



HERBERT UTZ VERLAG WISSENSCHAFT

**FORSCHUNGSBERICHTE**

**310**

**Markus Schweier**

**Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen  
mit Strahloszillation**

Markus Schweier

**Simulative und experimentelle Untersuchungen zum  
Laserschweißen mit Strahloszillation**

Herbert Utz Verlag · München 2015

Forschungsberichte IWB  
Band 310

Ebook (PDF)-Ausgabe:  
ISBN 978-3-8316-7214-1 Version: 1 vom 06.04.2016  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Softcover  
ISBN 978-3-8316-4536-7  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

## **Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation**

**Markus Schweier**

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. Hans-Jakob Kaltenbach

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier,  
Technische Universität Berlin

Die Dissertation wurde am 20.05.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 10.07.2015 angenommen.

Markus Schweier

**Simulative und experimentelle Untersuchungen  
zum Laserschweißen mit Strahloszillation**



Herbert Utz Verlag · München

## Forschungsberichte IWB

Band 310

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2015

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 · 2016

ISBN 978-3-8316-4536-7

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

Ich möchte mich an erster Stelle bei Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, dem Ordinarius des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, für die Möglichkeit der Promotion ganz herzlich bedanken. Er versteht es in ausgezeichneter Art und Weise, nicht nur das wissenschaftliche Arbeiten zu lehren, sondern insbesondere die dazu erforderliche Eigenständigkeit zu fördern, woran ich im Laufe von beinahe fünf Jahren wachsen konnte. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier für die Übernahme des Koreferates und Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Jakob Kaltenbach für den Prüfungsvorsitz.

Ein weiteres Dankeschön möchte ich an die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des *iwb* richten, von denen jede und jeder Einzelne einen wertvollen Beitrag zu einem hervorragenden Arbeitsklima leistet. Dieses Arbeitsklima hat mich dazu motiviert, den nicht immer leichten Weg zur Promotion bis zum Ende zu gehen. Ausdrücklicher Dank geht an die Kollegen in der Themengruppe Füge- und Trenntechnik, deren konstruktives Feedback die Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit wesentlich beeinflusste. Besonders möchte ich in diesem Zuge Dr.-Ing. Stefan Braunreuther, Dipl.-Ing. Martin Haubold und Dr.-Ing. Philipp Schmidt hervorheben, deren kritische Anmerkungen mir eine große Hilfe waren.

Zuletzt möchte ich mich in aller Form bei denen bedanken, die zwar keinen inhaltlichen Beitrag zu dieser Dissertation leisteten, ohne deren Unterstützung diese Arbeit jedoch niemals zu Stande gekommen wäre: meinen Eltern Marianne und Karlheinz, meinem Bruder Simon und im Besonderen meiner Ehefrau Annika. Euer Rückhalt hat mich zu dieser Arbeit befähigt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen .....</b>	<b>V</b>
Abkürzungen .....	V
Skalare, Funktionen und Ränder .....	VIII
Matrizen und Vektoren .....	XVI
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Laserstrahlschweißen in der industriellen Fertigung .....	1
1.2 Ausgangssituation und Problembeschreibung .....	3
1.3 Zielsetzung .....	5
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>7</b>
2.1 Allgemeines .....	7
2.2 Lasertechnik .....	7
2.2.1 Überblick.....	7
2.2.2 Transversale elektromagnetische Moden.....	8
2.2.3 Strahlqualität und Fokussierbarkeit .....	9
2.2.4 Leistungsdichte und POYNTING-Vektor.....	12
2.3 Prozessregime beim Laserstrahlschweißen.....	14
2.4 Ausgewählte Methoden der statistischen Versuchsplanung .....	19
2.4.1 Überblick.....	19
2.4.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	19
2.4.3 Methoden der Versuchsplanerstellung.....	23
2.4.4 Statistische Aus- und Bewertung von Versuchsergebnissen .....	28
2.5 Optimierungsverfahren .....	34
2.6 Multi-Hypothesis-Tracking.....	39
2.6.1 Überblick.....	39
2.6.2 Zustandsraum-Schätzung mit der KALMAN-Methode.....	39
2.6.3 Lösung eines linearen Zuordnungsproblems .....	42
<b>3 Stand der Technik und Wissenschaft .....</b>	<b>45</b>
3.1 Allgemeines .....	45
3.2 Schweißen mit überlagerter Strahloszillation .....	45
3.2.1 Überblick.....	45
3.2.2 Oszillationsformen und ihre mathematische Beschreibung .....	46

