



**336**

**Alexander Belitzki**  
**Rechnergestützte Minimierung des Verzugs**  
**laserstrahlgeschweißter Bauteile**



Alexander Belitzki

**Rechnergestützte Minimierung des Verzugs  
laserstrahlgeschweißter Bauteile**

Herbert Utz Verlag · München 2018

Forschungsberichte IWB  
Band 336

Ebook (PDF)-Ausgabe:  
ISBN 978-3-8316-7375-9 Version: 1 vom 29.05.2018  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2018

Alternative Ausgabe: Softcover  
ISBN 978-3-8316-4254-0  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2018





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Rechnergestützte Minimierung des Verzugs  
laserstrahlgeschweißter Bauteile**

**Alexander Belitzki**

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:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wall

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh
2. Prof. Dr.-Ing. Frank Vollertsen

Die Dissertation wurde am 21.06.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 23.10.2017 angenommen.



Alexander Belitzki

**Rechnergestützte Minimierung des Verzugs  
laserstrahlgeschweißter Bauteile**



Herbert Utz Verlag · München

## Forschungsberichte IWB

Band 336

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2017

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 · 2018

ISBN 978-3-8316-4254-0

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

*Nicht weil es schwierig ist, wagen wir es nicht,  
sondern weil wir es nicht wagen, ist es schwierig.*

LUCIUS ANNAEUS SENECA



## 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 Potenziale 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 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, dem Leiter des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Mein Dank gilt auch meinem Zweitprüfer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Vollertsen sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wall für die Übernahme des Vorsitzes.

Ein besonderer Dank gilt meinem Bruder sowie meinen beiden Arbeitskollegen Martin Haubold und Markus Krutzlinger, die mit ihren kritischen und hilfreichen Anmerkungen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen meinen Kolleginnen und Kollegen für die zahlreichen fachlichen Diskussionen zu meinem Thema. Außerdem danke ich allen Studierenden, insbesondere Alexander Huissel, Dominik Meier und Johannes Tenhumberg, die mich im Rahmen ihrer Studienarbeiten oder ihrer Tätigkeiten als studentische Hilfskraft bei der Ausarbeitung und Umsetzung der Methode unterstützt haben. Zudem danke ich meinem Bürokollegen Marco Ulrich für die zahlreichen Gespräche über ebenso wichtige Themen abseits des Arbeitslebens.

Mein ganz besonderer Dank gilt jedoch meinen Eltern und meiner Frau, die durch ihre Geduld und ihre liebevolle Unterstützung zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben. Zuletzt möchte ich mich bei meiner kleinen Tochter Elisabeth bedanken. Ohne sie hätte ich die Arbeit nur halb so schnell verfasst.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Verzeichnis der Zeichen, Kennzahlen und Konstanten</b>	<b>VII</b>
Lateinische Formelzeichen . . . . .	VII
Griechische Formelzeichen . . . . .	XII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation . . . . .	1
1.2 Motivation und Zielsetzung . . . . .	3
1.3 Betrachtungsrahmen und Schwerpunktsetzung . . . . .	5
<b>2 Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Allgemeines . . . . .	7
2.2 Bauteilreaktionen . . . . .	7
2.2.1 Überblick . . . . .	7
2.2.2 Entstehung von Bauteilverzügen beim Schweißen . . . . .	8
2.2.3 Formen des Bauteilverzugs . . . . .	10
2.3 Schweißsimulation . . . . .	12
2.3.1 Überblick . . . . .	12
2.3.2 Thermomechanische Grundgleichungen . . . . .	15
2.3.3 Wärmequellenmodelle . . . . .	18
2.4 Bildverarbeitung . . . . .	20
2.4.1 Überblick . . . . .	20
2.4.2 Kantenerkennung . . . . .	21
2.4.3 Segmentierung und morphologische Operationen . . . . .	21
2.5 Optimierung . . . . .	23
2.5.1 Überblick . . . . .	23
2.5.2 Lokale Optimierungsverfahren – gradientenbasierte Optimierungsalgorithmen . . . . .	23

