



**301**

**Thomas Kirchmeier**

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

Thomas Kirchmeier

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

Herbert Utz Verlag · München 2015

Forschungsberichte IWB  
Band 301

Ebook (PDF)-Ausgabe:  
ISBN 978-3-8316-7141-0 Version: 1 vom  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Softcover  
ISBN 978-3-8316-4478-0  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

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](http://www.utzverlag.de)

## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.



## 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

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
<b>Begriffserklärungen</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>17</b>
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

<b>3</b>	<b>Methode zur Anwendung der ultraschallbasierten Handhabung</b>	<b>37</b>
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
<b>4</b>	<b>Modellierung der Prozesszusammenhänge</b>	<b>45</b>
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
<b>5</b>	<b>Adaption der Anlagentechnik und der Montageprozesse</b>	<b>77</b>
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
<b>6</b>	<b>Technische und wirtschaftliche Bewertung</b>	<b>103</b>
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
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>123</b>
7.1 Zusammenfassung . . . . .	123
7.2 Ausblick . . . . .	125
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>
<b>A Zusätzliche Informationen zur statistischen Versuchsplanung</b>	<b>145</b>
<b>B Ergebnisse der Vermessung verschiedener Greiferspitzen</b>	<b>147</b>
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
<b>C Ergebnisse der Prozessmodellierung</b>	<b>153</b>
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 Geometrieigenschaften . .	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