## Inhaltsverzeichnis

---

3.2.3	Systemtechnik .....	50
3.2.4	Werkstofftechnik .....	55
3.2.5	Prozesstechnik .....	61
3.3	Simulation des Laserstrahlschweißens .....	65
3.3.1	Temperaturfeldberechnung .....	69
3.3.2	Dampfkapillarberechnung .....	75
3.3.3	Hybride Modellierung .....	87
3.4	Spritzerbildung beim Laserstrahlschweißen .....	89
3.5	Fazit und Handlungsbedarf .....	93
<b>4</b>	<b>Vorgehensweise und Aufbau dieser Arbeit .....</b>	<b>95</b>
<b>5</b>	<b>Versuchseinrichtung, Werkstoff und Software.....</b>	<b>99</b>
5.1	Überblick .....	99
5.2	Versuchseinrichtungen .....	99
5.3	Werkstoff X5CrNi18-10.....	101
5.4	Software.....	105
<b>6</b>	<b>Bestimmung der Oszillationsfähigkeit von Scannersystemen .....</b>	<b>107</b>
6.1	Einführung in die Problemstellung.....	107
6.2	Methodische Vorgehensweise .....	108
6.3	Oszillationsfähigkeit der verwendeten Scanneroptik .....	111
6.3.1	Überblick .....	111
6.3.2	Faktorreduktion .....	111
6.3.3	Modellbildung .....	115
6.3.4	Modellsynthese.....	120
6.4	Fazit .....	121
<b>7</b>	<b>Temperaturfeldsimulation .....</b>	<b>123</b>
7.1	Überblick .....	123
7.2	Simulation mit der Methode der GREEN'schen Funktionen .....	124
7.2.1	Allgemeines.....	124
7.2.2	Modellierungskonzept, Simulationsablauf und programmtechnische Umsetzung .....	124
7.2.3	Koordinatentransformation .....	132
7.2.4	Automatisierte Wärmequellenkalibrierung .....	133
7.3	Simulation mit der Finite-Elemente-Methode.....	138
7.3.1	Allgemeines.....	138

---

7.3.2	Modellierungskonzept und programmtechnische Umsetzung	138
7.3.3	Netzgenerierung	140
7.3.4	Randbedingungen	142
7.3.5	Lösung des Wärmeleitungsproblems	143
7.3.6	Temperaturrückkopplung	144
7.4	Modellvergleich und experimentelle Validierung	148
7.4.1	Überblick	148
7.4.2	Berücksichtigte Effekte und Modellvereinfachungen	149
7.4.3	Prozessverhalten und Schweißnahtgeometrie	152
7.4.4	Rechenzeit	165
7.5	Fazit	168
<b>8</b>	<b>Analyse der Spritzerbildung</b>	<b>171</b>
8.1	Überblick	171
8.2	Versuchsaufbau und -planung	171
8.3	Spritzeranalyse mittels Objektverfolgung	173
8.3.1	Allgemeines	173
8.3.2	Algorithmus zur Spritzerverfolgung	173
8.3.3	Kostenberechnung bei der Filtererstellung	179
8.3.4	Restriktionen	184
8.4	Modellbildung	185
8.5	Diskussion des Prozessverhaltens	188
8.5.1	Überblick	188
8.5.2	Einfluss der Prozessparameter	189
8.5.3	Entstehungsmechanismen	192
8.6	Fazit	197
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>199</b>
9.1	Zusammenfassung	199
9.2	Ausblick	202
9.3	Anwendungsbezogene Bewertung	208
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>215</b>
<b>11</b>	<b>Verzeichnis betreuter Studienarbeiten</b>	<b>237</b>
<b>12</b>	<b>Anhang</b>	<b>239</b>
12.1	Temperaturen im Umfeld einer DIRICHLET'schen Randbedingung	239

## Inhaltsverzeichnis

---

12.2	Versuchsplan .....	241
12.3	Dampfkapillargeometrie.....	242
12.4	Genannte Firmen und Verbände.....	243

# Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
2D	zweidimensional
abs.	absolut
ANOVA	Varianzanalyse, engl.: analysis of variances
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bzw.	beziehungsweise
CCD	zentral zusammengesetzter Plan, engl.: central composite design
CGM	Methode der konjugierten Gradienten, engl.: conjugate gradient method
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
const.	konstant
CPU	Prozessor, engl. central processing unit
DB	Datenbank
DGL	Differenzialgleichung
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DOE	statistische Versuchsplanung, engl.: design of experiments
DVS e. V.	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. eingetragener Verein
EBW	Elektronenstrahlschweißen, engl.: electron beam welding
EDX	energiedispersive Röntgenspektroskopie, engl.: energy dispersive x-ray spectroscopy
EN	europäische Norm
engl.	englisch
et al.	und andere, lat.: et alii
etc.	und die übrigen Dinge, lat.: et cetera
f.	folgende (Singular)
Fa.	Firma
FEM	Finite-Elemente-Methode
ff.	folgende (Plural)
FVM	Finite-Volumen-Methode
GPU	Grafikkarte, engl.: graphics processing unit

