

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

Methode zur Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess

Thomas Bernhard Kirchmeier

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Franke
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Die Dissertation wurde am 16.10.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.07.2014 angenommen.

Thomas Kirchmeier

**Methode zur Anwendung der berührungslosen
Handhabung mittels Ultraschall im
automatisierten Montageprozess**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 301

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2014

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 · 2015

ISBN 978-3-8316-4478-0

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

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit recht herzlich bedanken.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die durch zahlreiche Diskussionen und vielfältige Anregungen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Insbesondere danke ich den zahlreichen Studenten und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus den Servicecentern des Instituts, die durch ihre Unterstützung meine Arbeit erst ermöglicht haben.

Des Weiteren geht mein Dank an meine früheren Kollegen Andrea Acker, Jakob Kurfer, Frédéric-Felix Lacour und Tobias Zeilinger sowie an meinen guten Freund Sebastian Smykowski, die das Manuskript kritisch begutachtet und viele wertvolle Anregungen beigetragen haben.

Nicht unerwähnt bleiben soll die stete Hilfe durch eine Vielzahl von Studentinnen und Studenten, die mit Semester- und Diplomarbeiten und als wissenschaftliche Hilfskräfte die Versuchsaufbauten erstellt und viele Versuche durchgeführt haben.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und damit den Grundstein zu dieser Arbeit gelegt haben und meiner Frau Nina, die durch ihre unermüdliche Geduld mir eine ständige mentale Unterstützung und Motivation war.

München, im Juli 2013

Thomas Bernhard Kirchmeier

„Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig: Unermüdliche Ausdauer und die Bereitschaft, etwas, in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat, wieder wegzuwerfen.“

Albert Einstein

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xv
Formelzeichenverzeichnis	xvii
Begriffserklärungen	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Von der Mikroelektronik zur Mikrosystemtechnik	1
1.2 Herstellung monolithischer Mikrosysteme	3
1.2.1 Fertigungsprozesse	3
1.2.2 Montagetechniken	6
1.2.3 Automatisierte Montagesysteme	12
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	14
2 Stand der Forschung und Technik	17
2.1 Überblick	17
2.2 Vergleich bauteilschonender Handhabungsprinzipien	17
2.2.1 Adhäsive Handhabungssysteme	17
2.2.2 Magnetische Handhabungssysteme	18
2.2.3 Elektrostatische Handhabungssysteme	18
2.2.4 Handhabung mittels Luftkissen	19
2.2.5 Handhabung durch den Bernoulli-Effekt	19
2.2.6 Ultraschallbasierte Handhabungssysteme	20
2.2.7 Bewertung der aufgeführten Handhabungsprinzipien	20
2.3 Überblick zur berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall	22
2.3.1 Physikalische Grundlagen der Ultraschalllevitation . .	22
2.3.2 Produktionstechnische Anwendungsfelder	24
2.4 Auslegung ultraschallbasierter Handhabungssysteme	26
2.4.1 Prozessparameter	26
2.4.2 Auslegung des Ultraschallsystems	28
2.4.3 Strukturmechanische Auslegung der Greiffläche	32
2.4.4 Dimensionierung der Greifkräfte	33
2.5 Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs . .	35

3	Methode zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabung	37
3.1	Betrachtungsraum der Methode	37
3.2	Anforderungen an die ultraschallbasierte Montage	38
3.2.1	Technologische Anforderungen	38
3.2.2	Industrielle Anforderungen	39
3.3	Aufstellung der Methode	41
4	Modellierung der Prozesszusammenhänge	45
4.1	Vorgehen zur numerischen Auslegung der Greiferspitze	45
4.2	Prozesskraftmessungen verschiedener Greiferspitzen	47
4.2.1	Aufbau des Versuchsstandes	47
4.2.2	Voruntersuchungen	48
4.2.3	Gestaltung des Versuchsplans	50
4.2.4	Auswertung	51
4.3	Prozessmodellierung mittels Multi-Layer-Perceptron-Netz	58
4.3.1	Funktionsweise eines Multi-Layer-Perceptron-Netzes	58
4.3.2	Bewertung verschiedener Netztopologien	59
4.3.3	Aufbau und Adaption	60
4.3.4	Bewertung des Modellierungsansatzes	64
4.4	Prozessmodellierung mittels mathematischer Funktion	66
4.4.1	Identifikation der Gleichungsstruktur	66
4.4.2	Berücksichtigung der geometrischen Parameter	70
4.4.3	Bewertung der mathematischen Prozessfunktion	74
5	Adaption der Anlagentechnik und der Montageprozesse	77
5.1	Adaption der Anlagentechnik	77
5.1.1	Bereitstellung der erforderlichen Sensorik und Aktorik	77
5.1.2	Mechanische Integration des Ultraschallvakuumgreifers	80
5.1.3	Messung der relativen Greiferposition zum Bauteil	83
5.1.4	Erweiterung zum automatisierten Greiferspitzenwechsel	85
5.2	Inbetriebnahme des Ultraschallvakuumgreifers	88
5.2.1	Systemkalibrierung	88
5.2.2	Auslegung des Fügekraft- und Luftspaltreglers	91
5.3	Adaption der Montageprozesse	95
5.3.1	Gestaltung der Chip-and-Wire-Technik	95
5.3.2	Gestaltung der Flip-Chip-Technik	99
6	Technische und wirtschaftliche Bewertung	103
6.1	Bewertungsgrundlage	103
6.2	Anwendungsbeispiel Leiterplattenbestückung	103
6.2.1	Prototypischer Aufbau der Montageanlage	103
6.2.2	Erstellung des Prozessmodells	105
6.2.3	Auslegung des Kraft- und Luftspaltreglers	106
6.2.4	Durchführung und Auswertung der Beispielmontage	108

6.3 Technische Bewertung	112
6.4 Wirtschaftliche Bewertung	116
7 Zusammenfassung und Ausblick	123
7.1 Zusammenfassung	123
7.2 Ausblick	125
Literaturverzeichnis	127
A Zusätzliche Informationen zur statistischen Versuchsplanung	145
B Ergebnisse der Vermessung verschiedener Greiferspitzen	147
B.1 Ergebnisse der Voruntersuchung von Unterabschnitt 4.2.2 . .	147
B.2 Messergebnisse zu Unterabschnitt 4.2.4	148
B.3 Versuchsauswertung zu Abschnitt 4.2	152
C Ergebnisse der Prozessmodellierung	153
C.1 Messungen zur Gleichungsstruktur von Unterabschnitt 4.4.1 .	153
C.2 Adaptionsergebnisse der MPL-Netze von Abschnitt 4.3	155
C.3 Extrapolationsergebnisse der Modellierungsansätze	156

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prozessschritte in der Planartechnik	5
1.2	Unterschiedliche Ausführungen des Unterdruckgreifers .	9
1.3	Darstellung der Chip-and-Wire-Technik	10
1.4	Schematische Darstellung der Flip-Chip-Technik	11
1.5	Prozessschritte eines Bestückautomaten	13
2.1	Entstehung der abstoßenden Ultraschallkraft	25
2.2	Schematische Darstellung der Prozessparameter	27
2.3	Aufbau eines Ultraschallvakuumgreifers	30
2.4	Vorgehen zur Auslegung der Handhabungstechnologie .	34
3.1	Bildliche Darstellung der Methode	43
4.1	Numerische Auslegung der Greiferspitze	46
4.2	Versuchsstand und die erfassten Messgrößen	48
4.3	Wechselwirkungseffekte des Versuchsblocks 1	54
4.4	Wechselwirkungseffekte des Versuchsblocks 2	55
4.5	Beispiele unterschiedlicher Transferfunktionen	59
4.6	Aufbau des neuronalen Netzes zur Prozesskraftberechnung	62
4.7	Adaptionsergebnis des neuronalen Netzes	63
4.8	Ergebnisvergleich zwischen Modell und Messung	66
4.9	Ergebnisvergleich zwischen Prozessfunktion und Messung	75
5.1	Folgen einer verkippt montierten Längsachse	81
5.2	Konzept zum Austausch der Greiferspitze	87
5.3	Amplitudenverstärkung bei verschiedenen Anpresskräften	88
5.4	Darstellung des Fügekraft- und Luftspaltreglers	92
5.5	Prozessschritte beim ultraschallbasierten Greifen	96
5.6	Modifizierte Flip-Chip-Technik	101
6.1	Umsetzung zur Messung des Greiferabstandes	104
6.2	Prototypischer Aufbau einer Montageanlage	105
6.3	Online-Identifikation des Prozessmodells	106
6.4	Verallgemeinerte Sprungantwort eines PT1	107
6.5	Führungsverhalten des Kraftregelkreises	108
6.6	Führungsverhalten des Luftspaltregelkreises	109

Abbildungsverzeichnis

6.7	Luftmengenstromänderung während der Bauteilaufnahme	110
6.8	Streuung der Ablagegenauigkeit	111
6.9	Monetärer Vergleich von Handhabungstechniken	120
6.10	Gewinnschwellenverlauf der Handhabungstechnologien	121
6.11	Monetärer Mehrwert der optimierten Flip-Chip-Technik	122
B.1	Messergebnisse zur Voruntersuchung	147
B.2	Messungen der $5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ Greiferspitze (1. Versuchsplan)	148
B.3	Messungen der $4 \cdot 6,25 \text{ mm}^2$ Greiferspitze (1. Versuchsplan)	149
B.4	Messungen der $5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ Greiferspitze (2. Versuchsplan)	150
B.5	Messungen der $4 \cdot 6,25 \text{ mm}^2$ Greiferspitze (2. Versuchsplan)	151
C.1	Krafteinflüsse einzelner Parameter	153
C.2	Funktionsapproximation zweier Parameter	154
C.3	Vergleich Messung und Extrapolation	156

Tabellenverzeichnis

4.1	Voruntersuchungsergebnis geometrischer Einflussgrößen . . .	50
4.2	Verwendeter Stufenabstand der Eingangsparameter	51
4.3	Ergebnis der Prozessmodellierung mittels MLP-Netze	64
4.4	Ergebnis der Prozessmodellierung mit einem MLP-Netz . . .	64
4.5	Ermittelte Koeffizienten der definierten Gleichungsstruktur .	70
4.6	Kombinationen unterschiedlicher Geometrieeigenschaften . .	72
4.7	Korrelationswerte aus Koeffizient und Geometrieparameter .	73
6.1	Vergleich aller drei Bestückszenarien	112
6.2	Zusammenfassung der technischen Bewertung	113
6.3	Eingangsdaten der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	119
A.1	t-Werte zur Berechnung zweiseitiger Vertrauensbereiche . . .	145
A.2	2^{5-1} Teilfaktorenplan	146
B.1	Signifikanzauswertung der Versuchspläne	152
C.1	Lernerfolge unterschiedlicher MLP-Netztopologien	155

Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
E	–	Errechneter Modellfehler in %
F_{ist}	mN	Gemessene Prozesskraft
F_G	mN	Gewichtskraft des Bauteils
F_{Modell}	mN	Berechnete Prozesskraft
F_{res}	mN	Resultierende Kraft aus Ultraschall und Unterdruck; positiv: abstoßende Kraft, negativ: anziehende Kraft
F_{soll}	mN	Zielgröße des Kraftregelkreises
F_U	mN	Anziehende Unterdruckkraft
F_{US}	mN	Abstoßende Ultraschallkraft
F_W	N	Anpresskraft der wechselfähigen Sonotrode
F_Z	mN	Zentrierkraft
G_p	–	Übertragungsfunktion des Druckregelkreises
G_R	–	Übertragungsfunktion des Reglers
G_{US}	–	Übertragungsfunktion des Amplitudenregelkreises
K_r	V/mN	Proportionalbeiwert des Reglers
N	–	Vektorlänge oder Anzahl an Messpunkten
Q	cm^3/min	Luftmengenstrom
R	–	Maßzahl für die Robustheit
V_{US}	V	Steuerspannung der Ultraschallamplitude
V_p	V	Steuerspannung des Unterdrucks
T_N	s	Zeitkonstante des Reglers
T_p	s	Zeitkonstante des Druckregelkreises
T_{US}	s	Zeitkonstante des Amplitudenregelkreises
a	mm	Kantenlänge a eines rechteckigen Bauteils
b	mm	Kantenlänge b eines rechteckigen Bauteils
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
c_i	–	i -ter Koeffizient
d_\varnothing	mm	Abstand zweier Unterdruckbohrungen
\bar{e}	mN	Gemittelter absoluter Fehler
e^2	N^2	Gemittelter quadratischer Fehler
f_0	Hz	Resonanzfrequenz des Ultraschallsystems
f_{DoE}	–	Freiheitsgrad

Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
h_{ist}	μm	Gemessener Luftspaltwert
h_{min}	μm	Minimaler Luftspaltwert
h_{soll}	μm	Zielgröße der Luftspaltregelung
h_0	μm	Mittlerer Luftspalt
i	—	Indexwert einer Reihe
k	—	Schrittweite oder Messfortschritt
k_{US}	$\mu m/V$	Verstärkungsfaktor des Ultraschallsystems
k_p	Pa/V	Verstärkungsfaktor der Unterdruckerzeugung
$min(a, b)$	mm	Kleinste Kantenlänge des Bauteils
n_{\emptyset}	—	Anzahl der Unterdruckbohrungen im Greifer
p	Pa	Druck
p_U	hPa	Unterdruck
p_0	hPa	Umgebungsdruck
r	—	Empirischer Korrelationskoeffizient
s	—	Schätzwert der Standardabweichung einer Messreihe
s^2	—	Schätzwert der Varianz einer Messreihe
s_d	—	Mittelwert mehrerer Standardabweichungen
s_e	mN	Fehlerstandardabweichung
t	—	Faktor des Vertrauensintervalls (vgl. Tabelle A.1)
v	m/s^2	Strömungsgeschwindigkeit
\bar{x}	—	Geschätzter Mittelwert des Vektors x
x_{γ}	mm	Verschiebung des Greifermittelpunkts in x
\bar{y}	—	Geschätzter Mittelwert des Vektors y
\hat{y}	—	Geschätzter Modellausgangswert
y_{γ}	mm	Verschiebung des Greifermittelpunkts in y
Δh	mm	Verkippungsbedingte Luftspaltänderung
Δx	mm	Verschiebung der Greiffläche in x -Richtung
Δy	mm	Verschiebung der Greiffläche in y -Richtung
Δz	mm	Verschiebung der Greiffläche in z -Richtung
Φ	$^{\circ}$	Verkippungswinkel des Ultraschallvakuumgreifers um die x -Achse
Θ	$^{\circ}$	Verkippungswinkel des Ultraschallvakuumgreifers um die y -Achse
Ψ	$^{\circ}$	Drehwinkel um die Längsachse (z -Achse) des Ultraschallvakuumgreifers
ϵ	—	Kompression
φ	—	Eingangsvektor der Prozessgleichung
γ	$^{\circ}$	Verkippungswinkel der Längsachse
λ_0	mm	Wellenlänge der 1. Längsmode des Ultraschallwandlers

Zeichen	Einheit	Bedeutung
μ	–	Wahrer Mittelwert einer Reihe
θ	–	Verbindungsgewicht eines künstlichen neuronalen Netzes
σ	–	Wahre Standardabweichung einer Reihe
σ^2	–	Wahre Varianz einer Reihe
ξ	μm	Ultraschallamplitude
$\hat{\psi}$	–	Adaptierter Koeffizientenvektor
\varnothing	mm	Durchmesser einer Unterdruckbohrung

Begriffserklärungen

Bauteil

Verallgemeinerter Begriff des zu handhabenden Objektes (z. B. integrierter Schaltkreis, Chip oder Die).

Bauteilträger

Als Bauteilträger wird das Objekt bezeichnet, auf dem das Bauteil montiert wird, z. B. Chipgehäuse oder Leiterplatte.

Bestückschatten

Als Bestückschatten wird die Fläche bezeichnet, die das Greifwerkzeug bei der Handhabung eines Bauteils zusätzlich zur Bauteilfläche einnimmt. In der DIN 61188 TEIL 5-1 fällt der Bestückschatten unter den Begriff der Bauteilflächenbearbeitungszone und beschreibt eine Flächenzugabe zur Bauteilfläche, die durch die Anforderungen einer fehlerfreien Montage entsteht.

Chip-and-Wire-Technik

Bei der Chip-and-Wire-Technik wird die unstrukturierte Bauteilseite auf dem Bauteilträger montiert. Die Kontaktierung erfolgt über Bonddrähte (vgl. Abbildung 1.3).

Eingangsparameter

HEINZ (2011) unterteilte die Eingangsparameter eines ultraschallbasierten Handhabungssystems in direkte Parameter (in dieser Arbeit gleichbedeutend mit den Prozessparametern) und in geometrische Parameter. Während die geometrischen Parameter durch den Bau der Greiferspitze festgelegt sind, können die direkten Parameter, Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt, zu jedem Zeitpunkt der Bauteilhandhabung geändert werden.

Flip-Chip-Technik

Bei der Flip-Chip-Technik wird das Bauteil aufgenommen, um 180° gedreht und mit der strukturierten Seite auf dem Bauteilträger montiert. Die Kontaktierung erfolgt über Lotbumps, die zwischen dem Bauteil und dem Bauteilträger sitzen (vgl. Abbildung 1.4).

Greiferachse

Die Greiferachse bezeichnet die Längsdrehachse eines Handhabungssystems, in dessen Richtung die Bauteilaufnahme und -ablage erfolgt. Durch eine Drehung um die Greiferachse wird ein gegriffenes Bauteil in der Ebene ausgerichtet.

Greiferspitze

Die Greiferspitze ist an die jeweilige Bauteilgeometrie anzupassen und sitzt am Ende der Ultraschallsonotrode.

Greiffläche

Die Greiffläche bildet die Stirnseite der Greiferspitze und erzeugt die Ultraschallschwingungen in der Luft.

Höhenlinie

Die Höhenlinie repräsentiert im ξ - p_{LU} - F_{res} -Diagramm (vgl. Abbildung 2.2) den Verlauf einer resultierende Kraft mit dem Wert Null.

Monolithisches Bauteil

Ein monolithisches Bauteil wird vollständig aus einem Material, z. B. Silizium, gefertigt (vgl. Unterabschnitt 1.2.1). Die erzeugten Strukturen befinden sich nur auf einer Bauteilseite.

Leistungselektronik

Über die Leistungselektronik wird das Ultraschallsystem angesteuert. Die erzeugte Ultraschallamplitude ist proportional zur Steuerspannung.

Luftspalt

Der Luftspalt h_0 ist der Abstandswert zwischen der Bauteil- und Greiffläche.

Prozessgrößen

Als Prozessgrößen werden die zu regelnden Zielgrößen, die resultierende Prozesskraft und der Luftspalt, bezeichnet.

Prozessparameter

Die Prozessparameter umfassen die Ultraschallamplitude, den Unterdruck und den Luftspalt (siehe Eingangsparameter).

Resultierende Prozesskraft

Als resultierende Prozesskraft wird die axiale Kraft in Richtung der Greiferachse bezeichnet, die aus der Superposition der Ultraschall- und Unterdruckkraft entsteht (vgl. Abbildung 2.2).

Überanpassung

Nach BACKHAUS (2008) charakterisiert eine Überanpassung (engl. *overfitting*) ein Modell, das irrelevante funktionsbeschreibende Variablen enthält. Das Modell wird damit zwar besser auf die Trainingsdaten angepasst, aber die Übertragbarkeit auf die Gesamtheit (Interpolations- und Extrapolationsfähigkeit) wird deutlich verschlechtert.

Ultraschallfrequenz

Als Ultraschallfrequenz ist in dieser Arbeit immer die Resonanzfrequenz der ersten Längsmode λ_0 des Ultraschallvakuumgreifers gemeint.

Ultraschallvakuumgreifer

Ein an die Handhabungsaufgabe angepasstes Ultraschallsystem, bestehend aus Ultraschallverbundschwinger, Ultraschallsonotrode mit Unterdruckanschluss und Greiferspitze sowie Leistungselektronik (vgl. Abbildung 2.3).

Ultraschallverbundschwinger

Der Ultraschallverbundschwinger, auch Langevin-Bolt-Transducer (KUTRUFF 1988; MORENO ET AL. 2005) genannt, besteht aus piezoelektrischen Lochscheiben und Isolatoren, die über zwei Zylinder, der Kopf- und der Rückenmasse, mit einer Schraube mechanisch vorgespannt sind (vgl. Abbildung 2.3).

Ultraschallsonotrode

Als Ultraschallsonotrode wird in der vorliegenden Arbeit das Schallverstärkungselement bezeichnet, an das der Ultraschallverbundschwinger und die Greiferspitze angeschraubt werden.

Ultraschallsystem

Allgemeiner Begriff für ein System zur Erzeugung von Ultraschallschwingungen in einem Medium (z. B. Luft).

Unterdruckdüsen oder Unterdruckbohrungen

Die Unterdruckdüsen sind in der Greiferspitze integriert und darüber wird die anziehende Unterdruckkraft auf das Bauteil ausgeübt.

Unterdruckgreifer

Allgemeine Bezeichnung für Greifwerkzeuge zur Handhabung von Bauteilen mittels Unterdruck (vgl. Abbildung 1.2).

Sonotrode

Abk. für Ultraschallsonotrode.

Begriffserklärungen

Substrat

Das Substrat ist das Basismaterial, aus dem über die Planartechnik monolithische Bauteile gefertigt werden.

Wafer

Als Wafer wird in der Planartechnik das Substrat bezeichnet, aus dem die monolithischen Bauteile gefertigt werden.

1 Einleitung

1.1 Von der Mikroelektronik zur Mikrosystemtechnik

Die Innovationen der Mikroelektronik, die von der Menschheit heutzutage als selbstverständlich wahrgenommen und verwendet werden, tragen zu zahlreichen Veränderungen in Wirtschaft, Wissenschaft und Kultur bei. So beschleunigten die entstandenen Kommunikationsmöglichkeiten den Prozess der Marktöffnungen für Waren, Dienstleistungen und Geld, womit die Globalisierung maßgeblich vorangetrieben wurde (VON PLATE 2003). Zahlreiche komplexe Modelle in Physik, Chemie und weiteren mathematischen sowie naturwissenschaftlichen Fachrichtungen sind erst seit der Erfindung der Computertechnik als Folge der Mikroelektronik möglich geworden (DRENTH 2001). HILBERT & LÓPEZ (2011) nehmen an, dass die Menschheit im Jahr 2002 erstmals mehr Informationen digital als analog speicherte. Der ehemalige Bundestagspräsident Wolfgang Thierse sieht in dieser Digitalisierung einen Wandel, der sich sowohl auf alle Technologien als auch auf fast alle menschlichen Lebensbereiche auswirkt, weshalb er von der „digitalen Revolution“ mit Beginn des 20. Jahrhunderts spricht (THIERSE 2003).

Doch die eigentliche technische Revolution begann bereits Ende der vierziger Jahre des letzten Jahrhunderts. *William Shockley* von der *Fa. Bell Laboratories* hat 1947 den Transistor (VÖLKLEIN & ZETTERER 2006) erfunden und erhielt zusammen mit *John Bardeen* und *Walter Houser Brattain* 1956 hierfür den Physiknobelpreis (HILLMER 2000). Ein Transistor ist ein elektronisches Bauelement, aufgebaut aus einem Halbleitermaterial, dessen elektrischer Widerstand durch eine angelegte Spannung gesteuert wird (MÜLLER 1991). Damit werden elektrische Signale geschaltet oder verstärkt, ohne dabei mechanische Bewegungen auszuführen, wie es beim Relais der Fall ist. In den 50er Jahren wurden die bis dahin in Computern verbauten Elektronenröhren durch Transistoren ersetzt. Die intelligente Verschaltung, gleich ob Elektronenröhre oder Transistor, in einer bistabilen Kippstufe ermöglicht die Speicherung einer Datenmenge von einem Bit über einen längeren Zeitraum (DENNHARDT 2009). Dies ist das Grundprinzip der Computertechnik. Aber erst mit der Entwicklung des integrierten Schaltkreises¹ durch *Jack Kilby* (*Fa. Texas Instruments*) und *Robert Noyce* (*Fa.*

¹engl. Integrated Circuit, Abk. IC.

1 Einleitung

Fairchild Semiconductor) 1958 wurde die Mikroelektronik geboren (JOPP 2006). Deren Erfolg beruht einerseits auf der Integration von Funktionsbausteinen bestehend aus intelligent zusammengeschalteten Transistoren, andererseits auf den kontinuierlich verbesserten Fertigungsverfahren zur Herstellung miniaturisierter mikroelektronischer Bauteile, denn erst dadurch war es möglich, den Platzbedarf und das Gewicht zu senken und gleichzeitig die Packungs- und Funktionsdichte zu erhöhen. Durch eine weitergehende Miniaturisierung der einzelnen Transistoren und deren Verschaltung werden die gerade genannten Eigenschaften eines integrierten Schaltkreises weiter optimiert und zugleich die Herstellungskosten reduziert. Folglich ist die Erhöhung der Funktionsdichte das Entwicklungsziel jedes neuen mikroelektronischen Bauteils.

Der Trend zur Miniaturisierung wurde bereits 1965 durch das Moorsche Gesetz prophezeit (KEYES 2006) und bewahrheitet sich bis heute. Das Postulat besagt eine Verdoppelung der Transistorenanzahl pro Flächeneinheit in gleichbleibenden Entwicklungsabständen. Besonders deutlich wird der Funktionszuwachs durch die Miniaturisierung am Beispiel zweier Produkte der *Fa. Intel*. Während 1971 der 4004 Mikroprozessor mit 2.300 Transistoren bei einer Baugröße von jeweils $10\ \mu\text{m}$ pro Transistor gefertigt wurde, besteht der 2008 hergestellte Intel Core-i7 Computerprozessor aus 731 Millionen Transistoren, die jeweils nur noch ein Größe von $45\ \text{nm}$ aufweisen (INTEL CORPORATION 2009). Infolge der anhaltenden Miniaturisierung sind auf dem Halbleitermarkt in den letzten 20 Jahren Wachstumsraten von durchschnittlich 16% zu verzeichnen (PUFFER 2007). Selbst die Weltwirtschaftskrise von 2008 ließ nach PETTEY & STEVENS (2011) das Wachstum des Halbleitermarkts nicht zur Stagnation kommen.

Aus den Fertigungsverfahren der Mikroelektronik entstand zu Beginn der 80er Jahre im letzten Jahrhundert die Idee, auch mikromechanische Komponenten zu erzeugen (PETERSEN 2003). Die Kombination der Mikroelektronik und -mechanik ermöglichte die Herstellung erster Mikrosensoren, wie einen Beschleunigungssensor. Damit wurde der Grundstein der Mikrosystemtechnik gelegt, die nach DIN 32564 TEIL 1 wie folgt definiert ist:

Definition (*Mikrosystem*)

Ein Mikrosystem ist eine miniaturisierte Einheit, welche durch hybride oder monolithische Integration mehrere Mikrokomponenten und/oder Funktionseinheiten enthält.

Wie die vorangegangene Definition verdeutlicht, wird bei der Mikrosystemtechnik zwischen monolithischen und hybriden Systemen unterschieden. Nach MENZ ET AL. (2005) wird ein monolithisches Mikrosystem vollständig aus einem Material, z. B. Silizium, gefertigt (vgl. Unterabschnitt 1.2.1). Bei hybriden Mikrosystemen werden die einzelnen Komponenten getrennt und meist aus unterschiedlichen Werkstoffen hergestellt und in einer abschließenden Monta-

1.2 Herstellung monolithischer Mikrosysteme

ge auf einem gemeinsamen Bauteilträger zu einem System zusammengebaut. Nach HILLERINGMANN (2006) ist dadurch die Kombination verschiedener Teilmikrosysteme zu einem Gesamtsystem möglich, mit dem auch optische und fluidische Funktionen realisiert werden können. Aufgrund dieser vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten von Mikrosystemen sieht LUKAS (2009) die Potentiale der Mikrosystemtechnik noch lange nicht erschöpft. Genau diese Gestaltungsfreiheiten können aber auch als Nachteil hybrider Mikrosysteme gesehen werden, da für deren Herstellung oftmals spezialisierte Montageprozesse erforderlich sind (HÖHN 2001). Die Entwicklungskosten wirtschaftlicher und automatisierter Montageprozesse hybrider Mikrosysteme können nach HESSELBACH ET AL. (2003) bis zu 80% der gesamten Produktionskosten betragen. Folglich wird die manuelle Montage bevorzugt zur Herstellung hybrider Mikrosysteme eingesetzt (FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG 2006; HESSELBACH ET AL. 2006). Für die Massenproduktion ist die manuelle Montageform allerdings wirtschaftlich nicht mehr rentabel. Eine Pressemitteilung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung sieht die Massenproduktion mikrosystemtechnischer Produkte allerdings als Voraussetzung für die Generierung weiterer Märkte, denn bislang wird die Entwicklung und Anwendung der Mikrosystemtechnik durch die Mobilfunk- und Automobiltechnik getragen (BMBF & VDE 2007). GERLACH & DÖTZEL (2006) sehen ausschließlich die Fertigung monolithischer Bauteile als Mittel für eine kostengünstige Massenproduktion von Mikrosystemen. Nach NEIL (2005) werden monolithische Bauteile zunehmend ohne Gehäuse auf einer Funktionsbaugruppe verbaut. Der Fokus der vorliegenden Dissertation richtet sich daher auf die automatisierte Montage von monolithischen Mikrosystemen² und von Bauteilen der Mikroelektronik auf einem Bauteilträger, wie einer Leiterplatte oder einem Chipgehäuse. Für die Herleitung der produktionstechnischen Herausforderungen wird im folgenden Abschnitt die Herstellung monolithischer Mikrosysteme erläutert.

1.2 Herstellung monolithischer Mikrosysteme

1.2.1 Fertigungsprozesse

Da die Herstellung monolithischer Mikrosysteme aus den Techniken der Mikroelektronik stammt, werden anhand der Fertigung von integrierten Schaltkreisen die prinzipiellen Prozessschritte erläutert. Die Herstellung einer integrierten Schaltung umfasst bis zu 400 Einzelschritte (WIDMANN ET AL. 1996). Diese

²In der vorliegenden Arbeit wird ein monolithisches Mikrosystem, dass in ein Chipgehäuse oder auf eine Leiterplatte montiert ist, nicht als ein hybrides Mikrosystem betrachtet. Dies entspricht der Definition nach MENZ ET AL. (2005), nach der ein hybrides Mikrosystem aus mindestens zwei Mikrokomponenten besteht.

1 Einleitung

lassen sich grob in die Waferherstellung und die Planartechnik (engl. Front-End) einteilen. Mit der Montagetechnik (engl. Back-End) werden anschließend in Unterabschnitt 1.2.2 die Vereinzelnung, die Handhabung und die Kontaktierverfahren der Bauteile betrachtet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist der verallgemeinerte Begriff des Bauteils gleichbedeutend mit integriertem Schaltkreis, Chip oder Die³.

Als Basismaterial für integrierte Schaltungen eignet sich Silizium. Reines Silizium besitzt mit einem spezifischen Widerstand von $1,2 \cdot 10^7 \Omega m$ Eigenschaften eines elektrischen Isolators (KUCHLING 2004). Durch die gezielte Einbringung von Fremdatomen, die eine Verunreinigung des Siliziums darstellen, wird der elektrische Widerstand von Silizium verändert. Damit der Widerstand möglichst genau definiert werden kann, wird das Ausgangsmaterial in einer nahezu perfekten Kristallqualität mit einem Fremdatomanteil von 10^{-9} (1 Fremdatom bei 10 Milliarden Siliziumatomen) benötigt. Das Verfahren zur Einbringung von Fremdatomen wird Dotierung genannt. Dabei wird zwischen einer n- und p-Dotierung unterschieden. Um eine n-Dotierung zu erhalten, wird in das Siliziumkristall entweder Phosphor (P), Arsen (As) oder Antimon (Sb) eingebracht. Diese Elemente, auch Donatoren genannt, geben bei Energiezufuhr ein fünftes Valenzelektron ab. Die Bindung zu den benachbarten Siliziumatomen bleibt dabei erhalten, denn Silizium besitzt nur vier Bindungselektronen (LINDNER ET AL. 1999). Das freie Elektron kann sich daher ungehindert im Halbleiter bewegen, womit der Stromfluß bei deutlich geringerem Widerstand ermöglicht wird. Im Gegensatz zu den Donatoren führt die Integration von Akzeptoren im Siliziumkristall zu einer Bindungslücke. Elemente wie Aluminium (Al), Bor (B), Gallium (Ga) oder Indium (In) besitzen nur drei Bindungselektronen. Die entstehende Bindungslücke wird durch benachbarte Bindungselektronen ausgeglichen. Da dieser Ausgleichsprozess nie abgeschlossen ist, bewegt sich die Lücke frei im Kristallgitter und ermöglicht ebenfalls den Stromfluß (LINDNER ET AL. 1999).

Um große Siliziumeinkristalle zu züchten, gibt es zwei Verfahren, das Czochralski-Verfahren sowie das Zonenschmelzverfahren (VÖLKLEIN & ZETTERER 2006). Beim Czochralski-Verfahren wird ein Kristallkeim aus Silizium mit einer bestimmten kristallographischen Orientierung in eine Schmelze gleichen Materials getaucht. Unter Rotation wird der Kristallkeim, der an einem Metallstab befestigt ist, langsam aus der Schmelze herausgezogen. Dabei rekristallisiert das flüssige Silizium zu einem Einkristall. Nach EVERS ET AL. (2003) werden 95% der Weltproduktion an einkristallinem Silizium durch das Czochralski-Verfahren hergestellt. Die Grunddotierung kann durch

³Plural „Dies“ oder „Dice“. Nach DIN 32564 TEIL 2 wird „Die“ definiert als *aus einem Wafer vereinzelt* Bauteil mit *mechanischen, fluidischen, elektronischen, optischen und/oder opto-elektronischen Funktionen*.

1.2 Herstellung monolithischer Mikrosysteme

Beimischung der jeweiligen Fremdatome dem aufgeschmolzenen Silizium beim Czochralski- sowie beim Zonenschmelzverfahren bereits mitgegeben werden.

Das Ergebnis aus den Schmelzverfahren ist ein Siliziumstab mit einem definierten Durchmesser von 150 mm, 200 mm oder 300 mm. Nach Überprüfung der Kristallorientierung und der Dotierung werden die zylinderförmigen Einkristalle zu dünnen Scheiben geschnitten, den sogenannten Wafern, die abschließend geläppt und poliert werden. Die Wafer dienen in den weiteren Schritten, der Planartechnik (HILLERINGMANN 2008), als Substrat für die Herstellung einer integrierten Schaltung. Diese beinhalten eine Reihe von aufeinanderfolgenden technologischen Einzelprozessen, mit der die gewünschte Struktur der elektronischen Schaltung geschaffen wird. Nach FISCHER ET AL. (2007) können die wesentlichen Prozessschritte entsprechend der Abbildung 1.1 graphisch erläutert werden.

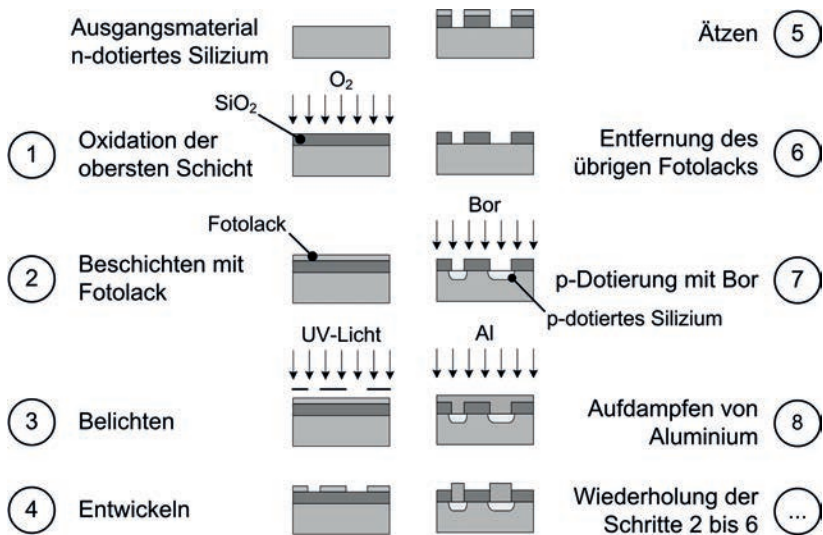


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Prozessschritte in der Planartechnik, nach FISCHER ET AL. (2007).

Im ersten Schritt wird der vordotierte Wafer Sauerstoff (O_2) ausgesetzt, womit sich an dessen Oberfläche eine dünne Oxidschicht (SiO_2) bildet. Siliziumdioxid ist elektrisch isolierend und wird als Isolationsschicht in MOSFETs⁴ (MÜLLER

⁴ engl. metal oxide semiconductor field-effect transistor, Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor

1 Einleitung

1991) verwendet. Im zweiten Schritt wird eine dünne Resistsschicht, meist eine Art Fotolack, gleichmäßig auf der Siliziumdioxidoberfläche aufgebracht. Über eine strukturierte Fotomaske werden im dritten Schritt nur bestimmte Stellen des Wafers mit UV-Licht bestrahlt. Dadurch ändert sich an diesen Stellen die Löslichkeit des Resists. Anschließend wird im vierten Schritt der Resist entwickelt. Die unbelichteten Flächen widerstehen dem chemischen Abtragungsprozess im fünften Schritt. Der restliche Resist wird danach ebenfalls chemisch entfernt. Im siebten Schritt werden die herausgeätzten Siliziumdioxidflächen mit einer zum Substrat gegensätzlichen Dotierung versehen. Hierzu gibt es zwei unterschiedliche Ansätze, die Diffusion und die Ionenimplantation (RUGE & MADER 1991). Damit wird der für alle Halbleiterelemente wichtige pn-Übergang zwischen n- und p-dotiertem Silizium erzeugt. Zum Schluss werden die einzelnen pn-Übergänge beispielsweise mit Aluminiumbrücken zu Funktionseinheiten verbunden. Zur weiteren Strukturierung bzw. zur Erzeugung der Verbindungsbrücken werden die zuvor beschriebenen Prozessschritte mehrfach wiederholt. Je kleiner die Strukturen auf dem Wafer erzeugt werden, desto mehr Bauteile können parallel im selben Fertigungsprozess hergestellt werden. Aus diesem Grund ist die Halbleiterindustrie an einer ständigen Verfeinerung des Lithographieprozesses (VÖLKLEIN & ZETTERER 2006) interessiert. Dadurch wird die Miniaturisierung maßgeblich vorangetrieben.

Nach erfolgter Herstellung der integrierten Schaltkreise muss die Dicke des Wafers noch mechanisch oder chemisch reduziert werden. Durch die Dickenreduktion des Wafers wird der Wärmeabtransport des einzelnen Bauteils verbessert. Zur Verringerung der Waferdicke haben sich das Schleifen, das Läppen und das Ätzen etabliert (HILLERINGMANN 2008). Abschließend ist eine Zerteilung des Wafers in einzelne Bauteile notwendig. Während die Herstellung der integrierten Schaltkreise parallelisiert auf einem Wafer erfolgt, ist für die weitergehende sequenzielle Montage eine Vereinzelung der Bauteile unumgänglich (HÖHN 2001). Hierzu müssen die im Verbund erstellten Bauteile voneinander getrennt werden. Dabei wird der Wafer mit der unstrukturierten Seite auf eine Folie, dem Blue-Tape oder dem UV-Tape, aufgeklebt. Die Trennung zu einzelnen Bauteilen findet durch Ritzen und Brechen, Lasertrennen oder Trennsägen des Wafers statt. Die dabei entstehenden Trennlinien wurden bereits im Lithographieprozess berücksichtigt. Durch die klebende Folie behalten alle Bauteile nach der Zerteilung des Wafers ihren Ordnungszustand und werden erst zur Montage durch Ablösung von der Folie aus dem Verbund herausgenommen.

1.2.2 Montagetechniken

Während die Montage nach VDI (1983) als *der Zusammenbau von Teilen und/oder (Teile-) Gruppen zu Erzeugnissen oder zu (Teile-) Gruppen höherer Erzeugnisebenen zu verstehen ist*, wird unter der Mikromontage nach DIN 32564 TEIL 2 *der*

1.2 Herstellung monolithischer Mikrosysteme

Zusammenbau mikrotechnischer Bauteile, der Aufbau von Mikrokomponenten auf Montageflächen oder deren Einbau in Gehäuse, einschließlich elektrischer Kontaktierung und Erstellung sonstiger Anschlüsse, verstanden. Auch wenn im allgemeinen Sprachgebrauch mit der Mikromontage oftmals der Zusammenbau hybrider Mikrosysteme adressiert wird, fallen monolithische Mikrosysteme und mikroelektronische Bauteile ebenfalls unter die Definition der DIN 32564 TEIL 2. Denn auch diese Bauteile sind zu vereinzeln, auf einem Träger zu montieren und anschließend sind die Anschlusspads von Bauteil und Träger zu kontaktieren. Nach VÖLKLEIN & ZETTERER (2006) kommen als Bauteilträger entweder metallische Systemträger, Keramiken, Kunststoffe, Gläser, Siliziumwafer oder auch Leiterplatten zum Einsatz. Die Verbindung zwischen Bauteil und Träger erfolgt dabei durch Kleben, Löten oder Legieren. Die in ein Kunststoff- oder Keramikgehäuse verpackten Bauteile werden als SMD⁵-Bauteile bezeichnet. Dagegen werden Bauteile, die auf eine Leiterplatte ohne Gehäuse aufgebracht werden, als Bare-Die⁶ betitelt (VÖLKLEIN & ZETTERER 2006). Der Vorteil von Bare-Dice im Gegensatz zu gehäusten Bauteilen liegt nach HILLERINGMANN (2008) im Entfall von etlichen Handhabungsschritten und der Reduktion des Flächenbedarfs auf dem Träger und der damit verbundenen Kosteneinsparung. Weiterhin werden die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Bauteils verbessert.

In der Halbleiterindustrie und der Mikrosystemtechnik werden zwei Arten von Kontaktierungstechniken unterschieden (HSU & CLATTERBAUGH 2003). Bei der ersten Kontaktierungsart wird die unstrukturierte Seite auf dem Bauteilträger montiert (face-up bonding). Bei der zweiten Kontaktierungsart wird dagegen die strukturierte Bauteilseite auf dem Bauteilträger befestigt (face-down bonding). Beim face-down bonding kommt die sogenannte Flip-Chip-Technik zum Einsatz, die auch in der Mikrosystemtechnik Einzug gehalten hat (JACOB 2002), während beim face-up bonding das Chip-and-Wire-Verfahren eingesetzt wird. Bevor die beiden Techniken aber näher erläutert werden, wird zuvor die Bauteilvereinzlung und die derzeitige Greiftechnik kurz dargestellt.

Bauteilvereinzlung: Nach der Zerteilung des Wafers in einzelne Bauteile am Ende der Waferherstellung liegen diese in einer durch den Trennschnitt genau definierten Größe und Lage auf der selbstklebenden Folie (UV- oder Blue-Tape) vor. Für die nachfolgende Montage müssen die Bauteile von der Folie durch die Aufhebung der Adhäsionskraft gelöst werden. Eine der bekanntesten Methoden hierfür ist die *needle ejection* durch einen *Die Ejector* gemäß der PATENTSCHRIFT US 4990051 A. Bei diesem Verfahren heben eine oder mehrere dünne Nadeln die

⁵ engl. surface-mounted-device; oberflächenmontierbare Bauteile, die mittels lotfähiger Anschlussflächen direkt auf eine Leiterplatte gelötet werden können.

⁶ dt. Nacktchip; bezeichnet den Verbau des Bauteils auf einem Bauteilträger ohne schützendem Gehäuse.

Folienunterseite und damit ein einzelnes Bauteil an (HERBST & MARTE 2005). Abbildung 1.4 veranschaulicht diese Bauteilvereinzelung. Zusätzlich zum Anheben des Bauteils wird der Folienkontakt zum Bauteil, an den Stellen, an denen keine Nadel angesetzt ist, durch ein angelegtes Vakuum im *Die Ejector* reduziert. Der Kontakt zwischen Adhäsivfolie und Bauteil beschränkt sich damit nur auf die Fläche der Nadelspitze(n), womit ein leichtes Anheben des Bauteils durch das Handhabungssystem möglich ist. Neben dem Prinzip der *needle ejection* können die Bauteile von der Folie auch anderweitig entnommen werden. Durch Wirkmedien, die auf den Klebstoff der Adhäsivfolie aufgetragen werden, oder durch UV-Bestrahlung kann eine Reduktion der Klebekraft ebenfalls erfolgen. Jedoch benötigt der Einsatz von Wirkmedien oder UV-Bestrahlung eine Einwirkzeit, die den Vereinzelungsprozess im Vergleich zum *Die Ejector* verlangsamt und folglich verteuert.

Greiftechnik: Für das automatisierte Greifen elektronischer oder monolithischer Bauteile werden in der Industrie überwiegend Unterdruckgreifer eingesetzt (NIENHAUS 1999). Aufgrund der hohen Flexibilität, der weitestgehenden Bauteilgeometrie- und Materialunabhängigkeit und des einfachen Funktionsprinzips sind Unterdruckgreifer die erste Wahl für Handhabungsaufgaben der Mikromontage. Weiterhin können auch gewölbte und poröse Objekte gegriffen und montiert werden, wenn sie eine ebene Greiffläche besitzen. Derartige Greifsysteme auf Basis des taktilen, fluidischen Greifprinzips werden zahlreich in der Literatur diskutiert (ANSEL ET AL. 2002; GRUTZECK & KIESEWETTER 2002; POPOVIC ET AL. 2002; NIENHAUS 1999; HENSCHKE 1994). Unterdruckgreifer unterscheiden sich anhand der geometrischen Form des Kopfes, des eingesetzten Werkstoffs sowie den daraus resultierenden Einsatzgebieten. Vier unterschiedliche Unterdruckgreifer, die in der automatisierten Bauteilmontage eingesetzt werden, sind in Abbildung 1.2 dargestellt (HEINZ 2011). Abbildung 1.2 a zeigt einen Saugglockengreifer, der Bauteile durch eine Bohrung mit angelegtem Unterdruck anzieht und an definierten Positionen an der Bauteiloberfläche durch Abstandshalter auf Distanz hält. Somit wird eine Berührung empfindlicher Bauteiloberflächen vermieden. Aus dem gleichen Grund gibt es auch den Die-Collet (Abbildung 1.2 b). Dieser Greifer verfügt über schräge, bauteilspezifische Dichtflächen, die der Oberflächenschonung des Bauteils dienen und nur an der Außenkante ansetzen. Die Bauform des Greifers übt zusätzlich eine selbstzentrierende Wirkung auf das Bauteil aus. Infolge der Greifgeometrie entsteht allerdings der sogenannte Bestückschatten⁷ (SCHILP 2007), da die Abmessungen des Greifers über die des Bauteils hinausragen. Folglich muss dieser Bereich

⁷In der DIN 61188 TEIL 5-1 fällt der Bestückschatten unter den Begriff der Bauteilflächenbearbeitungszone und beschreibt eine Flächenzugabe zur Bauteilfläche, die durch die Anforderungen einer fehlerfreien Montage entsteht.

1.2 Herstellung monolithischer Mikrosysteme

sowohl bei der Bauteilaufnahme als auch bei der Bauteilablage freigehalten werden, um Beschädigungen des Die-Collet oder der umliegenden Bauteile zu vermeiden. Die Pipette (Abbildung 1.2 c) ist der bekannteste Unterdruckgreifer. Ihr Einsatz ist nur möglich, wenn die Berührung der Bauteiloberfläche keine Beschädigungen zur Folge hat, wie beispielsweise bei gehäusten Bauteilen. Das Greifen mit dem Saugnapf (Abbildung 1.2 d), an dessen Kopfseite sich eine elastische Gummilippe befindet, funktioniert zwar problemlos, jedoch ist die Bauteilpositionierung durch die entstehende Beweglichkeit sehr ungenau (BÜTTGENBACH & HOXHOLD 2008).

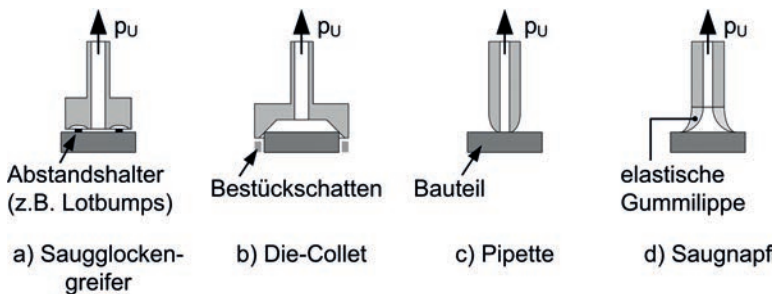


Abbildung 1.2: Unterschiedliche Ausführungen des Unterdruckgreifers (p_U : Unterdruck), nach HEINZ (2011).

Chip-and-Wire-Technik: Bei dieser Technik werden die Bauteile vom Wafer genommen und auf einen Träger gesetzt. Durch Kleben, Lötten oder Legieren werden die Bauteile fest mit dem Träger verbunden. Die elektrischen Verbindungen zwischen dem Bauteil und den Anschlusspads des Bauteilträgers werden bei der Chip-and-Wire-Technik sequenziell durch das Einzeldrahtverfahren (Drahtbonding) hergestellt (HILLERINGMANN 2008). Die verschiedenen Methoden des Einzeldrahtverfahrens unterscheiden sich in der Art der Energiezufuhr zur Herstellung der Verbindung. Während beim Thermokompressionsverfahren die Verbindung durch Wärme und Druck hergestellt wird, handelt es sich beim Ultraschallbonden um ein Reibschweißverfahren, bei dem die elektrische Kontaktierung durch Druck und Reibungswärme erzeugt wird (KIENINGER 2005). Das Thermosonicverfahren stellt eine Kombination aus dem Thermokompressions- und Ultraschallverfahren dar. Beispielfhaft für die Chip-and-Wire-Technik sei hier das Thermokompressionsverfahren in Abbildung 1.3 veranschaulicht. Zuerst wird der Bonddraht, ein Aluminium- oder Golddraht, am Ende der Keramik-Kapillare aufgeschmolzen und es bildet sich eine Kugel. Diese wird auf die zu kontaktierende Bauteilfläche gesetzt. Der Bauteilträger inklusive Bauteil wurde zuvor auf etwa 300°C erwärmt. Nach dem Aufsetzen der geschmolzenen Kugel

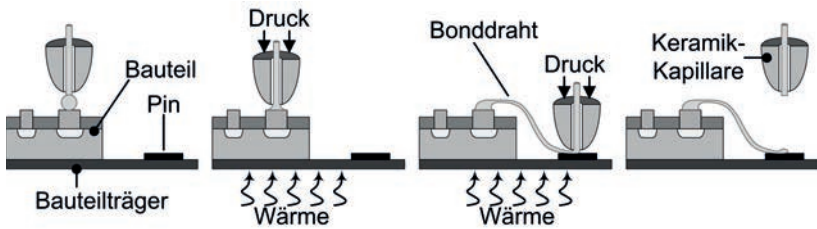


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung der Chip-and-Wire-Technik anhand des Thermokompressionsverfahrens.

auf die Anschlussfläche des Bauteils verformt sich diese zu einem Nagelkopf und haftet. Anschließend wird die Keramik-Kapillare in einer bogenförmigen Bewegung zum entsprechenden Kontakt (Pin) des Bauteilträgers geführt. An diesem erfolgt ebenfalls der zuvor beschriebene Schweißvorgang. Zum Schluss wird der übrige Bonddraht abgerissen.

Flip-Chip-Technik: Die derzeit höchstintegrierte Aufbautechnologie für Halbleiterkomponenten in der Mikroelektronik und der Mikrosystemtechnik ist die Flip-Chip-Technik (HÖHN 2001), deren Vorgang in Abbildung 1.4 schematisch dargestellt wird. Nach REICHL (1998) wurde diese Technik von der *Fa. IBM* unter dem Namen C4 (controlled collapse chip connection) eingeführt und in den vergangenen Jahren stets weiterentwickelt. Auf die daraus entstandenen unterschiedlichen Flip-Chip-Verfahren soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, da jedes Verfahren anwendungsspezifische Stärken besitzt und im Hinblick auf Handhabungstechnik keine Differenzierungsmerkmale aufweist. Im Grundprinzip sind die Verfahren identisch, die Bauteile werden mit der im Lithographieprozess strukturierten Seite zum Bauteilträger hin gedreht (*face-down bonding*) (JACOB 2002). Der elektrische Kontakt wird dabei durch Lotkugeln, den sogenannten Lotbumps oder Bumps, zwischen dem Bauteilträger und dem Bauteil realisiert. Diese $30\ \mu\text{m} - 80\ \mu\text{m}$ hohen Lotbumps werden in einem der Montage vorausgehenden Schritt auf der Waferoberseite oder auf dem Bauteilträger aufgebracht (HILLERINGMANN 2008). Nach der Bauteilvereinzelung vom Wafer nimmt ein Greifsystem das bereitgestellte Bauteil auf, dreht es um 180° und übergibt das Bauteil an eine zweite Handhabungseinrichtung. Diese setzt das Bauteil auf den Bauteilträger. Anschließend erfolgt im Durchlaufofen (Reflow-Ofen) die elektrische Kontaktierung durch Aufschmelzen der Lotbumps.

Neue Ansätze zur Bauteilhandhabung: Der Miniaturisierungstrend geht allerdings mit einer stetigen Verkleinerung der geometrischen Bauteilabmessungen

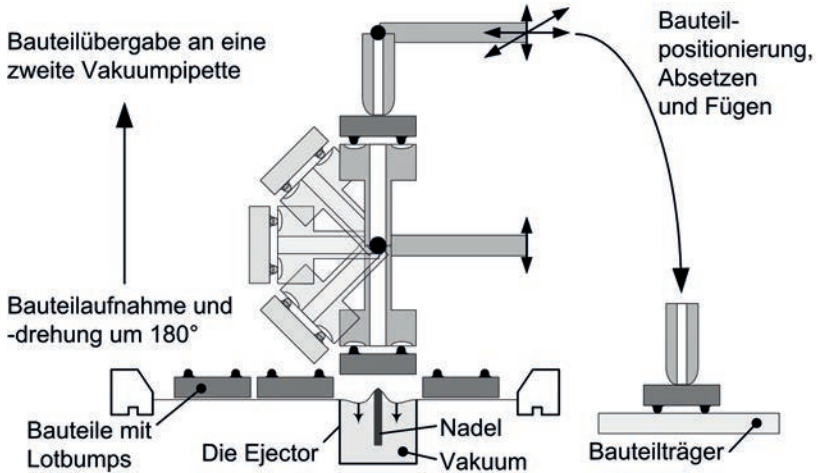


Abbildung 1.4: Schematische Darstellung der Flip-Chip-Technik

gen einher. Gerade dünne Bauteile von weniger als $75 \mu\text{m}$ Dicke neigen bei der taktilen Handhabung zum durchbrechen (FRANZKOWIAK ET AL. 2005B). Weiterhin kann die Funktion oberflächenstrukturierter Bauteile, wie Oberflächenwellenfilter, durch eine Berührung beeinträchtigt werden. Nach ABELE & REINHART (2011) führt der Miniaturisierungstrend daher zur Notwendigkeit neuer Greifsysteme, um die Montage auch weiterhin prozesssicher und mit höchster Genauigkeit zu ermöglichen. Denn unabhängig von der verwendeten Kontaktierungstechnik (Flip-Chip- oder Chip-and-Wire-Technik) ist jedes Bauteil aus dem Waferverbund aufzunehmen und an einen Zielort zu fügen. Die Handhabungstechnik ist dabei das kritische Element in der Montage.

