

Michael Heinz

**Modellunterstützte Auslegung
berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für
die Mikrosystemtechnik**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 254

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2011

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2012

ISBN 978-3-8316-4147-5

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Innovationsmotor Mikrosystemtechnik - Überblick und Definitionen .	3
2.1.1	Einführung	3
2.1.2	Wirtschaftliche Bedeutung der Mikrosystemtechnik	4
2.1.3	Historische Entwicklung der Mikrosystemtechnik	5
2.2	Mikromontage	7
2.2.1	Einordnung der Mikromontage in die Montage- und die Mikroproduktionstechnik	7
2.2.2	Montage- und Handhabungsaufgabenstellungen in der Mikrosystemtechnik	12
2.2.3	Einschränkende Randbedingungen bei der Montage und Handhabung miniaturisierter Komponenten	17
2.3	Konventionelle Handhabungs- und Greiftechnologien	21
2.3.1	Definition Handhaben	21
2.3.2	Definition Greifer, Greifphasen und Wirkprinzipien	23
2.3.3	Stand der Technik bei taktilen Greifern	24
2.4	Berührungslose Handhabungs- und Greiftechnologien	33
2.4.1	Definition berührungsloses Handhaben	33
2.4.2	Adhäsive Effekte und Handhabungssysteme	34
2.4.3	Magnetische Effekte und Handhabungssysteme	35
2.4.4	Elektrostatische Effekte und Handhabungssysteme	36
2.4.5	Luftlager und Luftkissen	38
2.4.6	Das hydrodynamische Paradoxon und Bernoulligreifer	40
2.4.7	Ultraschallbasierte Handhabungssysteme	41
3	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	49
3.1	Funktions- und Prozessanalyse	
	berührungsloser Ultraschallhandhabungssysteme	49
3.2	Defizite bekannter Ansätze aus dem Stand der Technik	51
3.3	Zielsetzung	53
4	Strömungsmechanische Grundlagen der Squeeze-Film-Levitation	55
4.1	Allgemeines	55
4.2	Experimentelle Untersuchung der Squeeze-Film-Levitation	56
4.2.1	Versuchsaufbauten zur messtechnischen Erfassung des Druckprofils und des Traglastverhaltens	56

4.2.2	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der SFL . . .	59
4.3	Fundamentale Gleichungen	
	reibungsbefahelter, kompressibler Strömungen	62
4.4	Modellvorstellungen für die Charakteristik der Squeeze-Film-Levitation	66
4.4.1	Akustische Modelle	66
4.4.2	Ein einfaches thermodynamisches Modell für die Squeeze-Film-Levitation	66
4.4.3	Modellbasierte Abschätzung der Unterschiede zwischen der Schmierfilmtheorie und der Squeeze-Film-Levitation	68
4.4.4	Die Reynolds-Gleichung	73
4.4.5	Erweiterung der Reynolds-Gleichung um den Einfluss der Trägheitskräfte	76
4.4.6	Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen für die SFL	81
4.5	Diskussion der Modelle	84
5	Systementwurf von Longitudinalschwingern zur Erzeugung von Ultraschall	91
5.1	Allgemeines	91
5.2	Anwendungen und Grundprinzipien der Ultraschalltechnik	92
5.2.1	Stand der Technik in der Entwicklung und Anwendung von Ultraschallsystemen	92
5.2.2	Grundaufbau des Gesamtsystems und Halbwellsynthese	92
5.3	Elektromechanische Analogien und Grundelemente der Ultraschallerzeugung	95
5.3.1	Elektrische und mechanische Analogien	95
5.3.2	Der eindimensionale Wellenleiter	97
5.3.3	Der piezoelektrische Längsschwinger als Wellenleiter	103
5.4	Elektromechanische Netzwerksynthese von Ultraschallsystemen	106
5.4.1	Elektromechanische Netzwerksynthese von zwei piezoelektrischen Scheiben	107
5.4.2	Elektromechanische Netzwerksynthese von Longitudinalschwingern	111
6	Systematische Auslegung berührungsloser, ultraschallbasierter Handhabungsprozesse	119
6.1	Allgemeines	119
6.2	Detaillierte Systembeschreibung des Versuchssträgers	119
6.3	Einführung einer Methodik zur Auslegung berührungsloser Greifprozesse für kleine Bauteile	122
6.4	Umsetzung der Methodik am Beispiel der berührungslosen Handhabung eines Silizium-Chips	130
6.4.1	Identifikation der Handhabungsaufgabe	130
6.4.2	Modellbasierte Abschätzung der Charakteristik der Squeeze-Film-Levitation	131
6.4.3	Modellbasierte Auslegung des Ultraschallgreifers	134
6.4.4	Modellbasierte Auslegung des horizontalen Kräftegleichgewichts	140
6.4.5	Auslegung des vertikalen Kräftegleichgewichts	146
6.4.6	Bestimmung des Handhabungsverhaltens	155