2.5.3	Direkte Suchverfahren – Pattern-Search-Algorithmen . . .	25
2.5.4	Globale Optimierungsverfahren – genetische Algorithmen	27
2.6	Metamodellierung . . . . .	29
2.6.1	Überblick . . . . .	29
2.6.2	Regression . . . . .	29
2.6.3	Künstliche Neuronale Netze . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>35</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	35
3.2	Ansätze zur Wärmequellenkalibrierung . . . . .	36
3.2.1	Überblick . . . . .	36
3.2.2	Numerische Ansätze . . . . .	36
3.2.3	Analytische Ansätze . . . . .	37
3.3	Ansätze zur zeitoptimierten Verzugsimulation . . . . .	40
3.3.1	Überblick . . . . .	40
3.3.2	Strategien zur Vernetzung . . . . .	42
3.3.3	Näherungsmethoden mit vereinfachten Randbedingungen	42
3.4	Ansätze zur Verzugskompensation und -minimierung . . . . .	45
3.4.1	Überblick . . . . .	45
3.4.2	Experimentelle Ansätze . . . . .	46
3.4.3	Rechnergestützte Ansätze . . . . .	48
3.5	Fazit und Handlungsbedarf . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>Methode zur automatisierten Wärmequellenkalibrierung</b>	<b>57</b>
5.1	Allgemeines . . . . .	57
5.2	Vorstellung der Methode . . . . .	59
5.2.1	Datenvorbereitung . . . . .	59
5.2.2	Wärmequellenmodell . . . . .	64
5.2.3	Automatisierung der Wärmequellenkalibrierung . . . . .	68
5.3	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	73
5.3.1	Kalibrierung mit dem genetischen Algorithmus . . . . .	73
5.3.2	Kombination mit weiteren Optimierungsansätzen . . . . .	77
5.4	Zusammenfassung der Methode . . . . .	81

<b>6</b>	<b>Methode zur Bestimmung verzugsoptimierter Fertigungsparameter</b>	<b>83</b>
6.1	Allgemeines . . . . .	83
6.2	Vorstellung der Methode . . . . .	84
6.3	Datenverwaltung . . . . .	87
6.4	Metamodellierung mit Neuronalen Netzen . . . . .	96
6.5	Zusammenfassung der Methode . . . . .	97
<b>7</b>	<b>Anwendungsbeispiel</b>	<b>99</b>
7.1	Allgemeines . . . . .	99
7.2	Verfahrensgrundlagen . . . . .	100
7.3	Minimierung des Bauteilverzugs an einem Teilgebiet . . . . .	101
7.3.1	Vorhersage des Bauteilverzugs mit Neuronalen Netzen . . . . .	103
7.3.2	Verzugsminimierung mithilfe eines genetischen Algorithmus . . . . .	109
7.3.3	Gegenüberstellung beider Verfahrensweisen . . . . .	115
7.4	Minimierung des Bauteilverzugs am Gesamtmodell . . . . .	116
7.5	Experimentelle Validierung . . . . .	126
7.5.1	Überblick . . . . .	126
7.5.2	Bauteilverzüge an der Beispielgeometrie . . . . .	126
7.5.3	Bauteilverzüge am Gesamttrahmen . . . . .	127
7.6	Abschließende Bemerkungen . . . . .	133
<b>8</b>	<b>Technische und wirtschaftliche Bewertung</b>	<b>137</b>
8.1	Allgemeines . . . . .	137
8.2	Technische Bewertung . . . . .	137
8.3	Wirtschaftliche Bewertung . . . . .	140
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>143</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	143
9.2	Ausblick . . . . .	144
	<b>Literatur</b>	<b>149</b>
	<b>Anhang</b>	<b>XIII</b>
<b>A</b>	<b>Betreute Studienarbeiten</b>	<b>XV</b>
<b>B</b>	<b>Verwendete Software</b>	<b>XVII</b>

