

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

S. Hecker
Verfahren zur Inline-
Prozessüberwachung für das Schweißen
von Glas mit Ultrakurzpulslasern

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.

Verfahren zur Inline- Prozessüberwachung für das Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslasern

von Dr.-Ing. Sebastian Hecker
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. rer. nat. Alois Herkommer

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., 2021

D 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2022

ISBN 978-3-8316-4955-6

Printed in Germany

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

Inhalt

Inhalt	3
Symbole	5
Abkürzungsverzeichnis	9
Kurzfassung der Arbeit	11
Extended Abstract	12
1 Einleitung	15
1.1 Ausgangssituation: Stand der Technik	15
1.2 Zielsetzung	18
1.3 Gliederung der Arbeit	18
2 Experimente zur Untersuchung der Nahtentstehung beim Glasschweißen	20
2.1 Absorption und Wärmeakkumulation in transparenten Materialien . . .	21
2.2 Systemtechnik und Auswertemethodik	22
2.3 Quarzglas	26
2.4 Alkali-Aluminosilikatglas	33
2.5 Fazit	36
3 Spezifische Techniken zur Prozessoptimierung	37
3.1 Methoden zur Prozessoptimierung	38
3.2 Zeitliche Modulation der Laserleistung	40
3.3 Räumliche Strahlformung	47
3.4 Leistungsmodulation bei räumlicher Strahlformung	49
3.5 Fazit	52
4 Experimente zur Entwicklung eines Verfahrens zur Prozessüberwachung	53
4.1 Überwachung leistungsmodulierter Prozesse mit einer Fotodiode	53
4.2 Positionserkennung mittels optischer Kohärenztomografie	72
5 Entwicklung eines Überwachungssystems	87

5.1	Modell zur Schmelzvolumenklassifikation	87
5.2	Überwachungssystem	101
5.3	Anwendung in der industriellen Fertigung	102
6	Zusammenfassung und Ausblick	105
	Literaturverzeichnis	108
	Danksagung	117

Symbole

Griechische Buchstaben

Δt	Integrationsdauer
Δz	Messtiefe in z-Richtung
Δz_L	Halbwertsbreite eines Signals an der Nahtoberkante
Δz_S	Positioniertoleranz
Δz_U	Halbwertsbreite eines Signals an der Nahtunterkante
δ_x	laterales Auflösungsvermögen
δ_z	axiales Auflösungsvermögen
λ	Wellenlänge
λ_{nR}	Beleuchtungswellenlänge
σ	Standardabweichung
σ_1	Standardabweichung einer Intensitätsverteilung an der Nahtoberseite
σ_2	Standardabweichung einer Intensitätsverteilung an der Nahtunterseite
σ_{SW}	Grauwert-Standardabweichung
τ	Pulsdauer

Lateinische Buchstaben

$\bar{F}(z)$	zeitlich gemittelttes Tiefenprofil
$\dot{S}(t)$	zeitliche Ableitung des Fotodiodensignals
\dot{S}_{min}	minimale Steigung
\dot{S}_{min}^{GW}	Schwellwert für die minimale Steigung
$\tilde{F}(z)$	Mittelwert einer zweidimensionalen Intensitätsverteilung
a	Abstand zwischen zwei Schmelzvolumen

$B(t)$	Bool'sches Array
d_B	Durchmesser des bessel-ähnlichen Strahlprofils
d_f	Fokusedurchmesser
d_G	Glasdicke
d_S	Spaltbreite
e	Euler'sche Zahl
E_B	Gesamtenergie aller Pulse in einem Burst
f	Brennweite
$F(z)$	Tiefenprofil
$F(z, t)$	zeitabhängiges Tiefenprofil
$F(z, x)$	ortsabhängiges Tiefenprofil
f_{Acan}	A-Scan-Rate
f_B	Repetitionsrate der Bursts
f_{mod}	Modulationsfrequenz
F_{SW}	Schwellwert für die Detektion von Hohlräumen
f_s	Repetitionsrate des Seedlasers
f_n	Anzahl der falsch-negativen Ergebnisse
f_p	Anzahl der falsch-positiven Ergebnisse
G	Vorhersagegenauigkeit
h_S	Höhe der Schweißnaht
I	integrierte Signalintensität
$I(k)$	Interferenzspektrum auf einem Zeilendetektor
I^{GW+}	oberer Schwellwert für die integrierte Signalintensität
I^{GW-}	unterer Schwellwert für die integrierte Signalintensität
k	Pixelpositionen auf einem Zeilendetektor
L_B	Länge des Bereichs mit bessel-ähnlichem Strahlprofil
$n_{B/mod}$	Anzahl der applizierten Pulse je Schmelzvolumen

n_B	Anzahl der Pulse in einem Burst
n_{ges}	Anzahl der Bereiche ohne gültiges Messsignal
n_G	Brechungsindex des Glases
n_R	Anzahl der Newton'schen Ringe
NA	numerische Apertur
P	Leistung des Laserstrahls
p	Grenzflächenposition innerhalb eines Schmelzvolumens
P_1	erstes Signalmaximum eines Fotodiodensignals
P_2	zweites Signalmaximum eines Fotodiodensignals
R_{FN}	Falsch-Negativ-Rate
R_{FP}	Falsch-Positiv-Rate
rn	Anzahl der richtig-negativen Ergebnisse
rp	Anzahl der richtig-positiven Ergebnisse
S	Spezifität
$S(t)$	zeitabhängiges Fotodiodensignal
S_{max}	maximale Signalintensität
S_{max}^{GW+}	oberer Schwellwert für die maximale Signalintensität
S_{max}^{GW-}	unterer Schwellwert für die maximale Signalintensität
S_{min}	Intensität des lokalen Signalminimums
S_{min}^{GW}	Schwellwert für die Intensität des lokalen Signalminimums
S_{P2}	Intensität des zweiten lokalen Signalmaximums
S_{P2}^{GW}	Schwellwert für das zweite lokale Signalmaximum
S_T	Schwellwert für die minimale Signalintensität
t	Zeit
t_A	Beginn der Schmelzvolumenentstehung
t_E	Ende der Schmelzvolumenentstehung
t_G	Zeitpunkt des Signaleinbruchs

t_p	Dauer vom Nahtentstehungsbeginn bis zum Erreichen der Grenzfläche
t_w	Wachstumsdauer eines einzelnen Schmelzvolumens
v	Vorschubgeschwindigkeit
x	x-Koordinate
y	y-Koordinate
z	Tiefe
z_1	mittlere Tiefe der Hohlräume an der oberen Nahtgrenze
z_2	mittlere Tiefe der Hohlräume an der unteren Nahtgrenze
z_L	Position von Hohlräumen an der Nahtoberkante
z_{surf}	Position der Glasoberfläche
z_S	ideale Grenzflächenposition innerhalb eines Schmelzvolumens
z_U	Position von Hohlräumen an der Nahtunterkante
z_{VE1}	Position der Schweißnahtoberkante
z_{VE2}	Position der Schweißnahtunterkante
z_{VE3}	Position der Oberkante des inneren, fehlerfreien Schweißnahtbereichs
z_{VE4}	Position der Unterkante des inneren, fehlerfreien Schweißnahtbereichs

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog-Digital-Wandler (Analog Digital Converter)
A-Scan	Tiefenprofil
B-Scan	ortsabhängiges Tiefenprofil
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
F	Fotodiode
FD	Frequenzbereich (Fourier-Domain)
FE	Femto Edition
FN-Rate	Falsch-Negativ-Rate
FP-Rate	Falsch-Positiv-Rate
fps	Frames pro Sekunde
FT	Fourier-Transformation
FWHM	Halbwertsbreite (Full Width at Half Maximum)
HSC	Hochgeschwindigkeitskamera
HWP	$\frac{\lambda}{2}$ -Verzögerungsplatte (Half Wave Plate)
norm.	normiert
OCT	Optische Kohärenztomografie
QWP	$\frac{\lambda}{4}$ -Verzögerungsplatte (Quarter Wave Plate)
Si	Silizium
TD	Zeitbereich (Time-Domain)
TEM00	Grundmode (Gaußstrahl)
TFP	Dünnschichtpolarisator (Thin Film Polarizer)
TTL	Transistor Transistor Logik
UKP-Laser	Ultrakurzpulslaser

VM	Volumenmodifikation
WEZ	Wärmeeinflusszone (Heat Affected Zone)
WWV	Wechselwirkungsvolumen
WWZ	Wechselwirkungszone

Kurzfassung der Arbeit

Beim Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslasern (UKP-Laser) führen nicht ideale Prozessparameter wie zu große Spalte zwischen den Fügepartnern, verunreinigte Werkstückoberflächen oder eine unzureichend positionierte Schweißnaht oftmals zu Schweißnahtunregelmäßigkeiten bis hin zu einer vollständigen Unterbrechung der Anbindung. Um bei der Umsetzung des Prozesses in der industriellen Fertigung eine gleichbleibend hohe Bauteilqualität zu gewährleisten und die Auslieferung von fehlerhaften Bauteilen zu verhindern, muss daher die Qualität der Schweißverbindung überprüft werden. Beim Schweißen von Glas mit UKP-Lasern erfolgt diese Prüfung oftmals subjektiv durch eine manuelle optische Prüfung. Die bisher fehlende Möglichkeit zur Überwachung des Prozesses während des Schweißens (inline) verhindert eine objektive und damit zuverlässige Bewertung des Prozesses.

In dieser Arbeit wird daher ein Verfahren zur Inline-Prozessüberwachung für das Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslasern entwickelt und evaluiert. Um reproduzierbare Schweißnähte mit gleichmäßiger Struktur zu gewährleisten und diese zielgenau zu bewerten, werden zunächst Techniken zur Unterdrückung gleichzeitig auftretender Wechselwirkungszonen entwickelt. Diese Untersuchungen zur Nahtentstehung und Prozessoptimierung bilden dabei die Grundlage zur Überwachung des Schweißprozesses. Die Fehlerentstehung wird untersucht und relevante Signalmerkmale, die eindeutig auf das Prozessergebnis hindeuten, ermittelt. Anhand dieser Merkmale wird anschließend ein Überwachungssystem entwickelt und in einen Demonstrator überführt. Die Erprobung des Verfahrens erfolgt in einem Industrieprozess zur Herstellung von Spiegelarrays für Multipass-Scheibenlaser-Verstärker.

Extended Abstract

The mechanical, optical and chemical properties of glass enable countless applications in everyday life. Manufacturing of many products requires bonding of glass components, which means that joining glass samples is an important step in the assembly process. In joining by welding, a long-term stable, liquid- and gas-tight connection is achieved, by locally melting the parts to be joined. The mechanical and chemical properties of this bond correspond to those of the bulk material. For this reason, welding is often superior to alternative bonding techniques such as adhesive bonding, soldering, gating or diffusion bonding. For welding of glass ultrafast lasers are used in addition to CO₂ lasers. Due to defects such as gaps between the joining partners, process irregularities can occur, resulting in faulty bonded parts. Quality inspection in welding of glass with ultrafast lasers is often performed subjectively by manual inspection. Thus, insufficient information regarding the quality of the bond might be available. An inline process monitoring system, on the other hand, can provide an objective assessment and thus help to prevent the issue of faulty parts. So far, methods for inline process monitoring are not documented for glass welding. For this reason, the aim of this research is to develop a method for inline process monitoring for the welding of glass with ultrashort pulse lasers.

In a first step, the seam formation in different materials was systematically investigated by analyzing the emitted process radiation. Regarding the formation of in-volume modifications, two major regimes were identified in the investigated parameter range: A regime where molten volumes are formed one by one and another regime where several molten volumes are formed simultaneously. Molten volumes are formed simultaneously, when the laser radiation that is transmitted through an interaction zone is sufficient to form further interaction zones below. Whereas, with individually formed molten volumes the interaction zone is not transparent enough to allow the formation of further interaction zones. Since irregular seam structures result in stress for micro-welding of glass, process regimes exhibiting a regular formation of the molten volumes are considered advantageous to avoid reduced strength or susceptibility to cracking.

The occurrence of simultaneous interaction zones and the resultant irregular seam formation were avoided by modulating the average laser power or by using a Bessel-like beam profile. A modulated laser power was used to achieve the formation of individual molten volumes at regular intervals for both a Gaussian-shaped and a Bessel-like beam

profile, resulting in a predictable and reproducible weld with a regular structure. However, the formation of the individual molten volumes depends on the beam shape. With a gaussian beam profile the molten volumes longitudinally grow from near the geometrical focus towards the direction of the incident laser radiation. Whereas with the Bessel-like beam profile the molten volumes expand symmetrically away from the center. With the Bessel-like beam profile the cylindrically symmetrical lateral incidence of the radiation avoids shadowing along the beam axis and thus prevents a periodic upward movement of the interaction zone. When the average laser power is not modulated, the Bessel-like beam profile creates an elongated interaction volume that continuously melts material, whereby a homogeneous seam structure was achieved.

The investigations of the seam formation build the foundation for monitoring individually produced fusion volumes by means of a photodiode. During the welding process, recording of the plasma emission by a photodiode can provide information about the process and is suitable to differentiate between various regimes. By modulating the average laser power, monitoring of each individually produced molten volume within a welded seam is enabled. Deviations from the expected plasma emission indicate process irregularities and defects. The signal provides information about the quality of the bond and whether a gap between the samples existed. In the case that a gap is present, additional localization of the interface within the molten volumes is possible. For additional diagnostics, monitoring with photodiodes can be combined with an OCT-based method to detect the seam position in optically contacted joining partners or a camera-based system for crack detection.

Based on the signal data from the photodiode, a process monitoring system is finally developed for power-modulated processes. In order to evaluate the seam quality by means of the emitted process radiation, each individually generated molten volume within a weld seam is evaluated, to determine whether a permanent bond has been created. A decision tree is used to classify the molten volumes by selected features that specify the state of a molten volume unambiguously. Both the selection of features and the designed decision tree are based on the underlying process physics, allowing the development of the classification model without the use of machine learning methods. In addition, specific evaluation criteria are used to finally evaluate the quality of the laser welded bond. In order to demonstrate process monitoring, the developed method was implemented at TRUMPF in an industrial process for manufacturing mirror arrays for multipass disk laser amplifiers. Here, the new method enables fully automated operation of the manufacturing system and ensures economical production of mirror arrays.

Due to the ongoing developments in the field of welding of glass with ultrafast lasers, further applications and industrial implementations are expected in the future. The developed method for process monitoring is a valuable approach for process automation and can contribute to the industrial implementation of glass welding processes performed by ultrafast lasers. In addition to the development of a process for correcting faulty welds, a further development of the method is the integration of an OCT system in order to detect the seam position inline for optically contacted glasses and thus to enable quality monitoring or control of the seam position in this situation as well. In terms of processing, the modulation pattern represents a so far unused degree of freedom for process optimization.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation: Stand der Technik

Glas hat das Leben der Menschheit revolutioniert. Aufgrund seiner herausragenden optischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften findet es in unterschiedlichen Bereichen unzählige Anwendungsmöglichkeiten. In der Telekommunikation, Verbraucherelektronik, Chemie, Medizin und Pharmazie kommt Glas beispielsweise in Form von Glasfasern zur Datenübertragung [1], Laborausüstung wie Gläsern zur Aufbewahrung chemischer Substanzen oder Kolben zur Synthese von Stoffen [1, 2], Displaygläser für Smartphones [1, 3] oder Ampullen für Medikamente zum Einsatz [1]. Weiterhin legte die Entdeckung der Glaslinse mit der darauffolgenden Entwicklung des Mikroskops und des Teleskops einen entscheidenden Grundstein für die Wissenschaft und damit für den gegenwärtigen Stand des technischen Fortschritts [4].

Spezifische Anwendungsbereiche wie optische Komponenten [5, 6], technische Gehäuse [6, 7] oder die Kapselung von medizinischen Implantaten und Sensoren [8] erfordern oftmals eine dauerhafte und stoffschlüssige Verbindung von Gläsern, um ihre Funktion zu erfüllen. Das dauerhafte Verbinden von Werkstücken wird als Fügen bezeichnet und ist in der DIN-Norm 8580 als eine von insgesamt sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren definiert [9]. Eine Untergruppe des Fügens stellt das Fügen durch Schweißen dar. Bild 1.1 zeigt eine Strukturgrafik zur Einordnung des Schweißens unter den Fügeverfahren. Beim Schweißen von Glas wird durch das lokale Aufschmelzen der Fügepartner eine langzeitstabile sowie potenziell flüssigkeits- und gasdichte Schweißverbindung erreicht, die in ihren mechanischen und chemischen Eigenschaften denen des Grundmaterials entspricht. Aufgrund dieser Eigenschaften ist das Schweißen alternativen Fügeverfahren für Gläser, wie dem Kleben [10–12], dem Löten [13], dem Ansprengen [14] oder dem Diffusionschweißen [15, 16] hinsichtlich der Festigkeit [17] und Langzeitstabilität [10–12, 17] oftmals überlegen.

Für das Schweißen von Glas kommen heutzutage Laser zum Einsatz. Die Verwendung von CO₂-Lasern mit einer Wellenlänge von 10,6 µm ist dabei ein etablierter Prozess, der bereits industriell Anwendung findet [17, 19]. Typische Gläser sind in diesem Wellenlängenbereich in der Regel opak, wodurch die Strahlung nahe an der Oberfläche li-

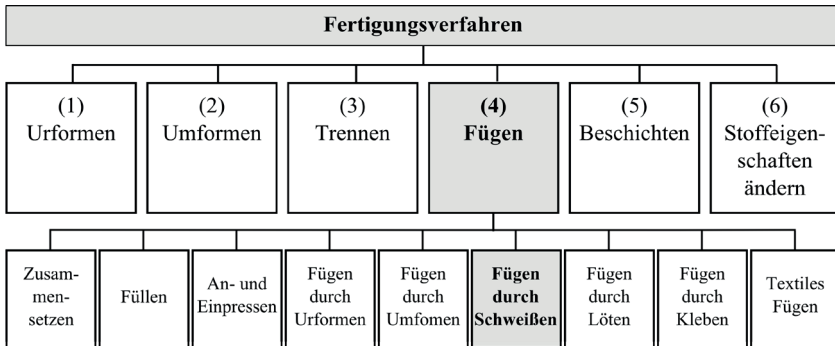


Bild 1.1: Strukturgrafik zur Einordnung der Fügeverfahren nach [9, 18].

near absorbiert wird. Beim Schweißen von Glas mit CO_2 -Lasern werden zwei Verfahren unterschieden: das Wärmeleitungsschweißen und das Tiefschweißen [17]. Beim Wärmeleitungsschweißen wird das Glas oberflächlich entlang der Fügezone aufgeschmolzen, ohne das Material zu verdampfen. Im Gegensatz dazu wird beim Tiefschweißen die Verdampfungstemperatur überschritten, wodurch sich, wie beim Schweißen von Metallen, eine Dampfkapillare ausbildet. Die lokale Erwärmung des Materials führt sowohl beim Wärmeleitungsschweißen als auch beim Tiefschweißen zu großen Temperaturgradienten. Dadurch entstehen beim Abkühlen häufig Risse [17]. Das Schweißen von Glas mit CO_2 -Lasern eignet sich daher nur für Gläser mit geringem Wärmeausdehnungskoeffizienten, wie beispielsweise Quarzglas.

Um Gläser mit einem größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten als Quarzglas durch Schweißen zu fügen, werden heutzutage Ultrakurzpuls laser mit Wellenlängen im nahen Infrarotbereich eingesetzt. Gläser sind in diesem Wellenlängenbereich aufgrund ihrer Bandlücke in der Regel transparent. Mit Pulsdauern im Bereich von Piko- oder Femtosekunden werden bei geeigneter Fokussierung Intensitäten von mehreren Gigawatt pro Quadratzentimeter erreicht [20]. Bei derart hohen Intensitäten können nichtlineare Absorptionseffekte auftreten, die eine Bearbeitung transparenter Materialien [21, 22] und damit das Schweißen von Glas ermöglichen [23]. Da die Absorption nichtlinear von der Intensität abhängt und unterhalb einer Schwellintensität nicht auftritt, kann das erzeugte Schmelzvolumen durch geschickte Fokussierung des Bearbeitungsstrahls nahezu beliebig im Volumen platziert werden. Die Glasoberflächen bleiben dabei unbeschadet. Dies ermöglicht das Schweißen aufeinanderliegender Fügepartner im Durchstrahlverfahren [24–28].

Die Voraussetzungen zur Herstellung einer Schweißverbindung mit einem UKP-Laser sind neben der Werkstoffeignung und geeigneter Wahl der Bearbeitungsparameter, eine saubere Kontaktierung der Fügepartner mit einem Spaltmaß von wenigen Mikrometern [29, 30] sowie eine präzise Nahtpositionierung im Bereich weniger Mikrometer [31]. Ein Spalt zwischen den Fügepartnern, verunreinigte Werkstückoberflächen oder eine unzureichend positionierte Schweißnaht führen oftmals zu Schweißnahtunregelmäßigkeiten oder zu einer Unterbrechung der Anbindung [27, 29]. Dadurch verringert sich die Stabilität, Dichtheit und die optische Qualität der Verbindung [27, 29]. Um im industriellen Maßstab eine gleichbleibend hohe Bauteilqualität zu gewährleisten und die Auslieferung von fehlerhaften Bauteilen zu verhindern, muss die Qualität der Schweißverbindung überprüft werden.

Die Qualitätsprüfung beim Schweißen von Glas mit UKP-Lasern erfolgt oftmals manuell durch eine einfache Sichtprüfung mit dem bloßen Auge oder einem Mikroskop [32–36]. Alternativ kommen zerstörende Prüfmethoden wie Querschliffe [36] oder Festigkeitsmessungen [32–34] zum Einsatz, nach denen das Werkstück nicht mehr verwendet werden kann. Der Überwachungsprozess ist durch die manuelle Prüfung zeitaufwendig und kostenintensiv, wodurch die Wirtschaftlichkeit dieser Glasschweißprozesse kaum nachgewiesen werden kann. Eine subjektive Einschätzung, wie sie bei einigen manuellen Prüfungsverfahren erforderlich ist, kann dazu führen, dass unzureichende Informationen über die Qualität der Verbindung vorliegen. Eine objektive Bewertung kann die Qualität von Schweißverbindungen bestimmen und eine Auslieferung von fehlerhaften Bauteilen verhindern [37]. Erfolgt diese Bewertung während des Prozesses, und damit inline, kann bei einer schlechten Verbindung potentiell während des Fügeprozesses nachgeregelt werden. Dadurch reduziert sich der Ausschuss, was zu einer höheren Wertschöpfung beiträgt.

Die automatisierte Überwachung von Laserschweißprozessen ist in der Lasermaterialbearbeitung ein etablierter Prozess, der für eine qualitativ hochwertige Produktion oftmals einen wesentlichen Faktor darstellt [38–40]. Insbesondere für das Schweißen von Metallen sind neben optischen [41–43] und bildbasierten [44] Verfahren eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten zur Prozessüberwachung [38–40] bekannt. Die Überwachung von Glasschweißprozessen beschränkt sich dagegen auf den Einsatz von Pyrometern, die beim Schweißen mit CO₂-Lasern zur Erfassung der Oberflächentemperatur des Werkstücks eingesetzt werden, um die Laserleistung zu regeln [45, 46]. Ein Verfahren zur Inline-Prozessüberwachung für das Schweißen von Glas mit UKP-Lasern wurde bisher nicht publiziert. Automatisierte Lösungen beschränken sich lediglich auf die Vermessung der Werkstückoberfläche, liefern jedoch keine Information über die Qualität des Schweißergebnisses [7, 47].