6.4.7	Prozessüberwachung für die Systemintegration	161
6.5	Technische und wirtschaftliche Bewertung	164
6.5.1	Technische Bewertung	164
6.5.2	Wirtschaftliche Bewertung	169
7	Zusammenfassung und Ausblick	175
7.1	Zusammenfassung	175
7.2	Ausblick	178
8	Literaturverzeichnis	181
A	Mathematische Grundlagen	205
A.1	Satz von Gauß	205
A.1.1	Spezielle Anwendungsfälle des Satz von Gauß	205
A.2	Leibniz-Regel	205
A.2.1	Integration der Kontinuitätsgleichung mit Hilfe der Leibniz-Regel	206
A.3	Differentialoperatoren in kartesischen Koordinaten	206
A.3.1	Gradient in kartesischen Koordinaten	206
A.3.2	Vektordivergenz in kartesischen Koordinaten	206
A.3.3	Laplaceoperator in kartesischen Koordinaten	207
A.3.4	Tensordivergenz in kartesischen Koordinaten	207
A.4	Polarkoordinaten	207
A.5	Zylinderkoordinaten	208
A.6	Differentialoperatoren in Zylinderkoordinaten	210
A.6.1	Gradient in Zylinderkoordinaten	210
A.6.2	Vektordivergenz in Zylinderkoordinaten	210
A.6.3	Laplaceoperator in Zylinderkoordinaten	211
A.6.4	Substantielle Ableitung in Zylinderkoordinaten	211
A.6.5	Gradient der Divergenz in Zylinderkoordinaten	212
B	Ergänzungen zur Thermodynamik und Fluidmechanik von Gasen	213
B.1	Zusammenfassung der strömungsmechanischen Grundgleichungen für reibungsbehaftete, kompressible Fluide	213
B.1.1	Die strömungsmechanischen Grundgleichungen in kartesischen Koordinaten	213
B.1.2	Die strömungsmechanischen Grundgleichungen in kartesischen Koordinaten und dimensionsloser Form	215
B.1.3	Größenordnung der Terme in den strömungsmechanischen Grundgleichungen in kartesischen Koordinaten und dimensionsloser Form für die Schmierfilmtheorie	217
B.1.4	Größenordnung der Terme in den strömungsmechanischen Grundgleichungen in kartesischen Koordinaten und dimensionsloser Form für die Squeeze-Film-Levitation	219
B.1.5	Die strömungsmechanischen Grundgleichungen in Zylinderkoordinaten	221
C	Grundlagen der Elektromechanik	223

C.1	Elektromechanisches Ersatzschaltbild eines piezoelektrischen Grundelements in Longitudinalschwingung	223
C.2	Elektromechanisches Ersatzschaltbild der Reihenschaltung von zwei piezoelektrischen Grundelementen	232
D	Materialdaten	237
D.1	Fluide	237
D.1.1	Luft	237
D.2	Metalle	237
D.2.1	Titan	237
D.2.2	Aluminium	238
D.2.3	Stahl	238
D.3	Piezoelektrische Materialdaten	238
D.3.1	Sonox P8	238
E	Ergänzende Abbildungen	241
E.1	Ergänzende Druckprofile	241
E.1.1	Vergleich der gemessenen mit den modellbasierten Druckprofilen	241
E.1.2	Mit den Navier-Stokes-Gleichungen berechnete Druckprofile .	245
E.2	Charakteristik des überlagerten Strömungszustands	249
E.3	Beispielbauteil	255
E.4	Sonotroden spitzen	256

