

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

M. Sawannia
Nutzung der thermischen
Strahlung zur experimentellen
Bestimmung der 3D-Geometrie,
Temperatur, Brechungsindex
und Extinktionskoeffizient
von flüssigen Metallen

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.

**Nutzung der thermischen
Strahlung zur experimentellen
Bestimmung der 3D-Geometrie,
Temperatur, Brechungsindex
und Extinktionskoeffizient
von flüssigen Metallen**

von Dr.-Ing. Michael Sawannia
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: Assoc. Prof. Dr.-Ing. Jörg Volpp

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.

Bei Fragen zur Produktsicherheit wenden Sie sich bitte
an unsere Adresse: utzverlag GmbH ·
Herr Matthias Hoffmann · Nymphenburger Straße 91 ·
80636 München · Telefon: 0049-89-27779100 oder
www.utzverlag.de

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2026

D 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2026

ISBN (Print) 978-3-8316-5105-4

ISBN (E-Book) 978-3-8319-7846-4

Printed in Germany

utzverlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Liste der verwendeten Symbole	5
Kurzfassung.....	11
Extended Abstract	12
1 Einführung.....	13
1.1 Absorption der Laserstrahlung an metallischen Werkstücken.....	15
1.1.1 Stand der Technik.....	15
1.1.2 Fazit und Forschungsbedarf	20
1.2 Berührungsfreie Bestimmung der dreidimensionalen Geometrie der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Werkstück.....	21
1.2.1 Stand der Technik.....	21
1.2.2 Fazit und Forschungsbedarf	29
1.3 Berührungsfreie Bestimmung der Temperaturverteilung in der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Werkstück.....	30
1.3.1 Stand der Technik.....	30
1.3.2 Fazit und Forschungsbedarf	39
1.4 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	40
2 Bestimmung der 3D-Geometrie der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Werkstück mittels Analyse der thermischen Prozessstrahlung	43
2.1 Publikation.....	43
2.2 Einordnung der Ergebnisse	65
3 Synchrone Bestimmung der 3D-Geometrie und Temperatur der Schneidfront beim Laserschneiden	66

3.1	Publikation.....	66
3.2	Einordnung der Ergebnisse.....	92
4	Methode zur Bestimmung des Brechungsindex und des Extinktionskoeffizienten von flüssigen Metallen	93
4.1	Publikation.....	93
4.2	Einordnung der Ergebnisse.....	118
5	Zusammenfassung	119
	Literaturverzeichnis	121
	Danksagung	127

Liste der verwendeten Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Absorptionsgrad	—
a	Variable zur Berechnung des Pseudo-Brewster-Winkel	—
A_{0°	Absorptionsgrad bei senkrechtem Einfall	—
$A_{B'}$	Absorptionsgrad beim Pseudo-Brewster-Winkel	—
A_p	Absorptionsgrad für parallel polarisierte Strahlung	—
A_s	Absorptionsgrad für senkrecht polarisierte Strahlung	—
b	Variable zur Berechnung des Pseudo-Brewster-Winkel	—
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	m/s
C_1	Strahlungskonstante 1	W·m ²
C_2	Strahlungskonstante 2	m·K
d_f	Fokusedurchmesser	μm
f	Aufnahmerate	Hz
f_{min}	Minimale Abtastrate	Hz
f_1, f_2, f_3, f_4	Brennweiten von Linsen	mm

h	Plancksches Wirkungsquantum	J·s
I	Leistungsdichte	W/m ²
I_β	Intensität der thermischen Emission nach einem Linearpolarisator mit der Orientierung β	a.u.
k	Extinktionskoeffizient	—
k_B	Boltzmann-Konstante	J/K
$L_{SB,D}$	Detektierbare spektrale Strahldichte eines realen Körpers eines Spektralbereichs SB	W/(m ² · sr · nm)
L	Spektrale Strahldichte eines realen Körpers	W/(m ² · sr · nm)
L_B	Spektrale Strahldichte eines Schwarzkörperstrahlers im Vakuum	W/(m ² · sr · nm)
L_D	Detektierbare spektrale Strahldichte eines realen Körpers	W/(m ² · sr · nm)
M^2	Beugungsmaßzahl	—
n	Brechungsindex	—
n_x	x-Komponente des Normalenvektors	—
n_y	y- Komponente des Normalenvektors	—
n_z	z- Komponente des Normalenvektors	—
$\bar{n}$	Komplexer Brechungsindex	—
$\vec{n}$	Normalenvektor	—
P	Laserleistung	W
p	Schneidgasdruck	bar
Q	Quotient	—

