Funktionsstrukturen auf Bauteilober- bzw. unterseiten und dem Substrat zueinander ausgerichtet werden müssen (s. a. Höhn 2001 und Jacob 2002). Die Toleranzanforderungen liegen dabei zwischen 0,1 und 20  $\mu\text{m}$  (Zühlke 1996, Bark 1998). Heute beschränken sich die verwendeten Montagetechniken auf das Aufnehmen der Teile mit Pinzetten oder Saugröhrchen. Dabei können aber nur inhomogen verteilte und größtenteils nicht definierte Kräfte auf die Bauteile ausgeübt werden. Bruchempfindliche Bauelemente können durch ungleichmäßige Krafteinleitung beim Handhabungs- und Fügeprozess leicht beschädigt werden. Auch ist es bisher nicht möglich, Bauteile mit Oberflächenstrukturen im  $\mu\text{-Meterbereich}$ , z. B. HF-Bauelemente, Leuchtdiodenkomponenten etc., exakt zu positionieren und zu fügen, ohne Gefahr zu laufen, diese Strukturen zu beschädigen.

### 1.2 Zielsetzung

Aufgrund der genannten Punkte setzt sich diese Arbeit zum Ziel, für kleine Bauteile mit unterschiedlichsten Oberflächen und Strukturen berührungslose Greifverfahren zum beschädigungsfreien Transportieren, Handhaben und Montieren unter Vermeidung jeglicher Verschmutzung und Partikelerzeugung zu untersuchen und weiter zu entwickeln. Jede Berührung der Bauteile führt sowohl zur Erzeugung von Partikeln durch Abrieb als auch zur Verschleppung der an den Betriebsmitteln haftenden Partikeln auf die Bauteiloberflächen.

Berührungslose Greifverfahren erfordern zunächst das Erzeugen vertikaler Kräfte zum Aufheben und Andrücken der Bauteile, um die Schwerkraft und auftretende Beschleunigungskräfte zu kompensieren. Zudem ist eine laterale Zentrierung notwendig, um eine genaue Positionierung zu ermöglichen. Positioniertoleranzen im zurzeit üblichen Bereich zwischen 10 und 80  $\mu\text{m}$  werden in dieser Arbeit angestrebt. Diese seitliche Zentrierung soll nach Möglichkeit ebenfalls berührungsfrei oder zumindest minimaltaktill erfolgen, um den vorgenannten Zielen der Kontaminationsfreiheit und Partikelvermeidung zu entsprechen.

Zunächst sollen grundsätzliche Möglichkeiten, berührungsfrei Kräfte aufzubringen, evaluiert werden. Unterschiedliche physikalische Prinzipien sowie deren Kombinationen können für eine berührungslose Krafterzeugung genutzt werden. Gespiegelt an den Anforderungen an

Greifwerkzeuge von Seiten der Montagesysteme sollen als Ziel Prototypengreifer für ausgewählte Beispielprozesse aus der Mikrosystemtechnik und Mikrooptik vorgestellt werden.

### 1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit befasst sich damit, Verfahren für den berührungslosen Transport und die berührungslose Positionierung von kleinen Bauteilen zu entwickeln und die Möglichkeiten anhand dreier typischer Beispiele zu beschreiben.

In **Kapitel 2** wird der Stand der Technik dargestellt. An den Anforderungen an die Montage von Bauteilen der Mikrosystemtechnik und Mikrooptik werden die Möglichkeiten herkömmlicher Greiftechnologien gespiegelt. Aus den sich ergebenden Defiziten bestehender Systeme werden die Anforderungen an die Gestaltung von berührungslosen Greifern abgeleitet und die Notwendigkeit für deren Einsatz begründet.

In den Kapiteln 3, 4 und 5 werden die grundsätzlichen Möglichkeiten der berührungslosen Krafterzeugung untersucht und die unterschiedlichen für das Greifen notwendigen Kraftkomponenten bewertet. In **Kapitel 3** werden die physikalischen Prinzipien für die berührungslose Erzeugung von Zug- und Druckkräften auf Bauteile vorgestellt. Entscheidungskriterien für den Einsatz einzelner Prinzipien werden aufgestellt und für unterschiedliche Bauteiltypen und Materialien beschrieben. In **Kapitel 4** wird das Luftlager als werkstoffneutrales Prinzip vorgestellt. Der Fokus liegt dabei zu gleichen Teilen auf dem durch Druckdüsen erzeugten Luftlager wie auf dem Prinzip des Ultraschallnahfeldes. Für beide Prinzipien wird kurz die Berechnung der möglichen Kräfte gezeigt. Prinzipien zur Erzeugung lateraler Kräfte zur Bauteilzentrierung werden in **Kapitel 5** dargestellt, womit alle notwendigen Komponenten für ein vollständig berührungsloses Greifen von Bauteilen beleuchtet werden.

Das **Kapitel 6** befasst sich anschließend mit der Umsetzung eines berührungslosen Greifers auf der Basis von Ultraschall. Beginnend mit den Randbedingungen der Auslegung der dazu erforderlichen Ultraschallsonotrode wird die Haltekraft experimentell ermittelt. Abschließend werden die lateralen Zentrierkräfte untersucht und die auftretenden Phänomene vermessen.

In **Kapitel 7** werden drei Anwendungsbeispiele vorgestellt, für die das berührungslose Greifverfahren umgesetzt wurde. Einer kurzen Beschreibung des jeweiligen Versuchsaufbaus schließen sich die Darstellungen der jeweils entwickelten Greifer und die erzielten Versuchsergebnisse an.

In **Kapitel 8** findet die Arbeit mit einer kurzen Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf weitere Entwicklungen ihren Abschluss.