Abbildungsverzeichnis

2.1	Einordnung der Präzisions- und Mikromontage nach GREITMANN (1998).	9
2.2	Einordnung der Mikromontage in die Mikroproduktionstechnik nach FISCHER (2000).	10
2.3	Abgrenzung der Mikromontage von der Aufbau- und Verbindungstechnik nach NIENHAUS (1999).	12
2.4	Nutzungsanteil unterschiedlicher Greifprinzipien in der automatisierten Mikromontage nach BARK (1998).	26
2.5	Industriell eingesetzte Vakuumbreifer.	30
2.6	Horizontales und vertikales Kräftegleichgewicht bei einem kombinierten Ultraschall-Vakuum-Greifprozess.	46
3.1	Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise eines berührungslosen Ultraschall-Vakuum-Greifsystems bzw. Ultraschall-Vakuum-Greifprozesses.	50
3.2	Abgrenzung des betrachteten Prozessfensters an den vorhergehenden und nachfolgenden Prozessschritten der geordneten Bauteilbereitstellung und des Fügens.	51
4.1	Prinzip des Messverfahrens zur Bestimmung der Druckverteilung im Spalt zwischen Ultraschallsonotrode und levitierter Masse.	57
4.2	Versuchsaufbauten zur experimentellen Bestimmung der Druckverteilung im Luftspalt und des Traglastverhaltens der SFL.	58
4.3	Ultraschallamplitude δ_h der Sonotrode und entsprechende Spalthöhe h_0 für die beiden levitierten Massen mit integriertem Drucksensor.	60
4.4	Gemessene Druckprofile als Funktion der Ultraschalleistung, der normierten Zeit und der radialen Position für Versuchsmassen von $m_1 = 72\text{ g}$ und $m_2 = 556\text{ g}$ (Kolbenschwinger $18,9\text{ kHz}$).	61
4.5	Gemessenes Traglastverhalten der Sonotrode als Funktion der Spalthöhe h_0 und der Anregungsamplitude δ_h .	62
4.6	Vereinfachte Modellvorstellung für die Entstehung des Rayleighschen Schallstrahlungsdrucks anhand einer nichtlinearen, isentropen Zustandsänderung im p-V-Diagramm.	67
4.7	Gemessene und berechnete Druckprofile als Funktion der normierten Zeit T und der radialen Position r für eine Versuchsmasse mit $m_1 = 556\text{ g}$; Ultraschalleistung 100%; $\sigma = 259$; $\epsilon = 0, 250$; (Kolbenschwinger $18,9\text{ kHz}$).	85
4.8	Berechnete Druckprofile (p) als Funktion der normierten Zeit (T) und der radialen Position (r) für unterschiedliche Kompressionswerte ϵ und Squeeze-Zahlen σ_S (Kolbenschwinger $18,9\text{ kHz}$).	87

4.9	Berechnete Traglastkurven als Funktion der Amplitude δ_n und der mittleren Spalthöhe h_0 entsprechend den Randbedingungen aus Abbildung 4.3 (Kolbenschwinger 18,9 kHz).	88
5.1	Darstellung des Grundaufbaus eines Ultraschall-Vakuum-Greifers anhand eines CAD-Modells.	94
5.2	Elektrischer RLC-Reihenschwingkreis und analoges, mechanisches Feder-Masse-Dämpfer-System.	96
5.3	Dehnstab bzw. Wellenleiter der Länge l und Querschnittsfläche A sowie Elastizitätsmodul E und Dichte ρ . Randbedingungen F_1, v_1 am linken Rand und F_2, v_2 am rechten Rand.	98
5.4	Elektromechanisches Ersatzschaltbild eines Dehnstabs.	100
5.5	In Abhängigkeit der Resonanzbedingung $kl = \pi/2$ dargestelltes Verhältnis der Geschwindigkeiten v_1/v_2 an beiden Enden eines Dehnstabes entsprechend Abbildung 5.3a.	101
5.6	Spannungs- und Geschwindigkeitsverteilung an einem resonant abgestimmten Transformationsstück, bestehend aus Stabelementen unterschiedlicher Querschnittsflächen (Amplituden normiert).	102
5.7	Piezoelektrischer Längsschwinger mit Randbedingungen F_1, v_1 am unteren Rand und F_2, v_2 am oberen Rand, elektrische Spannung U in Polarisationsrichtung 3.	104
5.8	Elektromechanisches Ersatzschaltbild eines kreisförmigen, piezoelektrischen Dickenschwingers.	105
5.9	Mechanische Reihenschaltung von zwei piezoelektrischen Dickenschwingern identischer Abmessungen und Materialeigenschaften.	107
5.10	Elektromechanisches Ersatzschaltbild zweier mechanisch in Reihe geschalteter, piezoelektrischer Dickenschwinger identischer Abmessungen und Materialeigenschaften; (a) Achtpoldarstellung; (b) äquivalente Sechspoldarstellung.	108
5.11	Kurzschlusskernadmittanz Y_{mech} zweier in Reihe geschalteter Piezoelemente ($r_1 = r_2 = 7,5 \text{ mm}, l_1 = l_2 = 4 \text{ mm}$).	110
5.12	Kurzschlussingangsadmittanz Y_{el} zweier in Reihe geschalteter Piezoelemente ($r_1 = r_2 = 7,5 \text{ mm}, l_1 = l_2 = 4 \text{ mm}$).	110
5.13	Zylindrischer Anregekonverter mit zwei in Reihe geschalteten, piezoelektrischen Scheiben zur Erzeugung einer Longitudinalschwingung.	111
5.14	Exemplarische und vereinfachte Vierpoldarstellung einer Abfolge von n Wellenleitern auf der linken Seite der piezoelektrischen Aktoren in Abbildung 5.13.	112
5.15	Auf die Ersatzimpedanzen $L_{1ges}, L_{2ges}, R_{1ges}$ und R_{2ges} der Wellenleiter reduziertes elektrisches Ersatzschaltbild eines piezoelektrischen Ultraschallwandlers.	114
5.16	Kurzschlusskernadmittanz Y_{mech} des Anregekonverters aus Abbildung 5.13.	116
5.17	Kurzschlussingangsadmittanz Y_{el} des Anregekonverters aus Abbildung 5.13.	116
5.18	Normierte Auslenkungsverteilung für den Anregekonverter in Longitudinalresonanz bei 30,2 kHz.	117