Q_1, Q_2, Q_3	Quotienten	—
$\hat{Q}_1, \hat{Q}_2$	Gemessene Quotienten	—
Q_A	Quotient aus dem Absorptionsgrad beim Pseudo-Brewster-Winkel und dem Absorptionsgrad bei senkrechtem Einfall	—
Q_{Emis}	Quotient zweier Emissionsgrade von zwei Signalen	—
Q_Q	Quotient der detektierbaren spektralen Strahldichten eines realen Körpers von zwei unterschiedlichen Spektralbereichen	—
Q_{Temp}	Quotient zur Temperaturberechnung	—
Q_{Trans}	Quotient der der Transmissionsverluste von zwei Signalen	—
Q_ε	Quotient der Emissionsgrade von zwei Spektralbereichen	—
Q_{η_S}	Quotient der relativen spektralen Empfindlichkeiten von zwei Spektralbereichen	—
R	Reflexionsgrad	—
r	Variable berechnet aus $\hat{Q}_1$ und $\hat{Q}_2$	—
r_{3P}	Variable zur Berechnung des Polarwinkels	—
R_p	Reflexionsgrad für parallel zur Einfallsebene polarisierte Strahlung	—
$\bar{r}_p$	Reflexionskoeffizient für parallel zur Einfallsebene polarisierte Strahlung	—
R_s	Reflexionsgrad für senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Strahlung	—

r_s	Reflexionskoeffizient für senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Strahlung	—
S	Emittiertes Signal eines realen Körpers	a.u.
T	Temperatur	K
T_{AVG}	Mittlere Temperatur	K
T_{cal}	Kalibriertemperatur	K
T_{loss}	Transmissionsverluste	—
T_{max}	Maximale Temperatur	K
T_{melt}	Schmelztemperatur	K
T_{min}	Minimale Temperatur	K
v	Vorschubgeschwindigkeit	m/min
v_{Stufe}	Geschwindigkeit einer Stufe	m/s
x, y, z	Raumkoordinaten	Mm
x_G, y_G, z_G	Koordinaten des Polarisationsgoniometers	Pixel
α	Azimutwinkel	°
β	Winkelstellung eines Linearpolarisators	°
ε	Emissionsgrad	—
ε_p	Emissionsgrad für parallel polarisierte Strahlung	—
ε_s	Emissionsgrad für senkrecht polarisierte Strahlung	—
ε_{SB}	Bandemissionsgrad	—
η_S	Relative spektrale Empfindlichkeit	—

$\eta_{SB,S}$	Relative spektrale Empfindlichkeit des Messsystems im Spektralbereich SB	—
θ	Transmissionsgrad	—
λ	Wellenlänge	nm
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$	Grenzwellenlängen für Pyrometrie	nm
λ_Z	Zentralwellenlänge eines Spektralbereiches	nm
σ	Standardabweichung Gaußfilter	—
φ	Einfallswinkel oder Abstrahlwinkel zur Oberflächennormalen, bzw. der Polarwinkel	°
$\varphi_{B'}$	Pseudo-Brewster-Winkel	°
Ω_0	Raumwinkel	sr

Abkürzung	Bedeutung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
CMOS	Komplementäre Metall-Oxid-Halbleiter
IFSW	Institut für Strahlwerkzeuge
InGaAs	Indiumgalliumarsenid
OCT	Optische Kohärenztomographie
PbSe	Bleiselenid
px	Pixel
SB	Spektralbereich

SD	Standardabweichung
WWZ	Wechselwirkungszone

Kurzfassung

Die Geometrie der Wechselwirkungszone (WWZ) zwischen Laserstrahl und Werkstück ist in der Lasermaterialbearbeitung von besonderem Interesse, da diese die Energieeinkopplung ins Werkstück beeinflusst. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, das die Polarisationsseigenschaften der thermischen Strahlung der WWZ nutzt, um die 3D-Geometrie der WWZ mit hoher örtlicher ($36\text{ }\mu\text{m}/\text{Pixel}$) und zeitlicher Auflösung (bis 75 kHz) berührungslos zu erfassen. Die analytischen Gleichungen zur Berechnung der 3D-Geometrie wurden hergeleitet und die Methode experimentell validiert.

