



HERBERT UTZ VERLAG WISSENSCHAFT

FORSCHUNGSBERICHTE

307

Jan Daniel Musiol
Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden

Jan Daniel Musiol

Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden

Herbert Utz Verlag · München 2015

Forschungsberichte IWB
Band 307

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7178-6 Version: 1 vom 12.11.2015
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4523-7
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden

Jan Daniel Musiol

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. Rafael Macián-Juan, Ph.D.

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt
Friedrich-Alexander-Universität,
Erlangen-Nürnberg

Die Dissertation wurde am 04.09.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 29.03.2015 angenommen.

Jan Daniel Musiol

Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 307

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 · 2015

ISBN 978-3-8316-4523-7

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.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, dem Leiter des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und die Betreuung meiner Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter des Lehrstuhls für Betriebswissenschaften und Montagetechnik, danke ich für die stets vertrauensvolle Zusammenarbeit während meiner Zeit am *iwb*.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, dem Leiter des Lehrstuhls für Photonische Technologien der Friedrich-Alexander-Universität, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Rafael Macián-Juan, dem Leiter des Lehrstuhls für Nukleartechnik, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Besonders hervorheben möchte ich dabei Robert Wiedenmann, Markus Ruhstorfer, Rüdiger Daub und Stefan Braunreuther für ihren fachlichen Rat, ihre beständige Motivation und die kritische Durchsicht meines Manuskriptes. Großer Dank gilt auch allen Studenten die mich bei meiner Forschung unterstützt haben, im besonderen Maße Matthias Gürtler und Markus Krutzlinger.

Mein Dank geht zudem an meinen Bürokollegen, Jan-Fabian Meis, für die Durchsicht meines Manuskriptes und für seine Freundschaft während und nach der Arbeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir mit ihrer Liebe und Fürsorge den Weg zur Promotion ermöglicht haben, und meiner Familie, die mich durch manches tiefe Tal begleitet hat.

München, 10. Mai 2015

Jan Musiol

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Formelverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Allgemeines	3
2.2 Ausbreitung Gauß'scher Strahlen	3
2.3 Absorption von Laserstrahlung im Werkstoff	6
2.4 Energie- und Leistungsbilanzierung	7
3 Stand der Technik	11
3.1 Allgemeines	11
3.2 Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden	11
3.2.1 Wirkprinzip	11
3.2.2 Charakteristische Kenngrößen	12
3.2.3 Schnittqualität	16
3.2.4 Modellierungsansätze	21
3.3 Prozesstechnik zum Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden	25
3.3.1 Systemtechnik	25
3.3.2 Arbeitsfeldvergrößerung	26
3.3.3 Nachbearbeitung	27
3.4 Vergleich und Abgrenzung zu anderen Laserstrahl-Schneid- verfahren	28
3.5 Zusammenfassung	32
4 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise	33
5 Versuchsumgebung	37
5.1 Allgemeines	37
5.2 Laserstrahlquelle	37
5.3 Strahlformung und Strahlführung	38
5.4 Probenwerkstoffe	43
5.5 Versuchsaufbauten und Probengeometrien	43
6 Empirisches Prozessmodell	49
6.1 Allgemeines	49
6.2 Geometrie der Prozesszone	51