5.19	Normierte Auslenkungsverteilung für den Anregekonverter mit Transformatorstück in Longitudinalresonanz bei $30,2\text{ kHz}$	118
6.1	Versuchsaufbau zur Vermessung des Systemverhaltens eines berührungslosen Pick-and-Place-Prozesses.	120
6.2	Abstrahierter Aufbau des Versuchsstands in Form eines Signalflossplans. FPGA \equiv Field-Programmable-Gate-Array; USG \equiv Ultraschallgreifer; PWM \equiv Pulsweitenmodulation; PC \equiv Personal-Computer;	121
6.3	Methodisches Vorgehensmodell zur systematischen Auslegung eines berührungslosen Handhabungssystems mit dem Ziel eines stabilen Greifzustands.	123
6.4	Ansatz zur systematischen Bestimmung und Optimierung der für die Vorspannung des Luftlagers relevanten Kräfte.	128
6.5	Experimentelle Bestimmung der Spalthöhe durch systematische Variation der Stellgrößen Ultraschallamplitude δ_h und Unterdruck p_U	130
6.6	CAD-Modell und Foto des zu greifenden Chips.	130
6.7	Vernetzte Geometrie zur modellhaften Abbildung des Luftspalts zwischen der Handhabungsfläche und dem Bauteil.	132
6.8	Berechnetes Druckprofil im Luftspalt zwischen der Handhabungsfläche und dem Chip für eine Spalthöhe $h_0 = 30\ \mu\text{m}$ und einer Anregungsamplitude $\delta_h = 15\ \mu\text{m}$ zu diskreten Zeitpunkten einer Anregungsperiode zwischen $t = 0$ und $t = T$	133
6.9	Berechnete Ultraschall- bzw. Fügekraft in Abhängigkeit der Spalthöhe h_0 und der Anregungsamplitude δ_h	134
6.10	Schematischer Schnitt des Ultraschall-Vakuum-Greifers.	135
6.11	Kurzschlusskernadmittanz $Y_{mech} = v_2/U$ des Ultraschall-Vakuum-Greifers.	137
6.12	Verhältnis Y_w der Auslenkungsamplitude $w_2 = v_2/j\omega$ zur Anregungsspannung U des Ultraschall-Vakuum-Greifers.	137
6.13	Kurzschlusseingangsadmittanz $Y_{el} = i/U$ des Ultraschall-Vakuum-Greifers.	138
6.14	Proportional zur Auslenkung eingefärbter Schnitt eines FE-Modells des Ultraschall-Vakuum-Greifers in Resonanz bei $29,95\text{ kHz}$, hell \equiv geringe Auslenkung, dunkel \equiv große Auslenkung.	139
6.15	Auf die Anregungsspannung U normierte Zeitantwort der Sonotroden spitze $\tilde{w}_2 = v_2/j\omega U$ bei einer sinusförmigen Systemanregung in Resonanzfrequenz $f = 29,95\text{ kHz}$	140
6.16	Vernetzte Geometrie zur Studie der bauteilzentrierenden Druckkräfte an den Strinflächen des Bauteils.	142
6.17	Zentrierende Unterdruckkraft an der Stirnfläche des Bauteils in Abhängigkeit der Auslenkung Δx des Bauteils relativ zur Sonotrode und des Drucks p für eine Spalthöhe $h_0 = 30\ \mu\text{m}$	143
6.18	Exemplarische Darstellung der Strömungslinien im Luftspalt für zwei Bauteilpositionen relativ zur Handhabungsfläche ($h_0 = 30\ \mu\text{m}$; $p_U = 0,8 \cdot 10^5\text{ bar}$).	143