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

$H_0$	Nullhypothese
ISO	Internationale Organisation für Normung, engl.: International Organization for Standardization
KOS	Koordinatensystem
$KOS_{wQ}$	lokales Koordinatensystem der Wärmequelle
LASER	Lichtverstärkung durch stimulierte Emission, engl.: light amplification by stimulated emission of radiation
lat.	lateinisch
lin.	linear
LLK	Lichtleitkabel
LSF	LISSAJOUS-Figur
MGF	Methode der GREEN'schen Funktionen
Mio.	Millionen
ML	Maximum-Likelihood
Mrd.	Milliarden
NIR	Nah-Infrarot
num.	numerisch
OFK	Oszillationsfähigkeitskarte
PARDISO	direkter paralleler Löser für dünn besetzte Probleme, engl.: parallel sparse direct solver
Pos.	Position
rel.	relativ
RLW	Remote-Laserstrahlschweißen, engl.: remote laser welding
RM	reduziertes Modell
S.	Seite
SiC	Siliziumkarbid, engl. silicon carbide
SLV	Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt
sonst.	sonstige
SVP	statistische Versuchsplanung
$TEM_{gh}$	transversale elektromagnetische Mode der Ordnungen $g$ und $h$
TS	Tiefschweißen
US	Vereinigte Staaten, engl.: United States
v.	von
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
vgl.	vergleiche

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

---

VHP	Vorheizpunkt
VHS	Vorheizstreifen
WLS	Wärmeleitungsschweißen
WQ	Wärmequelle
WS	Wärmesenke
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
z. B.	zum Beispiel

---

## Skalare, Funktionen und Ränder

Größe	Einheit	Erläuterung
$a$	pixel	Fläche einer segmentierten Region
$A$	mm	Amplitude der Oszillation
$A_{\parallel}$	-	Absorptionsgrad nach FRESNEL für parallel polarisierte Strahlung
$A_{\perp}$	-	Absorptionsgrad nach FRESNEL für senkrecht polarisierte Strahlung
$A_{Ein}$	mm	Einstell-Amplitude
$a_h$	m	laterale Halbachse in $y$ -Richtung der doppelt elliptischen Wärmequelle
$A_{Ist}$	mm	resultierende Ist-Amplitude
$A_{Kap}$	mm <sup>2</sup>	Dampfkapillar-Oberfläche
$A_s$	-	dimensionslose Scheitelpunktkoordinaten
$A_{Soll}$	mm	Soll-Amplitude im Markierungsversuch
$A_x$	mm	Oszillationsamplitude in $x$ -Richtung
$A_y$	mm	Oszillationsamplitude in $y$ -Richtung
$A_z$	-	Absorptionsgrad nach FRESNEL für zirkular polarisierte Strahlung
$b$	variiert	Faktor bei der Definition einer Versuchsraumeinschränkung
$b_1, b_2$	-	Konstanten im Dampfkapillarmodell
$b_{an}$	mm	Anbindungsbreite eines verschweißten Überlapstoßes
$b_{an,Ist}$	mm	simulierte Anbindungsbreite eines verschweißten Überlapstoßes
$b_{an,Soll}$	mm	geforderte Anbindungsbreite eines verschweißten Überlapstoßes
$b_{Exp}$	mm	experimentell bestimmte Raupenbreite
$b_h$	m	untere Halbachse in $z$ -Richtung der doppelt elliptischen Wärmequelle
$B_N$	m	Breite des Netzes
$b_s$	m	Breite des Um-Rechtecks einer segmentierten Region
$\bar{b}_s$	m	mittlere Breite der Um-Rechtecke aller Regionen einer Spritzertrajektorie
$b_{Sim}$	mm	simulativ bestimmte Raupenbreite

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

$c_{hb}$	m	hintere Halbachse in $x$ -Richtung der doppelt elliptischen Wärmequelle
$c_{hf}$	m	vordere Halbachse in $x$ -Richtung der doppelt elliptischen Wärmequelle
$c_{Licht}$	m/s	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in Vakuum
$c_p$	J/kg	spezifische Wärmekapazität
$c_{p,korr}$	J/(kgK)	Korrigierte spezifische Wärmekapazität
$D$	m	Rohstrahldurchmesser
$DOF_1$	-	Anzahl der Freiheitsgrade eines Faktors
$DOF_2$	-	Anzahl der Freiheitsgrade des Fehlers
$d_w$	m	Abstand zweier paralleler adiabater Grenzflächen
$e$	-	EULER'sche Zahl
$E$	J/m <sup>2</sup>	Energiedichte, Energiedeposition
$E_f, E_b$	-	Hilfsgrößen zur Beschreibung der doppelt elliptischen Wärmequelle
$f$	Hz	Oszillationsfrequenz
$F$	-	F-Statistik
$F_{DOF_1, DOF_2}$	-	F-Statistik bei den gegebenen Freiheitsgraden $DOF_1$ und $DOF_2$ sowie der zulässigen Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha_{irr}$
$f_f$	m	Fokussierbrennweite einer Linse
$f_{Grenz}$	Hz	Grenzfrequenz
$f_{max}$	Hz	maximal mögliche Oszillationsfrequenz
$f_{min}$	Hz	minimale Oszillationsfrequenz
$f_x$	Hz	Oszillationsfrequenz der Schwingung in $x$ -Richtung
$f_y$	Hz	Oszillationsfrequenz der Schwingung in $y$ -Richtung
$G$	-	GREEN'sche Funktion
$g$	-	tangentiale Modenordnung einer TEM
$h$	-	radiale Modenordnung einer TEM
$H_M$	J/kg	Schmelzenthalpie
$h_M$	-	dimensionslose Schmelzenthalpie
$H_N$	m	Höhe des Netzes
$i, j, k, l, m$	-	Zählvariablen
$I$	W/m <sup>2</sup>	Leistungsdichte (Intensität) der Laserstrahlung
$I_0$	W/m <sup>2</sup>	Maximale Leistungsdichte eines Laserstrahls der $TEM_{00}$ im Zentrum
$K_a$	-	Flächenkosten