Aufgrund der zunehmenden Bauteilempfindlichkeit werden auf dem Gebiet der Produktionstechnik seit gut zehn Jahren unterschiedliche Ansätze für eine schonendere Handhabung erforscht. Dabei werden verschiedene physikalische Prinzipien zur nichttaktilen Kraftübertragung betrachtet und in Laboraufbauten realisiert. Als besonders viel versprechende Technologie wird die berührungslose Handhabung mittels Ultraschall (FRANZKOWIAK ET AL. 2005B; BAUR ET AL. 2007; SCHILP 2007; REINHART ET AL. 2008; HEINZ 2011) angesehen. Bei dieser Technologie wird im Nahfeld vor einer im Ultraschallbereich schwingenden Fläche ein Luftkissen erzeugt, auf dem ein flächiges Bauteil schweben kann. Der Ultraschall wirkt als abstoßende Kraft auf das Bauteil. Wird die schwingende Fläche im Weiteren mit Unterdruckdüsen versehen, kann zusätzlich eine anziehende Unterdruckkraft auf das Bauteil aufgetragen werden. Durch die Kombination der abstoßenden Ultraschallkraft und der anziehenden Unterdruckkraft wird

ein berührungsloses Greifen des Bauteils ermöglicht. Die Vorteile der ultraschallbasierten Handhabungstechnik liegen nach SCHILP (2007) in der schonenden Bauteilmanipulation und der Vermeidung eines Bestückschattens. Bislang wird diese Handhabungstechnik aber noch nicht in der automatisierten Montage von monolithischen Bauteilen eingesetzt und ist lediglich im Forschungsbereich zu finden.

1.2.3 Automatisierte Montagesysteme

Da im Gegensatz zur parallelisierten Fertigung der Bauteile im Lithographieprozess deren Montage immer sequenziell erfolgen muss (ANSEL ET AL. 2002), ist die automatisierte Mikromontage ein entscheidender Faktor für die breite technische Nutzung und kostengünstige Herstellung von Mikrosystemen (TUMMALA 2001). Besonders unter dem Gesichtspunkt, dass die erforderlichen Montageprozesse einen hohen Prozentsatz der gesamten Produktionskosten verursachen (DILTHEY & BRANDENBURG 2005), ist ein effizienter Montageablauf mit geringen Taktzeiten (STANZL 2008) unumgänglich. Die hierfür eingesetzten Anlagen sind sogenannte Pick-and-Place Automaten oder Bestückautomaten (HÖHN 2001), in denen die zuvor beschriebenen unterschiedlichen Montagetechniken realisiert sind. Hochleistungsbestückautomaten der *Fa. Siemens AG* erreichen eine Bestückleistung von über 100.000 Bauteilen in der Stunde (OSWALD 2007).

Den Kern dieser vollautomatisierten Systeme bildet dabei beispielsweise ein Portalroboter mit vier Freiheitsgraden zur räumlichen Positionierung und zur Ausrichtung der Bauteile in der Ebene. Im Arbeitsraum des Roboters sind neben der Zuführ- und Vereinzelnungseinheit auch die Bauteilträger, auf denen die Bauteile montiert werden, untergebracht. Zur Erhöhung der Positioniergenauigkeit werden Pick-and-Place Automaten mit zusätzlichen Positionserkennungssensoren sowie einer digitalen Bildverarbeitung ergänzt. Durch die Verwendung zweier Kamerasysteme ist die lagegenaue Erkennung der Bauteile, der Bauteilträger und des Handhabungswerkzeuges möglich. Etwaige Lagetoleranzen werden damit erkannt und kompensiert. Die *Fa. Siemens AG* erreicht bei ihren Bestückautomaten eine Genauigkeit der platzierten Bauteile von $55 \mu\text{m}$ bei 3σ (STANZL 2008). Der Prozessablauf eines Bestückautomaten mit der Anwendung zweier Kamerasysteme wird schematisch durch die Abbildung 1.5 wiedergegeben.

Im ersten Schritt wird eine grobe Bauteilpose mittels der am Portalroboter befindlichen Kamera genau vermessen. Dieser Schritt entfällt, wenn die Bauteilposition bekannt ist und kleinere Aufnahmetoleranzen akzeptiert werden. Im zweiten Schritt wird das Bauteil durch das Greifsystem, beispielsweise einen Saugglockengreifer, aufgenommen. Hierbei ist neben den Ebenenkoordinaten x und y zusätzlich noch die Höhenposition z des Bauteils zu bestimmen. Diese

1.2 Herstellung monolithischer Mikrosysteme

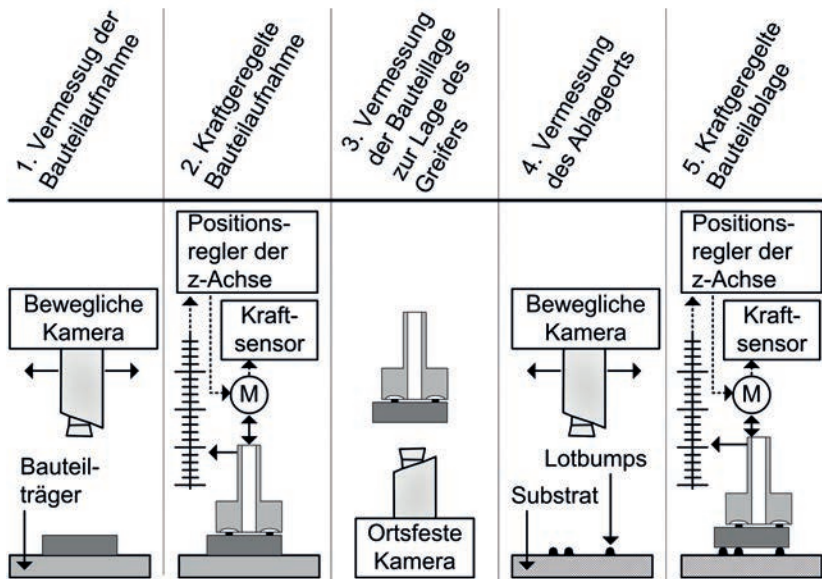


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung der Prozessschritte eines Bestückautomaten mit zwei Kamerasystemen zur Optimierung der Platziergenauigkeit.

variiert im gesamten Arbeitsraum aufgrund unterschiedlicher Höhenniveaus, verschiedener Bauteil- und Bauteilträgerdicken und abwechselnder geometrischer Längen des Greifsystems. Zur Detektion der tatsächlichen Höhenposition wird ein integriertes, direktes Wegmesssystem verwendet. Die Zielposition des Greifers wird stets so gewählt, dass die Achsbewegung zu einer Kollision führt. Sobald der Greifer die Oberfläche berührt, steigt der Motorstrom, der eine direkte Proportionalität zur Anpresskraft des Greifers aufweist, an (vgl. Abbildung 1.5 Positionsregler der z-Achse). Überschreitet der gemessene Motorstrom einen prozessabhängigen Schwellwert, wird die Bewegung der Greiferachse, unabhängig von der angesteuerten Zielposition, gestoppt. Über das direkte Wegmesssystem an der Greiferachse ist die tatsächliche Höhenposition bekannt. Anschließend an den Höhenpositionierungsvorgang erfolgt die Aktivierung des Unterdrucks und das Bauteil ist gegriffen. Im dritten Schritt wird die Orientierung und Position des gegriffenen Bauteils am Greifer mit Hilfe einer ortsfesten Kamera ermittelt. Eventuelle Abweichungen zwischen der Greifer- und Bauteillage werden bei der Bauteilablage zur Erhöhung der Bestückgenauigkeit berücksichtigt. Die entstehenden Abweichungen sind das Resultat der summierten Ungenauigkeiten bestehend aus dem Versatz des Greifers zum Bauteilmittelpunkt bei dessen Aufnahme und der Kalibrierung der Anlage. Im vierten Schritt wird die

Ablageposition vermessen. Hierzu wird die Lage des Koordinatenursprungs des Bauteilträgers über drei auf dem Träger befindliche Vermessungsmarken im Arbeitsraum bestimmt. Aus diesen Informationen werden die Maschinenkoordinaten jeder Ablageposition und -orientierung aller Bauteile berechnet. Dieser Schritt ist nur zum Bestückanfang jedes neuen Bauteilträgers erforderlich. Im letzten Schritt erfolgt die lagekorrigierte Bauteilablage ebenfalls über die kraftgeregelte Achsenbewegung des Greifers, über die zusätzlich eine definierte Fügekraft aufgebracht wird.

1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Der vorangegangene Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über die Herstellung monolithischer Bauteile von der Fertigung bis hin zur automatisierten Montage. Daraus werden die folgenden technologischen Trends abgeleitet:

1. Auch zukünftig werden die Märkte für Produkte der Mikrosystemtechnik und der Mikroelektronik weiter wachsen und tragen somit zur Stärkung der Wirtschaft bei.
2. Diese Entwicklung wird vor allem durch die Miniaturisierung forciert, die auch den Kundenwünschen nach höherer Funktionsdichte und geringerem Leistungsverbrauch entgegenkommt.
3. Infolge der kontinuierlichen Bauteilverkleinerung steigen aber gleichzeitig die Anforderungen an das Handhabungssystem, um weiterhin eine beschädigungsfreie Montage mit geringen Ausschußraten zu gewährleisten.

Bestehende Lösungsansätze können die Anforderungen nach einer beschädigungsfreien Handhabung aber nur bedingt erfüllen (HEINZ 2011). Für sensible, oberflächenstrukturierte Bauteile können der Die-Collet, der Saugglockengreifer oder der Saugnapf verwendet werden, allerdings mit unterschiedlichen Nachteilen. Im Falle des Saugnapfes führt die elastische Gummilippe zu einer ungenauen Bauteilpositionierung (BÜTTGENBACH & HOXHOLD 2008). Der Einsatz eines Saugglockengreifers erfordert eine gleichmäßige Verteilung von Abstandshaltern auf der Bauteiloberfläche. Eine einseitige Anordnung der Abstandshalter führt zu einem Kippen des Bauteils. Das Bauprinzip des Die-Collet bedingt einen Bestückschatten, der sowohl auf dem Wafer als auch auf der Montagefläche eine bestimmte Fläche unbenutzbar macht (SCHILP 2007). Eine generelle Bauteilbeschädigung durch die taktile Handhabung besonders im Hinblick auf die Bauteildurchbiegung kann nicht ausgeschlossen werden.

Insofern ergeben sich zwei grundsätzliche Problemstellungen bei der Anwendung konventioneller Handhabungstechniken:

1. das Risiko der Bauteilbeschädigung und

2. die Inkaufnahme eines Bestückschattens bei der Verwendung des Die-Collet.

Die Lösung liegt in der Verwendung einer neuen Handhabungstechnologie, die sowohl eine schonende Montage mikroelektronischer und monolithischer Bauteile ermöglicht als auch einen Bestückschatten vermeidet. Die schonende Handhabung dient zur Verringerung der Ausschussraten empfindlicher Bauteile im Vergleich zur taktilen Handhabung. Eine Vermeidung des Bestückschattens erhöht die Flächenausnutzung des Wafers und des Bauteilträgers und verringert damit die Produktionskosten. Als besonders viel versprechende Technologie wird die berührungslose Handhabung mittels Ultraschall (FRANZKOWIAK ET AL. 2005B; BAUR ET AL. 2007; SCHILP 2007; REINHART ET AL. 2008; HEINZ 2011) erforscht, die den beiden genannten Anforderungen gerecht wird. Folglich wird die Anwendung der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie im Montageprozess monolithischer Mikrosysteme in einem automatisierten Montagesystem angestrebt. Aus diesem Grund werden die Ziele der vorliegenden Arbeit wie folgt definiert:

Zielsetzung

- *Erstellung einer Gestaltungssystematik zur effizienten Auslegung des ultraschallbasierten Handhabungssystems für unterschiedliche Bauteile.*
- *Integration der Handhabungstechnologie mittels Ultraschall in die bestehende Anlagentechnik.*
- *Inbetriebnahme, Kalibrierung und Parametrisierung des automatisierten Montagesystems mit ultraschallbasierter Handhabungstechnik.*
- *Adaption der bestehenden Kontaktierungstechnik zur Durchführung einer schonenden Montage sensibler Bauteile.*

Dabei werden nur die Aspekte der Montage betrachtet, die durch die Einführung der neuen Handhabungstechnologie beeinflusst werden. Dies betrifft vor allem den Handhabungs- und den Fügeprozess. Alle weiteren Tätigkeiten der Montage werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

Um das gestellte Ziel zu erreichen, werden in **Kapitel 2**, Stand der Forschung und Technik, zu Beginn unterschiedliche Handhabungstechnologien betrachtet, die ebenfalls die Anforderung einer schonenden Bauteilmanipulation erfüllen. Anhand verschiedener Kriterien erfolgt eine Gegenüberstellung dieser Handhabungstechnologien und daraus die Erläuterung der Vorteile der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall. Diese Technologie wird anschließend näher betrachtet und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im automatisierten Montage-

1 Einleitung

prozess monolithischer und mikroelektronischer Bauteile diskutiert und der Handlungsbedarf abgeleitet.

In **Kapitel 3** wird eine Methode zur schrittweisen Anwendung der Technologie im Montageprozess und in einer automatisierten Montageanlage vorgestellt.

In **Kapitel 4** werden die Voraussetzungen für eine reproduzierbare Bauteilmannipulation erarbeitet. Hierzu wird zuerst in umfangreichen experimentellen Versuchen das grundsätzliche Systemverhalten untersucht. Anschließend wird aus diesen Erkenntnissen ein Prozessmodell erstellt. Dieses bildet die Grundlage für die spätere Regelung der Handhabungsparameter.

In **Kapitel 5** wird der Fokus auf die Integration der neuen Handhabungstechnologie in den automatisierten Montageprozess gelegt. Die sich daraus ergebenden Anpassungsmaßnahmen bilden die Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Handhabungstechnologie im industriellen Umfeld.

In **Kapitel 6** werden die erarbeiteten Ergebnisse anhand einer beispielhaften Umsetzung demonstriert. Basierend auf dem dargestellten Anwendungsfall wird der Einsatz der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie im Montageprozess monolithischer Bauteile technisch und wirtschaftlich bewertet.

Kapitel 7 fasst abschließend die erreichten Ergebnisse zusammen und diskutiert die Ansatzpunkte weiterer Arbeiten.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Überblick

Zur Erläuterung der definierten Zielsetzung werden im ersten Teil des folgenden Kapitels verschiedene, bauteilschonende Handhabungsprinzipien verglichen. Eine anschließende Bewertung der aufgeführten Handhabungstechnologien verdeutlicht die Anwendungspotentiale der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess monolithischer Bauteile.

Im zweiten Teil des Standes der Forschung und Technik wird die ultraschallbasierte Handhabungstechnik näher betrachtet. Dazu werden die physikalischen Grundlagen der Ultraschalllevitation beschrieben und die aktuellen produktionstechnischen Anwendungsfelder aufgezeigt. Darauf aufbauend wird die Auslegung ultraschallbasierter Manipulationssysteme für die Handhabung sowohl von großen Bauteilen, wie Wafer, als auch von kleinen Bauteilen, wie integrierte Schaltkreise, erläutert. Abschließend werden die derzeitigen Defizite bezüglich der Anwendung der Handhabungstechnologie im automatisierten Montageprozess aufgezeigt und daraus der Handlungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet.

2.2 Vergleich bauteilschonender Handhabungsprinzipien

2.2.1 Adhäsive Handhabungssysteme

Als Adhäsion wird allgemein die molekulare Wechselwirkung in der Grenzflächenschicht zwischen zwei Körpern verstanden. Diese können aus dem gleichen Material oder auch aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehen. Die auftretende Wechselwirkung äußert sich in Form einer Kraft, die an den Grenzflächen der beteiligten Körper auftritt (BISCHOF & POSSART 1982). In der Regel sind hierfür mehrere Ursachen gleichzeitig verantwortlich, die nach GLEICH (2004) nur zum Teil durch die Adhäsionstheorien erklärt werden können. Für die Handhabungstechnik miniaturisierter Bauteile ist in den meisten Fällen der adhäsive Effekt unerwünscht. Dies liegt darin begründet, dass die Gewichtskraft des Bauteils ab einer bestimmten Objektgröße nicht mehr ausreicht, um die Adhäsionskräfte zwischen Greifer und Objekt zu überwinden. Folglich bleibt das gefasste Objekt auch ohne Greifkraft am Greifer haften (PETERSEN 2003). Durch die kontrollierte

2 Stand der Forschung und Technik

Aufhebung der Adhäsionskräfte ist es aber möglich, den Effekt als Greifprinzip einzusetzen. Ein Adhäsionsgreifer ist wie folgt aufgebaut.

An der Spitze des Greifers befindet sich ein Flüssigkeitstropfen mit hoher Viskosität, der die adhäsiven Kräfte zwischen dem Bauteil und dem Greifer begünstigt. Die adhäsiven Kräfte übersteigen dabei die Gewichtskraft des Bauteils. Das Ablegen des Bauteils erfolgt durch eine Reduzierung der Viskosität infolge einer Temperaturerhöhung (HENSCHKE 1994). Für eine detailliertere Beschreibung adhäsiver Greiftechniken sei auf die Fachliteratur verwiesen (GRUTZECK 2000).

2.2.2 Magnetische Handhabungssysteme

Bei dieser Technik werden Magnetfelder eingesetzt, um in der Regel ferromagnetische Körper in der Schwebelage zu halten. Die bekannteste Anwendung der magnetischen Levitation ist die Magnetschwebbahn; der Transrapid. Aber der Magnetismus wird nicht nur zur Fortbewegung verwendet, sondern auch zur berührungslosen Lagerung von Antrieben (SCHWEITZER ET AL. 1993; LANG 2004). Neben ferromagnetischen Materialien lassen sich auch diamagnetische Materialien, Stoffe die keine permanenten magnetischen Dipole besitzen, zum Schweben bringen. Das Anlegen eines äußeren magnetischen Wechselfeldes induziert im diamagnetischen Material Dipole, deren eigenes magnetisches Feld entsprechend der Lenzschen Regel dem Erzeugerfeld entgegen gerichtet ist (SCHARLAU ET AL. 2003; PELRINE 2005) und damit eine abstoßende Kraft hervorruft.

Die Anwendbarkeit magnetischer Systeme zur Handhabung miniaturisierter Bauteile ist zwar möglich, aber infolge der magnetischen Wechselfelder werden die Bauteile hohen Belastungen ausgesetzt (JIN ET AL. 1995). Der produktionstechnische Einsatz dieser Technologie als Handhabungsprinzip kleiner Bauteile ist bislang noch nicht bekannt.

2.2.3 Elektrostatische Handhabungssysteme

Eine berührungslose Kraftübertragung ermöglicht auch die Elektrostatik. Die elektrischen Feldkräfte lassen sich grundsätzlich auf elektrisch leitende und nichtleitende Materialien übertragen. Voraussetzung dieser Technologie ist die Reaktion des Bauteils auf elektrostatische Ladung (OH 1998). Die Grundidee dabei ist die Ausnutzung der elektrischen Anziehungskraft unterschiedlich geladener Körper. Die Greiffläche des Endeffektors und des Bauteils entsprechen dem Aufbau eines Plattenkondensators. Durch die Anwendung einer konzentrischen Ringelektrode gelang es WREGG (2007), Mikrobauteile unter einem Greifer zentriert zu lagern und diese durch die Anwendung eines aktiven Lade-

2.2 Vergleich bauteilschonender Handhabungsprinzipien

und Entladesystems auch kontrolliert abzulegen. Elektrostatische Greifsysteme sind zum Patent angemeldet (PATENTANMELDUNG EP 1387392 A2). Ähnlich der adhäsiven Handhabung kann auch bei der elektrostatischen Handhabung nicht von einer völligen Kontaktfreiheit zwischen Greifwerkzeug und Bauteil ausgegangen werden. Aufgrund der geringen elektrostatischen Kräfte und deren starker Abnahme bedingt durch den Bauteilabstand zum Greifer besitzen die gegriffenen Bauteile einen mechanischen Kontakt zum Greifwerkzeug.

2.2.4 Handhabung mittels Luftkissen

Ein tragendes Luftpolster kann sowohl mit Hilfe von aerostatischen als auch aerodynamischen Effekten erzeugt werden. Während sich die Aerostatik mit strömungsfreien Gasen und deren Einfluss auf umliegende Körper befasst, wird in der Aerodynamik das Verhalten von Körpern in kompressiblen Fluiden betrachtet. Durch einen statischen und/oder dynamischen Gasdruck werden Kräfte auf einen Körper übertragen. Die daraus entstehenden Luftkissen werden schon seit längerem zur Lagerung von Hochpräzisionsführungen in Produktionsmaschinen eingesetzt (SCHROTER 1995; TÖNSHOFF & KOPP 2001). Mit Hilfe von zahlreichen Bohrungen in einer Platte mit angelegtem Überdruck können flache Bauteile angehoben werden. Auch ein poröser Boden, durch den Luft strömt, kann hierfür eingesetzt werden (SCHILP 2007). Das Greifen eines Bauteils von oben ist allerdings erst durch die Kombination anziehender und abstoßender Druckkräfte möglich. Dieses Prinzip ermöglicht einen stabilen Schwebezustand des flachen Bauteils und gewährleistet eine schonende Handhabung empfindlicher und formlabiler Bauteile (PATENTANMELDUNG DE 19806306 A1). Allerdings sind für die Handhabung seitliche mechanische Anschläge vorzusehen, um ein Abgleiten des Bauteils zu verhindern. HEINZL ET AL. (2004) übertragen das Prinzip auf die Handhabung von kleinen Bauteilen durch den prototypischen Aufbau eines miniaturisierten Luftkissengreifers. Besonders hervorzuheben ist hierbei die auftretende Selbstzentrierung des Bauteils, wenn die Greiffläche kongruent zur Bauteilfläche gestaltet ist und wenn sich die Unterdruckdüsen am Rand befinden.

2.2.5 Handhabung durch den Bernoulli-Effekt

Der Bernoulli-Effekt ist auch bekannt als das hydrodynamische Paradoxon. Dieses beschreibt die Abnahme des statischen Drucks in einer Rohrströmung nach einer Rohrverengung infolge der Geschwindigkeitssteigerung. Übertragen auf die Handhabung flacher Bauteile kann dieser Effekt zu deren Anhebung verwendet werden.

2 Stand der Forschung und Technik

In einer Greiffläche befinden sich eine oder mehrere Bohrungen. Durch jede Bohrung wird das flache Bauteil von einem Druckluftstrahl getroffen. Aufgrund des geringeren Umgebungsdrucks breitet sich die entstehende Luftströmung radial vom Treffpunkt auf dem Bauteil aus. Anders als vermutet wird das Bauteil nicht weggedrückt, denn durch die erhöhte Fluidgeschwindigkeit verringert sich der statische Druck und das Bauteil wird angezogen (DINI ET AL. 2009). Durch das Gleichgewicht anziehender und abstoßender Druckkräfte bleibt der Spalt zwischen Greifer und Bauteil bestehen. Anwendung findet dieses Handhabungsprinzip in der Herstellung von Flatpanels, Wafern oder Glasscheiben (BINDER 2004).

2.2.6 Ultraschallbasierte Handhabungssysteme

Die Möglichkeit mit Ultraschall Objekte berührungslos zu handhaben ist eine relativ junge Technologie. Dabei wird über die Bewegung einer Platte im Ultraschallbereich ein Luftpolster erzeugt, auf dem flächige Bauteile schweben können. Das Prinzip funktioniert unabhängig von der geometrischen Form und Abmessung des Bauteils und ist auch nicht an ein bestimmtes Material gebunden (REINHART ET AL. 2004). Da keine Prozessgase eingesetzt werden, ist das Handhabungsprinzip auch in einer Reinraumatmosphäre anwendbar (ZIMMERMANN ET AL. 2008). Weiterhin kann die schallabstrahlende Fläche mit kleinen Unterdruckdüsen versehen werden. Ähnlich dem Luftkissengreifer (vgl. Unterabschnitt 2.2.4) ermöglicht auch ein Ultraschallvakuumgreifer das berührungslose Greifen der Bauteile von oben durch eine Kombination aus anziehendem Unterdruck und abstoßendem Ultraschall.

2.2.7 Bewertung der aufgeführten Handhabungsprinzipien

Bevor eine Bewertung der Handhabungstechnologien durchgeführt werden kann, gilt es zuerst die Bewertungskriterien für die Technologieauswahl zu definieren. Die folgenden Kriterien lehnen sich an die Arbeit von SCHILP (2007) an, allerdings mit dem Unterschied, dass in der vorliegenden Dissertation der automatisierte Montageprozess betrachtet wird:

- Schonende Bauteilhandhabung:
Ausgangspunkt für die Zielsetzung dieser Arbeit ist die schonende Handhabung empfindlicher Bauteile zur beschädigungsfreien Montage. Als besonders schonend wird die berührungslose Handhabung angesehen, die HÖPPNER (2002) in Anlehnung an die VDI-RICHTLINIE 2860 wie folgt definierte:

2.2 Vergleich bauteilschonender Handhabungsprinzipien

Definition (*berührungslöse Handhabung*)

Unter berührungslöser Handhabung versteht man das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem, wobei die hierfür nötigen Kräfte und/oder Momente ohne mechanischen Kontakt übertragen werden.

- **Vermeidung eines Bestückschattens:**
Als Bestückschatten wird die Fläche bezeichnet, die das Greifwerkzeug bei der Handhabung eines Bauteils zusätzlich zur Bauteilfläche einnimmt. Diese Fläche muss sowohl auf dem Wafer bei der Bauteilaufnahme als auch auf dem Ablageort berücksichtigt werden, damit keine benachbarten Bauteile durch den Endeffektor beschädigt werden. Die Vermeidung eines Bestückschattens erhöht die Flächennutzung.
- **Materialunabhängigkeit:**
Für den industriellen Einsatz einer neuen Technologie ist dessen Flexibilität ein maßgeblicher Entscheidungsfaktor (KRÖLL 2007). Die alternative Handhabungstechnik darf daher nicht an bestimmte Bauteilmaterialien gebunden sein.
- **Verschmutzung:**
Die Herstellungsbedingungen monolithischer Bauteile erfordern meistens eine Reinraumatmosfera, um eine Beschädigung des Wafers und der Bauteile durch Partikel in der Luft zu vermeiden. Das Greifwerkzeug darf daher nicht zu einer Verschmutzung der Produktionsatmosfera beitragen.

Anhand der genannten Anforderungen werden die Prinzipien der elektrostatischen und adhäsiven Handhabung bereits ausgeschlossen. In beiden Verfahren erfolgt die Kraftübertragung zwar im Sinne der Definition der berührungslösen Handhabung nach HÖPPNER (2002) ohne mechanischen Kontakt durch elektrostatische Felder bzw. durch innermolekulare Vorgänge, aber eine vollkommene Kontaktfreiheit zum Bauteil ist nicht gegeben. Weiterhin können beim elektrostatischen Greifer die hohen Potentialdifferenzen Schaltkreise und Bauteilstrukturen zerstören (SCHILP 2007) und durch die Verwendung unterschiedlicher Flüssigkeitstropfen bei einem adhäsiven Greifsystem kann eine Verschmutzung der Reinraumatmosfera entstehen. Magnetische Greifsysteme finden ebenfalls keine Anwendung, da nur bestimmte Materialien über das magnetische Feld zu manipulieren sind. Auch die Umsetzung des Bernoulli-Effektes zur Handhabung kleiner Bauteile ist nach HEINZ (2011) nur schlecht möglich. Hierfür wären sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten notwendig (GRUTZECK 2000), die mit der Verwendung kleinerer Bohrungen in der Greiffläche im Widerspruch stehen. Weiterhin führen hohe Strömungsgeschwindigkeiten zu einem erheblichen Beschädigungsrisiko (NIENHAUS 1999). Bleiben nur noch der Luftkissen- und

Ultraschallvakuumgreifer, beide in Kombination mit anziehenden Unterdruckkräften. Nach SCHILP (2007) ist jedoch der Ultraschallvakuumgreifer besser zur Handhabung von Bauteilen der Mikrosystemtechnik geeignet als der Luftkissengreifer, da durch den erzeugten Luftüberdruck eine Kontamination der Reinraumatmosfera entsteht. Auch REINHART ET AL. (2008) sagen dieser Technologie das größere Anwendungspotential vorher. Dementsprechend wird als schonendes Handhabungsverfahren für die automatisierte Montage von monolithischen Bauteilen in dieser Arbeit das Prinzip des Ultraschallvakuumgreifers eingesetzt.

2.3 Überblick zur berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall

2.3.1 Physikalische Grundlagen der Ultraschalllevitation

Im Vergleich zu den im vorhergehenden Abschnitt erwähnten Prinzipien, Kräfte auf ein Objekt berührungslos wirken zu lassen, ist die Ultraschallhandhabung eine relativ neue Technologie, die erstmals 1975 erwähnt wurde (WHYMARK 1975). Verantwortlich für das Zustandekommen der Ultraschalllevitation sind zwei unterschiedliche Effekte, die Stehwellenlevitation und die Nahfeld- bzw. die Schmierfilmlevitation.

Der erstgenannte Effekt ist seit den 70er Jahren bekannt und wurde im Rahmen der Mikrogravitationsforschung der Weltraumorganisationen NASA und ESA erforscht. Dabei wurde ein Verfahren gesucht, mit dem kleine Objekte unter bestimmten Bedingungen untersucht werden können, ohne dass sie durch ein umgebendes Behältnis beeinflusst werden. In diesem Zusammenhang wurde ein Verfahren etabliert, das unter dem Namen *Containerless Processing* bekannt ist (WHYMARK 1975). Dabei werden über ein Ultraschallsystem Luftschwingungen erzeugt, die an einer dem Ultraschallsystem gegenüberliegenden Fläche reflektiert werden. Beträgt der Abstand zwischen dem Ultraschallsystem und dem Reflektor ein ganzes Vielfaches der halben Wellenlänge, entsteht ein konstruktives Interferenzmuster der Schallwellen. Die abgestrahlte Welle und die reflektierte Welle bilden zusammen eine stehende Welle mit örtlichen Druckmaxima. In den Druckknotenpunkten der stehenden Welle können kleine Objekte durch den axialen Schallstrahlungsdruck auf der Ober- und -unterseite gehalten werden. Ein radiales Kräftegleichgewicht entsteht durch Unterdruckkräfte, die orthogonal zur Schallfeldachse auf das Objekt wirken. Die Ursache hierfür wird dem Bernulli-Effekt zugeschrieben (SPRYNCHAK 2003). Damit ist es möglich, kleine Proben ohne Wandkontakt in einem Ofen zu prozessieren, Stoffeigenschaften kontaktfrei zu messen und Kristallzüchtungen aus verdampften Lösungstropfen zu kontrollieren. Weiterhin wird die Technologie der stehenden Welle für die Untersuchung von flüssigkeitsdynamischen Effekten (LIERKE

2.3 Überblick zur berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall

1996), wie die Tropfenschwingungen, die Grenzflächeneffekte und die Stoffaustauschvorhersage, eingesetzt. In der experimentellen Physik und Chemie findet die Stehwellenlevitation noch heute ihre Anwendung (RUNAR 1999; WEINBERG ET AL. 2000; RENSINK 2004).

Durch die stehende Welle wirkt auch ein Schalldruck auf den Reflektor. Eine kontinuierliche Verkleinerung des Abstandes zwischen dem Reflektor und der Schallquelle äußert sich durch steigende Kraftspitzen bei Abstandswerten, die einem Vielfachen der halben Wellenlänge entsprechen (HÖPPNER 2002). Bei genügend großer Schallleistung und ausreichend großer Fläche kann der Reflektor durch ein flaches Bauteil ersetzt werden (SCHILP 2007). Das zu handhabende Bauteil ist damit gleichzeitig der Reflektor für die stehende Schallwelle. Besonders interessant ist, dass die messbare Kraft auf den Reflektor unterhalb einer halben Wellenlänge mit kleiner werdendem Abstand exponentiell ansteigt. Die theoretischen Modelle zur Erklärung dieser Schallkraft werden noch sehr kontrovers in der Forschergemeinschaft diskutiert. Zur Erklärung des Phänomens werden sowohl Ansätze aus der linearen Akustik (HASHIMOTO ET AL. 1995) als auch der Schmierfilmtheorie (WIESENDANGER 2001; HÖPPNER 2002; MINIKES & BUCHER 2003; HEINZ 2011) verwendet. Infolge dieser verschiedenen Herangehensweisen entstanden auch unterschiedliche Namensgebungen für dasselbe Phänomen; die Nahfeldlevitation (engl. Near-Field-Levitation) und die Schmierfilmlevitation (engl. Squeeze-Film-Levitation).

Die folgende vereinfachte Erklärung der Schmierfilmlevitation orientiert sich an der Arbeit von HÖPPNER (2002) und verwendet zur bildlichen Veranschaulichung eine adiabate Zustandsänderung gemäß der Abbildung 2.1. Zur besseren Illustration der Vorgänge wird das pV -Diagramm auf der rechten Seite von Abbildung 2.1 um 90° im Uhrzeigersinn gedreht. Auf der linken Seite ist eine Greiferspitze eines Ultraschallvakuumgreifers dargestellt. Diese vollzieht eine zyklische Auf- und Abwärtsbewegung ähnlich einer Kolbenschwungung mit der Amplitude ξ . Zur Erklärung des Levitationseffektes wird angenommen, dass das Bauteil bereits mit einem mittleren Abstand h_0 über der Greiferspitze schwebt. Aufgrund der hochfrequenten Bewegungen der Greiferspitze wird das Luftvolumen zwischen der Greiffläche und dem Bauteil stetig komprimiert bzw. expandiert. Da die Geometrie des Bauteils dabei unverändert bleibt, hängt die Volumenänderung nur von der Ultraschallamplitude ξ ab. Die durch die Volumenänderung bedingte Druckänderung führt in Abhängigkeit von der Bauteilfläche zu einem zyklisch anziehenden und abstoßenden Druck p_{US} auf das Bauteil. Gemäß der adiabaten Zustandsänderung (Abbildung 2.1, $p \cdot V^\kappa = \text{const.}$) verhält sich der erzeugte Druck p_{US} nichtlinear zur Volumenänderung. Im zeitlichen Mittel entsteht daher ein konstanter Überdruck $\overline{p_{US}}$ auf das Bauteil, der in Abhängigkeit von der Bauteilfläche in einer abstoßenden Kraft, der Ultraschallkraft F_{US} , resultiert. Bei einer Schallfrequenz von etwa 30 kHz nimmt das Bauteil aufgrund dessen Trägheit nur noch den statischen Druck $\overline{p_{US}}$ wahr und

2 Stand der Forschung und Technik

schwebt stabil in einem definierten Abstand h_0 . Dieser Wert wird hauptsächlich durch das Bauteilgewicht und die erzeugte schallabstrahlende Kraft sowie die Greif- und Bauteilfläche bestimmt.

In der Literatur wird die Ultraschallkraft F_{US} teilweise unter Zurhilfenahme der linearen Akustik beschrieben (HASHIMOTO ET AL. 1995; MATSUO ET AL. 2000; UEHA ET AL. 2000; NOMURA 2002). Die verwendeten Ansätze können jedoch die schallabstrahlende Kraft nicht gänzlich erklären. Aus diesem Grund wird in der wissenschaftlichen Gemeinschaft der tragende Luftfilm zusätzlich als Spaltströmung betrachtet. Die abstoßende Kraft wird dabei numerisch auf Basis der Schmierfilmtheorie modelliert (REINHART & HÖPPNER 2000; WIESEN-DANGER 2001; HÖPPNER 2002; MINIKES & BUCHER 2003; HEINZ 2011). Die hierfür herangezogene partielle Differenzialgleichung von Osborne Reynolds (REYNOLDS 1886) führt allerdings zu einer erheblichen Abweichung zwischen der numerisch ermittelten und der messtechnisch erfassten Ultraschallkraft (HEINZ 2011). Aus diesem Grund beschreibt HEINZ (2011) den Effekt mit Hilfe vereinfachter Navier-Stokes-Gleichungen. Dadurch wird die genannte Abweichung zwar prinzipiell reduziert, aber vor allem bei kleinen schallabstrahlenden Flächen bestehen noch Diskrepanzen zur realen Messung.

2.3.2 Produktionstechnische Anwendungsfelder

Berührungslos arbeitende Handhabungssysteme auf Basis des Ultraschalls werden in der Verfahrens- und Produktionstechnik eingesetzt. In der Verfahrenstechnik werden, wie bereits beschrieben, mit Hilfe der Stehwellenlevitation kleine Proben eines Materials oder einer Flüssigkeit in Schwebelage gehalten, um chemische Reaktionen mit anderen Stoffen zu untersuchen (LIERKE 1996). Die produktionstechnische Anwendbarkeit eines Handhabungssystems auf Basis der Stehwellenlevitation ist in verschiedenen Arbeiten dargestellt (HÖPPNER 1999) und die dabei entwickelten Versuchsaufbauten sind konzeptionell zum Patent angemeldet (PATENTSCHRIFT DE 19916872 C1; PATENTANMELDUNG WO 00/61473 A1). Bislang wird dieses Handhabungsprinzip jedoch nicht eingesetzt. REINHART & HÖPPNER (2000) sehen den Grund hierfür in den Grenzen bezüglich Bauteilgröße und -gewicht.

Anstatt kleine Bauteile in den Druckknoten einer stehenden Welle gefangen zu halten, ist es sinnvoller die auf den Reflektor wirkenden Kräfte oder die Kraftwirkung der Squeeze-Film-Levitation zu nutzen. HASHIMOTO ET AL. (1998) erkannten als erste die Potentiale der Nahfeldlevitation für die produktionstechnische Anwendung und nutzten den Effekt zum berührungslosen Transport von flächigen, sensiblen Bauteilen. Die Erkenntnis, dass das zu manipulierende Bauteil gleichzeitig den Reflektor bildet, wurde zum Patent angemeldet (PATENTANMELDUNG WO 00/61474 A1). Hieraus entstanden eine Reihe weiterer möglicher Applikationen, wie der berührungslose Transport von flächigen

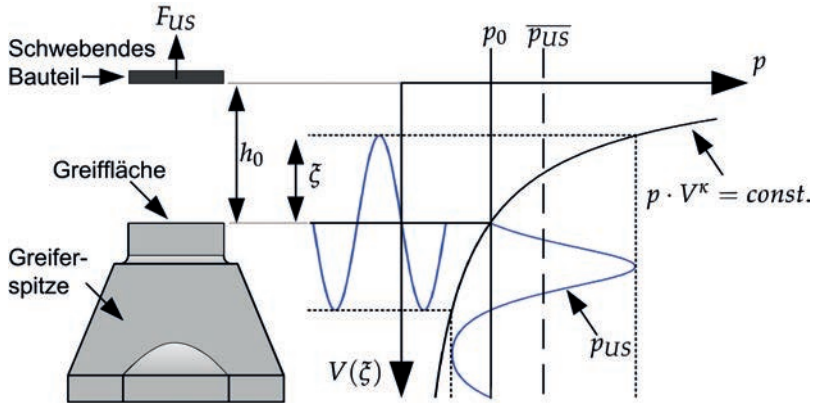


Abbildung 2.1: Entstehung des mittleren, abstoßenden Drucks $\overline{p_{US}}$ bei einem mittleren Luftspalt h_0 zwischen Bauteil und Greiferspitze; ξ : Ultraschallamplitude, p_0 : Umgebungsdruck, F_{US} : Ultraschallkraft.

Bauteilen und ein berührungsloses Greifsystem für Wafer, die ebenfalls durch Patentanmeldungen veröffentlicht wurden (PATENTANMELDUNG WO 00/61475 A1; PATENTANMELDUNG WO 02/12097 A1). Weiterhin ist das Prinzip der Handhabungstechnologie durch die Größengestaltung der schwingenden Fläche skalierbar und kann somit auf die Abmessungen des zu handhabenden Bauteils angepasst werden. Eine verkleinerte Greiffäche ermöglicht daher die Handhabung von Bauteilen in der Mikromontage (SCHILP 2007). Feine Unterdruckbohrungen in der schwingenden Greiffäche lassen bei einem angelegten Unterdruck zudem das Greifen eines Bauteils von oben durch die Kombination abstoßender Ultraschall- und anziehender Unterdruckkräfte zu. Die grundlegende Idee des Ultraschallvakuumgreifers ist in der PATENTANMELDUNG WO 02/090222 A1 festgehalten und in mehreren Veröffentlichungen dargestellt (ZÄH ET AL. 2003; REINHART ET AL. 2004; ZÄH ET AL. 2004; FRANZKOWIAK ET AL. 2005A; FRANZKOWIAK ET AL. 2005B; SCHILP 2007).

Ausgehend von den genannten Patenten wurde die Handhabungstechnologie basierend auf der Squeeze-Film-Levitation zur industriellen Anwendungsreihe weiterentwickelt. Sie wird seit 2007 von der Fa. Zimmermann und Schilp Handhabungstechnik GmbH kommerziell vertrieben. Nach ZIMMERMANN ET AL. (2008) kann die Technologie zur Handhabung unterschiedlichster Bauteile, wie Flachbildschirme, Solarzellen, Dünn- und Flachgläser, beschichtete oder lackierte Bleche sowie Halbleiterkomponenten und Wafer, eingesetzt werden. Derzeit beschränkt sich die Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall noch auf Produktionsprozesse, die unter Raumtemperaturen erfolgen. Aus diesem Grund wird am Institut für Werkzeugmaschinen und

Betriebswissenschaften (*iwb*) die Qualifikation der Technologie für Hochofenprozesse untersucht (REINHART ET AL. 2012).

2.4 Auslegung ultraschallbasierter Handhabungssysteme

2.4.1 Prozessparameter

Um Bauteile von oben greifen zu können, sind neben den abstoßenden Kräften des Ultraschalls auch anziehende Unterdruckkräfte erforderlich. Zur Realisierung einer anziehenden Unterdruckkraft werden in die schwingende Greiffläche Unterdruckdüsen integriert. Aufgrund des anliegenden Unterdrucks entsteht eine Umströmung der Bauteilstirnseiten, die im Falle einer flächenkongruenten Gestaltung der Greiferspitze zum Bauteil gleichmäßig an allen Seiten auftritt. Eine Verschiebung des Bauteils aus dem Greifermittelpunkt heraus, infolge einer lateralen Beschleunigung des Greifers, führt zu einer Änderung der Umströmungsverhältnisse, die eine rückstellende, zentrierende Kraft auf das Bauteil bewirkt. SCHILP (2007) führt diese Kräfte vor allem auf den Bernoulli-Effekt zurück. Da die strömungsbedingten Druckänderungen an den Bauteilstirnseiten begrenzt sind und die daraus resultierenden Zentrierkräfte im Mikronewtonbereich liegen, verliert sich der selbstzentrierende Effekt mit größer werdendem Bauteilgewicht. Für die Handhabung großflächiger Bauteile sind daher seitliche Anschläge (ZIMMERMANN ET AL. 2008) zur Übertragung lateraler Bewegungen des Greifers auf das Bauteil erforderlich.

Um das Bauteil in einer definierten und stabilen Schwebeposition unter dem Greifer zu halten, sind die Prozessparameter relevant, die in Abbildung 2.2 auf der linken Seite veranschaulicht werden. Entsprechend der Ultraschallamplitude ζ und der wirksamen Fläche aus schallabstrahlender Fläche und der Bauteilfläche entsteht die abstoßende Ultraschallkraft F_{US} . Durch die Unterdruckdüsen und einen angelegten Unterdruck p_U wird eine anziehende Unterdruckkraft F_U erzeugt. Auch diese Kraft hängt sowohl von den Flächenverhältnissen zwischen Bauteil- und Greiffläche als auch von der wirksamen Unterdruckfläche ab. Wirksam deshalb, da sich durch den Abstand zwischen dem Greifer und dem Bauteil ein Druckprofil ausbildet, das an den Unterdruckdüsen maximal ist und sich zum Bauteil- bzw. Greiferrand hin dem Umgebungsdruck annähert (SCHILP 2007). Die axialen Kräfte aus Unterdruck, Ultraschall und Bauteilgewichtskraft bilden zusammen ein Kräftegleichgewicht, in dem ein Bauteil im Abstand h_0 ¹, dem Luftspalt, schweben kann. Im Falle der Handhabung sehr kleiner Bauteile spielt die Gewichtskraft des Bauteils eine untergeordnete Rolle,

¹ h_0 ist der mittlere Luftspalt, der durch die Ultraschallamplitude überlagert wird:
 $h_0(t) = h_0 \cdot \zeta \sin(2\pi f t)$

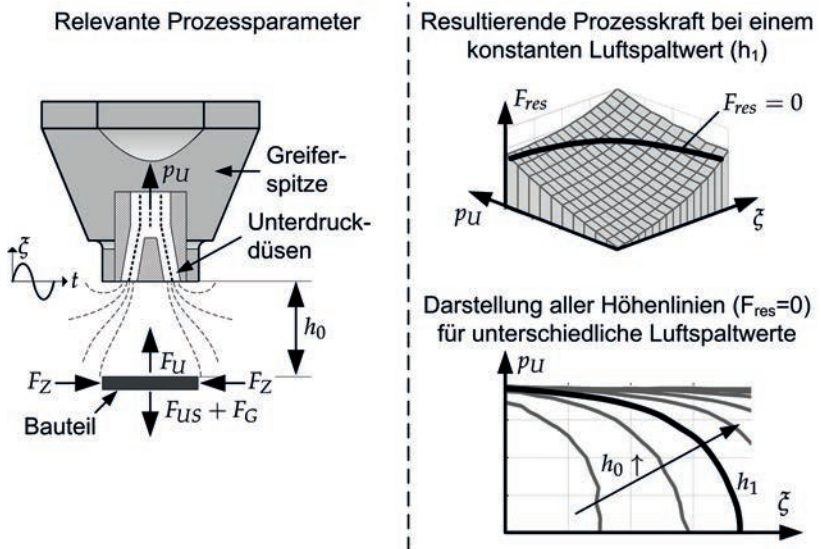


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Prozessparameter (links, nach REINHART & KIRCHMEIER (2011)), der resultierenden Prozesskraft (oben rechts) und aller Höhenlinien verschiedener Luftspaltwerte (unten rechts). p_U : Unterdruck, ξ : Ultraschallamplitude, h_0 : Luftspalt, F_U : Unterdruckkraft, F_{US} : Ultraschallkraft, F_G : Gewichtskraft des Bauteils, F_Z : laterale Zentrierkräfte, $F_{res} = F_U - F_G - F_{US}$: resultierende Prozesskraft bei bestimmten Parameterkonstellation ξ , p_U und h_0 .

da sie um ein Vielfaches kleiner ist als die Ultraschall- und die Unterdruckkraft². Die Messung der resultierenden Prozesskraft aus Ultraschall und Unterdruck wird in Abbildung 2.2 auf der rechten Seite dargestellt. Dabei ist deutlich der nichtlineare Einfluss der Prozessparameter Ultraschallamplitude ξ und Unterdruck p_U auf die resultierende Prozesskraft F_{res} bei einem konstanten Luftspalt h_1 zu sehen. Die hervorgehobene Höhenlinie im ξ - p_U - F_{res} -Diagramm repräsentiert die Parameterkombinationen, die zu einem Kräftegleichgewicht führen. Die Extraktion dieser Höhenlinien für unterschiedliche Luftspaltwerte wird in einem zweidimensionalen ξ - p_U -Diagramm dargestellt und ist die Grundlage

²Die gemessene Ultraschallkraft bei einer Bauteilfläche von $5 \cdot 5 \text{ mm}^2$, einer Ultraschallamplitude von $15 \text{ }\mu\text{m}$ und einem Luftspalt von $20 \text{ }\mu\text{m}$ liegt in etwa bei 50 mN . Zum Vergleich beträgt das Gewicht des beschriebenen Bauteils bei einer Dicke von $120 \text{ }\mu\text{m}$ und unter der Voraussetzung, dass es sich bei dem Material um Silizium handelt ($\rho = 2,336 \text{ g/cm}^3$), nur $0,1 \text{ mN}$.

für das eigentliche Prozessfenster (REINHART ET AL. 2010A).

Die richtige Kombination aus Ultraschallamplitude und Unterdruck ist zwar die Voraussetzung dafür, dass das Bauteil überhaupt im jeweiligen Luftspalt schweben kann, aber erst ein stabil schwebendes Bauteil kann sinnvoll gehandhabt werden. SCHILP (2007) prägte in diesem Zusammenhang den Begriff der Stabilitätskarte und definiert in Abhängigkeit zu den beiden Eingangsgrößen die Bauteilstabilität durch vier unterschiedliche Kategorien:

- *Stabil*: Das Bauteil schwebt ruhig in einem definierten Abstand zur schwingenden Greiffläche. Dabei können kleine Auslenkungen durch die Zentrierkräfte kompensiert werden.
- *Unruhig*: In diesem Zustand schwebt das Bauteil zwar, rotiert allerdings um die Greiferachse und führt oszillierende Bewegungen in alle drei Raumrichtungen aus.
- *Instabil*: Als instabiler Zustand wird ein unruhig schwebendes Bauteil bezeichnet, dessen Bewegungen sich aufschaukeln können, bis es herabfällt bzw. in Kontakt mit der schwingenden Greiffläche kommt.
- *Nicht gegriffen*: Hierbei führt die aktuelle Parameterkombination aus Ultraschallamplitude und Unterdruck nicht zu einem Schweben des Bauteils.

Erst die Erweiterung des zweidimensionalen ζ - p_U -Diagramms aus Abbildung 2.2 um die Information der Bauteilstabilität führt zur Darstellung des eigentlichen Prozessfensters. Die Bauteilstabilität wird dabei maßgeblich von der Höhe der Zentrierkräfte bestimmt (Heinz 2011) und ist ein wichtiges Zielkriterium für die beschriebene Systemauslegung in Unterabschnitt 2.4.4.

2.4.2 Auslegung des Ultraschallsystems

Das Kernelement der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie bildet ein leistungsstarkes Ultraschallsystem, weshalb dessen Gestaltung der erste Schritt zur Auslegung derartiger Handhabungssysteme ist. Zur Erzeugung von Ultraschall mit hohen, mechanischen Schwingungsamplituden können zwei physikalische Prinzipien, der magnetostriktive und piezoelektrische Effekt, genutzt werden (KUTTRUFF 1988).

Das erste Prinzip beschreibt die Deformation ferromagnetischer Stoffe infolge eines angelegten magnetischen Feldes. Das Magnetfeld bewirkt eine Ausrichtung der Weisschen Bezirke, die nach dem Physiker Pierre-Ernest Weiss (1865–1940) (FISCHER ET AL. 2007) benannt wurden. Diese Bezirke sind mikroskopisch kleine magnetisierte Domänen in den Kristallen eines ferromagnetischen Stoffes und bewirken bei einer Ausrichtung eine elastische Längenänderung des Körpers (JANOCHA 1992). Für die Ultraschallerzeugung wird ein Stab mit hoher

Magnetostriktion (z. B. Terfenol-D) in einer elektromagnetischen Spule mechanisch durch eine Feder vorgespannt. Das durch den Wechselstrom erzeugte Magnetfeld führt zu einer Auslenkung des Stabes bei identischer Frequenz zum Anregungssignal.

Das zweite Prinzip, der piezoelektrische Effekt, beschreibt dagegen die Verformung eines Materials bei Anlegen einer elektrischen Spannung (indirekter piezoelektrischer Effekt). Die elektrische Spannung führt zu einer abwechselnden Stauchung und Dehnung der piezoelektrischen Kristallstruktur. Da der piezoelektrische Effekt reversibel ist, kann mit diesem Prinzip der Ultraschall erzeugt und gemessen werden (ARNAU 2004). Ultraschallsysteme mit besonders hohen Schallamplituden werden seit längerem bereits in der Produktionstechnik eingesetzt, beispielsweise bei der Ultraschallreinigung und beim Ultraschallschweißen (BECKER 2001) sowie bei der spanenden Werkstückbearbeitung (VORONINA & BABITSKY 2008). Hierfür werden zwei oder mehrere piezoelektrische Lochscheiben zwischen zwei Zylindern eines anderen Materials (z. B. Aluminium), der Kopf- und Rückenmasse, zu einem Ultraschallverbundschwinger mit einer Schraubverbindung mechanisch vorgespannt (KUTTRUFF 1988). Die Abbildung 2.3 stellt die beschriebene Bauart des Ultraschallsystems schematisch dar, das bereits an die Anforderungen der ultraschallbasierten Handhabungstechnik angepasst ist. Das Grundelement des Ultraschallsystems, der Ultraschallverbundschwinger, wird auch Langevin-Bolt-Transducer (KUTTRUFF 1988; MORENO ET AL. 2005) genannt.

Durch die Anregung der piezoelektrischen Lochscheiben (vgl. Abbildung 2.3) mit einer elektrischen Wechselspannung erfolgt eine periodische Dickenänderung der Lochscheiben entsprechend der Frequenz des Steuersignals und dies versetzt den Ultraschallverbundschwinger in Schwingungen. Wird das mechanische Gesamtsystem in einer Frequenz angeregt, die dem ganzen Vielfachen der ersten Längsmode entspricht, erfolgt eine Reflexion der Schallwelle an den Stirnseiten. Durch die Interferenz der weggehenden und reflektierten Schallwelle bildet sich eine stehende Welle (λ_0) aus. Der Betrieb in der ersten Eigenfrequenz der Longitudinalschwingung f_0 führt, wie im Bode-Diagramm in Abbildung 2.3 rechts ersichtlich, zu einer maximalen Schallamplitude. Dabei können sehr hohe Systemgüten erzielt werden, da der Übergang der Wellenwiderstände von Aluminium oder Titan zu Luft einen sehr hohen Reflexionskoeffizienten besitzt (KUTTRUFF 1988). Folglich bleibt der Großteil der Schwingungsenergie im mechanischen System erhalten und nur ein kleiner Teil der Schallenergie wird in die Luft abgestrahlt.

Dabei kann das Ultraschallsystem entsprechend der Halbwellensynthese nach LITTMANN (2003) durch Ultraschallsonotroden erweitert werden. Die Ultraschallsonotrode muss aber in der ersten Längsmode die identische mechanische Resonanz zum Ultraschallverbundschwinger aufweisen. Zur Minimierung

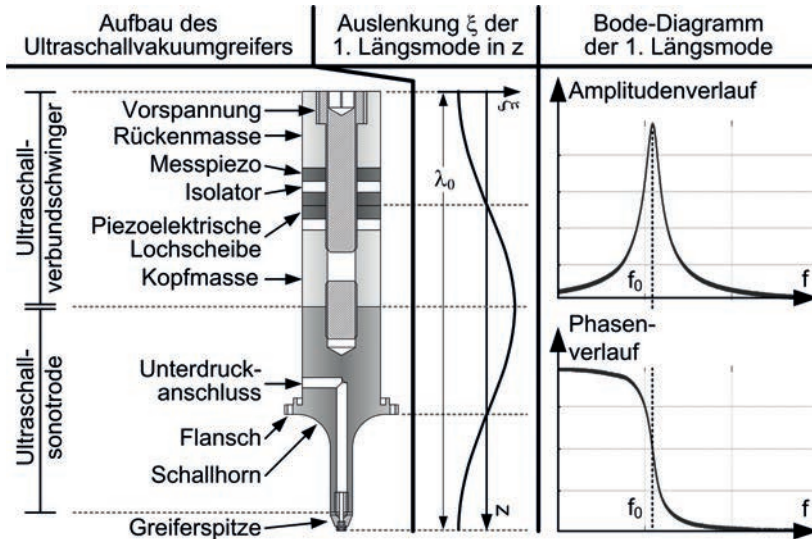


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau eines Ultraschallvakuumgreifers der Länge λ_0 (links), nach REINHART & KIRCHMEIER (2011); Auslenkung ξ der 1. Längsmode in z-Richtung (mitte); Bode-Diagramm der 1. Längsmode (rechts). Die Resonanzfrequenz f_0 ist von der Wellenlänge λ_0 des Ultraschallvakuumgreifers abhängig.

von Dämpfungen in Folge von Schallreflexionen und Materialübergangswiderständen wird die Kopplung der Ultraschallsonotrode und des Ultraschallverbundschwingers in einem Schwingungsbauch vorgenommen, da hier die Schallenergie ausschließlich in kinetischer Form vorhanden ist. Umgekehrt verhält es sich in einem Schwingungsknoten. An dessen geometrischem Ort ist die mechanische Auslenkung gleich Null und die mechanische Spannung maximal. Dieser Punkt eignet sich zur Halterung des Ultraschallsystems (Flansch), um eine Schwingungsübertragung an die Umgebung und eine Dämpfung der Ultraschallamplitude zu minimieren. Zur Erzeugung hoher Schallamplituden besitzt die Ultraschallsonotrode meist ein sogenanntes Schallhorn, das durch die Verjüngung des Querschnittes die Steifigkeit herabsetzt und damit die Schallamplitude erhöht (LITTMANN 2003).