6.19	Druckverteilung auf der Stirnseite des Bauteils für eine Auslenkung des Bauteils relativ zur Handhabungsfläche, einer Spalthöhe $h_0 = 30 \mu\text{m}$ und einem Druck $p = 0,8 \text{ bar}$	144
6.20	Variation der Unterdrucköffnungen zur Optimierung des Stabilitätsverhaltens.	146
6.21	Mit Hilfe des Versuchsaufbaus (Abbildung 6.1) gemessene Ultraschallkraft für die drei Greifspitzen entsprechend Abbildungen 6.20a, 6.20b und 6.20c in Folge des quasistatischen Überdrucks der SFL als Funktion der Anregungsamplitude δ_h und der Spalthöhe h_0	148
6.22	Für Greifspitze 6.20a berechnete Unterdruckkraft und Volumenstrom in Abhängigkeit des Unterdrucks p_U und der Spalthöhe h_0	148
6.23	Für Greifspitze 6.20c berechnete Unterdruckkraft bei variierendem Bohrungsradius zwischen $r = 0,1 \text{ mm}$ und $r = 0,4 \text{ mm}$ für eine Spalthöhe $h_0 = 30 \mu\text{m}$	150
6.24	Mit Hilfe des Versuchsaufbaus (Abbildung 6.1) gemessene Unterdruckkraft für die drei Greifspitzen entsprechend Abbildungen 6.20a, 6.20b, 6.20c als Funktion der Druckdifferenz p_U und der Spalthöhe h_0	151
6.25	Dem Kräftegleichgewicht entsprechende Nullkraftlinien für unterschiedliche Spalthöhen h_0 , berechnet durch lineare Superposition aus gemessenen Ultraschall- und Unterdruckkräften in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Drucks p_U	152
6.26	Experimentell ermittelte Kraft in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Unterdrucks p_U für verschiedene Spalthöhen.	153
6.27	Dem Kräftegleichgewicht entsprechende Nullkraftlinien für unterschiedliche Spalthöhen h_0 in Abhängigkeit der Ultraschallamplitude δ_h und des Drucks p_U	154
6.28	Vergleich der dem Kräftegleichgewicht entsprechenden Nullkraftlinien für unterschiedliche Bauteilabstände h_0 aus der kombinierten Kraftmessung mit den Höhenlinien aus der Abstandsmessung in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Drucks p_U	157
6.29	Für Greifspitze 6.20a ermittelte Stabilitätskarte des Bauteils in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Drucks p	158
6.30	Für Greifspitze 6.20b ermittelte Stabilitätskarte in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Drucks p	160
6.31	Für Greifspitze 6.20c ermittelte Stabilitätskarte in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Drucks p	160
6.32	Für Greifspitze 6.20c ermittelte Durchflusskennlinien; (a) Durchfluss in Abhängigkeit der Spalthöhe h_0 und Ultraschallamplitude δ_h ; (b) Durchfluss in Abhängigkeit der Spalthöhe h_0 und des Unterdrucks p_U ; (c) Durchfluss bei Überlagerung aus Ultraschall und Unterdruck in Abhängigkeit der Spalthöhe h_0 und des Unterdrucks p_U bei einer Ultraschallamplitude $\delta_h = 15 \mu\text{m}$; (d) Durchfluss im Levitations- bzw. Gleichgewichtszustand als Funktion der Ultraschallamplitude δ_h und des Unterdrucks p_U	162