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

$K_D$	-	Distanzkosten
$K_P$	-	Positionskosten
$K_\phi$	-	Winkelkosten
$KQ$	variiert	Kleinste-Quadrate-Funktion
$l_e$	m	Elementkantenlänge
$l_{Mess}$	mm	Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Oszillationsperioden in Schweiß-Vorschubrichtung
$L_N$	m	Länge des Netzes
$l_s$	m	Länge des Um-Rechtecks einer segmentierten Region
$l_{Traj}$	mm	Länge der Oszillationstrajektorie beim Markierungsversuch
$l_0$	mm	Länge der Anbindungslücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Perioden
$m$	-	Ordnung eines Versuchsplans / Beschreibungsmodells
$M^2$	-	Beugungsmaßzahl
$N$	-	Anzahl der Punkte im Gitter der Temperaturfeld-Berechnung
$N_B$	-	Anzahl der Bilder in einer Serie
$n$	-	positive Ganzzahl oder null
$n^*$	-	Anzahl der Zielgrößen
$n_b$	-	Anzahl der beobachteten Objekte
$n_B$	-	Ordnung einer BESSEL-Funktion
$n_{Dis}$	-	Anzahl der Stützstellen auf der Oszillationstrajektorie
$n_f$	-	Anzahl der Faktoren
$n_m$	-	Anzahl der Modellterme
$n_{m,max}$	-	Anzahl der maximal möglichen Modellterme
$n_{Osz}$	-	Anzahl der Stützstellen pro Oszillationsperiode
$n_p$	-	Anzahl der verstrichenen Halbperioden einer Oszillation
$n_{Per}$	-	Anzahl der Oszillationsperioden
$n_s$	-	Anzahl der prädierten Objekte
$n_{Sp}$	mm <sup>-1</sup>	spezifische Anzahl der Schweißspritzer (bezogen auf die Schweißnahtlänge)
$n_{Sp,max}$	mm <sup>-1</sup>	maximale spezifische Anzahl der Schweißspritzer im Gültigkeitsbereich des Modells für die Spritzerbildung
$n_{Sp}^*$	mm <sup>-1</sup>	spezifische Anzahl der Schweißspritzer im (BOX-COX-) transformierten Ergebnisraum

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

$n_{VHS}$	-	Anzahl der im Vorheizstreifen simulierten 1D-Wärmeleitungsprobleme
$n_v$	-	Anzahl der Versuche
$n_x$	-	Anzahl der beobachteten Systemzustände
$n_z$	-	Anzahl der Messwerte
$n_\xi$	-	Anzahl der Systemparameter
$n_v$	-	Anzahl der Zielgrößenwerte
$P$	W	Laserleistung
$p$	%	Irrtumswahrscheinlichkeit
$Pe$	-	Péclet-Zahl, dimensionslose Vorschubgeschwindigkeit
$P_{Ein}$	W	eingekoppelte Laserleistung
$p_{WQ}$	m	Ursprungskoordinate einer Wärmequelle
$q$	-	Iterationsnummer
$q_0$	W	Maximalleistung einer doppelt elliptischen Wärmequelle im Zentrum
$q_a$	Wm <sup>-2</sup>	absorbierte Wärmestromdichte
$q_{a0}$	-	dimensionslose Wärmestromdichte am Scheitelpunkt
$q_{a0}^{stat}$	-	dimensionslose Wärmestromdichte am Scheitelpunkt im stationären Fall
$q_{a1}$	-	dimensionsloser Wärmestrom
$q_{a2}$	-	zweite Ableitung der dimensionslosen Wärmestromdichte um den Kreismittelpunkt
$q_{a2}^{stat}$	-	Krümmung der dimensionslosen Wärmestromdichte um den Kreismittelpunkt im stationären Fall
$q_{ap}$	Wm <sup>-2</sup>	absorbierte Wärmestromdichte am Stabende bei der Berechnung des Vorheizpunktes
$q_{deWQ}$	Wm <sup>-3</sup>	Wärmestromdichte einer doppelt elliptischen Wärmequelle
$q_{th}$	Wm <sup>-3</sup>	Wärmestromdichte
$r_0$	m	Radius des Kapillarkreises auf der Oberfläche des Kontinuums
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
$R_a$		Mittenrauwert
$R_{adj}^2$	-	adjustiertes Bestimmtheitsmaß
$s$	var.	Standardabweichung einer Stichprobe
$SPP$	m·rad	Strahlparameterprodukt
$SPP_{00}$	m·rad	Strahlparameterprodukt für Laserstrahlung der $TEM_{00}$