Für die Industrie besteht die Herausforderung darin, den Prozess der Überwachung reproduzierbar zu gestalten und eine automatisierte Inline-Prozessüberwachung durch eine wissenschaftliche Begleitforschung einzuführen.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Inline-Prozessüberwachung für das Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslasern, das dazu geeignet ist, die Qualität von Schweißverbindungen zu bewerten. Basierend auf dem Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse und verschiedenen Ansätzen zur Prozessoptimierung soll dazu ein Verfahren entwickelt werden, das ein koaxial zum Bearbeitungsstrahl angeordnetes und in eine Bearbeitungsanlage integrierbares Sensorsystem nutzt. Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit befasst sich daher mit der Analyse und Steuerung der Nahtentstehung von Glasschweißprozessen. Die Aufgabe ist es, gleichzeitig auftretende Wechselwirkungszonen zu unterdrücken, dadurch reproduzierbare Schweißnähte mit gleichmäßiger Struktur zu gewährleisten und diese zielgenau zu bewerten. Die Untersuchungen zur Nahtentstehung bilden die Grundlage zur Überwachung einzeln hergestellter Schmelzvolumen. Dabei stehen die Untersuchung der Fehlerentstehung und die Identifikation relevanter Signalmerkmale, die eindeutig auf das Prozessergebnis hindeuten, im Vordergrund. Um die Detektierbarkeit der Nahtposition bei optisch kontaktierten Fügepartnern zu gewährleisten, soll zudem ein passendes Messverfahren evaluiert werden. Hierbei steht die Definition relevanter Kenngrößen zur Detektion der Schweißnahtposition und die Charakterisierung von Schweißnähten in verschiedenen Materialien im Vordergrund. Basierend auf den identifizierten Signalmerkmalen, soll abschließend eine Prozessüberwachung entwickelt und in einem Industrieprozess demonstriert werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Nach der Einleitung wird in Kapitel 2 die Nahtentstehung beim Schweißen von Glas in verschiedenen Materialien untersucht. Die Untersuchung der Nahtentstehung erfolgt anhand der räumlichen und zeitlichen Entwicklung der emittierten Prozessstrahlung, die mit einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet wird. Zur erweiterten Diagnostik detektiert eine Fotodiode den

Intensitätsverlauf der emittierten Prozessstrahlung. Durch das erlangte Prozessverständnis lassen sich geeignete Anforderungen an die Prozessoptimierung und -überwachbarkeit ableiten.

Um beim Schweißen eine regelmäßige Nahtausbildung und damit einen reproduzierbaren und überwachbaren Prozess zu gewährleisten, folgt im nächsten Kapitel eine Diskussion spezifischer Techniken zur Optimierung der Nahtentstehung. Gegenstand der Untersuchungen ist die Wirkung der zeitlich und räumlich modulierten Energieeinkbringung. Hierzu wird die Prozessdynamik für die beiden Ansätze Leistungsmodulation und Strahlformung zunächst getrennt und anschließend kombiniert betrachtet. Die Analyse der Prozessdynamik erfolgt mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen.

Basierend auf den Erkenntnissen von Kapitel 2 und Kapitel 3, wird in Kapitel 4 auf die Überwachung leistungsmodulierter Prozesse mit einer Fotodiode eingegangen. Die Überwachung basiert auf einzeln hergestellten Schmelzvolumen, die überlappend eine durchgängige Schweißnaht bilden. Die Fehlerentstehung wird untersucht und relevante Signalmerkmale, die eindeutig auf das Prozessergebnis hindeuten, identifiziert. Um die Nahtposition auch bei optisch kontaktierten Gläsern überwachen zu können, wird ergänzend ein Ansatz zur Detektion der Nahtposition durch optische Kohärenztomografie vorgestellt. Dieser Abschnitt umfasst neben der Offline-Charakterisierung von Volumenmodifikationen in verschiedenen Materialien mit einem kommerziellen OCT-System die Demonstration einer Positionserkennung und diskutiert die Umsetzbarkeit einer Inline-Prozessüberwachung.

In Kapitel 5 steht die Entwicklung und Demonstration eines Überwachungssystems zur Qualitätskontrolle basierend auf einer Fotodiode im Vordergrund der Betrachtung. Anhand identifizierter Merkmale, die das Prozessergebnis beim leistungsmodulierten Schweißen eindeutig beschreiben, wird eine Methode zur Bewertung einzelner Schmelzvolumen vorgestellt und mit der entwickelten Systemtechnik zur Überwachung des Schweißprozesses in einem Überwachungssystem zusammengeführt. Zur Demonstration der Prozessüberwachung wurde das entwickelte Verfahren in einem Industrieprozess zur Herstellung von Spiegellarrays für Multipass-Scheibenlaser-Verstärker umgesetzt.

Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungsfelder.

2 Experimente zur Untersuchung der Nahtentstehung beim Glasschweißen

Beim Schweißen von Glas erzeugen nichtlineare Absorptionseffekte und Wärmeakkumulation nahe des geometrischen Fokus ein Plasma (Wechselwirkungszone), das sich ausdehnt und in Richtung des einfallenden Laserstrahls bewegt [48–50]. Die Wechselwirkungszone bewegt sich in Richtung der Laserstrahlquelle, da die Laserstrahlung durch Avalanche-Anregung überwiegend an der Vorderseite des optisch dichten Plasmas absorbiert wird [48, 49, 51]. Sobald der Energieverlust durch die Wärmeleitung größer ist als die Energie, die durch den Laserstrahl zugeführt wird, erlischt die Wechselwirkungszone und der Prozess startet nahe des geometrischen Fokus erneut [48–50]. Dadurch entstehen periodisch einzelne Schmelzvolumen, die in Richtung der einfallenden Laserstrahlung orientiert sind. Die resultierenden Schweißnähte zeigen eine periodische Struktur [48–50].

Während des Schweißprozesses weist die emittierte Prozessstrahlung auf die Bildung von Schweißnähten hin. Die Intensität ändert sich periodisch infolge der variierenden Ausdehnung und Temperatur der Wechselwirkungszone [48]. Neben verschiedenen Ansätzen zur Modellierung [48, 51, 52] wird die Prozessdynamik beim Schweißen von Glas mit ultrakurzen Laserpulsen typischerweise zeitlich hochaufgelöst mit einer Hochgeschwindigkeitskamera untersucht. Hierbei kommen unterschiedliche Methoden zum Einsatz, bei denen die emittierte Prozessstrahlung räumlich aufgelöst erfasst [48–50], die Prozesszone im Durchlicht beobachtet [53] oder transiente Spannungen [5] detektiert werden.

Im Hinblick auf die Verbesserung der industriellen Umsetzbarkeit von Glasschweißprozessen mit UKP-Lasern beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Untersuchung der Nahtentstehung beim Glasschweißen [54]. Hierzu wird die emittierte Prozessstrahlung und die Entstehung der resultierenden Schweißnaht räumlich und zeitlich hochaufgelöst erfasst. Der Fokus liegt auf der Untersuchung von Schweißprozessen, die mit Pulszügen (Bursts) umgesetzt werden. Die Verwendung von Bursts anstelle von äquidistanten Pulsen ist ein Ansatz zur Prozessoptimierung und Skalierung des Durchsatzes beim Glasschweißen [5, 31, 55, 56]. Diese Form der zeitlichen Energieeinbringung ermöglicht die Reduzierung transienter Spannungen, die beim Schweißen oftmals Risse

induzieren [55]. Des Weiteren ändert sich durch die Verwendung von Bursts die Modifikationsform, wodurch eine Umverteilung permanenter Spannungen erreicht wird [56]. Dies kann sich positiv auf die Stabilität einer Verbindung auswirken, wenn Risse trotz des geringen Nahtabstandes nicht von Naht zu Naht propagieren. Darüber hinaus erlauben beispielsweise die erreichten höheren Festigkeiten bei Alkali-Aluminosilikatglas eine Verringerung der relativen aufgeschmolzenen Fläche geschweißter Teile, beispielsweise durch eine geringere Anzahl von Schweißnähten [31].

2.1 Absorption und Wärmeakkumulation in transparenten Materialien

Gläser sind in der Regel aufgrund ihrer Bandlücke von mehreren Elektronenvolt im sichtbaren und nahen infraroten Wellenlängenbereich transparent. Die Bandlücke ist gegenüber der Energie eines Photons in diesem Spektralbereich um ein Vielfaches höher, sodass die Absorption eines einzelnen Photons nicht ausreicht, um die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband zu überwinden und dadurch ein Elektron aus dem Valenz- ins Leitungsband anzuheben. Damit ein Elektron die Bandlücke überwinden kann, ist die gleichzeitige Absorption mehrerer Photonen für den oben genannten Wellenlängenbereich erforderlich. Dieser Prozess wird Multiphotonenabsorption genannt. [22, 57]

Liegen beispielsweise durch Multiphotonenabsorption induzierte, quasifreie Elektronen im Leitungsband vor, können diese durch inverse Bremsstrahlung zusätzlich Strahlung absorbieren, wodurch ihre kinetische Energie zunimmt. Überschreitet die Energie eines quasifreien Elektrons das Leitungsbandminimum um mehr als die Energie, die zur Überwindung der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband erforderlich ist, kann dieses Elektron durch Stoßanregung ein anderes Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband befördern und selbst im Leitungsband verbleiben. Durch die Fortsetzung des Prozesses steigt die Anzahl quasifreier Elektronen lawinenartig an (Avalanche-Anregung). [17, 22, 58]

Die Elektronen geben ihre Energie auf einer Pikosekunden-Zeitskala durch Elektron-Phonon-Kopplung an das Gitter ab [21]. Ist die Zeit zwischen den Laserpulsen kürzer als die thermische Diffusionszeit, kommt es zu einer Akkumulation der thermischen Energie im Einbringungsvolumen. Auf diese Weise erwärmt sich dort das Material [23]. Bei ausreichend hohem Wärmeeintrag wird die Schmelztemperatur überschritten und das Material schmilzt lokal auf [23, 26].

2.2 Systemtechnik und Auswertemethodik

Um die Nahtentstehung beim Schweißen von Glas zu untersuchen, wurde der Schweißprozess anhand von Volumenmodifikationen in unterschiedlichen Materialien über einen großen Parameterbereich hinweg analysiert. Für die Untersuchung kam eine Hochgeschwindigkeitskamera (HSC) zum Einsatz, welche die Prozesszone zeitlich hochaufgelöst beobachtet. Eine alternierende Beleuchtung der Prozesszone ermöglicht es, abwechselnd das Prozessergebnis und die emittierte Prozessstrahlung im zeitlichen Abstand von 20 μ s zu beobachten. Dadurch stehen beide Aufnahmen in einem direkten Zusammenhang. Bei zwei Prozessen, die einmal mit und einmal ohne Beleuchtung aufgenommen werden, wäre dies nicht der Fall. Ergänzend erfolgte die Überwachung der Intensität der emittierten Strahlung mit einer Fotodiode.

2.2.1 Versuchsaufbau

Die Nahtentstehung wurde in den zwei technisch relevanten Werkstoffen Quarzglas (Corning® 9780 [59]) und ungehärtetem Alkali-Aluminosilikatglas (Corning® Gorilla® Glas [60]) untersucht. Quarzglas ist eines der wichtigsten Hochleistungsmaterialien für die wissenschaftliche Forschung und die Industrie [61], während Alkali-Aluminosilikatglas vor allem bei der Herstellung von Displaygläsern im Bereich der Verbraucherelektronik Anwendung findet [62, 63]. Die beiden Materialien sind in ihren Eigenschaften sehr unterschiedlich. Quarzglas kann aufgrund einer Bandlücke von 9 eV [64] im NIR-Spektralbereich mit Leistungen von 10 W [47] bis 18 W und Intensitäten im Bereich von 1,2 TW/cm² [7] bearbeitet werden. Alkali-Aluminosilikatglas benötigt aufgrund seiner geringeren Bandlücke von 4,2 eV [65] weniger Leistung und ist aufgrund der mehr als 13-mal höheren Wärmeausdehnung im Vergleich zu Quarzglas [59, 60] anfälliger gegenüber spannungsbedingter Defekte [36]. Für die Versuche wurden polierte Flachgläser mit einer Länge von 40 mm und einer Breite von 20 mm verwendet. Die Dicke der Quarzglas-Proben betrug 2 mm. Die Proben aus Alkali-Aluminosilikatglas waren 700 μ m dick. Um die emittierte Prozessstrahlung und die Prozesszone beim Schweißen ohne störende Reflexionen an der Grenzfläche oder spaltbedingte Defekte durch unzureichend kontaktierte Proben mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zu untersuchen, wurden 2 mm lange Schweißnähte im Vollmaterial (Volumenmodifikation) 1,5 mm unterhalb der schmalen Seitenfläche der Probe erzeugt, siehe Bild 2.1.

Der Versuchsaufbau zur zeitlich hochaufgelösten Analyse der Plasmaemission beim Schweißen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und einer Fotodiode ist in Bild 2.2

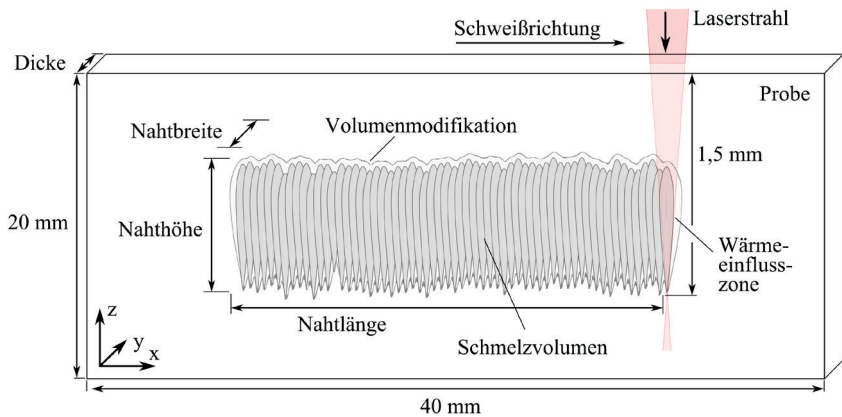


Bild 2.1: Schematische Darstellung einer Schweißnaht im Vollmaterial (Volumenmodifikation)

dargestellt. Für die Experimente kam ein Prototyp des TRUMPF Lasers TruMicro 2030 Femto Edition zum Einsatz, der gepulste Strahlung in der Grundmode TEM₀₀ mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1030$ nm und einer maximalen mittleren Ausgangsleistung von $P = 20$ W emittierte. Die Dauer τ der einzelnen Pulse betrug 300 fs. Darüber hinaus bot das Lasersystem die Möglichkeit, Pulszüge (Bursts) mit einer Anzahl von zwei bis acht Pulsen in verschiedenen Mustern zu konfigurieren [66]. Zur Herstellung der Volumenmodifikationen wurden Bursts mit einer Anzahl von $n_B = 8$ Pulsen bei einer Burst-Repetitionsrate von $f_B = 250$ kHz verwendet. Somit standen maximal 80 μ J Burstenergie zur Verfügung. Bild 2.3 zeigt das Schema des Burstmusters. Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Pulsen innerhalb eines Bursts ist durch die Repetitionsrate des Seedlasers $f_s = 50$ MHz definiert und betrug 20 ns.

Der emittierte Laserstrahl mit einem $1/e^2$ -Durchmesser von 5 mm wurde durch ein Mikroskopobjektiv mit einer numerischen Apertur von $NA = 0,25$ und einer Brennweite von $f = 20$ mm in die Glasproben fokussiert. Dadurch ergab sich rechnerisch ein Fokusbereich von $d_f = 7,9 \mu\text{m}$. Die Burstenergie auf dem Werkstück wurde durch die Kombination eines Dünnpolarisators (TFP) und einer $\lambda/2$ -Platte (HWP) auf maximal 50 μJ begrenzt. Um richtungsabhängige Effekte durch die Polarisation zu vermeiden, wurde die linear polarisierte Strahlung des Lasers durch eine $\lambda/4$ -Platte (QWP) zirkular polarisiert, siehe Bild 2.2.

Die emittierte Prozessstrahlung wurde mit demselben Mikroskopobjektiv kollimiert, sodass diese entgegengesetzt zum Bearbeitungsstrahl propagierte. Die Trennung der Pro-

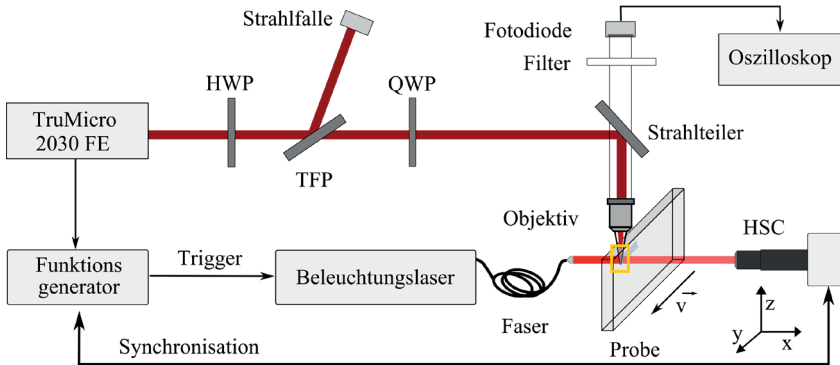


Bild 2.2: Versuchsaufbau zur zeitlich hochaufgelösten Analyse der Plasmaemission beim Schweißen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und einer Fotodiode. In Anlehnung an [54]

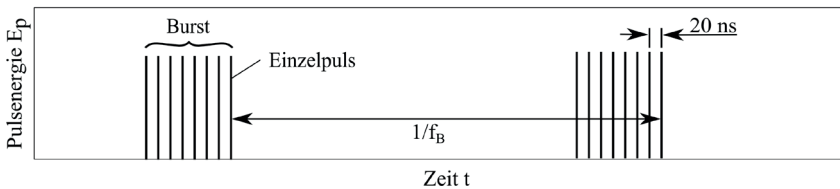


Bild 2.3: Die zum Schweißen der Glasproben verwendeten Bursts bestanden aus acht einzelnen Laserpulsen, die im Abstand von 20 ns angeordnet waren. Der Abstand zwischen den Bursts betrug $1/f_B = 4 \mu\text{s}$. [54]

zessstrahlung vom Bearbeitungsstrahl erfolgte mit Hilfe eines dichroitischen Strahlteilers. Ein Filter, der Licht im Wellenlängenbereich von 475 nm bis 1000 nm transmittiert, filterte zusätzlich die eventuell von der Probe oder dem Plasma zurückreflektierte Laserstrahlung heraus. Die Intensität der emittierten Prozessstrahlung wurde mit einer Si-Fotodiode detektiert, die eine Sensitivität im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 1100 nm aufwies. Ein Oszilloskop erfasste die Fotodiodensignale und speicherte diese zur weiteren Verarbeitung ab.

Zur Analyse der Nahtentstehung und deren Korrelation mit den aufgezeichneten Fotodiodensignalen wurde die Wechselwirkungszone in einem Spektralbereich von 798 nm bis 818 nm (FWHM) mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (FASTCAM Mini AX200, Photron) bei einer Bildrate von 50.000 fps beobachtet. Die Belichtungszeit betrug $4 \mu\text{s}$ je

Frame und entspricht damit der Zeit zwischen zwei Bursts. Um das Ereignis einzelner Bursts aufzuzeichnen, wurde die Hochgeschwindigkeitskamera auf die Burst-Repetitionsrate $f_B = 250 \text{ kHz}$ des Lasers synchronisiert. Ein Funktionsgenerator wandelte hierfür das entsprechende TTL-Signal des Lasers in ein Signal mit einer Frequenz von 50 kHz um. Jedes zweite Bild dieser Sequenz wurde dazu verwendet, die Schweißnaht aufzunehmen, während die anderen Bilder die vom Prozess emittierte Strahlung aufzeichneten. Zur Aufnahme der Schweißnaht beleuchtete ein Beleuchtungslaser (HF-System, Cavitux) die Prozesszone mit Strahlung der Wellenlänge $\lambda = 810 \text{ nm}$, siehe Bild 2.2. Eine Linse, die am Ende der faserbasierten Strahlführung montiert war, kollimierte dazu den Strahl des Beleuchtungslasers. Um jedes zweite Bild zu beleuchten, triggerte der Funktionsgenerator den Beleuchtungslaser bei einer Frequenz von 25 kHz .

2.2.2 Datenanalyse

Die Bilder der Schweißnaht und die der emittierten Prozessstrahlung wurden für die weitere Analyse in zwei Videosequenzen aufgeteilt. Bild 2.4 zeigt typische Ergebnisse anhand des Bildes einer Schweißnaht (a), einem Bild der dazugehörigen Prozessemission (b) und dem von der Fotodiode aufgezeichneten zeitlichen Intensitätsverlauf (c), die während der Herstellung einer Volumenmodifikation in Quarzglas aufgenommen wurden. Die Modifikation entstand bei einer mittleren Laserleistung $P = 2,5 \text{ W}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit $v = 10 \text{ mm/s}$. Der z-Nullpunkt der Hochgeschwindigkeitsbilder bezieht sich auf die Glasoberfläche. Bild 2.4 (d) zeigt das zeitaufgelöste Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung. Zur Erstellung dieser Grafik wurde jedes Bild der emittierten Prozessstrahlung in der x-Richtung integriert und die resultierenden Intensitätsprofile über die Zeit aufgetragen.

Sowohl das Bild 2.4 (a) als auch (b) zeigt eine einzelne Wechselwirkungszone (WWZ). Diese bewegt sich während des Schweißprozesses in Richtung der Laserstrahlquelle. Das Zusammenspiel von linearen und nichtlinearen Absorptionseffekten generiert ein Plasma und schmilzt das Material lokal auf. Da sich die Absorption aufgrund der optischen Dichte des Plasmas an der bestrahlten Vorderseite des Plasma konzentriert und das dahinterliegende Volumen abschirmt, kommt es zu einer Aufwärtsbewegung der Wechselwirkungszone [48, 49, 51]. Reicht die Intensität im Strahl aufgrund der Strahldivergenz nicht mehr aus, um die Wechselwirkungszone aufrecht zu erhalten, erlischt diese und der Prozess startet nahe des geometrischen Fokus erneut [48–50]. Nach rund einer Millisekunde beginnt der Prozess in der Nähe des geometrischen Fokus des Strahls erneut. Die so erzeugte Volumenmodifikation wird daher mit einer charakteristischen periodischen Signatur ausgebildet. Jeder dieser Zyklen erzeugt ein individuelles und dauerhaft

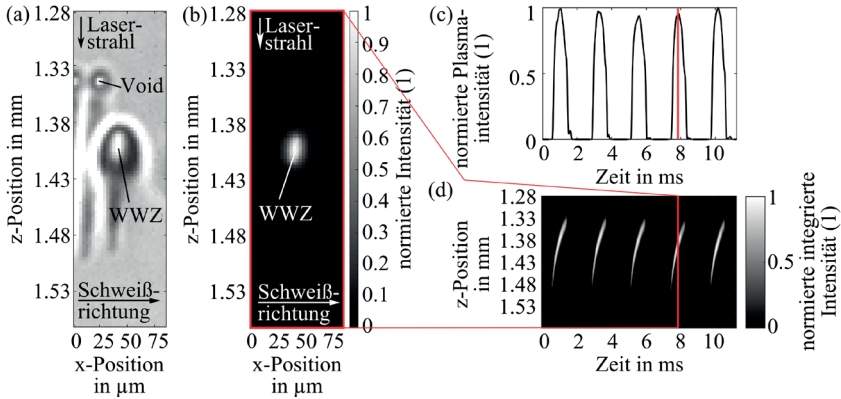


Bild 2.4: (a) Bild der Schweißnahtentstehung. (b) emittierte Strahlung infolge der Wechselwirkung. (c) Zeitliche Entwicklung der Strahlungsintensität, wie sie vom Fotodetektor aufgezeichnet wurde. (d) Zeitaufgelöstes Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung. [54]

sichtbares Schmelzvolumen, das in Bild 2.4 (a) zu sehen ist. Sowohl das Volumen der Wechselwirkungszone, das durch den Laserstrahl erwärmt wird, als auch die absorbierte Intensität ändert sich während der Aufwärtsbewegung. Dieses periodische Verhalten äußert sich in einer Änderung der Intensität der emittierten Prozessstrahlung, siehe Bild 2.4 (c). Das in (d) gezeigte zeitaufgelöste Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung stellt die Entwicklung der Wechselwirkungszone dar. Das Tiefenprofil veranschaulicht das Wachstum des Schmelzvolumens während des Schweißprozesses. Jeder Streifen (räumlich-zeitliche Trajektorie der Plasmaemission) zeigt die Bildung eines individuellen Schmelzvolumens an. Im Folgenden bezeichnet der Begriff Schmelzvolumen einen einzelnen Streifen. Gemäß des zeitaufgelösten Tiefenprofils der Plasmaemission in Bild 2.4 (d) misst die Wachstumsdauer t_w eines Schmelzvolumens etwa 1 ms. Dies entspricht einer Anzahl $n_{b/mod} = t_w * f_B$ von 250 Bursts. Die Steigung eines Schmelzvolumens (Streifen) ist proportional zur Wachstumsgeschwindigkeit.