Die systemspezifische Längsresonanz hängt zwar vor allem von der geometrischen Länge des Ultraschallvakuumgreifers ab, wird aber noch durch weitere Faktoren beeinflusst (RUSCHMEYER & BARTZ 1995). Jede Änderung der Masse, der Steifigkeit oder der Umgebungsbedingungen beeinflusst die Resonanzfrequenz des Systems. Der Betrieb von Ultraschallsystemen mit hoher

Leistung erzeugt aufgrund der thermisch bedingten Längenänderung eine erhöhte Druckspannung auf die piezoelektrischen Lochscheiben. Dies führt zu einer Änderung der Steifigkeit des mechanischen Systems und infolgedessen zu einer Verschiebung der Resonanzfrequenz, wodurch eine Nachregelung der Ansteuerungsfrequenz unumgänglich wird. Verschiedenste Regelungsansätze werden in der Literatur diskutiert (BECKER 2001; BEST 1993; GABAY & BUCHER 2006; RAMOS & SAN EMETERIO 2004). Die Frequenzregelung beruht dabei meist auf dem Prinzip der Phasenverschiebung zwischen der Ansteuerungsspannung und dem resultierenden Stromfluß (MORTIMER ET AL. 2001) oder einem der mechanischen Auslenkung proportionalen Messwert (VORONINA & BABITSKY 2008), wie der Spannung an einem Messpiezo (PATENTANMELDUNG DE 4322388 A1). Kommerziell erhältliche Ultraschallsysteme bestehen daher immer aus der mechanischen Komponente und der Leistungselektronik.

Das Ende der Ultraschallsonotrode bildet die Greiferspitze. Jede Greiferspitze ist durch geometrische Restriktionen und Rahmenbedingungen an die Handhabungsaufgabe anzupassen. Die Anbindung der Greiferspitze an die Ultraschallsonotrode erfolgt ebenfalls über eine Schraubverbindung (SCHILP 2007; HEINZ 2011; ZIMMERMANN 2011). Gekaufte Ultraschallsysteme, ohne spezielle Auslegung auf die Anwendung der berührungslosen Handhabung, besitzen eine fest vorgestellte Betriebsfrequenz. Die Greiferspitze ist daher auf die vorgegebene Ultraschallfrequenz auszulegen. Für die Handhabung großflächiger Bauteile, wie Wafer, führt eine dementsprechend große Greiffläche zu einer Änderung der Schwingungseigenschaften des Ultraschallvakuumgreifers, da dessen zusätzliche Masse einen Einfluss auf die erste Mode der Längsresonanz zur Folge hat. Die Abmessung des zu handhabenden Bauteils und damit die der Greiffläche bestimmen den Grad der Beeinflussung des Ultraschallsystems.

Weiterhin ist noch die Eigenform der Greiffläche zu berücksichtigen. Die Anregung der Greiffläche durch den Ultraschallverbundschwinger erfolgt an einem Punkt auf der Greiffläche, die an die Ultraschallsonotrode geschraubt wird. Sind die Abmessungen der Greiffläche größer als ein ganzes Vielfaches der halben Wellenlänge der Anregungsfrequenz, führt diese Biegeschwingungen aus. Im einfachsten Fall kann man sich die entstehende Biegeschwingung einer kreisförmigen Greiffläche mit dem Durchmesser einer halben Wellenlänge der Anregungsfrequenz als eine Art Pilz vorstellen. Je kleiner die schwingende Greiffläche, desto geringer ist die Beeinflussung des Ultraschallsystems; vorausgesetzt die Gesamtlänge des Ultraschallvakuumgreifers bleibt gleich. So gleicht die Bewegungsform der Greiffläche bei kleinen Bauteilen einem Kolbenschwinger. Diese Tatsache erfordert unterschiedliche Herangehensweisen in der Auslegung der Handhabungssysteme, die in den folgenden beiden Unterabschnitten erläutert werden.

2.4.3 Strukturmechanische Auslegung der Greiffläche

Im Vordergrund für die Auslegung der Greiferspitze zur Handhabung großflächiger Bauteile steht die strukturmechanische Optimierung der schwingenden Greiffläche. Da aufgrund der Flächenabmessungen Biegeeigenfrequenzen entstehen, ist die Resonanzfrequenz einer für die Handhabung geeigneten Mode an die Resonanzfrequenz des Ultraschallsystems anzupassen. Entsprechend den Ergebnissen von ZÄH & ZITZMANN (2005) wird das Vorgehen zur Auslegung der Greiffläche zur Handhabung großflächiger Bauteile im Wesentlichen in drei Einzelschritte unterteilt.

1. *Definition der Rahmenbedingungen*

Im ersten Schritt sind die erforderlichen Kräfte auf das zu tragende Bauteil während des Handhabungs- und des Fügeprozesses zu bestimmen. Hierzu gehört auch die Berücksichtigung der Temperatur und die Viskosität des umgebenden Mediums - in den meisten Fällen Luft - sowie die Wahl des Materials für die Greiffläche.

2. *Leistungsdimensionierung des Handhabungssystems*

In diesem Schritt werden alle Parameter, die einen Einfluss auf die Ultraschallkraft besitzen, simulativ untersucht. Hierzu gehören die Ultraschallamplitude und die schallabstrahlende Greiffläche. Die Dimension der schallabstrahlenden Greiffläche im Vergleich zur Bauteilfläche kann sowohl kleiner als auch größer gewählt werden. Die erzeugte Ultraschallkraft ist dabei vom Überlappungsbereich beider Flächen abhängig, da nur im Luftspalt eine Kompression entsteht, infolge deren eine abstoßende Kraft aufgebaut wird.

3. *Auslegung der Greiffläche*

Im dritten Schritt erfolgt die Festlegung der Schwingungseigenform entsprechend den geometrischen Abmessungen des Bauteils. Im Falle eines radialsymmetrischen Bauteils wird die Form der Schwingung einem Pilz gleichen, während bei quadratischen Bauteilen eher ein Schachbrettmuster angestrebt wird (ZIMMERMANN 2011). Darauf aufbauend wird die Greiffläche mittels CAD-Programm modelliert und anschließend mit Hilfe der Methode der Finite Elemente die Schwingungseigenform simuliert. Dabei ist die angestrebte Eigenmode an die Resonanzfrequenz des Ultraschallsystems anzupassen. Dies ist notwendig, um das Ultraschallsystem in seiner optimalen Betriebsfrequenz zu betreiben, in der die geringsten Dämpfungswerte zu erwarten sind. Als Optimierungsparameter für die gewünschte Schwingungseigenform der Greiffläche können alle geometrischen Größen herangezogen werden. Nach der Fertigung der simulativ identifizierten Greiffläche ist das Handhabungssystem komplett.

Mit kleiner werdenden Bauteilabmessungen wird die schwingende Oberfläche ebenfalls verkleinert. Unterhalb einer Kantenlänge von etwa 10 mm vollzieht die Greiffläche (bei einer Frequenz von 30 kHz und der Verwendung von Aluminium) keine Biegeschwingung mehr. Die Greiffläche verhält sich dann wie ein Kolbenschwinger. Im Gegensatz zur strukturmechanischen Auslegung der Greiffläche für große Bauteile gestaltet sich die Auslegung für kleine Bauteile etwas einfacher, da nach SCHILP (2007) nur auf die Länge des Ultraschallvakuumgreifers zu achten ist. Damit ist die strukturmechanische Auslegung der Greiferspitze zur Handhabung kleiner Bauteile wesentlich einfacher. Dagegen ist bei kleinen Greifflächen die Dimensionierung der Greifkräfte etwas anspruchsvoller, weshalb diese im nächsten Unterabschnitt gesondert erläutert wird.

2.4.4 Dimensionierung der Greifkräfte

Um Bauteile nicht nur anzuheben, sondern auch von oben zu greifen, sind Unterdruckdüsen in der Greiffläche notwendig. Da aber die Ultraschallamplitude und der Unterdruck einer bis dato unbekannt und nichtlinearen Überlagerung unterliegen (REINHART & KIRCHMEIER 2011), liegt die Herausforderung in der Abstimmung der Unterdruckkraft auf die Ultraschallkraft. Nur wenn sich die Wertebereiche aus abstoßender Ultraschallkraft und anziehender Unterdruckkraft überlagern, entsteht ein Kräftegleichgewicht (HEINZ 2011). Dies ist die grundsätzliche Voraussetzung für ein schwebendes Bauteil.

Zur Erzeugung der lateralen Zentrierkräfte ist eine Flächenkongruenz zwischen der Bauteil- und Greiffläche erforderlich (SCHILP 2007). Im Umkehrschluss ist damit für jede Bauteilgeometrie eine eigene Sonotroden spitze zu entwickeln. Eine Änderung der Greiffläche beeinflusst alle entstehenden Kraftwerte. Die Parameterkombinationen aus Ultraschallamplitude und Unterdruck, die zum Kräftegleichgewicht führen, sind daher für verschiedene Bauteile unterschiedlich. Eine simulative Abschätzung der Prozessparameter ist bislang nicht möglich, da die numerische Modellierung der Ultraschallkraft, insbesondere bei kleinen Greifgeometrien, noch deutliche Abweichungen zur Realität besitzt und weil die Art der Superposition des Ultraschalls und des Unterdrucks bislang noch unklar ist (REINHART & KIRCHMEIER 2011). Insofern bleibt dem Anwender nur eine experimentelle Auslegung des Systems übrig. REINHART ET AL. (2010A) und HEINZ (2011) schlagen ein Vorgehen in vier Schritten gemäß der Abbildung 2.4 vor. Entsprechend der Bauteilabmessungen wird eine Greiferspitze gefertigt, deren Fläche kongruent zur Bauteilfläche ist und keine Unterdruckbohrungen besitzt.

Im ersten Schritt werden über einen präzisen Kraftsensor die erreichbaren Ultraschallkräfte in Abhängigkeit zum Luftspalt und zur Ultraschallamplitude ermittelt. Um das Bauteil in einen Schwebezustand zu bringen, müssen sich die Größenbereiche der Ultraschall- und Unterdruckkraft überlagern.

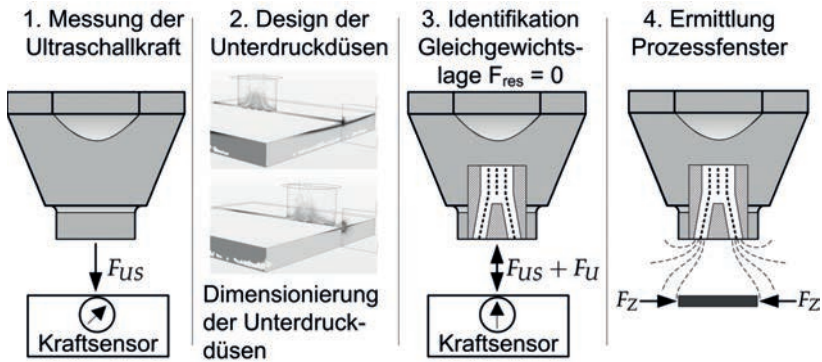


Abbildung 2.4: Vorgehen bei der Auslegung der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie für kleine Bauteile, nach REINHART ET AL. (2010B).

Entsprechend diesem Kriterium werden im zweiten Schritt die Unterdruckbohrungen mittels einer FEM-Simulation basierend auf den bestehenden Auslegungshypothesen nach SCHILP (2007) und REINHART ET AL. (2011) dimensioniert. Hierbei wird die Unterdruckkraft in Abhängigkeit zur Anzahl, zur Position, zum Durchmesser und zur Winkellage jeder Unterdruckbohrung in der Greiferspitze untersucht. Das Auslegungsziel ist eine Unterdruckkraft, die in ihrer Höhe der gemessenen Maximalkraft des Ultraschalls entspricht. Die ermittelten geometrischen Abmessungen der Unterdruckbohrungen werden anschließend der im ersten Schritt angefertigten Greiferspitze hinzugefügt. Zur Verifikation der simulativ abgeschätzten Unterdruckkräfte können diese auch experimentell gemessen werden.

Im dritten Schritt wird die resultierende Kraft aus Unterdruck- und Ultraschallkraft in Abhängigkeit zu Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt gemessen. Eine einzelne Messung bei einem bestimmten Luftspaltwert wird beispielhaft durch die Abbildung 2.2 (rechts oben) veranschaulicht. Vergleichende Abstandsmessungen zwischen dem schwebenden Bauteil und der Greiferspitze belegen die Analogie zur Kraftmessung und den daraus extrahierten Höhenlinien (REINHART ET AL. 2010A). Somit ist eine erste Abschätzung des Prozessfensters möglich.

Im letzten Schritt wird der Schwebезustand des Bauteils für alle identifizierten Parameterkonstellationen betrachtet. Abhängig von der beobachteten Bauteilstabilität werden das Prozessfenster und die Werte der Prozessparameter für die Durchführung der Handhabungsaufgabe bestimmt.

2.5 Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs

Die Empfindlichkeit elektronischer sensibler Bauteile nimmt mit der stetigen Miniaturisierung zu. Damit erhöhen sich auch die Anforderungen an die Montage und im Speziellen an die Handhabungstechnologie. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist der Einsatz einer schonenden Handhabungstechnologie unabdingbar. Ein Vergleich unterschiedlicher physikalischer Effekte zur Übertragung nichttaktile Kräfte zeigt, dass die berührungslose Handhabung mittels Ultraschall den gestellten Anforderungen an die Handhabung sensibler Bauteile am besten gerecht wird. Die Vorteile der Technologie liegen in der Materialunabhängigkeit des zu handhabenden Bauteils, der homogenen Kraftverteilung auf die gesamte Bauteilfläche und der Reinraumtauglichkeit. SCHILP (2007) zeigt in seiner Arbeit nicht nur, dass die Handhabung kleiner und flächiger Bauteile aus der Mikrosystemtechnik unter Anwendung der Squeeze-Film-Levitation möglich ist, sondern er realisiert auch einen ersten Prototypen eines Ultraschallvakuumbreifers. Dabei wird der abstoßende Effekt des Ultraschalls mit der anziehenden Kraft eines angelegten Unterdrucks kombiniert. Mit dem daraus resultierenden Kräftegleichgewicht können Bauteile berührungslos manipuliert werden. HEINZ (2011) baut auf den Ergebnissen von SCHILP (2007) auf und erarbeitet ein experimentelles Vorgehen zur Auslegung der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie entsprechend einer gegebenen Bauteilgeometrie.

Die grundsätzliche Anwendbarkeit der berührungslosen Handhabungstechnologie mittels Ultraschall ist mit dem vorgestellten Stand der Forschung und Technik zwar belegt, aber wie die Technologie im automatisierten Montageprozess monolithischer Bauteile angewendet wird, ist noch offen. Es ist noch unklar, welche technischen Voraussetzungen zur Durchführung einer berührungslosen Montage in einer automatisierten Anlage erforderlich sind und wie dieser Montageprozess von der Bauteilaufnahme bis hin zur Bauteilablage zu gestalten ist. Aus diesen Fragestellungen wird der folgende, übergeordnete Handlungsbedarf abgeleitet:

Handlungsbedarf

Erarbeitung einer Methode zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabung im automatisierten Montageprozess monolithischer Bauteile.

Die Inhalte der Methode werden im nächsten Kapitel erläutert.

3 Methode zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabung

3.1 Betrachtungsraum der Methode

Die Einsatzfähigkeit jeder Methode hängt von deren Systemgrenzen ab. Aus diesem Grund wird für die zu erstellende Methode zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabung im automatisierten Montageprozess monolithischer Bauteile zuerst der Betrachtungsraum der Methode definiert. Erst danach können im zweiten Schritt die Methodeninhalte zielgerichtet erstellt werden.

Als „Flaschenhals“ bei der automatisierten Montage monolithischer Bauteile wurde im Kapitel 1 die derzeitige Handhabungstechnik identifiziert. Die taktilen Greifverfahren bergen nicht nur das Risiko einer Bauteilbeschädigung, sondern erhöhen je nach Ausführungsvariante des Greifers auch den Flächenbedarf des Bauteils (siehe Bestückschatten auf Seite 8). Anschließend wurde in Kapitel 2 die ultraschallbasierte Handhabungstechnik als alternatives Handhabungsverfahren zur schonenden Bauteilmanipulation identifiziert. Folglich bilden die vor- und nachgelagerten Prozessschritte zur Bauteilhandhabung die Systemgrenzen der im Folgenden beschriebenen Methode. Die Bauteilzuführung und die Prozessschritte nach der Aufbringung einer definierten Fügekraft durch das Greifwerkzeug werden damit nicht berücksichtigt. Somit ergeben sich folgende Randbedingungen:

1. Die Bauteile befinden sich an einer bekannten Position und Orientierung im Koordinatensystem der Montageanlage und lassen sich ohne Aufhebung von Haftkräften greifen.
2. Ähnliches gilt auch für die Bauteilablage dessen Zielort ebenfalls bekannt ist.
3. Während das Lösen des Bauteils vom Greifer und die Aufbringung einer Fügekraft noch Bestandteil des Betrachtungsraumes sind, werden die weitergehenden Prozessschritte, wie das Aufschmelzen des Lotes, nicht betrachtet.

Während der Ausgangspunkt und das Ziel der Methode, die automatisierte Montage eines bestimmten Bauteils, durch die Montageaufgabe gegeben sind, sind die einzelnen Methodenschritte zur Erreichung des Methodenziels noch zu klären. Deren Inhalte richten sich nach den Anforderungen des Anwenders

an die automatisierte berührungslose Montagetechnik mittels Ultraschall. Jene Anforderungen entstehen in erster Linie aus der technischen Integration der ultraschallbasierten Greiftechnik in eine bestehende Montageanlagentechnik. Hierfür sind die technischen Unterschiede zwischen der konventionellen und ultraschallbasierten Handhabung zu erörtern. Ferner sind ebenfalls industrielle Anforderungen an die ultraschallbasierte Handhabungstechnik zu berücksichtigen. Sowohl die technologischen als auch die industriellen Anforderungen werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

3.2 Anforderungen an die ultraschallbasierte Montage

3.2.1 Technologische Anforderungen

Definierte Aufbringung der Fügekraft: Der markanteste Unterschied zwischen der konventionellen und ultraschallbasierten Handhabung liegt in der Kontaktfreiheit zum Bauteil. Dadurch ändert sich der komplette Handhabungsprozess vom Greifen des Bauteils über den Transport bis hin zu dessen Ablage. Eine weitergehende Anwendung der konventionellen Bewegungssteuerung des Greifers ist damit nicht möglich. Zwar bringt die nicht-taktile Handhabung etliche Vorteile mit sich, aber die Bewegungssteuerung verliert infolge der Umstellung von einer taktilen auf eine berührungslose Handhabung einen wichtigen Sensorwert. Durch den Kontakt des Greifwerkzeuges mit der Bauteiloberfläche wird in konventionellen Anlagen die Fügekraft gemessen (vgl. Unterabschnitt 1.2.3). Bei der ultraschallbasierten Handhabung ist diese Messung und damit die Erzeugung definierter Fügekräfte aufgrund der Berührungsfreiheit per se nicht möglich.

Vermessung des Arbeitsraums: Mit der Kraftmessung wird in konventionellen Montageanlagen aber nicht nur die Fügekraft kontrolliert, sondern über diesen Sensorwert erfolgt auch ein Teil der Anlagenkalibrierung. Unterschiedliche Bauteil- und Bauteilträgerdicken oder verschiedene Montageanlagen führen zu unterschiedlichen Abstandswerten zwischen der Montageoberfläche und dem Greifwerkzeug. In konventionellen Montageanlagen wird das Greifwerkzeug solange in Richtung einer Oberfläche verfahren, bis der Kraftsensor eine Berührung signalisiert. Über das Wegmesssystem des Linearantriebs des Greifers ist die relative Höhenposition im Koordinatensystem der Montageanlage kalibriert. Dieses Positionierungsverfahren ist bei der berührungslosen Handhabung nicht mehr möglich. Für die Ermittlung der relativen Abstandswerte zwischen dem ultraschallbasierten Greifwerkzeug, dem Bauteil und dem Bauteilträger im Koordinatensystem der Montageanlage ist daher eine andere Messmethode erforderlich.

Einfache Prozesssteuerung: Für die Durchführung der Montageaufgabe unter Anwendung einer Vakuumpipette sind im Wesentlichen zwei Prozessparameter zu definieren: die erforderliche Fügekraft und die Höhe der Bauteilhaltekraft durch den Greifer in Form des angelegten Unterdrucks. Im Gegensatz dazu sind beim ultraschallbasierten Greifen mehrere Prozessparameter (Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt) zu betrachten. Weiterhin muss zwischen dem Bauteiltransport sowie der Bauteilaufnahme und -ablage unterschieden werden. Im erstgenannten Zustand ergibt sich der Luftspalt zwischen dem schwebenden Bauteil und der Greiferspitze aus den Parametern Ultraschallamplitude und Unterdruck. Im zweiten Zustand ist der Luftspalt nicht als Eingangsparameter, sondern als Ausgangsparameter zu sehen. Aus diesen drei Parametern resultiert die Füge- oder die Greifkraft. Damit der ultraschallbasierte Handhabungsprozess ähnlich der konventionellen Handhabungstechnik zu steuern ist, muss die Komplexität der Prozesssteuerung reduziert werden. Für die Bauteilmontage sind nur die Fügekraft und der Luftspalt relevant. Die Definition des Luftspaltverlaufs ermöglicht die Beschreibung des kompletten Handhabungsvorgangs. Die Umsetzung ist allerdings noch zu erarbeiten.

3.2.2 Industrielle Anforderungen

Neben den technologischen Anforderungen an die Handhabungstechnik müssen auch industrielle Anforderungen bezüglich Produktionstechnik und -planung berücksichtigt werden, denn diese sind ausschlaggebend dafür, ob die Handhabungstechnologie in der Produktion zukünftig eingesetzt werden kann. Die Identifikation der Anforderungen erfolgt anhand der Technologiebewertungskriterien nach KRÖLL (2007).

Effiziente Auslegung der Greiferspitze: Dies ist die Fähigkeit einer zielgerichteten und zeitnahen Anpassung auf eine Veränderung. Für die Handhabung von Bauteilen der Mikrosystemtechnik bedeutet dies eine Adaption der Greiftechnik auf unterschiedliche Bauteilgeometrien und Fügeprozesse. Voraussetzung für die Handhabung kleiner Bauteile sind definierte Parameterkombinationen aus Ultraschallamplitude und Unterdruck, die für eine bestimmte Bauteilgeometrie zu gleichbleibenden Levitationseigenschaften führen (REINHART ET AL. 2010B). Aufgrund der nichtlinearen Parameterzusammenhänge besteht derzeit noch kein Modell, mit dem die Prozesskraft aus der überlagerten Ultraschall- und Unterdruckkraft effizient berechnet werden kann. Auch die Superpositionsart zwischen der Ultraschall- und der Unterdruckkraft auf das Bauteil ist bislang unklar (REINHART & KIRCHMEIER 2011). Eine numerische Berechnung unter Anwendung einer CFD-Simulation (Abk.: Coupled Fluid Dynamics) benötigt nach HEINZ (2011) auch mit derzeitigen Rechnern mehrere Wochen Rechenzeit. Somit bleibt nur die experimentelle Auslegung der Greifergeometrie für

3 Methode zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabung

eine bestimmte Bauteilgeometrie nach REINHART ET AL. (2010A) und HEINZ (2011). Zur Erhöhung der Flexibilität ist daher ein effizienteres und günstigeres Auslegungsverfahren erforderlich.

Flexibler und automatisierter Greiferspitzenwechsel: Das Kriterium der Flexibilität adressiert die Anpassungsfähigkeit der Montageanlage, unterschiedliche Bauteile zu verarbeiten. Für verschiedene Bauteilgeometrien werden unterschiedliche Greiferspitzen benötigt. Diese Greiferspitzen werden derzeit über eine Schraubverbindung mit der Ultraschallsonotrode verbunden. Diese kraft- und formschlüssige Verbindungsart ermöglicht eine nahezu verlustfreie Übertragung der Ultraschallenergie. Zur Vermeidung eines manuellen Greiferspitzenwechsels ist ein automatisiertes Wechselkonzept erforderlich.

Reproduzierbare Montagequalität: Unter dieser Kategorie wird der Grad eines reproduzierbaren Montageergebnisses adressiert. Für die ultraschallbasierte Handhabungstechnologie bedeutet dies, dass im Gegensatz zu einem Laboraufbau im industriellen Umfeld stärkere Prozessschwankungen und -toleranzen zu erwarten sind. Erst die Kompensation auftretender Toleranzen ermöglicht den Einsatz der Technologie in der Serienproduktion. Während des gesamten Handhabungsprozesses, von der Bauteilaufnahme bis zur -ablage, ist ein definierter Schwebezustand des Bauteils erforderlich. Dadurch wird eine reproduzierbare Montagequalität gewährleistet. Voraussetzung hierfür ist die Regelung der Prozessgrößen Luftspalt und Fügekraft. Ansätze zur Regelung dieser Größen existieren bislang noch nicht. Folglich ist eine Strategie zur Regelung der Fügekraft und des Luftspaltes zu erarbeiten.

Anwendung bestehender Montagetechniken: Nach KRÖLL (2007) wird mit dem Kriterium „Technologischer Reifegrad“ das Risiko der Zuverlässigkeit, der Fertigungsfähigkeit und des Weiterentwicklungspotentials für die neue Technologie betrachtet. Im Hinblick auf die berührungslose Handhabung mittels Ultraschall kann darunter dessen Integration in den bestehenden Produktionsprozess verstanden werden. Verfahren wie die Chip-and-Wire- oder die Flip-Chip-Technik dürfen durch die ultraschallbasierte Handhabung nicht ausgeschlossen werden. Beides sind etablierte Verfahren, die gleichzeitig Qualitätsstandards definieren. Es gilt daher die ultraschallbasierte Handhabungstechnologie in die etablierten Produktionsverfahren zu integrieren. Weiterhin sind im Gegensatz zur konventionellen Greiftechnik, wie der Vakuumpipette, die Anforderungen der ultraschallbasierten Handhabungstechnik an die Anlagen- und Prozesstechnik unbekannt. Folglich sind die notwendigen Adaptionsmaßnahmen der Anlagentechnik zu beschreiben, um die neue Technologie in einer automatisierten Montageanlage anzuwenden.

Kosten: Auch wenn die vorangegangenen Kriterien erfüllt sind, muss sichergestellt sein, dass die Anwendung der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie zu einem finanziellen Erfolg führt. Da die Abschätzung des monetären Mehrwerts vom jeweiligen Anwendungsfall abhängt, kann das Kriterium der Kosten nicht verallgemeinert in die Methode aufgenommen werden. Stattdessen wird die vorliegende Arbeit ein Anwendungsbeispiel vorstellen, an dem die Bewertung des technischen und wirtschaftlichen Mehrwerts erfolgt.

3.3 Aufstellung der Methode

Die zuvor identifizierten Anforderungen und die daraus resultierenden, notwendigen Prozessschritte, die zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie erforderlich sind, werden nun in der Methode berücksichtigt. Der Methodenablauf wird in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt, wobei sich die Veranschaulichung an die Konventionen der UML¹-Beschreibung für Zustandsdarstellungen lehnt (BALZERT 2008).

Den Startpunkt der Methode bildet die Montageaufgabe eines berührungsempfindlichen Bauteils, das durch die ultraschallbasierte Handhabung schonend montiert werden soll. Ausgehend von der Aufgabenstellung ergeben sich unmittelbar die Anforderungen an die Montage, die im vorangegangenen Abschnitt aufgeführt wurden.

Zuerst erfolgt die Auslegung der Greiferspitze. Diese muss zum einen die für den Montageprozess erforderliche Fügekraft bereitstellen und zum anderen ist die Greiferspitze an die definierte Bauteilgeometrie anzupassen, um merkliche Zentrierkräfte infolge der anziehenden Unterdruckkräfte zu erzeugen. Durch die Zentrierkräfte wird das Bauteil bei begrenzten lateralen Beschleunigungen des Greifers stets mittig unter diesem gehalten. Derzeit erfolgt die Erstellung der Greiferspitze und die Identifikation auf experimentellem Weg entsprechend der Arbeiten von REINHART ET AL. (2010A) und HEINZ (2011). Da dies ein zeitaufwendiger und damit kostspieliger Prozess ist, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine numerische Auslegung angestrebt. Nach REINHART & KIRCHMEIER (2011) bildet ein mathematisches Modell der vertikalen Prozesskräfte den Kern der numerischen Auslegung. Das Prozessmodell wird im späteren Verlauf der Methode auch für die Regelung der handhabungsspezifischen Prozessgrößen, Luftspalt und Fügekraft, verwendet. Da das Prozessmodell mehrfach Anwendung findet (für die effiziente Greiferspitzenauslegung und für die Regelung der Handhabungsparameter), wird dessen Erarbeitung eigens in Kapitel 4 betrachtet.

¹ engl. Unified Modeling Language (Vereinheitlichte Modellierungssprache)

3 Methode zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabung

Im darauffolgenden Methodenschritt wird die Anlagentechnik gestaltet. Dazu gehört zuerst die Bereitstellung der für die Handhabung notwendigen Sensorik und Aktorik. Hierauf aufbauend wird der Ultraschallvakuumgreifer mechanisch in die Anlage integriert. Die Messung der relativen Greiferposition zum Bauteil dient der reproduzierbaren und sicheren Bauteilaufnahme und -ablage und ermöglicht im nächsten Schritt auch die Systemkalibrierung. Zur Gewährleistung eines flexiblen und automatisierten Greiferspitzenwechsels ist ein Wechselkonzept auf Basis der Bauart des Ultraschallvakuumgreifers (vgl. Unterabschnitt 2.4.2) erforderlich.

Im Anschluss an die Adaption der Anlagentechnik erfolgt die Inbetriebnahme des Ultraschallvakuumgreifers. Dazu gehört die aufgaben- und systemspezifische Kalibrierung der Montageanlage und die Auslegung des Fügekraft- und Luftspaltreglers. Im Rahmen der Kalibrierung wird zum einen die Anlage vermessen, um die relative Positionierung des Greifers über dem Bauteil und dem Bauteilträger zu erlauben. Zum anderen wird ein Prozessmodell zur Handhabung des jeweiligen Bauteils erstellt. Das Prozessmodell dient im Weiteren auch als Streckenmodell für die Auslegung des Fügekraft- und Luftspaltreglers.

Abschließend wird der Montageprozess für die ultraschallbasierte Handhabung adaptiert. Dabei sind die Handhabungsphasen von der Bauteilaufnahme bis hin zur Bauteilablage und der Aufbringung der Fügekraft für die Chip-and-Wire- und Flip-Chip-Technik zu gestalten.

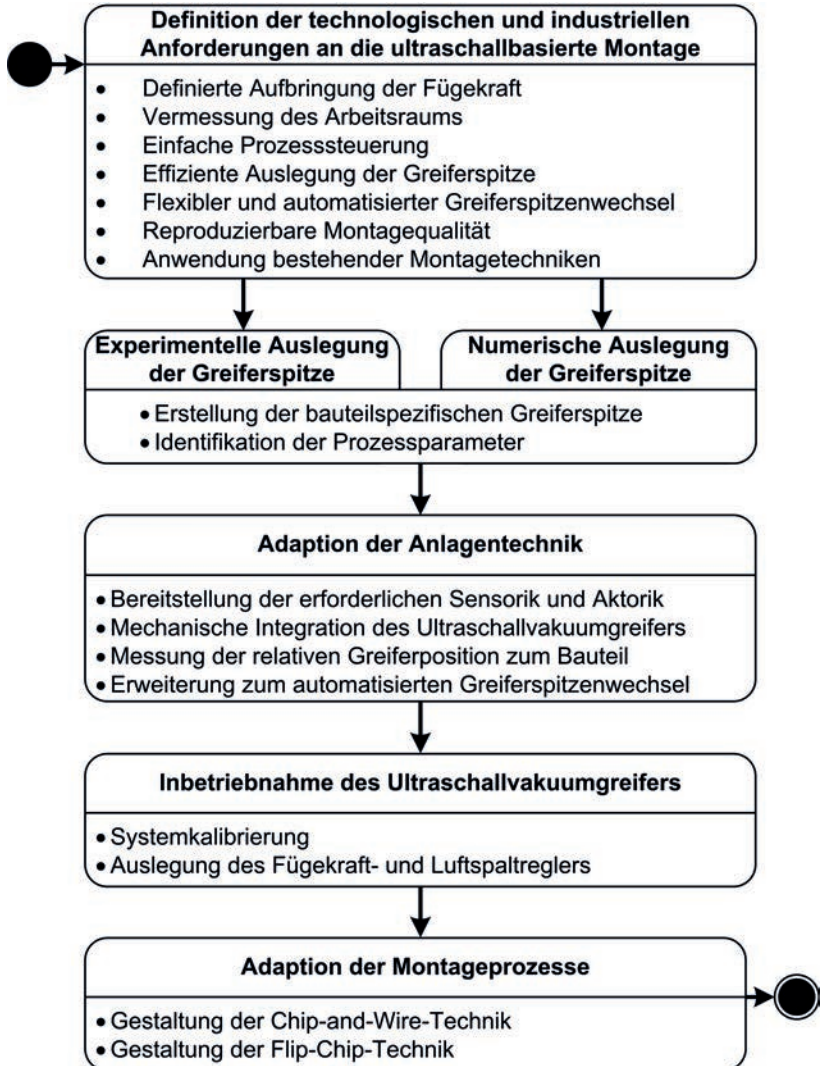


Abbildung 3.1: Veranschaulichung des für die Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall erforderlichen Vorgehens.

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

4.1 Vorgehen zur numerischen Auslegung der Greiferspitze

Nach der Definition der Montageanforderungen, inklusive des zu montierenden Bauteils, wird im zweiten Methodenschritt zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabungstechnik die bauteilspezifische Greiferspitze ausgelegt. Nur durch eine an die Bauteilgeometrie angepasste Greiferspitze wirken signifikante Zentrierkräfte während des Handhabungsvorgangs auf das Bauteil. Da bei der Auslegung etliche Faktoren zu berücksichtigen sind, definierten REINHART ET AL. (2010A) und HEINZ (2011) ein experimentelles Vorgehen (vgl. Unterabschnitt 2.4.4) zur systematischen Gestaltung der Greiferspitze. Diese zeitintensive und damit kostspielige Herangehensweise ermöglicht zwar die Auslegung des Greifers, aber sie erfüllt die gestellten industriellen Anforderungen hinsichtlich der effizienten Auslegung der Handhabungstechnologie nicht (vgl. Seite 39). Daher ist ein effizienter Auslegungsprozess erforderlich. Mit Hilfe einer numerischen Berechnung der Prozessparameter besteht nicht nur die Möglichkeit einer automatisierten Greiferspitzenauslegung, sondern auch der Betrachtung unterschiedlicher Lösungen und der Identifikation der optimalen Greiferspitze. Die Abbildung 4.1 veranschaulicht schematisch den numerischen Ansatz zur Auslegung der Greiferspitze.

Aufgrund der notwendigen Flächenkongruenz zwischen dem Bauteil und dem Greifer sind die geometrischen Abmessungen des Greifers vordefiniert. Auf dieser Greiferfläche aufbauend setzt der Generator zur Anordnung der Unterdruckbohrungen an und platziert eine oder mehrere Bohrungen. Mit den Daten der Greiferspitze (Abmessungen, Bohrungspositionen und -größen) wird das Modell zur Berechnung der Prozesskräfte gespeist. Das Modell bildet für jede Kombination aus Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt die resultierende Prozesskraft ab. Analog zur Abbildung 2.2 wird für jede Kraftfläche pro Luftspaltwert die Kraftnulllinie extrahiert und in Abhängigkeit zur Ultraschallamplitude und zum Unterdruck dargestellt (ξ - p_U -Diagramm). Sollte die Ausnutzung des Ultraschallamplituden- und Unterdruckbereichs nicht optimal sein, wie es beispielhaft in der Abbildung 4.1 durch den ersten und zweiten Anordnungsversuch der Unterdruckbohrungen dargestellt ist, erfolgt ein weiterer Iterationsschritt zur Gestaltung der Unterdruckbohrungen. Sobald eine Anordnung der Unterdruckbohrungen eine zufriedenstellende Verteilung der

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

Kraftnulllinien (n. Anordnung der Unterdruckbohrungen in Abbildung 4.1) liefert, erfolgt die Identifikation des eigentlichen Prozessfensters.

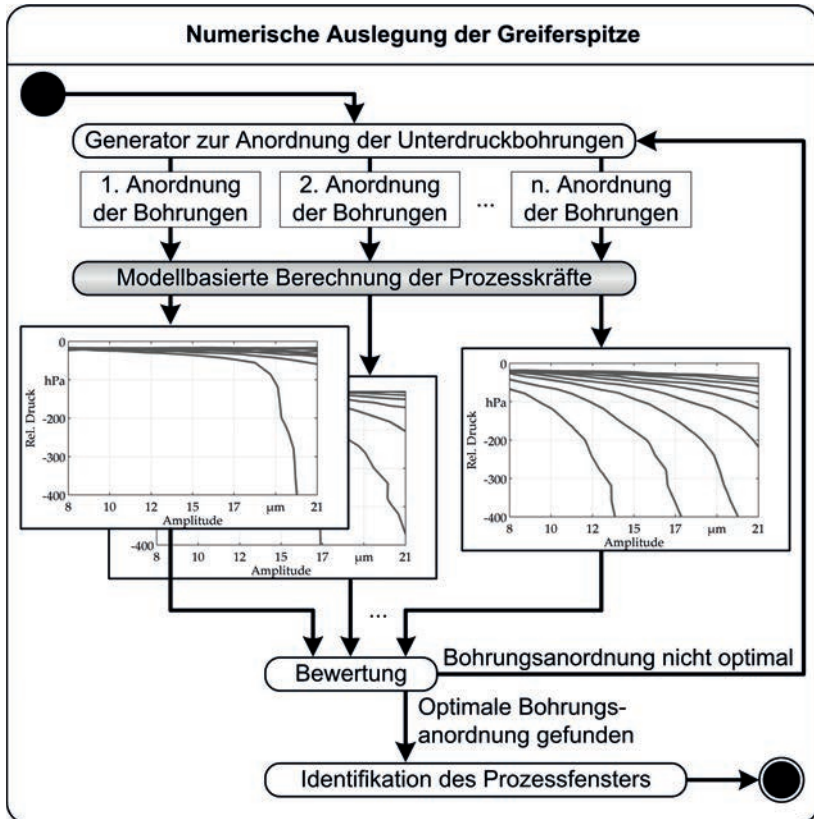


Abbildung 4.1: Numerische Auslegung der Greiferspitze. Der grau hinterlegte Schritt, die modellbasierte Berechnung der resultierenden Kräfte, bildet den Kern des numerischen Vorgehens zur Greiferspitzenauslegung.

Diese Identifikation ist erforderlich, da nicht jede Kombination aus Ultraschallamplitude und Unterdruck zu einem stabil schwebenden Bauteil führt. Im Rahmen der experimentellen Auslegung der Greiferspitze (vgl. Unterabschnitt 2.4.4) erfolgt die Ermittlung der Bauteilstabilität auf Basis der subjektiven Beobachtung des Bauteilschwebeverhaltens für jede mögliche Kombination der Prozessparameter. Das daraus bestimmte Prozessfenster unterliegt damit der subjektiven

Abschätzung des Experimentators. Zudem ist die Aufstellung des Prozessfensters zeitaufwendig. Zur Vermeidung einer subjektiven und zeitaufwendigen Abschätzung des Bauteilschwebzustands für jede Parameterkombination erarbeiteten REINHART & KIRCHMEIER (2011) ein Expertensystem zur Bewertung der geeignetsten Arbeitsparameter. Das Expertensystem und der Generator zur Anordnung der Unterdruckdüsen werden in der vorliegenden Arbeit nicht weiter vertieft, denn den Kern der numerischen Auslegung bildet das Prozessmodell zur Berechnung der resultierenden Kraft (in Abbildung 4.1 grau hervorgehoben). Da ein solches Modell bislang noch nicht existiert, liegt ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit in der Erstellung des Prozessmodells. Das Ergebnis der Prozessmodellierung wird im Weiteren auch für die Gestaltung und die Auslegung der Regelkreise genutzt.

Als Grundlage für die folgenden Modellierungsansätze werden zuerst Prozessdaten unterschiedlicher Greiferspitzen ermittelt. Die bisherigen Arbeiten von SCHILP (2007) und HEINZ (2011) konzentrierten sich auf die grundlegenden Prozesseigenschaften der ultraschallbasierten Handhabung für kleine Bauteile. In beiden Arbeiten wurde eine Bauteilgeometrie mit einer Abmessung von $6,5 \cdot 4,5 \text{ mm}^2$ verwendet. Zur Ermittlung der Einflussgrößen verschiedener Bauteilgeometrien auf die resultierende vertikale Prozesskraft müssen daher vor der eigentlichen Modellierung zusätzliche Messungen an verschiedenen Greiferspitzen durchgeführt werden. Im Anschluss daran erfolgt die Modellierung der resultierenden Kraft.

4.2 Prozesskraftmessungen verschiedener Greiferspitzen

4.2.1 Aufbau des Versuchsstandes

Die folgende Untersuchung lehnt sich an die Erkenntnisse von REINHART ET AL. (2010A) und HEINZ (2011) an, die durch die Bestimmung des Kräftegleichgewichts einen Rückschluss auf die Luftspalthöhe eines schwebenden Bauteils erlauben. Folglich genügt es, die resultierende Prozesskraft in Abhängigkeit von der Ultraschallamplitude, dem Unterdruck und der Luftspalthöhe zu messen. Abbildung 4.2 zeigt den Versuchsaufbau zur Messung der resultierenden Prozesskraft. Über eine sensible Wägezelle vom Typ KD40s 2 N und einer hochauflösenden Messelektronik vom Typ GVS-2AS der Fa. ME-Meßsysteme GmbH wird die resultierende Kraft F_{res} gemessen. Vor jedem Messbeginn ist stets auf eine Kongruenz von Greif- und Kraftmessfläche zu achten. Während eine positiv gemessene Kraft als abstoßend definiert wird, besitzt eine negativ gemessene Kraft eine anziehende Wirkung auf das Bauteil. Der Abstand h_0 zwischen der Greiffläche und der Wägezelle wird über ein hochpräzises Achssystem vom Typ M-511.DDB (angegebene Genauigkeit bei $0,5 \mu\text{m}$) der Fa. Physik Instrumente

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

GmbH eingestellt. Vor Beginn einer jeden Messung erfolgt die Bestimmung der relativen Nullposition des Greifers zur Wägezelle ($h_0 = 0$). Dazu wird die Greiffläche durch das Achssystem sukzessive an die Wägezelle angenähert und beim ersten messbaren Kraftausschlag, der einem mechanischen Kontakt zwischen Greifer und Wägezelle gleichzusetzen ist, gestoppt. Ebenfalls ist vor Messbeginn auch auf die Ebenenparallelität zwischen der Greif- und der Messfläche zu achten. Ermöglicht wird dies durch die Verwendung mehrerer präzise justierbarer Kipptische.

Nachdem der am Bauteil bzw. Kraftsensor anliegende Unterdruck sehr stark vom Luftspaltwert beeinflusst wird, ist nach HEINZ (2011) eine Regelung des Druckes erforderlich, um gleichbleibende und unabhängige Prozesseingangsgrößen zu schaffen. Zur Vermeidung von Hystereseeffekten durch das magnetische Proportionaldruckventil wurde ein Zweipunktregler mit Hysterese für PT₁-Strecken ohne Totzeit nach SCHULZ (1995) realisiert. Alle vorangegangenen Maßnahmen erlauben die Messungen der resultierenden Kraft zu jeder möglichen Eingangskombination aus Ultraschallamplitude ζ , Unterdruck p_U und Luftspalt h_0 . Der Austausch unterschiedlicher Greiferspitzen wird durch eine Schraubverbindung in der Ultraschallsonotrode ermöglicht.

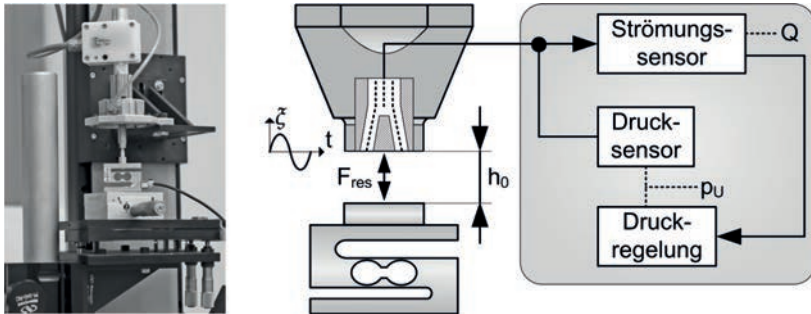


Abbildung 4.2: Darstellung des Versuchsstandes und der erfassten Messgrößen

Der vorgestellte Versuchsstand und die damit ermittelten Messwerte wurden aus Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) mit dem Titel „Kraftge-regeltes berührungsloses Handhaben und Fügen mittels Leistungsumschall“ finanziert und unter dem Kennzeichen ZA 288/31-1 geführt.

4.2.2 Voruntersuchungen

Vor dem Beginn der eigentlichen Messungen müssen die zu untersuchenden Parameter festgelegt werden. Den Ausgangsparameter bildet die resultierende

Prozesskraft. Als Eingangsparameter kommen sowohl direkte Prozessparameter¹ als auch geometrische Parameter der Greiferspitze in Frage. Ausschlaggebend für die Auswahl der zu betrachtenden Parameter ist deren lineare Unabhängigkeit zueinander. Der vorhin beschriebene Versuchsaufbau (vgl. Unterabschnitt 4.2.1) ermöglicht die unabhängige Einstellung der direkten Prozessparameter Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt². Im Gegensatz zu den direkten Prozessparametern ist die Unabhängigkeit der geometrischen Parameter noch nicht klar. Mögliche Parameter sind die Greiffläche A_G , die schallabstrahlende Fläche A_E , die Unterdruckfläche A_U , die Bohrungsanzahl n_\emptyset und -position d_\emptyset sowie die Kantenlängen a und b eines rechteckigen Bauteils. Da eine Flächenänderung immer eine Änderung der Kantenlängen bedingt, kann nur ein Parameter sinnvoll variiert werden. Um den dominanteren Parameter zu identifizieren, wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen dem Flächenwert und den Kantenlängen näher betrachtet. Sollte die Fläche der dominierende Faktor sein, müssten bei Greiferspitzen, mit identischen Flächenwerten und unterschiedlichen Kantenlängen, ähnliche Prozesskräfte resultieren. Zur Bestätigung oder Widerlegung dieser Vermutung wurden drei unterschiedliche Greiferspitzen, entsprechend der Tabelle 4.1, gefertigt und mit Hilfe des Versuchsaufbaus gemäß Unterabschnitt 4.2.1 vermessen. Die Anordnung der Unterdruckdüsen blieb bei allen drei Greiferspitzen identisch. Durch die Wahl dieser Maße soll geklärt werden, ob die schallabstrahlende Fläche oder die Größe der Kantenlängen ausschlaggebend sind. Die Tabelle 4.1 veranschaulicht auch das zusammengefasste Untersuchungsergebnis, das durch die Abbildung B.1 a–c im Anhang B dargestellt wird. Die Messergebnisse der maximal resultierenden Kraft jeder Greiferspitze zeigen jedoch einen anderen Zusammenhang als vermutet. Bei der zweiten Greiferspitze liegt die maximale resultierende Kraft bei lediglich 45% der maximalen resultierenden Kraft der ersten Greiferspitze. Weiterhin unterscheiden sich die letzten beiden Greiferspitzen nur um 6% in der gemessenen Kraft.

Innerhalb der durchgeführten Stichprobenmessung zeigt sich die Erkenntnis, dass nicht die Fläche, sondern die kleinere der beiden Kantenlängen $\min(a, b)$ einen dominierenden Effekt auf die resultierende Kraft ausübt. Die Darstellung

¹HEINZ (2011) unterteilte die Eingangsparameter in direkte Prozessparameter und geometrische Parameter. Während die geometrischen Parameter durch den Bau der Greiferspitze festgelegt sind, werden die direkten Parameter, Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt, zu jedem Zeitpunkt der Bauteilhandhabung geändert.

²Die Ultraschallamplitude besitzt keinerlei Abhängigkeiten und kann frei eingestellt werden. Der Unterdruck besitzt eine Abhängigkeit zum Luftspalt, da eine Luftspaltänderung auch eine Änderung des Luftmengenstroms erzeugt und infolgedessen auch den anliegenden Unterdruck beeinflusst. Aufgrund der Unterdruckregelung wird diese Abhängigkeit aber aufgehoben, da der Luftmengenstrom so eingestellt wird, dass immer der gewünschte Unterdruck resultiert. Der Luftspalt besitzt nur dann eine Abhängigkeit zur Ultraschallamplitude und zum Unterdruck, wenn das Schwebeverhalten eines Bauteils betrachtet wird. Durch die Hochachse des Versuchsaufbaus lässt sich der Luftspaltwert unabhängig von allen anderen Parametern justieren.

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

Nr.	a [mm]	b [mm]	A_G [mm ²]	$F_{res}(max)$ [mN]	Abnahme [%]
1	5	5	25	175	—
2	4	6,25	25	80	45%
3	4	4	16	68	6%

Tabelle 4.1: Darstellung der verwendete Greiferspitzen zur Bestimmung der dominanten geometrischen Einflussgröße zwischen den Kantenlängen a , b und dem sich daraus ergebenden Flächenwert A_G sowie die Messergebnisse der maximalen Kraft $F_{res}(max)$ und deren Abnahme.

der Gleichgewichtszustände aller drei untersuchten Greiferspitzen in Abhängigkeit zum Unterdruck und Ultraschall in Abbildung B.1 d veranschaulicht diese Erkenntnis. Das Ergebnis wird als Indikation für die Auswahl des ersten geometrischen Parameters, die Größe der kleinsten Kantenlänge der Greiferspitze, in den folgenden Versuchen verwendet.

Ebenso wie die beiden gerade diskutierten Parameter kann auch die Anzahl der Unterdruckbohrungen nicht von deren Größe gesondert untersucht werden. Eine höhere Bohrungsanzahl bedingt immer auch eine Steigerung der summierten Unterdruckfläche. Ein Vergleich der Bohrungsanzahl anhand deren Flächenwerte ist zudem nicht sinnvoll, da sich nach SCHILP (2007) unterschiedliche Druckprofile im Luftspalt ergeben. Dadurch wirkt ein zusätzlicher Einfluss auf die resultierende Kraft, der im Faktor der Bohrungsanzahl untergeht und gesondert betrachtet werden müsste. Folglich wird der Einfluss des Parameters Bohrungsanzahl anhand zweier unterschiedlicher Versuchsblöcke qualitativ untersucht. Die weiteren geometrischen Faktoren bilden der Durchmesser bei einer Unterdruckbohrung bzw. der Abstand der Unterdruckbohrungen im Falle zweier Bohrungen. Durchmesser und Bohrungsabstand werden entsprechend der Aufteilung durch die Bohrungsanzahl in unterschiedlichen Versuchsblöcken betrachtet.

4.2.3 Gestaltung des Versuchsplans

Zur Bestimmung der signifikanten Einflussgrößen aus den genannten Parametern sind zahlreiche Versuche erforderlich. Simulierte Experimente können nicht hinzugezogen werden. Zum einen weist die numerisch berechnete Kraft der Squeeze-Film-Levitation für kleinere Flächen noch eine zu hohe Abweichung zur realen Messung auf, zum anderen liegt die Berechnungszeit einer einzelnen Simulation, selbst bei modernen Rechnern, bei etlichen Tagen (HEINZ 2011). Folglich bleibt für die Bestimmung der Effekthöhen der genannten Parameter nur das reale Experiment. Um die Ergebnisauswertung aller Versuche übersichtlich und zusammenfassend zu beschreiben, wird die Herangehensweise

4.2 Prozesskraftmessungen verschiedener Greiferspitzen

des Screening-Experiments aus der statistischen Versuchsplanung eingesetzt (MAYERS 1997; KLEIN 2007; KLEPPMANN 2008). Das Ziel der Versuche liegt einerseits in der Schaffung eines grundlegenden Verständnisses über die Wirkung der Eingangsgrößen auf die Prozesskraft, andererseits dienen die Messdaten im späteren Verlauf der vorliegenden Arbeit der Adaption der erstellten Prozessmodelle. Wie im vorherigen Unterabschnitt (vgl. 4.2.2) beschrieben, werden die Versuche in zwei Blöcke unterteilt, um den Einfluss der Bohrungsanzahl zu betrachten.

Im ersten Versuchsblock werden anhand verschiedener Greiferspitzen mit einer zentrischen Bohrung die prinzipiellen Auswirkungen der kleinsten Kantenlänge, des Bohrungsdurchmessers sowie der Prozessparameter auf die resultierende Kraft untersucht. Anschließend wird im zweiten Versuchsblock anstelle des Bohrungsdurchmessers die Auswirkung unterschiedlicher Abstandslängen bei zwei Unterdruckbohrungen betrachtet. Die Parameterstufen der Ultraschallamplitude, des Unterdrucks und des Luftspalts repräsentieren sinnvolle Werteänderungen, die zu signifikanten Kraftänderungen führen. Die zu untersuchenden Parameter wurden entsprechend den Vorversuchen so gewählt, dass für jede Kombination sowohl positive als auch negative Kräfte auftreten. Die Tabelle 4.2 veranschaulicht die Stufenwerte des ersten und zweiten Versuchsblocks.

Stufe	ξ	p_U	h_0	$\min(a, b)$	\varnothing	d_\varnothing
1. Versuchsblock: $n_\varnothing = 1$						
+	18,6 μm	-280 hPa	30 μm	5 · 5 mm^2	0,6 mm	0 mm
-	8,0 μm	-40 hPa	20 μm	4 · 6,25 mm^2	1,0 mm	0 mm
2. Versuchsblock: $n_\varnothing = 2$						
+	18,6 μm	-280 hPa	30 μm	5 · 5 mm^2	0,6 mm	2,6 mm
-	8,0 μm	-40 hPa	20 μm	4 · 6,25 mm^2	0,6 mm	1,0 mm

Tabelle 4.2: Verwendeter Stufenabstand der Eingangsparameter.

Die Kombination aller Parameterstufen führt zu $2 \cdot 2^5 = 64$ Einzelversuchen. Da aber nach SCHEFFLER (1997) die Informationen von 3-Faktor-Wechselwirkungen und höheren Effekten durch das Messrauschen untergehen, wurde ein 2^{5-1} Teilfaktorplan entsprechend der Tabelle A.2 im Anhang A gewählt und die Anzahl an Einzelversuchen halbiert.