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>C</b>	<b>Prozessfenster für das Schweißen von Kehl- und Stumpfnähten</b>	<b>XIX</b>
C.1	Kehlnähte . . . . .	XIX
C.2	Stumpfnähte . . . . .	XX
<b>D</b>	<b>BHLS – Kenngrößen und Leistungsmessungen</b>	<b>XXI</b>
D.1	Kenngrößen . . . . .	XXI
D.2	Leistungsmessungen . . . . .	XXI
<b>E</b>	<b>Übersicht der kalibrierten Wärmequellen</b>	<b>XXIII</b>
E.1	Kehlnähte . . . . .	XXIII
E.2	Stumpfnähte . . . . .	XXVIII
<b>F</b>	<b>Visualisierung des verwendeten Neuronalen Netzes</b>	<b>XXXIII</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V.
BHLS	Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CAD	rechnergestütztes Konstruieren, engl.: Computer-aided design
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
FEM	Finite-Elemente-Methode
fps	Bilder pro Sekunde, engl.: frames per second
FSW	Rührreibschweißen, engl.: Friction Stir Welding
GA	Genetischer Algorithmus
GCM	Gray-Correlation-Modell
KNN	Künstliches Neuronales Netz
LGA	Local-Global-Ansatz
lrz	Leibniz-Rechenzentrum
MBM	Macro-Bead-Methode
MS	Microsoft
OP	Optimierungsansatz
PS	Pattern-Search-Algorithmus
SFB/TR10	Sonderforschungsbereich Transregio 10
SQP	Sequentielle Quadratische Programmierung, engl.: Sequential-Quadratic-Programming
TCO	Abrechnungsverfahren, engl.: Total Cost of Ownership
WIG	Wolfram-Inertgasschweißen
WQP	Wärmequellenparameter
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild



## Verzeichnis der Zeichen, Kennzahlen und Konstanten

### Lateinische Formelzeichen

Größe	Einheit	Bedeutung
$a$	mm	geometrischer Parameter für die Breite einer Wärmequelle
$a_1$	mm	geometrischer Parameter für die Breite der ersten Wärmequelle
$a_2$	mm	geometrischer Parameter für die Breite der zweiten Wärmequelle
$A$	–	Absorptionsgrad eines Werkstoffs
$a_{17,L}$	mm	Auswertepunkte für den absoluten Bauteilverzug am Gesamtrahmen (linke Seite)
$a_{17,R}$	mm	Auswertepunkte für den absoluten Bauteilverzug am Gesamtrahmen (rechte Seite)
$a_q$	mm	Schweißnahtbreite
$A_{Test}$	%	Testdatenabweichung
$b$	mm	geometrischer Parameter für die Tiefe einer Wärmequelle
$b_1$	mm	geometrischer Parameter für die Tiefe der ersten Wärmequelle
$b_2$	mm	geometrischer Parameter für die Tiefe der zweiten Wärmequelle
$B_{UQ}$	kW	obere Schranke für den Wärmestrom
$B_{LQ}$	kW	untere Schranke für den Wärmestrom
$B_i$	variabel	Basispunkt im Pattern-Search-Algorithmus
$b_q$	mm	Einschweißtiefe
$b_{w,1}$	–	gewichteter Schwellwert der Eingangsdaten des des Neuronalen Netzes

## Lateinische Formelzeichen

Größe	Einheit	Bedeutung
$b_{w,2}$	–	gewichteter Schwellwert der verdeckten Schicht des Neuronalen Netzes
$c$	m	geometrische Länge einer Wärmequelle
$c_p$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	spezifische Wärmekapazität
$C_{R,k}$	–	kleinste notwendige Anzahl an Simulationen pro Berechnungsstufe
$c_{fn}$	mm	geometrischer Parameter für den vorderen Teil einer Wärmequelle
$c_{f1}$	mm	geometrischer Parameter für den vorderen Teil der ersten Wärmequelle
$c_{f2}$	mm	geometrischer Parameter für den vorderen Teil der zweiten Wärmequelle
$c_{rn}$	mm	geometrischer Parameter für den hinteren Teil einer Wärmequelle
$c_{r1}$	mm	geometrischer Parameter für den hinteren Teil der ersten Wärmequelle
$c_{r2}$	mm	geometrischer Parameter für den hinteren Teil der zweiten Wärmequelle
$d_n^{Kont}$	–	Daten aus einer Punktwolke eines Querschliffs
$d_n^{Sim}$	–	Daten aus einer Punktwolke eines Simulationsergebnisses
$d_f$	$\mu m$	Fokusedurchmesser
$d$	mm	Abstand zwischen zwei Wärmequellen
$\bar{E}$	variabel	Restfehler
$e_{el}$	mm	Elementkantenlänge
$E_{ges}$	$\frac{J}{mm}$	Streckenenergie
$e_x, e_y, e_z$	–	Einheitsvektoren im kartesischen Koordinatensystem
$E$	$\frac{N}{mm^2}$	E-Modul
$E_k$	%	Erwartungswert für den Berechnungsaufwand
$\bar{f}(S)$	variabel	Aktivierungsfunktion
$f_S$	–	Faktor der doppelt elliptischen Wärmequelle
$\nabla F$	variabel	Gradientenvektor einer Vektorfunktion