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

$t$	s	Zeit (kontextabhängig)
$t$	-	Zeitschrittnummer (kontextabhängig)
$t_{Exp}$	mm	experimentell bestimmte Einschweißtiefe
$t_{Kap}$	mm	simulierte Kapillartiefe
$t_{Sim}$	mm	simulierte Einschweißtiefe
$t_{Sch}$	s	Schweißzeit
$T$	K	Temperatur
$T_{\infty}$	K	Temperatur in unendlichem Abstand zur Strahl-Stoff-Wechselwirkungszone, Umgebungstemperatur
$t_a$	s	Aktivierungszeit
$T_M$	K	Schmelztemperatur
$T_{Mess}$	K	gemessene Temperatur
$T_{MGF}$	K	mit Hilfe der MGF berechnetes Temperaturfeld
$T_{RM}$	K	mit Hilfe des reduzierten Modells nach SCHULZ und der Zylinderquellenlösung berechnetes Temperaturfeld
$T_{Sim}$	K	simulierte Temperatur
$T_{Stab}$	K	Temperatur am Stabende bei der Berechnung des Vorheizpunktes
$T_V$	K	Verdampfungstemperatur
$t_{VHP}$	s	Zeitpunkt, zu welchem im Vorheizstreifen erstmals $T_V$ überschritten wird
$T_{WQ}$	K	Temperaturbeitrag einer Wärmequelle
$T_{WS}$	K	Temperaturbeitrag einer Wärmesenke
$\ddot{U}$	-	Überlappungsgrad einer Oszillationstrajektorie
$ v $	m/min	Betrag der Bahngeschwindigkeit
$v_b$	m/s	lokale Abtragsgeschwindigkeit
$v_s$	m/s	Schweiß-Vorschubgeschwindigkeit
$v_{Sp}$	m/s	Geschwindigkeit eines Schweißspritzers
$\bar{v}_{Sp}$	m/s	mittlere Geschwindigkeit eines Schweißspritzers
$v_x$	m/s	Geschwindigkeitskomponente in $x$ -Richtung
$v_y$	m/s	Geschwindigkeitskomponente in $y$ -Richtung
$w_j$	-	Gewichtung des Zielgrößenvektors $j$
$x, y, z$	m	Koordinatenpunkte
$\acute{x}, \acute{y}, \acute{z}$	m	Koordinatenpunkte im Kontinuum
$x_i$	variiert	Faktor bzw. Kovariable $i$

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

$x_{i,c}$	-	kodierter Faktor $x_i$
$x_{i,o}$	variiert	obere Versuchsraumgrenze des Faktors $x_i$
$x_{i,u}$	variiert	untere Versuchsraumgrenze des Faktors $x_i$
$x_{kar}$	m	kartesische $x$ -Koordinate bei Temperaturfeldberechnung mit der Zylinderquellenlösung
$x_M$	mm	$x$ -Komponente des Mittelpunktes der Oszillationstrajektorie beim Markierungsversuch
$x_p, y_p$	m	prädiizierte Spritzerkoordinaten im Folgebild
$x_{Stab}$	m	Position des Stabes bei der Berechnung des Vorheizpunktes
$x_s, y_s$	m	Schwerpunktkoordinaten eines Spritzer
$x_{VHP}$	m	Abstand zwischen Laserstrahlachse und Vorheizpunkt
$x_{VHS}, y_{VHS}$	m	Koordinaten im Vorheizstreifens
$x_{WQ}, y_{WQ}$	m	Koordinaten im lokalen Koordinatensystem einer Wärmemquelle
$\bar{y}$	var.	Mittelwert der Zielgröße
$y_j$	variiert	gemessene Zielgröße $j$
$y_{kar}$	m	kartesische $y$ -Koordinate bei Temperaturfeldberechnung mit der Zylinderquellenlösung
$y_M$	mm	$y$ -Komponente des Mittelpunktes der Oszillationstrajektorie beim Markierungsversuch
$y_{sj}$	variiert	Schätzwert der Zielgröße $j$
$z_0$	m	$z$ -Koordinate der Bauteiloberfläche
$z_{an}$	mm	$z$ -Koordinate der Stoßfläche eines Überlappstoßes
$z_n$	m	$z$ -Koordinate der $n$ -ten Schicht
$z_R$	m	RAYLEIGH-Länge
$z_{Sen}$	m	$z$ -Koordinate entlang des Sensorstreifens
$\alpha$	-	dimensionsloser Kapillarradius
$\alpha_{irr}$	%	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\alpha_{zul}$	%	zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit
$\hat{\beta}_i$	var.	Regressionskoeffizienten von Dämpfungs- und Grenzfrequenzmodell
$\beta_i$	variiert	$i$ -ter Koeffizient einer Regressionsfunktion
$\gamma$	°	Winkel zwischen POYNTING-Vektor $\mathbf{S}$ und Oberflächennormale $\mathbf{e}_n$
$\gamma^q$	-	Konjugationskoeffizient des Iterationsschrittes $q$
$\Gamma_{BS}$	-	Unterer Rand des Kontinuums