2.3 Quarzglas

Werden Prozesse, wie oben beschrieben, analysiert, lassen sich anhand der zeitaufgelösten Tiefenprofile unterschiedliche Formen der Nahtentstehung in Quarzglas beobachten, siehe Bild 2.5. Die Grafik zeigt den Einfluss der Pulsenergie und der Vorschubgeschwindigkeit auf die Entwicklung der Wechselwirkungszone bei Burstenergien E_B zwischen $10 \mu\text{J}$

und 40 μJ und Vorschubgeschwindigkeiten v zwischen 5 mm/s und 40 mm/s. Der untersuchte Parameterbereich beschränkt sich hierbei auf Bearbeitungsparameter, bei denen keine Risse entstehen. Sofern nicht anders angegeben, kommt der Laserstrahl bei den zeitaufgelösten Tiefenprofilen von oben und es wird von links nach rechts geschweißt.

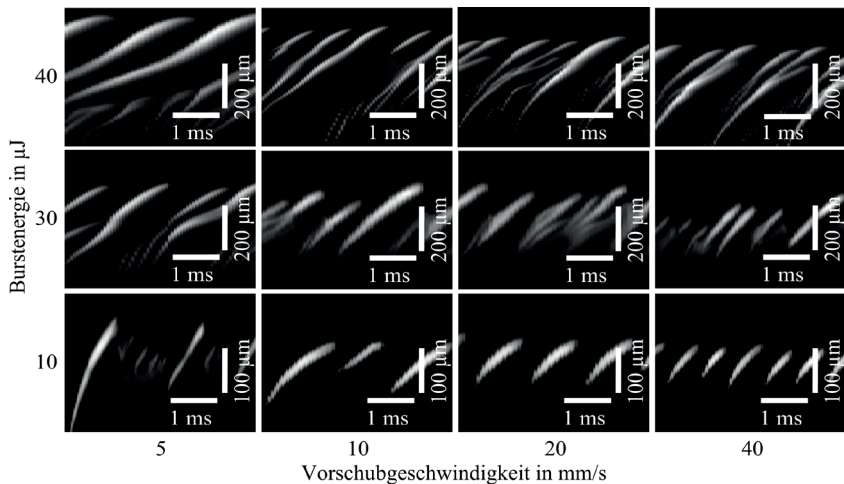


Bild 2.5: Zeitaufgelöste Tiefenprofile der Plasmaemission bei der Erzeugung von Volumenmodifikationen in Quarzglas bei verschiedenen Pulsenergien und Vorschubgeschwindigkeiten. [54]

Wie im vorherigen Abschnitt diskutiert, führen Energien von 10 μJ pro Burst zu zeitlich getrennten Schmelzvolumen. In der Nähe des geometrischen Fokus entstehen periodisch Schmelzvolumen, die sich in Richtung der Laserstrahlquelle ausbilden. Die Wachstumsrate nimmt während der Schmelzvolumenentstehung ab, was zu einer in Scanrichtung des Lasers gekrümmten Form des Streifens im zeitaufgelösten Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung führt. Bild 2.6 zeigt den Ausschnitt einer Volumenmodifikation, die mit einer Burstenergie von $E_B = 10 \mu\text{J}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s erzeugt wurde. Wie im Bild 2.6 zu sehen ist, weist die Volumenmodifikation nahe der oberen Nahtgrenze Hohlräume, sogenannte Voids, auf. Diese Hohlräume sind typisch für Schweißnähte in Quarzglas [67–69]. Aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen geht hervor, dass sich diese Hohlräume am Ende der Schmelzvolumenentstehung bilden. Die Entstehung der Hohlräume erklärt sich durch den schnellen Abkühlvorgang des geschmolzenen Materials, wodurch beim Erstarren ein Hohlraum zurückbleibt [68]. Es wird angenommen, dass die komplexen Oberflächenstrukturen der Hohlräume die Laserstrahlung streuen, nachdem das Plasma zerfallen ist [68,69]. Infolge dessen reduziert sich

die Intensität im Fokus. Liegt diese unterhalb der Schwellintensität für eine nichtlineare Absorption der Laserstrahlung, kommt es zu einer kurzzeitigen Prozessunterbrechung. Sobald aufgrund der Probenbewegung der Hohlraum die Laserstrahlung nicht mehr beeinflusst, startet der Prozess in der Nähe des geometrischen Fokus erneut, wodurch ein weiteres Schmelzvolumen entsteht.

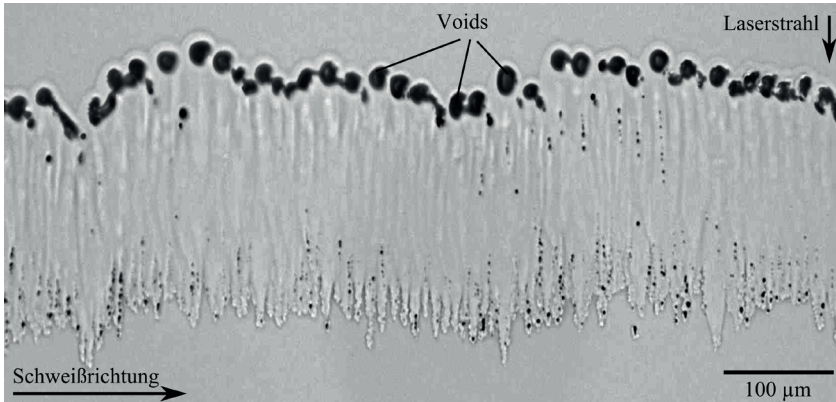


Bild 2.6: In Quarzglas hergestellte Volumenmodifikation mit Hohlräumen (Voids) an der oberen Nahtgrenze. [54]

Bei Burstenergien von 30 µJ und 40 µJ können mehrere Wechselwirkungszonen gleichzeitig beobachtet werden. Da in einer Wechselwirkungszone nur in den seltensten Fällen die gesamte Strahlung absorbiert wird [25], kann davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Wechselwirkungszonen nicht optisch dicht sind und dadurch nur einen Teil der verfügbaren Strahlung absorbieren. Die transmittierte Strahlung reicht aus, um im Fokus eine weitere Wechselwirkungszone zu induzieren. Jede der Wechselwirkungszonen bildet ein individuelles Schmelzvolumen und ist im zeitaufgelösten Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung als einzelner Streifen erkennbar. Im Allgemeinen führt die Erhöhung der Pulsenergie zu längeren Schmelzvolumen, die im zeitaufgelösten Tiefenprofil eine s-förmige Wachstumskurve aufweisen. Darüber hinaus entstehen zwischen großen Schmelzvolumen kleinere eigenständige Schmelzvolumen. Im Folgenden werden diese kleinen Schmelzvolumen als Zwischenmodifikation bezeichnet. Aus Bild 2.5 geht hervor, dass Zwischenmodifikationen überwiegend im oberen Bereich der Schweißnaht auftreten, da hier das Plasma optisch dünner wird und die Temperatur steigt. Durch die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit wird weniger Wärme akkumuliert, wodurch kleinere Schmelzvolumen entstehen und der Prozess geregelter abläuft.

Eine unregelmäßige Entstehung der Schmelzvolumen, die insbesondere in den beiden oberen Reihen von Bild 2.5 bei 30 μJ und 40 μJ zu erkennen ist, führt zu Schweißnähten mit unregelmäßigen Abständen zwischen den Schmelzvolumen und fluktuierender Schmelzvolumenpositionierung in Strahlrichtung. Darüber hinaus variiert die longitudinale Ausdehnung der Schmelzvolumen. Schweißnähte mit unregelmäßiger Struktur weisen typischerweise eine heterogene Spannungsverteilung auf [35]. Im Gegensatz dazu zeigen Nähte mit regelmäßig ausgebildeten Schmelzvolumen eine gleichmäßigere Spannungsverteilung [35] und können zu einer erhöhten Bruchfestigkeit der verschweißten Proben führen [31]. Daraus wird geschlossen, dass Prozessregime mit regelmäßig gebildeten Schmelzvolumen eine bessere Fügequalität aufweisen. Dementsprechend ist diese Form der Nahtentstehung zu bevorzugen.

Im Allgemeinen zeigt Quarzglas zwei unterschiedliche Formen der Nahtentstehung: Im ersten Fall entstehen Schmelzvolumen einzeln nacheinander, im zweiten Fall bilden sich mehrere Schmelzvolumen gleichzeitig aus. Bei genauerer Betrachtung kann eine detailliertere Unterteilung vorgenommen werden, siehe Bild 2.7. Die Abbildung zeigt das zeitaufgelöste Tiefenprofil und die Intensität der emittierten Prozessstrahlung für vier verschiedene Formen der Nahtentstehung bei Quarzglas: gruppiert (a), diskret (b), aneinandergereiht (c) und intermediär (d). Die grüne Linie markiert das Ende der Wachstumsperiode eines Schmelzvolumens und hilft dabei, das Auftreten mehrerer Wechselwirkungszonen zu beurteilen.

Die gruppierte Nahtentstehung ist durch periodische Gruppen von Schmelzvolumen gekennzeichnet. Diese bestehen aus einem großen Schmelzvolumen, auf das bis zu zehn kleinere Schmelzvolumen folgen. Aufeinanderfolgende Gruppen bilden sich zeitlich voneinander getrennt. Die Schmelzvolumen innerhalb einer Gruppe entstehen dagegen teilweise gleichzeitig. Bei der diskreten Form entwickeln sich zeitlich getrennte Schmelzvolumen mit ähnlicher Höhe nacheinander. Da das zeitaufgelöste Tiefenprofil lediglich die z-Position und die Ausdehnung der Wechselwirkungszonen in Strahlrichtung über die Zeit darstellt, geht aus dem zeitaufgelösten Tiefenprofil die laterale Ausdehnung der Schmelzzone nicht hervor. Dadurch ist die Naht im diskreten Fall nicht zwangsweise unterbrochen. Bild 2.8 zeigt zwei diskret entstandene Volumenmodifikationen von der Seite, die mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s (a) und 50 mm/s (b) und jeweils mit einer Burstenergie von 5 μJ erzeugt wurden. Ist der Abstand zwischen zwei Schmelzvolumen größer als die transversale Ausdehnung der Wärmeeinflusszone des geschmolzenen Volumens (b), werden diskrete Schweißpunkte erzeugt. Eine unterbrochene Schweißnaht kann die Gas- und Flüssigkeitsdichtheit einer Verbindung beeinträchtigen. Aufgrund der geringeren Anbindungsfläche sind außerdem geringere Stabilitäten zu erwarten [34].

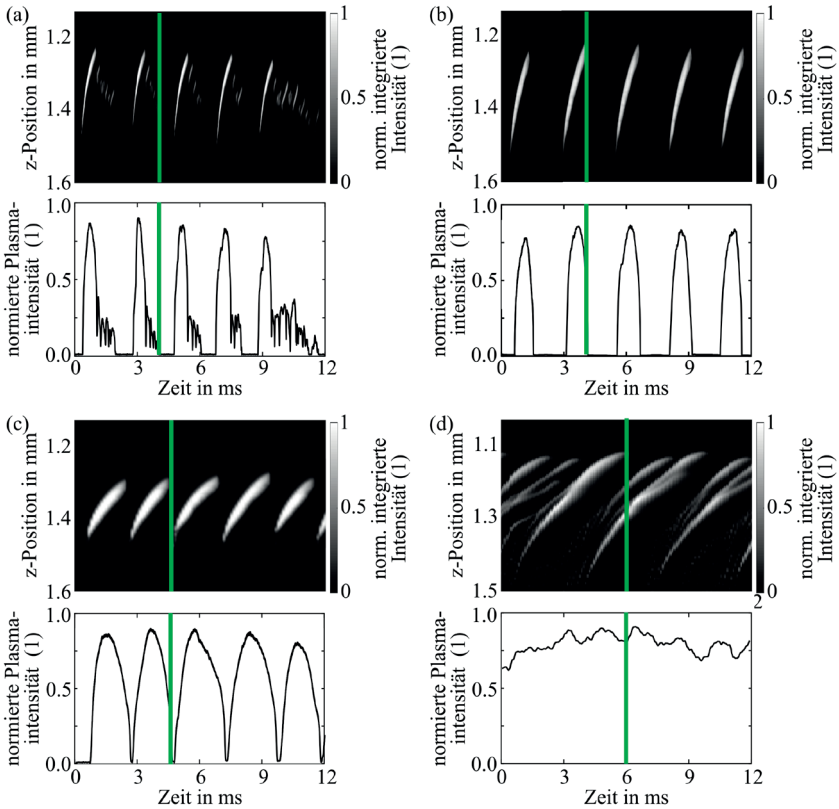


Bild 2.7: Zeitaufgelöstes Tiefenprofil und die Intensität der emittierten Prozessstrahlung für vier verschiedene Formen der Nahtentstehung bei Quarzglas: gruppiert (a), diskret (b), aneinandergereiht (c) und intermediär (d). Die grüne Linie markiert das Ende der Wachstumsperiode eines Schmelzvolumens. [54]

Entstehen Schmelzvolumen aneinandergereiht, bilden sich einzelne Schmelzvolumen ohne zeitliche Trennung aus. Nachdem der Entstehungsprozess eines Schmelzvolumens endet, beginnt der Folgeprozess unmittelbar in der Nähe des geometrischen Fokus erneut. Der intermediäre Prozess zeichnet sich durch kleine Zwischenmodifikationen aus, die gleichzeitig mit großen Schmelzvolumen gebildet werden.

Das Auftreten der identifizierten Prozessformen in Quarzglas hängt bei konstanter Anzahl von Pulsen im Burst und konstanter Burst-Repetitionsrate von den angewandten

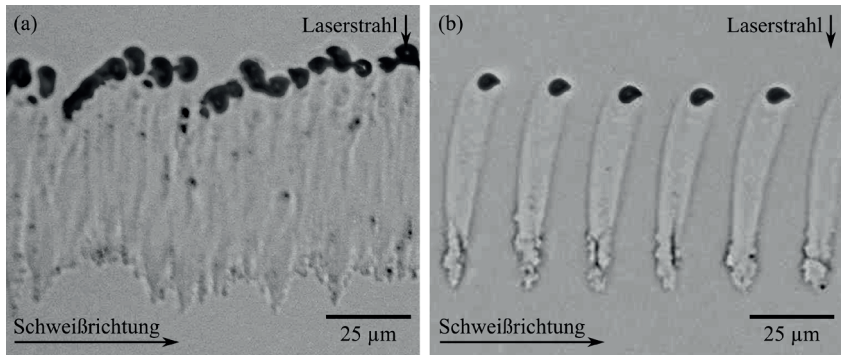


Bild 2.8: Diskret erzeugte Volumenmodifikationen in der Seitenansicht (a) durchgehende Schweißnaht mit $E_B = 5 \mu\text{J}$ und $v = 10 \text{ mm/s}$. (b) unterbrochene Schweißnaht mit diskreten Schweißpunkten mit $E_B = 5 \mu\text{J}$ und $v = 50 \text{ mm/s}$. [54]

Prozessparametern ab, siehe Bild 2.9. Die Karte zeigt die identifizierten Prozessformen für einen Parameterraum mit Burstenergien E_B im Bereich von $5 \mu\text{J}$ bis $40 \mu\text{J}$ und Vorschubgeschwindigkeiten v im Bereich von 5 mm/s bis 50 mm/s . Die experimentell ermittelten Datenpunkte sind durch schwarze Quadrate dargestellt.

Die Entstehung einzelner Schmelzvolumen ist auf Burstenergien mit $E_B \leq 10 \mu\text{J}$ beschränkt. Bei Vorschubgeschwindigkeiten von 5 mm/s werden Schmelzvolumen gruppiert gebildet. Die einfallende Laserstrahlung ist ausreichend, um unmittelbar nach dem ersten Schmelzvolumen ein weiteres Schmelzvolumen zu erzeugen. Da die einfallende Laserstrahlung durch den Hohlraum an der Oberseite des zuvor gebildeten Schmelzvolumens abgeschirmt wird, ist die Höhe des nachfolgenden Schmelzvolumens wesentlich geringer. Mit zunehmender Anzahl der Schmelzvolumen nimmt die Anzahl der Hohlräume und damit die Abschirmung der einfallenden Laserstrahlung zu. Daher werden die aufeinanderfolgenden Schmelzvolumen immer kleiner, bis der Prozess schließlich zum Stillstand kommt. Sobald die einfallende Laserstrahlung nicht mehr durch Hohlräume abgeschirmt wird, entsteht die nächste Gruppe von Schmelzvolumen. Bei Burst-Energien von $E_B = 5 \mu\text{J}$ und Vorschubgeschwindigkeiten $v \geq 10 \text{ mm/s}$ reicht die durch das Plasma transmittierte Strahlung nicht aus, um unmittelbar nahe des geometrischen Fokus eine nicht-lineare Absorption der Laserstrahlung zu induzieren. Schmelzvolumen werden daher auf diskrete Weise gebildet. Die Erhöhung der Pulsenergie auf $10 \mu\text{J}$ in diesem Bereich der Vorschubgeschwindigkeit reicht aus, um die Schwelle für die anfängliche Absorption in der Nähe des Fokus bereits dann zu überwinden, wenn die Wechselwirkungszone des zuvor gebildeten Schmelzvolumens erlischt. Dies ermöglicht eine kontinuierliche

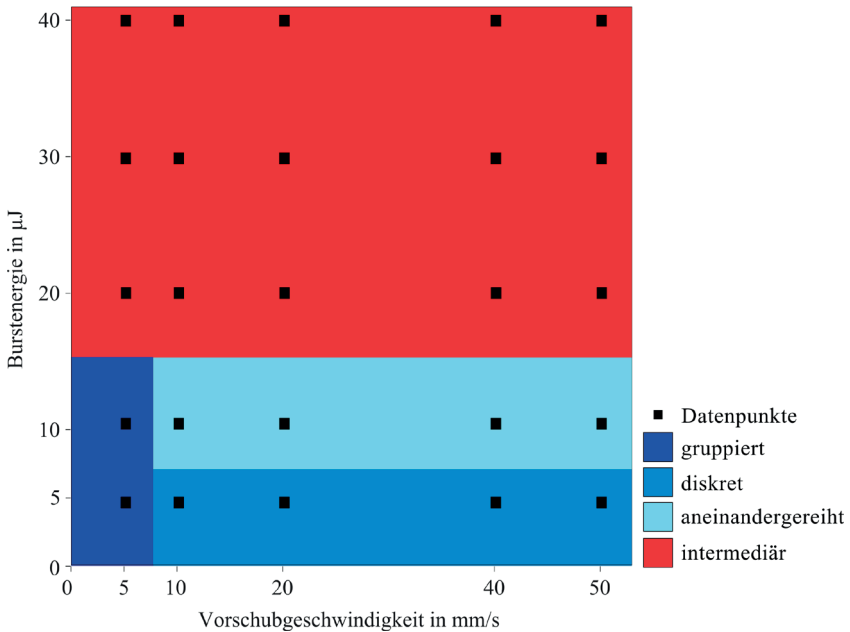


Bild 2.9: Prozesskarte für Quarzglas. In Quarzglas treten drei Formen individuell erzeugter Schmelzvolumen und eine Form gleichzeitig erzeugter Schmelzvolumen auf. [54]

Schmelzvolumenentstehung ohne Verzögerung zwischen den einzelnen Schmelzvolumen. Der Prozess verläuft aneinandergereiht. Der intermediäre Prozess, der mehrere, gleichzeitig wachsende Wechselwirkungszonen aufweist, wurde für Burst-Energien $E_B > 20 \mu\text{J}$ beobachtet.

Wie aus Bild 2.7 hervorgeht, kann der von einer Fotodiode aufgezeichnete Intensitätsverlauf zur Unterscheidung der unterschiedlichen Formen der Nahtentstehung verwendet werden. Die Entstehung einzeln entstandener Schmelzvolumen ist mit einer kurzzeitigen Strahlungsemission (Peak) verbunden. Dabei weisen Emissionen mit geringer Maximalintensität auf kleine Schmelzvolumen und Emissionen mit hoher Maximalintensität auf größere Schmelzvolumen hin. Die Dauer der Strahlungsemission entspricht der Wachstumsperiode der einzelnen Schmelzvolumen. Mehrere gleichzeitig gebildete Schmelzvolumen können dagegen durch Aufzeichnung der emittierten Strahlung mit einer Fotodiode nicht voneinander unterschieden werden.

Es wurde gezeigt, dass die Nahtentstehung bewertbar ist, wenn die emittierte Prozessstrahlung überwacht wird. Um die Entstehung jedes Schmelzvolumen getrennt bewerten zu können, müssen Schmelzvolumen einzeln nacheinander entstehen. Bei Quarzglas ist dies der Fall, wenn Burstenergien zwischen 5 μJ und 10 μJ verwendet werden.

2.4 Alkali-Aluminosilikatglas

In Alkali-Aluminosilikatglas wurde die Nahtentstehung anhand von Volumenmodifikationen untersucht, die mit Vorschubgeschwindigkeiten v von 5 mm/s bis 50 mm/s und Burstenergien E_B zwischen 5 μJ und 20 μJ hergestellt wurden. Wie bei Quarzglas wurden die Parameter auf Bereiche beschränkt, die zu rissfreien Volumenmodifikationen führen. Eine Auswahl erzielter Ergebnisse ist in Bild 2.10 dargestellt. Im Gegensatz zu Quarzglas sind im ausgewählten Parameterbereich zumindest zu Beginn und am Ende der Schmelzvolumenentstehung mehrere gleichzeitig aktive Wechselwirkungszonen zu beobachten. In Alkali-Aluminosilikatglas werden keine sichtbaren Hohlräume gebildet. Daher gibt es auch keinen Parameterbereich wie bei Quarzglas, in dem Schmelzvolumen einzeln nacheinander mit einer Pause dazwischen entstehen. Darüber hinaus ist die Bandlücke von Alkali-Aluminosilikatglas mit 4,2 eV [65] im Vergleich zu Quarzglas mit 9 eV [64] deutlich kleiner. Dadurch ist es in Alkali-Aluminosilikatglas möglich, Laserstrahlung bei niedrigeren Intensitäten und somit bei gleichem Fokusbereich bei niedrigeren Pulsenergien zu absorbieren [70].

Ähnlich zu Quarzglas führt eine Erhöhung der Pulsenergie zu größeren Schmelzvolumen mit Zwischenmodifikationen. Ebenfalls wurde eine regelmäßigere Nahtentstehung bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten beobachtet.

Wie bei Quarzglas ist eine detaillierte Unterteilung in weitere Entstehungsformen möglich. Neben der intermediären Form der Nahtentstehung, die bereits in Abschnitt 2.3 für Quarzglas beschrieben wurde, konnten zwei weitere Formen identifiziert werden: partiell simultan (a) und simultan (b), wie in Bild 2.11 dargestellt.

Bild 2.12 zeigt eine Karte der beobachteten Nahtentstehungsformen in Alkali-Aluminosilikatglas in Abhängigkeit der Prozessparameter. Der partiell simultan verlaufende Prozess ist durch zwei kurzzeitig, koexistierende Wechselwirkungszonen gekennzeichnet, die gleichzeitig periodische Schmelzvolumen bilden. Die zeitaufgelösten Tiefenprofile der emittierten Prozessstrahlung in Bild 2.11 (a) weisen Streifen mit einer Dauer von etwa 2 ms auf. Am Ende jedes Streifens entsteht in der Nähe des geometrischen Fokus eine neue Wechselwirkungszone, bevor die vorherige vollständig erlischt. Für einen Zeitraum

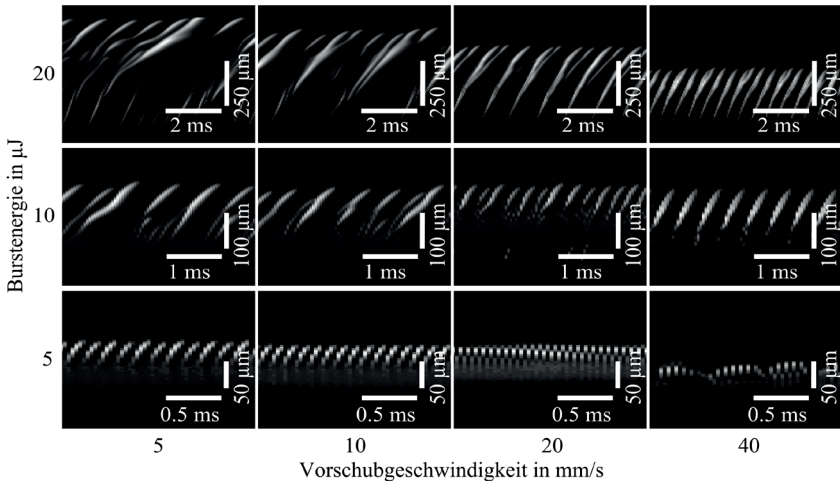


Bild 2.10: Zeitaufgelöstes Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung für Volumenmodifikationen in Alkali-Aluminosilikatglas bei verschiedenen Pulsenergien und Vorschubgeschwindigkeiten. [54]

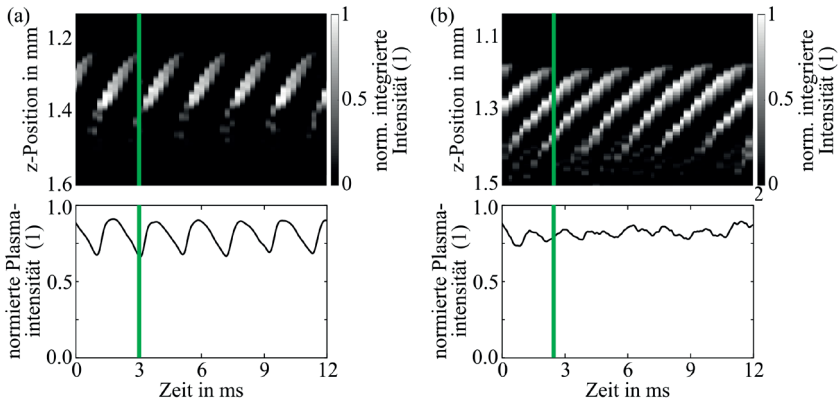


Bild 2.11: Zeitaufgelöstes Tiefenprofil und Intensität der emittierten Prozessstrahlung für zwei in Alkali-Aluminosilikatglas vorkommenden Formen der Nahtentstehung: partiell simultan (a), simultan (b). [54]

von 40 μs bis 80 μs sind daher zwei Wechselwirkungszonen gleichzeitig vorhanden. Sobald beim Schweißen dauerhaft koexistierende Wechselwirkungszonen erkennbar sind,

liegt ein simultan ablaufender Prozess vor, siehe Bild 2.11 (b). Bei dieser Form der Nahtentstehung bilden sich mindestens zwei Schmelzvolumen zur selben Zeit. Da bei partiell simultan und simultan entstehenden Schmelzvolumen kontinuierlich Strahlung emittiert wird, kann aus der Prozessstrahlung auf gleichzeitig vorhandene Wechselwirkungszonen geschlossen werden.