4.2.4 Auswertung

Nach der Versuchsdurchführung werden im Folgenden die Ergebnisse diskutiert. Die Einzelmessungen werden durch die Abbildungen B.2 bis B.5 im Anhang B dargestellt. Jede dieser Abbildungen stellt den Kraftverlauf in Abhängigkeit

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

von der Ultraschallamplitude und vom Unterdruck bei einem konstanten Luftspaltwert dar. Die Unterschiede zwischen den Einzelmessungen ergeben sich aus der Variation der geometrischen Parameter und des Luftspaltwertes. Für die Auswertung der Effekte ist es wichtig, dass die gesammelten Messdaten jedes Versuches eine Normalverteilung aufweisen. Hierfür wird ein beliebiger Versuchspunkt stellvertretend für alle anderen Punkte näher betrachtet und auf dessen Normalverteilung hin untersucht. Dazu werden die Messdaten einem Shapiro-Wilks-Test auf Normalverteilung unterzogen. Das Testergebnis bestätigt die Annahme einer Nullhypothese im Falle einer Normalverteilung, womit eine direkte Verwendung der Daten ermöglicht wird. Dementsprechend können die Kennwerte der Wahrscheinlichkeitsverteilung μ , σ^2 und σ aus den Berechnungen der Schätzwerte für den Mittelwert, für die Varianz und für die Standardabweichung bestimmt werden³. Für den diskutierten Messpunkt ergeben sich die folgenden Werte:

$$\mu = 0,1793 \text{ N} \quad \sigma^2 = 3,3753 \cdot 10^{-5} \text{ N}^2 \quad \sigma = 0,0058 \text{ N} \quad (4.1)$$

Ausgehend von der Standardabweichung kann die Wahrscheinlichkeitsverteilung $p(F_{res})$ der Kraftmesspunkte um den Mittelwert μ angegeben werden.

$$p(F_{res}) = \begin{cases} 68,3 \% \text{ der Messpunkte liegen im Intervall } \mu \pm \sigma = 5,8 \text{ mN}, \\ 95,4 \% \text{ im Intervall } \mu \pm 2\sigma = 11,6 \text{ mN und} \\ 99,7 \% \text{ im Intervall } \mu \pm 3\sigma = 17,4 \text{ mN} \end{cases}$$

Für die Schwankungen der Kraftmessungen sind die Messwertstreuungen der Wägezelle und der Unterdruckregelung verantwortlich.

Zur Bewertung der Aussagekraft der errechneten Ergebnisse wird für jeden Versuchspunkt ein Konfidenzintervall berechnet. Das Konfidenzintervall hängt zum einen von der geforderten Wahrscheinlichkeit ab, mit der der wahre Mittelwert μ im definierten Bereich liegen soll, und zum anderen vom Freiheitsgrad f_{DoE} . Der Freiheitsgrad f_{DoE} beschreibt in der Statistik allgemein die Anzahl unabhängiger Einzelinformationen subtrahiert um die Anzahl der in der Berechnung verwendeten Parameter (HAGL 2008). Der Freiheitsgrad wird durch die

³Trotz sorgfältigster Versuchsdurchführung unterliegen die Versuchsergebnisse bei mehrmaliger Versuchsdurchführung einer gewissen Streuung. Der wahre Mittelwert μ einer Messreihe ist daher immer unbekannt und kann nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in einem Vertrauensintervall oder dem Konfidenzintervall liegen (SCHEFFLER 1997). Unter Anwendung des Maximum-Likelihood-Prinzips kann mathematisch gezeigt werden, dass im Falle einer Gaußschen Normalverteilung die Schätzwerte für den Mittelwert \bar{y} und die Varianz s^2 eine gute Näherung an die wahren, unbekanntenen Werte μ und σ^2 sind (PAPULA 2001A).

$$\Rightarrow \mu \approx \bar{y} \quad \text{und} \quad \sigma^2 \approx s^2$$

Gleichung

$$f_{DoE} = N - J - 1 \quad (4.2)$$

definiert, mit N als dem gesamten Versuchsumfang und J als der Anzahl an unabhängigen Variablen bzw. zu untersuchenden Faktoren. Um die Signifikanz eines Effektes sicher zu bestimmen, wird die Erfüllung des 99%igen Signifikanzniveaus gefordert. Hierzu wird zuerst der t-Wert entsprechend der Tabelle A.1 im Anhang A und dem Freiheitsgrad f (Gleichung (4.2)) wie folgt errechnet.

$$f = \underbrace{90}_{\text{Einzelmessungen pro Messpunkt}} - \underbrace{15}_{\text{Anzahl (Wechsel-)Effekte}} - 1 = 74 \quad (4.3)$$

$$\Rightarrow t = 2,648 \quad (4.4)$$

Unter Verwendung des Mittelwertes s_d aller Einzelvarianzen s^2 und dem Mittelwert μ jedes Versuchspunktes errechnen sich die dazugehörigen Konfidenzintervalle

$$[\mu - s_d \cdot t ; \mu + s_d \cdot t] \quad (4.5)$$

für beide Versuchspläne, die im Anhang durch die Tabelle B.1 wiedergegeben werden. Alle Effekte, abgesehen von der Nummer 14 im ersten Versuchsblock und der Nummer 11 im zweiten Versuchsblock, besitzen einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Kraft. Die Auswertung beider teilfaktoriellen Versuchspläne führt zu den in den Abbildungen 4.3 und 4.4 dargestellten Effektauswirkungen. Im Folgenden werden die Ergebnisse beider Versuchsblöcke der Reihe nach diskutiert. Die Nummerierung der folgenden Aufzählung bezieht sich auf die jeweilige Effekt Nummer der genannten Abbildungen. Eine zusätzliche Unterscheidung eines Effektes durch a oder b kennzeichnet den Versuchsblock 1 oder 2 im Falle der Betrachtung des Bohrungsdurchmessers oder des Abstandes zweier Unterdruckbohrungen.

1. Der Effekt des Ultraschalls besitzt in beiden Versuchsblöcken den höchsten Einfluss auf die resultierende Kraft. Bei einer Erhöhung der Ultraschallamplitude von $8 \mu\text{m}$ auf $18,6 \mu\text{m}$ erhöht sich die resultierende Kraft⁴ um 91 mN im ersten Versuchsblock und um 60 mN im zweiten. Die geringere Ultraschallkraft im zweiten Versuchsblock ist auf den Unterschied der Bohrungsanzahl zurückzuführen. Hierbei zeigt sich ganz eindeutig, dass die Unterdruckfläche bzw. deren Verhältnis zur schallabstrahlenden Fläche eine untergeordnete Rolle spielt, da alleine vom Flächenwert die Greiferspitze mit einer zentrischen Bohrung von $1,0 \text{ mm}$ Durchmesser eine

⁴Während eine positiv gemessene Kraft mit einer abstoßenden Wirkung gleichzusetzen ist, repräsentiert eine negative Kraft eine anziehende Wirkung zum Greifer.

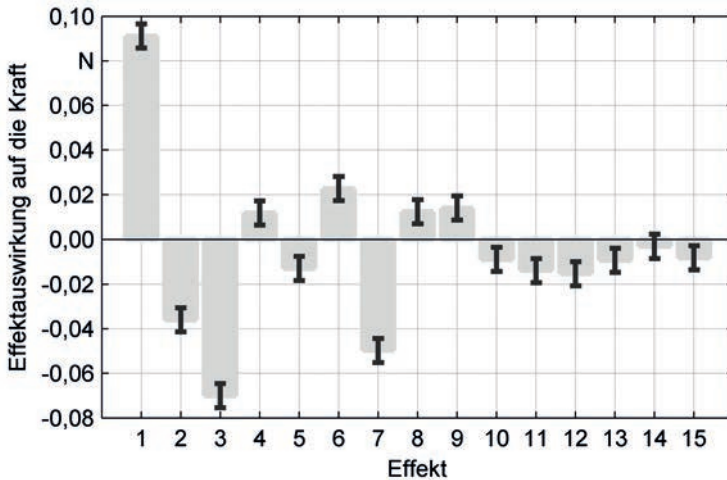


Abbildung 4.3: Veranschaulichung der Haupteffekte und zweifach Wechselwirkungseffekte des Versuchsblocks 1 inklusive des jeweiligen Konfidenzintervalls.

- größere Unterdruckfläche besitzt⁵ als die mit zwei Unterdruckbohrungen.
2. Eine Änderung des Unterdrucks von -40 hPa auf -280 hPa erhöht, wie erwartet, die anziehende Kraft auf ein Bauteil um -36 mN bei einer Unterdruckbohrung und um -63 mN bei zwei Unterdruckbohrungen. Die fast um 50% höhere Kraftwirkung bei zwei Bohrungen wurde bereits von SCHILP (2007) beobachtet. HEINZ (2011) erklärte diesen Sachverhalt durch das Zustandekommen eines überlagerten Druckprofils mehrerer Bohrungen, die eine viel höhere flächenwirksame Kraft bewirken.
 3. Mit einem durchschnittlichen Wert von -70 mN im ersten Versuchsblock und -41 mN im zweiten Versuchsblock beeinflusst eine Luftspalterhöhung von $20 \mu\text{m}$ auf $30 \mu\text{m}$ ebenfalls die resultierende Kraft. Die Kraftabnahme lässt sich dadurch erklären, dass die Wirkung des Ultraschalls mit größerem Abstand exponentiell abnimmt. Im Gegensatz dazu verhält sich die Wirkung des Unterdrucks fast linear und besitzt damit einen höheren Fernwirkeffekt als der Ultraschall. REINHART ET AL. (2010A) nutzen die-

⁵ $A_U(n_\varnothing = 1, \varnothing = 0,6 \text{ mm}) = 0,283 \text{ mm}^2$; $A_U(n_\varnothing = 1, \varnothing = 1,0 \text{ mm}) = 0,785 \text{ mm}^2$;
 $A_U(n_\varnothing = 2, \varnothing = 0,6 \text{ mm}) = 0,565 \text{ mm}^2$

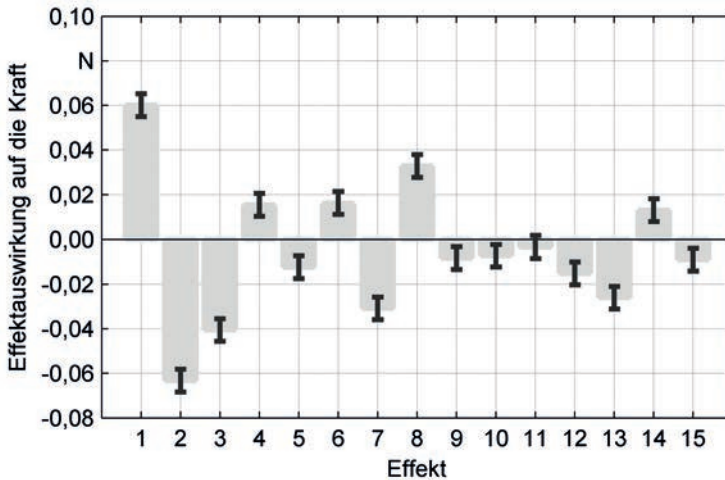


Abbildung 4.4: Veranschaulichung der Haupteffekte und zweifach Wechselwirkungseffekte des Versuchsblocks 2 inklusive des jeweiligen Konfidenzintervalls.

- sen Sachverhalt, um Bauteile zu greifen, da die Annäherung des Greifers an das Bauteil zuerst dessen Anheben bewirkt.
4. Die Erhöhung der kleinsten Kantenlänge der Greiferspitze wirkt sich sowohl bei einer Unterdruckbohrung als auch bei zwei Unterdruckbohrungen in etwa gleich stark um 14 mN aus. Dies ist ein besonders interessantes Ergebnis, da alle untersuchten Greiferspitzen eine Fläche von 25 mm^2 besitzen. Folglich ist die kleinere von beiden Kantenlängen der maßgebende Parameter auf die Kraft und nicht die Fläche, wie bereits die Voruntersuchung zeigt.
 5.
 - a) Im Versuchsblock 1 wurde der Durchmesser von $0,6 \text{ mm}$ auf $1,0 \text{ mm}$ erhöht. Eine größere Unterdruckbohrung erzeugt ein breiteres Unterdruckprofil und erhöht damit die anziehende Kraft. Der Versuch konnte diese Erwartung mit einer gemessenen Kraft von -13 mN bestätigen.
 - b) Eine Vergrößerung des Bohrungsabstandes im Falle des Versuchsblocks 2 führt ebenfalls zu einer höheren anziehenden Kraft um durchschnittlich $-12,5 \text{ mN}$.
 6. Eine gleichzeitige Stufenerhöhung der Ultraschallamplitude und des Unterdrucks erzeugt eine Krafterhöhung von 23 mN im ersten Versuchsblock

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

und 16 mN im zweiten. Die Kombination beider Parameter unterliegt somit einer gegenseitigen Beeinflussung.

7. Der Wechselwirkungseffekt zwischen Ultraschall und Luftspalt ist stark mit einer durchschnittlichen Kraftabnahme von $-50 mN$ und $-31 mN$ ausgeprägt. Dieses Ergebnis bestätigt abermals die exponentielle Zunahme der Ultraschallkraft mit kleiner werdenden Luftspaltwerten. Im Falle einer gleichzeitigen Erhöhung des Luftspaltes und des Ultraschalls überwiegt daher die kraftabnehmende Wirkung des Luftspaltes. Dies kommt aber der Bauteilaufnahme zugute. Wie vorhin beschrieben verwenden REINHART ET AL. (2010A) den anziehenden Fernwirkeffekt des Unterdrucks. Das Bauteil wird dadurch angehoben, womit der Luftspalt verkleinert wird. Mit kleiner werdendem Luftspalt erhöht sich die abstoßende Wirkung des Ultraschalls und „bremst“ die Bewegung des Bauteils zur schwingenden Greiffläche hin ab, bis das Bauteil im Kräftegleichgewicht schwebt.
8. Eine Erhöhung der Ultraschallamplitude und die gleichzeitige Änderung der kleinsten Kantenlänge des Greifers von 4 mm auf 5 mm führt zu einer Steigerung der resultierenden Kraft auf 12 mN bei einer Unterdruckbohrung und auf 33 mN bei zwei Unterdruckbohrungen. Der Grund, weshalb dieser Effekt bei zwei Unterdruckbohrungen stärker ausgeprägt ist, konnte nicht erklärt werden.
9.
 - a) Eine gleichzeitige Erhöhung der Ultraschallamplitude und des Bohrungsdurchmessers führt zu einer durchschnittlichen Kraftsteigerung von 14 mN .
 - b) Im Gegensatz dazu verringert eine simultane Erhöhung der Ultraschallamplitude und des Bohrungsabstandes die resultierende Kraft um $-8 mN$.
10. Ähnlich dem Wechselwirkungseffekt zwischen dem Luftspalt und der Ultraschallamplitude findet auch eine gegenseitige Beeinflussung des Unterdrucks und des Luftspaltes statt. Eine gleichzeitige Erhöhung beider Parameter bewirkt eine Kraftverringering um $-9 mN$ bzw. um $-7 mN$. Nachdem die Ergebniswerte beider Versuchsblöcke sehr nah beieinander liegen, kann davon ausgegangen werden, dass die Bohrungsanzahl hier keinen Einfluss besitzt.
11. Die kleinste Kantenlänge des Greifers tritt mit dem Unterdruck ebenfalls in Wechselwirkung. Während im ersten Versuchsblock eine Kraftänderung von $-14 mN$ entsteht, konnte im zweiten Versuchsblock dieser Wechselwirkungseffekt nicht als signifikant nachgewiesen werden.
12. Die Erhöhung des Unterdrucks und des Bohrungsdurchmessers im Versuchsblock 1 bzw. die Erhöhung des Bohrungsabstandes im Versuchsblock 2 führt in beiden Fällen zu einer Kraftminderung von $-15 mN$.

13. Der Wechselwirkungseffekt zwischen dem Luftspalt und der kleinsten Kantenlänge des Greifers bedingt eine durchschnittliche Kraftänderung um -9 mN bei einer Unterdruckbohrung und -26 mN bei zwei Unterdruckbohrungen.
14.
 - a) Ein Wechselwirkungseffekt zwischen dem Luftspalt und dem Bohrungsdurchmesser konnte aufgrund der fehlenden Signifikanz nicht bestätigt werden.
 - b) Dagegen treten der Luftspalt und der Bohrungsabstand in Wechselwirkung und verursachen bei gleichzeitiger Erhöhung eine Kraftänderung von -13 mN .
15.
 - a) Die letzte Wechselwirkung beschreibt den Effekt zwischen der kleinsten Kantenlänge und dem Durchmesser und bewirkt eine durchschnittliche Kraftänderung von -8 mN .
 - b) Eine gleichzeitige Erhöhung des Bohrungsabstandes und der kleinsten Greiferkantenlänge mindert die resultierende Kraft um -9 mN .

Die Ergebnisse der Prozesskraftmessungen verschiedener Greiferspitzengeometrien zeigen eine starke Wechselwirkung aller Parameter. Diese bestätigen unter anderem die bisherigen Erkenntnisse (vgl. Unterabschnitt 2.4.4), dass die resultierende Prozesskraft nicht aus einer linearen Superposition der Einzelkräfte aus Unterdruck und Ultraschall berechnet werden kann. Das Vorhandensein des Wechselwirkungseffektes zwischen der Ultraschallamplitude und dem Unterdruck ist ein eindeutiger Beleg dafür. Die betrachteten Parameter sowie die resultierende Prozesskraft verfügen über keine zeitliche Abhängigkeit. Die eingestellte Prozesskraft ist nur von den Werten der Eingangsparameter abhängig und nicht von einem früheren Zustand. Darüber hinaus zeigen die Messungen eine stetige Änderung der Prozesskraft in Abhängigkeit zu den Prozessparametern. Jeder Kraftwert ist dabei genau auf einen Wertesatz der Eingangsparameter zurückzuführen.

Daraus lässt sich schließen, dass das Verhalten des untersuchten Systems eine stetige, nichtlineare und statische Abbildung der Eingangsparameter auf die resultierende Prozesskraft aufweist. Die genannten Systemeigenschaften treffen auch auf eine Funktion im hyperdimensionalen Raum zu, deren Rechenvorschrift allerdings noch unbekannt ist. Mit der Identifikation aller dazugehörigen Funktionsparameter wäre ein vollständiges Modell des Systems erstellt. Jedoch sind die Struktur der gesuchten Funktion und damit der Aufwand zur Identifikation der dazugehörigen Funktionsparameter unbekannt. Zur Komplexitätsreduzierung der Modellierungsaufgabe wird im folgenden Abschnitt das System als „Black-Box-Modell“ (JOHANSEN 2007) betrachtet.

4.3 Prozessmodellierung mittels Multi-Layer-Perceptron-Netz

4.3.1 Funktionsweise eines Multi-Layer-Perceptron-Netzes

Eine Möglichkeit zur Modellierung von „Black-Box“-Vorgängen stellt die Methode der künstlichen, neuronalen Netze dar (SCHRÖDER 2010). Deren Zusammenhänge und Operationen orientieren sich am Vorbild des menschlichen Gehirns (STOICA-KLÜVER ET AL. 2009). Mit dem Ansatz der künstlichen, neuronalen Netze wird die Fähigkeit zu Lernen durch einfache mathematische Bausteine nachgebildet. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Ansätze zur Gestaltung künstlicher, neuronaler Netze ist an dieser Stelle eine Auswahl des zu verwendenden Netztyps zu treffen. Als Auswahlkriterium zur Modellierung des ultraschallbasierten Handhabungsprozesses dient das in Abschnitt 4.2 beobachtete Verhalten einer statischen, stetigen und nichtlinearen Funktion. Nach SCHRÖDER (2010) eignet sich hierfür vor allem das Multi-Layer-Perceptron-Netz (MLP-Netz).

Der Aufbau des Multi-Layer-Perceptron-Netzes weist die größte Übereinstimmung mit dem des menschlichen Gehirns auf. Analog zu dem biologischen Vorbild besteht ein Neuron⁶ aus einem Zellkörper, dem Dendriten und dem Axon (HOFMANN 2003). Die Dendriten sammeln die eingehenden Informationen der Zelle auf und entsprechen damit der Zelleingabe \underline{u} . Das Axon \hat{y} gibt das summierte Ergebnis der Zelle weiter. Synapsen übertragen Informationen zwischen dem Axon eines vorherigen Neurons und einem Dendriten einer nachfolgenden Zelle. Je stärker eine Verbindung genutzt wird, desto ausgeprägter ist diese. Die Synapsenstärke wird mathematisch als Verbindungsgewicht ϑ dargestellt. Zu dem Summationsergebnis aller Eingangswerte \underline{u} wird innerhalb des technischen Neurons der Offset b addiert. Das Ergebnis s wird anschließend durch die nichtlineare Transferfunktion $\mathcal{T}(s)$ auf den Neuronenausgang \hat{y} abgebildet. Mathematisch lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt ausdrücken.

$$\hat{y} = \mathcal{T}(s) = \mathcal{T}\left(\vartheta^T \cdot \underline{u} + b\right) \quad (4.6)$$

Bei der Transferfunktion ist oftmals auch die Rede von der Entscheidungs- bzw. Aktivierungsfunktion, da sie für die Stimulationshöhe des einzelnen Neurons in Abhängigkeit zum Eingangswert verantwortlich ist. Abbildung 4.5 stellt unterschiedliche Transferfunktionen dar. Nach STURM (2000) werden für Multi-Layer-Perceptron-Netze hauptsächlich sigmoide⁷ Funktionen verwendet. Diese Funktionsform ermöglicht eine gleiche Bewertung kleiner wie auch großer Signalam-

⁶hier gleichbedeutend mit dem Begriff Perzeptron

⁷S-förmige Funktion

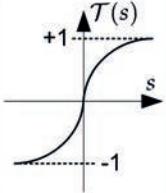
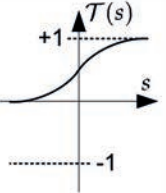
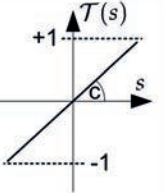
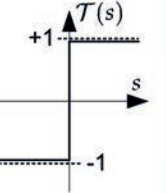
Tangenshyperbolicusfunktion	Logistikfunktion	Lineare Funktion	Signumfunktion
$\mathcal{T}(s) = \tanh(s)$	$\mathcal{T}(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}$	$\mathcal{T}(s) = c \cdot s$	$\mathcal{T}(s) = \text{sign}(s)$
			
weiche Transferfunktionen			harte Transferfunktion

Abbildung 4.5: Beispiele für unterschiedliche Transferfunktionen, nach HOFMANN (2003).

plituden. Damit das neuronale Netz ein vorgegebenes Ein-/Ausgangsverhalten adaptieren kann, müssen die Verbindungsgewichte θ und die Offsetwerte b einer jeden Transferfunktion durch einen Lernalgorithmus angepasst werden. Nach HOFMANN (2003) können bei Multi-Layer-Perceptron-Netzen nur nichtlineare Adaptionsverfahren eingesetzt werden, da die Netzgewichte θ nichtlinear auf die Ausgangssignale wirken. Eines der gängigsten Adaptionsverfahren neuronaler Netze ist das Gradientenabstiegsverfahren (ENDISCH 2009) sowie unterschiedliche Variationen daraus, wie der Backpropagation-Algorithmus (HOFMANN 2003), das Gauß-Newton- oder das Levenberg-Marquardt-Verfahren (HANKE-BOURGOIS 2006).

4.3.2 Bewertung verschiedener Netztopologien

Zu Beginn der Erstellung eines neuronalen Netzes steht die Wahl einer geeigneten Topologie entsprechend der Aufgabenstellung. Nach HOFMANN (2003) gibt es in der Praxis keine allgemein gültigen Regeln zur Gestaltung des neuronalen Netzes, dessen optimaler Aufbau an Schichten und Neuronen stets durch gezieltes Ausprobieren ermittelt werden muss. Auf der einen Seite muss die Neuronen- und Schichtzahl ausreichend groß sein, um die Komplexität der Prozesskraft aus den Eingangsparametern abzubilden. Auf der anderen Seite führt ein zu groß dimensioniertes Netz zu einer hohen Anzahl an Optimierungsparametern, die den

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

Rechenaufwand bei der Adaption erhöht und das Risiko der Überanpassung⁸ steigt.

Zur objektiven Bewertung verschiedener Netztopologien wird der mittlere absolute Fehler \bar{e} gemäß der Gleichung (4.7) verwendet. Über die Division der Fehlerstandardabweichung s_e , entsprechend der Gleichung (4.8), mit einer Referenzkraft F_{ref} wird durch Gleichung (4.9) der prozentuale Modellfehler E berechnet. Das prozentuale Divisionsergebnis lässt einen Rückschluss auf die Genauigkeit des modellierten Vorgangs zu und ermöglicht nicht nur einen Vergleich unterschiedlicher Netztopologien, sondern auch einen allgemeinen Ansatz zur Bewertung anderer Prozessmodelle (vgl. Abschnitt 4.4).

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i \quad \text{mit} \quad e_i = |F_{Modell}(i) - F_{res}(i)| \quad (4.7)$$

$$s_e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2} \quad (4.8)$$

$$E = \frac{s_e}{F_{ref}} \quad (4.9)$$

In die ersten beiden Gleichungen geht sowohl die interpolierte Kraft $F_{Modell}(i)$ als auch die gemessene Kraft $F_{res}(i)$ mit ein.

4.3.3 Aufbau und Adaption

Für die zu berechnende Prozesskraft besteht keine zeitliche Abhängigkeit von den Eingangsparametern. Deshalb wird ein reines Feed-Forward-Netz verwendet, bei dem jede Schicht direkt mit der nachfolgenden Schicht verbunden ist. Für jedes neuronale Netz sind vorab die Input-, Transfer- und Ausgangsfunktionen zu definieren (vgl. Abbildung 4.5). Da die zu berechnende Prozesskraft sowohl positiv als auch negativ auftritt, wird die Logistikkfunktion (vgl. Abbildung 4.5) ausgeschlossen. Weiterhin sind Kraftsprünge nicht zu erwarten, weshalb auch Signumfunktionen ignoriert werden. Somit bleiben als Transferfunktionen nur die Tangenshyperbolicusfunktion und die lineare Funktion. Während für die Eingangsschicht und für die verdeckte(n) Schicht(en) die Tangenshyperbolicusfunktion verwendet wird, wird für die Ausgangsfunktion eine lineare Übertragungsfunktion festgelegt. Die Wahl der Eingangsparameter orientiert sich an

⁸Nach BACKHAUS (2008) charakterisiert eine Überanpassung (engl. *overfitting*) ein Modell, das irrelevante funktionsbeschreibende Variablen enthält. Das Modell wird damit zwar besser auf die Trainingsdaten angepasst, aber die Übertragbarkeit auf die Gesamtheit (Interpolations- und Extrapolationsfähigkeit) wird deutlich verschlechtert.

den bereits definierten Parametern der Kraftmessungen verschiedener Greiferspitzen (vgl. Abschnitt 4.2.3). Entsprechend den vorangegangenen Festlegungen ergibt sich das in der Abbildung 4.6 dargestellte schematische Modell des künstlichen neuronalen Netzes. Die Implementierung des MLP-Netzes erfolgt unter Anwendung der kommerziell erhältlichen Mathematiksoftware *Matlab Neural Network Toolbox* der Fa. *The MathWorks, Inc.* Dabei wurde als Optimierungs-methode der Levenberg-Marquardt Backpropagation Algorithmus verwendet mit dem Optimierungskriterium der gemittelten quadratischen Abweichung

$$e^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_{Modell}(i) - F_{res}(i))^2 \quad (4.10)$$

zwischen interpolierter Kraft $F_{Modell}(i)$ und gemessener Kraft $F_{res}(i)$. Zur Untersuchung der prinzipiellen Eignung von MLP-Netzen werden zuerst nur die Kraftverläufe der einzelnen Greiferspitzen in jeweils einem separaten Netz gelernt. Dies bedeutet, dass nur die drei Prozessparameter, Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt, als Eingangsparameter verwendet werden. Im Falle einer erfolgreichen Modelladaption wird der Eingangsvektor um die geometrischen Parameter, kleinste Kantenlänge, Bohrungsdurchmesser und -position, erweitert.

Zur Festlegung der optimalen Anzahl an verdeckte Schichten und Neuronen werden unterschiedliche Netzkonfigurationen erstellt und mit Hilfe der Versuchsdaten trainiert. Die Neuronenzahl erstreckt sich dabei von zwei bis fünf bei ein bis zwei verdeckte Schichten. Alle verdeckten Schichten besitzen die gleiche Anzahl an Neuronen. Daraus ergeben sich acht unterschiedliche Netztopologien. Für jede Netzkonfiguration werden alle acht Greiferspitzen aus der experimentellen Untersuchung in Abschnitt 4.2 separat adaptiert. Die Abbildung 4.7 zeigt repräsentativ für alle Untersuchungspunkte das Adaptionsergebnis eines MLP-Netzes mit drei Neuronen und einer verdeckten Schicht anhand des Vergleiches der Kraftnulllinien zwischen der gemessenen und der gelernten Prozesskraft. Zusätzlich veranschaulicht Abbildung 4.7 noch die Interpolationsfähigkeit des MLP-Netzes durch die Darstellung des Verlaufs einer interpolierten Kraftnulllinie bei einem Luftspaltwert von $22,5 \mu m$.

Der Lernerfolg jeder Netztopologie wird anhand des individuell gemittelten absoluten Fehlers sowie der Fehlerstandardabweichung dargestellt. Die vollständige Auflistung aller 64 Ergebnispunkte ist in der Tabelle C.1 im Anhang C ersichtlich. Um die eingangs gestellte Frage nach dem optimalen Netzaufbau zu beantworten, reicht es aus, eine Teilmenge der Tabelle C.1 zu betrachten. Die

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

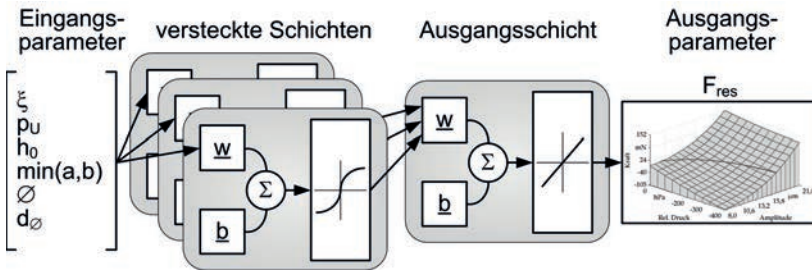


Abbildung 4.6: Schematischer Aufbau des künstlichen neuronalen Netzes mit einer verdeckten Schicht zur Berechnung der Prozesskraft.

Tabelle 4.3 stellt das Ergebnis der „vereinfachten“⁹ Prozessmodellierung mittels MLP-Netz dar. Zum Vergleich der Netztopologien dienen Durchschnittswerte der gemittelten absoluten Fehlerwerte und der Fehlerstandardabweichungswerte über alle Geometrieparameter. Unter Anwendung des prozentualen Modellfehlers, entsprechend der Gleichung (4.9), werden die unterschiedlichen Netztopologien verglichen. Als Referenzkraft für die Berechnung des Modellfehlers E wird die höchst gemessene Prozesskraft über alle Versuchsreihen hinweg verwendet ($F_{ref} = 258 \text{ mN}$ ¹⁰). Die abnehmenden Fehlerwerte (\bar{e} , s_e und E) demonstrieren die steigende Adaptionfähigkeit des MLP-Netzes mit jedem zusätzlichen Neuron und jeder weiteren verdeckten Schicht. Der Modellfehler bei drei Neuronen und einer verdeckten Schicht liegt bei etwa 1% und entspricht einer Abweichung von etwa $2,5 \text{ mN}$ zwischen der modellierten Kraft und gemessenen Kraft. Mit einem Wert von $5,8 \text{ mN}$ ist die Streuung der Kraftmessung mehr als doppelt so hoch (vgl. Gleichung (4.1)). Die Modellierungsgenauigkeit durch das neuronale Netz ist daher kleiner als das Messrauschen des Kraftaufnehmers. Folglich beschreibt das neuronale Netz mit drei Neuronen und einer verdeckten Schicht die resultierende Prozesskraft ausreichend genau. Die erzielte Genauigkeit ist damit ausreichend, um die Prozesskraft und den Luftspalt einer bestimmten Greiferspitzengeometrie zu regeln (vgl. Abschnitt 5.2).

Die vorangegangene Modellerstellung setzt allerdings voraus, dass jede Greiferspitzengeometrie individuell in einem neuronalen Netz adaptiert wird. Damit ist zwar die Regelung der Prozesskraft und des Luftspaltes für eine bestimmte Greiferspitze möglich, aber die modellgestützte, numerische Auslegung der

⁹Es wird an dieser Stelle von einer vereinfachten Prozessmodellierung gesprochen, da im ersten Schritt als Eingangsparameter für das neuronale Netz nur die direkten Prozessparameter verwendet wurden.

¹⁰Gemessene Maximalkraft bei der Greiferspitze mit den Abmessungen $5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ und einer Unterdruckbohrung mit einem Durchmesser von $0,6 \text{ mm}$; vgl. Abbildungen B.2 bis B.5.

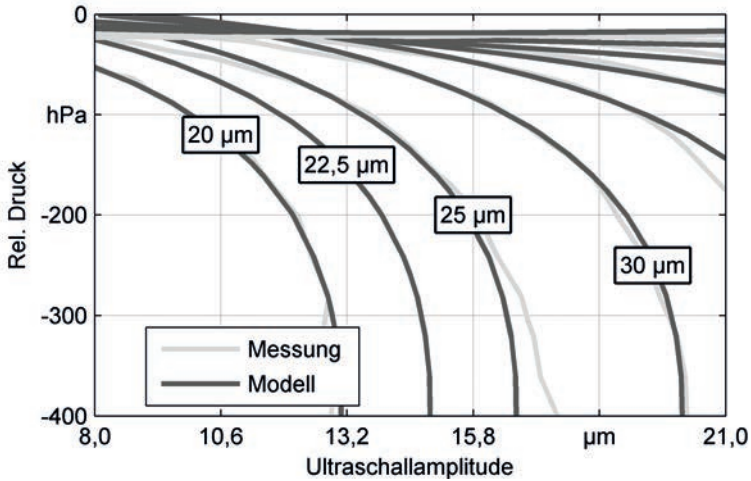


Abbildung 4.7: Vergleich der gemessenen und gelernten Kraftnulllinien bei der Adaption eines MLP-Netzes mit drei Neuronen und einer verdeckten Schicht (verwendete Geometrie: $5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ mit einer $1,0 \text{ mm}$ zentrischen Bohrung). Die Kraftnulllinie bei einem Luftspaltwert von $22,5 \text{ µm}$ repräsentiert die Interpolationsfähigkeit des MLP-Netzes.

geometrischen Parameter noch nicht. Der nächste Schritt liegt daher in der Erfassung aller Greiferspitzengeometrien in einem neuronalen Netz mit dem Ziel, die Prozesskraft auch für unbekannte Geometrieparameter zu interpolieren. Dazu wird der Eingangsvektor des verwendeten MLP-Netzes um die drei Geometrieparameter, minimale Kantenlänge, Bohrungsdurchmesser und Bohrungsabstand, erweitert. Anschließend werden wieder die gleichen Netztopologien entsprechend der Tabelle 4.3 untersucht mit dem Unterschied, dass diesmal die Messdaten aller acht Greiferspitzen zusammen in einem MLP-Netz adaptiert werden. Die Tabelle 4.4 veranschaulicht das Ergebnis der Prozessmodellierung aller acht Greiferspitzen mit einem neuronalen Netz. Im Vergleich zur Adaption einer einzelnen Greiferspitze (vgl. Tabelle 4.3) sind die Fehlerwerte größer. Dies ist zu erwarten, da die Modellkomplexität durch die Hinzunahme der Geometrieparameter und der Zusammenfassung aller Greiferspitzen in einem neuronalen Netz deutlich steigt. Aufgrund dieser gestiegenen Komplexität ist auch eine höhere Anzahl an Neuronen und verdeckten Schichten erforderlich. Erst mit der Verwendung zweier verdeckter Schichten mit je fünf Neuronen wird bei der Adaption aller Greiferspitzen in einem neuronalen Netz ein ähnliches Ergebnis erzielt wie bei der Adaption einer einzelnen Greiferspitze.

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

Neuronenzahl	1 verdeckte Schicht			2 verdeckte Schichten		
	\bar{e}	s_e	E	\bar{e}	s_e	E
2	326,06	8,29	3,21%	100,57	3,42	1,33%
3	84,11	2,63	1,02%	55,71	1,72	0,67%
4	78,38	1,90	0,74%	31,04	1,25	0,48%
5	41,70	1,59	0,62%	32,93	1,10	0,43%

Tabelle 4.3: Ergebnis der „vereinfachten“ Prozessmodellierung mittels MLP-Netze. Anhand der Durchschnittswerte der gemittelten absoluten Fehlerwerte \bar{e} und der Fehlerstandardabweichungswerte s_e aller Adaptionsergebnisse der einzelnen Geometrien ist ein Vergleich der verschiedenen Netztopologien möglich. Der Modellfehler E veranschaulicht zudem die Abbildungsgenauigkeit der realen Kraft (Angaben aller Werte in mN; Auszug aus der Tabelle C.1).

Ausgehend von den Fehlerwerten sollte ein neuronales Netz mit zwei verdeckten Schichten mit je fünf Neuronen in der Lage sein, nicht nur die Regelung der Prozessgrößen, der resultierenden axialen Kraft und des Luftspalts, zu erlauben, sondern auch die Berechnung der resultierenden Prozesskraft für unbekannte Greiferspitzengeometrie ermöglichen.

4.3.4 Bewertung des Modellierungsansatzes

Zur Prüfung, ob die Berechnung der Prozesskraft einer unbekanntes Greifergeometrie tatsächlich möglich ist, wird das trainierte neuronale Netz mit den Geometriedaten einer unbekanntes (nicht trainierten) Greiferspitze gespeist. Das Berechnungsergebnis des neuronalen Netzes für die unbekanntes Greiferspitze wird mit den Ergebnissen einer entsprechenden Messung verglichen. Sollten sich die berechneten und die gemessenen Kräfte der zusätzlichen Greiferspitze

Neuronenzahl	1 verdeckte Schicht			2 verdeckte Schichten		
	\bar{e}	s_e	E	\bar{e}	s_e	E
2	7600,19	9,57	3,71%	7755,86	9,40	3,64%
3	1169,19	8,43	3,27%	3008,42	8,18	3,17%
4	1006,59	6,99	2,71%	438,70	5,88	2,28%
5	325,16	6,25	2,42%	99,17	2,98	1,16%

Tabelle 4.4: Ergebnis der Prozessmodellierung aller Greiferspitzen in einem MLP-Netz. Anhand der gemittelten absoluten Fehlerwerte \bar{e} und der Fehlerstandardabweichungswerte s_e aller Adaptionsergebnisse ist ein Vergleich der verschiedenen Netztopologien möglich. Der Modellfehler E veranschaulicht zudem die Abbildungsgenauigkeit der realen Kraft (Angaben aller Werte in mN).

annähernd überdecken, wäre die Anwendbarkeit des Prozessmodells belegt. Die Geometriedaten der unbekanntenen Greiferspitze unterscheiden sich zu den gelernten Daten im neuronalen Netz (vgl. Tabelle 4.2) nur in einem Parameter, dem Durchmesser der Unterdruckbohrung ($5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ mit einem Durchmesser von $1,5 \text{ mm}$).

Sowohl die Ergebnisse der Messung als auch die der Extrapolationsberechnung durch das neuronale Netz sind im Anhang C.3 unter Abbildung C.3 a—d ersichtlich. Die Extraktion der Kraftnulllinien aus den Kraftverläufen in Abbildung 4.8 lässt die folgende Bewertung zur Anwendung des Prozessmodells für die angestrebte numerische Auslegung zu. Voraussetzung für die Anwendung des neuronalen Netzes als Prozessmodell zur numerischen Auslegung von Greiferspitzengeometrien ist die korrekte Berechnung der resultierenden Prozesskraft in Abhängigkeit zu den Eingangsparametern. Diese Korrektheit ist erforderlich, da aus der Berechnung die Prozessparameter für die ultraschallbasierte Handhabung abgeleitet werden. Mit steigender Abweichung zwischen der berechneten und der tatsächlichen Prozesskraft werden die Parametereinstellungen zur Erreichung eines bestimmten Luftspaltes oder einer bestimmten Fügekraft zunehmend ungenau. Die Folge sind qualitative Mängel im Montageprozess, falls der Handhabungsvorgang von der Bauteilaufnahme bis hin zu dessen Ablage überhaupt möglich ist. Für den vorliegenden Fall aus Abbildung 4.8 hätte die numerische Auslegung zwar ein Ergebnis geliefert, aber die spätere Montage würde fehlschlagen, da die Abweichungen zwischen der interpolierten und gemessenen Kraft zu hoch sind.

Der Grund für mangelhafte Extrapolation der Prozesskraft aus den unbekanntenen Geometriedaten könnte in der fehlenden Lerntiefe des neuronalen Netzes liegen, denn die acht gelernten Greiferspitzen stellen gerade einmal drei geometrische Unterscheidungsmerkmale mit jeweils zwei Stufen zur Verfügung. Im Gegensatz dazu konnten die Prozessparameter Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt viel feingranularer aufgelöst werden (pro Greiferspitze wurden ca. 1600 Messpunkte erstellt). Um weitere Messdaten dem neuronalen Netz bereitzustellen, sind zwei Punkte zu beachten:

1. Für alle Greiferspitzen müssen die Intervallgrenzen der Eingangsparameter identisch sein.
2. Nach jedem Tausch der Greiferspitze an der Ultraschallsonotrode sind vor Messungsbeginn stets die gleichen Rahmenbedingungen zu schaffen. Damit sind gleichbleibende Ultraschallamplituden, identische Spalthöhen und Druckbedingungen adressiert sowie die Sicherstellung einer Ebenenparallelität zwischen der Greiferfläche und der Kraftmesszelle.

Insgesamt lassen sich mit Anwendung des MLP-Netzes zur Abbildung der resultierenden Prozesskraft aus den Eingangsparametern drei Vorteile erzielen. Erstens ermöglicht das MLP-Netz die Interpolation der Prozesskraft einer

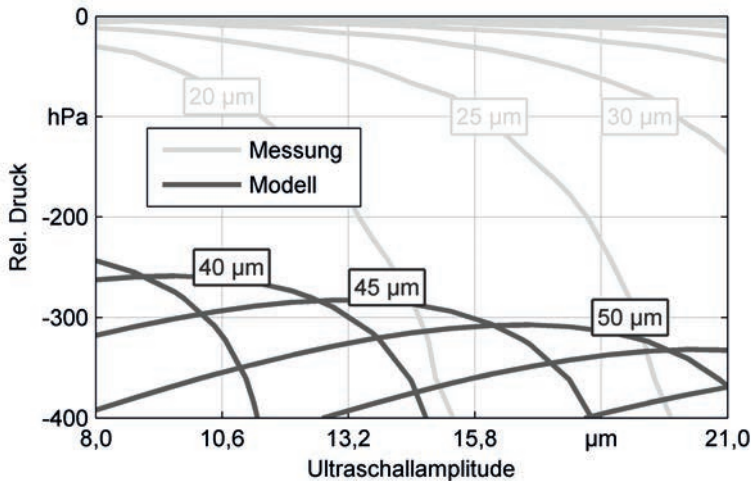


Abbildung 4.8: Vergleich der gemessenen und der extrapolierten Kraftnulllinien. Die verwendete Greiferspitzengeometrie ($5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ mit einem Durchmesser von $1,5 \text{ mm}$) wurde für die Adaption des neuronalen Netzes nicht verwendet.

einzelnen gelernten Greiferspitze aus den Prozessparametern. Zweitens kann durch diese Interpolationsfähigkeit das MLP-Netz als Streckenmodell in einem Regelkreis zur Regelung der Prozessgrößen Fügekraft und Luftspalt eingesetzt werden. Und drittens kann ein neuronales Netz als Wissensdatenbank für mehrere unterschiedliche Greiferspitzen genutzt werden. Das eigentliche Ziel einer effizienten Gestaltungssystematik zur Auslegung der Greiferspitzen kann jedoch mit dem Ansatz des MLP-Netzes als Prozessmodell nicht erreicht werden.

4.4 Prozessmodellierung mittels mathematischer Funktion

4.4.1 Identifikation der Gleichungsstruktur

Der Einsatz eines neuronalen Netzes zur Beschreibung des Ein- und Ausgangsverhaltens einer einzelnen trainierten Greiferspitze ist zwar ausreichend für die Regelung der Handhabungsparameter, aber dennoch sind noch nicht alle Fragen geklärt. Weder ist mit diesem Ansatz eine Abschätzung der resultierenden Prozesskraft von unbekanntem Geometrieparametern möglich, noch trägt das neuronale Netz zum besseren Verständnis der Prozessvorgänge bei. Aus diesem

Grund wird im folgenden Abschnitt ein analytisches Modell der Prozessvorgänge entwickelt.

Als analytisches Modell wird in diesem Kontext eine Abbildungsvorschrift verstanden, die mit Hilfe von mathematischen Formeln beschreibbar ist. Prinzipiell ist die Approximation eines unbekanntes Funktionsverlaufs durch verschiedene, elementare Funktionen und eine beliebige Anzahl an Funktionskoeffizienten möglich; beispielsweise durch Taylor-Polynome (PAPULA 2001B). Die Beschreibung eines beliebigen Funktionsverlaufs durch eine analytische Funktion wird durch die Adaption der Funktionskoeffizienten über diskret vorgegebene Funktionswerte, wie bei einer Messreihe, ermöglicht. Zu jedem Messpunkt gibt es ein oder mehrere Ein- und Ausgangsparameter, die den Stützstellen und Funktionswerten einer Funktion entsprechen. Über die sogenannte Ausgleichsrechnung (engl. Fitting) werden die Koeffizienten einer vorabdefinierten Gleichungsstruktur solange angepasst, bis die verwendete Funktion bestmöglich an den Verlauf aller Messwerte angepasst ist (PAPULA 2001A). Für die Koeffizientenadaption wird ein mathematischer Algorithmus, wie der Recursive-Least-Square Algorithmus oder das Gradientenabstiegsverfahren (PAPULA 2001A; STRANG 2010; SCHRÖDER 2010), zur Lösung linearer oder nichtlinearer Gleichungen verwendet.

Mit der Bereitstellung einer Prozessgleichung zur Beschreibung der resultierenden Prozesskraft aus den Eingangsparametern ergeben sich zwei Vorteile. Zum einen in der verständlichen Darstellung des Prozesses und zum anderen in der einfachen Umsetzung in einem Regelkreis zur Regelung der Fügekraft und des Luftspaltes. Zur Abbildung der resultierenden Kraft F_{res} in Abhängigkeit zu den Prozessparametern Ultraschallamplitude ξ , Unterdruck p_U und Luftspalt h_0 wird zur Modellbeschreibung eine Gleichungsform angestrebt. Allgemein kann diese Gleichung wie folgt definiert werden:

$$F_{res} = f(\xi, p_U, h_0) \quad (4.11)$$

Bislang ist aus dem Stand der Technik und Forschung nur bekannt, dass die Superposition aus der Ultraschallamplitude und dem Unterdruck zur Berechnung der resultierenden Kraft keinem linearen Zusammenhang zugrunde liegt (vgl. Abschnitt 2.4.4). Daher ist die Gleichungsstruktur der Funktion (4.11) derzeit noch unbekannt. Insofern ist ein zielgerichtetes Vorgehen zur Identifikation der Gleichungsstruktur unabdingbar, bevor die Gleichungskoeffizienten näher betrachtet werden können. Im Falle einer erfolgreich erstellten Gleichung zur Berechnung der Prozesskraft beschreiben die Gleichungskoeffizienten die geometrischen Einflussgrößen der Greiferspitze.

Einen ersten Hinweis auf die Gleichungsstruktur liefern die Erkenntnisse aus den vorhergehenden Versuchen in Abschnitt 4.2. Das Ergebnis der Effektanalyse zeigt, dass jeder Parameter einzeln und alle möglichen Zweifachkombinationen

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

die Prozesskraft beeinflussen. Dementsprechend kann die allgemeine Funktion (4.11) in Teilfunktionen (4.12) zerlegt werden.

$$F_{res} = f(\xi) + f(p_U) + f(h_0) + f(\xi, p_U) + f(\xi, h_0) + f(p_U, h_0) \quad (4.12)$$

Für jede Teilfunktion ist wiederum eine eigene Gleichungsstruktur zu erörtern. Um den Suchraum für die jeweilige Gleichungsstruktur aus den Grundfunktionen der Analysis einzugrenzen, wird anhand von weiteren Messungen¹¹ die Prozesskraft über den jeweils betrachteten Parameter oder die Parameterkombination aufgetragen. Die Abhängigkeit der Prozesskraft zu jeweils einem Parameter wird im Anhang C in Abbildung C.1 a bis c dargestellt. Daraus geht hervor, dass jeder Parameter einen Vorzeichenwechsel der resultierenden Prozesskraft bewirken kann oder anders formuliert: Über jede Eingangsgröße kann die Richtung der Kraft, ob abstoßend oder anziehend, geändert werden. Dies bedeutet, dass die einzelnen Parameter nicht durch Potenz-, Exponential- oder Wurzelfunktionen oder logarithmische und trigonometrische Funktionen beschreibbar sind. Folglich bleiben nur Polynome und gebrochene rationale Funktionen zur Beschreibung übrig. Reihenentwicklungen werden an dieser Stelle auch als solche Funktionen angesehen. Mit Hilfe der *Matlab Curve-Fitting-Toolbox* der *Fa. The MathWorks, Inc.* kann ein beliebig hoher Funktionsgrad vorgegeben werden. Der hinterlegte Optimierungsalgorithmus arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie bei der Adaption des neuronalen Netzes. Anstelle von Netzgewichten werden die Funktionskoeffizienten identifiziert, mit denen die Summe der Fehlerquadrate entsprechend der Gleichung (4.10) minimal wird. Dieser Fehler wird auch als Approximationsfehler verstanden, da er aus der zu approximierenden Funktion und den Messdaten gebildet wird. Mit dieser Approximationsmethode wird erkannt, dass die unbekanntesten Funktionsverläufe $f(\xi)$, $f(p_U)$ und $f(h_0)$ gemäß der Abbildung C.1 a bis c im Anhang C durch Polynome ab dem Grad zwei angenähert werden können. Mit steigender Gradzahl reduziert sich zwar der Approximationsfehler, aber dies kann zu einer Überanpassung führen. Aus diesem Grund wird der Funktionsgrad so hoch wie nötig und so gering wie möglich gewählt. Für alle drei Teilfunktionen mit einem Prozessparameter wird im Weiteren jeweils ein Polynom zweiten Grades verwendet.

Anschließend werden die Teilfunktionen betrachtet, deren Prozesskraft aus der Wechselwirkung zweier Parameter $f(\xi, p_U)$, $f(\xi, h_0)$ und $f(p_U, h_0)$ hervorgeht. Zur Identifikation möglicher Funktionsstrukturen wurde unter anderem auf das frei erhältliche Surface-Fitting-Programm von PHILLIPS (2011) zurückgegriffen sowie auf die *Matlab Surface-Fitting-Toolbox* der *Fa. The MathWorks, Inc.* Weiterhin wird bei der Beziehung zwischen dem Ultraschall und dem Luftspalt die durch

¹¹Diese Messungen erfolgten mit einer der bestehenden Greiferspitzen aus den Versuchen ($5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ mit einer zentrischen Bohrung mit einem Durchmesser von $1,0 \text{ mm}$).

HÖPPNER (2002) eingeführte Kompression

$$\epsilon = \frac{\xi}{h_0} \quad (4.13)$$

berücksichtigt. Das Ergebnis der jeweiligen Teilfunktionen wird durch die Gleichungen (4.14a) bis (4.14c) wiedergegeben. Die Abbildungen C.2 a bis c im Anhang C zeigen die dazugehörigen Funktionsflächen inklusive den jeweiligen Messpunkten.

$$f(\xi, p_U) = c_1 + c_2 \cdot \xi + c_3 \cdot p_U + c_4 \cdot \xi^2 + c_5 \cdot \xi \cdot p_U + c_6 \cdot p_U^2 \quad (4.14a)$$

$$f(\xi, h_0) = c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{\xi}{h_0}\right)^3 \quad (4.14b)$$

$$f(p_U, h_0) = c_1 + c_2 \cdot p_U + c_3 \cdot h + c_4 \cdot p_U \cdot h + c_5 \cdot h^2 \quad (4.14c)$$

Die Teilfunktionen (4.14a) bis (4.14c) erfüllen die Anforderungen nach Funktions-
typ und -grad. Diese werden wie folgt zu der gesuchten Gesamtfunktion (4.15)
zusammengefasst.

$$\begin{aligned} F_{res} &= f(\xi, p_U, h_0) \\ &= c_1 + c_2 \cdot \xi + c_3 \cdot p_U + c_4 \cdot h_0 + c_5 \cdot \left(\frac{\xi}{h_0}\right)^3 \\ &\quad + c_6 \cdot \xi \cdot p_U + c_7 \cdot p_U \cdot h_0 + c_8 \cdot \xi^2 + c_9 \cdot p_U^2 + c_{10} \cdot h_0^2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Nach Identifikation der Prozessgleichung gilt es diese auf ihre Anwendbarkeit hin zu prüfen. Hierzu werden mit Hilfe eines nichtlinearen Optimierungsalgorithmus, dem Gradientenabstiegsverfahren (ENDISCH 2009), die Koeffizienten c_1 bis c_{10} der Gleichung (4.15) für jede Greiferspitzengeometrie separat angepasst. Das Ergebnis wird in Tabelle 4.5 veranschaulicht. Sie zeigt für jede Greiferspitzengeometrie die optimalen Koeffizientenwerte zur Beschreibung der Prozesskraft aus den Parametern Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt. Um das Approximationsergebnis der Gleichung (4.15) mit den Lernfolgen der neuronalen Netze zu vergleichen, werden die durchschnittlichen Fehlerwerte der gemittelten absoluten Fehler, der Fehlerstandardabweichungen und der Modellfehler berechnet.

$$\varnothing \bar{e} = 49,27 \text{ mN} \quad \Rightarrow \quad \varnothing s_e = 7,22 \text{ mN} \quad \Rightarrow \quad E = 2,80\%$$

Mit diesen Werten wird deutlich, dass die gefundene Gleichungsstruktur mit zehn Koeffizienten die resultierende Kraft fast so gut beschreibt wie ein neuronales Netz mit 3 Neuronen und einer verdeckten Schicht. Folglich kann auch die gefundene Gleichungsstruktur zur Berechnung der resultierenden Prozesskraft aus den Parametern Ultraschall, Unterdruck und Luftspalt sowie für die Regelung der Kraft und des Luftspaltes verwendet werden. Damit die Glei-

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

chungsstruktur als Prozessmodell in der numerischen Auslegung unbekannter Greiferspitzengeometrien eingesetzt werden kann, müssen die bislang adaptierten Gleichungskoeffizienten näher spezifiziert werden. Dazu wird die Annahme getroffen, dass die Einflussgrößen der Ultraschallamplitude, des Unterdrucks und des Luftspaltes auf die resultierende Kraft durch die Gleichung (4.15) vollständig erfasst sind. In diesem Fall werden die Einflüsse der geometrischen Parameter vollständig durch die Koeffizienten wiedergegeben. Diese gilt es im nächsten Unterabschnitt 4.4.2 näher zu untersuchen.

Geometrie [mm]				[mN]		Koeffizienten			
a	b	\varnothing	d_{\varnothing}	s_e	\bar{e}	c_1	c_2	c_3	...
4	6,25	0,6	0	7,15	91,75	-0,0029	-0,0019	0,3772	...
4	6,25	1	0	7,12	68,82	-0,0051	-0,0014	0,4497	...
5	5	0,6	0	7,55	43,80	0,0340	0,0043	0,4854	...
5	5	1	0	9,18	31,41	0,0141	0,0005	0,5273	...
4	6,25	0,6	1	6,77	48,04	-0,0140	-0,0012	0,5103	...
4	6,25	0,6	2,6	7,14	46,46	-0,0203	-0,0012	0,5241	...
5	5	0,6	1	7,17	18,06	0,0133	0,0012	0,5891	...
5	5	0,6	2,6	5,70	45,82	-0,0436	0,0025	0,5992	...