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

$\Gamma_M$	-	Rand des Schmelzbades
$\Gamma_{TL}$	-	Oberer, flüssiger Rand des Kontinuums
$\Gamma_{TS}$	-	Oberer, fester Rand des Kontinuums
$\Gamma_V$	-	Rand der Dampfkapillare
$\delta_{ij}$	-	KRONECKER-Delta
$\delta_{Stab}$	m	Temperatureindringtiefe bei der Berechnung des Vorheizpunktes
$\delta_{WQ}$	m	Abstand einer WQ zur adiabaten Grenzfläche
$\delta_x$	-	dimensionslose Temperatureindringtiefe
$\delta_x^{stat}$	-	dimensionslose Temperatureindringtiefe im stationären Fall
$\Delta b_{Exp-sim}$	%	relative Abweichung zwischen experimentell und simulativ bestimmter Raupenbreite
$\Delta t$	s	Zeitschrittweite
$\Delta t_{Exp-sim}$	%	relative Abweichung zwischen experimentell und simulativ bestimmter Einschweißtiefe
$\Delta x_N$ $\Delta y_N$ $\Delta z_N$	m	Punktabstände in $x$ -, $y$ - und $z$ -Richtung
$\Delta x_{WQ}$ $\Delta y_{WQ}$	m	Verschiebungskomponenten des Mittelpunktes der WQ in Bezug zum Koordinatensystem des Kontinuums
$\Delta z$	m	Fokuslage
$\Delta\varphi$	rad	Phasenverschiebung der Schwingungen in $x$ - und $y$ -Richtung
$\varepsilon^q$	-	Summe der Fehlerquadrate im Iterationsschritt $q$
$\varepsilon_0 \cdot \omega$	A	Verschiebungsstrom
$\varepsilon_{el}$	-	dielektrische Leitfähigkeit
$\varepsilon_i$	variiert	Residuum zwischen $i$ -tem Modell- und Messwert
$\varepsilon_{Stop}$	variiert	Grenzwert der Fehlerquadratsumme
$\theta$	-	dimensionslose Temperatur
$\theta_0$	°	Fernfeld-Divergenzwinkel
$\theta_{MGF}$	-	mit der MGF berechnete, dimensionslose Temperatur
$\theta_{RM}$	K	mit dem reduzierten Modell berechnete, dimensionslose Temperatur
$\kappa$	$m^2s^{-1}$	Temperaturleitfähigkeit
$\lambda$	m	Wellenlänge der Laserstrahlung
$\lambda_{BC}$	-	Parameter der BOX-COX-Transformation
$\lambda_{th}$	$W(mK)^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

$\mu$	-	Kosinus des Einfallswinkels eines Laserstrahls
$\xi_i$	variiert	Systemparameter $i$
$\pi$	-	Kreiszahl
$\rho$	°	Orientierungswinkel der Oszillationstrajektorie beim Markierungsversuch
$\rho_m$	kgm <sup>-3</sup>	Massendichte
$\rho_{pol}$	-	dimensionsloser Abstand vom Kapillarkreismittelpunkt
$\sigma$	A	Leitungsstrom
$\sigma_{P,ij}^2$	variiert	prädizierte Kovarianz der Fehler $i$ und $j$
$\sigma_{Q,ij}^2$	variiert	Kovarianz der Umwelteinflüsse $i$ und $j$
$\sigma_{R,ij}^2$	variiert	Kovarianz der Messungenauigkeiten $i$ und $j$
$\sigma_T$	K	Standardabweichung des Temperaturbereichs, in dem die spezifische Wärmekapazität korrigiert wird
$\sigma_\varepsilon$	variiert	Varianz der Residuen
$\tau$	-	dimensionslose Zeit
$v^*$	variiert	übergeordneter Zielfunktionswert
$\Phi$	-	Phasenfaktor
$\Phi_{ij}$	rad	Winkel zwischen dem Vektor zweier segmentierter Regionen und der Radiallinie von der Mitte der maskierten Prozesszone zur ersten Region
$\varphi_{pol}$	rad	Rotationswinkel um den Mittelpunkt des Kapillarkreises
$\varphi_{rot}$	rad	Rotationswinkel der WQ in Bezug zum Koordinatensystem des Kontinuums
$\varphi_s$	rad	Orientierungswinkel einer segmentierten Region
$\bar{\varphi}_s$	°	mittlere Flugrichtung eines Schweißspritzers
$\varphi_x$	rad	Phasenwinkel der Schwingung in $x$ -Richtung
$\varphi_y$	rad	Phasenwinkel der Schwingung in $y$ -Richtung
$\psi$	rad	Rotationswinkel um den Mittelpunkt des Kapillarkreises zur Berechnung der Krümmung der dimensionslosen Wärmestromdichte
$\omega$	m	Laserstrahlradius
$\omega_o$	m	Strahltaillenradius