Die Wärmeakkumulation und damit die thermische Anregung der Elektronen wird durch Verringerung der Pulsenergie oder Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit begrenzt und ermöglicht die reproduzierbare Bildung von zwei oder sogar drei Wechselwirkungszonen. Da die Anzahl der Zwischenmodifikationen zunimmt, wird der Prozess mit zunehmender Burstenergie und abnehmender Vorschubgeschwindigkeit immer instabiler. Infolgedessen ist die resultierende Struktur der Schweißnaht auch weniger homogen.

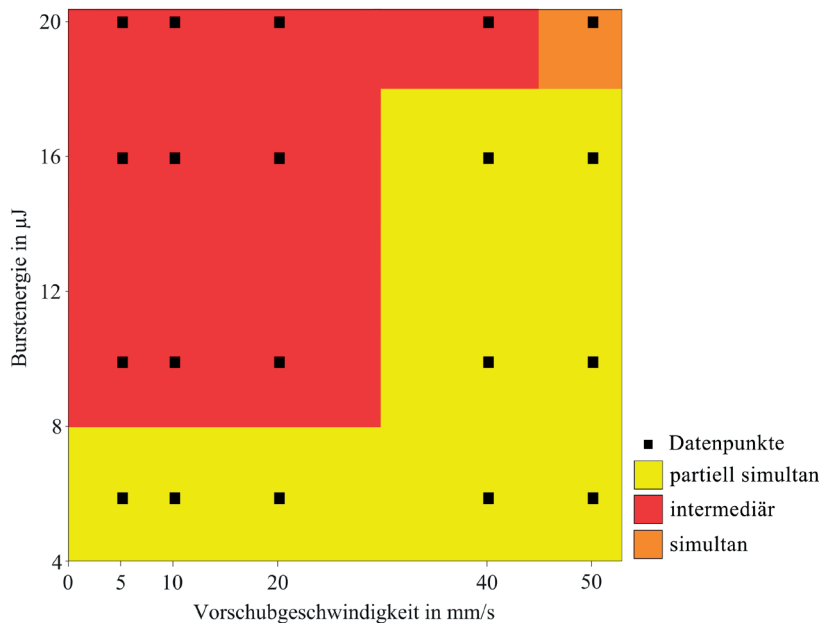


Bild 2.12: Regimekarte für Alkali-Aluminosilikatglas. Es wurden drei unterschiedliche Formen gleichzeitig entstehender Schmelzvolumen identifiziert. [54]

2.5 Fazit

Zur Untersuchung der Nahtentstehung beim Schweißen von Glas mit ultrakurzen Laserpulsen wurde der Schweißprozess in zwei verschiedenen Materialien systematisch durch eine räumlich-zeitliche Betrachtung der emittierten Prozessstrahlung analysiert. In den untersuchten Parameterbereichen wurden zwei übergeordnete Formen der Nahtentstehung identifiziert: Eine Form, bei der ein Schmelzvolumen nach dem anderen entsteht und eine Form, bei der sich mehrere Schmelzvolumen gleichzeitig ausbilden. Reicht die durch eine Wechselwirkungszone transmittierte Strahlung aus, um in der Nähe des geometrischen Fokus eine Wechselwirkungszone zu induzieren, entstehen mehrere Schmelzvolumen gleichzeitig. Bei einzeln erzeugten Schmelzvolumen ist die Wechselwirkungszone nicht ausreichend transparent, um die Bildung weiterer Wechselwirkungszone zu ermöglichen. Bei Quarzglas waren im untersuchten Parameterbereich beide Formen der Nahtentstehung zu beobachten, während Alkali-Aluminosilikatglas im untersuchten Parameterbereich zumindest zu Beginn und am Ende der Schmelzvolumenentstehung mehrere gleichzeitig aktive Wechselwirkungszone aufwies.

Gleichzeitig erzeugte Schmelzvolumen, die durch mehrere Wechselwirkungszone entstehen, zeigen oftmals unregelmäßige Nahtstrukturen, die im Bereich der Schweißnaht zu hohen Spannungen führen können. Prozesse, die eine regelmäßige Nahtausbildung zeigen, lassen dagegen eine erhöhte Festigkeit und eine verminderte Rissbildung erwarten und bieten infolgedessen eine stabilere Verbindung und eine höhere Prozesssicherheit. Prozesse mit regelmäßiger Nahtentstehung sind daher für das Schweißen von Glas als vorteilhaft anzusehen. Aus den Experimenten geht zudem hervor, dass die Nahtentstehung bewertbar ist, wenn Schmelzvolumen einzeln erzeugt und die emittierte Prozessstrahlung überwacht wird. Verringert sich der Abstand zwischen räumlich separierten Schmelzvolumen (Schweißpunkte), sodass zusammenhängende Nähte entstehen, sind zudem stabile und dichte Nähte zu erwarten. Zur Entwicklung eines Verfahrens zur Prozessüberwachung mit einer Fotodiode lässt sich daraus schlussfolgern, dass ein Prozess erforderlich ist, der reproduzierbar einzelne Schmelzvolumen erzeugt, die zusammen eine durchgehende Schweißnaht bilden.

3 Spezifische Techniken zur Prozessoptimierung

Um Glasteile mit UKP-Lasern im industriellen Maßstab zu verschweißen, sind vorher-sagbare und reproduzierbare Prozesse erforderlich, die zu Schweißnähten mit möglichst minimaler Spannung bei möglichst maximaler Verbundfestigkeit führen [5, 31, 35]. Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt, führen die untersuchten Parameter, die zur Herstellung kontinuierlicher Schweißnähte in Alkali-Aluminosilikatglas verwendet werden, typischerweise zu einer unregelmäßigen Schweißnahtsignatur. Der etablierte Schweißprozess mit einem gaußförmigen Strahlprofil und einer konstanten mittleren Laserleistung erzeugt in Alkali-Aluminosilikatglas mehrere, gleichzeitig aktive Wechselwirkungszonen. Auf diese Weise entstehen verschiedene Schmelzvolumen gleichzeitig. Dies führt zu Schweißnähten mit unregelmäßigen Abständen zwischen den Schmelzvolumen, fluktuierender Schmelzvolumenpositionierung in Strahlrichtung und Schmelzvolumen mit variierender Ausdehnung. Die Struktur der Schweißnaht sowie die Positionierung der Schweißnaht relativ zum Spalt haben jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die Spannungsverteilung [35] und damit auf die Rissbildung [35] sowie die Festigkeit [31] einer Verbindung. Der etablierte Prozess ist somit nur bedingt geeignet, um Alkali-Aluminosilikatglas zu fügen. Daher wird im Folgenden eine Optimierung des Prozesses diskutiert, die über die bloße Optimierung der Prozessparameter hinausgeht.

Zur Vermeidung unregelmäßiger Spannungsverteilungen entlang der Schweißnaht und zur Verringerung der Anfälligkeit gegenüber Rissbildungen ist ein Ansatz bekannt, der auf einer langsamen Modulation der mittleren Laserleistung im Bereich weniger kHz bis 10 kHz basiert [35]. Ein weiterer Ansatz zur Optimierung von Materialbearbeitungsprozessen ist der Einsatz von geformten Strahlprofilen. Dieser findet zunehmend auch im industriellen Umfeld Verwendung [71]. Für Schweißanwendungen werden insbesondere langgestreckte Strahlprofile eingesetzt, die beispielsweise Vorteile in der Spaltüberbrückbarkeit zeigen [31, 72]. Die meisten dieser Untersuchungen zur Gestaltung der zeitlichen und räumlichen Energieeinbringung beim Schweißen von Glas beziehen sich auf Eigenschaften, wie die Festigkeit oder die Spaltüberbrückbarkeit der erzeugten Schweißnähte, jedoch nicht auf die zugrundeliegende Nahtentstehung.

Im folgenden Kapitel wird daher die Wirkung zweier Techniken zur Gestaltung der zeitlichen und räumlichen Energieeinbringung auf die Nahtentstehung diskutiert [73]. Die Variation der Energieeinbringung erfolgt durch Leistungsmodulation und Strahlformung, die im Abschnitt 3.1 genauer beschrieben werden. Der Effekt der Leistungsmodulation beim Schweißen mit einem gaußförmigen Strahlprofil wird dem Prozess mit konstanter Laserleistung in Abschnitt 3.2 gegenübergestellt. Abschnitt 3.3 beschreibt den Einfluss eines Bessel-ähnlichen Strahlprofils auf das Schweißen mit konstanter Laserleistung. In Abschnitt 3.4 wird schließlich über die Ergebnisse berichtet, die mit der Leistungsmodulation beim Schweißen mit dem Bessel-ähnlichen Strahl erzielt wurden.

3.1 Methoden zur Prozessoptimierung

Um die Wirkung der Leistungsmodulation und der Strahlformung auf die Nahtausbildung zu untersuchen, wurde der in Bild 3.1 dargestellte Versuchsaufbau verwendet, wobei die in Kapitel 2 beschriebenen Diagnostik mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zum Einsatz kam. Die beiden Einzelbilder in Bild 3.1 zeigen zwei nacheinander aufgenommene Bilder der Hochgeschwindigkeitskamera. Auf dem linken Bild ist eine Schattenaufnahme der Schweißnaht abgebildet. Das rechte Bild zeigt die Strahlungsemission der Wechselwirkungszone ohne zusätzliche Beleuchtung. Darin sind mehrere Wechselwirkungszonen, die ein einzelnes Schmelzvolumen bilden, erkennbar.

Für die Untersuchungen wurden 2 mm lange Volumenmodifikationen in polierten Proben aus ungehärtetem Alkali-Aluminosilikatglas mit den Abmessungen 40 mm x 20 mm x 0,7 mm erzeugt, siehe Kapitel 2. Wie bereits im vorherigen Kapitel, erfolgte die Bearbeitung durch Bursts mit $n_B = 8$ Pulsen und einer Repetitionsrate von $f_B = 250$ kHz. Die Vorschubgeschwindigkeit war konstant und betrug $v = 10$ mm/s.

Um den Einfluss der Leistungsmodulation zu untersuchen, wurde die mittlere Ausgangsleistung des Lasers durch das modulierte Spannungssignal eines Funktionsgenerators moduliert. In Bild 3.2 sind Burstzüge bei konstanter Laserleistung (a) und sinusförmiger Leistungsmodulation (b) dargestellt, f_{mod} bezeichnet die Modulationsfrequenz. Diese lag mit 100 Hz bis 40 kHz deutlich unterhalb der Burst-Repetitionsrate f_B . Für die Versuche wurde die Laserleistung sinusförmig moduliert, um Spannungen zu reduzieren [35]. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde in den Experimenten mit und ohne Leistungsmodulation jeweils dieselbe mittlere Gesamtleistung verwendet. Dies setzt voraus, dass für den unmodulierten Prozess maximal 50 % der verfügbaren Burstenergie genutzt wird, da sich die mittlere Leistung durch die Sinusmodulation um den Faktor zwei reduziert.

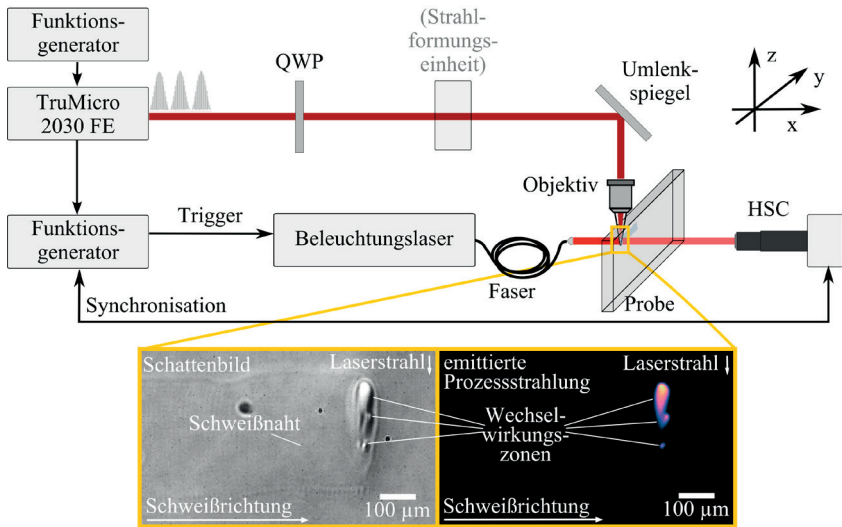


Bild 3.1: Versuchsaufbau für die Diagnostik mit einer Hochgeschwindigkeits-Kamera. Ein Funktionsgenerator modulierte die mittlere Laserleistung des Bearbeitungslasers (TruMicro 2030 FE) mittels eines modulierten Spannungssignals. [73].

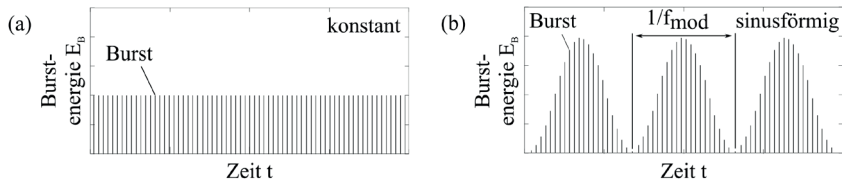


Bild 3.2: Burstzüge bei konstanter Laserleistung (a) und sinusförmiger Leistungsmodulation (b). [73]

Für die Bearbeitung mit einem gaußförmigen Strahlprofil wurde der Ausgangsstrahl des Lasers mit einem $1/e^2$ -Durchmesser von 5 mm durch ein Mikroskopobjektiv mit einer numerischen Apertur von $NA = 0,25$ und einer Brennweite von $f = 20$ mm auf einen Durchmesser von $d_f = 7,9 \mu\text{m}$ fokussiert. Der geometrische Fokus wurde 1,5 mm unterhalb der optischen Oberfläche der Glasproben platziert. Bei den Experimenten mit dem gaußförmigen Strahlprofil betrug die mittlere Laserleistung 1,25 W. Zur Vermeidung von richtungsabhängigen Effekten durch die Polarisation wurde der linear polarisierte

Strahl des Lasers durch eine Viertelwellenplatte in zirkuläre Polarisation umgewandelt, siehe Bild 3.1.

Das langgezogene Fokusvolumen mit einem Bessel-ähnlichem Strahlprofil wurde mit einem diffraktiven optischen Element erzeugt, das in seiner Wirkung einem negativen Axikon [74] entspricht. Um Volumenmodifikationen mit einer Höhe von $200\text{ }\mu\text{m}$ bis $250\text{ }\mu\text{m}$ zu erreichen, wie sie bei den Versuchen mit gaußförmigem Strahlprofil entstehen, wurde das Bessel-ähnliche Strahlprofil mit Hilfe eines Teleskops verkleinert. Der $1/e^2$ -Strahldurchmesser an dem für die Strahlformung verwendeten negativen Axikon betrug $2,5\text{ mm}$, wodurch die zentrale Intensitätsverteilung des Bessel-ähnlichen Strahlprofils in Simulationen eine Länge von $L_B = 190\text{ }\mu\text{m}$ (FWHM) und einen Durchmesser von $d_B = 1,6\text{ }\mu\text{m}$ (FWHM) aufwies, siehe Bild 3.3. Die Länge des Strahlprofils lässt sich durch einen größeren Strahldurchmesser am negativen Axikon vergrößern. Zum Schweißen mit dem Bessel-ähnlichen Strahlprofil betrug die mittlere Laserleistung $P = 4\text{ W}$, um ähnlich breite Schweißnähte wie mit dem gaußförmigen Strahlprofil zu generieren. Im Vergleich zu den Versuchen mit dem gaußförmigen Strahlprofil ist die verwendete mittlere Leistung für das Bessel-ähnliche Strahlprofil damit um $2,75\text{ W}$ höher.

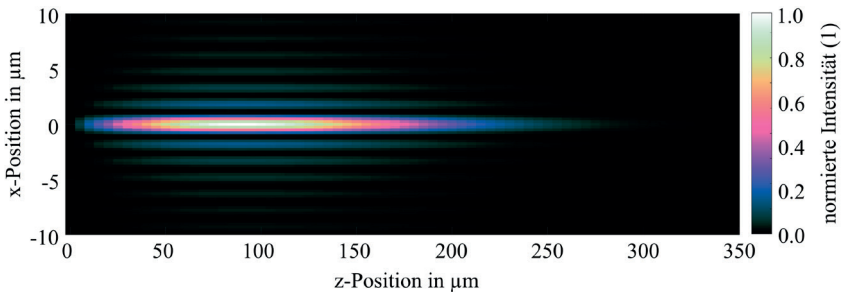


Bild 3.3: Bessel-ähnliches Strahlprofil.

3.2 Zeitliche Modulation der Laserleistung

In Alkali-Aluminosilikatglas wurden sowohl Volumenmodifikationen mit einer konstanten Laserleistung als auch mit Modulationsfrequenzen f_{mod} von $0,5\text{ kHz}$ bis 40 kHz hergestellt. Die Entwicklung der Wechselwirkungszone und damit die Nahtentstehung ist anhand von zeitaufgelösten Tiefenprofilen der emittierten Prozessstrahlung in Bild 3.4 dargestellt. Die grün gestrichelte Linie markiert das Ende des Entstehungsprozesses

eines Schmelzvolumens und hilft dabei, die gleichzeitige Entstehung mehrerer Wechselwirkungszonen in unterschiedlicher Tiefe zu beurteilen. Auf die Erzeugung und Interpretation der zeitaufgelösten Tiefenprofile wurde in Kapitel 2 ausführlich eingegangen.

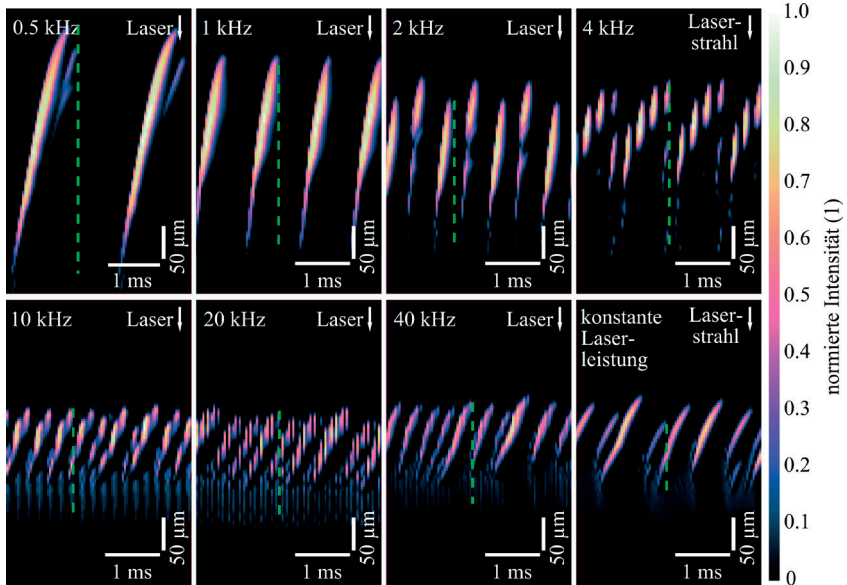


Bild 3.4: Zeitaufgelöste Tiefenprofile der Plasmaemission für die Erzeugung von Volumenmodifikationen in Alkali-Aluminosilikatglas bei verschiedenen Modulationsfrequenzen f_{mod} . [73]

Bei Modulationsfrequenzen im Bereich von 4 kHz bis 40 kHz und dem Schweißen mit konstanter Laserleistung entstehen mehrere Wechselwirkungszonen in unterschiedlichen Tiefen, die gleichzeitig verschiedene Schmelzvolumen bilden. Die Entstehung mehrerer Wechselwirkungszonen wird auf die Teildurchlässigkeit der einzelnen Wechselwirkungszonen zurückgeführt [48, 54]. Die Intensität der transmittierten Strahlung reicht aus, um unterhalb existierender Wechselwirkungszonen weitere Wechselwirkungszonen zu bilden. Dort ist der Strahldurchmesser kleiner, was wiederum zu einer erhöhten Intensität führt. Darüber hinaus ist bei einer Modulationsfrequenz von $f_{mod} = 4$ kHz die Dauer bis zur nächsten Modulationssequenz so kurz, dass das Plasma nicht vollständig zerfällt. Da das Plasma transparent genug ist, entsteht eine neue Wechselwirkungszone in der Nähe des geometrischen Fokus und reaktiviert das darüberliegende noch nicht vollständig zerfallene Plasma. Dieses Verhalten ist auch für Modulationsfrequenzen

$f_{mod} > 4$ kHz zu beobachten und lässt daher den Schluss zu, dass der Prozess ab einer Modulationsfrequenz von 4 kHz wie beim Schweißen mit einer konstanten Laserleistung zu diskutieren ist.

In Bild 3.5 sind Mikroskopaufnahmen der resultierenden Schweißnaht bei konstanter mittlerer Laserleistung von der Seite (a) und von oben (b) zu sehen. Die gelben Punkte markieren den geschätzten lokalen Toleranzbereich von $z = 40$ μm , innerhalb dessen die Grenzfläche für eine geeignete Verbindung zwischen zwei Proben im Überlappstoß positioniert sein sollte [75]. Für die gesamte Schweißnaht ergibt sich daraus der deutlich eingeschränkte blau markierte Toleranzbereich mit einer Breite von etwa 15 μm .