6.33	Auf die Gesamtkosten normierte Kostenverteilung für die Auslegung eines berührungslosen Handhabungssystems für die Wertschöpfungsschritte entsprechend der Auslegungsmethodik. S 1 \equiv Abschätzung der SFL; S 2 \equiv Auslegung des Ultraschallgreifers; S 3 \equiv Auslegung des horizontalen Kräftegleichgewichts; S 4 \equiv Auslegung des vertikalen Kräftegleichgewichts; S 5 \equiv Bestimmung des Handhabungsverhaltens; Fert. \equiv Fertigungskosten; Ges. \equiv Gesamtkosten;	171
6.34	Auf die Gesamtkosten normierte Kostenverteilung für die Auslegung eines berührungslosen Handhabungssystems nach der Auslegungsmethodik. Unterteilung in Raum-, Energie-, Hardware-, Software-, Personal-, Material- und Gesamtkosten. Die Fertigungskosten beinhalten die Wertschöpfung für den Anregekonverter, das Horn und die Spitze.	172
6.35	Auf die Gesamtkosten normierte Kostenentwicklung für die Auslegung eines berührungslosen Handhabungssystems durch Standardisierung der Ultraschallwandler und exemplarischer Umverteilung der Auslegungskosten auf 100 Ultraschallwandler. Unterteilung in Raum-, Energie-, Hardware-, Software-, Personal-, Material- und Gesamtkosten. Die Fertigungskosten beinhalten die Wertschöpfung für den Anregekonverter, das Horn und die Spitze.	173
6.36	Auf die Gesamtkosten normierte Kostenentwicklung für die Auslegung eines berührungslosen Handhabungssystems durch weitere Standardisierung der Greifspitzen und exemplarischer Umverteilung der Auslegungskosten auf 5 Spitzen. Unterteilung in Raum-, Energie-, Hardware-, Software-, Personal-, Material- und Gesamtkosten. Die Fertigungskosten beinhalten die Wertschöpfung für den Anregekonverter, das Horn und die Spitze.	174
C.1	Vereinfachung des Ersatzschaltbilds für zwei in Reihe geschaltete piezoelektrische Elemente.	234
C.2	Vereinfachtes Ersatzschaltbild für zwei in Reihe geschaltete piezoelektrische Elemente.	235
E.1	Gemessene und berechnete Druckprofile als Funktion der Leistung, der normierten Zeit und der radialen Position für eine Versuchsmasse mit 72 g; Ultraschalleistung 20%; $\sigma = 350$; $\epsilon = 0,096$ (Kolbenschwinger 18,9 kHz).	241
E.2	Gemessene und berechnete Druckprofile als Funktion der Leistung, der normierten Zeit und der radialen Position für eine Versuchsmasse mit 72 g; Ultraschalleistung 100%; $\sigma = 1323$; $\epsilon = 0,111$ (Kolbenschwinger 18,9 kHz).	242
E.3	Gemessene und berechnete Druckprofile als Funktion der Leistung, der normierten Zeit und der radialen Position für eine Versuchsmasse mit 556 g; Ultraschalleistung 20%; $\sigma = 68$; $\epsilon = 0,219$ (Kolbenschwinger 18,9 kHz).	243

E.4	Gemessene und berechnete Druckprofile als Funktion der Leistung, der normierten Zeit und der radialen Position für eine Versuchsmasse mit 556 g; Ultraschalleistung 100 %; $\sigma = 259$; $\epsilon = 0, 250$ (Kolbenschwinger 18,9 kHz).	244
E.5	Berechnete Druckprofile als Funktion der normierten Zeit und der radialen Position für unterschiedliche Kompressionswerte ϵ und Quetschzahlen σ (Kolbenschwinger 18,9 kHz).	245
E.6	Berechnete Druckprofile als Funktion der normierten Zeit und der radialen Position für unterschiedliche Kompressionswerte ϵ und Quetschzahlen σ (Kolbenschwinger 30,0 kHz).	246
E.7	Berechnete Druckprofile als Funktion der normierten Zeit und der radialen Position für unterschiedliche Kompressionswerte ϵ und Quetschzahlen σ (Kolbenschwinger 40,0 kHz).	247
E.8	Für Greifspitze 6.20a resultierende Kraft durch lineare Superposition von gemessener Unterdruck- und Ultraschallkraft in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Unterdrucks p_U für verschiedene Spalthöhen h_0 .	249
E.9	Für Greifspitze 6.20b resultierende Kraft durch lineare Superposition von gemessener Unterdruck- und Ultraschallkraft in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Unterdrucks p_U für verschiedene Spalthöhen h_0 .	250
E.10	Für Greifspitze 6.20c resultierende Kraft durch lineare Superposition von gemessener Unterdruck- und Ultraschallkraft in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Unterdrucks p_U für verschiedene Spalthöhen h_0 .	251
E.11	Für Greifspitze 6.20a experimentell ermittelte Kraft in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Unterdrucks p_U für verschiedene Spalthöhen h_0 .	252
E.12	Für Greifspitze 6.20b experimentell ermittelte Kraft in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Unterdrucks p_U für verschiedene Spalthöhen h_0 .	253
E.13	Für Greifspitze 6.20c experimentell ermittelte Kraft in Abhängigkeit der Anregungsamplitude δ_h und des Unterdrucks p_U für verschiedene Spalthöhen h_0 .	254
E.14	Beispielbauteil für die Auslegung des berührungslosen Greifsystems.	255
E.15	Sonotrodenspitze mit zwei Saugdüsen auf der Hauptachse (entspricht Greifspitze 6.20a).	256
E.16	Sonotrodenspitze mit zwei Saugdüsen auf einer Diagonalen (entspricht Greifspitze 6.20b).	257
E.17	Sonotrodenspitze mit vier Saugdüsen in den Ecken (entspricht Greifspitze 6.20c).	258