Das dafür konzipierte und aufgebaute Gerät wird Polarisationsgoniometer genannt und wurde zusätzlich um die Möglichkeit der Temperaturmessung mittels Quotientenpyrometrie erweitert, sodass erstmals eine synchrone Messung von Geometrie und Temperatur der WWZ auf Basis der thermischen Strahlung möglich ist.

Anhand von Experimenten beim Laserstrahlschneiden mit 1030 nm Laserwellenlänge konnten lokale Temperaturschwankungen von bis zu 800 K entlang der gesamten Schneidfront gemessen werden, die mit dem Auftreten dynamischer Geometrieänderungen auf der Schneidfront korrelieren.

Weiterhin wurde eine Methodik zur Bestimmung der temperatur- und wellenlängenabhängigen Werte von Brechungsindex und Extinktionskoeffizient flüssiger Metalle entwickelt, welche essenziell für die Berechnung des temperatur- und winkelabhängigen Absorptionsgrades ist. Der Absorptionsgrad von flüssigen Metallen bei der Laserwellenlänge wird zur Steigerung der Genauigkeit von Simulationen von Lasermaterialbearbeitungsprozessen benötigt.

Damit liefert die Arbeit erstmalig ein Messsystem zur synchronen Messung der Geometrie und Temperatur der WWZ mit hoher örtlicher und zeitlicher Auflösung. Zudem können mit dem Goniometer optische Materialkonstanten temperaturabhängig bestimmt werden. Beide Methoden schaffen somit eine Grundlage für ein vertieftes Prozessverständnis und realitätsnähere Simulationen der Lasermaterialbearbeitung.

Extended Abstract

The geometry of the interaction zone between the laser beam and the workpiece affects the energy deposition into the workpiece and is therefore of particular interest in laser material processing. As part of this work, a method was developed using the polarization properties of thermal radiation for a contactless determination of the 3D geometry of the interaction zone with high spatial ($36\text{ }\mu\text{m/pixel}$) and temporal resolution (up to 75 kHz). The analytical equations for the calculation of the 3D geometry were derived, and the method was validated experimentally.

The device designed and built for this purpose is called polarization goniometer and was additionally upgraded to measure the temperature by quotient pyrometry, enabling for the first-time synchronous measurement of the 3D-geometry and temperature of the interaction zone.

Experiments with laser beam cutting at a laser wavelength of 1030 nm revealed local temperature fluctuations of up to 800 K along the entire cutting front, which correlate with dynamic changes in the geometry on the cutting front.

Furthermore, a methodology was developed for the determination of the temperature- and wavelength-dependent values of refractive index and extinction coefficient of liquid metals, which are essential for calculating the temperature- and angle-dependent absorptivity. The absorptivity of liquid metals is required to increase the accuracy of simulations in laser material processing.

This work thus provides for the first time a measurement system for the synchronous measurement of the geometry and temperature of the interaction zone with high spatial and temporal resolution. In addition, the goniometer can be used to determine optical material constants as a function of temperature. Both methods create a basis for a deeper understanding of laser material processing as well as for more realistic simulations of the processes.

1 Einführung

Die Lasermaterialbearbeitung wird in zahlreichen industriellen Fertigungsprozessen genutzt, da sie eine hochpräzise, schnelle, berührungsfreie und automatisierbare Produktion von Teilen ermöglicht [1, 2]. Die Lasermaterialbearbeitung beruht darauf, dass der Werkstoff mit dem Laserstrahl in deren Wechselwirkungszone (WWZ) erhitzt wird. Je nach Fertigungsverfahren wird der Werkstoff dabei erwärmt, aufgeschmolzen, teilweise verdampft, vollständig verdampft oder ionisiert [1]. Die lokale Geometrie der Wechselwirkungszone kann sich beim Aufschmelzen und beim Verdampfen hochdynamisch ändern, z.B. durch Schmelzeströmung [1, 3], Dampfströmung [1, 4], Oberflächenspannung [1, 3], Prozessgase [1, 3] oder den Verdampfungsdruck [1, 4].

Ein Beispiel für die hohe Dynamik beim Laserstrahlschneiden von Edelstahl ist in Bild 1.1 durch eine Bildfolge einer Highspeed-Aufnahme gegeben, in welcher zu sehen ist, wie die Schmelze entlang der Schneidfront nach unten ausgetrieben wird.