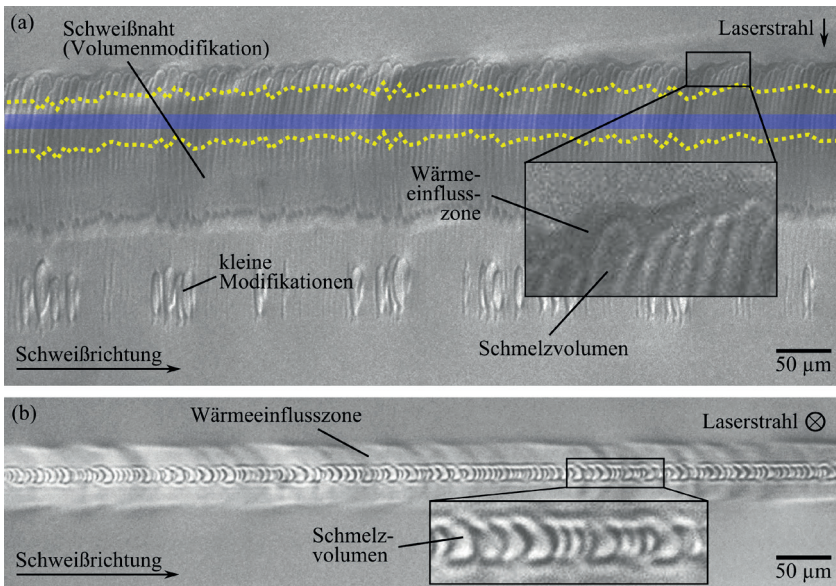


Bild 3.5: Mit konstanter mittlerer Laserleistung erzeugte Volumenmodifikation in Alkali-Aluminosilikatglas. (a) Seitenansicht und (b) Draufsicht. Die gelben Punkte markieren den lokalen Toleranzbereich für die Position einer Grenzfläche. Der blaue Bereich markiert den resultierenden Toleranzbereich für die gesamte Schweißnaht. [73]

Die Schweißnaht weist eine unregelmäßige Struktur auf. Die Überlappung, die Höhe und der Ursprung der Schmelzvolumen variiert entlang der gesamten Schweißnaht. Die unregelmäßige Nahtstruktur wird auf die gleichzeitig gebildeten Schmelzvolumen zurückgeführt [54] und deutet auf heterogene Spannungsverteilungen hin, welche die Verbundfestigkeit verringern und die Rissanfälligkeit erhöhen [35]. Da die Positionen

und die Höhen der Schmelzvolumen schwanken, ist der resultierende Toleranzbereich der Grenzflächenposition (blau markierter Bereich) kleiner als der lokale Toleranzbereich, der durch die Schmelzvolumen (gelbe Punkte) gegeben ist. Bei starken Schwankungen der Höhe und der Lage der Schmelzvolumen kann ein optimales Schweißergebnis entlang der gesamten Schweißnaht nicht sichergestellt werden. Um eine optimale Nahtpositionierung zu gewährleisten, muss die Fokusslage gegebenenfalls während der Verarbeitung angepasst werden, was aufgrund der eingeschränkten Vorhersagbarkeit des Prozesses technisch äußerst kompliziert ist.

Wird die mittlere Laserleistung mit 0,5 kHz oder 1 kHz moduliert, kann das gleichzeitige Auftreten mehrerer Wechselwirkungszonen weitgehend unterdrückt werden. Dies geht aus den zeitaufgelösten Tiefenprofilen für das Schweißen mit Modulationsfrequenzen von 0,5 kHz und 1 kHz in Bild 3.4 hervor. Mit einer Modulationsfrequenz von $f_{mod} = 1$ kHz wurde ein Prozess beobachtet, bei dem einzelne Schmelzvolumen nacheinander entstehen [54]. Wie in Bild 3.6 gezeigt, ist jedoch selbst bei einer Modulation von 1 kHz zu Beginn der Schweißnahtentstehung eine Wechselwirkungszone unterhalb der Hauptwechselwirkungszone zu beobachten. Da diese zweite Wechselwirkungszone nur am Anfang einer Schweißnaht auftritt und nach der Bildung der ersten Schmelzvolumen nicht mehr detektierbar ist, spielen diese für das letztendliche Schweißergebnis eine untergeordnete Rolle und wurden nicht weiter untersucht. Wie in den Schattenbildern zu sehen ist, bilden die Wechselwirkungszonen ein tropfenförmiges Schmelzvolumen [Bild 3.6 (b), 880 μ s]. Das in Bild 3.6, (b) rechts bei 880 μ s dargestellte Schmelzvolumen weist eine innere und eine äußere Struktur auf. Die Größe und Form der inneren Struktur (WWV) entspricht dem Volumen, das die Wechselwirkungszone während ihrer Aufwärtsbewegung durchstreift. Die äußere Struktur ist auf thermische Diffusion zurückzuführen und kennzeichnet damit die Wärmeeinflusszone (WEZ) [76].

Bei einer Modulationsfrequenz von $f_B = 1$ kHz entsteht innerhalb jeder Modulationsperiode ein eigenständiges Schmelzvolumen. Um die applizierte Laserleistung und die Entwicklung der Wechselwirkungszone zu korrelieren, erfolgte eine Umrechnung des aufgezeichneten Spannungssignals des Wellenformgenerators in eine mittlere Laserleistung. Die resultierende Kurve und das zeitaufgelöste Tiefenprofil der Plasmaemission eines einzelnen Schmelzvolumens sind in Bild 3.7 aufgetragen. Die gestrichelten weißen Linien markieren den Beginn und das Ende der Wachstumsperiode des Schmelzvolumens. Die Wechselwirkungszone entsteht, wenn die momentane mittlere Laserleistung einen Wert von 0,5 W erreicht. Dies entspricht einer Intensität von 10^6 W/cm² im Fokus. Mit zunehmender Laserleistung dehnt sich die Wechselwirkungszone aus und bewegt sich in die Richtung der Laserquelle.

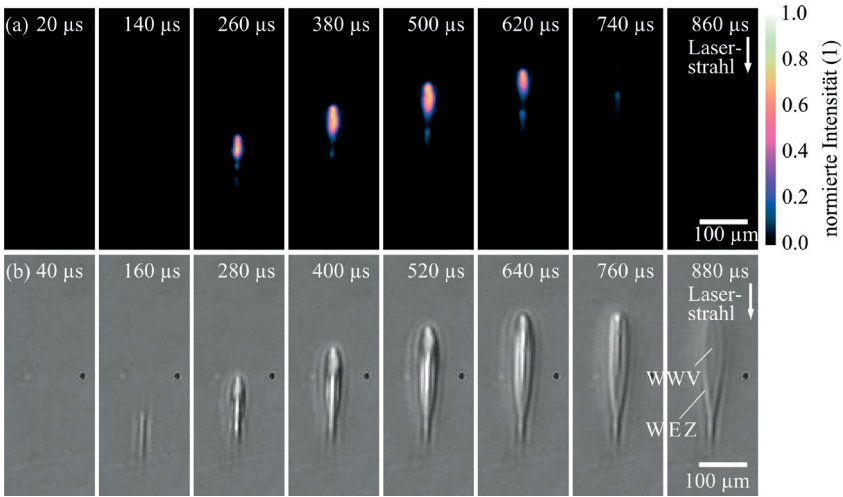


Bild 3.6: Bildsequenzen der Bildung eines einzelnen Schmelzvolumens durch sinusförmige Leistungsmodulation von der Seite. (a) Plasmaemission der Wechselwirkungszone. (b) Schattenbild der Bearbeitungszone. Das tropfenförmige Schmelzvolumen weist eine innere Struktur (WWV) auf, die dem Bereich entspricht, in welchem eine Licht-Materie-Wechselwirkung stattfindet und eine äußere Struktur, welche der Wärmeeinflusszone (WEZ) entspricht. [73]

Die Intensität in einem konvergierenden Strahl nimmt bei konstanter mittlerer Leistung mit zunehmendem Abstand zum geometrischen Fokus ab. Die Aufwärtsbewegung der Wechselwirkungszone ist daher begrenzt [48, 52]. Durch die Erhöhung der mittleren Laserleistung beim Erzeugen einer Modifikation durch Modulation dehnt sich die Isophotenkontur aus und wandert, wie die sich ausbreitende Wechselwirkungszone, in Richtung der Laserquelle. Dadurch wird der Intensitätsabfall an der Absorptionsfront verringert. Die Strahlung erhält den Prozess dadurch auch weiter vom geometrischen Fokus entfernt aufrecht, was zu einem längeren Schmelzvolumen führt. Aufgrund der Abschirmung des dahinter liegenden Volumens [77] und der durch thermische Ionisation [52] erhöhten Absorption reicht die durch die Wechselwirkungszone transmittierte Strahlung nicht aus, um eine weitere Wechselwirkungszone in der Nähe des geometrischen Fokus zu bilden. Nimmt die momentane mittlere Laserleistung wieder ab, reduziert sich die Wachstumsrate des Schmelzvolumens. Dies geht aus der vorwärts gekrümmten Form der sich entwickelnden Wechselwirkungszone hervor, siehe Bild 3.7. Ab einer Zeit von 0,78 ms nach Beginn der Modulationssequenz beginnt die Wechselwirkungszone wieder zu schrumpfen. Dies wird auf die Wärmeleitung zurückgeführt, da mehr Energie

abgeführt wird als durch Absorption zugeführt. Dadurch wächst das Schmelzvolumen nicht mehr weiter und erreicht damit seine endgültige Höhe. Obwohl keine Wechselwirkungszone mehr erkennbar ist und die Intensität im Fokus noch oberhalb der Prozessschwelle von 10^6 W/cm^2 liegt, startet der Prozess im Fokus nicht erneut. Dies lässt den Schluss zu, dass noch ein dünnes Plasma vorhanden ist, das jedoch nicht mehr hell genug leuchtet, um detektiert werden zu können. Eine weitere Erklärung für den fehlenden Neustart des Prozesses ist die Brechung der Laserstrahlung in der Modifikation, die zu einem vergrößerten Fokus und damit einer geringeren Intensität im Fokus führt.

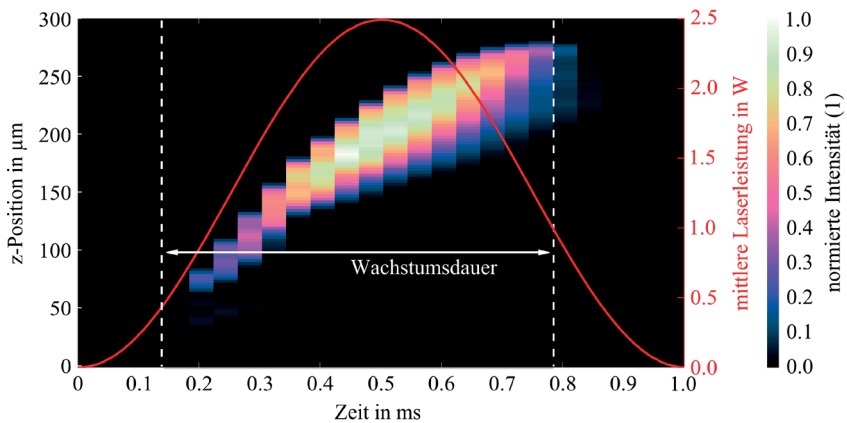


Bild 3.7: Korrelation der mittleren Laserleistung mit der Entwicklung der Wechselwirkungszone eines einzelnen Schmelzvolumens. Die Modulationsfrequenz betrug 1 kHz. [73]

Durch periodisches Erhöhen und Verringern der mittleren Laserleistung entstehen in regelmäßigen Abständen Schmelzvolumen. Diese bilden eine regelmäßige Schweißnaht mit periodischer Signatur. Bild 3.8 zeigt eine Schweißnaht, die mit einer Modulationsfrequenz von $f_{mod} = 1 \text{ kHz}$ hergestellt wurde.

Die Position der Nahtwurzel bleibt über die gesamte Länge der Schweißnaht nahezu unverändert. Im Vergleich zum Schweißen ohne Leistungsmodulation ist der Toleranzbereich zur Lokalisierung der Nahtstelle um 65 % größer. Dies erleichtert es, die optimale Schweißnahtposition relativ zur Grenzfläche während des Schweißprozesses beizubehalten. Darüber hinaus weisen die erzeugten Schmelzvolumen eine konstante Höhe und einen gleichbleibenden Überlapp auf, was auf eine homogene Spannungsverteilung und damit auf einen erhöhten Risswiderstand hindeutet [35].

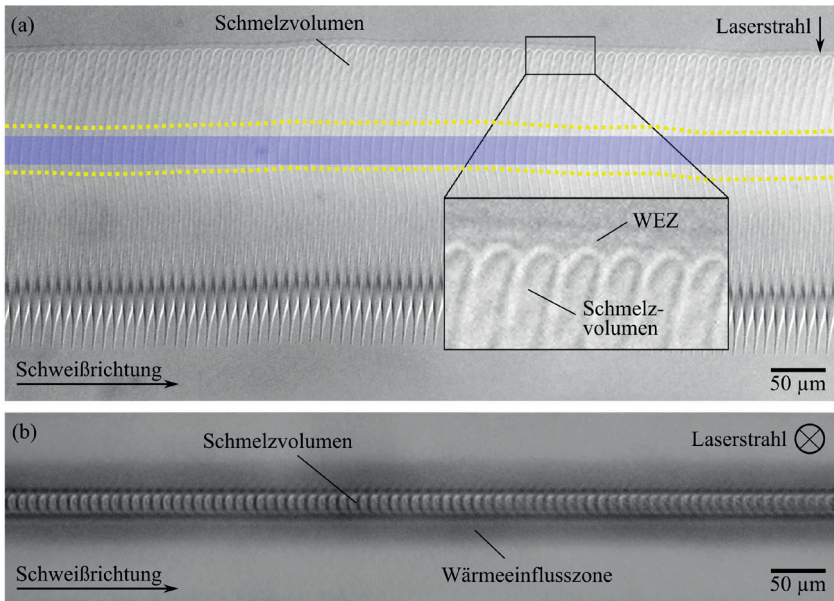


Bild 3.8: Durch sinusförmig modulierte Laserleistung erzeugte Volumenmodifikation in Alkali-Aluminosilikatglas. (a) Seitenansicht und (b) Draufsicht. Die gelben Punkte markieren den lokalen Toleranzbereich für die Position der Grenzfläche. Der blaue Bereich kennzeichnet den resultierenden Toleranzbereich für die gesamte Schweißnaht. [73]

Die Höhe der Schweißnaht ist mit der Leistungsmodulation etwa doppelt so hoch wie im unmodulierten Fall, vergleiche Bild 3.5 (a) und Bild 3.8 (a). Die vergrößerte Nahthöhe ist auf die doppelte Spitzenleistung zurückzuführen. Die Intensität der Laserstrahlung reicht aus, um den Prozess weiter vom geometrischen Fokus entfernt aufrecht zu erhalten. Infolgedessen bewegt sich die Wechselwirkungszone weiter nach oben, was zu größeren Schmelzvolumen führt. Im Vergleich zum Schweißen ohne Modulation wird außerdem die Breite der Schweißnaht und damit die potenzielle Verbindungsfläche zwischen zwei Fügepartnern vergrößert, vergleiche Bild 3.5 (b) und Bild 3.8 (b). Größere Fügeflächen lassen auf eine erhöhte Stabilität einer Verbindung schließen [34].

Wie in Bild 3.4 zu sehen ist, nimmt die Höhe der Schmelzvolumen mit zunehmender Modulationsfrequenz ab. Dies deutet darauf hin, dass die Wachstumsrate der Wechselwirkungszone begrenzt ist. Infolgedessen erreichen die Schmelzvolumen bei höheren Modulationsfrequenzen nicht die gleiche Höhe wie bei den längeren Perioden. Bei

Modulationsfrequenzen im Bereich von 4 kHz bis 40 kHz werden mehrere Modulationssequenzen benötigt, um die volle Nahthöhe zu erreichen, siehe Bild 3.4. In diesem Parameterbereich ändert sich die Lage der Wechselwirkungszone mit jeder Modulationssequenz. Dadurch werden so lange kleine Schmelzvolumen übereinander erzeugt, bis die endgültige Nahthöhe erreicht ist. Durch Wärmeakkumulation und der resultierenden thermischen Anregung wird eine große Dichte freier Elektronen an Orten erzeugt, die weit vom geometrischen Fokus entfernt sind [48, 49, 52]. Infolgedessen kann Strahlung trotz der niedrigeren Intensitäten durch die größere Entfernung zum geometrischen Fokus absorbiert werden. Hierdurch kommt es von einer Modulationssequenz zur nächsten zu einer Verschiebung der Wechselwirkungszone in Richtung der Laserstrahlquelle. Wird der Abstand zum Nahtursprung zu groß, reicht die Dichte freier Elektronen nicht mehr aus, um weitere Wechselwirkungszone weiter oben zu initialisieren, wodurch der Prozess in der Nähe des geometrischen Fokus erneut startet. Mit zunehmender Frequenz wird der Prozess immer unregelmäßiger und nähert sich dem Verhalten des Prozesses ohne Leistungsmodulation an.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch die Modulation der Laserleistung mit einer Frequenz im Bereich von 0,5 kHz bis 1 kHz regelmäßige Schweißnähte entstehen, die im Vergleich zum Schweißen mit konstanter Laserleistung größer und breiter sind. Daraus lassen sich Vorteile hinsichtlich der Fokustoleranz und der Stabilität einer möglichen Verbindung ableiten. Zudem kann das größere Schmelzbad, erzeugt durch die vergrößerte Wechselwirkungszone, dazu beitragen, größere Spalte zwischen zwei Glasproben zu überbrücken [29].

3.3 Räumliche Strahlformung

Um zu untersuchen, ob die Verwendung von Bessel-ähnlichen Strahlprofilen dazu beiträgt, die Regelmäßigkeit und Homogenität der Nahtstruktur weiter zu erhöhen, wurden Volumenmodifikationen mit einem entsprechend geformten Strahlprofil hergestellt, siehe Bild 3.3. Bild 3.9 zeigt das zeitaufgelöste Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung (a), das während des Schweißens mit konstanter mittlerer Laserleistung aufgezeichnet wurde. Ebenfalls dargestellt ist ein Einzelbild des Hochgeschwindigkeitsvideos, das die Form der emittierenden Wechselwirkungszone zeigt. Außerdem sind Mikroskopaufnahmen der resultierenden Schweißnaht von der Seite (b) und von oben (c) abgebildet.

Das Schweißen mit einem Bessel-ähnlichen Strahlprofil bei konstanter mittlerer Leistung führt zu einem länglichen und zeitlich invarianten Wechselwirkungsvolumen [Detailbild

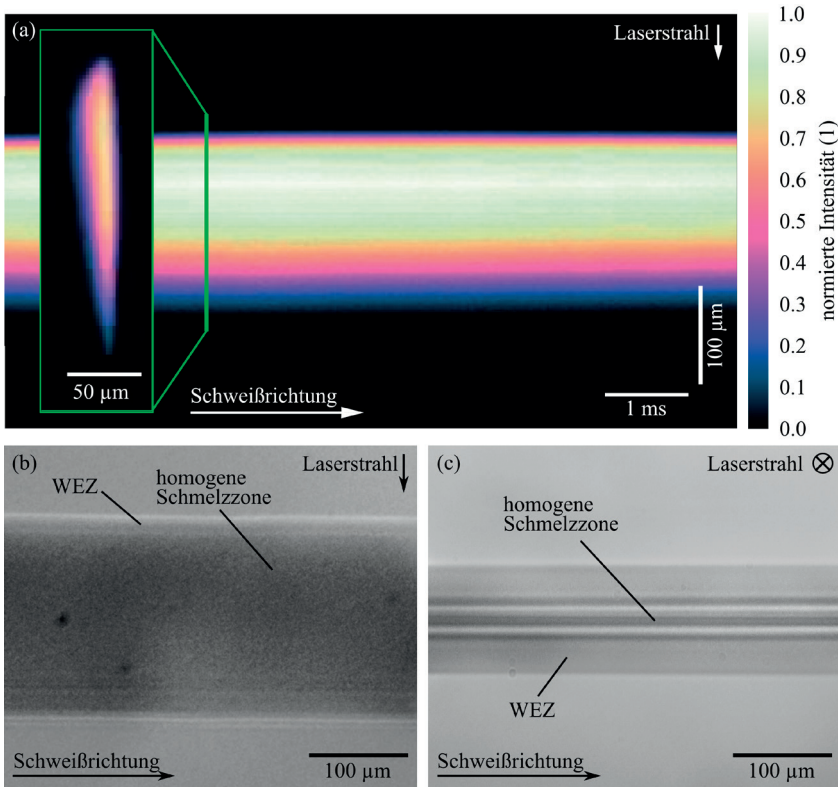


Bild 3.9: (a) Zeitaufgelöstes Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung bei der Erzeugung von Volumenmodifikationen in Alkali-Aluminosilikatglas mit einem Bessel-ähnlichen Strahlprofil. Das Detailbild zeigt die Form der emittierenden Wechselwirkungszone. Die resultierende Schweißnaht ist von der Seite (b) und von oben (c) durch Mikroskopaufnahmen dargestellt. [73]

in Bild 3.9 (a)]. Im zeitaufgelösten Tiefenprofil ist dies durch einen einzelnen kontinuierlichen Streifen mit konstanter Höhe und Intensitätsverteilung zu erkennen [Bild 3.9 (a)]. Eine Abschirmung der Wechselwirkungszone, wie sie bei einem gaußförmigen Strahlprofil zu einer Aufwärtsbewegung der gesamten Wechselwirkungszone führt (3.6), ist nicht zu beobachten. Bild 3.10 stellt schematisch die Strahlpropagation zur Erzeugung eines gaußförmigen Strahlprofils (a) und eines Bessel-ähnlichen Strahlprofils (b) gegenüber. Die Strahlung tritt bei einem Bessel-ähnlichen Strahlprofil von den Seiten (Umfang) in die Wechselwirkungszone ein [74, 78, 79]. Hierdurch wird eine Abschirmung durch die

Wechselwirkungszone entlang der longitudinalen Strahlachse, wie sie beim gaußförmigen Strahlprofil zu beobachten ist, vermieden. Während des Schweißens schmilzt das Material kontinuierlich auf, was zu einer Schweißnaht mit einer homogenen inneren (WWV) und äußeren Struktur (WEZ) führt, siehe Bild 3.9 (a) und (b).

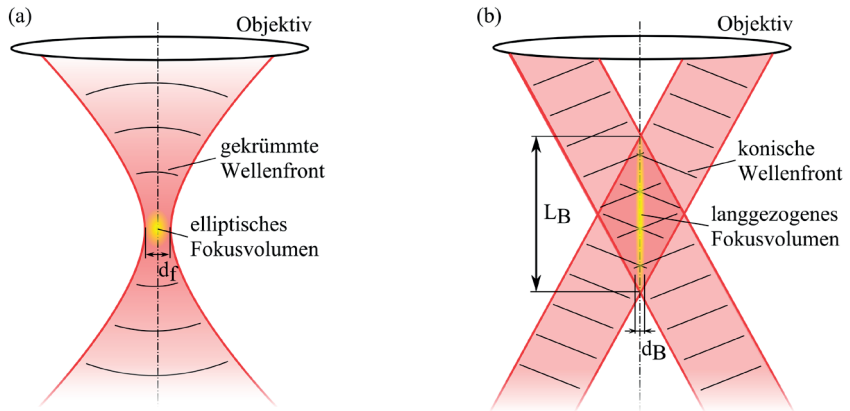


Bild 3.10: Schematische Darstellung der Strahlpropagation bei der Erzeugung eines gaußförmigen Strahlprofils (a) und eines Bessel-ähnlichen Strahlprofils (b).

Eine Übertragung dieser Erkenntnisse auf das Schweißen zweier Fügepartner lässt auf ein kontinuierliches Schmelzen des Materials im oberen und unteren Glas schließen. Im Falle eines Spaltes zwischen den Fügepartnern ist anzunehmen, dass das erzeugte Schmelzvolumen im oberen und unteren Glas dem Spalt kontinuierlich Schmelze zuführt. Im Vergleich zu einer einseitigen Schmelzezuführung, wie es bei einem gaußförmigen Strahlprofil der Fall wäre, ist zu erwarten, dass mehr Material zum Füllen des Spaltes zur Verfügung steht und sich die Spaltüberbrückung dadurch verbessert [31].

3.4 Leistungsmodulation bei räumlicher Strahlformung

Die Demonstration des Einflusses der Leistungsmodulation auf die Nahtentstehung beim Schweißen mit einem Bessel-ähnlichen Strahlprofil erfolgte bei einer Modulationsfrequenz von $f_{mod} = 1$ kHz. Bild 3.11 zeigt das entsprechende zeitaufgelöste Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung und die applizierte Laserleistung (a). Weiterhin sind Mikroskopaufnahmen der resultierenden Schweißnaht von der Seite (b) und von oben (c) abgebildet.