Koeffizienten							
...	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
...	0,0015	0,1925	-0,0061	0,0005	0,0000	0,4705	0,0000
...	0,0008	0,2354	-0,0086	0,0025	-0,0001	0,4880	0,0000
...	-0,0021	0,2528	-0,0025	-0,0022	-0,0002	0,4469	0,0000
...	-0,0009	0,3054	-0,0107	0,0032	-0,0001	0,5400	0,0000
...	0,0017	0,1262	-0,0032	0,0001	0,0000	0,5445	0,0000
...	0,0018	0,1015	-0,0014	-0,0014	0,0000	0,5266	0,0000
...	-0,0010	0,2397	-0,0095	0,0014	-0,0001	0,5044	0,0000
...	0,0010	0,2260	-0,0069	-0,0010	-0,0002	0,4965	0,0000

Tabelle 4.5: Ermittelte Koeffizienten c_1 bis c_{10} zur optimalen Beschreibung jeder Greiferspitzengeometrie sowie die Angabe des gemittelten absoluten Fehlers und der Fehlerstandardabweichung.

4.4.2 Berücksichtigung der geometrischen Parameter

Eine genauere Betrachtung der Tabelle 4.5 verdeutlicht zwei Punkte. Erstens ist eine Zuordnung der geometrischen Parameter auf irgendeinen Koeffizienten nicht ersichtlich; eine lineare Kombination aus einem einzelnen Geometrieparameter und einem Koeffizienten wird nicht erkannt. Im Folgenden wird versucht,

für jeden Koeffizienten eine sinnvolle Kombination unterschiedlicher Geometrieparameter zu finden. Zweitens ist zu erkennen, dass die Koeffizienten c_8 und c_{10} sehr kleine Werte aufweisen, weshalb diese im Weiteren dauerhaft auf Null gesetzt werden. Eine Reduktion der Koeffizientenzahl ist im Hinblick auf das Ziel einer einfachen und handlichen Gleichung zur Berechnung der Prozesskräfte erstrebenswert. Als problematisch ist in jedem Fall das teilweise wechselnde Vorzeichen der Koeffizienten zwischen den unterschiedlichen Geometrien zu sehen, da damit eine Zuordnung zwischen Geometrieparameter und Koeffizienten erschwert wird. Es bleibt die Frage, wie überprüft werden kann, ob die einzelnen Koeffizienten aus den geometrischen Parametern gebildet werden können.

Eine mögliche Lösung liegt in der Betrachtung des empirischen Korrelationskoeffizienten, der die Abhängigkeit zwischen zwei Wertemengen aufzeigt. Nach PAPULA (2001A) wird der empirische Korrelationskoeffizient allgemein für die Wertemengen \underline{x} und \underline{y} unter Verwendung der empirischen Kovarianz

$$s_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}) \quad (4.16)$$

und den jeweiligen Standardabweichungen s_x und s_y wie folgt berechnet:

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad (4.17)$$

Der empirische Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Ergebnisse, die nahe an einem der beiden Extrema liegen, deuten auf eine starke Abhängigkeit zwischen den betrachteten Wertemengen hin, wohingegen bei Werten nahe der Null sicher von einer linearen Unabhängigkeit beider Vektoren ausgegangen werden kann. Anhand des empirischen Korrelationskoeffizienten wird in diesem Anwendungsfall der Grad der Abhängigkeit zwischen den Gleichungskoeffizienten c_1 bis c_9 (Tabelle 4.5) und unterschiedlichen Kombinationen von Geometriewerten für alle acht Greiferspitzen betrachtet. Die Tabelle 4.6 stellt einen Auszug möglicher Kombinationen unterschiedlicher Geometriewerte dar. Aus dieser Tabelle und der Tabelle 4.5 kann der empirische Korrelationskoeffizient für jeden Geometriewert oder jede -kombination und Koeffizient errechnet werden. Die Tabelle 4.7 stellt das Ergebnis dar und zeigt anhand der grau hinterlegten Zellen die höchste ermittelte Abhängigkeitswahrscheinlichkeit zwischen den Geometriedaten und den Funktionskoeffizienten c_1 bis c_9 auf.

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

	Geometrieparameter und deren Kombinationen							
a	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5,00
b	6,25	6,25	5,00	5,00	6,25	6,25	5,00	5,00
\varnothing	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	0,60	0,60	0,60
$d\varnothing$	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,60	1,00	2,60
$a \cdot b$	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
$n\varnothing \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi$	0,28	0,79	0,28	0,79	0,57	0,57	0,57	0,57
$\left(\frac{\varnothing+d\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi$	0,28	0,79	0,28	0,79	2,01	8,04	2,01	8,04
a/\varnothing	6,67	4,00	8,33	5,00	6,67	6,67	8,33	8,33
b/\varnothing	10,4	6,25	8,33	5,00	10,42	10,42	8,33	8,33
$\frac{a}{\varnothing+d\varnothing}$	6,67	4,00	8,33	5,00	2,50	1,25	3,13	1,56
$\frac{b}{\varnothing+d\varnothing}$	0,15	0,25	0,12	0,20	0,40	0,80	0,32	0,64
$\frac{a}{\varnothing+d\varnothing}$	10,4	6,25	8,33	5,00	3,91	1,95	3,13	1,56
$\frac{b}{\varnothing+d\varnothing}$	0,10	0,16	0,12	0,20	0,26	0,51	0,32	0,64
$\frac{a \cdot b}{n\varnothing \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}$	88,4	31,8	88,4	31,8	44,2	44,2	44,2	44,2
$\frac{n\varnothing \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{a \cdot b}$	0,01	0,03	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
$\frac{n\varnothing \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{a^2}$	56,6	20,4	88,4	31,8	28,3	28,3	44,2	44,2
$\frac{n\varnothing \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{b^2}$	0,02	0,05	0,01	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02
$\frac{n\varnothing \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{a^2}$	138	49,7	88,4	31,8	69,1	69,1	44,2	44,2
$\frac{n\varnothing \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{b^2}$	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02
$\frac{\left(\frac{\varnothing+d\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{a^2}$	56,6	20,4	88,4	31,8	7,96	1,99	12,4	3,11
$\frac{\left(\frac{\varnothing+d\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{b^2}$	138	49,7	88,4	31,8	19,4	4,86	12,4	3,11

Tabella 4.6: Kombinationen unterschiedlicher Geometrieigenschaften.

4.4 Prozessmodellierung mittels mathematischer Funktion

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_9
a	0,00	-0,57	0,36	0,04	0,75	-0,41	-0,02	-0,19
b	0,00	0,57	-0,36	-0,04	-0,75	0,41	0,02	0,19
\varnothing	-0,47	-0,45	-0,28	0,64	0,54	-0,60	0,79	-0,22
d_{\varnothing}	-0,14	0,32	0,71	-0,02	-0,55	0,24	-0,53	0,68
$a \cdot b$	Division durch Null \Rightarrow Korrelation nicht definiert							
$n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \pi$	-0,59	-0,34	0,30	0,74	0,20	-0,65	0,66	0,38
$\left(\frac{\varnothing+d_{\varnothing}}{2}\right)^2 \pi$	-0,21	0,30	0,63	0,04	-0,49	0,23	-0,49	0,59
a/\varnothing	0,43	0,04	0,45	-0,54	-0,08	0,29	-0,71	0,11
b/\varnothing	0,37	0,73	0,04	-0,57	-0,84	0,74	-0,66	0,27
$\frac{a}{\varnothing+d_{\varnothing}}$	0,41	-0,19	-0,69	-0,36	0,51	0,12	0,04	-0,81
$\frac{\varnothing+d_{\varnothing}}{a}$	-0,17	0,38	0,65	0,02	-0,64	0,26	-0,44	0,74
$\frac{b}{\varnothing+d_{\varnothing}}$	0,26	0,00	-0,89	-0,24	0,26	0,18	0,14	-0,83
$\frac{\varnothing+d_{\varnothing}}{b}$	-0,29	0,14	0,74	0,16	-0,34	0,04	-0,39	0,61
$\frac{a \cdot b}{\varnothing}$	0,55	0,24	-0,51	-0,67	-0,03	0,57	-0,50	-0,59
$n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi$								
$\frac{n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{a \cdot b}$	-0,59	-0,34	0,30	0,74	0,20	-0,65	0,66	0,38
$\frac{n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{a^2}$	0,62	-0,10	-0,20	-0,67	0,31	0,37	-0,53	-0,52
$\frac{n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{b^2}$	-0,36	-0,03	0,11	0,49	-0,25	-0,26	0,47	0,48
$\frac{n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{a^2}$	0,34	0,51	-0,68	-0,49	-0,36	0,62	-0,33	-0,51
$\frac{n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{b^2}$	-0,59	-0,52	0,37	0,71	0,58	-0,79	0,60	0,14
$\frac{\left(\frac{\varnothing+d_{\varnothing}}{2}\right)^2 \cdot \pi}{a^2}$	0,52	-0,12	-0,60	-0,52	0,42	0,29	-0,17	-0,74
$\frac{b^2}{\left(\frac{\varnothing+d_{\varnothing}}{2}\right)^2 \cdot \pi}$	0,23	0,10	-0,89	-0,27	0,16	0,26	0,03	-0,84

Tabelle 4.7: Darstellung der empirischen Korrelationskoeffizienten zwischen den geometrischen Eigenschaften der Tabelle 4.6 und den optimierten Koeffizienten der Tabelle 4.5 für alle acht Geometrien. Die grau hinterlegten Zellen stellen für den jeweiligen Koeffizienten die beste geometrische Beschreibung dar.

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

Da der empirische Korrelationskoeffizient aber nur den Grad der Abhängigkeit zwischen den Funktionskoeffizienten und den Geometriedaten beschreibt und konstante Verstärkungsfaktoren ignoriert, sind in der erweiterten mathematischen Modellbeschreibung durch Gleichung (4.18) noch konstante Verstärkungsfaktoren k_1 bis k_8 vorgesehen.

$$\begin{aligned}
 F_{res} = & \frac{k_1 \cdot a^2}{n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi} + \frac{k_2 \cdot b}{\varnothing} \cdot \xi + \frac{k_3 \cdot b}{\varnothing + d_{\varnothing}} \cdot p_U - \\
 & k_4 \cdot n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot h_0 + \frac{k_5 \cdot b}{\varnothing} \cdot \left(\frac{\xi}{h_0}\right)^3 - \\
 & k_6 \cdot \frac{n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{b^2} \cdot \xi \cdot p_U - \\
 & k_7 \cdot \varnothing \cdot p_U \cdot h_0 + \frac{k_8 \cdot b^2}{\left(\frac{\varnothing + d_{\varnothing}}{2}\right)^2 \cdot \pi} \cdot p_U^2
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Zur Bestimmung der konstanten Faktoren k_1 bis k_8 wird erneut der Optimierungsalgorithmus verwendet, woraus für alle acht Greiferspitzen die gemeinsame Gleichung (4.19) hervorgeht.

$$\begin{aligned}
 F_{res} = & \frac{-2,2 \cdot 10^{-3} \cdot a^2}{n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi} + \frac{0,127 \cdot 10^{-3} \cdot b}{\varnothing} \cdot \xi + \frac{72,5 \cdot 10^{-3} \cdot b}{\varnothing + d_{\varnothing}} \cdot p_U - \\
 & - 0,83 \cdot 10^{-3} \cdot n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot h_0 + \frac{3,8 \cdot 10^{-3} \cdot b}{\varnothing} \cdot \left(\frac{\xi}{h_0}\right)^3 - \\
 & - 81,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{n_{\varnothing} \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \cdot \pi}{b^2} \cdot \xi \cdot p_U - \\
 & - 44,4 \cdot 10^{-6} \cdot \varnothing \cdot p_U \cdot h_0 + \frac{10,5 \cdot 10^{-3} \cdot b^2}{\left(\frac{\varnothing + d_{\varnothing}}{2}\right)^2 \cdot \pi} \cdot p_U^2
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

4.4.3 Bewertung der mathematischen Prozessfunktion

Mit der Gleichung (4.19) wird erstmalig die Art der nichtlinearen Superposition aus der Ultraschallamplitude, dem Unterdruck und dem Luftspalt zur Berechnung der resultierenden Prozesskraft beschrieben. Der verbleibende Modellfehler zwischen der berechneten und der gemessenen Kraft beträgt dabei etwa 2,8%. Die sich daraus ergebende Fehlerstreuung liegt mit 7,2 mN nur etwas

4.4 Prozessmodellierung mittels mathematischer Funktion

über der Streuung des Kraftsensors ($\sigma = 5,8 \text{ mN}$). Dennoch ist die Genauigkeit der berechneten resultierenden Kraft für die Verwendung der Gleichung (4.19) zur Regelung der Prozessgrößen Kraft und Luftspalt ausreichend. Der Aufbau eines Prozessmodells zur Regelung wichtiger Handhabungsparameter ist somit erfolgreich abgeschlossen.

Bleibt noch offen, ob die Gleichung (4.19) auch als Prozessmodell in der numerischen Greiferspitzenauslegung verwendet werden kann. Dazu werden analog zum Unterabschnitt 4.3.4 die Messergebnisse der unbekanntenen Greiferspitze (vgl. Abbildung C.3 a und b im Anhang C) herangezogen und mit dem Berechnungsergebnis der Gleichung (4.19) verglichen. Die berechneten Kraftverläufe sind in den Abbildungen C.3 e und f veranschaulicht. Im Gegensatz zu den Berechnungsergebnissen des neuronalen Netzes (vgl. Abbildung C.3 c und d) weisen die berechneten Kraftflächen durch die Gleichung (4.19) eine höhere Ähnlichkeit mit der Messung auf. Dies zeigt sich auch im Vergleich der extrahierten Kraftnulllinien zwischen der Abbildung 4.8 und 4.9. Zwar sind die Ergebnisse des mathematischen Modells für den numerischen Auslegungsprozess der Greiferspitze noch zu ungenau, aber im Gegensatz zum neuronalen Netz ist mit der Gleichung (4.19) eine bessere Abschätzung geometrischer Einflussgrößen möglich.

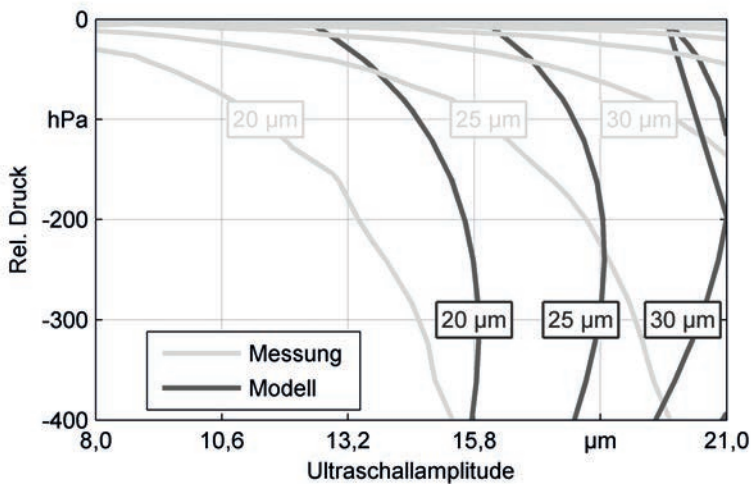


Abbildung 4.9: Vergleich der Höhenlinien der neunten Greiferspitze zwischen der gemessenen und der durch die Gleichung (4.19) berechneten Kraft.

4 Modellierung der Prozesszusammenhänge

Insgesamt lassen sich mit der ermittelten Übertragungsfunktion als Prozessmodell für die Abbildung der resultierenden Prozesskraft zwei Vorteile erzielen. Erstens lässt sich die Prozesskraft einer einzelnen Greiferspitze aus den Prozessparametern errechnen und zweitens kann die Prozessfunktion als Streckenmodell in einem Regelkreis zur Regelung der Prozessgrößen eingesetzt werden. Aber auch mit der ermittelten Prozessfunktion kann das eigentliche Ziel einer effizienten Gestaltungssystematik zur Auslegung der Greiferspitzen nicht erreicht werden. Das mathematische Modell kann zwar als unterstützendes Werkzeug zur Abschätzung der Geometriedaten eingesetzt werden, aber eine experimentelle Auslegung der Greiferspitze nach REINHART ET AL. (2010A) und HEINZ (2011) ist weiterhin erforderlich.

5 Adaption der Anlagentechnik und der Montageprozesse

5.1 Adaption der Anlagentechnik

5.1.1 Bereitstellung der erforderlichen Sensorik und Aktorik

Mit der Beendigung des vorangegangenen Methodenschritts zur Anwendung der berührungsgelosen Handhabung mittels Ultraschall ist die Auslegung der Greiferspitze abgeschlossen. Damit ist die Greiferspitze entsprechend der Bauteilgeometrie gefertigt und die integrierten Unterdruckbohrungen ermöglichen ein stabil schwebendes Bauteil bei bekannten Parameterkombinationen aus Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt. Als nächstes stehen die Methodenschritte zur Adaption der Anlagentechnik, zur Inbetriebnahme des Ultraschallvakuumgreifers und zur Adaption der Montageprozesse an. In diesem Unterabschnitt werden die für den Betrieb der ultraschallbasierten Handhabung notwendigen Komponenten erläutert, während in den nachfolgenden Unterabschnitten 5.1.2 bis 5.1.4 die mechanische Integration des Ultraschallvakuumgreifers in die Montageanlage, die Relativpositionierung des Greifers über dem Bauteil und der automatisierte Wechselmechanismus verschiedener Greiferspitzen beschrieben werden.

Den Kern des Handhabungssystems bildet der Ultraschallvakuumgreifer. Abbildung 2.3 zeigt dessen schematischen Aufbau. Zur Erzeugung des Ultraschalls ist ein elektrischer Verstärker erforderlich, der aus einer analogen Steuerspannung V_{US} eine proportionale Ultraschallamplitude ξ erzeugt. Die Ausführung des Verstärkers hängt dabei von der Bauart des Ultraschallsystems ab, nämlich ob dieser nach dem Prinzip der magnetostriktiven oder der piezoelektrischen Schallerzeugung arbeitet. Im Idealfall weist die Wirkkette des gesamten Ultraschallsystems, bestehend aus Verstärker und Ultraschallvakuumgreifer, einen linearen Verstärkungsfaktor k_{US} entsprechend der Gleichung (5.1) auf. Der Wertebereich des Steuersignals V_{US} ist entsprechend den mechanischen Grenzen des Ultraschallsystems zu limitieren.

$$\xi = k_{US} \cdot V_{US} \quad \text{mit} \quad V_{US} \in [V_{US}(min); V_{US}(max)] \quad (5.1)$$

Zur Versorgung des Ultraschallvakuumgreifers mit dem notwendigen Unterdruck p_U wird ein geeigneter Schlauch für pneumatische Anwendungen an

5 Adaption der Anlangentechnik und der Montageprozesse

den Unterdruckanschluss der Ultraschallsonotrode angeschlossen (vgl. Abbildung 2.3 links). An dem anderen Schlauchende sitzt ein Unterdruckregler, der ebenfalls eine druckproportionale Steuerspannung V_p bereitstellt.

$$p_U = k_p \cdot V_p \quad \text{mit} \quad V_p \in [V_p(\min); V_p(\max)] \quad (5.2)$$

Die Regelung des Unterdrucks ist erforderlich, um konstante Voraussetzungen für die Bauteillevitation zu schaffen. Durch den Luftspalt zwischen dem Bauteil und dem Greifer ist das Unterdrucksystem, vom Unterdruckerzeuger über die Unterdruckdüsen im Greifer bis hin zum Umgebungsdruck, offen. Anders als bei einem geschlossenen System, bei dem der Druck¹ eine rein statische Komponente aufweist, setzt sich der Druck bei einem offenen System mit konstanter stationärer Strömung (durch die Betrachtungsgrenzen des Systems strömt das Fluid) gemäß der Bernoullischen Gleichung aus statischem und dynamischem Anteil zusammen (KUCHLING 2004). Während der statische Druck p gleichmäßig in alle Raumrichtungen wirkt, äußert sich der dynamische Druck $1/2 \cdot \rho v^2$ nur in Strömungsrichtung.

Bernoullische Gleichung

$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = \text{const.} \quad (5.3)$$

Weiterhin besagt die Kontinuitätsgleichung

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2, \quad (5.4)$$

dass die Strömungsgeschwindigkeit mit kleiner werdendem Strömungsquerschnitt zunimmt². Im Bezug auf den vorliegenden Fall eines schwebenden Bauteils unter dem Ultraschallvakuumbreifer lassen die beiden physikalischen Effekte folgenden Schluss zu. Eine Verkleinerung des Luftspaltes führt zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, infolgedessen der dynamische Druck zunimmt. Aufgrund des Gesetzes von Bernoulli bleibt der Gesamtdruck aber konstant und infolgedessen nimmt der statische Druck ab. Weiterhin wirkt der dynamische Druck nur in Strömungsrichtung. Durch die seitliche Einstromung in den Luftspalt zwischen dem Bauteil und dem Greifer erzeugt der geänderte dynamische Druck keine Kraftänderung auf das Bauteil. Aber der kleiner gewordene statische Druck führt zu einer höheren anziehenden Kraft auf das Bauteil

¹Um den Bezug zum Gesetz von Bernoulli zu halten, werden im Folgenden kurzzeitig die Begriffe Über- oder Unterdruck nicht verwendet, da diese relative Werte beschreiben. Der allgemeine Begriff des Druckes soll stattdessen als absoluter Wert verstanden werden.

²Das Produkt der mit einer Geschwindigkeit v_1 durchströmten Eingangsfläche A_1 ist gleich dem Produkt der durchströmten Ausgangsfläche A_2 mit der Geschwindigkeit v_2 . Als Beispiel sei an dieser Stelle eine Rohrströmung mit unterschiedlichen Ein- und Ausströmungsöffnungen erwähnt.

in Richtung der Unterdruckbohrungen des Greifers, da der Umgebungsdruck auf der gegenüberliegenden Bauteilseite unverändert ist. Folglich bewirkt eine Luftspaltverkleinerung eine Erhöhung der anziehenden Unterdruckkraft, die ihrerseits den Luftspalt weiter reduziert. Daher ist die Regelung des statischen Drucks zur Erzeugung definierter Luftspaltwerte unumgänglich.

Die Messung des Luftmengenstroms ist hilfreich, aber für die berührungslose Handhabung mittels Ultraschall nicht zwingend erforderlich, denn über diesen Wert ist nur die binäre Information eines vorhandenen Bauteils ableitbar. Wie soeben beschrieben erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit v mit kleiner werdendem Luftspalt. Damit steigt zugleich der Volumenstrom Q gemäß der Gleichung

$$Q = A \cdot v \quad (5.5)$$

an. Die Einströmfläche A hängt bei einem quadratischen Bauteil von den Kantenlängen a und b sowie von der Luftspalthöhe h_0 ab. Somit gilt für den Volumenstrom der Zusammenhang:

$$Q = 2(a + b) \cdot h_0 \cdot v \quad (5.6)$$

Die Verkleinerung des Luftspaltes wirkt somit der Volumenstromerhöhung durch die gestiegene Strömungsgeschwindigkeit entgegen. Weiterhin wird der Volumenstrom auch durch die Druckregelung beeinflusst. Wird der Luftspalt durch eine Störung verkleinert, beispielsweise durch den Kontakt des Bauteils mit dem Bauteilträger bei dem Absetzvorgang, erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit und der statische Druck wird reduziert. Die Unterdruckregelung wirkt der Störung entgegen. Nach der Bernoullischen Gleichung führt dies aber zur Reduktion des dynamischen Drucks (der Gesamtdruck bleibt konstant), womit die Strömungsgeschwindigkeit ebenfalls reduziert wird. Folglich ist der Volumenstrom von der Unterdruckregelung abhängig und kann nicht als Messgröße für den Luftspalt verwendet werden. Jedoch eignet sich der Volumenstrom zur Erkennung, ob ein Bauteil unter dem Greifer vorhanden ist. Ist kein Bauteil vorhanden, sind die Unterdruckbohrungen offen und die Unterdruckregelung muss das Stellsignal stark erhöhen, um den vorgegebenen Unterdruck zu erreichen. Dies bedingt eine deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeit als bei einem schwebenden Bauteil bei gleichem Druck.

Als weiterer Sensor ist eine Kraftmesszelle zur Vermessung der resultierenden Prozesskraft des Ultraschallvakuumgreifers erforderlich. Der Grund für die erneute Vermessung der Greiferspitze liegt in der Kompensation von Systemtoleranzen. Diese entstehen beispielsweise durch Toleranzen im E-Modul piezoelektrischer Keramiken, die für die Wandlung der elektrischen Leistung in eine mechanische Auslenkung verantwortlich sind. Auch die Strecke der Druckregelung weist Toleranzen auf. Zur Regelung des Unterdrucks ist ein Drucksensor erforderlich. Dieser kann aber aus Platz- und Integrationsgründen nicht direkt

an die Unterdruckdüsen der Greiferspitze gesetzt werden. Die Druckmessung muss daher an einer anderen Stelle zwischen der Ultraschallsonotrode und dem Unterdruckregler positioniert werden. Verschiedene Verbindungslängen zwischen dem Drucksensor und der Greiferspitze führen zu unterschiedlichen Unterdruckwerten am Bauteil, deren direkte Messung aber nicht möglich ist. Somit sind die Verstärkungsfaktoren k_{US} und k_p der Übertragungsvorschriften für die Ultraschall- und Unterdruckerzeugung der Gleichungen (5.1) und (5.2) anlagenspezifisch. Folglich ist eine Kalibrierung des Ultraschallvakuumgreifers mit jeder Greiferspitze erforderlich. Diese Kalibrierung wird über die Messung der resultierenden Kraft mit Hilfe des Kraftsensors erreicht. Die Durchführung der Kalibrierung selbst wird in Unterabschnitt 5.2.1 erläutert.

Zuletzt ist noch die Positionierung der Greiffläche in einem definierten Abstand, dem Luftspalt, über der Bauteilfläche notwendig. Dazu ist der Ultraschallvakuumgreifer an eine hochpräzise Linearachse zu montieren, die die Greiffläche in Richtung der Bauteilfläche verfährt. Zur Abstandseinstellung, unabhängig von der Bauteilposition im Koordinatensystem der Greiferachse, sind noch zwei weitere Sensoren erforderlich: zum einen ein direktes Wegmesssystem zur Bestimmung der aktuellen Position der Greiffläche, zum anderen ein Abstandssensor, über dessen Messwert eine relative Positionierung der Greiffläche in einem bestimmten Abstand zu einer gegenüberliegenden Oberfläche möglich ist. Die Messung der relativen Greiferposition zum Bauteil wird in Unterabschnitt 5.1.3 noch ausführlicher betrachtet.

5.1.2 Mechanische Integration des Ultraschallvakuumgreifers

Zur Positionierung und Orientierung des Ultraschallvakuumgreifers und damit des Bauteils sind je nach Anforderungen ein bis drei rotatorische und lineare Achsen erforderlich. Die mechanische Anbindung des Ultraschallvakuumgreifers in die Anlage stellt dabei besondere Anforderungen. Die Herausforderungen liegen in der schwingungsneutralen Integration des Ultraschallvakuumgreifers in die Anlage und in der axialen Ausrichtung des Bauteils.

Der erste Punkt wird durch die Lagerung des Ultraschallsystems im Bereich eines Schwingungsknotens erreicht. In einem Schwingungsknoten wird die Energie des Ultraschalls ausschließlich in Form von mechanischen Spannungen übertragen. Obwohl die exakte Anbindung des Ultraschallsystems an die Anlage in einem Knoten nicht möglich ist, ist die Schwingungsübertragung auf die Halterung im Bereich des Knotens minimal (vgl. Abbildung 5.1, linke Seite, Schraubverbindung zum Hohlwellenmotor).

Für den zweiten Punkt, die Bauteilausrichtung in der Ebene, ist die Drehung des Ultraschallvakuumgreifers um die Längsachse mit dem Drehwinkel Ψ notwendig. Hierfür ist am besten ein Hohlwellenmotor geeignet (vgl. Abbildung 5.1,

linke Seite), an dessen Ende der Ultraschallvakuumgreifer befestigt wird. Das Greifsystem, bestehend aus Ultraschallvakuumgreifer und Hohlwellenmotor, wird an die Positionierungsachsen der Montageanlage montiert. Dabei ist vor allem auf die Ebenenparallelität zwischen der Greiffläche und Arbeits- bzw. Bauteilfläche zu achten. Eine Verkipfung der Längsachse des Ultraschallvakuumgreifers um die x - und y -Achse (Φ und Θ) ist in jedem Fall zu vermeiden. Entstehende Fertigungs- und Montagetoleranzen aller Komponenten müssen erkannt und kompensiert werden. Abbildung 5.1 veranschaulicht anhand geometrischer Beziehungen die Auswirkung einer um die y -Achse verkippten Längsachse. Durch eine Verkipfung sowohl um den Winkel Φ als auch um

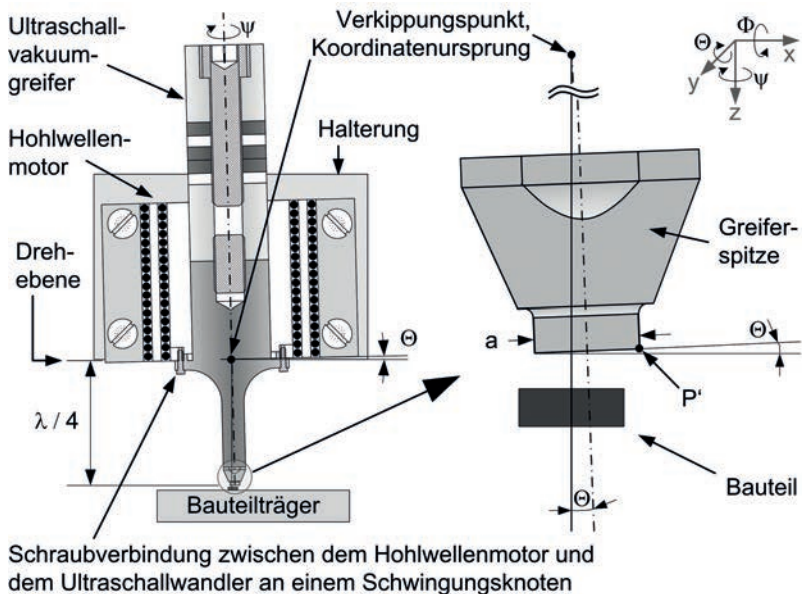


Abbildung 5.1: Überspitzte Darstellung einer um den Winkel Θ verkippt montierten Längsachse des Ultraschallvakuumgreifers (links) sowie der detaillierten Darstellung der Greiferspitzenverschiebung zum Bauteil (rechts). P' stellt einen Eckpunkt auf der Greiffläche dar.

den Winkel Θ entsteht eine Verschiebung des Greifermittelpunktes und eine Beeinflussung des Luftspaltwertes. Dieser Sachverhalt wird im Folgenden für den Eckpunkt P' auf der Greiffläche dargestellt. Hierbei wird vorausgesetzt, dass der Verkipfungspunkt gleich dem Koordinatenursprung ist und dass eine Verkipfung nur um die Winkel Φ und Θ erfolgt. Für $\Phi = \Theta = \Psi = 0$ besitzt im

Weiteren der Referenzeckpunkt P die Koordinaten

$$P = \begin{pmatrix} a/2 \\ b/2 \\ \lambda/4 \end{pmatrix}. \quad (5.7)$$

Mit Hilfe der drei elementaren Rotationsmatrizen (BARTSCH 2001)

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Phi) & \sin(\Phi) \\ 0 & -\sin(\Phi) & \cos(\Phi) \end{bmatrix}, R_y = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & 0 & \sin(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\Theta) & 0 & \cos(\Theta) \end{bmatrix} \text{ und} \\ R_z = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) & 0 \\ \sin(\Psi) & \cos(\Psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

wird der verschobene Eckpunkt P' gemäß der Gleichung (5.9) berechnet.

$$P' = R_x \cdot R_y \cdot R_z \cdot P \quad (5.9)$$

Die tatsächlichen Verschiebungswerte lassen sich aus der Strecke zwischen den Punkten P und P' nach Gleichung (5.10) errechnen.

$$\overline{PP'} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

Durch die Verschiebung in z-Richtung Δz wird der Luftspaltwert eines aufzunehmenden oder abzulegenden Bauteils beeinflusst. Da jegliche Verkippung zu einer Verkleinerung des Luftspaltes führt, wird im Weiteren die Luftspaltdifferenz Δh eingeführt, die wie folgt definiert ist:

$$\Delta h = |\Delta z| \quad (5.11)$$

Die laterale Verschiebung der Greiffläche durch Δx und Δy sowie die Luftspaltbeeinflussung Δh hängen von der Wellenlänge λ des Ultraschalls im Ultraschallvakuumgreifer und den Kantenlängen a und b der Greiferspitze ab. Die Wellenlänge λ errechnet sich aus der Wellengeschwindigkeit c des verwendeten Materials des Ultraschallsystems und der Ultraschallfrequenz f .

Die Auswirkungen auf die Bauteilhandhabung infolge der lateralen Verschiebung der Greiffläche durch eine Verkippung können durch die selbstzentrierende Wirkung des Greifprinzips kompensiert werden. Sollte dies nicht ausreichend oder nicht erwünscht sein, kann die Verschiebung der Greiffläche mit zusätzlicher Sensorik, beispielsweise einer Bildverarbeitung, bestimmt und in der Positionierung der Greiferspitze berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zur lateralen Verschiebung der Greiferspitze hat die Verkippung

des Ultraschallvakuumgreifers einen deutlich stärkeren Einfluss auf den Luftspalt. Während die Verschiebungswerte der Greiferspitze Δx und Δy in der Größenordnung der Bauteilabmessungen a und b liegen, besitzen der Luftspaltwert h_0 und der Verschiebungswert Δz unterschiedliche Größenordnungen. Dies hat zur Folge, dass die Verkippung der Längsachse des Ultraschallvakuumgreifers einen um den Faktor 1000 höheren Einfluss auf den Luftspalt ausübt. Eine Kompensation der entstehenden Luftspaltdifferenz Δh ist nur durch einen höheren Luftspaltwert bei der Bauteilaufnahme und -ablage möglich. Hieraus kann der minimale Luftspaltwert für die Aufnahme des Bauteils abgeleitet werden:

$$h_{\min} = \zeta + \Delta h \quad (5.12)$$

Der minimale Luftspaltwert h_{\min} wird aus der Ultraschallamplitude ζ und der Luftspaltdifferenz Δh berechnet. Voraussetzung für die Bauteilaufnahme und -ablage ist, dass der minimale Luftspalt kleiner ist als der Prozesswert h_0 .

$$h_{\min} = \zeta + \Delta h < h_0 \quad \text{mit} \quad \{\zeta | \zeta > 0\} \quad (5.13)$$

Die Gleichung (5.13) besitzt nur Gültigkeit, wenn die Ultraschallamplitude ζ größer ist als null, denn sonst ist eine ultraschallbasierte Handhabung nicht möglich. Das Verhältnis zwischen dem Luftspalt h_0 und dem minimalen Luftspalt h_{\min} kann als Maß für die Robustheit der Handhabungstechnologie betrachtet werden. Zur Verallgemeinerung der Robustheit wird die dimensionslose Maßzahl R eingeführt und unter Verwendung der Gleichung (5.13) wie folgt definiert:

$$R = \frac{h_0}{h_{\min}} = \frac{h_0}{\zeta + \Delta h} > 1 \quad (5.14)$$

Der Robustheitswert R muss dabei größer als der Wert 1 sein, damit die Bauteilaufnahme und -ablage überhaupt möglich wird. Je größer dieser Wert ist, desto höher ist die Systemrobustheit gegenüber äußeren Schwankungen. Mit Hilfe der Gleichungen (5.13) und (5.14) sind zwei Schlussfolgerungen möglich. Erstens ist eine Verkippung der Drehachse gegenüber der Arbeitsebene unbedingt zu vermeiden und in jedem Fall zu berücksichtigen. Zweitens ist bei der Bauteilaufnahme und -ablage das Verhältnis zwischen der Ultraschallamplitude ζ und dem Luftspalt h_0 möglichst gering zu halten.

5.1.3 Messung der relativen Greiferposition zum Bauteil

Wie im vorherigen Unterabschnitt erläutert, beeinflusst die Höhe des Luftspaltwertes die Robustheit der Handhabungstechnologie. Luftspalttoleranzen reduzieren die Robustheit zusätzlich. Dementsprechend wichtig ist es, den Luftspalt definiert und reproduzierbar einzustellen. Diese Einstellung erfolgt über die Positionierung der Greiffläche in einem bestimmten Abstand zur Bauteilfläche.

5 Adaption der Anlangentechnik und der Montageprozesse

Erschwert wird die Positionierung des Greifers allerdings durch die Höhenvarianz im Arbeitsraum der Montageanlage, da unterschiedliche Abstände zwischen der Greif-, Montage- und Bauteilaufnahmeoberfläche zu erwarten sind. Diese ergeben sich aus unterschiedlichen Bauteil- und Bauteilträgerdicken, variierenden Längen der Greiferspitzen für unterschiedliche Bauteilgeometrien sowie anlagenspezifischen Konstruktionsmerkmalen (unterschiedliche Bauteilzuführsysteme etc.). Die Höhenposition der Greiferaktori (ermittelt durch deren Wegmessenheit) fällt für unterschiedliche Bauteilaufnahme- und -ablagekoordinaten verschieden aus. Abbildung 5.5 verdeutlicht den Sachverhalt schematisch anhand der skizzierten Höhenpositionen. Folglich muss die vertikale Aufnahme- und Ablageposition der Bauteile bekannt sein.

In konventionellen Bestückanlagen wird zur Detektion der tatsächlichen Greifhöhe die Stromaufnahme der Hochachse gemessen. Da der Antriebsstrom eines Motors direkt proportional zum Motordrehmoment und damit zur Anpresskraft steht, genügt eine grobe Höhenpositionierung des Greifers über die Steuerung. Mit Ausschlag des Kraftsensors ist die tatsächliche Aufnahme- bzw. Ablagehöhe erreicht. Der Sachverhalt wurde bereits in Abschnitt 1.2.3 (vgl. Abbildung 1.5) näher erläutert. Aufgrund der berührunglosen Handhabungstechnik ist das angesprochene Messprinzip nicht anwendbar. Das Wegmesssystem der Greiferachse alleine erlaubt keine relative Positionierung der Greiffläche zur Montageoberfläche bzw. zur Aufnahmehöhe der Bauteile. Erst eine Kalibrierung des Wegmesssystems der Greiferaktori mit dem Koordinatensystem der Montageanlage ermöglicht die Positionierung der Greiffläche mit einem definierten Abstand zur Bauteilfläche, die dem gewünschten Luftspalt entspricht. Für die Kalibrierung ist ein unabhängiges Abstandsmesssystem notwendig.

Durch die Bedingung einer berührunglosen Bauteilmanipulation entfallen taktile Abstandsmessprinzipien. Prinzipiell stehen verschiedene berührunglose Abstandsmessverfahren für diesen Anwendungsfall zur Verfügung. Dazu zählen sowohl optische Verfahren, wie die Lichtlaufzeitmessung (BURKHARDT 2004), die Triangulation (DEUMLICH & STAIGER 2002), die chromatisch-konfokale Messung (LÜCKE 2006), als auch akustische (LÜCKE 2006) und induktive Messverfahren (BURKHARDT 2004). Voraussetzung für den Einsatz eines der genannten Messverfahren ist aber die Erfüllung der folgenden Anforderungen:

- Das Abstandsmesssystem ist direkt neben dem Positioniersystem des Ultraschallvakuumgreifers zu befestigen. Nur damit ist der Abstandsmesswert direkt als Positionsstellgröße für den Greifer zu verwenden.
- Limitierend für die Sensorgröße ist der zur Verfügung stehende Bauraum in der Montageanlage.
- Das Messprinzip darf nicht von den maximalen lateralen Beschleunigungen der Montageanlage beeinflusst werden, die während des Montageprozesses auftreten.

- Die Messgenauigkeit sollte unter der Positionierungsgenauigkeit der Liniarachse des Ultraschallvakuumgreifers liegen.
- Das Messprinzip muss mit allen im Montageprozess vorkommenden Oberflächen und Materialien zurechtkommen. Dazu gehören sowohl spiegelnde Bauteiloberflächen als auch matte Bauteilträgeroberflächen.
- Zuletzt ist noch auf die Mindestgröße der zu messenden Oberfläche zu achten. Alle berührungslosen Abstandsmessverfahren benötigen eine bestimmte Reflexionsgröße, um einen Abstandswert sicher zu erfassen. Bei der Auswahl des Messsystems ist daher die kleinste zu handhabende Bauteilfläche als Referenz zu nehmen.

5.1.4 Erweiterung zum automatisierten Greiferspitzenwechsel

Zur automatisierten Montage unterschiedlicher Bauteilgeometrien ist ein Wechselkonzept für die Greiferspitzen erforderlich. Denn erst eine Kongruenz zwischen der Bauteil- und Greiffläche führt zu signifikanten Zentrierkräften (vgl. Unterabschnitt 2.4.4). Im Laboraufbau erfolgt der Greiferspitzenwechsel manuell über eine Schraubverbindung. Aufgrund der form- und kraftschlüssigen Verbindungsart wird die Ultraschallschwingung vom Ultraschallverbundschwinger bis zur Greiferspitze nahezu verlustfrei übertragen. Jedoch sind Schraubverbindungen schwierig zu automatisieren, weshalb für die industrielle Anwendung des Ultraschallvakuumgreifers ein effizienteres Konzept erarbeitet werden muss. Prinzipiell ergeben sich dabei zwei mögliche Szenarien zum Wechsel der Greiferspitze. Entweder wird nur die Greiferspitze oder der gesamte Ultraschallvakuumgreifer getauscht.

Für die semimanuelle Montage oder bei Kleinserien genügt der Tausch des Ultraschallvakuumgreifers. Die Verwendung bestehender Wechselkonzepte im Bereich der semimanuellen Bestückung ist dabei naheliegend. Im Bereich der Fertigungsmittel für Mikrosysteme wird seit mehreren Jahren eine standardisierte Schnittstelle nach DIN 32565 verwendet. Über diese Schnittstelle wird sowohl der Unterdruck als auch die erforderliche elektrische Leistung für den Ultraschallvakuumgreifer übertragen. Dieser lässt sich damit als einzelne Einheit tauschen. Im Rahmen des Forschungsprojektes Sonic Grip des BMBF (02PG2324) wurde durch das Konsortium ein erster Prototyp eines Ultraschallvakuumgreifers mit einer Wechselschnittstelle nach der genannten DIN-Vorschrift entwickelt. Die Schnittstelle befindet sich zwischen dem mechanischen Ultraschallsystem und der Leistungselektronik. Damit wird die Nutzung einer Leistungs- und Ultraschallregelelektronik für unterschiedliche Ultraschallvakuumgreifer ermöglicht.

Der Ansatz, nur die Greiferspitze zu wechseln, ermöglicht den sinnvollen Einsatz der Handhabungstechnologie in der vollautomatisierten Montage. Der Vorteil

hierbei liegt vor allem in der Kostenersparnis, da nur ein Ultraschallverbundschwinger für unterschiedliche Bauteilgeometrien notwendig ist. Zusätzlich zur Greiferspitze ist dabei auch die wechselfähige Sonotrode zu fertigen. Die Hauptanforderung an das automatisierte Wechselkonzept liegt in der dämpfungsfreien Übertragung der Schwingungsenergie, ähnlich dem Vorbild der Schraubverbindung. Für die Auswahl möglicher Wechselkonzepte wird kurz der Aufbau und die Funktionsweise des Ultraschallverbundschwingers wiederholt beschrieben. Abbildung 5.2 zeigt auf der linken Seite den schematischen Aufbau eines Ultraschallvakuumbreifers mit wechselfähiger Greiferspitze. Über eine hochfrequente elektrische Spannung werden die beieinanderliegenden piezoelektrischen Lochscheiben zu Dickenschwingungen angeregt. Diese Schwingung setzt sich als Longitudinalschwingung im mechanischen System fort. Liegt die Gesamtlänge des Ultraschallsystems bei einem ganzen Vielfachen der halben Wellenlänge, wird die Schwingung an den Stirnseiten reflektiert. Dadurch bildet sich eine stehende Welle aus, die die örtliche Auslenkungsamplitude in Längsrichtung beschreibt. Die Reflexion an den Stirnseiten führt nur zu geringen Dämpfungseffekten, so dass die Schallenergie größtenteils im System erhalten bleibt. An den Abschnitten, an denen die Auslenkung gleich Null ist, den Schwingungsknoten, kann das System gelagert werden, ohne die Schwingungsenergie an die Umgebung abzugeben. Befindet sich die Wechselschnittstelle in einem Schwingungsknoten, muss die gesamte Energie in Form von mechanischer Spannung übertragen werden. Liegt das Wechselsystem dagegen in einem Schwingungsbauch, wird die Schwingungsenergie nur kinetisch übertragen. Eine Schraubverbindung überlappt zwar im Schwingungsbauch bzw. -knoten, kann aber aufgrund der form- und kraftschlüssigen Verbindung sowohl die mechanische Spannung als auch die kinetische Schwingungsenergie übertragen.

Die *Fa. Hilti AG* hat eine Spannvorrichtung für axial harmonisch schwingende Bauteile zum Patent angemeldet (PATENTANMELDUNG EP 1710034 A1). Der Fokus der Anmeldung liegt auf ultraschallunterstützten Schlagbohrmaschinen. Der Bohrer wird dabei über ein Rillenkugellager und eine manuelle Federspannvorrichtung an den Ultraschallverbundschwinger gepresst. Die mechanische Kopplung erfolgt dabei in einem Schwingungsbauch, um eine verlustfreie Übertragung der Schallenergie zu ermöglichen. Dieses Konzept wurde für den automatisierten Wechselmechanismus des Ultraschallhandhabungssystems weiterverfolgt. Dabei stellte sich die Frage, mit welcher Kraft die feste und die wechselfähige Sonotrode gegeneinander gepresst werden müssen. Eine zu kleine Kraft würde zu einem klaffenden Spalt führen, während eine zu große Kraft die Ultraschallamplitude zusätzlich dämpft. Um die notwendigen Kräfte zu bestimmen, wurde ein Versuchsträger aufgebaut, der in Abbildung 5.2 auf der rechten Seite dargestellt ist. Über zwei Druckzylinder wird die Anpresskraft der wechselfähigen Sonotrode an die feste Sonotrode des Ultraschallsystems proportional zum angelegten Druck eingestellt. Dabei wird das Übertragungsverhalten zwischen der Auslenkung der Greiferspitze im Verhält-

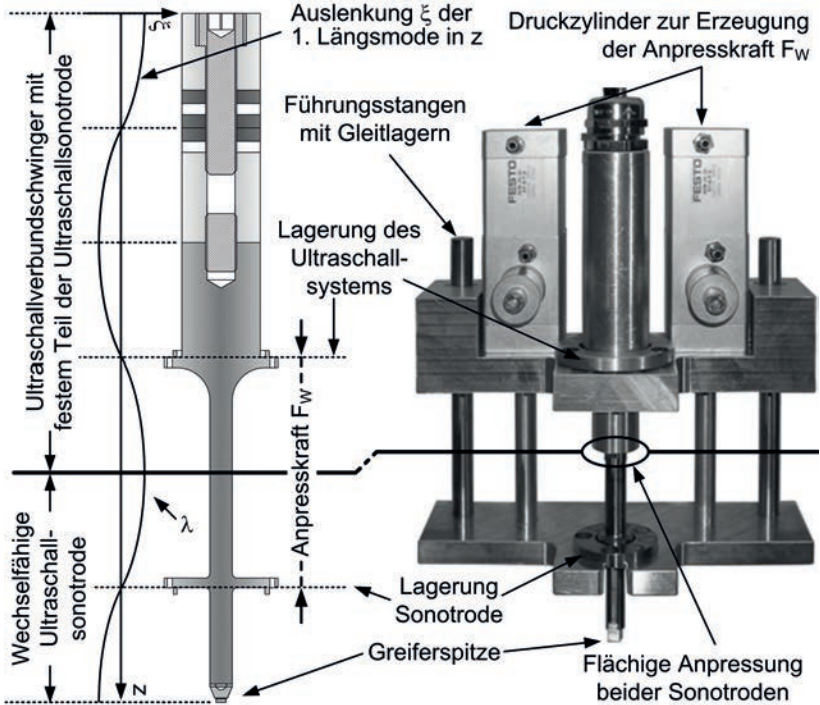


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung eines Ultraschallvakuumgreifers mit fester und wechselfähiger Ultraschallsonotrode (links) sowie des Aufbaus eines Versuchssträgers zur Abschätzung der notwendigen Anpresskräfte zwischen den Sonotrodenteilen (rechts).

nis zur angelegten Spannung an den piezoelektrischen Lochscheiben ermittelt und mit einem verschraubten Ultraschallverbundschwinger (vgl. Abbildung 2.3) verglichen. Die Resonanzfrequenz im Amplitudenverlauf aus Abbildung 5.3 stellt die unterschiedlichen Betriebsfrequenzen dar. Die Abweichung der Resonanzfrequenz zwischen dem verschraubten und dem wechselfähigen System liegt in dessen konstruktivem Unterschied. Das aufgebaute Ultraschallsystem mit wechselfähiger Sonotrode war geometrisch kürzer als der festverschraubte Ultraschallvakuumgreifer, womit dessen Resonanzfrequenz höher lag. Die Anpresskraft wird über die Dämpfung der Amplitude bewertet. Ab einer Anpresskraft von 300 N wird im Falle des Versuchsträgers die gleiche Schallleistung übertragen wie im verschraubten System. Der prototypische Aufbau zeigt, dass die Verwendung unterschiedlicher Greiferspitzen an einem Ultraschallsystem

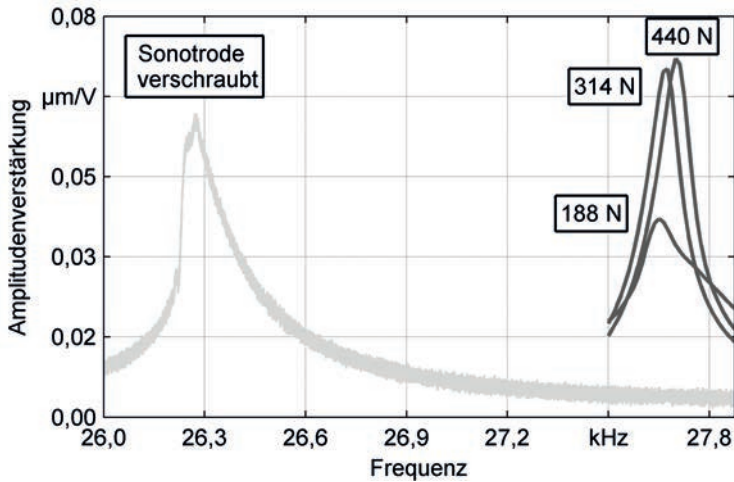


Abbildung 5.3: Amplitudenverstärkung bei unterschiedlichen Anpresskräften F_W im Vergleich zu einem fest verschraubten System.

möglich ist. Durch eine veränderte Druckansteuerung können die Druckzylinder von einer anziehenden Kraft auf eine abstoßende Kraft wechseln. Somit wird die Sonotrodenlagerung herabgesenkt und ermöglicht durch ein einfaches Ein- und Auslegen der wechselfähigen Sonotrode dessen Austausch.

5.2 Inbetriebnahme des Ultraschallvakuumgreifers

5.2.1 Systemkalibrierung

Nach der Adaption der Anlagentechnik ist die notwendige Infrastruktur zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie für die Montage monolithischer Bauteile geschaffen. Als nächstes erfolgt die Inbetriebnahme des Ultraschallvakuumgreifers. Dazu gehört die Systemkalibrierung und im Weiteren die Auslegung des Fügekraft- und Luftspaltreglers (vgl. Unterabschnitt 5.2.2). Mit der Systemkalibrierung sind zwei Maßnahmen durchzuführen, die sich aus der Beschreibung der erforderlichen Sensorik und Aktorik (vgl. Unterabschnitt 5.1.1) ergeben: erstens die Kalibrierung der Greiferposition relativ zur Bauteil- und Bauteilträgerfläche, zweitens die Erstellung des Prozessmodells für die Regelung der Fügekraft und des Luftspalts.

Der erste Punkt ist notwendig, um eine relative Positionierung der Greiffläche über der Bauteilfläche zu ermöglichen. Aufgrund von unterschiedlichen Greifer-spitzenlängen sowie verschiedenen Bauteil- und Bauteilträgerdicken sind eine Kalibrierung des Greiferpositioniersystems und die Vermessung der relevanten Oberflächen (z. B. Bauteilträgerfläche) vor Beginn jeder neuen Montageaufgabe wesentlich. Unter Anwendung des in Unterabschnitt 5.1.3 ausgewählten Abstandmesssystems wird zuerst an einer bekannten Referenzmarke das Wegmesssystem der Linearachse des Ultraschallvakuumgreifers mit dem Messwert des Abstandssensors kalibriert. Dazu wird der Abstand zwischen der Referenzmarke und dem Abstandssensor gemessen und als Bezugsmessgröße definiert. Der Bezugsmessgröße wird der Abstandswert Null zugewiesen. Anschließend wird die Greiffläche bei deaktiviertem Ultraschall in Richtung der Referenzmarke bis zum mechanischen Kontakt verfahren. Dieser wird durch die Messung des elektrischen Kontaktes zwischen dem Ultraschallvakuumgreifer und der Referenzmarke bestimmt. Ermöglicht wird die elektrische Messung wie folgt: Aus Sicherheitsgründen grenzen die mit Hochspannung beaufschlagten piezoelektrischen Lochscheiben an isolierende Keramiken (vgl. Abbildung 2.3). Alle anderen elektrisch leitenden Komponenten des Ultraschallverbundschwingers sind geerdet. Wird die Referenzmarke mit einer bestimmten elektrischen Spannung beaufschlagt, entsteht ein Stromfluß bei einem mechanischen Kontakt mit dem Ultraschallvakuumgreifer. Der Stromfluß bedingt einen Abfall der elektrischen Spannung. Die Messung des Spannungsabfalls zeigt damit den mechanischen Kontakt zwischen der Referenzmarke und dem Ultraschallvakuumgreifer. Die aktuelle Position des Ultraschallvakuumgreifers beim Kontakt wird über das Wegmesssystem der Linearachse ermittelt und ebenfalls als Bezugsgröße mit dem Wert Null definiert. Damit ist das Wegmesssystem der Linearachse des Ultraschallvakuumgreifers mit den Messwerten des Abstandssensors genullt. Anschließend werden jeweils drei Messpunkte mit unterschiedlichen Koordinaten des Bauteilträgers und der Bauteilzuführeinrichtung mit dem Abstandssensor vermessen. Aus den Messwerten wird die Lage der Arbeitsoberflächen im Raum bestimmt. Entsprechend den Ausführungen des Unterabschnitts 5.1.2 sollte eine Verkipfung der Arbeitsfläche gegenüber dem Ultraschallvakuumgreifer gegen Null gehen. Greif- und Ablagehöhen der Bauteile relativ zur Linearachse des Ultraschallvakuumgreifers sind damit bekannt und ermöglichen die Einstellung definierter Luftspaltwerte.

Der zweite Punkt der Systemkalibrierung adressiert die Erstellung des Prozessmodells zur Regelung der Fügekraft und des Luftspaltes. Aus den experimentellen Voruntersuchungen und aus den wissenschaftlichen Vorarbeiten ist eine sehr hohe Prozesssensibilität der Bauteilhandhabung zu erkennen. Bereits kleinste Änderungen im Unterdruck oder in der Ultraschallamplitude verändern den Luftspalt des schwebenden Bauteils und beeinflussen die Robustheit der Handhabung (vgl. Gleichung (5.14)). Daher ist ein exaktes Prozessmodell von entscheidender Bedeutung. Jedoch unterliegen die Prozessparameter Ultraschall-

5 Adaption der Anlagentechnik und der Montageprozesse

amplitude und Unterdruck anlagenspezifischen Schwankungen, da sie selber indirekt über Steuergrößen (V_{US} und V_p , siehe Gleichungen (5.1) und (5.2)) eingestellt werden. Diese Schwankungen gilt es zu reduzieren, um den gewünschten Luftspalt tatsächlich einzustellen. Daher sind zum einen die Prozessparameter Ultraschallamplitude ξ und Unterdruck p_U durch die Steuergrößen V_{US} und V_p im Prozessmodell zu ersetzen. zum anderen ist das Prozessmodell für die jeweilige Montageaufgabe zu trainieren, um die anlagenspezifischen Schwankungen zu berücksichtigen.