Inhaltsverzeichnis

6.2.1	Modellierung der Frontwand	51
6.2.2	Projektion der Intensitätsverteilung des Laserstrahls	56
6.3	Phasenumwandlung	59
6.3.1	Allgemeines	59
6.3.2	Flüssige Phase	59
6.3.3	Dampfförmige Phase	61
6.4	Materialaustrieb	63
6.4.1	Schmelzebeschleunigung	63
6.4.2	Schmelzefluss innerhalb der Schnittfuge	64
6.4.3	Materialablösung vom Werkstück	67
6.4.4	Eigenschaften der Spritzer	70
6.4.5	Zusammenfassung	75
6.5	Schnittfugenausbildung	75
6.6	Zusammenfassung	79
7	Teilanalytisches Prozessmodell	81
7.1	Allgemeines	81
7.2	Eingangsparameter, Zielgrößen, Modellrandbedingungen und Vereinfachungen	83
7.3	Geometrie der Prozesszone	85
7.3.1	Vorgehensweise	85
7.3.2	Modellierung der Frontwand	86
7.3.3	Projektion der Laserstrahlung	88
7.4	Erhaltungsgleichungen	89
7.4.1	Allgemeines	89
7.4.2	Massenerhaltung	90
7.4.3	Energieerhaltung	92
7.5	Schnittfugenausbildung	100
7.6	Leistungsbilanzierung	103
7.7	Modellanalyse	105
7.8	Zusammenfassung	111
8	Zusammenfassung und Ausblick	113
8.1	Zusammenfassung	113
8.2	Technische und wirtschaftliche Bewertung des RAC	115
8.3	Ausblick	117
9	Literaturverzeichnis	119
A	Anhang	129
A.1	Werkstoffkennwerte niedrig legierter Stähle	129
A.2	Werkstoffkennwerte hoch legierter Stähle	131
A.3	Physikalische Konstanten und sonstige Kennwerte	132
A.4	Verzeichnis betreuer Studienarbeiten	133

Abkürzungsverzeichnis

Hinweis: In DUDEN (2010) enthaltene Abkürzungen werden hier nicht explizit erläutert.

Abkürzung	Bedeutung
C	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
EDX	Energy dispersive X-ray spectroscopy (Energie-dispersive Röntgenspektroskopie)
Fe	Eisen
HG	Hochgeschwindigkeit
Mn	Mangan
Ni	Nickel
P	Phosphor
RAC	Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden
REM	Raster-Elektronenmikroskop
RLW	Remote-Laserstrahl-Schweißen
S	Schwefel
Si	Silizium

Formelverzeichnis

Variable	Einheit	Bedeutung
a	-	Modellkoeffizient
a_e	m	Ellipsenhalbachse
A_{Abs}	-	Grad der optischen Einkopplung
A_e	m^2	elliptische Frontwandfläche (Kontrollfläche)
A_F	-	Absorptionsgrad nach Fresnel
A_f	m^2	im Fokus bestrahlte Fläche
A_k	m^2	Querschnittsfläche der Schnittfuge
A_{Mantel}	m^2	Mantelfläche der Prozesszone (Kontrollfläche)
$A_{F,p}$	-	Absorptionsgrad für parallel polarisierte Strahlung nach Fresnel
$A_{F,s}$	-	Absorptionsgrad für senkrecht polarisierte Strahlung nach Fresnel
A_T	-	Temperaturfaktor
b	-	Modellkoeffizient
b_e	m	Ellipsenhalbachse
b_G	m	Breite des Schnittgrates
b_k	m	Breite der Schnittfuge
B	W/m^2	Brillanz
c_p	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$	spezifische Wärmekapazität
c_{ps}	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$	spezifische Wärmekapazität des Feststoffs
c_{pm}	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$	spezifische Wärmekapazität der Schmelze
c_{pv}	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$	spezifische Wärmekapazität des Dampfes
d	m	Material- oder Blechdicke

Variable	Einheit	Bedeutung
d_c	m	Faserkerndurchmesser
d_f	m	Durchmesser der Strahltaille oder des Fokus
d_h	m	Bohrlochdurchmesser
d_K	m	Kreisdurchmesser
d_{\max}	m	maximal schneidbare Blechdicke
E	J	Energie
E_h	J	aufgewendete Energie zum Erwärmen des Werkstoffs
E_{kin}	J	kinetische Energie
E_m	J	aufgewendete Energie zur Aggregatzustandsänderung von fest nach flüssig
E_p	J	Prozessenergie
E_{pot}	J	potentielle Energie
E_r	J	freiwerdende Energie aus chemischer Reaktion
E_T	J/mm ²	Trennenergie
E_{ten}	J	Oberflächenenergie
E_v	J	aufgewendete Energie zur Aggregatzustandsänderung von flüssig nach gasförmig
E_{vol}	J	Volumenenergie
\dot{E}_{Ein}	J/s	Energiestrom in die Prozesszone
f	Hz	Frequenz
f_{vap}	-	Dampfanteil der am Prozess beteiligten Werkstoffmasse
F	N	Kraft
h_G	µm	Höhe des Schnittgrates