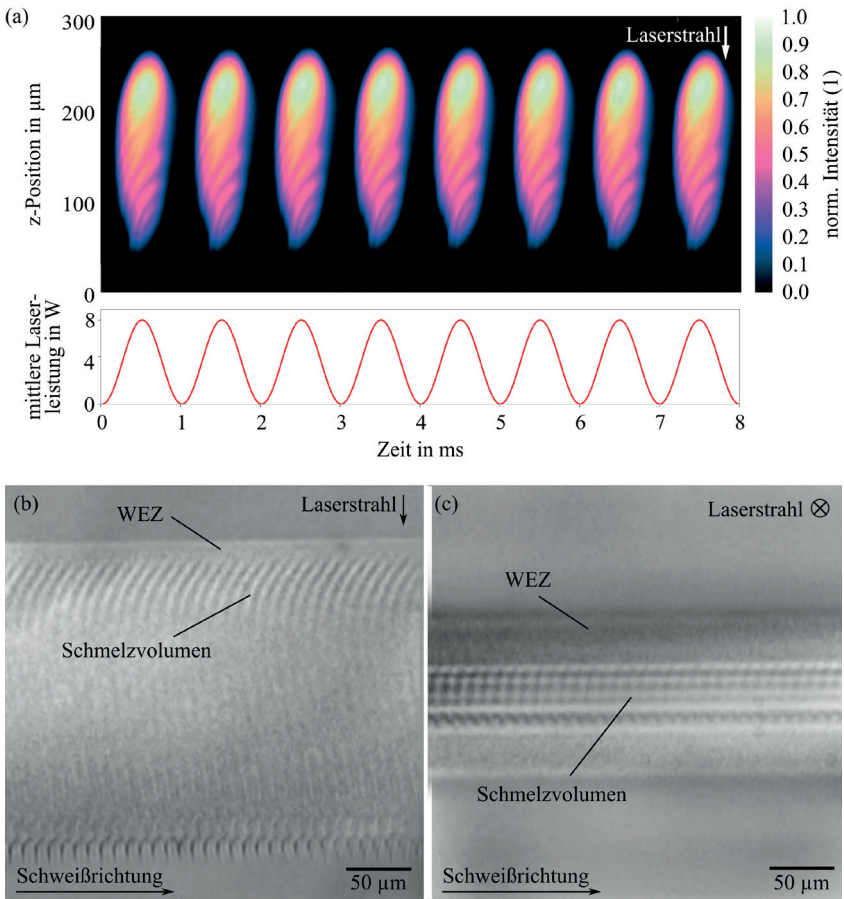


Bild 3.11: Zeitaufgelöstes Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung und applizierte mittlere Laserleistung beim Schweißen mit einem Bessel-ähnlichen Strahlprofil mit modulierter Leistung. Die Mikroskopbilder zeigen die Seitenansicht (b) und die Draufsicht (c) der resultierenden Schweißnaht. [73]

Durch die Modulation der mittleren Laserleistung während des Schweißens mit einem Bessel-ähnlichen Strahlprofil entstehen periodisch einzelne Schmelzvolumen nacheinander. Wie beim gaußförmigen Strahlprofil bildet sich jedes Schmelzvolumen während einer einzigen Modulationssequenz (a) aus. Die resultierende Schweißnaht weist daher eine periodische Signatur auf, siehe Bild 3.11 (b) und (c). Die Entstehung der Schmelzvolumen

unterscheidet sich jedoch von der Schmelzvolumenentstehung bei einem gaußförmigen Strahlprofil. In Bild 3.12 ist die Entstehung eines einzelnen Schmelzvolumens bei einem Bessel-ähnlichen Strahlprofil anhand einer Bildsequenz der emittierenden Wechselwirkungszone (a) und Aufnahmen der Prozesszone als Schattenbild (b) dargestellt. Ausgehend vom Fokusbild dehnt sich die Wechselwirkungszone mit zunehmender Laserleistung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung aus, wodurch sich ein elliptisch geformtes Schmelzvolumen ausbildet, siehe Bild 3.12 (b). Die Verringerung der mittleren Laserleistung lässt die Wechselwirkungszone wieder schrumpfen. Da die Wechselwirkungszone während des Prozesses ihre Position nicht verändert, entspricht die letztendliche Größe des Schmelzvolumens der maximalen longitudinalen Ausdehnung der Wechselwirkungszone.

Die Modulation der Laserleistung beim Schweißen mit Bessel-ähnlichem Strahlprofil kann Spannungen reduzieren [5]. Zudem entstehen im Vergleich zum Schweißen ohne Modulation (Abschnitt 3.3) aufgrund der hohen maximalen Burstenergie größere Schmelzvolumen, die größere Fokustoleranzen erwarten lassen, siehe Bild 3.9 (b) und Bild 3.11 (b). Darüber hinaus ist die Breite der Schweißnaht und damit die potenzielle Anbindungsfläche durch die Modulation vergrößert, vergleiche Bild 3.9 (c) und Bild 3.11 (c), was auf die erhöhte Stabilität einer Verbindung schließen lässt [34].

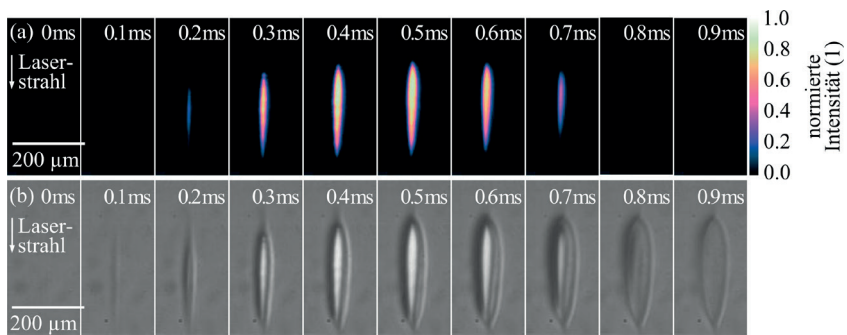


Bild 3.12: Bildsequenzen, die die Bildung eines individuellen Schmelzvolumens durch sinusförmige Leistungsmodulation beim Schweißen mit einem Bessel-ähnlichen Strahlprofil zeigen. (a) Plasmaemission und (b) Schattenbilder. [73]

3.5 Fazit

Beim UKP-Schweißen von Glas mit einem gaußförmigen Strahlprofil und konstanter mittlerer Laserleistung entstehen in der Regel unregelmäßige Nahtstrukturen. Um Techniken zur Vermeidung unregelmäßiger Nahtstrukturen zu identifizieren, wurde der Einfluss der zeitlichen und räumlichen Energieeinbringung auf den Prozess anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Wechselwirkungszone untersucht.

Steht ausreichend Laserleistung zur Verfügung, ist es aufgrund der erwarteten Nahteigenschaften und hinsichtlich der Überwachbarkeit einzeln erzeugter Schmelzvolumen sinnvoll, die mittlere Laserleistung zu modulieren. Die Leistungsmodulation führte sowohl bei einem gaußförmigen als auch bei einem Bessel-ähnlichen Strahlprofil in regelmäßigen Abständen zu einzeln erzeugten Schmelzvolumen. In beiden Fällen ist die resultierende Nahtstruktur regelmäßig. Im Vergleich zum Schweißen ohne Modulation bildeten sich größere Schweißnähte aus, die im Hinblick auf die Fokustoleranzen oder der Spaltüberbrückbarkeit als vorteilhaft anzusehen sind. Zudem können durch eine Modulation Spannungen reduziert werden.

Die Wachstumsrichtung der einzelnen Schmelzvolumen hängt von der Energieeinbringung und der Strahlform ab. Bei einem gaußförmigen Strahlprofil entstehen die Schmelzvolumen in Längsrichtung, ausgehend vom geometrischen Fokus, in Richtung des einfallenden Laserstrahls. Beim Bessel-ähnlichen Strahlprofil dehnt sich die Wechselwirkungszone hingegen symmetrisch vom Zentrum weg aus. Der zylindersymmetrische seitliche Einfall beim Bessel-ähnlichen Strahlprofil vermeidet eine Abschattung entlang der Strahlachse und verhindert so eine periodische Aufwärtsbewegung der Wechselwirkungszone. Wird die mittlere Laserleistung hingegen nicht moduliert, erzeugt das Bessel-ähnliche Strahlprofil ein längliches Wechselwirkungsvolumen, das kontinuierlich Material aufschmilzt und zu einer homogenen Nahtstruktur führt.

Je nach Anwendung kann die Fokuslagentoleranz oder der Anbindungsquerschnitt eine besondere Rolle spielen. Ist dies der Fall, sollte anstatt des gaußförmigen Strahlprofils ein Bessel-ähnliches Strahlprofil zum Einsatz kommen. Durch die elliptische Form der Naht bleibt der Querschnitt über einen größeren Bereich nahezu gleich. Darüber hinaus werden mit dem langgezogenen Strahlprofil bei vergleichbarer Nahthöhe breitere Nähte erzielt.

4 Experimente zur Entwicklung eines Verfahrens zur Prozessüberwachung

Basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 2 und Kapitel 3 wird in diesem Kapitel auf die Überwachung leistungsmodulierter Prozesse mit einer Fotodiode eingegangen. Die Überwachung basiert auf der Detektion der emittierten Prozessstrahlung einzelner hergestellten Schmelzvolumen, die überlappend eine durchgängige Schweißnaht bilden. Die Fehlerentstehung wird untersucht und relevante Merkmale, die eindeutig auf das Prozessergebnis hindeuten, identifiziert. Um die Nahtposition auch bei optisch kontaktierten Gläsern überwachen zu können, wird darüber hinaus ein Ansatz zur Detektion der Nahtposition durch optische Kohärenztomografie vorgestellt. Abschnitt 4.2 umfasst hierzu neben der Offline-Charakterisierung von Volumenmodifikationen in verschiedenen Materialien mit einem kommerziellen OCT-System die Demonstration einer Offline-Positionserkennung und diskutiert die Umsetzbarkeit einer Inline-Prozessüberwachung.

4.1 Überwachung leistungsmodulierter Prozesse mit einer Fotodiode

Zur Optimierung der Nahtentstehung wurden verschiedene Techniken zur zeitlichen und räumlichen Energieeinbringung demonstriert, siehe Kapitel 3. Die Modulation der mittleren Laserleistung hat sich dabei hinsichtlich der resultierenden Nahtstruktur [73] und der Fokustoleranzen [73] als vorteilhaft erwiesen. Im Gegensatz zum Schweißen mit konstanter mittlerer Laserleistung bilden sich bei dieser Art der Prozessführung sowohl mit dem gaußförmigen als auch mit dem Bessel-ähnlichen Strahlprofil einzeln regelmäßige Schmelzvolumen aus [73]. Bei konstanter mittlerer Leistung führte das Bessel-ähnliche Strahlprofil zu einer langgezogenen Wechselwirkungsvolumen, das kontinuierlich Material aufschmolz.

Die Entstehung einzelner Schmelzvolumen lässt sich anhand der emittierten Prozessstrahlung überwachen, wodurch sich eine Bewertbarkeit des Prozesses ableiten lässt, siehe Kapitel 2. Um relevante Merkmale zu identifizieren, die eindeutig auf das Prozessergebnis

hindeuten, erfolgt in diesem Abschnitt eine Charakterisierung der emittierten Prozessstrahlung bei der Herstellung individuell geformter Schmelzvolumen bei modulierter Laserleistung [80]. Neben defektfreien Prozessen im Volumen und in optisch kontaktierten Gläsern liegt der Schwerpunkt auf der Erkennung eines Spaltes und den damit einhergehenden Prozessunregelmäßigkeiten.

4.1.1 Methode

Um die Vorgänge bei der Fehlerentstehung zu analysieren und die Charakteristika der Prozessstrahlung den entsprechenden Defekten und Nahtunregelmäßigkeiten zuordnen zu können, wurden Defekte gezielt induziert und mit einer Fotodiode sowie einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet. Im Wesentlichen erfolgt die Versuchsdurchführung mit dem in Kapitel 2 vorstellten Versuchsaufbau, der um die Leistungsmodulation und eine Strahldiagnostik mit einer weiteren Fotodiode ergänzt wurde. Der folgende Abschnitt beschreibt die Versuchsdurchführung, das Probendesign und den verwendeten Versuchsaufbau.

4.1.1.1 Experiment und Probendesign

Die Versuchsdurchführung erfolgte mit Quarzglas und ungehärtetem Alkali-Aluminosilikatglas. Für jedes Material wurden Schweißnähte im Volumenmaterial (a) hergestellt und optisch kontaktierte Proben (b) sowie Proben mit unterschiedlich breitem Spalt von bis zu $10\text{ }\mu\text{m}$ (c) miteinander verschweißt, siehe Bild 4.1. Die Volumenmodifikationen wurden 1 mm unterhalb der Glasoberfläche erzeugt. Bei den Schweißverbindungen wurden die Schmelzvolumen auf der Grenzfläche zweier Gläser zentriert.

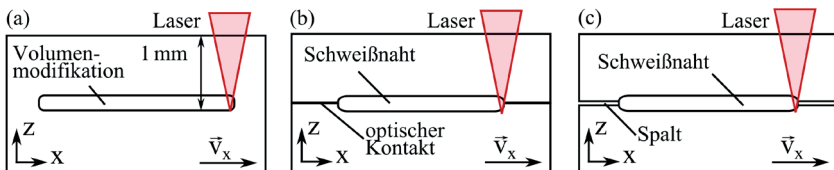


Bild 4.1: Schweißszenarien. (a) Volumenmodifikationen (b) Schweißen von optisch kontaktierten Proben, (c) Schweißen bei verschiedenen Spaltgrößen. [80]

Das Ansprenge der Gläser erfolgte durch das Zusammenpressen polierter Glasproben. Optisch kontaktierte Gläser haften aufgrund der wirkenden van-der-Waals-Kräfte zwischen den Oberflächenmolekülen aneinander [26]. Die Probenpräparation zur Herstellung

unterschiedlich großer Spalte für Alkali-Aluminosilikat- (a) und Quarzglas (b) ist in Bild 4.2 dargestellt. Bei Alkali-Aluminosilikatglas wurden zwei Gläser optisch kontaktiert, siehe linke Darstellung in Bild (a). Um einen Spalt zwischen den Proben zu erhalten, war die untere Glasprobe mit einer polierten Stufe präpariert. Das resultierende Stufenprofil wurde mit einem Laser-Scanning-Mikroskop (Olympus, Lext OLS4100) vermessen und wies aufgrund von Herstellungstoleranzen eine variable Stufentiefe auf, siehe Bild 4.2 (a). Die maximal erreichte Spaltbreite betrug 9 μm . Bei Quarzglas (b) lieferten zusammengepresste runde Proben, die auf einer Seite durch eine 10 μm dicke Folie voneinander getrennt waren, einen linear ansteigenden Spalt. Die Proben aus Quarzglas waren aufgrund der Spaltlänge von 30 mm je 5 mm dick, damit sich die Spaltgröße während des Prozessfortschritts durch das Zusammenziehen der Proben nicht verändert. Als weitere Maßnahme fand die Prozessierung der Probe in Richtung kleiner werdender Spalte statt. Zur Verifizierung der Spaltbreite $d_S = n_R * \lambda_{nR} / 2$ [81] wurde die Anzahl n_R der Newtonringe bei einer Beleuchtungswellenlänge von $\lambda_{nR} = 650 \text{ nm}$ bestimmt.

4.1.1.2 Versuchsaufbau

Der modifizierte Versuchsaufbau zur Überwachung der emittierten Prozessstrahlung mit Hilfe einer Fotodiode und einer Hochgeschwindigkeitskamera ist in Bild 4.3 dargestellt. Die beiden Abbildungen unterhalb des Versuchsaufbaus zeigen zwei aufeinanderfolgende Einzelbilder aus einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Schweißprozesses. Links (mit Beleuchtung) ist die entstehende Schweißnaht und rechts (ohne Beleuchtung) die entsprechende Plasmaemission beim Schweißen in Alkali-Aluminosilikatglas zu sehen.

Zum Schweißen kam der bereits in Kapitel 2 vorgestellte Prototyp des Lasers TruMicro 2030 Femto Edition zum Einsatz. Während der Bearbeitung wurde die mittlere Ausgangsleistung des Lasers durch das modulierte Spannungssignal eines Funktionsgenerators moduliert, um einzelne Schmelzvolumen zu erzeugen. Die Leistungsüberwachung erfolgte mit einer Fotodiode (1). Hierfür wurde der linear polarisierte Laserstrahl durch die kombinierte Verwendung einer Halbwellenplatte (HWP) und eines Dünnpolarisators (TFP) definiert in einen Strahl zur Leistungsüberwachung und einen Bearbeitungsstrahl aufgeteilt. Eine Viertelwellenplatte (QWP) wandelte anschließend den linear polarisierten Bearbeitungsstrahl in einen zirkular polarisierten um, um während der Bearbeitung richtungsabhängige Effekte durch die Polarisation zu vermeiden. Für die Bearbeitung wurde der Strahl durch ein Mikroskopobjektiv in das Material fokussiert. Die Proben wurden während des Schweißprozesses mit einem x-y-z-Tisch bewegt. Die zur Bearbeitung verwendeten Schweißparameter der beiden Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

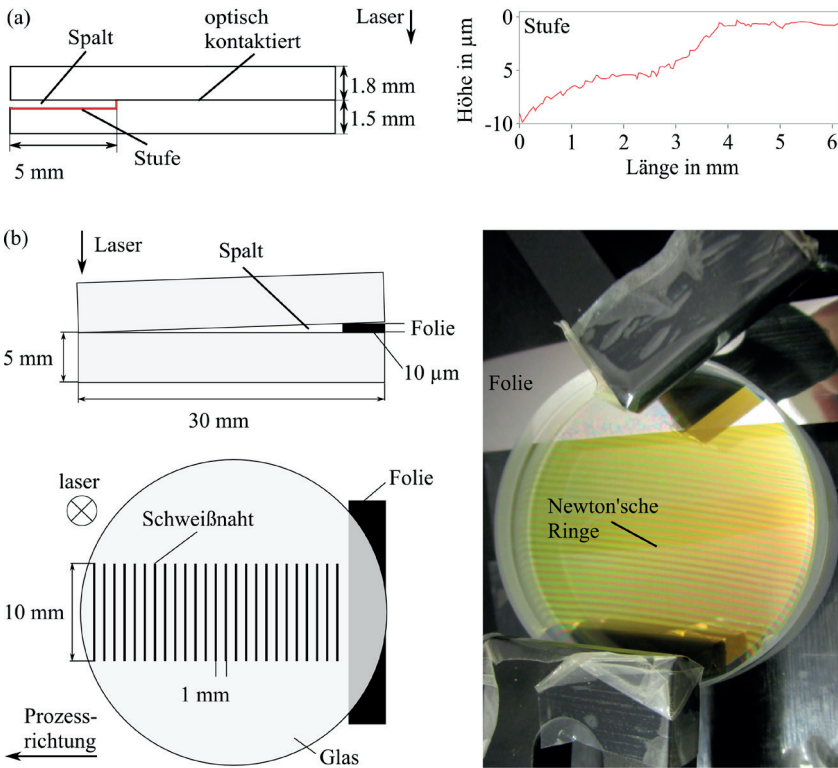


Bild 4.2: Probenpräparation mit unterschiedlichen Spaltbreiten. (a) Optisch kontaktierte Proben aus Alkali-Aluminosilikatglas mit einer polierten Stufe zur Spalterzeugung. (b) Zusammengepresste Proben aus Quarzglas, die einseitig durch eine 10 μm dicke Folie getrennt sind und dadurch unterschiedliche Spaltbreiten lieferten. [80]

Material	f (mm)	NA	d_f (μm)	f_{mod} (kHz)	n_B	P (W)	v (mm/s)
Alkali-Aluminosilikatglas	20	0,25	5,2	1	2	3,6	10
Quarzglas	40	0,13	10,5	0,1	8	17,6	10

Table 4.1: Bearbeitungsparameter für das Schweißen von Quarz- und Alkali-Aluminosilikatglas. [80]

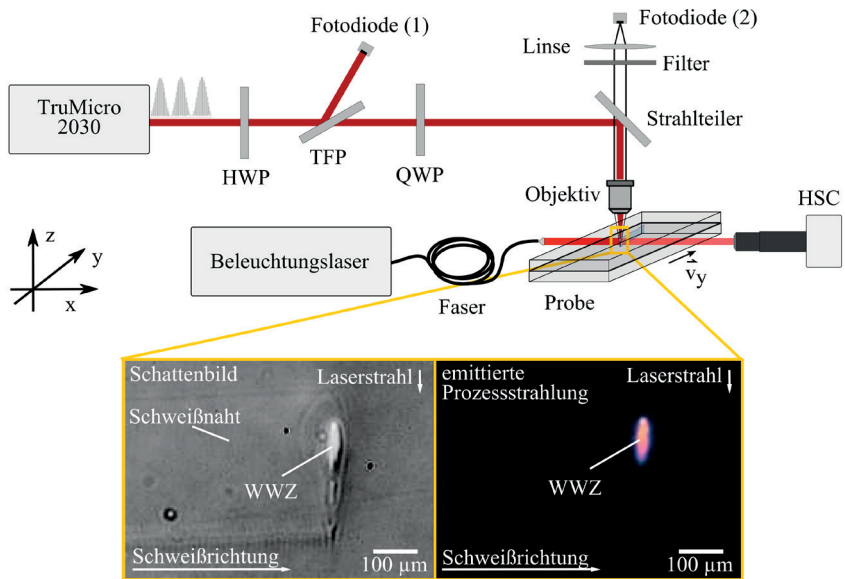


Bild 4.3: Versuchsaufbau zur Überwachung der emittierten Prozessstrahlung beim Schweißen mit modulierter Laserleistung. Abbildungen unterhalb: Aufeinanderfolgende Einzelbilder einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Schweißprozesses. Links: Entstehende Schweißnaht. Rechts: Entsprechende Plasmaemission beim Schweißen in Alkali-Aluminosilikatglas. [80]

Die Detektion der emittierten Prozessstrahlung erfolgte coaxial zum Bearbeitungsstrahl mit einer Fotodiode (2). Hierfür trennte ein dichroitischer Strahlteiler das kollimierte Prozesslicht nach dem Bearbeitungsobjektiv vom Bearbeitungsstrahl. Der Strahlteiler war im Spektralbereich von 400 nm bis 1000 nm transparent. Typischerweise emittiert die Wechselwirkungszone Strahlung, die ein kontinuierliches Spektrum aufweist [26, 82]. Um das Spektrum der Plasmaemission wellenlängenselektiv zu detektieren, wurden verschiedene Bandpass-Interferenzfilter mit einer zentralen Wellenlänge im Spektralbereich von 400 nm bis 875 nm und einer spektralen Breite von 50 nm verwendet. Bei den verschiedenen Wellenlängen waren ähnliche Signalverläufe zu beobachten. Es werden daher ausschließlich die Ergebnisse mit dem 875 nm Filter gezeigt, da dieser Spektralbereich die höchste Signalintensität lieferte. Im Anschluss an die optische Filterung der Prozessstrahlung fokussierte eine Linse mit einer Brennweite von 50 mm das kollimierte Prozesslicht auf eine Fotodiode. Die Detektorfläche war 3,6 mm x 3,6 mm groß, um sicherzustellen, dass die Wechselwirkungszone auch bei bis zu 1 mm großen Schmelzvo-

lumen vollständig auf den Detektor abgebildet wird. Die Beobachtung der Prozesszone mit und ohne Beleuchtung erfolgte durch eine Hochgeschwindigkeitskamera, wie in Kapitel 2 beschrieben.

4.1.2 Überwachung einzelner Schmelzvolumen

Die sequentielle Erzeugung einzelner Schmelzvolumen ermöglicht die Überwachung jedes einzelnen Schmelzvolumens. Zur Demonstration wird eine Volumenmodifikation in Alkali-Aluminosilikatglas bei einer sinusförmig modulierten Laserleistung erzeugt. In Bild 4.4 ist das zeitaufgelöste Tiefenprofil der emittierten Prozessstrahlung (a) und die gemessene Intensität der emittierten Prozessstrahlung zusammen mit der angelegten Laserleistung während des Schweißens (b) dargestellt. Jeder der dargestellten Streifen entspricht der Trajektorie einer Wechselwirkungszone und kennzeichnet dadurch die Entstehung eines individuellen Schmelzvolumens. Durch periodisches Erhöhen und Verringern der Laserleistung wird in der Nähe des geometrischen Fokus periodisch eine Wechselwirkungszone gebildet, die sich ausdehnt und in Richtung der Laserquelle bewegt. Dieser Prozess führt zu tropfenförmigen Schmelzvolumen [73]. Während der Bearbeitung ändern sich Größe und Helligkeit der Wechselwirkungszone periodisch. Die periodische Helligkeitsänderung kann mit einer Fotodiode beobachtet werden [Bild 4.4 (b)]. Wie bei der tiefaufgelösten Plasmaemission [Bild 4.4 (a)] nimmt die Intensität der Plasmaemission mit jeder Modulationssequenz periodisch zu und ab. Folglich entspricht jede Emissionsspitze einem einzelnen Schmelzvolumen.

