



Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge

IFSW

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Oliver Bocksrocker

Mechanismen der Entstehung von Schnittunregelmäßigkeiten beim Laserschneiden mit 1 μm Wellenlänge



utzverlag



Oliver Bocksrocker

**Mechanismen der Entstehung von
Schnittunregelmäßigkeiten beim Laserschneiden
mit 1 μm Wellenlänge**

utzverlag · München 2023

Laser in der Materialbearbeitung
Band 110

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7748-1 Version: 1 vom 19.04.2023
Copyright© utzverlag 2023

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4999-0
Copyright© utzverlag 2023

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

O. Bocksrocker
Mechanismen der Entstehung von
Schnittunregelmäßigkeiten beim
Laserschneiden mit 1 μm Wellenlänge

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Mechanismen der Entstehung von Schnittunregelmäßigkeiten beim Laserschneiden mit 1 μm Wellenlänge

von Dr.-Ing. Oliver Bocksrocker
Universität Stuttgart



utzverlag München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2022

D 93

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH 2023

ISBN 978-3-8316-4999-0

Printed in Germany

utzverlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Symbole	9
Kurzfassung der Arbeit	13
Extended Abstract	15
1 Einleitung	17
1.1 Motivation	18
1.2 Zielsetzung	21
1.3 Aufbau der Arbeit.....	22
2 Stand der Technik	25
2.1 Laserschneiden mit 1 μm Wellenlänge	25
2.2 Schnittunregelmäßigkeiten beim Laserschneiden mit 1 μm Wellenlänge.....	30
2.3 Vorgänge an der Schneidfront.....	33
2.3.1 Veränderungen der Schneidfrontgeometrie	33
2.3.2 Veränderungen der Strömungsverhältnisse	36
2.3.3 Lokale Veränderungen der absorbierten Bestrahlungsstärke	39
2.4 Sensoriken zur Überwachung der Schneidfront.....	42
3 Problemanalyse	47
4 Simulationen der Vorgänge an der Schneidfront	53
4.1 Erzeugung eines dreidimensionalen Abbilds der Schneidfront	53
4.2 Simulation des Gasflusses und des resultierenden Drucks	59
4.3 Verteilung der absorbierten Bestrahlungsstärke an der Schneidfront.....	64
5 Lokale Verdampfung an der Schneidfront	69
5.1 Detektion lokaler Verdampfung.....	69
5.1.1 Hochgeschwindigkeits-Bildgebung der Schneidfront	69
5.1.2 Spektralanalyse der Prozessemissionen.....	
5.2 Analyse lokaler Verdampfung.....	75
5.2.1 Lokale Blitze auf der Schneidfront.....	76

5.2.2	Temperatur auf der Oberfläche der Schneidfront	81
5.2.3	Metалldampf und dessen Temperatur.....	85
5.3	Diskussion der Ergebnisse.....	89
6	Gültigkeitsbereich und Übertragbarkeit	92
6.1	Einfluss der Fokuslage.....	92
6.2	Einfluss der Materialart	99
7	Industrielle Relevanz	104
8	Zusammenfassung	107
9	Literaturverzeichnis	109

Verzeichnis der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A(\theta)$	o.E.	Absorptionsgrad
A_{21}	o.E.	Einstein-Koeffizient beim Übergang vom Energieniveau E_2 auf E_1
ADB	mm	Abstand von Düse zu Blech
B	o.E.	Zeitlicher Anteil ohne Blitze während des Schneidprozesses
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit in Vakuum $c = 2,99 \cdot 10^8$ m/s
E_{21}	J	Energiedifferenz zwischen den Energieniveaus E_2 und E_1
E_L	J/m	Streckenenergie
f_f	mm	Brennweite der Fokussierung
FL	mm	Fokuslage
g	m / s^2	Beschleunigung
g_{21}	o.E.	statistisches Gewicht der Entartung beim Übergang vom Energieniveau E_2 auf E_1
h	J*s	Planksches Wirkungsquantum $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js
I	$W/\mu m^2$	Intensität des Laserstrahls
I_A	$W/\mu m^2$	Absorbierte Bestrahlungsstärke
J_{du}	o.E.	Grauwertstufe des Spektrometers ohne Beleuchtung
J_{Pr}	o.E.	Grauwertstufe des Spektrometers während der Beleuchtung durch das Prozessleuchten
J_{ref}	o.E.	Grauwertstufe des Spektrometers während der Beleuchtung durch die Wolframbandlampe
k	J/K	Boltzmannkonstante $k = 1,386 \cdot 10^{-23}$ J/K
K	o.E.	Kalibrierungsfaktor
l_R	o.E.	Lot auf der Riefenbahn
l_z	o.E.	Lot auf der Blechoberfläche in z-Richtung

