



HERBERT UTZ VERLAG WISSENSCHAFT

FORSCHUNGSBERICHTE

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

*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

Abkürzungsverzeichnis	V
Verzeichnis der Zeichen, Kennzahlen und Konstanten	VII
Lateinische Formelzeichen	VII
Griechische Formelzeichen	XII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Motivation und Zielsetzung	3
1.3 Betrachtungsrahmen und Schwerpunktsetzung	5
2 Grundlagen	7
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
3	Stand der Forschung	35
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
4	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	53
5	Methode zur automatisierten Wärmequellenkalibrierung	57
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

6	Methode zur Bestimmung verzugsoptimierter Fertigungsparameter	83
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
7	Anwendungsbeispiel	99
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
8	Technische und wirtschaftliche Bewertung	137
8.1	Allgemeines	137
8.2	Technische Bewertung	137
8.3	Wirtschaftliche Bewertung	140
9	Zusammenfassung und Ausblick	143
9.1	Zusammenfassung	143
9.2	Ausblick	144
	Literatur	149
	Anhang	XIII
	A Betreute Studienarbeiten	XV
	B Verwendete Software	XVII

Inhaltsverzeichnis

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

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	μm	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
∇F	variabel	Gradientenvektor einer Vektorfunktion