Die Überwachung der einzeln erzeugten Schmelzvolumen erfolgte beim Schweißen verschiedener Gläser. Bild 4.5 zeigt beispielhaft den gemittelten und normierten Verlauf der Strahlungsemission für ein einzelnes Schmelzvolumen, das durch eine sinusförmig modulierte mittlere Laserleistung in Alkali-Aluminosilikatglas (a) und Quarzglas (b) hergestellt wurde. Die gemittelte Strahlungsemission ergibt sich aus der aufgezeichneten Strahlungsemission von 200 Schmelzvolumen. Die schwarz gestrichelte Linie markiert die entsprechende 2-Sigma-Standardabweichung. Die auf das Maximum normierte Laserleistung ist rot dargestellt.

Zwischen Quarz- und Alkali-Aluminosilikatglas gibt es einen Unterschied in der Modulationsfrequenz. Bei Quarzglas entstehen durch die zehn Mal längere Modulationssequenz Schmelzvolumen, die etwa fünf Mal größer sind als bei Alkali-Aluminosilikatglas. Somit sind die Wachstumsraten in beiden Materialien deutlich ähnlicher als die Bearbeitungsdauer vermuten lässt. Der Prozess in Alkali-Aluminosilikatglas ist dementsprechend nicht übermäßig schneller, sondern kürzer. Darüber hinaus sind in den Emissionsverläufen

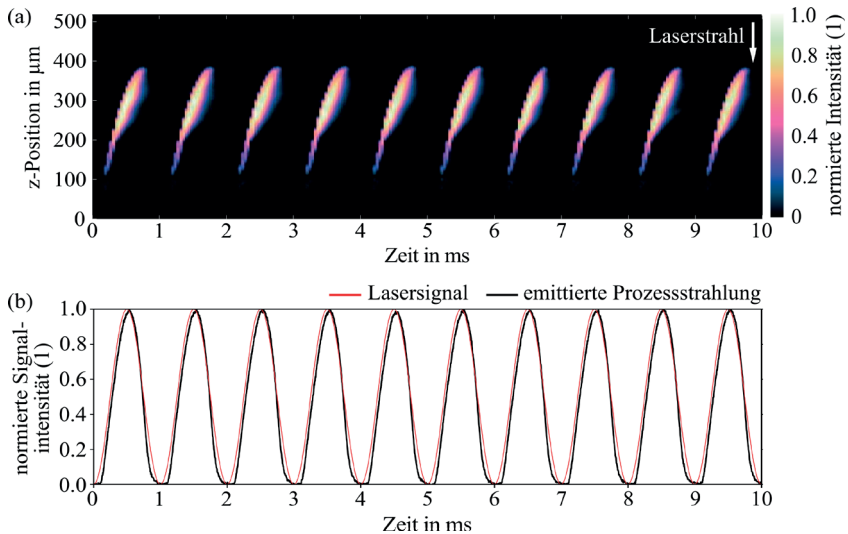


Bild 4.4: (a) Zeitaufgelöstes Tiefenprofil und (b) die normierte Intensität der emittierten Prozessstrahlung zusammen mit der angelegten Laserleistung, aufgezeichnet während der Herstellung einzelner Schmelzvolumen in Alkali-Aluminosilikatglas durch sinusförmige Leistungsmodulation. [80]

der beiden Materialien zwei Unterschiede zu erkennen: Quarzglas zeigt im Gegensatz zu Alkali-Aluminosilikatglas etwa 1,5 ms nach Beginn der Strahlungsemission einen Knick im Emissionsverlauf, der noch nicht nachvollziehbar ist. Des Weiteren sind die Maxima der emittierten Prozessstrahlung und der momentanen mittleren Leistung bei Quarzglas um etwa 1,5 ms versetzt. Obwohl die Laserleistung verringert wird, nimmt die Intensität des Prozessleuchtens für etwa 2 ms weiter zu, bevor diese ebenfalls abnimmt. Dies deutet darauf hin, dass der Wechselwirkungszone trotz der verringerten Laserleistung mehr Energie zugeführt, als durch Wärmeleitung abtransportiert wird, wodurch die Wechselwirkungszone weiter anwächst und damit mehr Strahlung emittiert. In beiden Materialien wird die Plasmaemission in jeder Modulationssequenz reproduziert und lässt damit auf eine regelmäßige Schweißnaht schließen.

4.1.3 Schweißen von optisch kontaktierten Proben

Um einen optischen Kontakt zwischen den Oberflächen zu gewährleisten, werden Glasteile vor dem Schweißen üblicherweise angesprengt. Zur Analyse des Einflusses angesprengter

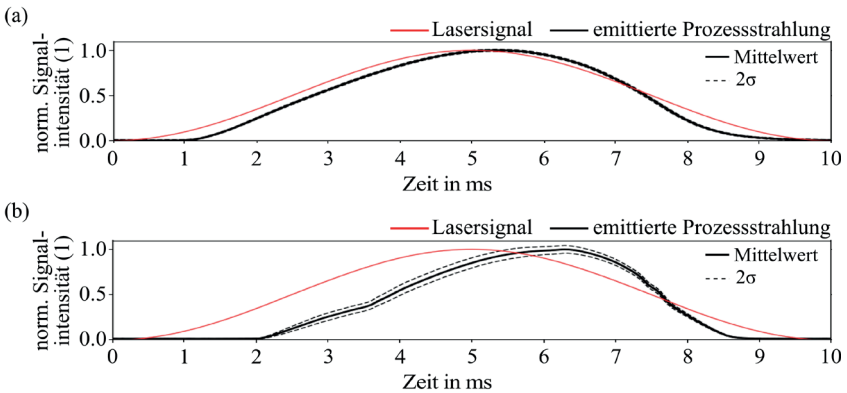


Bild 4.5: Aus 200 Schmelzvolumen gemittelter Verlauf der Strahlungsemission für ein einzelnes Schmelzvolumen beim Schweißen mit sinusförmiger Leistungsmodulation in (a) Alkali-Aluminosilikatglas und (b) Quarzglas. [80]

Oberflächen auf die Plasmaemission ist in Bild 4.6 der gemittelte Emissionsverlauf eines Schmelzvolumens bei der Herstellung einer Volumenmodifikation in Alkali-Aluminosilikatglas (a) und der einer Schweißnaht in optisch kontaktiertem Alkali-Aluminosilikatglas (b) gegenübergestellt. Wie aus den Messungen hervorgeht, gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den aufgezeichneten Plasmaemissionen. Dies deutet darauf hin, dass der Prozess im Bereich der optisch kontaktierten Flächen nicht beeinflusst wird. Im Hinblick auf die Prozessüberwachung kann gefolgert werden, dass die Position der Schweißnaht bekannt und entsprechend eingestellt sein muss, um sicherzustellen, dass zwei Teile mit optischem Kontakt stabil verschweißt wurden, da dies im Überwachungssignal nicht zu erkennen ist. Bei Quarzglas ist dasselbe Verhalten zu beobachten.

4.1.4 Spalterkennung und Prozessabbruch

Wenn ein optischer Kontakt aufgrund der Oberflächenqualität oder der Geometrie der Komponenten nicht hergestellt werden kann, können Spalte eine dauerhafte Verbindung zwischen zwei Teilen verhindern [29]. Daher wird im Folgenden der Einfluss der Spaltbreite und der Spaltlage sowie der damit verbundenen Prozessfehler (Prozessunterbrechung) und Grenzen der Spalterkennung beim Schweißen diskutiert.

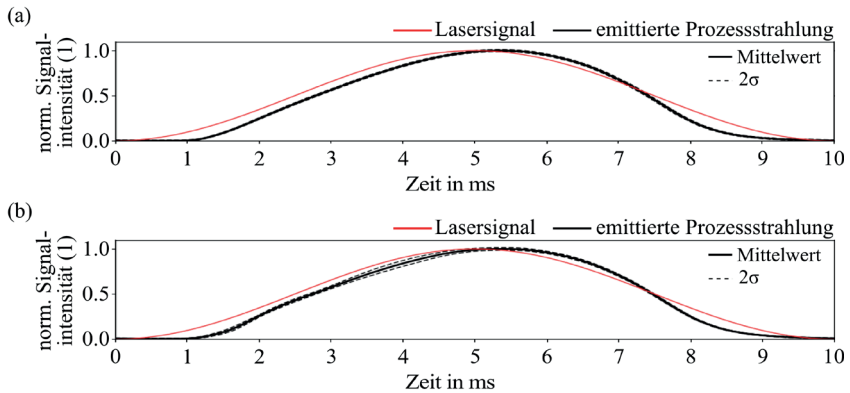


Bild 4.6: Aus 200 Schmelzvolumen gemittelter Verlauf der Strahlungsemission für ein einzelnes Schmelzvolumen beim Schweißen mit sinusförmiger Leistungsmodulation. (a) Volumenmodifikation in Alkali-Aluminosilikatglas. (b) Schweißnaht in optisch kontaktiertem Alkali-Aluminosilikatglas. [80]

4.1.4.1 Spaltbreite

Um die Spaltüberbrückung beim Schweißen zu untersuchen, wurde die Plasmaemission beim Schweißen von Quarz- und Alkali-Aluminosilikatglas mit unterschiedlich breitem Spalt zwischen den beiden Fügepartnern überwacht. Bild 4.7 zeigt den gemittelten Emissionsverlauf bei der Herstellung einzelner Schmelzvolumen in Quarzglas. Der Spalt variierte zwischen 0 μm bis 10 μm . Je Spaltbreite wurden 16 Schmelzvolumen erzeugt. Um eine Streuung der Laserstrahlung durch Hohlräume [69] oder ausgestoßene Schmelze zu vermeiden, waren die Schmelzvolumen im Abstand von 200 μm angeordnet. Die Wurzel der Schmelzvolumen befand sich 600 μm unterhalb der Grenzfläche, um eine maximale Breite der Schweißnaht an der Grenzfläche zu erhalten. Die Gesamthöhe der Schmelzvolumen betrug 800 μm . Erreicht das Schmelzvolumen die Grenzfläche, zeigt der Emissionsverlauf ab einer Spaltgröße von 2,5 μm etwa 4,5 ms nach Beginn der Modulationssequenz eine Intensitätsspitze, gefolgt von einem Einbruch der Strahlungsemission und einem Wiederanstieg. Die Zunahme der Strahlungsintensität nach dem Einbruch deutet auf die Fortführung des Prozesses hin. Die Tiefe und die Breite dieses Einbruchs nehmen mit zunehmender Spaltgröße zu. Bei einer Spaltbreite von 9,5 μm kommt es zu einem vollständigen Abbruch der Strahlungsemission.

Der Einbruch der Strahlungsemission hängt mit der Spaltüberbrückung zusammen: Sobald das Schmelzvolumen die Grenzfläche erreicht, bewirkt der im Bearbeitungsbereich

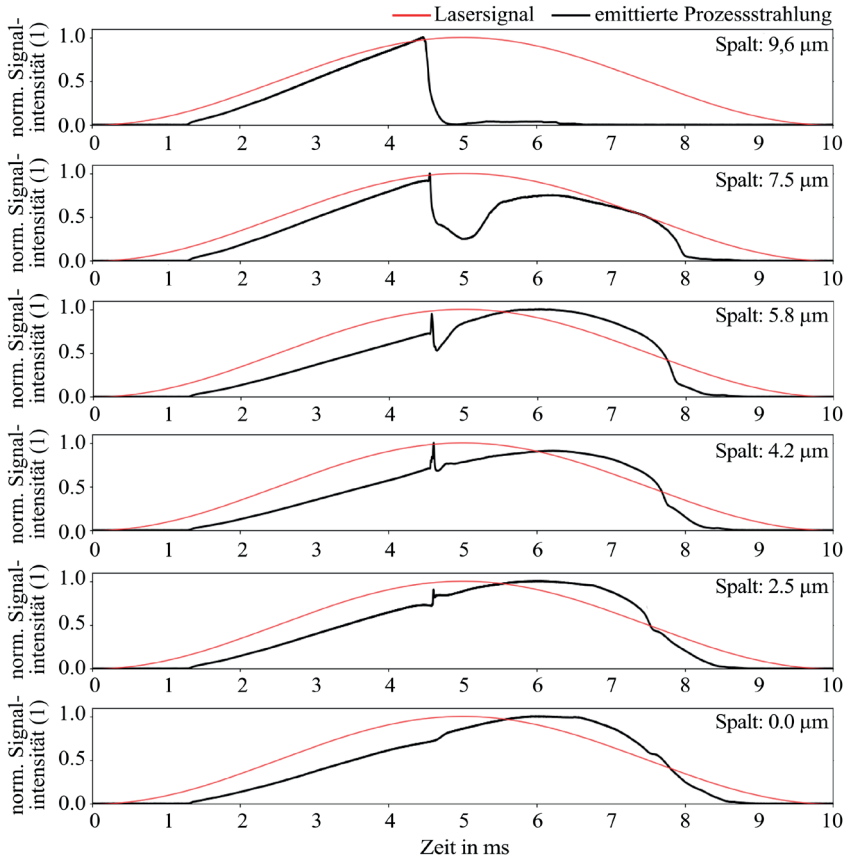


Bild 4.7: Aus 16 Schmelzvolumen gemittelter Verlauf der Strahlungsemission für ein einzelnes Schmelzvolumen in Quarzglas beim Schweißen mit verschiedenen Spaltgrößen. [80]

herrschende Druck einen Schmelzausstoß in den Raum zwischen die geschweißten Proben. Wird genügend Schmelze ausgestoßen, um den Spalt zu füllen, setzt sich der Prozess im oberen Glas fort. Dadurch entsteht eine dauerhafte Verbindung zwischen den Proben. Erreicht die Wechselwirkungszone die Grenzfläche, zeigt die emittierte Prozessstrahlung eine Intensitätsspitze, bevor die Intensität der Strahlungsemission abfällt. Es wird davon ausgegangen, dass das Plasma im Vollmaterial optisch dicht ist, sodass Strahlung aus dem Zentrum nicht nach außen dringt. Sobald die Wechselwirkungszone

den Spalt erreicht, dehnt sich das Plasma aus und wird optisch dünner. Dies ermöglicht zunächst eine weiter verteilte Absorption, vor allem aber eine intensivere Emission. Infolge der Ausdehnung kühlt das Plasma ab und wird zunehmend dünner, wodurch sich die Absorption verringert. Die Intensität der Plasmaemission nimmt ab, was zu den in Bild 4.7 dargestellten Verläufen mit Einbrüchen führt. Falls der Spalt klein genug und das Plasma noch ausreichend dicht ist (hier $\leq 7,5 \mu\text{m}$), reicht die Absorption aus, um das Plasma wieder zu entfachen. Das Plasma wandert nach oben und dehnt sich wieder aus. Dadurch nimmt die Intensität der emittierten Prozessstrahlung ebenfalls wieder zu. Sobald die eingestrahlte Laserleistung reduziert wird und die Wechselwirkungszone zu weit in den konvergenten Strahl gerückt ist, endet der Prozess und damit die Strahlungsemission.

4.1.4.2 Prozessabbruch

Ist der Spalt zu groß, um überbrückt zu werden, bricht der Prozess an der Grenzfläche ab und geht mit einem Abbruch der Strahlungsemission einher, siehe oberste Grafik in Bild 4.7. Dieser Prozess ist durch eine Sequenz von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Bild 4.8 dargestellt. Das Bild zeigt die Entstehung eines Schmelzvolumens nahe der Glas-Luft-Grenzfläche einer einzelnen Glasplatte aus Alkali-Aluminosilikatglas. Die Intensität der entsprechenden Plasmaemission ist oberhalb dargestellt. Mit zunehmender Laserleistung entsteht ein Schmelzvolumen in der Nähe des geometrischen Fokus und wächst in Richtung der Grenzfläche. Sobald das Schmelzvolumen die Grenzfläche erreicht hat, wird die Schmelze durch den im Bearbeitungsbereich herrschenden Druck ausgestoßen und hinterlässt an der Grenzfläche des Glases einen Hohlraum. Während des Schmelzausstoßes expandiert das Plasma und kühlt soweit ab, dass der Prozess nicht mehr aufrechterhalten werden kann. Das Plasma kollabiert, wodurch die Absorption und die Strahlungsemission abbrechen, vergleiche mit oberer Grafik in Bild 4.7. Im Folgenden beeinflussen die an der Glasoberfläche abgeschiedene Schmelze und der verbleibende Hohlraum die Strahlausbreitung. Komplexe Oberflächenstrukturen können Streuung [75], Brechung [83] und Beugung [83] der einfallenden Laserstrahlung verursachen und dadurch einen Neustart des Prozesses verhindern. Bricht der Prozess beim Schweißen an der Grenzfläche ab, entsteht keine dauerhafte Verbindung zwischen den Fügepartnern.

Ein vollständiger Einbruch der emittierten Prozessstrahlung kann bei einem nicht-überbrückbaren Spalt nur dann bei jedem einzelnen Schmelzvolumen beobachtet werden, wenn der Abstand zwischen den Schmelzvolumen ausreichend groß ist. Bild 4.9 zeigt zwei in Alkali-Aluminosilikatglas hergestellte Schweißnähte mit einem Abstand von $10 \mu\text{m}$ (a) und $40 \mu\text{m}$ (b) zwischen den Schmelzvolumen. Darunter ist jeweils ein Ausschnitt der gemessenen Strahlungsemission und der angelegten Laserleistung abge-

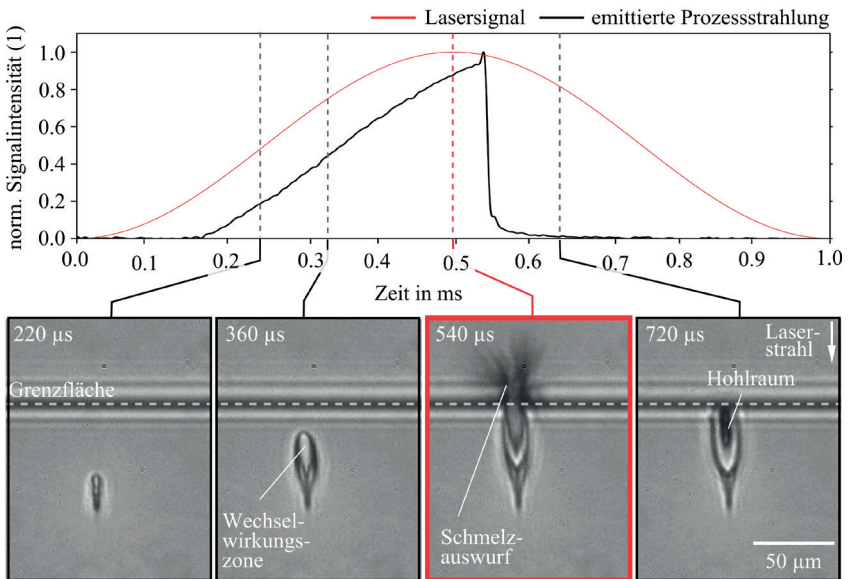


Bild 4.8: Strahlungsemission und Bildsequenz eines Schmelzvolumens in Alkali-Aluminosilikatglas, das nahe der Glas-Luft-Grenzfläche erzeugt wird und zum Auswurf von Schmelze führt. [80]

bildet. Dieser Ausschnitt zeigt den Emissionsverlauf von 20 (a) beziehungsweise fünf (b) Schmelzvolumen aus der Mitte der oben gezeigten Schweißnaht. Die unterschiedlichen Schmelzvolumenabstände wurden durch die Variation der Modulationsfrequenz und einer identischen Periodendauer von 1 ms realisiert. Die Modulationsfrequenz betrug $f_{mod} = 1 \text{ kHz}$ bei einem Abstand von $10 \text{ }\mu\text{m}$ und $f_{mod} = 250 \text{ Hz}$ bei einem Abstand von $40 \text{ }\mu\text{m}$ zwischen den Schmelzvolumen. Die Vorschubgeschwindigkeit war mit $v = 10 \text{ mm/s}$ in beiden Fällen identisch.

Nach einem Prozessabbruch stören die ausgeworfene Schmelze an der Grenzfläche und die verbleibenden Hohlräume im Volumen die Strahlausbreitung. Dadurch reicht die Intensität der Laserstrahlung nicht aus, um im Anschluss an einen Prozessabbruch weitere Schmelzvolumen zu erzeugen, welche die Grenzfläche ebenfalls erreichen und damit zu einem detektierbaren Signaleinbruch führen. Diese Schmelzvolumen ohne Grenzflächendurchbruch vergrößern sich mit zunehmendem Abstand zur Störstelle, bis es erneut zum Prozessabbruch kommt. Dieses Verhalten führt zu unregelmäßigen Schweißnähten mit Rissen und Hohlräumen und ist in der Regel bei stark überlappenden (35 %)

Schmelzvolumen zu beobachten [Bild 4.9 (a)]. In diesem Fall ist das Signal durch einen Einbruch der Plasmaemission gekennzeichnet, gefolgt von Emissionen zunehmender Intensität. Bei größeren Abständen von 40 μm zwischen den Schmelzvolumen [Bild 4.9 (b)] wird die Laserstrahlung nicht mehr signifikant gestört. Jedes Schmelzvolumen durchdringt die Grenzfläche, wodurch bei jedem Schmelzvolumen ein Abbruch der emittierten Prozessstrahlung detektierbar ist. Zu Überwachungszwecken ist der Abbruch der emittierten Prozessstrahlung sowie das periodische Muster aus Abbrüchen und Emissionen zunehmender Intensität geeignet, um die Größe des ungebundenen Bereichs zu bestimmen.

4.1.4.3 Spaltposition

Die Merkmale, die aus der Spaltüberbrückung resultieren, eignen sich dazu, die Position der Grenzfläche im Schmelzvolumen zu erkennen. Bild 4.10 zeigt die gemittelte Plasmaemission von drei Schweißnähten in Quarzglas, die unterschiedlich zur Grenzfläche positioniert wurden. Die Position p definiert den Abstand vom untersten Punkt eines Schmelzvolumens bis zur Grenzfläche. In allen drei gezeigten Fällen ergibt sich die gemittelte Plasmaemission aus dem Emissionsverlauf von 16 Schmelzvolumen, die im Abstand von 300 μm hergestellt wurden. Die Spaltbreite betrug 6,2 μm . Durch die Entstehung der Schmelzvolumen von unten nach oben kann die Lage des Einbruchs in der emittierten Prozessstrahlung einer Position auf der Längsachse des Schmelzvolumens zugeordnet werden. Diese ändert sich durch eine Variation der Spaltposition. Merkmale, die im Signal zuerst erscheinen, entsprechen einem Ereignis, das näher an der Wurzel des aufgeschmolzenen Volumens auftritt.

Bei Schmelzvolumen, deren Wurzel näher an der Grenzfläche liegt, sind zudem größere Signaleinbrüche infolge eines Spalts detektierbar. Der Verlauf nach einem Einbruch ist sehr ähnlich. Der größere Signaleinbruch deutet auf einen geringeren Schmelzausstoß hin. Die ausgeworfene Schmelze kühlt aufgrund des größeren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses schneller ab und führt damit zu einer schwächeren Leuchterscheinung nach dem Schmelzausstoß.