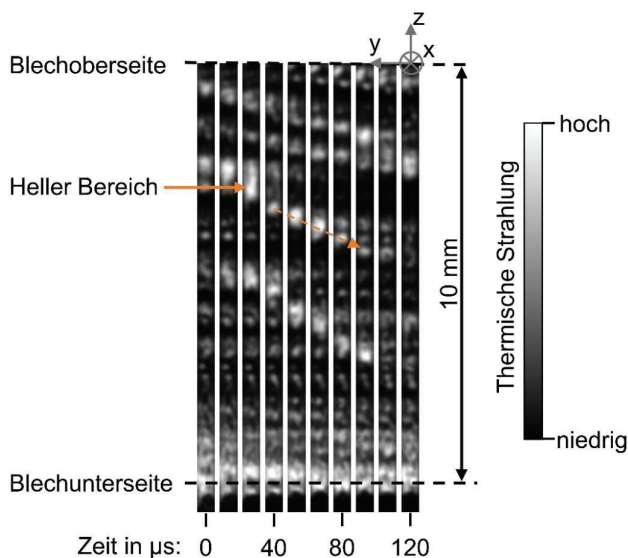


Bild 1.1: Highspeed-Aufnahme der Schmelzedynamik entlang der Schneidfront beim Laserstrahlschneiden von Edelstahl. Die hellen Bereiche entsprechen heißer Schmelze, die durch das Schneidgas an der Blechunterseite ausgetrieben wird. Die Framerate der Highspeed-Aufnahme betrug 75 kHz bei einer Belichtungszeit von 13,33 µs. Der Versuchsaufbau ist in [5] beschrieben. Die Prozessparameter waren: Edelstahl 1.4301, Leistung $P = 8$ kW, Vorschubgeschwindigkeit $v = 4,5$ m/min, Fokusdurchmesser $d_f = 200$ µm, Schneidgasdruck $p = 24$ bar, Fokusslage $z_f = -4,5$ mm.

Die großen hellen Bereiche in den Kamerabildern der Bildfolge entsprechen meist heißen Verdickungen des Schmelzefilms und werden in der Literatur oft als gleitende Stufen bezeichnet [6], die sich entlang der Schneidfront abwärts zur Blechunterseite bewegen. Die Geschwindigkeit der Stufen beträgt typischerweise 5 m/s bis 25 m/s [7, 8]. Um diese schnellen Bewegungen erfassen zu können, wurde eine Aufnahmezeit von 75 kHz genutzt. Zudem wird eine hohe örtliche Auflösung benötigt, die für die Bilder in Bild 1.1 36 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ betrug.

Durch die hochdynamische Änderung der WWZ ändern sich somit kontinuierlich deren Oberflächengeometrie und somit die winkelabhängige Absorption der Laserstrahlung. Zudem kann es durch Geometrieänderungen in der WWZ zu lokalen Absorptionsspitzen der Laserstrahlung kommen, welche zu lokalen Temperaturerhöhungen führen. Diese Temperaturerhöhungen können zur lokalen Verdampfung des Materials führen. Die lokale Verdampfung kann, z.B. beim Schneiden, wiederum zu Prozessinstabilitäten führen, welche mit geringerer Prozessqualität einher gehen [9, 10].

Für die Qualität des Prozessergebnisses sind somit sowohl die Temperaturverteilung als auch die Geometrie der Wechselwirkungszone von großer Bedeutung. Messungen dieser Größen könnten daher für die Qualitätssicherung oder Regelungen genutzt werden. Hierfür sind jedoch Messmittel notwendig, die sowohl Temperatur als auch Geometrie bei diesen hohen zeitlichen (≥ 50 kHz) und örtlichen Auflösungen (≤ 50 μm) flächig bestimmen können. Die Bestimmung muss dabei berührungsfrei erfolgen, um die schnellen hochproduktiven Laserprozesse nicht zu beeinflussen und das Material im flüssigen Zustand vermessen zu können.

Zudem kann mit der bekannten dreidimensionalen Geometrie und der Temperatur die Verteilung der absorbierten Leistungsdichte des Laserstrahls analysiert werden. Dafür müssen jedoch der winkel- und temperaturabhängige Absorptionsgrad bekannt sein, welcher zum aktuellen Stand der Technik für flüssige Metalle jedoch kaum bis gar nicht bekannt ist, für eine vollständige Beschreibung der Verteilung der absorbierten Leistungsdichte allerdings benötigt wird [11, 12].