



Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge

IFSW

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Daniel Förster

Energieeinkopplung und Energieumwandlungsprozesse bei der Bearbeitung von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen



utzverlag



Daniel Förster

**Energieeinkopplung und
Energieumwandlungsprozesse bei der Bearbeitung
von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen**

utzverlag · München 2023

Laser in der Materialbearbeitung
Band 111

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7744-3 Version: 1 vom 11.07.2023
Copyright© utzverlag 2023

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-5009-5
Copyright© utzverlag 2023

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

D. Förster
Energieeinkopplung und Energieum-
wandlungsprozesse bei der Bearbeitung
von Metallen mit ultrakurzen Laserpul-
sen

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.

Energieeinkopplung und Energieumwandlungsprozesse bei der Bearbeitung von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen

von Dr.-Ing. Daniel Förster
Universität Stuttgart



utzverlag München

Als Dissertation genehmigt
von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
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., 2023

D 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2023

ISBN Print 978-3-8316-5009-5
ISBN E-book 978-3-8316-7744-3

Printed in Germany

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

Inhalt

Inhalt	7
Symbole und Abkürzungen	9
Kurzfassung	13
Extended Abstract	15
1 Einleitung	17
2 Stand der Wissenschaft und Technik	20
2.1 Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen	20
2.2 Einkopplung und Umwandlung von Laserenergie während eines einzelnen Pulses	22
2.2.1 Einkopplung von Laserstrahlung	24
2.2.2 Zeitaufgelöste Einkopplung von Laserenergie	25
2.2.3 Forschungsbedarf	27
2.3 Bearbeitung von Metallen mit Burstpulsen	28
2.3.1 Forschungsbedarf	31
2.4 Präzisionsbohren von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen	33
2.4.1 Perkussionsbohren von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen	33
2.4.2 Forschungsbedarf	34
2.5 Gliederung der Arbeit	36
3 Energieeinkopplung während der Ablation mit Einzelpulsen	38
3.1 Experimentell bestimmtes Verhalten des komplexwertigen Brechungsindex auf ultrakurzen Zeitskalen	38
3.2 Vergleich zwischen Simulation und experimentellen Ergebnissen	41
3.2.1 Methodik	41
3.2.2 Numerisch bestimmtes Verhalten des komplexen Brechungsindex auf ultrakurzen Zeitskalen	43
3.3 Physikalische Ursachen des beobachteten zeitabhängigen Verlaufs des komplexen Brechungsindex und des Reflexionsgrades	45

4 Abschirmung von Strahlung und Materialreposition während der Bearbeitung mit Burst-Pulsen	53
4.1 Einfluss der Pulsabstände auf das abgetragene Volumen bei der Nutzung von Burst-Pulsen	53
4.2 Prozessbeobachtung während des Ablationsprozesses	57
5 Der Tiefbohrprozess und Auslegung von Perkussionsbohrprozessen	67
5.1 Tiefenzunahme zu Bohrbeginn und Übergang zum Tiefbohrprozess . . .	67
5.2 Der Tiefbohrprozess	71
5.2.1 Bestimmung der Durchbohrzeit	71
5.2.2 Analytisches Modell zur Berechnung der erreichbaren Bohrtiefe	72
5.3 Auslegung von Perkussionsbohrprozessen	76
5.4 Perkussionsbohren tiefer Löcher bei hoher Qualität	80
6 Energieumwandlung während des Tiefbohrprozesses	82
6.1 Kalorimetrische Messung zur Bestimmung der Residuumswärme	82
6.2 Residuumswärme in Abhängigkeit von Pulsanzahl und eingestrahelter Fluenz	85
6.3 Residuumswärme in Abhängigkeit von Bohrtiefe und Pulswiederholrate	87
6.4 Betrachtung der Residuumswärme während des Laserbohrprozesses . .	90
7 Zusammenfassung und Ausblick	92
Literaturverzeichnis	94
Anhang	105
A.1 Kritische Pulsanzahl für den Tiefbohrprozess	105
A.2 Kalorimetrisch bestimmte Werte der optischen Parameter	107
Danksagungen	109

Symbole und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
a	Krümmung der Normalparabel	
A	Absorptionsgrad	
A_{k,t_i}	Absorptionsanteil der k-ten Zelle zum Zeitpunkt t_i	
A_1	Fitparameter	
b	Hilfsgröße	
c_1	Konstante im elektronischen Anteil der Stoßfrequenz	K^{-1}
D	Diffusivität	$m^2 s^{-1}$
d_{abl}	Abtragsdurchmesser	m
e	Ladung des Elektrons	C
E_A	Absorbierte Energie	J
E_{in}	Eingestrahlte Laserenergie	J
E_L	Laserenergie	J
E_p	Energie eines Laserpulses	J
E_{proc}	Prozessenergie	J
E_{res}	Im Bauteil verbleibende Energie (Residuale Energie)	J
f_{rep}	Pulswiederholrate des Lasers	s^{-1}
$g(r, N)$	Funktion der Reflexionsgeraden g	
V_{en}	Energiespezifisches Volumen	$m^3 J^{-1}$
$V_{en,N}$	Energiespezifisches Volumen für Pulsanzahl N	$m^3 J^{-1}$
I	Intensität	$W m^{-2}$
I_{loc}	Lokal herrschende Intensität	$W m^{-2}$
I_0	Peakintensität	$W m^{-2}$
k	Imaginärteil des Brechungsindex	
m_e	Masse des Elektrons	kg