Tabellenverzeichnis

2.1	Unterschiede zwischen den Montageanforderungen und Montageszenarien in der Mikroelektronik und der MST (in Anlehnung an HÖHN 2001). . .	13
2.2	Zusammenfassung und technische Bewertung taktiler, mechanischer und taktiler, fluidischer Greifprinzipien (in Anlehnung an HÖHN (2001)). . .	31
4.1	Abschätzung der Unterschiede in der Größenordnung zwischen der Schmierfilmtheorie (SFT) und der Squeeze-Film-Levitation (SFL).	69
6.1	Technische Bewertung und Vergleich taktiler, fluidischer Greifprinzipien und berührungsloser, fluidischer Ultraschallgreifer.	167

1 Einleitung

Die Zukunft des Wirtschafts- und Technologiestandorts Deutschland liegt, unter anderem auch angesichts der Rohstoffarmut, in der Hand unserer Innovationskraft. Wie nie zuvor sind innovative Ideen und Produkte wichtige Voraussetzungen für Wachstum, Wohlstand und den Erfolg der deutschen Unternehmen. Dies gilt insbesondere für wirtschaftlich schwierige Zeiten, wie bspw. während der Finanzkrise in den vergangenen Jahren. Dabei sind Innovationen jedoch keineswegs ein Alleinstellungsmerkmal großer internationaler Konzerne. Gerade in Krisenzeiten liefern vor allem kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) kreative und innovative Ideen für den wirtschaftlichen Wiederaufschwung. In der Umsetzung innovativer Ideen in marktfähige Produkte liegt neben der Stärke des Wirtschaftsstandorts Deutschland jedoch auch eine große Schwäche. Diese Tatsache prangerte der ehemalige Bundespräsident Prof. Dr. Roman Herzog bei der Vorstellung einer Studie zu diesem Thema im Jahr 2006 in Berlin wie folgt an: *Dass Deutschland zwar den zweiten Platz der Patentanmeldungen weltweit einnimmt, sich aber im Innovationswettbewerb nicht behaupten kann, belegt das Umsetzungsproblem von der Idee zum Markterfolg und den Mangel an innovationsfreundlichen Rahmenbedingungen hierzulande* (SCHLENDORF 2006). Auch eine Studie des Fraunhofer IPK (MERTINS ET AL. 2008) in Berlin beklagt die Defizite an der Umsetzung der Ideen in den Markterfolg.

Um diese Schwachstelle zu beseitigen, muss eine erfolgreiche Innovationsstrategie Menschen, Gesellschaft und Staat sowie Unternehmen in einem Zusammenhang betrachten (SCHLENDORF 2006). Es gilt Strukturen in Unternehmen zu hinterfragen, innovationsfreundliche Kulturen in Unternehmen zu etablieren, gegen die Technikfeindlichkeit in der Gesellschaft anzukämpfen sowie junge Leute für einen natur- und ingenieurwissenschaftlichen Beruf zu begeistern. Vor allem jedoch muss die Zusammenarbeit und der Know-How-Transfer von Hochschulen und Forschungseinrichtungen, insbesondere in den Mittelstand, weiter vorangetrieben werden.

Die hier vorliegende Arbeit befasst sich mit berührungslosen Handhabungstechnologien mittels Ultraschall. Eine Erfolgsgeschichte, die verdeutlicht, dass die oben genannten Defizite ausgehebelt werden können und wie aus visionären Ideen an Hochschulen innovative Technologien und Produkte sowie Arbeitsplätze hervorgehen.