Zur Bestimmung des Prozessmodells dient die in Unterabschnitt 5.1.1 beschriebene Kraftmesszelle. Dabei ist aber eine komplette Neuvermessung der Greiferspitze nicht erforderlich. Durch den Methodenschritt der Greiferspitzenauslegung sind die Arbeitspunkte im Prozessfenster der Parameter bereits bekannt. Diese Punkte müssen jetzt nachgemessen werden. Aufgrund des erarbeiteten Prozesswissens in Abschnitt 4.4 ist eine wesentliche Verkürzung der Messzeit möglich. Bei näherer Betrachtung der hergeleiteten Prozessgleichung (5.15) (die Koeffizienten c_8 und c_{10} wurden vernachlässigt, vgl. Unterabschnitt 4.4.2) wird ersichtlich, dass lediglich acht Koeffizienten des Koeffizientenvektors ψ unbekannt sind. Während φ für jede Geometriespitze und für jede Parameterkonstellation bekannt ist, verändert sich $\hat{\psi}$ entsprechend den jeweiligen Prozessrahmenbedingungen. Da die Modellnichtlinearität größtenteils im bekannten Modelleingangsvektor φ enthalten ist, wird durch den Koeffizientenvektor $\hat{\psi}$ nur eine Gewichtung vorgenommen. Folglich reduziert sich die Lösung der unbekannt Koeffizienten auf die Lösung eines linearen Gleichungssystems. Dies ist auch der Grund, weshalb die Eingangsparameter Ultraschallamplitude ξ und Unterdruck p_U durch die Steuergrößen V_{US} und V_p ersetzt werden können, da die konstanten Verstärkungsfaktoren k_{US} und k_p der Gleichungen (5.1) und (5.2) in den Koeffizienten $\hat{\psi}$ berücksichtigt werden.

$$F_{res} = \hat{\psi}^T \cdot \varphi = (c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4 \quad c_5 \quad c_6 \quad c_7 \quad c_9) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ V_{US} \\ V_p \\ h_0 \\ \left(\frac{V_{US}}{h_0}\right)^3 \\ V_{US} \cdot V_p \\ V_p \cdot h_0 \\ V_p^2 \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

Die ursprünglich nichtlineare Prozessgleichung wird damit durch ein lineares Gleichungssystem gelöst, vorausgesetzt es sind mindestens acht Messpunkte (acht unbekannte Koeffizienten) vorhanden. Durch den Lösungsansatz des Recursive-Least-Square Algorithmus ist eine Online-Identifikation von linearen Gleichungssystemen (SCHRÖDER 2010), wie die der Prozessgleichung während

der Vermessung der Greiferspitze, möglich. Eine Online-Identifikation bedeutet an dieser Stelle die Bestimmung des mathematischen Prozessmodells für die momentan verwendete Greiferspitze zeitgleich zu jeder Parameteränderung (Ultraschallamplitude, Unterdruck und Luftspalt) während der Kraftmessung. Zu jedem diskreten Zeitschritt $[k]$ liegt ein Messwert der resultierenden Kraft $F_{res}[k]$ sowie der Parametereingangsvektor $\underline{\varphi}[k]$ vor. Entsprechend den Gleichungen zum Recursive-Least-Square Algorithmus wird aus den genannten Werten und der Optimierungsmatrix \mathbf{P} der Koeffizientenvektor $\underline{\hat{\psi}}[k]$ berechnet (SCHRÖDER 2010).

$$\underline{\hat{\psi}}[k] = \underline{\hat{\psi}}[k-1] + \mathbf{P}[k] \underline{\varphi}[k] \left(F_{res}[k] - \underline{\hat{\psi}}^T[k-1] \cdot \underline{\varphi}[k] \right) \quad (5.16)$$

Der Koeffizientenvektor stellt unter Berücksichtigung der vergangenen Zeitschritte $[k-n]$ die optimale Lösung der Prozessgleichung (5.15) für alle bis dahin aufgetretenen Eingangsparameter $\underline{\varphi}$ dar. Mit dem ermittelten Koeffizientenvektor $\underline{\hat{\psi}}$ wird auch die Prozesskraft

$$F_{Modell}[k] = \underline{\hat{\psi}}^T[k-1] \cdot \underline{\varphi}[k] \quad (5.17)$$

zum Zeitpunkt $[k]$ interpoliert. Nach SCHRÖDER (2010) ist zur Adaption des Koeffizientenvektors $\underline{\hat{\psi}}$ zusätzlich noch die Optimierungsmatrix \mathbf{P} zu jedem Zeitschritt wie folgt zu bestimmen:

$$\mathbf{P}[k] = \mathbf{P}[k-1] - \frac{\mathbf{P}[k-1] \cdot \underline{\varphi}[k] \cdot \underline{\varphi}^T[k] \cdot \mathbf{P}[k-1]}{1 + \underline{\varphi}^T[k] \cdot \mathbf{P}[k-1] \cdot \underline{\varphi}[k]} \quad (5.18)$$

Mit der Online-Identifikation des Prozessmodells für die definierten Arbeitspunkte ist eine ausreichend genaue Berechnung der resultierenden Prozesskraft möglich und dies erlaubt die Regelung der Parameter.

5.2.2 Auslegung des Fügekraft- und Luftspaltreglers

Eine Anforderung an die Methode zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie liegt in einer vereinfachten Prozesssteuerung ähnlich der Vakuumpipette. Die Definitionen des Fügekraft- und des Luftspaltverlaufes sind ausreichend, um den gesamten Handhabungsprozess zu beschreiben. Die weiteren Prozessparameter, Ultraschallamplitude und Unterdruck, sollten für den Anwender in den Hintergrund treten, da sie die Systemkomplexität erhöhen. Zur Erfüllung dieser Anforderung wird ein Fügekraft- und Luftspaltregler entsprechend der Abbildung 5.4 entworfen. Die Regelung erfolgt dabei über die berechnete Kraft F_{Modell} aus dem kalibrierten Prozessmodell des Unterabschnitts 5.2.1. Über die Reglerdifferenz zwischen der Sollkraft und der berechneten Kraft wird durch den Kraftregler das Stellsignal V_{US} geprägt. Die Regelung

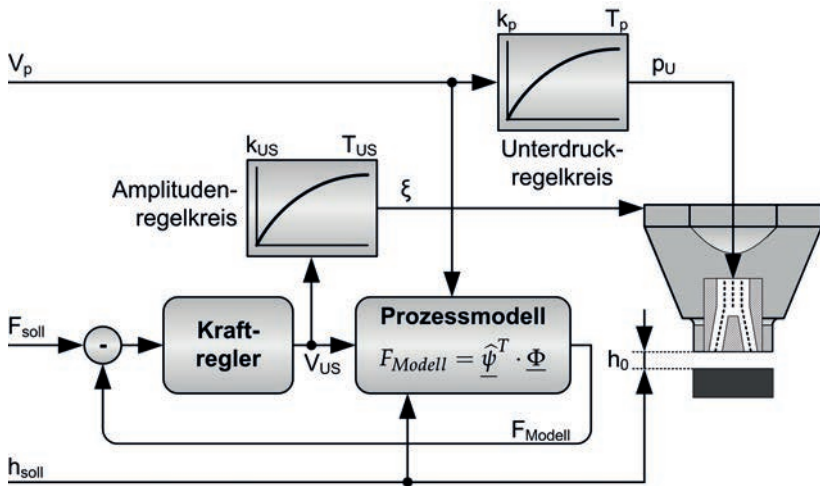


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung des Fügekraft- und Luftspaltreglers.

hätte zwar auch über den Unterdruck V_p erfolgen können, aber die Ultraschallamplitude besitzt bei allen untersuchten Greiferspitzen in Abschnitt 4.2 den größeren Einflussbereich auf den Luftspalt. Zur weitergehenden Erklärung des skizzierten Regelkreises in Abbildung 5.4 werden zwei Anwendungsfälle unterschieden; zum einen die Vorgabe eines Sollluftspaltes h_{soll} und zum anderen die einer Sollkraft F_{soll} bei vorgegebenem Luftspaltwert. In beiden Fällen ist der Unterdruck vorerst als konstanter Wert zu betrachten.

Beim Luftspaltregler ist die Sollkraft F_{soll} auf den Wert Null zu stellen, da sich das schwebende Bauteil in einem Kräftegleichgewicht befindet. Dies entspricht auch der Levitationsbedingung, dass die abstoßende Ultraschallkraft und die anziehende Unterdruckkraft entgegengesetzt sind und sich im Abstand des Bauteils kompensieren (das Bauteilgewicht wird hierbei vernachlässigt, vgl. Fußnote auf der Seite 27). Zur Erreichung des gewünschten Luftspaltwertes h_{soll} wird dieser dem Prozessmodell vorgegeben. Aufgrund der Anwendung einer mathematischen Funktion als Prozessmodell ist sichergestellt, dass es für einen vorgegebenen Luftspaltwert nur eine korrespondierende Ultraschallamplitude bei einem konstanten Unterdruck gibt³. Vorausgesetzt das kalibrierte Prozessmodell ist korrekt, das Amplitudenstellsignal V_{US} liegt innerhalb des definierten Bereiches (vgl. Gleichung (5.1)) und der Ultraschallvakuumgreifer

³Nach JANSCHKE (2010) bildet eine Gleichungsstruktur den Eingangsvektor \underline{x} des Definitionsbereiches D genau auf einen Ausgangsvektor \underline{y} des Wertebereiches Z ab ($f : D \rightarrow Z \quad \underline{x} \rightarrow \underline{y}$).

ist in der Lage, den geforderten Luftspalt zu realisieren, wird der vorgegebene Luftspaltwert h_{soll} durch den tatsächlichen h_0 erreicht.

Bei der Anwendung des Fügekraftreglers befindet sich das Bauteil nicht mehr in der Schwebelage und der Luftspalt wird durch eine Auflage, wie dem Bauteilträger, und der relativen Position des Ultraschallvakuumgreifers zu dieser Auflage vorgegeben. Die Sollkraft F_{soll} entspricht nur dann der tatsächlichen Prozesskraft, wenn der korrekte Luftspaltwert dem Prozessmodell bekannt ist. Aus diesem Grund ist die exakte Vermessung der Bauteilaufnahme- und -ablagehöhe gemäß dem Unterabschnitt 5.1.3 entscheidend. Falsche Luftspaltwerte führen zu Abweichungen zwischen der tatsächlichen Kraft F_{res} (in der Abbildung 5.4 nicht verzeichnet) und der Sollkraft F_{soll} , da für den Regelkreis die berechnete Kraft F_{Modell} ausschlaggebend ist. Auch im Anwendungsfall des Fügekraftreglers gelten als Voraussetzung die Korrektheit des Prozessmodells, die technische Realisierbarkeit der gewünschten Kraft und die Einhaltung des definierten Wertebereiches durch das Stellsignal V_{US} .

Mit einem konstanten Unterdruckwert V_p wird die Steuerung des Handhabungsprozesses in den Phasen Aufnahme, Transport, Ablage und Fügen über jeweils einen direkten Parameter ermöglicht. Die Stellgröße der Ultraschallamplitude V_{US} wird solange angepasst, bis die Sollkraft gleich der Istkraft ist. Gleichzeitig wird die Stellgröße auch für die Amplitudensteuerung des Ultraschallvakuumgreifers verwendet. Somit entsprechen bei einem korrekt kalibrierten Prozessmodell die vorgegebenen Prozessgrößen, Luftspalt und Kraft, auch den tatsächlichen Werten. Aus dem gleichen Grund wirkt auch der Steuerungswert des Unterdrucks V_p sowohl auf das Prozessmodell als auch über die Unterdruckregelung auf den Ultraschallvakuumgreifer. Zur Verdeutlichung sind in der Abbildung 5.4 zwei zusätzliche Regelkreise, der Amplituden- und Unterdruckregelkreis, verzeichnet. Obwohl beide Regelkreise mit einem dynamischen Verhalten dargestellt sind, widersprechen sie im eingeschwungenen Zustand nicht den Gleichungen (5.1) und (5.2). Somit ist auch die Annahme eines statischen Prozessmodells im vorherigen Kapitel auf die aufgestellten Gleichungen (5.1) und (5.2) valide. Da die Unterdruck- und Amplitudenregelung des Ultraschallvakuumgreifers aber reale Systeme sind, unterliegen Sollgrößenänderungen der jeweiligen Systemträgheit. Die Annahme eines statischen Gesamtsystems ist dennoch gültig, wenn dem System ausreichend Zeit gegeben wird, bis die Änderungen einen eingeschwungenen Zustand erreichen. Ein statisches Gesamtsystem wird erreicht, wenn der Kraftregler eine wesentlich höhere Zeitkonstante besitzt als die Regelkreise des Unterdrucks und der Ultraschallamplitude.

Die Auslegung des Kraftregelkreises erfolgt demzufolge in zwei Schritten. Erstens wird das Sprungantwortverhalten des Unterdruck- und Amplitudenregelkreises als Tiefpassfilter erster Ordnung aufgenommen. Die Gleichungen (5.19)

5 Adaption der Anlagentechnik und der Montageprozesse

und (5.20) stellen die Laplace-transformierten Übertragungsfunktionen des Amplituden- G_{US} und Druckregelkreises G_p allgemein dar.

$$G_{US} = \frac{\xi(s)}{V_{US}(s)} = \frac{k_{US}}{1 + T_{US} \cdot s} \quad (5.19)$$

$$G_p = \frac{p_U(s)}{V_p(s)} = \frac{k_p}{1 + T_p \cdot s} \quad (5.20)$$

Zweitens wird aus den ermittelten Zeitkonstanten T_{US} und T_p ein PI-Regler entwickelt. Der integrierende Anteil des Reglers dient zur Vermeidung bleibender Reglerdifferenzen. Nach SCHULZ (1995) besitzt ein PI-Regler die Übertragungsstruktur der Gleichung (5.21).

$$G_R = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = K_r + \frac{K_r}{T_N \cdot s} \quad (5.21)$$

Entsprechend den vorherigen Erläuterungen, dass der Kraftregler die höchste Zeitkonstante besitzen muss, wird die Zeitkonstante T_N festgelegt:

$$T_N = 5 \cdot T_{\max} \quad \text{mit} \quad T_{\max} = \begin{cases} T_{US}, & \text{wenn } T_{US} \geq T_p \\ T_p, & \text{wenn } T_p \geq T_{US} \end{cases} \quad (5.22)$$

Durch die Wahl der hohen Zeitkonstante wirken Sollgrößenänderungen nur sehr langsam auf das System. Die sukzessiven Kleinsignaländerungen verursachen damit nur kleinere Systemanregungen, die jeweils sehr schnell abklingen. Die Höhe des Proportionalbeiwerts K_r bildet sich aus der maximal erreichbaren Prozesskraft $F_{res}(max)$ und dem maximalen Steuerungswert der Ultraschallamplitude $V_{US}(max)$:

$$K_r = \frac{V_{US}(max)}{F_{res}(max)} \quad (5.23)$$

Zuletzt wird noch die Verwendung der Unterdrucksteuerung V_p in Abbildung 5.4 erklärt. Im Fall der Luftspaltregelung ist die Sollkraft gleich Null, während der Sollluftspalt h_{soll} vorgegeben wird. Eine zusätzliche Unterdruckerhöhung⁴ führt beim realen System zu einer Reduzierung des Luftspaltes h_0 . Die über das Prozessmodell berechnete Kraft F_{Modell} geht von Null zu einem negativen Wert über. Durch die Bildung der Reglerdifferenz $F_{soll} - F_{Modell}$ entsteht eine positive Abweichung, die eine Steigerung der Ultraschallamplitude bewirkt. Eine Erhöhung der Amplitude führt im realen System zu einer Erhöhung des Luftspaltes h_0 und über das Prozessmodell zu einer Minimierung der negativen

⁴Die Erhöhung des Unterdrucks bedeutet in diesem Kontext eine Werteänderung in Richtung eines Vakuums.

Modellkraft bis zum Wert Null. Durch den Regler ist eine Druckänderung ohne die Beeinflussung der Prozessparameter Luftspalt h_0 und Fügekraft F_{res} möglich. Nach SCHILP (2007) und HEINZ (2011) führt ein höherer Unterdruck zur Steigerung der bauteilzentrierenden Kräfte, womit die Bauteilstabilität und die Höhe der maximalen lateralen Greiferbeschleunigung gesteigert wird.

5.3 Adaption der Montageprozesse

5.3.1 Gestaltung der Chip-and-Wire-Technik

Mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.2 ist zum einen die Regelung der Prozessparameter Luftspalt und Fügekraft möglich und zum anderen die vollständige Steuerung des Handhabungsprozesses durch die Vorgabe von Luftspalt- und Kraftverläufen. Wie bei der konventionellen Handhabungstechnik erstreckt sich der Montageablauf von der Bauteilaufnahme bis hin zu dessen Ablage und anschließendem Fügevorgang auf dem Bauteilträger. Der vorgelagerte Arbeitsschritt der Bauteilvereinzelung sowie die nachgelagerten Prozessschritte nach dem Andrücken des Bauteils in ein Fügemitel werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Diese Schritte sind unabhängig von der Handhabungstechnologie durchzuführen. Der Fokus der Adaption der Montageprozesse liegt auf der Integration der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall in den bestehenden Montageablauf, der Chip-and-Wire- und Flip-Chip-Technik.

Der Hauptunterschied zwischen der Flip-Chip- und Chip-and-Wire-Technik liegt in der Ausrichtung der zu fügenden Bauteilseite. Während bei der Flip-Chip-Technik die zu kontaktierende Bauteilseite auf dem Bauteilträger liegt, ist diese Seite bei der Chip-and-Wire-Technik dem Bauteilträger abgewandt. Da die einzelnen Bauteile eines Wafers immer mit der nichtprozessierten Seite auf einem Blue-Tape oder UV-Tape liegen, sind die Bauteile bei der Flip-Chip-Technik aufzunehmen, mit der funktionsfähigen Seite nach unten zu drehen und auf dem Bauteilträger abzulegen. Für die Chip-and-Wire-Technik ist dies nicht nötig. Der Wendevorgang bei der Flip-Chip-Technik stellt im Hinblick auf die berührungslose Handhabung mittels Ultraschall eine erweiterte Betrachtung dar und wird erst im nächsten Unterabschnitt 5.3.2 diskutiert. Der folgende Ablauf bezieht sich damit auf die Aufnahme und Ablage eines einzelnen Bauteils, wie es auch bei der Chip-and-Wire-Technik erforderlich ist. Nach der Bauteilablage erfolgt die Kontaktierung durch einen Die-Bonder. Zu jedem Handhabungsschritt wird auch auf die Veränderung der Steuergrößen des Sollluftspaltes h_{soll} , der Sollkraft F_{soll} und des Unterdrucks V_p eingegangen. Abbildung 5.5 veranschaulicht schematisch die relevanten Prozessschritte sowie den generischen Verlauf der Steuergrößen. Im Folgenden werden die Prozessschritte und die Identifikation der jeweiligen Steuerwerte nacheinander erläutert:

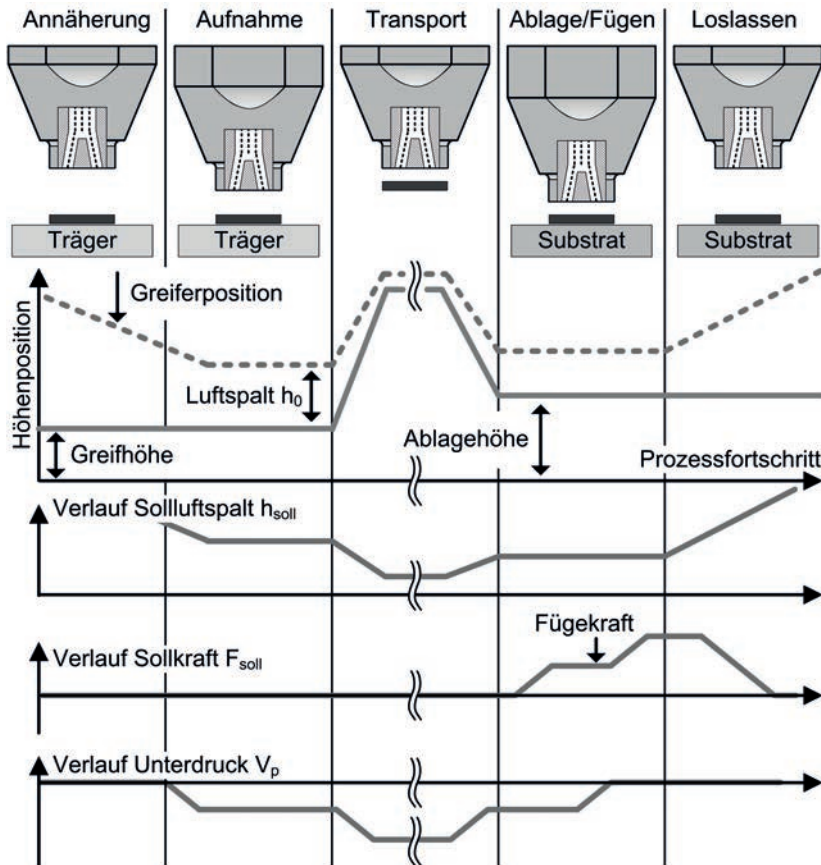


Abbildung 5.5: Prozessschritte beim berührungslosen Greifen mittels Ultraschall.

Annäherung: Im ersten Prozessschritt ist der Ultraschallvakuumgreifer in einem definierten Abstand zur Bauteiloberfläche zu positionieren. Der Luftspalt h_0 kann zu Beginn dieses Schrittes nicht den vorgegebenen Wert des Sollluftspaltes h_{soll} annehmen. Nach HEINZ (2011) liegt der maximal mögliche Luftspaltwert unter $100 \mu m$. Die Annäherung des Greifers an das Bauteil ist gesondert zu betrachten, da währenddessen eine ultraschallbedingte Kraftwirkung auf das Bauteil zu vermeiden ist. Die Longitudinalschwingung des Ultraschalls setzt sich auch in der Luft von der Greiffläche weggehend fort. Durch die sukzessive Annäherung des Greifers an den angestrebten Luftspalt h_0 treten Stehwelleneffekte

fekte auf, wenn die Longitudinalschwingung des Ultraschalls am Bauteil oder dessen Unterlage reflektiert wird.

Dies ist immer bei Abstandswerten von

$$n \cdot \frac{\lambda}{2} \left(\text{mit } \lambda = \frac{c_{Luft}}{f_0} \right), \quad (5.24)$$

einem Vielfachen der halben Wellenlänge λ der jeweiligen Ultraschallfrequenz f_0 (Schallgeschwindigkeit der Luft c_{Luft}), der Fall. Gemäß der Beschreibung zur Stehwellenlevitation (vgl. Unterabschnitt 2.3.1) wird bei diesen Abständen eine Kraft auf das Bauteil ausgeübt, die die Bauteillage beeinflusst. Daher ist das Ultraschallsystem erst bei Abstandswerten kleiner der halben Wellenlänge zu aktivieren. Zusätzlich ist auch der Unterdruck V_p während der Annäherungsphase auf Null zu halten, um ein vorzeitiges Ansaugen des Bauteils zu vermeiden. Mit der Unterschreitung eines Luftspaltwertes h_0 kleiner dem Wert der halben Wellenlänge $\lambda/2$ ist der Prozessschritt der Annäherung abgeschlossen.

Aufnahme: Das Ziel der Bauteilaufnahme liegt in der Aufbringung kontrollierter Greifkräfte auf das Bauteil. Dazu wird zum einen der Luftspalt h_0 bis zur Erreichung des Sollluftspaltes h_{soll} weiter verkleinert und zum anderen wird der Unterdruck V_p erhöht. Die Zielwerte des Unterdrucks und des Sollluftspaltes richten sich nach der Robustheitsbetrachtung durch Gleichung (5.14). Daraus wird der Luftspaltwert identifiziert, der eine maximale Systemtoleranz (hinsichtlich der Greiferachsenverkippung, der Positionier- und Höhenmessgenauigkeit; vgl. Unterabschnitt 5.1.2) zulässt. Dieser maximale Luftspaltwert bedingt einen bestimmten Unterdruckwert V_p . Aus der Festlegung dieser beiden Werte wird die korrespondierende Ultraschallamplitude durch den Fügekraft- und Luftspaltregler bestimmt.

Bereits während der Annäherung des Greifers an den Sollluftspalt kann das Bauteil angehoben werden, ohne dabei einen mechanischen Kontakt zur schwingenden Greiffläche zu erleiden. Voraussetzung hierfür ist, dass das Bauteil von keinen oder nur sehr geringen Haftkräften auf der Zuführeinheit gehalten wird. Da die anziehende Unterdruckkraft einen größeren Fernwirkeffekt als die abstoßende Ultraschallkraft aufweist, wird das Bauteil ab einem bestimmten Luftspaltwert zum Greifer hin beschleunigt. Der exponentiell zunehmende abstoßende Effekt des Ultraschalls bremst die Bauteilbewegung rechtzeitig ab, bevor es zu einem Kontakt mit der schwingenden Greiferoberfläche kommt. Sollte eine Greifkraft zur Aufhebung der Bauteilhaftkräfte notwendig sein, ist zusätzlich eine negative Sollkraft F_{soll} zu erzeugen (dieser Fall ist in Abbildung 5.5 nicht verzeichnet), die anschließend wieder wegzunehmen ist.

Transport: Im dritten Prozessschritt wird das Bauteil an die Zielposition gebracht. Das Hauptaugenmerk liegt hier auf den maximalen lateralen Verfahrbeschleunigungen des Greifers. Deren Höhe definiert maßgeblich die erreichbare Taktzeit bei der Montage. Um das schwebende Bauteil während der Beschleunigungs- oder Verzögerungsphase des Greifers nicht zu verlieren, müssen die zentrierenden Kräfte die Beschleunigungskraft übersteigen. Nach SCHILP (2007) entstehen die Zentrierkräfte durch die Umströmung des Bauteils bedingt durch den Unterdruck. Eine Erhöhung des Unterdrucks V_p bewirkt damit eine Steigerung der Zentrierkräfte. Der Luftspalt bleibt durch die Luftspaltregelung konstant, da der Regler die Ultraschallamplitude erhöht. Eine zusätzliche Reduzierung des Sollluftspaltes ermöglicht eine weitere Steigerung des Unterdrucks und damit der Zentrierkräfte. HEINZ (2011) vergleicht die gesteigerten Ultraschallamplituden und Unterdruckwerte mit einem vorgespannten Lager, ähnlich zweier Federn, die am Bauteil in gegensätzlicher Richtung ziehen. Je höher die Vorspannung ist, desto höher sind auch die maximal möglichen Zentrierkräfte. Nach der Erreichung der Zielposition sind der Unterdruck und der Sollluftspalt auf die Zielwerte für die Bauteilablage zu ändern. Für den Absetzvorgang wird der Sollluftspalt wieder entsprechend der Robustheitsbetrachtung nach Gleichung (5.14) erhöht, um einen größtmöglichen Abstand zwischen der schwingenden Greiferoberfläche und dem Bauteil zu gewährleisten.

Ablage und Fügen: Im vorletzten Prozessschritt ist das Bauteil am Zielort abzusetzen und eine definierte Fügekraft zu erzeugen. Durch die Systemkalibrierung (vgl. Unterabschnitt 5.2.1) ist die Höhenposition des Greifers zur Ablage des Bauteils bekannt. Zur Erzeugung der Fügekraft wird die Sollkraft F_{soll} erhöht. Anschließend wird der Unterdruck V_p auf Null zurückgesetzt, wobei durch die Kraftregelung die Fügekraft durch eine Verkleinerung der Stellgröße der Ultraschallamplitude gleich bleibt. Die Reduzierung des Unterdrucks ermöglicht eine zusätzliche Steigerung der Sollkraft. Aus den Messergebnissen nach Abschnitt 4.2 ist bekannt, dass die maximal erreichbare Fügekraft bei ca. 250 mN liegt (vgl. Abbildung B.2 bis B.5) und stark von den geometrischen Parametern abhängt. Aus diesem Grund ist die maximal erreichbare Fügekraft für jede Bauteilgeometrie und Greiferspitzengestaltung unterschiedlich. Die verwendeten Fügemitel (Lot oder Klebstoff) sind auf die maximalen Fügekräfte abzustimmen.

Loslassen: Im letzten Handhabungsschritt ist die Greifkraft für das Bauteil aufzuheben und das Greifwerkzeug ist zu entfernen. Infolge einer elektrischen Aufladung des Bauteils durch den Bauteilträger können adhäsive Kräfte zwischen dem Bauteil und dem Greifwerkzeug auftreten. Entsprechend dem Coulombschen Gesetz nimmt die elektrostatische Kraft F_C zweier entgegengesetzt geladener Punktquellen Q_1 und Q_2 im Quadrat des Abstandes r_C^2 ab

(LINDNER ET AL. 1999).

Coulombsches Gesetz

$$F_C = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_C^2} \quad (5.25)$$

Das Gesetz ist auch auf geladene Platten übertragbar, wie es im den vorliegenden Fall, durch Bauteil- und Greiffläche, gegeben ist. Zur Vermeidung einer erneuten Bauteilaufnahme ist daher die Sollkraft auf dem maximalen Wert zu belassen und der Abstand zwischen dem Greifer und dem Bauteil zu erhöhen. Sollte die maximale Fügekraft die adhäsive Kraft nicht übersteigen, ist über die Druckregelung ein leichter Überdruck zu erzeugen, der eine zusätzliche abstoßende Kraft auf das Bauteil ausübt (dieser Fall ist in Abbildung 5.5 nicht dargestellt). Analog zum Handhabungsschritt der Annäherung vor der Bauteilaufnahme ist beim Loslassen auch auf den Effekt der Stehwellenlevitation zu achten. Dieser tritt bei einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge entsprechend der Gleichung (5.24) auf. Bevor der Greifer einen Luftspaltwert von $n \cdot \lambda/2$ überschreitet, muss das Ultraschallsystem deaktiviert werden. Durch dessen Abschaltung schwingt der Ultraschallvakuumgreifer jedoch sehr lange nach, da die Bauart von Ultraschallverbundschwingern zur Erzeugung hoher Leistungen eine dementsprechend hohe Systemgüte besitzt (vgl. Unterabschnitt 2.4.2). Um die im System gespeicherte Schwingungsenergie schneller abzubauen sind entweder die piezoelektrischen Lochscheiben kurzzuschließen oder eine gegensätzliche Schwingungsansteuerung aufzubringen.

5.3.2 Gestaltung der Flip-Chip-Technik

Im Gegensatz zur Chip-and-Wire-Technik ist bei der Flip-Chip-Technik ein weiterer Prozessschritt, die Bauteildrehung, erforderlich. Diese kann an einer beliebigen Stelle nach der Bauteilaufnahme und vor deren Ablage erfolgen. Die Verwendung zweier Ultraschallsysteme, zwischen denen das Bauteil gewendet wird, ist allerdings überflüssig, da die Bauteile nur auf einer Seite eine oberflächenempfindliche Strukturierung besitzen. Die gegenüberliegende Bauteilseite wird aus fertigungstechnischen Gründen nicht mit einer Struktur versehen. Diese Bauteilseite wird dazu verwendet, den prozessierten Wafer nachträglich über einen Schleifprozess zu verdünnen. Danach wird der Wafer auf ein Blue-Tape oder UV-Tape geklebt und in einzelne Bauteile zerteilt. Durch die klebende Eigenschaft des UV- oder Blue-Tapes bleibt die Form des Wafers erhalten (vgl. Unterabschnitt 1.2.1). Die anschließende Bauteilvereinzelung erfolgt über einen Needle-Ejector. Über feine Nadeln wird die Folie des Blue- oder UV-Tape angehoben und das darüberliegende Bauteil löst sich zum Teil von der Folie. Die

empfindliche Bauteilseite ist dabei möglichst schonend nach der Lösung von der Folie zu greifen.

Genau hier kann die berührungslose Handhabung mittels Ultraschall ihre Vorteile ausspielen. Abbildung 5.6 veranschaulicht schematisch deren Einsatz bei der Flip-Chip-Technik. Die Idee hierbei liegt in der schonenden Aufnahme der strukturierten Bauteilseite durch einen Ultraschallvakuumgreifer und der anschließenden Übergabe des Bauteils an eine Vakuumpipette an der unempfindlichen Bauteilseite. Damit werden die Vorteile beider Handhabungstechnologien kombiniert. Durch die Vakuumpipette können wesentlich höhere laterale Beschleunigungen des Bauteils zur Positionierung ermöglicht werden als bei der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall. Der Grund hierfür liegt in den höheren Greifkräften. Weiterhin wird das Bauteil durch das ultraschallbasierte Greifprinzip bei der Aufnahme stets zentrisch unter dem Greifer ausgerichtet. Die Bauteilübernahme durch eine Vakuumpipette erfolgt daher immer an einer bekannten Position und Orientierung des Bauteils. Allerdings entsteht durch die Kombination beider Handhabungstechnologien für die Flip-Chip-Technik eine Restriktion im Bezug auf die Anbringung der Lotbumps. Diese können nicht mehr über ein Siebdruckverfahren auf die Bauteile im Waferverbund vor der Vereinzelung gebracht werden, da sie mit einer Höhe von etwa 80 bis 100 μm der Höhe des für die berührungslose Handhabung notwendigen Luftspaltes entsprechen. Daher müssen die Lotbumps immer auf den Bauteilträger gebracht werden. Die Prozessschritte der berührungslosen Bauteilaufnahme und der Bauteilübergabe an die Vakuumpipette in der Abbildung 5.6 sind identisch zu den Prozessschritten der Annäherung, der Aufnahme und des Transports des vorangegangenen Unterabschnitts 5.3.1. Ein separater Schritt für die Aufhebung der Greifkraft des Ultraschallvakuumgreifers nach der Bauteilübergabe an die Vakuumpipette ist nicht erforderlich, da die Greifkräfte der Vakuumpipette höher liegen.

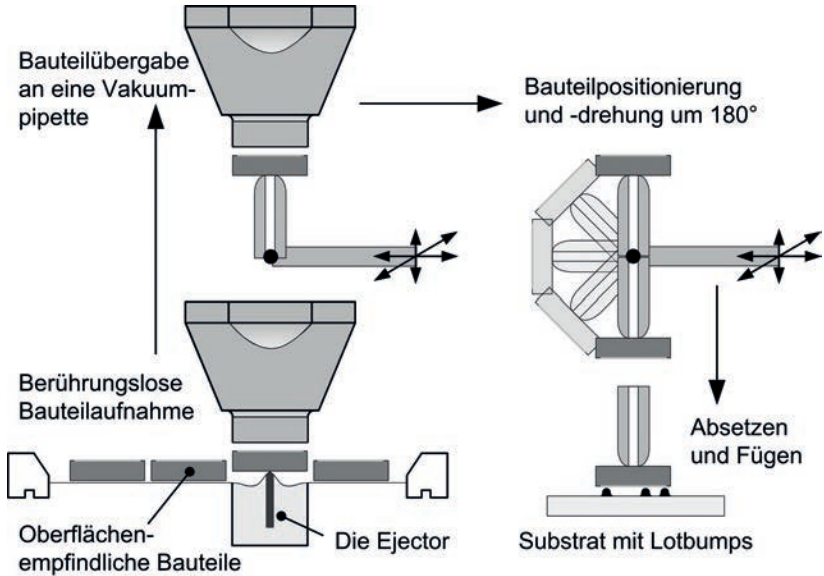


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der Anwendung der berührungslosen Handhabungstechnologie mittels Ultraschall in der Flip-Chip-Technik zur Montage von oberflächenempfindlichen Bauteilen.

6 Technische und wirtschaftliche Bewertung

6.1 Bewertungsgrundlage

Mit Hilfe der vorgestellten Ansätze in den vorangegangenen Kapiteln ist ein berührungsloser Montageprozess sensibler Bauteile möglich. Zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung dieser Ansätze und der in Kapitel 3 dargestellten Methode wurde eine prototypische Anlage aufgebaut und ein exemplarischer Montageprozess durchgeführt. Als Ausgangsbasis diente die konventionelle Leiterplattenbestückanlage SiPlace D2 der Fa. Siemens Electronics Assembly Systems¹. Im Rahmen des Forschungsprojektes SonicGrip wurde diese Bestückanlage umgerüstet und mit einem Ultraschallvakuumgreifer versehen (Reinhart et al. 2008). Das Projekt SonicGrip wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02PG2324 gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA-PFT) betreut.

Der exemplarische Montageprozess spiegelt den Ablauf einer Leiterplattenbestückung wider. Die Testbauteile mit den geometrischen Abmessungen von $5 \cdot 5 \cdot 0,12 \text{ mm}^3$ werden von einer bestimmten Position aufgenommen und an einer anderen abgelegt. Als Zuführeinheit dient ein Waffle Pack, auf dem die Bauteile geordnet liegen. Den Bauteilträger bildet eine Aluminiumplatte auf der eine doppelseitig klebende Folie aufgebracht ist, die das Fügemittel repräsentiert (vgl. Abbildung 6.2, Objektkennzeichnung 4 und 5). Zur Handhabung der Bauteile wird eine der bestehenden Greiferspitzen aus den Voruntersuchungen verwendet (Greiffläche $5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ mit zwei Unterdruckbohrungen mit einem Durchmesser von je $0,6 \text{ mm}$ und einem Abstand von $1,0 \text{ mm}$ zueinander).

6.2 Anwendungsbeispiel Leiterplattenbestückung

6.2.1 Prototypischer Aufbau der Montageanlage

Die Bestückanlage vom Typ SiPlace D2 besitzt einen 2,5-dimensionalen Arbeitsraum, um die Positionierung und die Ausrichtung der Bauteile in der Ebene

¹ Anfang 2011 wurde das Geschäftsgebiet der Siemens Electronics Assembly Systems von der Fa. ASM Pacific Technology übernommen.

zu realisieren. Dieser Arbeitsraum wird durch einen Portalroboter mit drei Linearachsen und einer rotatorischen Achse realisiert. Abbildung 6.2 zeigt auf der linken Seite eine Großaufnahme der Anlage. Der Bestückkopf, der mit Hilfe der ersten zwei Linearachsen in der Ebene bewegt wird, trägt die Hochachse, die rotatorische Achse zur Ausrichtung des Greifers und das eigentliche Greifwerkzeug. Für die Hochachse wurde ein Kugelgewindeantrieb mit einer Positioniergenauigkeit von unter $2\ \mu\text{m}$ eingesetzt. Als rotatorische Achse wurde ein Hohlwellenmotor entsprechend der Abbildung 5.1 verwendet. Der Druckregler sowie der Füge- und Luftspaltregler wurden unter Anwendung des Rapid-Control-Prototyping-Systems *DS1104 R&D Controller Board* der Fa. *dSPACE GmbH* und der Entwicklungsumgebung *Matlab Simulink* der Fa. *The MathWorks, Inc.* aufgebaut. Das Real-Time Interface (RTI) des Systems ermöglicht sowohl den simulativen Test des Regelkreises als auch die Reglererprobung direkt an dem Handhabungssystem. Der Luftmengenstromfluss wurde mit dem Massendurchflussmesser F-100D/F-100DI der Fa. Wagner Mess- und Regeltechnik GmbH ermittelt. Die Abstandsmessung zu einer bestimmten Oberfläche erfolgte über einen Laser-Triangulationssensor vom Typ ILD-1700-10 der Fa. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG. Entsprechend der Abbildung 6.1 wurde der Abstandssensor seitlich am Bestückkopf montiert und ermöglichte die relative Positionierung des Ultraschallvakuumgreifers über dem Bauteil. Dieser Sensor wurde auch zur Verifikation des Luftspaltreglers verwendet (vgl. Abbildung 6.6). Zur Erstellung des Prozessmodells und zur Verifikation des Füge-reglers wurde ein Kraftsensor vom Typ KD45 sowie eine hochauflösende Messelektronik vom Typ GVS-2AS der Fa. ME-Meßsysteme GmbH verwendet. Entsprechend den Ausführungen des Abschnitts 5.1 sind damit alle erforderlichen Sensoren und Aktoren bereitgestellt. Die Abbildung 6.2 veranschaulicht das Ergebnis der Umbaumaßnahme an der Bestückanlage.

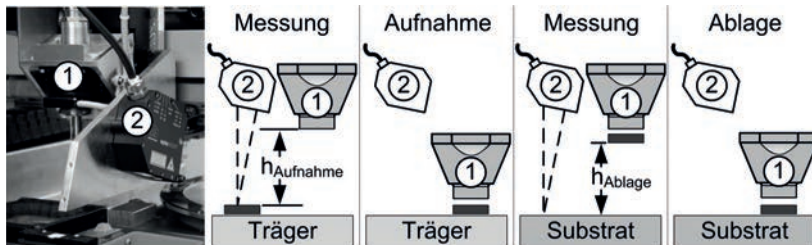


Abbildung 6.1: Prototypische Umsetzung zur Messung des Greiferabstandes mittels Laser-Triangulationssensor (links) und die schematische Darstellung des Ablaufs während der Bauteilaufnahme und -ablage (rechts); 1 = Ultraschallvakuumgreifer, 2 = Laser-Triangulationssensor.

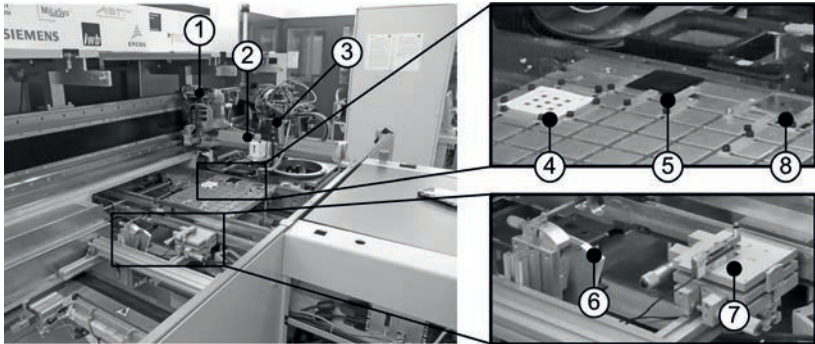


Abbildung 6.2: Prototypischer Aufbau einer Montageanlage auf Basis des Siemens Si-Place D2 Bestückautomaten mit integriertem Ultraschallvakuumgreifer. 1. Portalroboter, 2. Ultraschallvakuumgreifer, 3. Bestückkopf, 4. Bauteilträger, 5. Waffle-Pack, 6. Laser-Triangulationsensor (im Bild ist dieser nicht am Bestückkopf montiert, da er zum Zeitpunkt der Bildaufnahme zur Verifikation des Luftspaltreglers eingesetzt wurde), 7. Kraftsensor, 8. Gel-Pack.

6.2.2 Erstellung des Prozessmodells

Nachdem die Greiferspitze erstellt war und die anlagenspezifischen Voraussetzungen geschaffen wurden, erfolgte die Inbetriebnahme des Ultraschallvakuumgreifers. Auf die Kalibrierung der Greiferposition zur Aufnahme und Ablage der Bauteile wird nicht näher eingegangen, da diese gemäß der Abbildung 6.1 durchzuführen ist. Zur Ermittlung des Prozessmodells wurde vorab der relative Abstand der Kraftmesszelle zum Ultraschallvakuumgreifer ermittelt und anschließend wurde die Greiffläche darüber positioniert. Danach wurden verschiedene Prozessparameter aus Unterdruck, Ultraschallamplitude und Luftspalt eingestellt und die sich ergebende Kraft gemessen. Anhand der Ausführungen des Unterabschnitts 5.2.1 und unter Einsatz des Rapid-Control-Prototyping-Systems *DS1104 R&D Controller Board* der *Fa. dSPACE GmbH* wurde das Prozessmodell während der Messung (online) identifiziert. Der Identifikationserfolg des Prozessmodells wird durch die Abbildung 6.3 dargestellt. Im veranschaulichten Beispiel wurde die Greiferspitze in einem festen Abstand von $25 \mu\text{m}$ über der Wägezelle positioniert. Weiterhin wurde der Unterdruck auf -100 hPa konstant gehalten. Anschließend wurde die Ultraschallamplitude allmählich verändert und die daraus resultierende Prozesskraft F_{res} gemessen. Zum Beginn besteht eine deutliche Abweichung zwischen der berechneten und der gemessenen Prozesskraft. Diese Abweichung ist durch die frei gewählten Initialwerte des Koeffizientenvektors $\hat{\psi}[k=0]$ zu erklären. Mit steigender Anzahl an Messpunkten

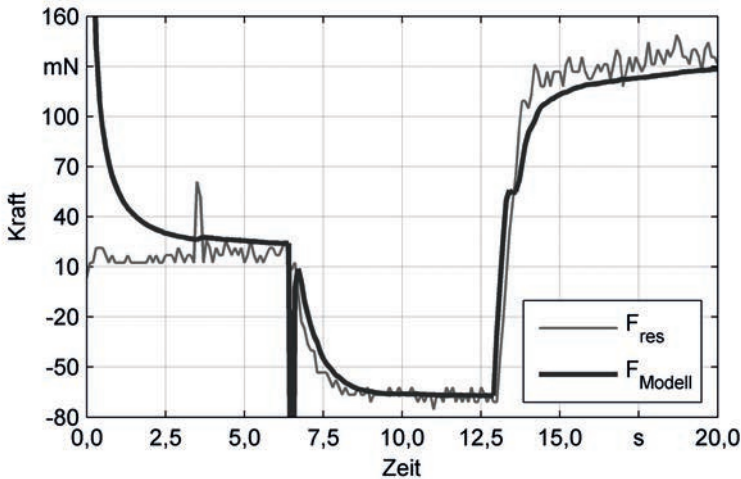


Abbildung 6.3: Darstellung der Online-Identifikation des Prozessmodells. Gemessene Kraftänderung F_{res} und modellierte Kraft F_{Modell} als Ergebnis des adaptierten Prozessmodells.

verbessert sich der Koeffizientenvektor, womit sich die interpolierte Prozesskraft der gemessenen annähert. Bei etwa sechs Sekunden wird das Prozessmodell durch eine Änderung der Ultraschallamplitude erneut angeregt. Diese Anregung führt zu einem kurzzeitig höheren Kraftfehler aufgrund der im Lernverlauf bislang noch nicht adaptierten Eingangskonstellation. Mit dieser zusätzlichen Prozessinformation kann das System auf die nächste Amplitudenänderung nach 12,5 Sekunden besser reagieren.

6.2.3 Auslegung des Kraft- und Luftspaltreglers

Im Anschluss an die Identifikation des Prozessmodells wird der Kraft- und Luftspaltregler ausgelegt. Dazu wird die Greiffläche des Ultraschallvakuumgreifers erneut über dem Kraftsensor in einem Abstand von $25 \mu\text{m}$ positioniert. Anschließend werden nacheinander die Tiefpasscharakteristika des Ultraschall- und des Unterdruckregelkreises ermittelt. Hierfür wird jeweils einer der beiden Regelkreise deaktiviert, so dass auf den Kraftsensor nur das Sprungantwortverhalten des anderen Regelkreises wirkt. Weiterhin wird auf den aktiven Regelkreis eine Sprungfunktion als Eingangssignal aufgeprägt. Aus der gemessenen Sprungantwort der Kraft werden die Parameter des Tiefpasses erster Ordnung abge-

lesen. Abbildung 6.4 erläutert gemäß den Ausführungen von SCHULZ (1995) allgemein, wie die Parameter abzulesen sind.

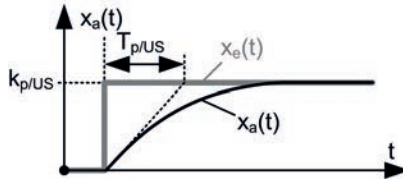


Abbildung 6.4: Verallgemeinerte Sprungantwort eines PT1-Regelkreisgliedes nach SCHULZ (1995). x_e : Eingangssignal in Form einer Sprungfunktion, x_a : Sprungantwort, K_p/US : Verstärkungsfaktoren des Unterdruck- bzw. Ultraschallregelkreises, T_p/US : Zeitkonstanten des Unterdruck- bzw. Ultraschallregelkreises.

Für die Konfiguration der prototypischen Anlage ergaben sich die folgenden Übertragungsfunktionen, wobei die des Ultraschalls keine messbare Zeitkonstante besaß:

$$G_{US} = \frac{\zeta(s)}{V_{US}(s)} = k_{US} = 2,1 \frac{\mu m}{V} \quad \text{mit } V_{US} \in [3,8 \text{ V}; 10 \text{ V}] \quad (6.1)$$

$$G_p = \frac{p_U(s)}{V_p(s)} = \frac{k_p}{1 + T_p \cdot s} = \frac{10000 \frac{Pa}{V}}{1 + 0,42 \text{ sec} \cdot s} \quad \text{mit } V_p \in [-4 \text{ V}; 0 \text{ V}] \quad (6.2)$$

Aus den Parametern der Gleichungen (6.1) und (6.2) werden die des Kraft- und Luftspaltreglers abgeleitet. Die maximal erreichbare Prozesskraft $F_{res}(max)$ liegt bei 183 mN (vgl. Abbildung B.4 a).

$$G_R = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = 0,21 + \frac{K_r}{T_N \cdot s} = 0,055 \frac{V}{mN} + \frac{0,055 \frac{V}{mN}}{2,1 \text{ sec} \cdot s} \quad (6.3)$$

Zur Verifikation des Kraft- und Luftspaltregelkreises sowie des kalibrierten Prozessmodells wurde sowohl eine Fügekraftmessung als auch eine Messung des Luftspaltes an einem schwebenden Bauteil durchgeführt. Das verwendete Bauteil und die eingesetzte Greiferspitze sind in Abschnitt 6.1 bereits beschrieben. Als Messeinrichtung wurden die in Abbildung 6.2 (Nr. 6 und 7) dargestellten Sensoren verwendet. Für die Kraftmessung blieben der Unterdruck (-100 hPa) und der Luftspalt ($25 \mu m$) konstant. Abbildung 6.5 zeigt die Führungsübertragungsfunktion des Kraftregelkreises bei zwei aufeinanderfolgenden Kraftsprüngen F_{soll} . Sowohl die durch das Prozessmodell berechnete Kraft F_{Modell} als auch die real gemessene Kraft F_{ist} zeigen einen nahezu identischen Verlauf. Damit wurde die Funktionsfähigkeit der Kraftregelung belegt.

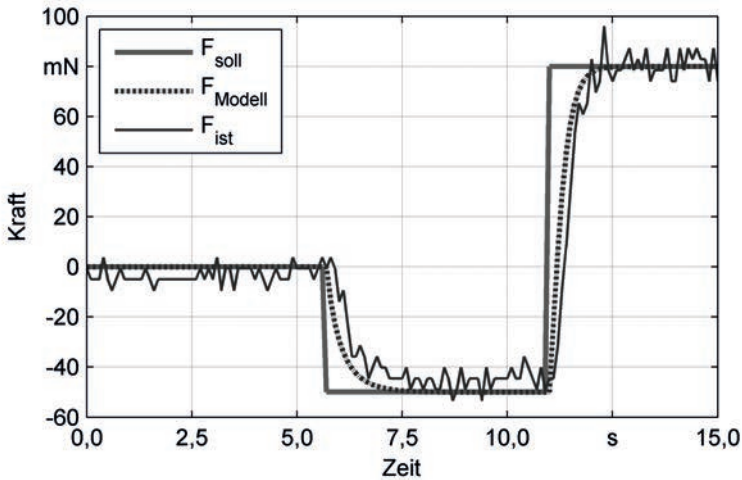


Abbildung 6.5: Führungsverhalten des Kraftregelkreises bei zwei Sollkraftsprüngen F_{soll} . Die Kraftregelung erfolgt über die berechnete Kraft F_{Modell} . Zusätzlich wird noch die tatsächlich gemessene Prozesskraft F_{ist} dargestellt.

Ähnlich der Kraftregelung wurde auch die Luftspaltregelung verifiziert mit dem Unterschied, dass die Kraftführungsgröße auf Null gehalten wurde, der Unterdruck (-100 hPa) konstant blieb und der gewünschte Luftspalt h_{soll} vorgegeben wurde. Abbildung 6.6 veranschaulicht anhand zweier Sollsprünge des Luftspaltes das Führungsverhalten des Regelkreises. Zur Überprüfung des vorgegebenen Luftspaltwertes h_{soll} wurde der tatsächliche Wert h_{ist} mit Hilfe des Laser-Triangulationssensors gemessen. Das Ergebnis wird in Abbildung 6.6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das System der vorgegebenen Werteänderung folgt. Mit diesen beiden Versuchen wurde die Funktionsfähigkeit des Prozessmodells sowie des Kraft- und Luftspaltreglers verifiziert.

6.2.4 Durchführung und Auswertung der Beispielmontage

Mit den vorangegangenen Ergebnissen ist die Durchführung der Beispielmontage möglich. Bevor diese allerdings gestartet werden konnte, galt es die Verläufe der Prozessparameter Sollluftspalt, Sollkraft und Unterdruck entsprechend den Ausführungen in Unterabschnitt 5.3.1 für diesen Anwendungsfall zu definieren. Bis auf den Prozessschritt des Loslassens wurde der Unterdruck während des gesamten Bestückablaufs konstant auf einem Wert von $V_p = -1 \text{ V} \approx -100 \text{ hPa}$ gehalten. Der Sollluftspalt wurde für die Bauteilaufnahme und -ablage auf

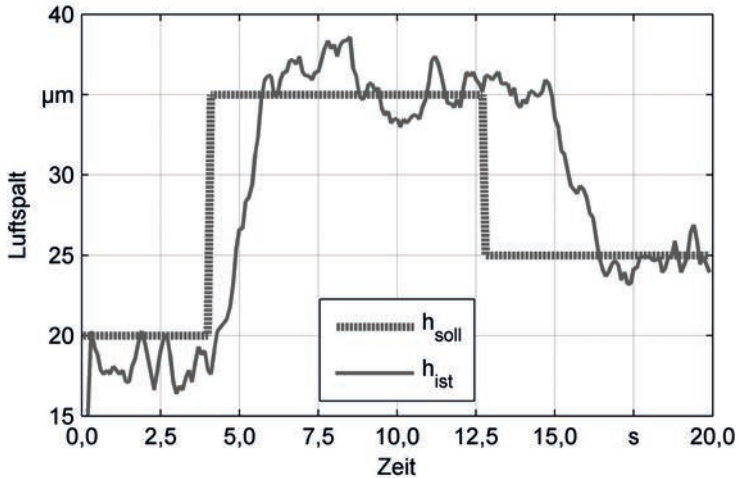


Abbildung 6.6: Darstellung des Führungsverhaltens des Luftspaltregelkreises bei zwei Sollspaltsprüngen h_{soll} und dem gemessenen Luftspalt h_{ist} .

$h_{\text{soll}} = 30 \mu\text{m}$ und für den Bauteiltransport auf $h_{\text{soll}} = 20 \mu\text{m}$ festgelegt. Eine Sollfügekraft von $F_{\text{soll}} = 100 \text{ mN}$ war ausreichend, damit das Bauteil nach dem Prozessschritt des Loslassens von der doppelseitig klebenden Folie gehalten wurde. Ein zusätzlicher Überdruck zur Überwindung adhäsiver Kräfte durch den Greifer war nicht erforderlich.

Für die Bauteilaufnahme wurde zusätzlich die Information des Mengendurchflusssensors verwendet. Gemäß den Ausführungen des Unterabschnitts 5.1.1 gibt der Messwert des Luftmengenstroms einen Aufschluss darüber, ob ein Bauteil gegriffen ist. Sobald sich der Luftmengenstrom schlagartig reduziert, kann von einem gegriffenen Bauteil während der Aufnahmephase ausgegangen werden. Zur Veranschaulichung stellt die Abbildung 6.7 den Verlauf des Luftmengenstroms Q_{ist} und der Greiferposition h_{Greifer} relativ zur Höhe der Bauteilaufgabe über die Zeit dar. Ab einem Abstand von etwa $75 \mu\text{m}$ zwischen Greifer und Bauteil verringert sich der gemessene Durchflusswert Q_{ist} sprunghaft auf unter $1000 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$. Die Reduktion des Durchflusswertes weist auf ein schwebendes Bauteil hin, da der verkleinerte Luftspalt zwischen dem Bauteil und dem Greifer den Luftmengenstrom durch die Unterdruckbohrungen im Greifer drosselt.

