

Entwicklung von Greifern für die automatisierte Montage hybrider Mikrosysteme

Von der gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl. Ing. Sebastian Bütetisch
aus Göttingen

Eingereicht am: 13. Januar 2003
Mündliche Prüfung am: 22. April 2003
Referenten: Prof. Dr. rer. nat. Stephanus Büttgenbach
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jürgen Hesselbach
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch

Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik

herausgegeben von Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach

Band 11

Sebastian Bütefisch

**Entwicklung von Greifern für die
automatisierte Montage hybrider Mikrosysteme**

Shaker Verlag
Aachen 2003

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.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2003

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2194-8

ISSN 1433-1438

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407/95 96 - 0 • Telefax: 02407/95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter dieses Institutes, Herrn Prof. rer. nat. S. Büttgenbach. Seinem großen Engagement ist es zu verdanken, dass ein bedeutender Standort für die Mikrotechnik in Braunschweig entstanden ist. Sein Institut zeichnet sich zum einen durch die hervorragende technische Ausstattung, aber vor allem durch sein kreatives und kollegiales Arbeitsklima aus. Die vertrauensvolle Betreuung und die von ihm gewährte gestalterische Freiheit trugen wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit bei.

Herrn Prof. J. Hesselbach, Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig, möchte ich für die Übernahme des Koreferats, vor allem aber für sein großes Engagement im SFB 516, in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist, danken.

Bei Herrn Prof. Tutsch, Leiter des Instituts für industrielle Messtechnik der TU Braunschweig, möchte ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes, zahlreiche interessante Diskussionen über messtechnische Fragestellungen und die sehr gute Zusammenarbeit im SFB 516 bedanken.

Die erfolgreiche Umsetzung der teilweise sehr komplexen Fertigungsverfahren war nur durch die uneingeschränkte Unterstützung meiner Kollegen möglich, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Im besonderen danke ich Volker Seidemann, Marco Feldmann und Jens Rabe für ihre Hilfe bei der Konzipierung und Prozessierung der SU8-Strukturen, Ralph Wilke für seine Mitarbeit an der Entwicklung des Kraftsensors, Alexander Wogersien und Monika Leester-Schädel für die Unterstützung bei der Laserstrukturierung von FGL-Aktoren, sowie Ulli Hansen für die Hilfestellung bei der rechnergestützten Ätzsimulation.

In den Studien- und Diplomarbeiten von Phillip Sichler, Ralph Wilke und Jens Rabe wurden wichtige Teilaspekte dieser Arbeit untersucht.

Mein besonderer Dank gilt Barbara Matheis für die Herstellung der Greiferstrukturen und Axel Schoft für seine, teilweise bis in die frühen Morgenstunden reichende Unterstützung.

Abschließend möchte ich meinem Vater und meiner Freundin Claudia Cook für die Korrektur der Arbeit danken.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Mikromontage	10
1.1 Einleitung	10
1.2 Besonderheiten der Mikromontage	16
1.3 Greifer in der Mikromontage	17
1.3.1 Positioniereigenschaften	17
1.3.2 Greifkräfte	18
1.3.3 Reinraumtauglichkeit	18
1.3.4 Greiferabmaße	18
1.3.5 Randbedingungen aus der Mikromontage	19
1.4 Stand der Technik	20
1.4.1 Greifer mit Stoffschluss	20
1.4.2 Greifer mit Formschluss	21
1.4.3 Greifer mit Kraftschluss	21
2 Ziel der Arbeit	29
2.1 Beispielaufgabe aus der Mikromontage	29
3 Mikrotechnische Herstellungsverfahren für nachgiebige Strukturen	31
3.1 Kinematik des Greifergetriebes	31
3.2 Oberflächenmikromechanik	32
3.3 Anisotropes nasschemisches Siliziumätzen	33
3.3.1 Nachgiebige Strukturen auf Basis von (100)-Bossmembranen	33
3.3.2 Through wafer etching	35
3.4 Plasmaunterstützter Trockenätzprozess	42
3.5 Laserstrukturierung von Silizium	43