Dass mittels Ultraschall abstoßende Druckkräfte auf Bauteile aufgebracht und diese somit zum Schweben angeregt werden können, ist schon lange bekannt (CHU ET AL 1982; HASHIMOTO 1995, 1997, 1998). Eine Umsetzung der anfangs sehr grundlagenorientierten Studien dieses Phänomens in technischen Anwendungen ließ aber auf sich warten. Zum Ende des letzten Jahrtausends erkannten Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München das produktionstechnische Potential dieses Effekts und begannen mit der Entwicklung von berührungslosen Handhabungs- und Transportsystemen für empfindliche Bauteile aus der Mikrosystem- und Halbleitertechnik (HÖPPNER 1999, REINHART ET AL. 1999a, 1999b). Die daraus resultierende Anmeldung von mehreren Patenten (HÖPPNER ET AL. 2000a, 2000b, 2000c, 2001) ebnete den weiteren Entwicklungsweg der ultraschallbasierten Handhabung am *iwb* (REINHART 2000, 2001; HÖPPNER 2002; ZÄH ET AL. 2003a, 2003b, 2004, 2005), unter anderem im Rahmen des Bayerischen Kompetenznetzwerks für Mechatronik. Im Jahr 2006 führte dies zur Ausgründung der Zimmermann & Schilp Handhabungstechnik GmbH, welche das umfassende Schutzrechtportfolio übernahm und bis heute stetig erweiterte. Typische produktionstechnische Anwendungen sind in der Photovoltaik, der Flat-Panel-Industrie oder aber auch in der Silizium- und Halbleitertechnik zu finden, d.h. in der Handhabung von Solarzellen, von Displays für Flachbildschirme und von großflächigen Glasscheiben sowie von Silizium-Wafern (ZIMMERMANN UND SCHILP HANDHABUNGSTECHNIK GMBH 2009).

Forschungsseitig wird intensiv an der Integration der Handhabungstechnologie in Mikromontage- und Bestückanlagen für miniaturisierte Bauteile gearbeitet (REINHART ET AL. 2008, 2010), um auch hier den Transfer in produktionstechnische Anwendungen zu vollziehen. Unterstützt wird die Forschung am *iwb* in diesem Bereich durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Förderkennzeichen ZA 288/16-1, ZA 288/31-1) und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Förderkennzeichen 02PG2324). Aus diesen beiden Projekten ist die hier vorliegende Dissertation entstanden.

Forschungsberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iw b ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Moßmer, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnernverbänden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprenzel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
 2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
 2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
 2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
 2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Bohl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
 2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilerstellung
 2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer
Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißenberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsender Montagesysteme
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingner
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
 2003 · 190 Seiten · 87 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlek
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Hartl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf
Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch
Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer
Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack
Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
 2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff
Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
 2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
 2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler
Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerrieder
Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
 2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller
Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl
Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen
 2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
 2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wunsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
 2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
 2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage
 2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis
Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl
Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig
Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck
Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
 2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier
Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl
Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
 2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller
Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
 2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner
Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
 2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann
Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
 2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy
Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
 2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl
Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl
Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
 2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann
Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
 2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise
Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
 2009 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht
Einsatz und Auslegung zeifensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg
Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
 2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 Ulrich Munzert
Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
 2010 · 176 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 Georg Völlner
Rührreischweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
 2010 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0955-0
- 236 Nils Müller
Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
 2010 · 270 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0992-5
- 237 Franz Decker
Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
 2010 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0996-3
- 238 Christian Lau
Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
 2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4012-6
- 239 Christoph Rimpau
Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
 2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4015-7
- 240 Michael Loy
Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung
 2010 · 169 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4027-0
- 241 Andreas Eursch
Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
 2010 · 205 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4029-4

- 242 Florian Schwarz
Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
2010 · 256 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4030-0
- 243 Martin Georg Prasch
Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
2010 · 261 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4033-1
- 244 Johannes Schilp
Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
2011 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4063-8
- 245 Stefan Lutzmann
Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
2011 · 222 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4070-6
- 246 Gregor Branner
Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
2011 · 230 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4071-3
- 247 Josef Ludwig Zimmermann
Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
2011 · 184 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4091-1
- 248 Clemens Pörnbacher
Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
2011 · 280 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4108-6
- 249 Alexander Lindworsky
Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
2011 · 300 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4125-3
- 250 Michael Mauderer
Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
2011 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4126-0
- 251 Roland Mork
Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
2011 · 228 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4127-7
- 252 Florian Reichl
Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
2011 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4128-4
- 253 Paul Gebhard
Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreißschweißen
2011 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4129-1
- 254 Michael Heinz
Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
2012 · 302 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4147-5
- 255 Pascal Krebs
Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
2012 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4156-7
- 256 Gerhard Straßer
Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
2012 · 290 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4161-1
- 257 Frédéric-Felix Lacour
Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
2012 · 222 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4162-8
- 258 Thomas Hensel
Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4167-3

259 Sherif Zaidan

A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots

2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4175-8

260 Hendrik Schellmann

Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz

2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4189-5