Zur Bestimmung der erreichbaren Bestückgenauigkeit und zur Ermittlung der möglichen Taktzeit wurden zwei unterschiedliche Bestückversuche durchge-

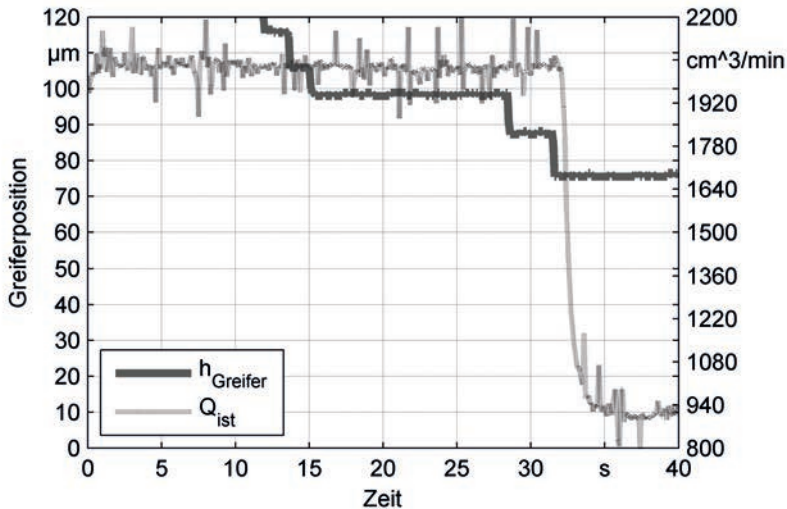


Abbildung 6.7: Darstellung der sukzessiven Annäherung des Greifers $h_{Greifer}$ an das Bauteil; ab einem Abstandswert von etwa $75 \mu\text{m}$ wird der Luftmengenstrom Q_{ist} sprunghaft reduziert und das Bauteil schwebt stabil unter dem Greifer.

führt. Die rechte obere Seite der Abbildung 6.2 zeigt eine vergrößerte Darstellung der Versuchsaufbauten. Der erste Versuch zielt auf die Ermittlung der Bestückgenauigkeit ab. Hierzu wurde auf einem Gel-Pack (Abbildung 6.2 Nr. 8) ein Bauteil wiederholt aufgenommen und an der gleichen Position mit gleichbleibender Orientierung wieder abgelegt. Nach jeder Bauteilablage wurde die im Bestückkopf integrierte Kamera über das Bauteil verfahren, um die Abweichung der tatsächlichen Bauteilposition zur Zielposition zu vermessen. Anschließend wurde das Bauteil durch den Greifer erneut aufgenommen. Die Positionsabweichungen in der Ebene wurden zu einem Abstandswert verrechnet und daraus wurde die Streuung der Ablagegenauigkeit gebildet. Abbildung 6.8 stellt das Ergebnis nach 50 Zyklen im Vergleich zur Genauigkeit der Anlage dar. Die ermittelten Abweichungen liegen unter $100 \mu\text{m}$. Diese Größenordnung liegt im Bereich der Streuung der Positioniergenauigkeit der Versuchsanlage, womit der berührungslose Handhabungsprozess mittels Ultraschall einen geringeren Einfluss auf die Platziergenauigkeit des Bauteils besitzt als die Bestückanlage selbst.

Der zweite Bestückversuch zielte darauf ab, eine erste Abschätzung der Taktzeit zu bestimmen. Dazu wurden neun Bauteile aus einem Waffle-Pack gegriffen (Abbildung 6.2 Nr. 5) und auf dem selbst erstellten Bauteilträger (Abbildung 6.2

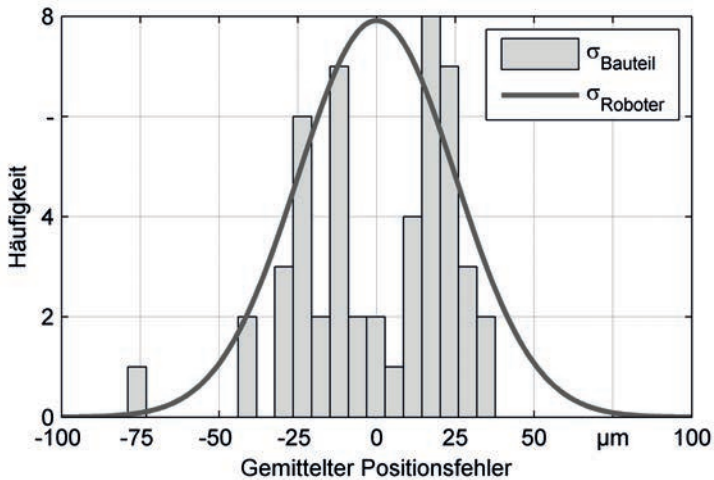


Abbildung 6.8: Vergleich der Streuung zwischen der Ablagegenauigkeit der Bauteile σ_{Bauteil} und der Streuung der Positioniergenauigkeit des Portalroboters σ_{Roboter} .

Nr. 4) abgelegt. Um einen realistischen Vergleich zwischen der Handhabung mittels Vakuumpipette und der ultraschallbasierten Handhabung zu erhalten, wurden drei unterschiedliche Bestückszenarien durchgeführt. Dadurch können die Handhabungsprinzipien, basierend auf der gleichen Anlageninfrastruktur und den identischen Wegstrecken, verglichen werden. Bei den ersten beiden Bestückszenarien wurde der Ultraschall deaktiviert, womit die Bauteile nur durch den Unterdruck aufgenommen wurden. Diese Modifikation entspricht der Handhabung mit einer Vakuumpipette. Bestückszenario eins und zwei unterschieden sich weiterhin durch deren Ablauf. Während im ersten Bestückversuch die Bauteile aufgenommen und an den Zielpositionen abgelegt wurden, wurde im zweiten Bestückversuch zwischen der Aufnahme und Ablage ein weiterer Prozessschritt zur Vermessung der gegriffenen Bauteillage am Greifer eingeführt. Mit diesem Vermessungsschritt wurde ein vollständiger konventioneller Bestückprozess gemäß der Abbildung 1.5 nachgebildet. Im dritten Bestückszenario wurde das ultraschallbasierte Handhabungsprinzip eingesetzt. Das Ergebnis der gemittelten Zeitmessung von jeweils neun bestückten Bauteilen, die maximal mögliche Achsbeschleunigung sowie ein prozentualer Taktzeitvergleich, wird durch die Tabelle 6.1 wiedergegeben. Neben der gemittelten Taktzeit wird durch die Tabelle 6.1 zusätzlich die durchschnittliche Bestückzeit ohne die Latenzzeit der Hochachsenbewegung angegeben (gemittelte Nettotaktzeit). Aufgrund der

6 Technische und wirtschaftliche Bewertung

Szenario	1	2	3
Beschleunigung x-Achse	3g	3g	0,03g
Beschleunigung y-Achse	4g	4g	0,04g
Gemittelte Taktzeit	5,59 s	9,23 s	15,8 s
Gemittelte Nettotaktzeit	0,42 s	1,49 s	10,6 s
Prozentualer Taktzeitvergleich	355%	100%	14%

Tabelle 6.1: Vergleich aller drei Bestückszenarien (1: Vakuumpipette ohne Vermessung der Bauteillage am Greifer, 2: Vakuumpipette mit Vermessung der Bauteillage am Greifer, 3: Ultraschallvakuumgreifer), die Nettotaktzeit ignoriert die langsame Verfahrensbewegung der z-Achse von 1,45 Sekunden in der Abwärtsbewegung und 1,13 Sekunden in der Aufwärtsbewegung. Der prozentuale Taktzeitvergleich bezieht sich auf das zweite Szenario.

hohen Genauigkeitsanforderung an die Greiferhochachse und der Tatsache, dass die Achsgeschwindigkeit beim Aufbau des ersten berührungslosen Bestückautomaten mittels Ultraschall nicht im Fokus stand, sind die „schlechten“ Zeitwerte auf die Trägheit dieser Achse zurückzuführen. Für eine Abwärtsbewegung, bis der Greifer die Aufnahmeposition des Bauteils einnimmt, benötigte die z-Achse 1,45 Sekunden und für die entgegengesetzte Bewegung 1,13 Sekunden. Die ultraschallbasierte Bestückung ist um 86% langsamer als der konventionelle Handhabungsvorgang. Zurückzuführen ist dies auf die wesentlich geringeren Lateralbeschleunigungen, die im Falle des dritten Szenarios eingehalten werden mussten, um das schwebende Bauteil nicht zu verlieren.

6.3 Technische Bewertung

Nachfolgend werden die Anforderungen an die ultraschallbasierte Montage aus Abschnitt 3.2 mit den erzielten Ergebnissen der aufgestellten Methoden zur Anwendung der besagten Technologie gegenübergestellt. In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der Betrachtung zusammengefasst. Auf den prinzipiellen technischen Mehrwert der berührungslosen Handhabungstechnologie mittels Ultraschall im Vergleich zur konventionellen Handhabungstechnik wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da diese Bewertung bereits ausführlich durch die Arbeiten von SCHILP (2007) und HEINZ (2011) erfolgt.

Definierte Aufbringung der Fügekraft: Die Anforderung der Aufbringung einer definierten Fügekraft entstand durch die Betrachtung der Unterschiede zwischen der konventionellen und der ultraschallbasierten Handhabungstechnik. Die Einhaltung einer bestimmten Kraft ist beim Fügeprozess jedes Bauteils erforderlich, um eine gleichbleibende Montagequalität zu gewährleisten. Durch

Technologische Anforderungen		
→	Definierte Aufbringung der Fügekraft	+
→	Vermessung des Arbeitsraums (Höhenposition des Greifers)	+
→	Einfache Prozesssteuerung	+

Industrielle Anforderungen		
→	Effiziente Auslegung der Greiferspitze	–
→	Flexibler und automatisierter Greiferspitzenwechsel	+
→	Reproduzierbare Montagequalität	○
→	Anwendung bestehender Montagetechniken	+

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der technischen Bewertung. Legende: + Anforderungen werden erfüllt, ○ Anforderungen werden teilweise erfüllt, – Anforderungen werden nicht erfüllt.

die Ergebnisse des Kapitels 4 ist eine mathematische Beschreibung der Parameterzusammenhänge auf die Kraft vorhanden. Mit dem Methodenschritt zur Inbetriebnahme des Ultraschallvakuumgreifers (vgl. Abschnitt 5.2) wird zum einen das Prozessmodell unter der Berücksichtigung der Eigenschaften der Montageanlage erstellt. Das Prozessmodell repräsentiert das Übertragungsverhalten des Ultraschallvakuumgreifers. Zum anderen wird die Auslegung des Kraft- und Luftspaltreglers beschrieben. Obwohl die Regelung auf Basis eines berechneten Kraftwerts erfolgt, stimmt die Sollkraft mit der tatsächlichen Prozesskraft des Handhabungssystems, aufgrund der Korrektheit des Prozessmodells, überein. Damit wird die Anforderung der Aufbringung einer definierten Fügekraft erfüllt.

Vermessung des Arbeitsraums (Höhenposition des Greifers): Infolge unterschiedlicher Höhenniveaus im Arbeitsraum der Montageanlage sowie verschiedener Bauteilträger- und Bauteildicken ist eine Vermessung der Abstände zwischen der Greif- und Bauteilfläche bei deren Aufnahme und Ablage erforderlich. Aufgrund des berührungsfreien Handhabungsprinzips kann das konventionelle Verfahren zur Messung der Anpresskraft nicht verwendet werden. Folglich ist ein zusätzlicher Abstandssensor erforderlich, über den der Relativabstand zwischen der Greif- und Bauteilfläche ermittelt wird. Dieser Abstandswert ist die Voraussetzung zur Berechnung der berührungslosen Anpresskraft. Durch die Erläuterungen des Unterabschnitts 5.1.3 und des Unterabschnitts 5.2.1 werden einerseits die erforderliche Sensorik und andererseits das Vorgehen zur Kalibrierung der Montageanlage aufgezeigt. Eine reproduzierbare Relativpositionierung der Greiffläche ist damit möglich.

Einfache Prozesssteuerung: Die Anforderungen einer einfachen Prozesssteuerung entstand ebenfalls aus dem Vergleich zwischen der neuen und konventionellen Handhabungstechnik. Mit dem erarbeiteten Prozessmodell und dem darauf aufgesetzten Kraft- und Luftspaltregler wird der Handhabungsvorgang von der Bauteilaufnahme bis zur -ablage nur noch durch zwei Prozessparameter, Sollluftspalt und Sollkraft, beschrieben. Im Methodenschritt zur Adaption der Montageanlage wird das Zustandekommen der Sollluftspalt- und Fügekraftverläufe deutlich. Dies vereinfacht die Steuerung der ultraschallbasierten Handhabung.

Effiziente Auslegung der Greiferspitze: Bislang gestaltet sich der Auslegungsprozess der Greiferspitze zeit- und kostenaufwendig, da hierfür zahlreiche Experimente durchzuführen sind. Weiterhin kann der Erfolg der Auslegung zu Beginn nicht garantiert werden. Aus diesem Grund wurde ein effizienterer Auslegungsprozess auf Basis des erarbeiteten Prozessmodells angestrebt. Jedoch weisen beide Ansätze der Prozessmodelle (neuronales Netz und mathematische Funktion) noch zu hohe Abweichungen in der berechneten Kraft auf. Die Prozessmodelle sind daher zur Auslegung der Greiferspitze nicht geeignet, weshalb weiterhin auf die experimentelle Auslegung zurückgegriffen werden muss und diese Anforderung nicht erfüllt werden kann.

Flexibler und automatisierter Greiferspitzenwechsel: Die Forderung der Flexibilität fokussiert den Einsatz unterschiedlicher Greiferspitzen während der Montage. Zur Erfüllung dieser Anforderung wurde in Unterabschnitt 5.1.4 ein Konzept zum automatisierten Wechsel der Greiferspitze entwickelt. Die Umsetzung der genannten Anforderung ist damit gegeben.

Reproduzierbare Montagequalität: Die Anforderung der reproduzierbaren Montagequalität betrifft mehrere Gesichtspunkte. Eine Voraussetzung ist die Erzeugung definierter Fügekräfte, die durch die erste Anforderung, die Aufbringung einer definierten Fügekraft, bereits beschrieben ist und als vollständig erfüllt betrachtet wird. Eine andere Voraussetzung ist die Bereitstellung definierter Luftspaltwerte. Hierbei wird nicht die Luftspaltregelung angesprochen, sondern die Positionierung des Ultraschallvakuumgreifers in einem definierten Abstand zu einer Oberfläche. Beeinflusst wird die Genauigkeit der relativen Greifflächenposition durch die Auflösung der Linearachse, die Genauigkeit des Abstandsmesssystems und durch den Verkipfungswinkel der Drehachse des Ultraschallvakuumgreifers (vgl. Unterabschnitt 5.1.2). Besonders der Aspekt der Verkipfung wird als kritisch angesehen, da bereits kleinste Verkipfungswerte zu hohen Abweichungen führen. Zur Verdeutlichung der Auswirkungen einer verkippten Längsdrehachse wird folgendes Zahlenbeispiel gegeben. Bei der

Verwendung von Titan ($c = 6100 \text{ m/s}$) als Basismaterial für den Ultraschallverbundschwinger und einer angezielten Frequenz von $f = 30.000 \text{ Hz}$ liegt die Längenabmessung des Ultraschallvakuumgreifers bei $\lambda = 203,3 \text{ mm}$ (vgl. Gleichung (5.9)). Diese Länge entspricht nach der Nomenklatur von KUTTRUFF (1988) einem $\frac{2\lambda}{2}$ -Schwinger. Der Abstand zwischen der Greiferspitze (Schwingungsbauch) und dem nächsten Schwingungsknoten, an dessen Punkt auch das Ultraschallsystem mit dem Hohlwellenmotor fixiert ist, liegt bei $\frac{\lambda}{4} = 50,8 \text{ mm}$. Weiterhin wird ein Verkippungswinkel von $\gamma = 0,1^\circ$ und ein quadratisches Bauteil mit einer Kantenlänge von $a = b = 5 \text{ mm}$ angenommen. Der Verkippungswinkel führt aufgrund der Beziehungen entsprechend der Gleichung (5.9) zu einer Differenz des Luftspaltwertes zwischen den gegenüberliegenden Greiferkanten von $\Delta h = 8,7 \text{ }\mu\text{m}$. Dieser Wert kann bis zu 40% des Luftspaltes betragen und reduziert damit die Robustheit des Handhabungsprozesses (vgl. Gleichung 5.14). Denn bei der Bauteilaufnahme und -ablage ist der Luftspalt abzüglich der Ultraschallamplitude, der minimale Luftspalt $h_{\min} = h_0 - \zeta$, von Bedeutung. Sobald dieser den Wert Null annimmt, kommt es zu einem Kontakt zwischen der schwingenden Greiffläche und dem Bauteil und damit zur Beschädigung des Bauteils. Insofern ist auf den korrekten Einbau des Ultraschallvakuumgreifers in die Montageanlage besonders zu achten. Aufgrund der hohen Integrationsgenauigkeit des Ultraschallvakuumgreifers in der Anlage wird die Erfüllung der Anforderung nach einer reproduzierbaren Montagequalität nur als teilweise erfüllt betrachtet.

Anwendung bestehender Montagetechniken: Die letzte Anforderung betrachtet die Integration der ultraschallbasierten Handhabung in bestehende Montagetechniken, wie der Chip-and-Wire- und Flip-Chip-Technik. Für beide Kontaktierverfahren sind modifizierte Montageabläufe erstellt, die die Anwendung der neuen Handhabungstechnologie ermöglichen und damit die Anforderung erfüllen. Im Vergleich der beiden Kontaktierverfahren liegen die Vorteile jedoch bei der Flip-Chip-Technik, da diese weniger von der Höhe der bauteilzentrierenden Kräfte abhängt als die Chip-and-Wire-Technik. Die teilweise geringen Zentrierkräfte bestimmen maßgeblich die entstehende Taktzeit und sind damit als Flaschenhals der Handhabungstechnologie anzusehen. Hohe Zentrierkräfte sind nicht für jede Bauteilgeometrie möglich, da diese von der Gestaltung der Greiferspitze abhängen. Die Lösung liegt also in der Kombination beider Technologien entsprechend dem Unterabschnitt 5.3.2, da damit die Vorteile der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall mit der lateralen Antriebsgeschwindigkeit einer Vakuumpipette kombiniert werden.

6.4 Wirtschaftliche Bewertung

Basierend auf den Bestückergebnissen aus dem Anwendungsbeispiel wird die Anwendung der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie in der automatisierten Montage monolithischer Bauteile wirtschaftlich bewertet. Um den monetären Vorteil der neuen Handhabungstechnologie gegenüber konventioneller Techniken aufzuzeigen, wird der Ultraschallvakuumgreifer mit der Vakuumpipette verglichen. Für einen derartigen Vergleich gibt es in der Literatur eine Vielzahl von Methoden. Daher sollte vorab die Art des angestrebten Ergebnisses geklärt werden. Aufgrund der schlechten Taktzeit der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall gegenüber der konventionellen Handhabungstechnik (vgl. Unterabschnitt 6.2.1) stellt sich allerdings die Frage, ob sich die neue Technologie überhaupt gewinnbringend einsetzen lässt. Denn zur Erreichung der montierten Stückzahlen eines Bestückautomaten mit Vakuumpipette sind mehrere parallel arbeitende Automaten mit Ultraschallvakuumgreifer erforderlich. Als Vorteil gegenüber der schlechteren Taktzeit steht die Vermeidung eines Bestückschattens und somit die anderweitige Verwendung der kostbaren Fläche sowie die Reduktion der Ausschußrate durch eine kontaktfreie Handhabung. Es gilt den Stückzahlenbereich zu identifizieren, in dem der Ultraschallvakuumgreifer wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden kann. Hierzu wird die Gewinnschwelle ermittelt, ab der die Technologie wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden kann. Das folgende Vorgehen, das auch als die Break-Even-Analyse bekannt ist, basiert auf der Arbeit von FRIEDL ET AL. (2010). Den Ausgangspunkt der Analyse bildet der Gewinn G , der sich aus dem Verkaufserlös E abzüglich der Produktionskosten K errechnet.

$$G = E - K \quad (6.4)$$

Die Gewinnschwelle, im Englischen Break-Even-Point, markiert die Stückzahl, für die zwar alle Kosten gedeckt sind, aber kein Gewinn erzielt wird ($E = K$). Während sich der Erlös aus dem Verkaufspreis vP multipliziert mit der Stückzahl S zusammensetzt

$$E = S \cdot vP, \quad (6.5)$$

werden die Kosten K weiter in fixe und variable Kosten aufgeteilt. Zu den variablen Kosten zählen die Herstellkosten, die von der Ausbringleistung einer Anlage abhängen. Fixkosten sind dagegen konstant und unabhängig von der produzierten Stückzahl. Da bei der Verwendung der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie mehrere Anlagen, infolge der höheren Taktzeit, erforderlich sind, um die Stückzahl einer einzelnen konventionellen Anlage zu erreichen, müssen in der Break-Even-Analyse zusätzlich sprungfixe Kosten berücksichtigt werden. Diese sind nicht proportional zur Ausbringleistung, sondern steigen sprunghaft bei der Notwendigkeit einer weiteren Maschine an (HABERSTOCK

& BREITHECKER 2008). Alle weiteren Kosten, wie Vertriebs- oder Verwaltungsallgemeinkosten, werden nicht betrachtet, da unterstellt wird, dass diese bei jeder Art von Handhabungstechnik gleichermaßen anfallen. Die sich ergebenden Gesamtkosten K , in Abhängigkeit zur Stückzahl S , können gemäß der folgenden Formeln berechnet werden. Ausgangsbasis für die Kostenberechnung eines einzelnen Bauteils bildet die Formel nach HENNESSY ET AL. (2007), mit der die Anzahl der Bauteile pro Wafer

$$CPW = \left[\frac{\pi \cdot r_{\text{Wafer}}^2}{A_{\text{Die}}} - \frac{\pi \cdot d_{\text{Wafer}}}{\sqrt{2} \cdot A_{\text{Die}}} \right] \quad (6.6)$$

in Abhängigkeit zur Bauteilfläche A_{Die} , zum Radius r_{Wafer} und zum Durchmesser d_{Wafer} des Wafers bestimmt wird. Über die Kosten eines einzelnen Wafers K_{Wafer} und der vermuteten Beschädigungsrate $p_{\text{Beschädigung}}$ infolge der Handhabungsform können die Kosten pro Bauteil $K_{\text{pro Die}}$ errechnet werden.

$$K_{\text{pro Die}} = \frac{K_{\text{Wafer}}}{CPW \cdot (1 - p_{\text{Beschädigung}})} \quad (6.7)$$

Über die produzierte Stückzahl S werden schlussendlich die Materialkosten

$$K_{\text{Material}} = K_{\text{pro Die}} \cdot S \quad (6.8)$$

ermittelt. Zur Bestimmung der fixen Kosten sind alle anfallenden Kosten infolge der notwendigen Anzahl an Montageanlagen zu berücksichtigen, da die geringere Taktzeit der berührungslosen Handhabungstechnik mittels Ultraschall mit einer höheren Anzahl an Montageanlagen einhergeht. Um diese Kosten zu errechnen, wird im ersten Schritt anhand der Betriebsdauer einer Montageanlage $T_{\text{Betriebsdauer}}$ und der Montagedauer T_{Taktzeit} eines Bauteils die maximal mögliche Anzahl an montierbaren Bauteilen

$$N_{\text{Bauteile pro Jahr und Anlage}} = \frac{T_{\text{Betriebsdauer}}}{T_{\text{Taktzeit}}} \quad (6.9)$$

bestimmt. Durch Aufrunden des Divisionsergebnisses aus der Stückzahl S durch die Anzahl montierbarer Bauteile pro Jahr und Anlage $N_{\text{Bauteile pro Jahr und Anlage}}$ ergibt sich die notwendige Maschinenanzahl.

$$N_{\text{Anlagenanzahl}} = \left\lceil \frac{S}{N_{\text{Bauteile pro Jahr und Anlage}}} \right\rceil \quad (6.10)$$

Anhand der gerade ermittelten Zahlen werden die Anlagenkosten K_{Anlagen} abgeleitet, die sich aus den Abschreibungskosten K_{Ab} , den Instandhaltungskosten $K_{\text{Instandhaltung}}$ und kalkulatorischen Zinskosten K_Z pro Jahr und Anlage

errechnen.

$$K_{\text{Anlagen}} = N_{\text{Anlagenanzahl}} (K_{\text{Ab}} + K_{\text{Inst.}} + K_{\text{Z}}) \quad (6.11)$$

Die aufgeführten Kostenpositionen einer Anlage setzen sich weiterhin aus den Anschaffungskosten pro Anlage $P_{\text{Anlagenpreis}}$, der Abschreibungsdauer $T_{\text{Abschreibungsdauer}}$ und dem Zinssatz Z zusammen.

$$K_{\text{Ab}} = \frac{P_{\text{Anlagenpreis}}}{T_{\text{Abschreibungsdauer}}} \quad (6.12)$$

$$K_{\text{Z}} = P_{\text{Anlagenpreis}} \cdot Z \quad (6.13)$$

Pro Anlage fallen zusätzlich noch Raum- (RK), Energie- (EK) und Lohnkosten (LK) an, die sich wie folgt berechnen lassen:

$$LK = LKpM_{\text{Lohnkosten pro Mitarbeiter}} \cdot MpA_{\text{Mitarbeiter pro Anlage}} \cdot N_{\text{Anlagenanzahl}} \quad (6.14)$$

$$EK = P_{\text{el. Leistungsaufnahme pro Anlage}} \cdot KpkWh_{\text{Kosten pro kWh}} \cdot N_{\text{Anlagenanzahl}} \quad (6.15)$$

$$RK = RBpA_{\text{Raumbedarf pro Anlage}} \cdot Kqm_{\text{Kosten pro m}^2} \cdot N_{\text{Anlagenanzahl}} \quad (6.16)$$

Aus der Summe aller Kosten entstehen die Gesamtkosten K .

$$K = K_{\text{Material}} + K_{\text{Anlagen}} + LK + EK + RK \quad (6.17)$$

Unter Anwendung der vorangegangenen Gleichungen (6.4) bis (6.17) wird die Gewinnschwelle identifiziert, ab deren Stückzahl sich ein Gewinn erzielen lässt. Mit der grafischen Aufbereitung der Kosten- und Gewinnverläufe lässt sich schnell ein Überblick über den gewinnbringenden Stückzahlbereich verschaffen. Durch die Hinzunahme einer weiteren Kostenlinie, die auf den Daten einer anderen Handhabungstechnologie basiert, entsteht ein weiterer Break-Even-Point. Daraus wird die jeweils kosteneffizientere Technologie für den jeweiligen Stückzahlenbereich identifiziert.

Als Basis für die wirtschaftliche Betrachtung des Anwendungsbeispiels aus Abschnitt 6.2 dienen die in Tabelle 6.3 dargestellten Werte. Bei dem verwendeten Beispielbauteil handelt es sich um einen Oberflächenwellenfilter, deren Oberfläche berührungsempfindlich ist. Die konventionelle Handhabungstechnik sieht hier einen Saugglockengreifer oder einen Die-Collet vor. Im Folgenden wird ein Die-Collet mit der ultraschallbasierten Handhabungstechnik verglichen. Bei der Verwendung der neuen Handhabungstechnik ist der Bestückschatten nicht vorhanden. Die daraus resultierende zusätzliche Fläche kann auf dem Wafer für weitere Bauteile genutzt werden. Um diesen Sachverhalt in Zahlen zu fassen wird für beide Handhabungstechniken eine unterschiedliche effektive Bauteil-

6.4 Wirtschaftliche Bewertung

	Allgemeine Daten
Wafergröße r_{Wafer}	150 mm
Bauteilgröße	25 mm ²
Verkaufspreis pro Bauteil	1,13 €
Kosten pro Wafer	2000,00 €
Betriebsdauer einer Anlage	365 Tage · 8 h/Tag · 3600 s/h
Kosten pro Anlage	500 T €
Instandhaltungskosten pro Jahr	25 T €
Zinskosten pro Jahr	25 T €
Abschreibungszeitraum	10 Jahre
Kosten pro Mitarbeiter	60 T €
Anzahl Mitarbeiter pro Anlage	1
Raumbedarf pro Anlage	10 m ²
Raumkosten	10 €/m ²
Stromkosten	0,30 €/kWh

Taktile Handhabung mittels Die-Collet		
Berührungslose Handhabung mittels Ultraschall		
Fläche des Bestückschattens	0	1,25 mm ²
Effektive Bauteilfläche	25 mm ²	26,25 mm ²
Beschädigte Bauteile pro Wafer	0%	5%
Taktzeit pro Bauteilmontage	15,8 s	9,2 s
Bauteile pro Wafer	2694	2562
Kosten pro Bauteil	0,7424 €	0,8217 €
Jährliches Produktionsvolumen	665.320	1.142.600

Table 6.3: Eingangsdaten zur Veranschaulichung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zweier unterschiedlicher Handhabungstechniken.

fläche betrachtet, die sich in der Anzahl der Bauteile pro Wafer widerspiegelt. Weiterhin wird angenommen, dass bei der taktilen Handhabung 5% aller Bauteile auf dem Wafer beschädigt werden. Die Vermeidung von Beschädigungen und eines Bestückschattens sind die klaren Vorteile der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall gegenüber einer konventionellen Handhabungstechnik, die sich auch monetär in den geringeren Materialkosten pro Bauteil äußern. Der Kostentreiber bei der berührungslosen Handhabung dagegen ist die höhere Taktzeit, die zu einem wesentlich geringeren Produktionsvolumen pro Jahr führt. Bereits an dieser Stelle wird deutlich, dass für die Massenproduktion mit hoher Stückzahl nur die konventionelle Handhabungstechnik in Frage kommt, da die zusätzlichen Montageanlagen bei der ultraschallbasierten Handhabung die Fixkosten in die Höhe treiben. Dieser Sachverhalt wird durch die grafische Auswertung der Break-Even-Analyse deutlich. Dazu werden in Abbildung 6.9

6 Technische und wirtschaftliche Bewertung

die Gesamtkosten für beide Handhabungstechniken und der erzielte Erlös über die Stückzahl dargestellt. Dabei wird deutlich, dass der Schnittpunkt zwischen dem Erlös und den Kosten der ultraschallbasierten Handhabung bei einer geringeren Stückzahl als bei der konventionellen Handhabungstechnik liegt. Der Gewinnbereich setzt somit bei der berührungslosen Handhabungstechnik mittels Ultraschall bereits bei einer Stückzahl von etwa 400.000 Bauteilen ein. Für die Verwendung des Die-Collet beginnt der Gewinnbereich dagegen erst bei etwa 550.000 Bauteilen. Der Gewinnbereich der ultraschallbasierten Handhabung endet jedoch bei einer Stückzahl von etwa 700.000 Bauteilen, da eine weitere Montageanlage erforderlich wird, die die Kosten sprunghaft in die Höhe treibt. Aus dieser Auswertung geht hervor, dass für noch höhere Stückzahlen die berührungslose Handhabung mittels Ultraschall wirtschaftlich nicht sinnvoll eingesetzt werden kann.

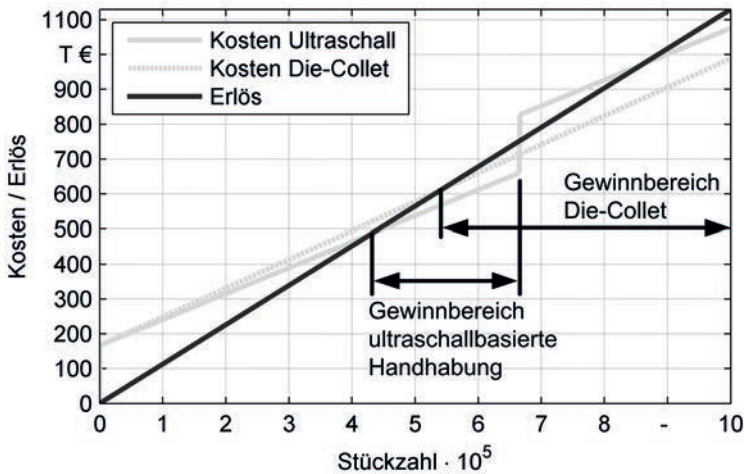


Abbildung 6.9: Darstellung der entstehenden Kosten der ultraschallbasierten Handhabung und der konventionellen Handhabungstechnik mit dem erzielten Erlös. Die berührungslose Handhabung mittels Ultraschall ist nur für einen Stückzahlenbereich zwischen 400.000 und 700.000 Bauteilen geeignet.

Die in der Abbildung 6.9 dargestellten Kostenverläufe sind größtenteils unabhängig der Beschädigungsrate, da diese nur einen Einfluss auf die konventionelle Handhabung besitzt. Die Abbildung 6.10 zeigt den Verlauf der Gewinnschwelle (vgl. Gleichung (6.4), $E = K$) in Abhängigkeit von Stückzahl und Beschädigungsrate. Für die ultraschallbasierte Handhabung gibt es keine Beschädigungsrate,

insolgedessen der Gewinnschwellenverlauf 1 nur eine Abhängigkeit zur Stückzahl aufweist. Im Gegensatz dazu wird der taktilen Handhabungstechnik eine Beeinträchtigung der Bauteilqualität während der Manipulation unterstellt. Mit einer steigenden Beschädigungsrate steigen auch die umgerechneten Stückkosten. Zur Deckung der höheren Kosten ist ein höheres Produktionsvolumen bei gleichbleibenden Erlös erforderlich. Dadurch erfolgt eine Verschiebung der Gewinnschwelle hin zu höheren Stückzahlen bei steigender Beschädigungsrate, entsprechend dem Gewinnschwellenverlauf 2. Der Abstand zwischen den Gewinnschwellenverläufen 1 und 2 bei einer Beschädigungsrate von 0% entsteht aus der unterschiedlichen Anzahl an Bauteilen pro Wafer (vgl. Tabelle 6.3). Dieser Abstand ist unabhängig von der Beschädigungsrate und führt bei einer Änderung zu einer horizontalen Verschiebung des Gewinnschwellenverlaufs. Der Verlauf 3 markiert die Stückzahl, ab dem für die berührungslose Handhabungstechnologie eine zweite Montageanlage erforderlich ist. Durch die Hinzunahme einer weiteren Montageanlage steigen die Fixkosten sprunghaft an. Somit ist die berührungslose Handhabungstechnik nur zwischen den Verläufen 1 und 3 wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar. Für die konventionelle Handhabungstechnik zeichnet sich ein Gewinn rechts vom Gewinnschwellenverlauf 2 ab, aber ein wirtschaftlich sinnvoller Einsatz ergibt erst ab dem Produktionsvolumen 3, da

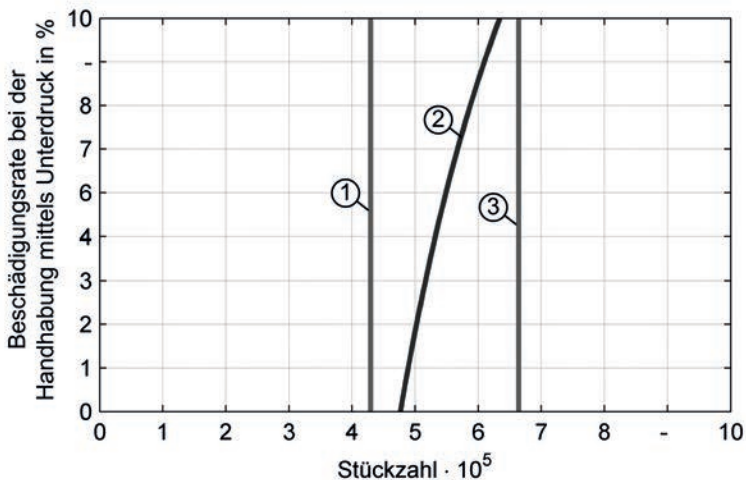


Abbildung 6.10: Verlauf der Gewinnschwelle beim Ultraschallvakuumbreifer (1) und der Vakuumpipette (2) in Abhängigkeit von Stückzahl und Beschädigungsrate. Ab der Stückzahl (3) steigen die Fixkosten der ultraschallbasierten Handhabung sprunghaft an.

6 Technische und wirtschaftliche Bewertung

die summierten Kosten für die berührungslose Handhabung zwischen 1 und 3 geringer sind, als für die taktile Handhabung (vgl. Abbildung 6.9).

Der Grund für den begrenzten Stückzahlenbereich liegt in der hohen Taktzeit infolge der geringen Zentrierkräfte. Um dieses Problem zu umgehen, sollten die Vorteile beider Handhabungstechniken vereint werden. Die grundsätzliche Idee dazu wurde bereits in Unterabschnitt 5.3.2 vorgestellt. Hier wurde ein angepasster Flip-Chip-Vorgang skizziert, bei dem das sensible Bauteil durch einen Ultraschallvakuumbreifer aufgenommen und an eine Vakuumpipette übergeben wird. Während der erste Greifer das Bauteil berührungslos an der sensiblen Bauteilseite vom Wafer aufnimmt, setzt das taktile Handhabungsverfahren auf der unempfindlichen Bauteilunterseite an. Der Ultraschallvakuumbreifer vollzieht dabei keine lateralen Bewegungen. Somit werden die Vorteile beider Techniken kombiniert, die schonende Bauteilaufnahme und die geringe Taktzeit. Kann damit die Taktzeit von 15,8 s aus dem Anwendungsbeispiel auf 10,2 s reduziert werden, also nur eine Sekunde länger als bei der konventionellen Handhabungstechnik, ergibt sich bei erneuter Auswertung der Break-Even-Analyse, Abbildung 6.11, ein deutlicher Mehrwert für die kombinierte Handhabungstechnik.

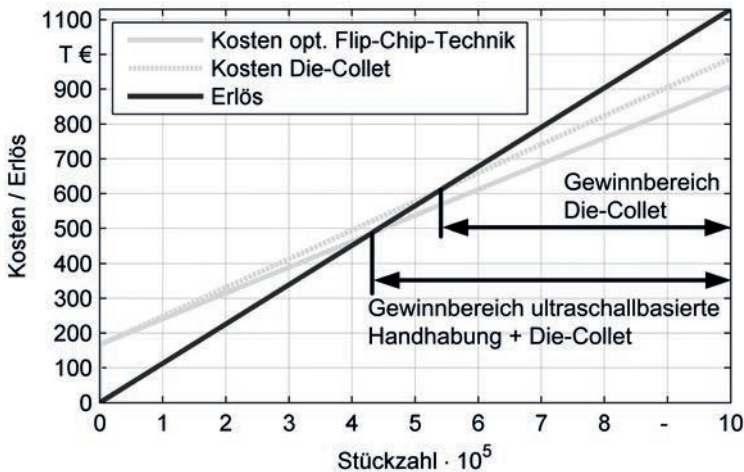


Abbildung 6.11: Grafische Auswertung des Beispiels bei einer reduzierten Taktzeit infolge der Kombination der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall und der Vakuumpipette im optimierten Flip-Chip-Prozess im Vergleich zur konventionellen Handhabung mittels Die-Collet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die stetige Miniaturisierung mikroelektronischer Komponenten und Bauteile der Mikrosystemtechnik ist eine der treibenden Kräfte innovativer Produkte von morgen. Damit können Kundenwünsche nach höherer Leistungsdichte, geringerem Energieverbrauch und geringeren Produktionskosten erfüllt werden. Das Streben nach immer kleineren Strukturen geht allerdings mit der Notwendigkeit neuer Handhabungssysteme einher, denn konventionelle, taktile Handhabungstechniken erreichen ihre Grenzen, sobald Berührungen das Bauteil beschädigen können. Aus diesem Grund ist für die Handhabung sensibler Bauteile ein besonders schonendes Verfahren erforderlich. Einen möglichen Ansatz stellt die berührungslose Handhabung mittels Ultraschall dar, deren Potentiale in der Wissenschaft sehr hoch angesehen werden. Industriell wird diese Technologie bereits bei der Handhabung großflächiger Bauteile, wie Solarzellen oder Wafer, eingesetzt. Im Gegensatz dazu findet das Prinzip der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall zur Montage monolithischer Bauteile bislang noch keine industrielle Anwendung. Die Ziele der vorliegenden Arbeit bestanden folglich in der Erstellung einer Gestaltungssystematik zur effizienten Auslegung des ultraschallbasierten Handhabungssystems für unterschiedliche Bauteile, der Integration der Handhabungstechnologie mittels Ultraschall in die bestehende Anlagentechnik, der Inbetriebnahme, Kalibrierung und Parametrisierung des automatisierten Montagesystems mit ultraschallbasierter Handhabungstechnik und der Adaption der bestehenden Kontaktierungstechnik zur Durchführung einer schonenden Montage sensibler Bauteile.

Anhand einer detaillierten Analyse des bestehenden Prozesswissens über die ultraschallbasierte Handhabungstechnologie wurde als Handlungsbedarf die Erarbeitung einer Methode zur Anwendung dieser Technologie erkannt. Für die Erstellung der einzelnen Methodenschritte wurden technologische und industrielle Anforderungen an die Handhabungstechnologie aufgestellt. Diese Anforderungen wurden zum einen in einzelne Methodenschritte zusammengefasst. Damit entstand eine strukturierte Anleitung von der Montageaufgabe bis hin zum automatisierten Montageprozess. Zum anderen zeigten die technologischen und industriellen Anforderungen auf, dass die Inhalte der einzelnen Methodenschritte bisher in Forschungsarbeiten nicht berücksichtigt waren.

Nach der Definition der Montageanforderungen wird im zweiten Methodenschritt eine an die Bauteilgeometrie angepasste Greiferspitze erstellt. Hierfür gibt es zwar in der Literatur bereits ein experimentelles Vorgehen, aber im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein effizienteres Auslegungsverfahren angestrebt. Dessen Kern bildet ein Prozessmodell, das eine Berechnung der Prozesskraft aus den Eingangsparametern ermöglicht. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Modellansätze verfolgt; einerseits die Modellierung der Prozesszusammenhänge mit Hilfe eines neuronalen Netzes und andererseits die Approximation einer mathematischen Gleichung. Mit beiden Ansätzen wurde gezeigt, dass eine genaue Berechnung der resultierenden Greifkraft aus den Prozessparametern möglich ist. Damit wurde auch die Grundlage für die Regelung der Handhabungsparameter gelegt.

Eine zusätzliche Berücksichtigung der geometrischen Abhängigkeiten auf die resultierende Kraft lieferte dagegen nur eine grobe Näherung zu einer vergleichenden Messung. Das Bestreben einer effizienteren Auslegung der Greiferspitze wurde daher nicht erreicht.

Der dritte Methodenschritt, die Adaption der Anlagentechnik, befasst sich mit der Integration des Ultraschallvakuumgreifers in eine Montageanlage und der dafür notwendigen Infrastruktur. Dabei wurde ein Konzept zum automatisierten Wechsel der bauteilspezifischen Greiferspitze vorgestellt.

Im vierten Methodenschritt wurde das Handhabungssystem in Betrieb genommen. Hierfür wurde zuerst eine Kalibrierung der Anlage und des Prozessmodells der jeweiligen Handhabungsaufgabe vorgenommen. Da die Leistungsmerkmale des Handhabungssystems stark von den jeweiligen Rahmenbedingungen und der verwendeten Bauteilgeometrie abhängen, wurde ein Verfahren zur Online-Identifikation des Prozessmodells erarbeitet. Auf Basis dieser Daten wurde der Regelkreis zur Regelung der bestimmenden Prozessparameter des Handhabungsvorgangs ausgelegt. Im letzten Methodenschritt wurden die bestehenden Montageprozesse für die ultraschallbasierte Handhabungstechnologie adaptiert.

Die erarbeitete Methode wurde abschließend am Anwendungsbeispiel einer berührungslosen Leiterplattenbestückung durchgeführt. Die Erkenntnisse aus der Anwendung der Methode sowie das Ergebnis der Bestückung wurden für die technische und wirtschaftliche Bewertung herangezogen. Aus technischer Sicht ist der Einsatz der vorgestellten Methode sinnvoll, da fast alle gestellten technischen und industriellen Anforderungen erfüllt werden konnten und eine schonende Bauteilmontage bei gleichzeitiger Vermeidung eines Bestückschatens möglich ist. Nur die Anforderung eines effizienteren Auslegungsprozesses der Greiferspitze wurde nicht erfüllt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Anwendung der Methode und damit der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie von der verwendeten Montagetechnik abhängig und nur für einen bestimmten

Stückzahlbereich montierter Bauteile gewinnbringend. Die Vorteile der Handhabungstechnologie liegen in der Vermeidung eines Bestückschattens und der schonenden Bauteilmanipulation. Demgegenüber steht eine deutlich reduzierte Taktzeit im Vergleich zu konventionellen Handhabungstechniken. Durch die vorgestellte Kombination einer taktilen Handhabungstechnik mit der schonenden Ultraschallhandhabung in einem Montageprozess werden die Vorteile beider Technologien vereint.

7.2 Ausblick

Mit der erarbeiteten mathematischen Beschreibung der Prozesszusammenhänge wird erstmalig der überlagerte Effekt des abstoßenden Ultraschalls und des anziehenden Unterdrucks berechnet. Das Ergebnis ist ausreichend genau, um den Handhabungsprozess zu regeln. Auch die geometrischen Parameter wurden in der mathematischen Formel berücksichtigt. Damit ist allerdings nur eine grobe Näherung an die gemessene Prozesskraft möglich. Eine exakte Auslegung der Greifergeometrie angepasst auf das jeweilige Bauteil ist damit noch nicht möglich. Aus diesem Grund sind weitere Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der modellhaften Auslegung der ultraschallbasierten Handhabungstechnologie erforderlich, um den zeitaufwendigen und kostspieligen experimentellen Auslegungsprozess zu vermeiden.

Ein weiteres Handlungsfeld wurde im Rahmen der Anforderungsanalyse an die Anlagen- und Prozesstechnik identifiziert. Bereits kleinste Verkippungen der Längsdrehachse des Ultraschallvakuumgreifers führen zu erheblichen Störungen des Handhabungsprozesses. Zur Verbesserung der Ebenenparallelität zwischen Greiffläche und Bauteil ist eine Ausgleichsaktorik erforderlich, mit deren Hilfe die Greifebene auf die Ebene des Bauteils ausgerichtet werden kann.

Zusammenfassend gilt es die in dieser Arbeit erarbeiteten Methoden weiter zu verfolgen und auf die Handhabung noch kleinerer Bauteile anzuwenden. Denn der Miniaturisierungstrend wird weiter voranschreiten, womit die Forderungen nach schonenden Handhabungssystemen weiter wachsen werden.

Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser, Carl 2011.

ANSEL ET AL. 2002

Ansel, Y.; Schmitz, F.; Kunz, S.; Gruber, H. P.; Popovic, G.: Development of tools for handling and assembling microcomponents. Journal of Micro-mechanics and Microengineering (2002) 12, S. 430–437.

ARNAU 2004

Arnau, A. (Hrsg.): Piezoelectric Transducers and Applications. Berlin: Springer 2004.

BACKHAUS 2008

Backhaus, K.: Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. 12. Aufl. Berlin: Springer 2008.

BALKHAUSEN 1980

Balkhausen, D.: Die dritte industrielle Revolution: Wie d. Mikroelektronik unser Leben verändert. 1. Aufl. München: Goldmann 1980.

BALZERT 2008

Balzert, H.: UML 2 in 5 Tagen: Der schnelle Einstieg in die Objektorientierung. 2. Aufl. Bochum: W3L 2008.

BARTSCH 2001

Bartsch, H.-J.: Taschenbuch mathematischer Formeln. 19. Aufl. Leipzig: Carl Hanser 2001.

BAUR ET AL. 2007

Baur, M.; Heinz, M.; Reinhart, G.; Zimmermann, J.; Zitzmann, A.: Auf Luft gebettet – Berührungsloses Handhaben empfindlicher Bauteile. Handling (2007) 10, S. 66–67.

BECKER 2001

Becker, M.: Modellierung und adaptive Regelung einer Ultraschallschweißanlage. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2001.

BEST 1993

Best, R.: Theorie und Anwendungen des Phase-Locked-Loops: Mit Diskette für PLL-Simulation. 5. Aufl. Aarau: AT-Verlag 1993.

BINDER 2004

Binder, A.: Praxisbericht von berührungslosen Handlingslösungen mit Bernoullie-Effekt. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Berührungslose Handhabung – Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle. München: Herbert Utz 2004, S. 6/1–6/14. (IWB Seminarberichte 76).

BISCHOF & POSSART 1982

Bischof, C.; Possart, W.: Adhäsion. Theoretische und experimentelle Grundlagen. Berlin: Akademie-Verlag 1982.

BMBF & VDE 2007

BMBF; VDE (Hrsg.): Trends in der Weiterentwicklung und Anwendung der Mikrosystemtechnik. Dresden: Oktober 2007.

BURKHARDT 2004

Burkhardt, T.; Feinäugle, A.; Fericean, S.; Forkl, A.: Lineare Weg- und Abstandssensoren: Berührungslose Messsysteme für den industriellen Einsatz. München: Süddeutscher Verlag onpact 2004.

BÜTTGENBACH & HOXHOLD 2008

Büttgenbach, S.; Hoxhold, B.: Mikrogreifer für die Handhabung zukünftiger Mikrosystemtechnik-Produkte. In: Reinhart, G.; Hoffmann, H.; Zäh, M. (Hrsg.): Münchener Kolloquium – Innovationen für die Produktion. München: Herbert Utz 2008, S. 277–286.

DENNHARDT 2009

Dennhardt, R.: Die Flipflop-Legende und das Digitale: Eine Vorgeschichte des Digitalcomputers vom Unterbrecherkontakt zur Röhrenelektronik, 1837–1945. Berlin: Kadmos 2009.

DEUMLICH & STAIGER 2002

Deumlich, F.; Staiger, R.: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Auflage. Heidelberg: Wichmann 2002.

DILTHEY & BRANDENBURG 2005

Dilthey, U.; Brandenburg, A.: Montage hybrider Mikrosysteme: Handhabungs- und Fügetechniken für die Klein- und Mittelserienfertigung. 1. Aufl. Berlin: Springer 2005.

DIN 32564 TEIL 1

DIN 32564 Teil 1: Fertigungsmittel für Mikrosysteme – Begriffe – Teil 1: Allgemeine Begriffe der Mikrosystemtechnik, Berlin: Beuth 2004.

DIN 32564 TEIL 2

DIN 32564 Teil 2: Fertigungsmittel für Mikrosysteme – Begriffe – Teil 2: Allgemeine Begriffe der Mikrosystemtechnik, Berlin: Beuth 2004.

DIN 32565

DIN 32565: Fertigungsmittel für Mikrosysteme – Schnittstelle zwischen Endeffektor und Handhabungsgerät, Berlin: Beuth 2007.

DIN 61188 TEIL 5-1

DIN 61188: Leiterplatten und Flachbaugruppen – Konstruktion und Anwendung. Teil 5–1: Betrachtungen zur Montage (Anschlussfläche/Verbindung) – Allgemeine Anforderungen, Berlin: Beuth 2002.

DINI ET AL. 2009

Dini, G.; Fantoni, G.; Failli, F.: Grasping leather plies by Bernoulli grippers. CIRP Annals – Manufacturing Technology 58 (2009) 1, S. 21–24.

DRENTH 2001

Drenth, P. J. D.: Die digitale Revolution in den Wissenschaften: ein „mixed blessing“, <<http://www.uni-heidelberg.de/presse/news/2112drent.html>> (24.06.2012).

DREWS & HILLEBRAND 2007

Drews, G.; Hillebrand, N.: Lexikon der Projektmanagement-Methoden. 1. Aufl. München: Rudolf Haufe 2007.

ENDISCH 2009

Endisch, C.: Optimierungsstrategien für die Identifikation mechatronischer Systeme. Aachen: Shaker 2009.

EVERS ET AL. 2003

Evers, J.; Klüfers, P.; Staudigl, R.; Stallhofer, P.: Czochralskis schöpferischer Fehlgriff: ein Meilenstein auf dem Weg in die Gigabit-Ära. Angewandte Chemie 115 (2003) 46, S. 5862–5877.

FISCHER ET AL. 2007

Fischer, H.; Hofmann, H.; Spindler, J.: Werkstoffe in der Elektrotechnik: Grundlagen, Aufbau, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung, Technologie. 6. Aufl. München: Hanser 2007.

FRANZKOWIAK ET AL. 2005A

Franzkowiak, M.; Grünwald, S.; Schilp, M.; Zitzmann, A.; Heinzl, J.; Zaeh, M. F.: Contactless Handling of Micro Parts. MST News 05 (2005) 1, S. 15–16.

FRANZKOWIAK ET AL. 2005B

Franzkowiak, M.; Zäh, M. F.; Zitzmann, A.: Non-contact Grippers for Micro Assembly. In: Reichl, H. (Hrsg.): MICRO SYSTEM Technologies. Franzis 2005, S. 156–163.

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG 2006

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Hrsg.): Neue Kundengruppen für Industrieroboter, PI-Mitteilung 38. Karlsruhe: 2006.

FRIEDL ET AL. 2010

Friedl, G.; Hofmann, C.; Pedell, B.: Kostenrechnung: Eine entscheidungsorientierte Einführung. München: Vahlen 2010.

GABAY & BUCHER 2006

Gabay, R.; Bucher, I.: Resonance tracking in a squeeze-film levitation device. Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006) 7, S. 1696–1724.

GERLACH & DÖTZEL 2006

Gerlach, G.; Dötzel, W.: Einführung in die Mikrosystemtechnik. München: Hanser 2006.

GLEICH 2004

Gleich, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004.

GRUTZECK 2000

Grutzeck, H.: Fluidisches Greifen in der Mikrosystemtechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000. (VDI Fortschritt-Berichte Reihe 9, Nr. 314).

GRUTZECK & KIESEWETTER 2002

Grutzeck, H.; Kieseewetter, L.: Downscaling of grippers for micro assembly. *Microsystem Technologies* 8 (2002), S. 27–31.

HABERFELLNER ET AL. 2002

Haberfellner, R.; Nagel, P.; Becker, M.; Büchel, H.; von Massow, H.: *Systems engineering: Methodik und Praxis*. 11. Aufl. Zürich: Industrielle Organisation 2002.

HABERSTOCK & BREITHECKER 2008

Haberstock, L.; Breithecker, V.: *Kostenrechnung 1: Einführung mit Fragen, Aufgaben, einer Fallstudie und Lösungen*. 13. Aufl. Berlin: Erich Schmidt 2008.

HAGL 2008

Hagl, S.: *Schnelleinstieg Statistik*. 1. Aufl. München: Rudolf Haufe 2008.

HANKE-BOURGEOIS 2006

Hanke-Bourgeois, M.: *Grundlagen der numerischen Mathematik und des wissenschaftlichen Rechnens*. 2. Aufl. Wiesbaden: Teubner 2006.

HASHIMOTO ET AL. 1995

Hashimoto, Y.; Ueha, S.; Koike, Y.: A theoretical study of near-field acoustic levitation of planar objects. In: Herbertz, J. (Hrsg.): *Proceedings of the World Congress on Ultrasonics*, Berlin 1995, S. 839–842.

HASHIMOTO ET AL. 1998

Hashimoto, Y.; Koike, Y.; Ueha, S.: Transporting objects without contact using flexural traveling waves. *The Journal Of The Acoustical Society Of America* 103 (1998) 6, S. 3230–3233.

HEINZ 2011

Heinz, M.: *Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Greifsysteme in der Mikrosystemtechnik*. München: Herbert Utz 2011. (*iwb Forschungsberichte* 254).