3.6	UV-Tiefenlithographie mit SU8.....	44
3.7	Auswahl geeigneter Herstellungsverfahren	45
4	Entwurf eines Greifergetriebes mittels FEM-Simulationen	55
4.1	Festlegung der Randbedingungen	56
4.1.1	Anforderungen an den Mikrogreifer aus der Handhabungsaufgabe.....	57
4.1.2	Greiferkinematik.....	61
4.1.3	Prozessbedingte Randbedingungen	64
4.2	Analytische Auslegung des Greifergetriebes.....	65
4.2.1	Berechnung des zulässigen Drehwinkels von Kerbgelenken	65
4.2.2	Berechnung der im Getriebe auftretenden Drehwinkel.....	67
4.2.3	Auslegung der Greiferabmaße in Abhängigkeit der maximal möglichen Drehwinkel	68
4.2.4	Balkengelenke	69
4.2.5	Auslegung des Parallelgreifergetriebes	71
4.3	FEM-Simulation	72
4.3.1	Kerbgelenke aus SU8.....	73
4.3.2	Balkengelenke aus Silizium	74
5	Prototypenherstellung	81
5.1	RIE-Prozess	81
5.2	SU8-Prozess	85
6	Entwicklung eines taktilen 3-D Kraftsensors zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Greifergetriebe	88
6.1	Funktionsweise des Kraftsensors	89
6.2	Kalibrierung des Kraftsensors	91
6.3	Weiterentwicklung des Kraftsensors	95
6.3.1	On-Chip Design	96

	6.3.2 Vollbrückendesign	96
	6.3.3 Streifendesign	103
	6.3.4 Konzept eines 3-D Kraftsensors mit <111>-Doppelschrägbalken	106
7	Mechanische Charakterisierung der Prototypen	110
	7.1 Übersetzung der Getriebevarianten	110
	7.2 Federsteifigkeit der Getriebevarianten	113
8	Aktorprinzipien in der Mikrotechnik	115
	8.1 Überblick und Auswahl geeigneter Aktorprinzipien	115
	8.1.1 Piezoelektrische Aktoren	117
	8.1.2 Bimetallaktoren	117
	8.1.3 Aktoren auf Basis von Formgedächtnislegierung (FGL)	118
	8.1.4 Elektrostatische Aktoren	120
	8.1.5 Elektromagnetische Aktoren	123
	8.1.6 Mikropneumatischer Aktor	125
	8.1.7 Eignung der vorgestellten Aktoren für den Mikrogreifer	127
	8.1.8 Auswahl eines geeigneten Aktors für den Mikrogreifer	132
	8.2 Realisierung eines Aktors auf Basis von Formgedächtnislegierung (FGL)	133
	8.2.1 Herstellungsverfahren	133
	8.2.2 Design und Funktionsprinzip	135
	8.3 Mikropneumatischer Aktor	150
	8.3.1 Design und Auslegung	150
	8.3.2 Mechanische Charakterisierung des mikropneumatischen Aktors	152
9	Konzepte von Greifkraftsensoren für Mikrogreifer aus Silizium	154
	9.1 Ausführung als Kerbgelenk	154
	9.2 Ausführung als Doppelbiegebalken	155

9.3	Konzept eines Sensors zur Messung mehrdimensionaler Greifkräfte	157
10	Erprobung des Gesamtsystems	159
10.1	Messung der Greifkräfte	160
10.2	Dauerfestigkeitsuntersuchungen	163
10.3	Erprobung der Mikrogreifers in der Mikromontage	166
10.4	Automatisierte Mikromontage	169
11	Zusammenfassung und Ausblick	173
11.1	Zusammenfassung	173
11.2	Ausblick	175
Anhang A: Analytische Berechnung des maximal zulässigen Drehwinkels bei Balkengelenken		177
Anhang B: Transformationsmatrix für den Kraftsensor mit Streifendesign		180
Anhang C: Funktionsprinzip des elektrostatischen „Comb drive“-Antriebs		184
Anhang D: Berechnung der nutzbaren Kraft eines mikropneumatischen Zylinders		186
Anhang E: Modellrechnungen zur Auswahl eines geeigneten Aktorsystems		187
E.1	Piezoelektrischer Aktor	187
E.2	FGL-Aktor	187
E.3	Elektrostatischer Aktor	189
E.4	Mikropneumatischer Aktor	189
Verwendete Formelzeichen		190
Literatur		192