L_{bl}	$W/(m^2 \cdot sr)$	Strahldichte eines schwarzen Körpers
L_L	$W/(m^2 \cdot sr)$	Strahldichte der Linienemission
L_{L1}	$W/(m^2 \cdot sr)$	Strahldichte der Linienemission der Linie L1
L_{L2}	$W/(m^2 \cdot sr)$	Strahldichte der Linienemission der Linie L2
L_{L3}	$W/(m^2 \cdot sr)$	Strahldichte der Linienemission der Linie L3
L_{Offset}	$W/(m^2 \cdot sr)$	konstanter Versatz vom kalibrierten gemessenen Prozessspektrum $L_{\lambda,pr}(\lambda)$ (enthält die Hintergrundstrahlung)
L_{pr}	$W/(m^2 \cdot sr)$	Strahldichte des Prozesses
L_{ts}	$W/(m^2 \cdot sr)$	Strahldichte der Wolframlampe
LX	o.E.	Nummer der Spektrallinie (L1, L2 und L3)
m	Kg	Masse
n	o.E.	Brechzahl (Realanteil des komplexen Brechungsindex)
$n(T_v)$	m^{-3}	Elektronendichte
N_2	-	Stickstoff, verwendet als Schneidgas
\emptyset_0	μm	Fokusbereich
$\emptyset_{Düse}$	mm	Düsendurchmesser
\emptyset_{Kern}	μm	Kerndurchmesser der optischen Faser
\emptyset_{Loch}	mm	Lochdurchmesser einer Lochblende
\emptyset_{Mess}	μm	Durchmesser des Messflecks für die Spektralanalyse
p	bar	Druck
p_0	bar	Atmosphärendruck
p_{lsn}	bar	Druck des Laserschneidgases
P_L	W	Laserleistung
p-pol.	o.E.	Polarisationsrichtung parallel zur Einfallsebene
R_s	$J / (kg \cdot K)$	Spezifische Gaskonstante
s	mm	Blechdicke
s-pol.	o.E.	Polarisationsrichtung senkrecht zur Einfallsebene

SPP	mm*mrad	Strahlparameterprodukt
T	K	Temperatur
t	s	Zeit
T_{Pr}	K	Temperatur der Prozesszone
$T_{Pr,vhoch}$	K	Temperatur der Prozesszone bei v_{hoch}
$T_{Pr,vklein}$	K	Temperatur der Prozesszone bei v_{klein}
$T_{Pr,vmittel}$	K	Temperatur der Prozesszone bei v_{mittel}
T_{ra}	K	Strahlungstemperatur der Wolframbandlampe (2500 K)
T_S	K	Schmelztemperatur von Eisen
T_{ts}	K	Temperatur auf der Oberfläche der Wolframbandlampe
T_v	K	Verdampfungstemperatur von Eisen
u	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
V	m ³	Gasvolumen
v_{hoch}	m/min	Maximale Vorschubgeschwindigkeit kurz unterhalb der Trenngrenze, die zu einem unterbrochenen Riefenbild führt
v_{klein}	m/min	Vorschubgeschwindigkeit, die zu einem homogenes Riefenbild führt
v_{max}	m/min	Vorschubgeschwindigkeit an der Trenngrenze, die zu Schnittabriss führt
v_{mittel}	m/min	Vorschubgeschwindigkeit, die zu einem unterbrochenen Riefenbild führt
$v_{\text{Übergang}}$	m/min	Vorschubgeschwindigkeit an der Grenze hin zu einer unterbrochenen Riefenstruktur
$w_v(z)$	mm	Profil der Schnittspaltbreite
$Z(T_v)$	o.E.	Verteilungsfunktion
$z_v(x)$	mm	Schneidfrontprofil
$\Delta T_{Pr,vhoch}$	K	Unsicherheit der Temperatur der Prozesszone bei v_{hoch}
ΔT_{ra}	K	Unsicherheit der Strahlungstemperatur der Wolframbandlampe
$\Delta \varepsilon_t$	o.E.	Unsicherheit des Emissionsvermögens des Wolframbands