HEINZL ET AL. 2004

Heinzl, J.; Zäh, M.; Franzkowiak, M.; Grünwald, S.; Schilp, M.; Zimmermann, J.; Zitzmann, A.: Die Schwebebahn der Mikroproduktion. *Zukunft im Brennpunkt* 3 (2004), S. 67–70.

HENNESSY ET AL. 2007

Hennessy, J. L.; Patterson, D. A.; Arpaci-Dusseau, A. C.: Computer architecture: A quantitative approach. 4. Aufl. San Francisco: Morgan Kaufmann 2007.

HENSCHKE 1994

Henschke, F.: Miniaturgreifer und montagegerechtes Konstruieren in der Mikromechanik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994. (VDI Fortschritt-Berichte Reihe 1, Nr. 242).

HERBST & MARTE 2005

Herbst, W.; Marte, A.: Bending stress is substantially reduced. EPP EUROPE 52 (2005) 8, S. 30–32.

HESELBACH ET AL. (2003)

Hesselbach, J.; Raatz, A.; Wrege, J.; Herrmann, H.; Weule, H.; Buchholz, C.; Tritschler, H.; Knoll, M.; Elsner, J.; Klocke, F.; Weck, M.; Bodenhausen, J. v.; Klitzing, A. v.: mikroPRO – Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik. wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 3, S. 119–128.

HESELBACH ET AL. (2006)

Hesselbach, J.; Wrege, J.; Raatz, A.: Mikromontage. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. 1. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 463–482.

HILBERT & LÓPEZ 2011

Hilbert, M.; López, P.: The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information. Science 332 (2011) 6025, S. 60–65.

HILLERINGMANN 2006

Hilleringmann, U.: Mikrosystemtechnik: Prozessschritte, Technologien, Anwendungen. 1. Aufl. Wiesbaden: Teubner 2006.

HILLERINGMANN 2008

Hilleringmann, U.: Silizium-Halbleitertechnologie: Grundlagen mikroelektronischer Integrationstechnik. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2008.

HILLMER 2000

Hillmer, H.: Der Transistor – die Entwicklung von den Anfängen bis zu den frühen integrierten Schaltungen. Der Fernmeldeingenieur 54 (2000) 1–3, S. 1–107.

HOFMANN 2003

Hofmann, S.: Identifikation von nichtlinearen mechatronischen Systemen auf der Basis von Volterra-Reihen. Dissertation, Technische Universität München, 2003.

HÖHN 2001

Höhn, M.: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme. München: Herbert Utz 2001. (*iwb* Forschungsberichte 149).

HÖPPNER 1999

Höppner, J.: Berührungslose Handhabung von Bauteilen in der Mikromontage. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Automatisierte Mikromontage. Herbert Utz 1999, S. 6.1–6.22. (*iwb* Seminarberichte 44).

HÖPPNER 2002

Höppner, J.: Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler. München: Herbert Utz 2002. (*iwb* Forschungsberichte 164).

HSU & CLATTERBAUGH 2003

Hsu, T.-R.; Clatterbaugh, J.: Joining and bonding technologies. In: Hsu, T.-R. (Hrsg.): Mems Packaging. Stevenage, United Kingdom: INSPEC The Institution of Electrical Engineers 2003, S. 23–60.

INTEL CORPORATION 2009

Intel Corporation: Microprocessor Quick Reference Guide, <<http://www.intel.com/pressroom/kits/quickreffam.htm>> (24.06.2012).

JACOB 2002

Jacob, D.: Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik. München: Herbert Utz 2002. (*iwb* Forschungsberichte 167).

JANOCHA 1992

Janocha, H.: Aktoren: Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer 1992.

JANSCHKE 2010

Janschek, K.: Systementwurf mechatronischer Systeme: Methoden – Modelle – Konzepte. Berlin: Springer 2010.

JIN ET AL. 1995

Jin, J.; Higuchi, T.; Kanemoto, M.: Electrostatic Levitator for Hard Disk Media. IEEE – Transactions on industrial Electronics 42 (1995) 5, S. 467–473.

JOHANNSEN 2007

Johannsen, F.: Transformation von Prozessmodellen: Bewertung XML-basierter Ansätze. 1. Aufl. Bremen: Salzwasser 2007.

JOPP 2006

Jopp, K.: Nanotechnologie – Aufbruch ins Reich der Zwerge. 2. Aufl. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler 2006.

KEYES 2006

Keyes, R. W.: The Impact of Moore's Law. IEEE SSCS Newsletter 3 (2006) 20, S. 25–27.

KIENINGER 2005

Kieninger, K.: Verarbeitung von ungehäusten Bauteilen, <http://www.ee.hm.edu/fb/lab/avt/avt_2005_Diemontage.pdf> (24.06.2012).

KLEIN 2007

Klein, B.: Versuchsplanung – DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2007.

KLEPPMANN 2008

Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. 5. Aufl. München: Hanser 2008.

KRÖLL 2007

Kröll, M.: Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung. Heimsheim: Jost-Jetter 2007. (IPA-IAO Forschung und Praxis 468).

KUCHLING 2004

Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. 18. Aufl. München: Carl-Hanser 2004.

KUTTRUFF 1988

Kuttruff, H.: Physik und Technik des Ultraschalls. Stuttgart: S. Hirzel 1988.

LANG 2004

Lang, M.: Berechnung und Optimierung von passiven permanentmagnetischen Lagern für rotierende Maschinen. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004. (VDI Fortschritt-Berichte Reihe 21, Nr. 357).

LIERKE 1996

Lierke, E. G.: Kontrollierte Massenänderungen von Tropfen in einem akustischen Stehwellen-Positionierer. Forschung im Ingenieurwesen 62 (1996) 1–2, S. 21–31.

LINDNER ET AL. 1999

Lindner, H.; Brauer, H.; Lehmann, C.: Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik. 7. Aufl. Leipzig: Carl-Hanser. 1999.

LITTMANN 2003

Littmann, W.: Piezoelektrische, resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst. 2003.

LÜCKE 2006

Lücke, P.: Mikrooptische Sensoren nach dem chromatisch konfokalen Messprinzip. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH) 2006.

LUKAS 2009

Lukas, W.-D.: Die Mikrosystemtechnik hat ihre Potenziale noch lange nicht erschöpft. mst online 14 (2009) 42, S. 20.

MATSUO ET AL. 2000

Matsuo, E.; Koike, Y.; Nakamura, K.; Ueha, S.; Hashimoto, Y.: Holding characteristics of planar objects suspended by near-field acoustic levitation. Ultrasonics 38 (2000) 1–8, S. 60–63.

MAYERS 1997

Mayers, B.: Prozeß- und Produktoptimierung mit Hilfe der statistischen Versuchsmethodik. Aachen: Shaker 1997. (Berichte aus der Produktionstechnik 9/97).

MENZ ET AL. 2005

Menz, W.; Mohr, J.; Paul, O.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. 3. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH 2005.

MINIKES & BUCHER 2003

Minikes, A.; Bucher, I.: Coupled dynamics of a squeeze-film levitated mass and a vibrating piezoelectric disc: numerical analysis and experimental study. *Journal of Sound and Vibration* 263 (2003) 2, S. 241–268.

MORENO ET AL. 2005

Moreno, E.; Acevedo, P.; Fuentes, M.; Sotomayor, A.; Borroto, L.; Villafuerte, M.; Leija, L.: Design and construction of a bolt-clamped Langevin transducer. In: IEEE (Hrsg.): 2nd International Conference on Electrical & Electronics Engineering. IEEE Service Center 2005. S. 393–395.

MORTIMER ET AL. 2001

Mortimer, B.; Du Bruyn, T.; Davies, J.; Tapson, J.: High power resonant tracking amplifier using admittance locking. *Ultrasonics* (2001) 39, S. 257–261.

MÜLLER 1991

Müller, R.: Bauelemente der Halbleiter-Elektronik. 4. Aufl. Berlin: Springer 1991.

NEIL 2005

Neil, G.: Time is right for bare die. *European Semiconductor* 11 (2005) 27, S. 11–12.

NIENHAUS 1999

Nienhaus, M.: Zur Montage hybrider Mikrosysteme am Beispiel von Radarsensoren und Umlaufrädergetrieben. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999. (Fortschritt durch Mikrotechnik Reihe 2, Nr. 501).

NOMURA 2002

Nomura, H.: Theoretical and experimental examination of near-field acoustic levitation. *Journal of Acoustic Society of America* 111 (2002) 4, S. 1578–1583.

OH 1998

Oh, H. S.: Elektrostatische Greifer für die Mikromontage. Düsseldorf: VDI Verlag 1998. (VDI Fortschritt-Berichte Reihe 8, Nr. 702).

OSWALD 2007

Oswald, S.: Productronica 2007: Siemens lädt die Branche zum objektiven Vergleich ein, <http://www.siemens.com/press/pool/de/pr_cc/2007/11_nov/adea2007111680d.pdf> (24.06.2012).

PAPULA 2001A

Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler – Band 3: Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung. 4. Aufl. Braunschweig: Vieweg 2001.

PAPULA 2001B

Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler – Band 1: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium. 10. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2001.

PATENTANMELDUNG WO 02/090222 A1

Patentanmeldung WO 02/090222 A1. Veröffentlichungstag 14.11.2002. Anmeldetag 04.05.2001. Priorität DE 10121742. Vorrichtung zum Berührungslosen Greifen und Halten eines Gegenstandes. Robert Bosch GmbH. Höhn, Michael; Höppner, Jürgen.

PATENTANMELDUNG EP 1387392 A2

Patentanmeldung EP 1387392 A2. Veröffentlichungstag 04.02.2004. Anmeldetag 15.01.2003. Priorität DE 10232080. Elektrostatischer Greifer und Verfahren zu dessen Herstellung. Integrated Dynamics Engineering. Heiland, Peter.

PATENTANMELDUNG DE 4322388 A1

Patentanmeldung DE 4322388 A1. Veröffentlichungstag 12.01.1995. Anmeldetag 30.06.1993. Dr. Hielscher GmbH. Schaltungsanordnung zum sicheren Anschwingen von Ultraschalldesintegratoren. Hielscher, Harald.

PATENTANMELDUNG WO 00/61473 A1

Patentanmeldung WO 00/61473 A1. Veröffentlichungstag 19.10.2000. Anmeldetag 13.04.2000. Priorität DE 19916923. Technische Universität München Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Vorrichtung zum berührungslosen senkrechten transportieren von Bauteilen. Höppner, Jürgen; Zimmermann, Josef; Klingel, Robert.

PATENTANMELDUNG WO 00/61474 A1

Patentanmeldung WO 00/61474 A1. Veröffentlichungstag 19.10.2000. Anmeldetag 13.04.2000. Priorität DE 19916859. Technische Universität München Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Vorrichtung zum berührungslosen Greifen und Positionieren von Bauteilen. Höppner, Jürgen; Zimmermann, Josef.

PATENTANMELDUNG WO 00/61475 A1

Patentanmeldung WO 00/61475 A1. Veröffentlichungstag 19.10.2000. Anmeldetag 13.04.2000. Priorität DE 19916922. Technische Universität München Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Vorrichtung zum berührungslosen Transportieren von Bauteilen und System zum Handhaben und Lagern derselben. Höppner, Jürgen; Zimmermann, Josef.

PATENTANMELDUNG WO 02/12097 A1

Patentanmeldung WO 02/12097 A1. Veröffentlichungstag 14.02.2002. Anmeldetag 08.08.2000. Priorität DE 10039482. PRI Automation Switzerland AG. Handler zum Transportieren von flachen in der Halbleiterindustrie zur Anwendung kommenden Substraten. Höppner, Jürgen; Zimmermann, Josef; Schilp, Johannes.

PATENTANMELDUNG DE 19806306 A1

Patentanmeldung DE 19806306 A1. Veröffentlichungstag 09.09.1999. Anmeldetag 16.02.1998. Siemens AG. Vorrichtung zum berührungslosen Greifen und Halten eines Gegenstandes und Anwendungen der Vorrichtung. Frank, Niklaus; Honsberg-Riedl, Martin; Höhn, Michael.

PATENTANMELDUNG EP 1710034 A1

Patentanmeldung EP 1710034 A1. Veröffentlichungstag 11.10.2006. Anmeldetag 30.01.2006. Priorität DE 102005000027. Hilti AG. Spannvorrichtung für axial harmonisch schwingende Bauteile. Sander, Bernhard; Johan, Alexander.

PATENTSCHRIFT DE 19916872 C1

Patentschrift DE 19916872 C1. Veröffentlichungstag 13.04.2000. Anmeldetag 14.04.1999. Technische Universität München Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Vorrichtung zum berührungslosen Lagern von Bauteilen. Höppner, Jürgen; Zimmermann, Josef.

PATENTSCHRIFT US 4990051 A

Patentschrift US 4990051 A. Veröffentlichungstag 25.07.1989. Anmeldetag 28.09.1987. Kulicke & Soffa Ind. Inc. Pre-Peel Die Ejector Apparatus. Safabakhsh, Ali R.; Amorosi, Vincent G.

PELRINE 2005

Pelrine, R. E.: Stabil in der Schweben. Spektrum der Wissenschaft (Februar 2005), S. 38–44.

PETERSEN 2003

Petersen, B.: Flexible Handhabungstechnik für die automatisierte Mikro-
montage. Aachen: Shaker 2003. (Berichte aus der Produktionstechnik
17/2003).

PETERSEN 1982

Petersen, K. E.: Silicon as a Mechanical Material. Proceedings of the IEEE
70 (1982) 5, S. 420–457.

PETTEY & STEVENS 2011

Petty, C.; Stevens, H.: Worldwide Semiconductor Revenue Rose by More
Than \$70 Billion in 2010, According to Final Results by Gartner: <<http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1637314>> (26.06.2012).

PHILLIPS 2011

Phillips, J. R.: ZunZun.com Online Curve Fitting and Surface Fitting Web
Site: <<http://zunzun.com>> (26.06.2012).

POPOVIC ET AL. 2002

Popovic, G.; Almansa, A.; Chatzitheodoridis, E.; Petrovic, D.; Del Medico,
O.; Brenner, W.; Sumecz, F.; Detter, H.: Handling and assembly in MST –
final results of a European network. In: IEEE (Hrsg.): 23rd International
Conference on Microelectronics. Nis (Yugoslavia), Piscataway, Electron
Devices Society: 2002, S. 251–254.

PUFFER 2007

Puffer, W.: Technisch-ökonomische Effizienzbetrachtungen für die Halb-
leiterfertigung. Dissertation, Technische Universität München 2007.

RAMOS & SAN EMETERIO 2004

Ramos, A.; San Emeterio, J. L.: Interface Electronic Systems for Broadband
Ultrasonic Applications. In: Arnau, A. (Hrsg.): Piezoelectric Transducers
and Applications. Berlin: Springer 2004, S. 101–110.

REICHL 1998

Reichl, H.: Direktmontage: Handbuch über die Verarbeitung ungehäuster
ICs. Berlin: Springer 1998.

REINHART & HÖPPNER 2000

Reinhart, G.; Höppner, J.: Non-Contact Handling Using High-Intensity
Ultrasonics. CIRP Annals – Manufacturing Technology 49 (2000) 1, S. 5–
8.

REINHART & KIRCHMEIER 2011

Reinhart, G.; Kirchmeier, T.: Fuzzy Logic based Ultrasonic Gripper Design for Handling Small Parts. In: IEEE (Hrsg.): International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM). Liebert 2011. S. 1–6.

REINHART ET AL. 2004

Reinhart, G.; Zäh, M. F.; Schilp, M.; Zimmermann, J.; Zitzmann, A.: Non Contact Handling – Leading to New Visions in Logistics and Assembly. *Production Engineering* 11 (2004) 1, S. 153–158.

REINHART ET AL. 2008

Reinhart, G.; Heinz, M.; Kirchmeier, T.: Berührungslose Greiftechnologien für die Halbleiter- und Mikrosystemtechnik. In: Reinhart, G.; Hoffmann, H.; Zäh, M. (Hrsg.): Münchener Kolloquium – Innovationen für die Produktion. München: Herbert Utz 2008, S. 253–263.

REINHART ET AL. 2010A

Reinhart, G.; Heinz, M.; Kirchmeier, T.: Integration of the Ultrasonic Handling Technology into Microassembly Systems. In: Lien, T. K. (Hrsg.): 3rd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS). Trondheim: Tapir Uttrykk 2010, S. 91–96.

REINHART ET AL. 2010B

Reinhart, G.; Kirchmeier, T.; Heinz, M.: Prozessverhalten leicht erlernt: Charakterisierung ultraschallbasierter Handhabungsprozesse mittels neuronalem Netz. *wt Werkstattstechnik online* 100 (2010) 11/12, S. 847–869.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Heinz, M.; Zimmermann, J.; Schilp, M.; Zitzmann, A.; Hellwig, J.; Stock, J.: Non-contact Handling and Transportation for Substrates and Microassembly Using Ultrasound-Air-Film-Technology. In: IEEE/SEMI (Hrsg.): 22nd Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC). New York: IEEE 2011, S. 1–6.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Locmelis, E.; Zitzmann, A.: Empfindliche Bauteile werden mit Ultraschall berührungslos bewegt: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/automatisierung/montagetechnik_handhabungstechnik/articles/367322/> (26.06.2012).

RENSINK 2004

Rensink, D.: Verdunstung akustisch levitierter schwingender Tropfen aus homogenen und heterogenen Medien. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg 2004.

REYNOLDS 1886

Reynolds, O.: On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. Philos. Trans. R. Soc. London 177 (1886) 1, S. 157–234.

RUGE & MADER 1991

Ruge, I.; Mader, H.: Halbleiter-Technologie. 3. Aufl. Berlin: Springer 1991.

RUNAR 1999

Runar, E.: Entwicklung einer Ultraschall-Levitations-Apparatur für die Probenvorbereitung in der Mikro- und Spurenanalyse. Dissertation, Philipps-Universität Marburg 1999.

RUSCHMEYER & BARTZ 1995

Ruschmeyer, K.; Bartz, W. J.: Piezokeramik: Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen. Renningen-Malmsheim: Expert 1995.

SCHARLAU ET AL. 2003

Scharlau, B.; Nordmeier, V.; Schlichting, H. J.: Magnetische Levitation. Berlin: Lehmanns Media 2003.

SCHEFFLER 1997

Scheffler, E.: Statistische Versuchsplanung und -auswertung: Eine Einführung für Praktiker. 3. Aufl. Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1997.

SCHILP 2007

Schilp, M.: Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage. München: Herbert Utz 2007. (*iwb* Forschungsberichte 199).

SCHRÖDER 2010

Schröder, D.: Intelligente Verfahren: Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme. Berlin: Springer 2010.

SCHROTER 1995

Schroter, A.: Ausgleichsvorgänge und Strömungsgeräusche bei aerostatischen Lagern mit flächig verteilten Mikrodüsen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.

SCHULZ 1995

Schulz, G.: Regelungstechnik: Grundlagen, Analyse und Entwurf von Regelkreisen, rechnergestützte Methoden. Berlin: Springer 1995.

SCHWEITZER ET AL. 1993

Schweitzer, G.; Traxler, A.; Bleuler, H.: Magnetlager: Grundlagen, Eigenschaften und Anwendungen berührungsfreier, elektromagnetischer Lager. Berlin: Springer 1993.

SPRYNCHAK 2003

Sprynchak, V.: Ramanspektroskopische Untersuchungen an homogenen und inhomogenen sphärischen und sphäroiden Partikeln. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 2003.

STANZL 2008

Stanzl, H.: SMD-Hochleistungsbestückautomaten. Innovationen für globale Märkte. In: Reinhart, G.; Hoffmann, H.; Zäh, M. (Hrsg.): Münchener Kolloquium. Innovationen für die Produktion. München: Herbert Utz 2008, S. 239–245.

STOICA-KLÜVER ET AL. 2009

Stoica-Klüver, C.; Klüver, J.; Schmidt, J.: Modellierung komplexer Prozesse durch naturanaloge Verfahren. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009.

STRANG 2010

Strang, G.: Wissenschaftliches Rechnen. 1. Aufl. Berlin: Springer 2010.

STURM 2000

Sturm, M.: Neuronale Netze zur Modellbildung in der Regelungstechnik. Dissertation, Technische Universität München. 2000.

THIERSE 2003

Thierse, W.: Traditionswahrung und Modernisierung – Sozialdemokratie in der Entscheidung. In: Dowe, D. (Hrsg.): 140 Jahre Gründung von Lassalles Allgemeinem Deutschen Arbeiterverein 1863 in Leipzig – zur Frühgeschichte der deutschen Sozialdemokratie. Bonn: Historisches Forschungszentrum 2003, S. 46–62.

TÖNSHOFF & KOPP 2001

Tönshoff, H. K.; Kopp, D.: Scaling Aerostatic Technology to Microsystems. Annals of the German Academic Society for Production Engineering 8 (2001) 1, S. 145–148.

TUMMALA 2001

Tummala, R.: Fundamentals of Microsystem Packaging. New York: McGraw-Hill Professional 2001.

UEHA ET AL. 2000

Ueha, S.; Hashimoto, Y.; Koike, Y.: Non-contact transportation using near-field acoustic levitation. Ultrasonics 38 (2000) 1–8, S. 26–32.

VDI 1983

VDI (Hrsg.): Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung: Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 3. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1983.

VDI-RICHTLINIE 2860

VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik, Berlin: Beuth 1990

VÖLKLEIN & ZETTERER 2006

Völklein, F.; Zetterer, T.: Praxiswissen Mikrosystemtechnik: Grundlagen – Technologien – Anwendungen. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2006.

VON PLATE 2003

von Plate, B.: Grundzüge der Globalisierung. Informationen zur politischen Bildung 3 (2003) 280, S. 3–6.

VORONINA & BABITSKY 2008

Voronina, S.; Babitsky, V.: Autoresonant control strategies of loaded ultrasonic transducer for machining applications. Journal of Sound and Vibration (2008) 313, S. 395–417.

WEINBERG ET AL. 2000

Weinberg, W.; Mitschke, M.; Wriedt, T.; Bauchhage, K.: PDA-Messungen an akustisch levitierten verdampfenden und inhomogenen Tropfen. Technisches Messen 97 (2000) 3, S. 104–110.

WHYMARK 1975

Whymark, R. R.: Acoustic field positioning for containerless processing. *Ultrasonics* 23 (1975) 5, S. 251–261.

WIDMANN ET AL. 1996

Widmann, D.; Mader, H.; Friedrich, H.: Technologie hochintegrierter Schaltungen. Berlin: Springer 1996.

WIESENDANGER 2001

Wiesendanger, M.: Squeeze-film air bearings using piezoelectric bending elements. Dissertation, EPF Lausanne 2001.

WREGE 2007

Wrege, J.: Elektrostatisch unterstützte Handhabungstechniken in der Mikromontage. Essen: Vulkan 2007.

ZÄH ET AL. 2004

Zäh, M.; Heinzl, J.; Franzkowiak, M.; Grünwald, S.; Schilp, M.; Zitzmann, A.: Berührungslose Handhabung kleiner Bauteile. In: Zäh, M.; Reinhart, G. (Hrsg.): Berührungslose Handhabung – Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle. Herbert Utz 2004, S. 2.1–2.22. (IWB Seminarberichte 76).

ZÄH & ZITZMANN 2005

Zäh, M. F.; Zitzmann, A.: Berührungslose Handhabung – Eine Methode zur Auslegung von ultraschallbasierten berührungslosen Handhabungssystemen. *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) 9, S. 649–653.

ZÄH ET AL. 2003

Zäh, M. F.; Zimmermann, J.; Schilp, M.; Zitzmann, A.: Non-Contact Handling and Assembly in Microfabrication. In: VDE (Hrsg.): 2nd VDE World Microtechnologies Congress, München 2003.

ZIMMERMANN ET AL. 2008

Zimmermann, J.; Zitzmann, A.; Schilp, M.: Bauteile greifen – ohne zu berühren. In: Ruprecht, R. (Hrsg.): Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2008. Karlsruhe 2008, S. 336–344.

ZIMMERMANN 2011

Zimmermann, J. L.: Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme. München: Utz 2011. (*iwb* Forschungsberichte 247).

A Zusätzliche Informationen zur statistischen Versuchsplanung

Freiheitsgrad f	t-Werte für Vertrauensniveau		
	95%	99%	99,9%
1	12,71	63,66	636,62
2	4,303	9,925	31,60
3	3,182	5,841	12,92
4	2,776	4,604	8,610
5	2,571	4,032	6,869
6	2,447	3,707	5,959
7	2,365	3,499	5,408
8	2,306	3,355	5,041
9	2,262	3,250	4,781
10	2,228	3,169	4,587
12	2,179	3,055	4,318
15	2,131	2,947	4,073
20	2,086	2,845	3,850
30	2,042	2,750	3,646
40	2,021	2,704	3,551
50	2,009	2,678	3,496
70	1,994	2,648	3,435
100	1,984	2,626	3,390
1000	1,962	2,581	3,300
∞	1,960	2,576	3,291

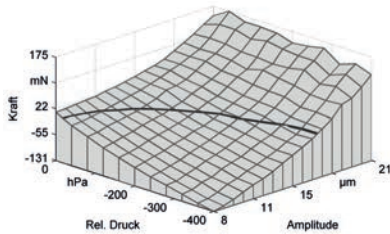
Table A.1: t-Werte zur Berechnung zweiseitiger Vertrauensbereiche (KLEPPMANN 2008)

Nr.	A	B	C	D	A*B	A*C	A*D	B*C	B*D	C*D	E*D A*B*C	E*C A*B*D	E*A B*C*D	E*B C*D*A	E A*B*C*D
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
5	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
8	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
10	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
11	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
12	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
13	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
14	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
15	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

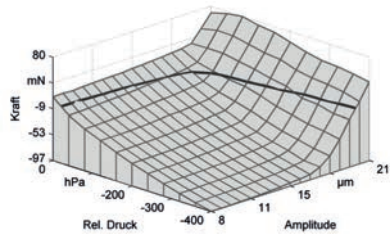
Tabelle A.2: 2^{5-1} Teilfaktorenplan

B Ergebnisse der Vermessung verschiedener Greiferspitzen

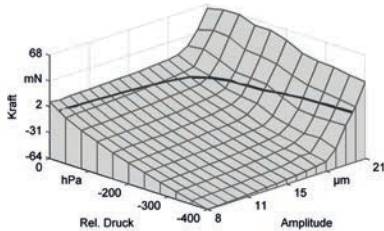
B.1 Ergebnisse der Voruntersuchung von Unterabschnitt 4.2.2



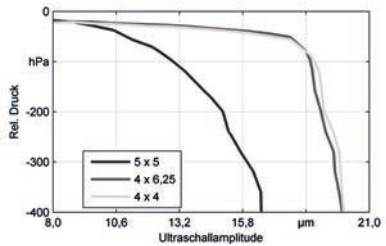
(a) Greiferspitze $5 \cdot 5 \text{ mm}^2$



(b) Greiferspitze $4 \cdot 6,25 \text{ mm}^2$



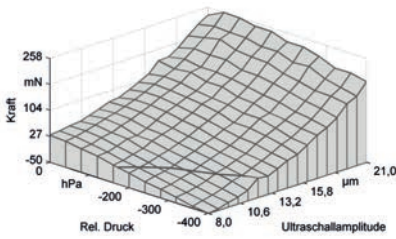
(c) Greiferspitze $4 \cdot 4 \text{ mm}^2$



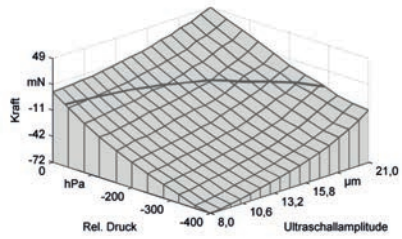
(d) Verlauf des Kräftegleichgewichts aller Greiferspitzen

Abbildung B.1: Messergebnisse zur Voruntersuchung bei einem Luftspaltwert von $h_0 = 20 \mu\text{m}$. Alle Greiferspitzen besitzen ein identisches Design der Unterdruckdüsen.

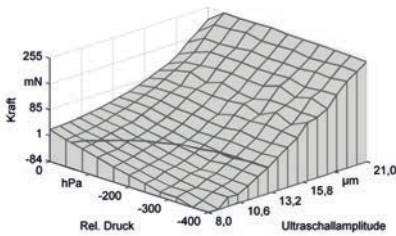
B.2 Messergebnisse zu Unterabschnitt 4.2.4



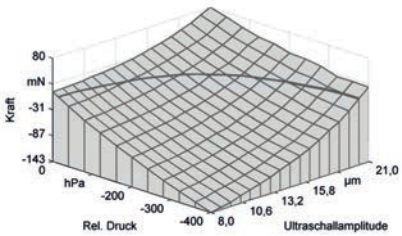
(a) $\varnothing 0,6 \text{ mm} / h_0 = 20 \text{ }\mu\text{m}$



(b) $\varnothing 0,6 \text{ mm} / h_0 = 30 \text{ }\mu\text{m}$



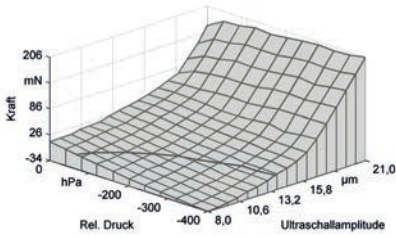
(c) $\varnothing 1,0 \text{ mm} / h_0 = 20 \text{ }\mu\text{m}$



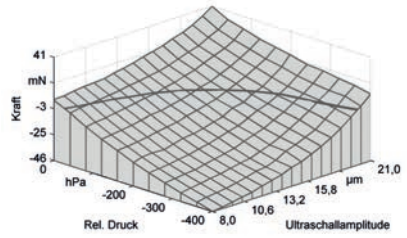
(d) $\varnothing 1,0 \text{ mm} / h_0 = 30 \text{ }\mu\text{m}$

Abbildung B.2: Ergebnisse der Kraftmessungen der $5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ Greiferspitze (1. Versuchsplan)

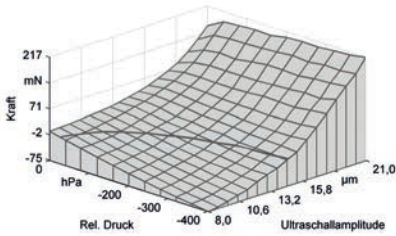
B.2 Messergebnisse zu Unterabschnitt 4.2.4



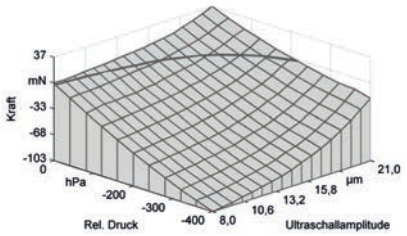
(a) $\varnothing 0,6 \text{ mm} / h_0 = 20 \mu\text{m}$



(b) $\varnothing 0,6 \text{ mm} / h_0 = 30 \mu\text{m}$



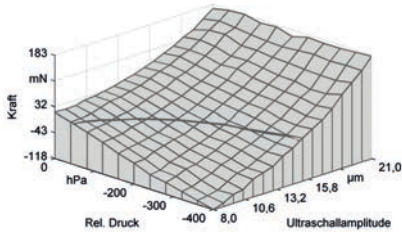
(c) $\varnothing 1,0 \text{ mm} / h_0 = 20 \mu\text{m}$



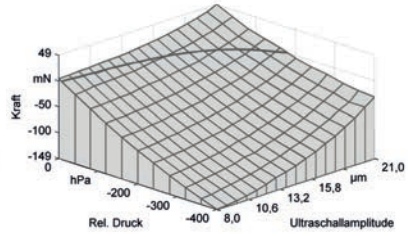
(d) $\varnothing 1,0 \text{ mm} / h_0 = 30 \mu\text{m}$

Abbildung B.3: Ergebnisse der Kraftmessungen der $4 \cdot 6,25 \text{ mm}^2$ Greiferspitze (1. Versuchsplan)

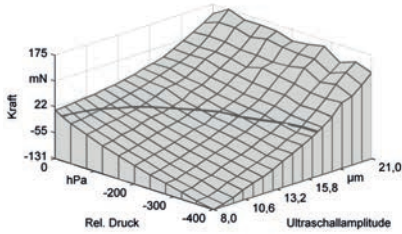
B Ergebnisse der Vermessung verschiedener Greiferspitzen



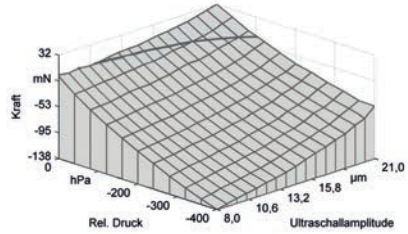
(a) $d_{\varnothing} 1,0 \text{ mm} / h_0 = 20 \text{ } \mu\text{m}$



(b) $d_{\varnothing} 1,0 \text{ mm} / h_0 = 30 \text{ } \mu\text{m}$

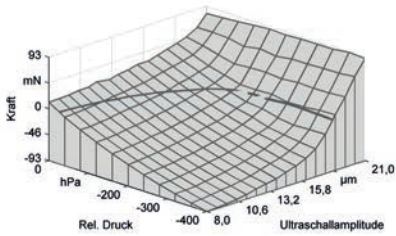


(c) $d_{\varnothing} 2,6 \text{ mm} / h_0 = 20 \text{ } \mu\text{m}$

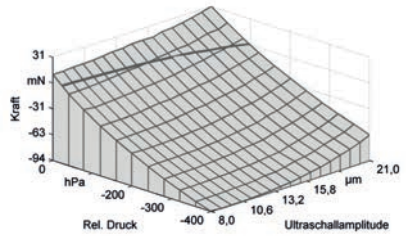


(d) $d_{\varnothing} 2,6 \text{ mm} / h_0 = 30 \text{ } \mu\text{m}$

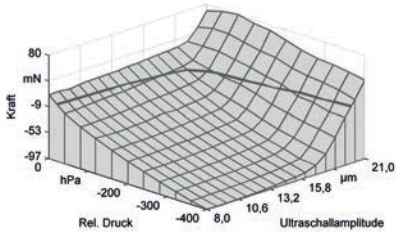
Abbildung B.4: Ergebnisse der Kraftmessungen der $5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ Greiferspitze (2. Versuchsplan)



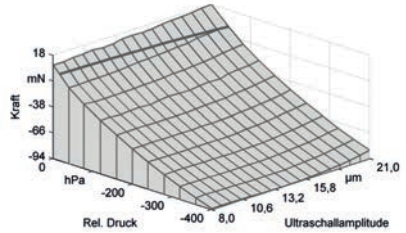
(a) $d_{\varnothing} 1,0 \text{ mm} / h_0 = 20 \mu\text{m}$



(b) $d_{\varnothing} 1,0 \text{ mm} / h_0 = 30 \mu\text{m}$



(c) $d_{\varnothing} 2,6 \text{ mm} / h_0 = 20 \mu\text{m}$



(d) $d_{\varnothing} 2,6 \text{ mm} / h_0 = 30 \mu\text{m}$

Abbildung B.5: Ergebnisse der Kraftmessungen der $4 \cdot 6,25 \text{ mm}^2$ Greiferspitze (2. Versuchsplan)

B.3 Versuchsauswertung zu Abschnitt 4.2

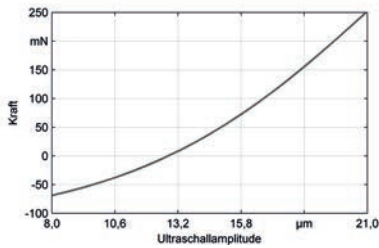
	Nr.	Effekt	Mittelwert	Kofidenzintervall	
				Untere Grenze	Obere Grenze
1. Versuchsplan	1	ξ	0,0911	0,0857	0,0966
	2	p_U	-0,0361	-0,0415	-0,0306
	3	h_0	-0,0700	-0,0755	-0,0646
	4	$\min(a, b)$	0,0118	0,0064	0,0172
	5	\varnothing	-0,0130	-0,0184	-0,0076
	6	$\xi \cdot p_U$	0,0227	0,0173	0,0281
	7	$\xi \cdot h_0$	-0,0498	-0,0552	-0,0444
	8	$\xi \cdot \min(a, b)$	0,0123	0,0069	0,0177
	9	$\xi \cdot \varnothing$	0,0140	0,0085	0,0194
	10	$p_U \cdot h_0$	-0,0089	-0,0144	-0,0035
	11	$p_U \cdot \min(a, b)$	-0,0139	-0,0193	-0,0085
	12	$p_U \cdot \varnothing$	-0,0153	-0,0208	-0,0099
	13	$h_0 \cdot \min(a, b)$	-0,0094	-0,0148	-0,0039
	14	$h_0 \cdot \varnothing$	-0,0031	-0,0085	0,0023
	15	$\min(a, b) \cdot \varnothing$	-0,0082	-0,0136	-0,0028

2. Versuchsplan	1	ξ	0,0601	0,055	0,0653
	2	p_U	-0,0633	-0,0684	-0,0582
	3	h_0	-0,0406	-0,0457	-0,0355
	4	$\min(a, b)$	0,0154	0,0103	0,0205
	5	$d \varnothing$	-0,0125	-0,0176	-0,0074
	6	$\xi \cdot p_U$	0,0162	0,0111	0,0213
	7	$\xi \cdot h_0$	-0,0309	-0,036	-0,0258
	8	$\xi \cdot \min(a, b)$	0,0328	0,0277	0,038
	9	$\xi \cdot d \varnothing$	-0,0084	-0,0135	-0,0032
	10	$p_U \cdot h_0$	-0,0073	-0,0124	-0,0022
	11	$p_U \cdot \min(a, b)$	-0,0035	-0,0086	0,0017
	12	$p_U \cdot d \varnothing$	-0,0152	-0,0203	-0,0101
	13	$h_0 \cdot \min(a, b)$	-0,0261	-0,0312	-0,021
	14	$h_0 \cdot d \varnothing$	0,0131	0,0079	0,0182
	15	$\min(a, b) \cdot d \varnothing$	-0,0090	-0,0142	-0,0039

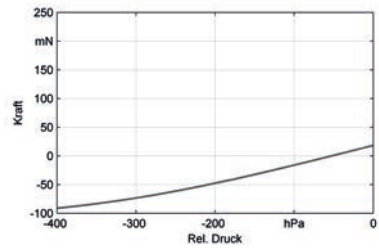
Tabelle B.1: Signifikanzauswertung der Versuchspläne (angegebene Werte in N).

C Ergebnisse der Prozessmodellierung

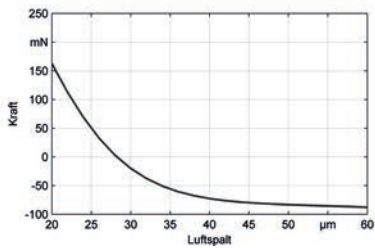
C.1 Messungen zur Gleichungsstruktur von Unterabschnitt 4.4.1



(a) $p_U = -280 \text{ hPa}$, $h_0 = 20 \text{ µm}$



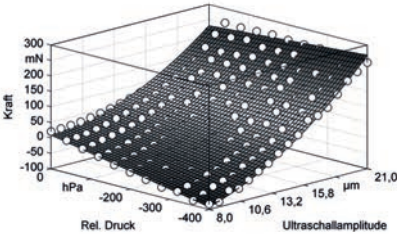
(b) $\xi = 8 \text{ µm}$, $h_0 = 20 \text{ µm}$



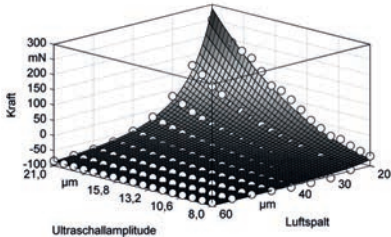
(c) $\xi = 18,6 \text{ µm}$, $p_U = -280 \text{ hPa}$

Abbildung C.1: Exemplarische Darstellung der Kräfteinflüsse einzelner Parameter

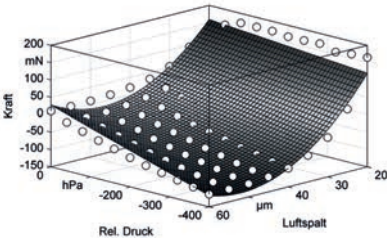
C Ergebnisse der Prozessmodellierung



(a) $h_0 = 20 \mu\text{m}$



(b) $p_U = -280 \text{ hPa}$



(c) $\xi = 18,6 \mu\text{m}$

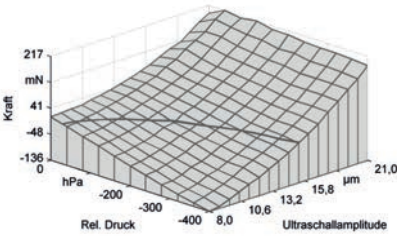
Abbildung C.2: Darstellung der Messpunkte und der jeweils approximierten Funktionen für die Beschreibung der resultierenden Kraft in Abhängigkeit von zwei Parametern.

C.2 Adaptionsergebnisse der MPL-Netze von Abschnitt 4.3

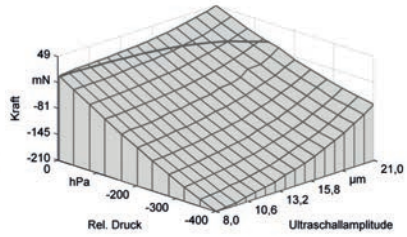
Geometrie [mm]		Anzahl Neuronen pro verdeckter Schicht																		
		2			3			4			5			1 verdeckte Schicht			2 verdeckte Schichten			
a	b	\varnothing	$d\varnothing$	s_e	\bar{e}	s_e	\bar{e}	s_e	\bar{e}	s_e	\bar{e}	s_e	\bar{e}	s_e	\bar{e}	s_e	\bar{e}	s_e	\bar{e}	
4	6,25	0,6	0	2,63	36,55	2,51	105,95	0,99	56,90	0,82	25,64									
4	6,25	1	0	2,41	80,01	2,25	57,03	1,64	71,44	1,05	30,42									
5	5	0,6	0	4,38	178,75	4,15	77,11	1,84	88,02	2,00	4,81									
5	5	1	0	5,40	41,36	3,97	351,07	3,18	141,02	3,17	102,24									
4	6,25	0,6	1	3,09	35,58	1,74	28,56	1,69	131,30	0,75	31,50									
4	6,25	0,6	2,6	12,59	10,66	1,62	28,10	1,50	33,93	1,31	29,87									
5	5	0,6	1	29,97	2111,73	2,38	7,18	1,96	5,65	1,39	63,54									
5	5	0,6	2,6	5,85	113,80	2,40	17,85	2,37	98,79	2,20	45,60									
				$\varnothing s_e, \varnothing \bar{e}$	8,29	326,06	2,63	84,11	1,90	78,38	1,59	41,70								
4	6,25	0,6	0	2,24	102,39	0,79	50,53	0,81	2,71	0,61	1,60									
4	6,25	1	0	2,13	218,12	1,28	52,71	0,93	28,30	0,74	36,80									
5	5	0,6	0	3,76	81,64	1,94	122,14	1,28	3,77	1,30	42,35									
5	5	1	0	5,14	47,01	3,73	49,55	2,23	46,86	2,07	93,58									
4	6,25	0,6	1	1,48	40,82	0,70	17,15	0,56	1,09	0,49	36,41									
4	6,25	0,6	2,6	3,01	107,91	1,18	25,00	1,29	70,92	0,96	4,07									
5	5	0,6	1	4,89	171,93	2,04	52,27	1,27	58,36	1,14	0,52									
5	5	0,6	2,6	4,72	34,76	2,07	76,29	1,66	36,34	1,49	48,14									
				$\varnothing s_e, \varnothing \bar{e}$	3,42	100,57	1,72	55,71	1,25	31,04	1,10	32,93								

Tabelle C.1: Kenngrößen der Adaption (angegebene Werte in mN) der MLP-Netze für verschiedene Geometrien bei unterschiedlicher Anzahl an Neuronen (Spalten) und verdeckter Schichten (Neuronenzahl für jede Schicht gleich).

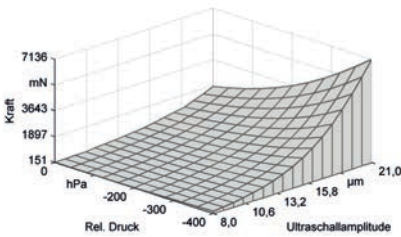
C.3 Extrapolationsergebnisse der Modellierungsansätze



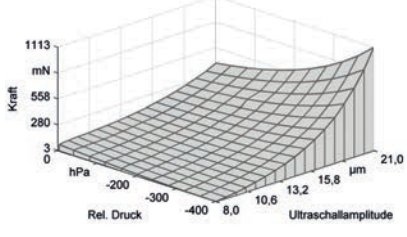
(a) Messung bei $h_0 = 20 \mu\text{m}$



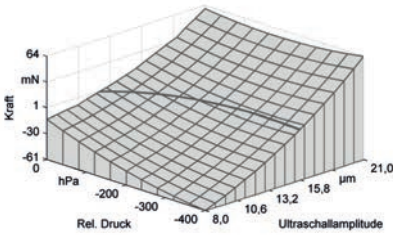
(b) Messung bei $h_0 = 30 \mu\text{m}$



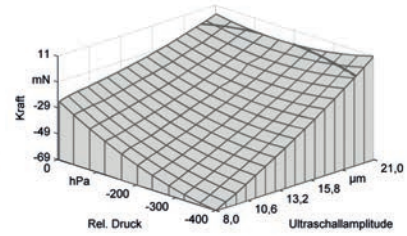
(c) Extrapolation mit MLP-Netz von $h_0 = 20 \mu\text{m}$



(d) Extrapolation mit MLP-Netz von $h_0 = 30 \mu\text{m}$



(e) Extrapolation mit Gleichung von $h_0 = 20 \mu\text{m}$



(f) Extrapolation mit Gleichung von $h_0 = 30 \mu\text{m}$

Abbildung C.3: Vergleich zwischen der Kraftmessung und dem extrapolierten Kraftverlauf einer unbekanntens Greiferspitze ($5 \cdot 5 \text{ mm}^2$ mit einem Durchmesser von $1,5 \text{ mm}$) durch das neuronale Netz. Die Greiferspitze wurde vor der Extrapolation nicht für die Adaption des neuronalen Netzes verwendet.

Seminarberichte IWB

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

Seminarberichte IWB sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-07-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten - ISBN 3-931327-08-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten - ISBN 3-931327-09-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen**
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management**
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlussseminar**
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibel und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlink im Mittelstand
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte IWB Band 1–121

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen.

- 1 Streifinger, E.: Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 Fuchsberger, A.: Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 Maier, C.: Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrieroboter
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 Summer, H.: Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 Simon, W.: Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 Büchs, S.: Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 Hunzinger, J.: Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 Pilland, U.: Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 Reithofer, N.: Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 Reinhart, G.: Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungszäse
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 Bürstner, H.: Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 Riese, K.: Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 Lutz, P.: Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 Klippel, C.: Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 Rascher, R.: Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 Heusler, H.-J.: Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 Kirchknopf, P.: Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 Sauerer, Ch.: Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 Karstedt, K.: Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 Peiker, St.: Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 Schugmann, R.: Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 Wrba, P.: Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 Eibelhäuser, P.: Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 Prasch, J.: Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 Teich, K.: **Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**
1990 - 52 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfang, W.: **Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**
1990 - 59 Abb. - 153 Seiten - ISBN 3-540-52829-6
- 30 Tauber, A.: **Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**
1990 - 93 Abb. - 190 Seiten - ISBN 3-540-52911-X
- 31 Jäger, A.: **Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**
1991 - 75 Abb. - 148 Seiten - ISBN 3-540-53021-5
- 32 Hartberger, H.: **Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**
1991 - 58 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-53326-5
- 33 Tuzcek, H.: **Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**
1992 - 125 Abb. - 179 Seiten - ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.: **Planungsstrategien zur stömungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten**
1991 - 60 Abb. - 166 Seiten - ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.: **3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**
1991 - 66 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-54076-8
- 36 Naber, H.: **Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente**
1991 - 85 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupec, Th.: **Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen**
1991 - 68 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.: **Dynamisches Verhalten von Kreissägen**
1991 - 109 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.: **Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile**
1991 - 86 Abb. - 201 Seiten - ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.: **3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung**
1991 - 74 Abb. - 126 Seiten - ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.: **Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme**
1992 - 108 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.: **Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**
1992 - 94 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hoßmann, J.: **Methodik zur Planung der automatisierten Montage von nicht formstabilen Bauteilen**
1992 - 73 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-5520-0
- 44 Petry, M.: **Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkastens für robotergeführte Klebprozesse**
1992 - 106 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-55374-6
- 45 Schönecker, W.: **Integrierte Diagnose in Produktionszellen**
1992 - 87 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-55375-4
- 46 Bick, W.: **Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**
1992 - 70 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-55377-0
- 47 Gebauer, L.: **Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**
1992 - 84 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-55378-9
- 48 Schrüfer, N.: **Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**
1992 - 103 Abb. - 161 Seiten - ISBN 3-540-55431-9
- 49 Wisbacher, J.: **Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**
1992 - 77 Abb. - 176 Seiten - ISBN 3-540-55512-9
- 50 Garnich, F.: **Laserbearbeitung mit Robotern**
1992 - 110 Abb. - 184 Seiten - ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.: **Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe**
1992 - 89 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-44441-2
- 52 Glaas, W.: **Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**
1992 - 67 Abb. - 140 Seiten - ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H.J.: **Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**
1992 - 60 Abb. - 153 Seiten - ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.: **Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**
1992 - 75 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.: **Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**
1992 - 67 Abb. - 135 Seiten - ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bomm, H.: **Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**
1992 - 87 Abb. - 195 Seiten - ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendt, A.: **Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**
1992 - 74 Abb. - 179 Seiten - ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.: **Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**
1993 - 67 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.: **Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**
1993 - 72 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-56307-5
- 60 Strohmayr, R.: **Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeeinrichtungen**
1993 - 80 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-56652-X
- 61 Glas, J.: **Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware**
1993 - 80 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-56890-5
- 62 Stetter, R.: **Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 - 91 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-56889-1
- 63 Dirndorfer, A.: **Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**
1993 - 76 Abb. - 144 Seiten - ISBN 3-540-57031-4
- 64 Wiedemann, M.: **Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen**
1993 - 81 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-57177-9
- 65 Woenckhaus, Ch.: **Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung**
1994 - 81 Abb. - 140 Seiten - ISBN 3-540-57284-8
- 66 Kummesteiner, G.: **3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme**
1994 - 62 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-57535-9
- 67 Kugelmann, F.: **Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 - 76 Abb. - 144 Seiten - ISBN 3-540-57549-9
- 68 Schwarz, H.: **Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 - 96 Abb. - 148 Seiten - ISBN 3-540-57577-4
- 69 Wiethen, U.: **Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**
1994 - 70 Abb. - 142 Seiten - ISBN 3-540-57794-7
- 70 Seehuber, M.: **Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 - 72 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-57896-X
- 71 Amann, W.: **Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen**
1994 - 71 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-57924-9
- 72 Schöpf, M.: **Rechnergestütztes Projektförderungs- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 - 63 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58052-2
- 73 Welling, A.: **Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 - 66 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-580-0
- 74 Zetmayer, H.: **Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinstserienproduktion**
1994 - 62 Abb. - 143 Seiten - ISBN 3-540-58134-0

- 75 Lindl, M.: Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 - 66 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58221-5
- 76 Zipper, B.: Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 - 64 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58222-3
- 77 Raith, P.: Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 - 51 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58223-1
- 78 Engel, A.: Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation
1994 - 69 Abb. - 160 Seiten - ISBN 3-540-58258-4
- 79 Zäh, M. F.: Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 - 95 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-58624-5
- 80 Zwanzler, N.: Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 - 65 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-58634-2
- 81 Romanow, P.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 - 66 Abb. - 151 Seiten - ISBN 3-540-58771-3
- 82 Kahlenberg, R.: Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 - 71 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-58772-1
- 83 Huber, A.: Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 - 87 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-58773-X
- 84 Birkel, G.: Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen
1995 - 64 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-58869-8
- 85 Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 - 77 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-58942-2
- 86 Nedeljkovic-Groha, V.: Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen
1995 - 94 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-58953-8
- 87 Rockland, M.: Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995 - 83 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-58999-6
- 88 Linner, St.: Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 - 67 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-59016-1
- 89 Eder, Th.: Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 - 62 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-59084-6
- 90 Deutschle, U.: Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 - 80 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-59337-3
- 91 Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 - 68 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-60120-1
- 92 Hechl, Chr.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 - 73 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-60325-5
- 93 Albertz, F.: Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 - 83 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-60608-8
- 94 Trunzner, W.: Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgenseoren
1996 - 101 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-60961-X
- 95 Fichtmüller, N.: Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 - 83 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-60960-1
- 96 Trucks, V.: Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 - 64 Abb. - 141 Seiten - ISBN 3-540-60599-8
- 97 Schäffer, G.: Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 - 71 Abb. - 170 Seiten - ISBN 3-540-60958-X
- 98 Koch, M. R.: Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 - 67 Abb. - 138 Seiten - ISBN 3-540-61104-5
- 99 Moctezuma de la Barrera, J. L.: Ein durchgängiges System zur Computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 - 99 Abb. - 175 Seiten - ISBN 3-540-61145-2
- 100 Geuer, A.: Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 - 84 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-61495-8
- 101 Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 - 67 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-61678-0
- 102 Pischelstrieder, K.: Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 - 74 Abb. - 171 Seiten - ISBN 3-540-61714-0
- 103 Köhler, R.: Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 - 62 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-62024-9
- 104 Feldmann, Ch.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 - 71 Abb. - 163 Seiten - ISBN 3-540-62059-1
- 105 Lehmann, H.: Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystemen
1997 - 96 Abb. - 191 Seiten - ISBN 3-540-62202-0
- 106 Wagner, M.: Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 - 94 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-62656-5
- 107 Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 - 63 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-62794-4
- 108 Krönert, U.: Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 - 53 Abb. - 127 Seiten - ISBN 3-540-63338-3
- 109 Pfersdorf, I.: Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 - 74 Abb. - 172 Seiten - ISBN 3-540-63615-3
- 110 Kuba, R.: Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 - 77 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-63642-0
- 111 Kaiser, J.: Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 - 67 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-63999-3
- 112 Geyer, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 - 85 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-64195-5
- 113 Martin, C.: Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 - 73 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-64401-6
- 114 Löffler, Th.: Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 - 85 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-64511-X
- 115 Lindermaier, R.: Qualitätsorientierte Entwurf in der Produktion
1998 - 84 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-64686-8
- 116 Koehrer, J.: Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 - 75 Abb. - 185 Seiten - ISBN 3-540-65037-7
- 117 Schuller, R. W.: Leitfäden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 - 76 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-65320-1
- 118 Debuschewitz, M.: Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 - 104 Abb. - 169 Seiten - ISBN 3-540-65350-3

- 119 Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline- Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 - 98 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-65382-1
- 120 Pfof, E.: Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 - 69 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-65525-5
- 121 Spitznagel, J.: Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen
1999 - 63 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-65896-3

Forschungsberichte IWB ab Band 122

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

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

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten - ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten - ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten - ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Rolf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten - ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten - ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
152 Seiten - ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heltmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten - ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialfußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industrikeramik
159 Seiten - ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten - ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten - ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokusspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten - ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten - ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schilffebacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten - ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprengel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten - ISBN 978-3-89675-757-9
- 142 *Andreas Gallasch*: Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 *Ralf Cuiper*: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 *Christian Schneider*: Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 *Christian Jonas*: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 *Ulrich Willnecker*: Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 *Christof Lehner*: Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 *Frank Rick*: Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 *Michael Höhn*: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0

- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudarfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinenaher Abläufe
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Führer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weißenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Raßgoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitinge:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterens für das Druckgießen
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieveling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kaustems
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Joachim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierloh:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9
- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3

- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgasfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0663-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griebisch:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraber:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlickerrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Müller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Würnsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlstahns
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasieren förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonia Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in unterbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4

- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schilp:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreißschweißen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflusintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Rad:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreißschweißen von Rohren
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmelitungsschweißen von Stählen
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5
- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteilabgabestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reißschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Mouthicho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6

- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathy Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahmert:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens
128 Seiten - ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreißschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-4452-0
- 298 **Florian Karl:** Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4458-2
- 299 **Philipp Ronald Engelhardt:** System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-4472-8
- 300 **Markus Graßl:** Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4476-6
- 301 **Thomas Kirchmeier:** Methode zur Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4478-0