## Matrizen und Vektoren

Größe	Einheit	Erläuterung	Dimension
$A$	variiert	Systemmatrix	$n_x \times n_x$
$cov$	variiert	Kovarianzmatrix	variiert
$d$	-	Hilfsvektor zur Bestimmung der Oberflächennormale eines bestrahlten Werkstoffelementes auf der Kapillarwand	$3 \times 1$
$diag$	variiert	Diagonalmatrix	variiert
$e_n$	-	Oberflächennormalen-Vektor	$3 \times 1$
$H$	-	Beobachtungsmatrix	$n_z \times n_x$
$I$	-	Einheitsmatrix	$n_x \times n_x$
$K$	-	Kostenmatrix	variiert
$K_t$	variiert	KALMAN-Matrix für den Zeitschritt $t$	$n_x \times n_z$
$L$	m	LISSAJOUS-Funktion	$2 \times 1$
$M_{rot}$	-	Rotationsmatrix	$4 \times 4$
$M_{trans}$	-	Translationsmatrix	$4 \times 4$
$P_t$	variiert	Kovarianzmatrix der Fehler zum Zeitschritt $t$	$n_x \times n_x$
$P_t^*$	variiert	korrigierte Kovarianzmatrix der Fehler zum Zeitschritt $t$	$n_x \times n_x$
$p_i$	pixel	Positionsvektor einer segmentierten Region	$2 \times 1$
$p_z$	pixel	Positionsvektor des Mittelpunktes der maskierten Prozesszone	$2 \times 1$
$p_1$	pixel	Vektor vom Mittelpunkt der maskierten Prozesszone zur segmentierten Region $i$	$2 \times 1$
$p_2$	pixel	Vektor vom Schwerpunkt der segmentierten Region $i$ zum Schwerpunkt der segmentierten Region $j$	$2 \times 1$
$Q$	variiert	Kovarianzmatrix der Umwelteinflüsse	$n_x \times n_x$
$R$	variiert	Kovarianzmatrix der Messungen	$n_x \times n_x$
$S$	-	POYNTING-Vektor	$3 \times 1$
$t$	-	Hilfsvektor zur Bestimmung der Oberflächennormale eines bestrahlten Werkstoffelementes auf der Kapillarwand	$3 \times 1$
$T_{VHS}$	K	Vektor der Temperaturen im VHS	variiert
$T_Z$	K	Vektor der Temperaturen im Sensorstreifen in $z$ -Richtung	variiert
$v$	m/min	Bahngeschwindigkeitsvektor	$2 \times 1$

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

$\mathbf{X}$	-	Designmatrix	$n_v \times n_m$
$\mathbf{x}$	variiert	Zustandsvektor	$n_x \times 1$
$\mathbf{x}_t$	variiert	Zustandsvektor im Zeitschritt $t$	$n_x \times 1$
$\mathbf{x}_t^*$	variiert	korrigierter Zustandsvektor im Zeitschritt $t$	$n_x \times 1$
$\mathbf{y}_j$	variiert	Vektor der $j$ -ten Zielgröße	$n_v \times 1$
$\mathbf{y}_t$	variiert	Residuenvektor zum Zeitschritt $t$	$n_z \times 1$
$\mathbf{z}_t$	variiert	Messvektor zum Zeitschritt $t$	$n_z \times 1$
$\boldsymbol{\beta}$	variiert	Koeffizientenvektor	$n_m \times 1$
$\boldsymbol{\beta}^q$	variiert	Suchschrittweitenvektor der Iteration $q$	$n_\xi \times 1$
$\boldsymbol{\delta}^q$	variiert	Richtung des abfallenden Gradienten der Iteration $q$	$n_\xi \times 1$
$\boldsymbol{\varepsilon}$	variiert	Residuenvektor	$n_v \times 1$
$\boldsymbol{\zeta}$	variiert	Vektor der Zielgrößen-Sollwerte	$n_v \times 1$
$\boldsymbol{\xi}$	variiert	Vektor der Systemparameter	$n_\xi \times 1$
$\boldsymbol{\xi}^q$	variiert	Vektor der Systemparameter der Iteration $q$	$n_\xi \times 1$
$\mathbf{v}$	variiert	Zielgrößenvektor	$n_v \times 1$
$\mathbf{v}^q$	variiert	Zielgrößenvektor der Iteration $q$	$n_v \times 1$
$\mathbf{v}_j$	variiert	Zielgrößenvektor $j$	$n_{v,j} \times 1$



# 1 Einleitung

## 1.1 Laserstrahlschweißen in der industriellen Fertigung

Als MAIMAN (1960) den ersten funktionsfähigen Rubinlaser präsentierte, wurde dieser noch als „solution looking for a problem“ (TOWNES 2003), also als eine Lösung ohne bekannte Problemstellung bezeichnet. Heute hingegen ist der Laser (engl.: light amplification by stimulated emission of radiation) aus vielen Bereichen des täglichen Lebens, wie beispielsweise der Medizintechnik, der Telekommunikation, der Messtechnik oder der Materialbearbeitung, nicht mehr wegzudenken. Diese Entwicklung spiegelt sich auch in den aktuellen Umsatzzahlen für Laseranlagen wider. Im Segment der Materialbearbeitung wurde im Jahr 2011 erstmals ein Weltmarktvolumen für Laseranlagen von über 10 Mrd. US\$ verzeichnet (OPTECH CONSULTING 2012). Der gesamte Bereich der laserbasierten Produktionstechnik umfasste in diesem Jahr sogar ein Umsatzvolumen von 21 Mrd. € (SPECTARIS ET AL. 2014). Die Tendenz ist nach wie vor steigend und im Branchenreport von SPECTARIS ET AL. (2014) wird diesem Geschäftsbereich in Deutschland bis 2020 eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von über 8 % prognostiziert. Damit zählt die laserbasierte Produktionstechnik zu den starken Kernbereichen der Photonik, die das Wachstum der Branche in Deutschland tragen. Dass die Lasermaterialbearbeitung sich immer größerer Beliebtheit in der industriellen Fertigung erfreut, kann unter anderem auf die große Flexibilität des „Strahlwerkzeuges“ (HÜGEL & GRAF 2009, S. 1) zurückgeführt werden. Heute werden mit Hilfe von Laserstrahlung Fertigungsprozesse aus allen sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach Norm DIN 8580 in der industriellen Anwendung umgesetzt. Ausgewählte Beispiele hierfür sind in Tabelle 1 aufgeführt. Treiber für die Entwicklung innovativer laserbasierter Fertigungsverfahren waren in vielen Fällen die neu entwickelten Strahlquellen und die zugehörige Systemtechnik zur Strahlführung und -formung. Während früher vornehmlich mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquellen die für die Materialbearbeitung nötige Leistungsdichte erzeugt werden konnte, stehen heute Festkörper-Laserstrahlquellen zur Verfügung, deren Strahlung aus dem Nah-Infrarot-Bereich (NIR) nicht nur einen höheren Absorptionsgrad an me-

## 1 Einleitung

---

tallischen Oberflächen besitzt, sondern auch einfach mittels optischen Fasern in sogenannten Lichtleitkabeln (LLK) geführt werden kann (HÜGEL & GRAF 2009, S. 5). Typische Vertreter dieser Strahlquellen sind die Stab-, Scheiben- und Faserlaser. Den Siegeszug der Festkörperlaser in der Materialbearbeitung unterstreicht die Tatsache, dass bereits im Jahr 2008 nahezu die Hälfte aller weltweit verkauften Laserquellen für die Materialbearbeitung mit einem der oben genannten Resonator Typen ausgestattet waren (OPTECH CONSULTING 2012).

<b>Hauptgruppe nach Norm DIN 8580</b>	<b>Beispiel eines laserstrahlbasierten Verfahrens</b>	<b>Quelle</b>
1 Urformen	Selektives Laserschmelzen	(BRANNER 2010)
2 Umformen	Laserstrahlbiegen von Flugzeugrumpfschalen	(HORNFECK 2008)
3 Trennen	Laserstrahl-Abtragschneiden von metallischen Werkstoffen	(LÜTKE 2011)
4 Fügen	Laserstrahlschweißen von Automobilkarosserien	(SOVETCHENKO 2007)
5 Beschichten	Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten	(ANGSTENBERGER 2012)
6 Stoffeigenschaften ändern	Laserstrahlhärten	(STANDFUSS 1999)

*Tabelle 1: Beispiele für laserbasierte Fertigungsverfahren, eingeteilt nach Hauptgruppen der Norm DIN 8580*

Vor allem das Laserstrahlschweißen war in den letzten beiden Jahrzehnten einer besonders dynamischen Entwicklung unterworfen. Wurden anfänglich mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung vornehmlich einfache zweidimensionale Schweißoperationen auf Flachbettmaschinen ausgeführt, so hat die zunehmende Verbreitung von Festkörper-Laserstrahlquellen zunächst dazu geführt, dass komplexere Konturen geschweißt werden konnten. Denn die Nahinfrarot-Strahlung konnte nun wesentlich flexibler in einem LLK zur Optik geführt werden, wodurch nicht mehr nur die Bauteile unter der statischen Laseroptik bewegt werden konnten, um den Schweißvorschub zu erzeugen. Stattdessen war es nun möglich die Schweißoptik mittels fortschrittlicher Handhabungssysteme, wie beispielsweise Knickarmrobotern, am Bauteil entlang zu führen, um somit auch dreidimensionale Konturen zu fügen (WAHL 1994).