Die Breite der Naht variiert aufgrund der tropfenförmigen Schmelzvolumen in longitudinaler Richtung. Da die Stabilität einer Verbindung von der Größe der angebundenen Fläche abhängt [34, 84], gibt es in Bezug auf die Stabilität der Verbindung eine optimale Position für die Grenzfläche. Diese befindet sich an der breitesten Stelle der Naht. Diese Position der Grenzfläche kann mit einer Fotodiode überwacht werden, siehe Bild 4.11. Die Abbildung zeigt eine Korrelation des Schmelzvolumenwachstums mit

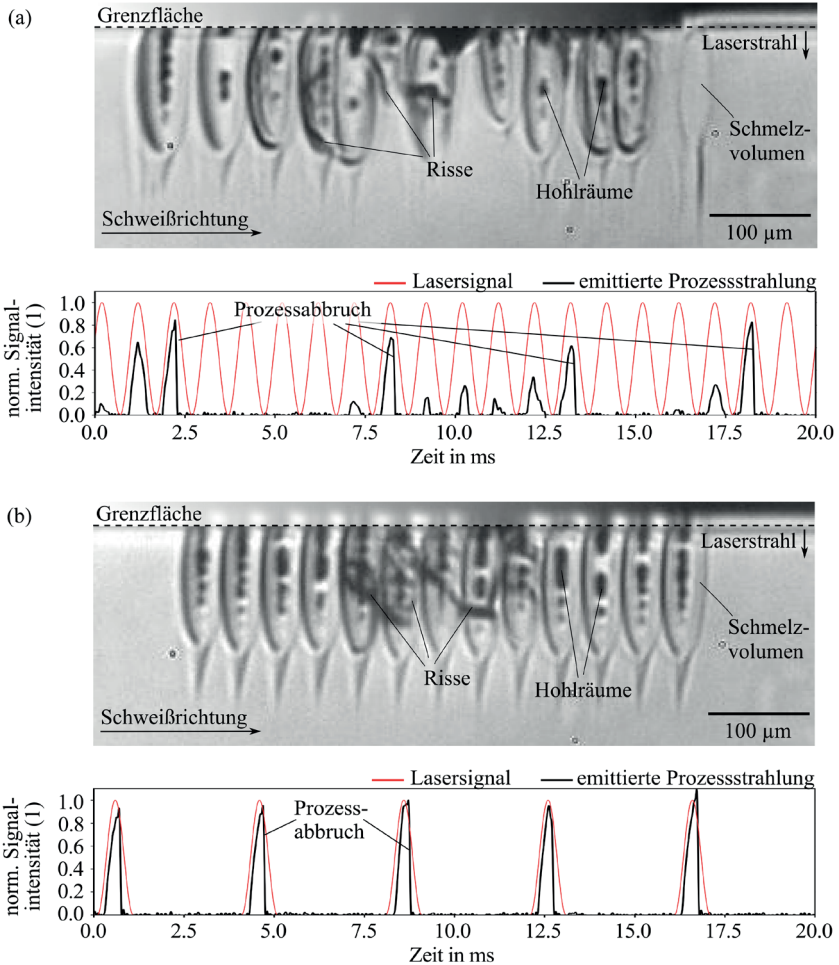


Bild 4.9: Mikroskopbild und ein Ausschnitt der entsprechenden Strahlungsemission von Schweißnähten in Alkali-Aluminosilikatglas, die nahe der Grenzfläche eines nicht überbrückbaren Spaltes hergestellt wurden. Die Schmelzvolumen innerhalb der Schweißnaht sind im Abstand $10\text{ }\mu\text{m}$ (a) und $40\text{ }\mu\text{m}$ (b) angeordnet. [80]

der emittierten Plasmaemission und der Breite des Schmelzvolumens über seine Höhe. Für ein gutes Schweißergebnis hinsichtlich der Verbindungsstabilität muss sichergestellt sein, dass sich die Grenzfläche immer an der breitesten Stelle der Naht befindet. Im

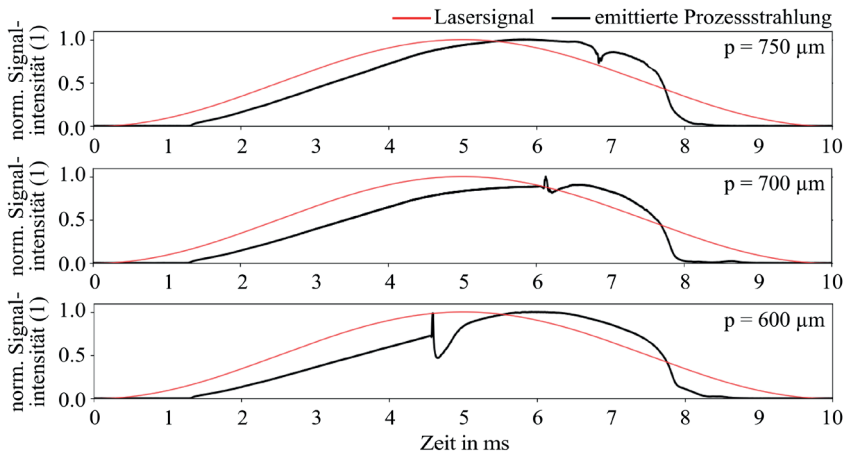


Bild 4.10: Aus 16 Schmelzvolumen gemittelte Verläufe der Strahlungsemission für drei Schmelzvolumen mit unterschiedlicher Positionierung p zur Grenzfläche. Die Position p definiert den Abstand der Wurzel der Schmelzvolumen zur Grenzfläche. Der laterale Abstand zwischen den Schmelzvolumen betrug $300\ \mu\text{m}$, die Spaltbreite $6,2\ \mu\text{m}$. [80]

vorliegenden Beispiel ist dies etwa $600\ \mu\text{m}$ über dem Ursprung des Schmelzvolumens der Fall. Die Position der Grenzfläche wird durch das entstehende Schmelzvolumen $3,5\ \text{ms}$ nach Beginn der Schmelzvolumenbildung erreicht. Bricht das Signal an dieser Stelle ein, kann bezüglich der Stabilität von einem optimal positionierten Schmelzvolumen ausgegangen werden. Der grüne Signalverlauf zeigt die emittierte Prozessstrahlung eines Schmelzvolumens mit einem Spalt an der entsprechenden Stelle. Eine Abweichung des Einbruchs von einer als optimal definierten Position deutet auf ein falsch positioniertes Schmelzvolumen hin. Mit Bezug zur Qualitätssicherung ermöglicht die Überwachbarkeit der Grenzflächenposition, Toleranzen in der Probenpositionierung, wie beispielsweise die Verkipfung, durch Anpassung der Fokusposition während des Schweißens auszugleichen.

4.1.4.4 Grenzen der Spalterkennung

In der Praxis ist die Möglichkeit zur Spalterkennung begrenzt. In Bild 4.12 ist die gemessene Signalintensität der emittierten Prozessstrahlung der ersten zehn Schmelzvolumen einer Schweißnaht in Quarzglas (a) und Alkali-Aluminosilikatglas (b) dargestellt. Es kamen jeweils Parameter zum Einsatz, die zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Verbindung geeignet sind. Die Größe des Spaltes zwischen den Gläsern betrug

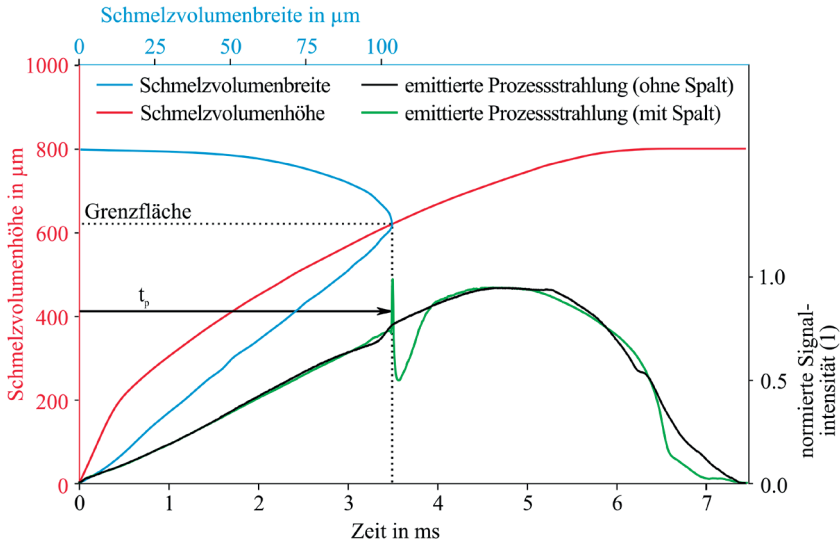


Bild 4.11: Korrelation des Schmelzvolumenwachstums mit der emittierten Plasmaemission und der Breite des Schmelzvolumens über seine Höhe. t_p ist die Dauer, bis das Schmelzvolumen die Grenzfläche erreicht. [80]

3 μm . Schmelzvolumen, die eine Überbrückung des Spaltes anzeigen, sind durch grüne Ellipsen hervorgehoben. Die Bilder auf der rechten Seite zeigen einen Ausschnitt der resultierenden Schweißnaht von oben.

Bei getrennten Schmelzvolumen, wie sie bei Quarzglas entstehen, ist in jedem Schmelzvolumen ein Spalt detektierbar [Bild 4.12 (a)]. In Alkali-Aluminosilikatglas, bei dem die Schmelzvolumen mit 35 % deutlich überlappen, weist dagegen nur das erste Schmelzvolumen das charakteristische Signal für einen überbrückten Spalt auf, siehe Bild 4.12 (b). Der Verlauf der emittierten Prozessstrahlung für die folgenden Schmelzvolumen ähnelt dem beim Schweißen ohne Spalt. Dies deutet darauf hin, dass der Spalt dort, wo die nächste Modifikation entsteht, bereits mit Schmelze gefüllt ist. Die Absorption und der Prozess werden davon nicht beeinträchtigt. Vergrößert sich der Abstand zwischen den Schmelzvolumen in Alkali-Aluminosilikatglas durch Auslassen einzelner Modulationssequenzen, steigt die Anzahl der Schmelzvolumen mit einem detektierbaren Spalt, siehe Bild 4.13. Bei getrennten Schmelzvolumen (oberster Graph von Bild 4.13) ist der Spalt in jedem einzelnen Schmelzvolumen detektierbar. Daraus wird geschlossen,

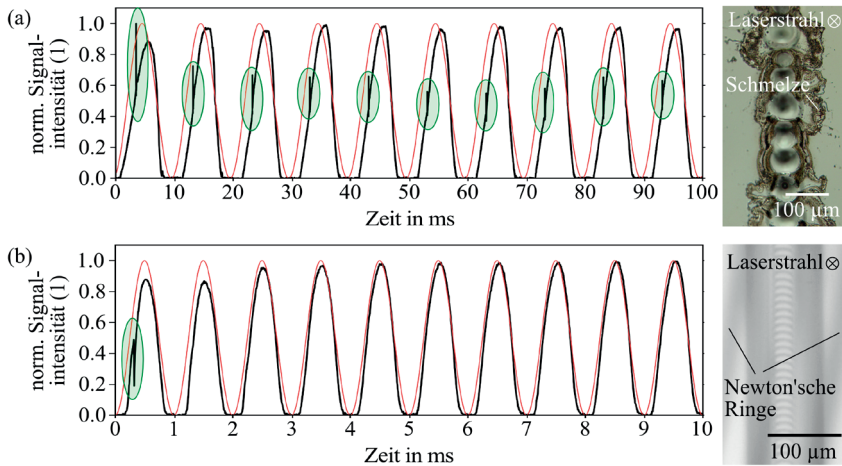


Bild 4.12: Emittierte Prozessstrahlung einer Schweißnaht in Quarzglas (a) und Alkali-Aluminosilikatglas (b). Die Größe des Spaltes zwischen den Gläsern betrug 3 μm . Schmelzvolumen, die eine Überbrückung des Spaltes anzeigen, sind durch grüne Ellipsen hervorgehoben. Die Bilder auf der rechten Seite zeigen Draufsichten der entsprechenden Schweißnaht. [80]

dass eine zuverlässige Erkennung der z-Lage des Spalts auf der Grundlage der emittierten Prozessstrahlung räumlich getrennte Schmelzvolumen erfordert.

4.1.5 Risserkennung

Beim Schweißen von Proben mit einem Spalt traten häufig Risse auf. Bild 4.14 zeigt die Mikroskopaufnahme einer Schweißnaht in Alkali-Aluminosilikatglas, die solche Risse aufweist (a). Die Risse sind als dunkle Strukturen zu sehen. Abgesehen von den Rissen innerhalb der Schweißnaht, die auf der rechten Seite zu erkennen sind, gibt es im Glas außerhalb der Naht große Risse. In (b) ist ein Ausschnitt der gemessenen Strahlungsemission dargestellt. Die Emissionsverläufe der einzelnen Schmelzvolumen zeigen die bekannte Struktur und weisen auf einen fehlerfreien Schweißprozess hin.

Die mit der Hochgeschwindigkeitskamera im zeitlichen Abstand von 80 ms aufgenommenen Einzelbilder in Bild 4.15 zeigen die Rissentstehung bei der Bearbeitung. Während im linken Bild (t_0) keine Risse zu sehen sind, zeigt das rechte Bild (t_1) einen Riss im Bereich der Grenzfläche. Risse entstehen demnach beim Abkühlen nach der Bearbeitung und werden auf schrumpfungsinduzierte Spannungen zurückgeführt [27].

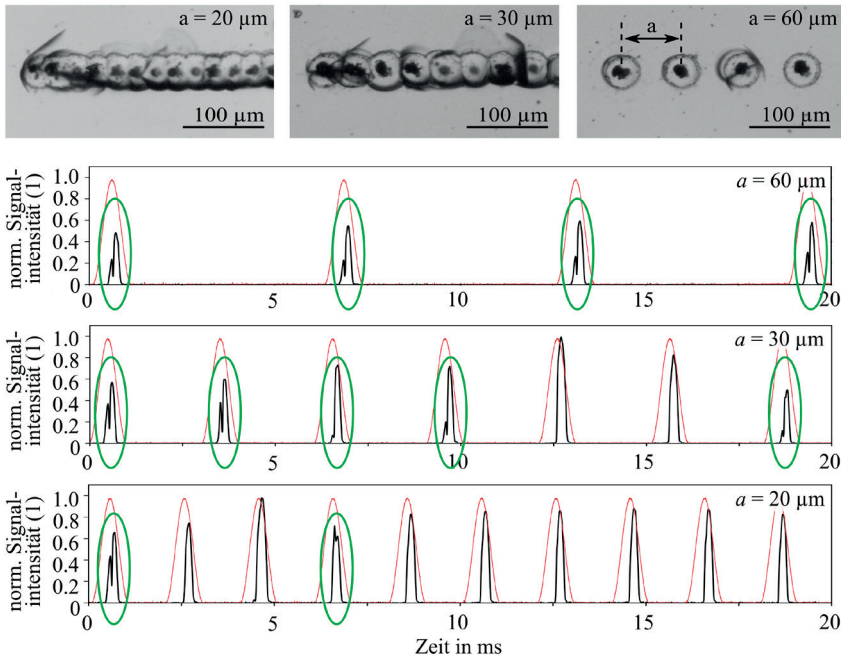


Bild 4.13: Emittierte Prozessstrahlung und Mikroskopaufnahme (Draufsicht) von drei Schweißnähten in Alkali-Aluminosilikatglas, bei welchen der Abstand a zwischen den Schmelzvolumen variiert wurde. Die Spaltgröße betrug $3\ \mu\text{m}$. Merkmale, die auf einen überbrückten Spalt hindeuten, sind in grüner Farbe hervorgehoben. [80]

Zur Risserkennung beim Glasschweißen lässt sich die Überwachung mit einer Fotodiode um weitere Verfahren ergänzen. Es wurde unter anderem ein optisches Mikrofon verwendet um die Rissentstehung beim Schweißen zu detektieren [85]. Das Prinzip des optischen Mikrofons besteht darin, Dichteänderungen eines optischen Mediums zu erfassen. Auf diese Weise lassen sich beim Glasschweißen Risse detektieren, die Luftschall mit Frequenzen von bis zu 1 MHz generieren. Auf die Risserkennung mit dem optischen Mikrofon wird im Folgenden nicht weiter eingegangen, ist aber unter [85] zu finden. Eine weitere Möglichkeit, die zur Risserkennung während des Schweißens genutzt wurde, ist die Beobachtung der erzeugten Schweißnaht mit einer koaxial in den Strahlengang integrierten Kamera. Die an Rissen reflektierte Prozess- oder Laserstrahlung kann zur Detektion genutzt werden. Auf die kamerabasierte Risserkennung wird ebenfalls nicht weiter eingegangen. Nähere Informationen sind unter [86] zugänglich.

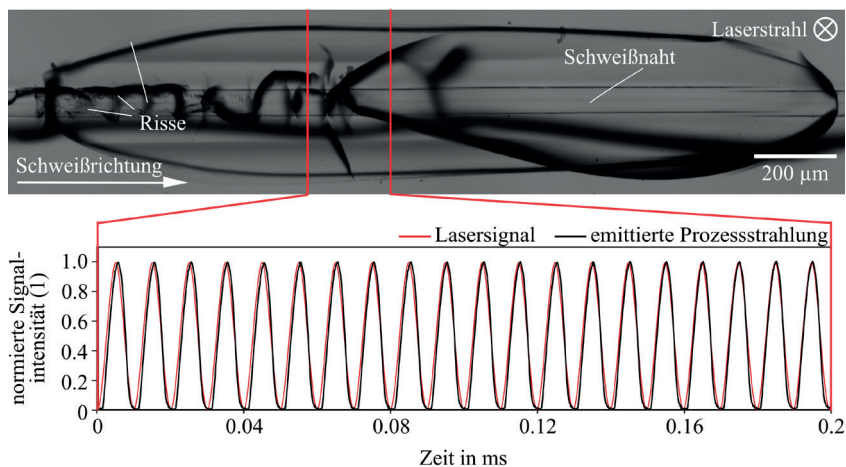


Bild 4.14: (a) Mikroskopische Aufnahme einer Schweißnaht in Alkali-Aluminosilikatglas mit Rissen. (b) Ausschnitt der beim Schweißen aufgezeichneten Plasmaemission. [80]

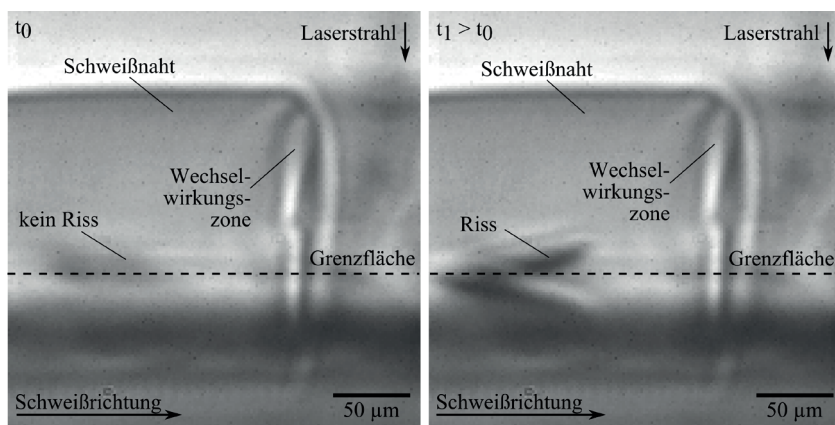


Bild 4.15: Rissentstehung während der Bearbeitung.

4.1.6 Fazit

In Abschnitt 4.1 wurde gezeigt, dass leistungsmodulierte Schweißprozesse mit einem gaußförmigen Strahlprofil durch eine Fotodiode überwacht werden können. Der gemessene Intensitätsverlauf der emittierten Prozessstrahlung liefert Informationen über die

Qualität der Verbindung. Die Modulation der mittleren Laserleistung ermöglicht die Überwachung jedes einzelnen Schmelzvolumens innerhalb einer Schweißnaht und damit eine umfassende Bewertbarkeit einer Schweißverbindung. Aufgrund der gleichmäßigen Schmelzvolumenerzeugung ist die emittierte Prozessstrahlung bei fehlerfreien Prozessen reproduzierbar. Abweichungen vom erwarteten Emissionsverlauf deuten auf Unregelmäßigkeiten im Prozessverlauf hin. Die Spaltüberbrückung oder Prozessabbrüche führen dabei zu charakteristischen Merkmalen im Intensitätsverlauf der emittierten Prozessstrahlung. Anhand des Signalverlaufes kann daher eine Aussage darüber erfolgen, ob eine dauerhafte Verbindung zwischen den Fügepartnern hergestellt wurde und wo sich die Grenzfläche innerhalb der Schmelzvolumen befindet. Die Grenzflächendetektion setzt allerdings einen Spalt zwischen den Fügepartnern sowie einen ausreichend großen lateralen Abstand zwischen den Schmelzvolumen voraus. Zur Erkennung von Rissen lässt sich die Überwachung mit der Fotodiode beispielsweise um ein kamerabasiertes Verfahren oder ein optisches Mikrofon ergänzen.

4.2 Positionserkennung mittels optischer Kohärenztomografie

Zur Herstellung einer Schweißverbindung zwischen zwei Glasbauteilen muss das Material im Bereich der Grenzfläche aufgeschmolzen werden [32, 33]. Die z-Lage der Schweißnaht hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit und damit auf die Qualität der dauerhaften Verbindung. Ist die Schweißnaht in der Tiefe ungenau positioniert oder das Werkstück bei der Bearbeitung verkippt, kommt es zu Festigkeitseinbußen der Schweißverbindung oder lokalen Nahtunterbrechungen [75]. Neben der induzierten Spannung hängt die Festigkeit einer dauerhaften Verbindung stark vom Querschnitt der Verbindung ab [35, 84]. Schweißnähte, die beispielsweise mit einem gaußförmigen Strahlprofil hergestellt werden, sind in der Regel tropfenförmig, wodurch die Breite der Schweißnaht in Strahlrichtung variiert. Die Positioniertoleranz ist dadurch typischerweise auf wenige Mikrometer begrenzt. [31, 34]. Durch unterschiedliche Ansätze mit zeitlicher und räumlicher Strahlformung lässt sich die Positioniertoleranz grundsätzlich verbessern [31, 73], ist jedoch durch die Nahthöhe von wenigen 100 μm begrenzt. Für ein optimales Bearbeitungsergebnis muss die Schweißnahtposition daher während des Prozesses überwacht und gegebenenfalls angepasst werden.

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, eignet sich das vorgestellte Verfahren mit einer Fotodiode unter anderem zur Detektion der Grenzfläche innerhalb eines Schmelzvolumens und lässt dadurch Rückschlüsse auf die Qualität der Verbindung zu. Die Grenz-

flächendetektion erfordert jedoch einen Spalt zwischen den Fügepartnern. Infolgedessen ist die Grenzfläche zwischen optisch kontaktierten Oberflächen mit diesem Verfahren nicht detektierbar. Um die Position der Schweißnaht im Vollmaterial oder bei optisch kontaktierten Fügepartnern überwachen zu können, wird in diesem Abschnitt die optische Kohärenztomographie (OCT) zur Bestimmung der Schweißnahtposition vorgestellt [75]. Nach der Beschreibung der Vorgehensweise bei der Positionsdetektion in Abschnitt 4.2.1 wird im Abschnitt 4.2.2 auf die Offline-Charakterisierung von Volumenmodifikationen in Quarz- und Alkali-Aluminosilikatglas mit einem OCT-System eingegangen. Die Anwendung der OCT zur Positionsüberwachung und die Diskussion zur Umsetzung einer Inline-Überwachung erfolgen in Abschnitt 4.2.3.

4.2.1 Methoden zur Positionserkennung

Die Online-Erfassung der Nahtposition im Glas ist aufgrund der transparenten Schweißnähte eine anspruchsvolle Aufgabe, die ein Messverfahren zur Tiefenbestimmung von Strukturen im Volumen transparenter Materialien erfordert. In diesem Abschnitt wird dazu die optische Kohärenztomographie vorgestellt und ihre Eignung zur Lokalisierung von Schweißnähten in transparenten Materialien diskutiert. Des Weiteren erfolgt die Definition relevanter Kenngrößen zur Detektion der Schweißnahtposition und die Beschreibung des verwendeten Versuchsaufbaus zur Charakterisierung von Volumenmodifikationen.

4.2.1.1 Optische Kohärenztomografie

Die optische Kohärenztomografie ermöglicht die nicht-invasive Analyse streuender und reflektierender Medien durch eine schnelle und qualitativ hochwertige Aufnahme von Schnitt- oder Volumenbildern [87]. Das Verfahren wird insbesondere für medizinische [88–90] oder technische [91–93] Anwendungen eingesetzt. Ein Beispiel ist die Qualitätsprüfung beim Durchstrahlschweißen von Thermoplasten [93]. Da die OCT kaum durch emittierte Wärme- oder Plasmastrahlung beeinflusst wird, eignet sich das Verfahren für Messungen bei der Lasermaterialbearbeitung [94].

Die optische Kohärenztomographie basiert auf der Kurzkohärenz-Interferometrie bei der die Lichtquelle eine Kohärenzlänge von 4 μm bis 100 μm aufweist [87, 89]. Bei der OCT wird zwischen der Time-Domain-OCT (TD-OCT) und der Fourier-Domain-OCT (FD-OCT) unterschieden [87]. Für diese Arbeit kam aufgrund der höheren Auflösung und schnelleren Datenerfassung ein FD-basiertes OCT-System zum Einsatz. Die Funktionsweise der FD-OCT ist in Bild 4.16 veranschaulicht. Ein Beugungsgitter zerlegt

das überlagerte Licht der Strahlquelle aus dem Mess- und dem Referenzstrahl in seine spektralen Bestandteile. Die Abbildung mit einer Linse liefert das Interferenzspektrum $I(k)$ der interferierenden Strahlen auf einem Zeilendetektor, wobei k die Pixel auf dem Zeilendetektor bezeichnet. Eine inverse Fourier-Transformation (FT) der wellenlängenabhängigen Intensitätsverteilung liefert ein Tiefenprofil $F(z)$ reflektierender und streuender Strukturen in der Probe, wobei z der Tiefe entspricht. Dieses Tiefenprofil wird als A-Scan bezeichnet.

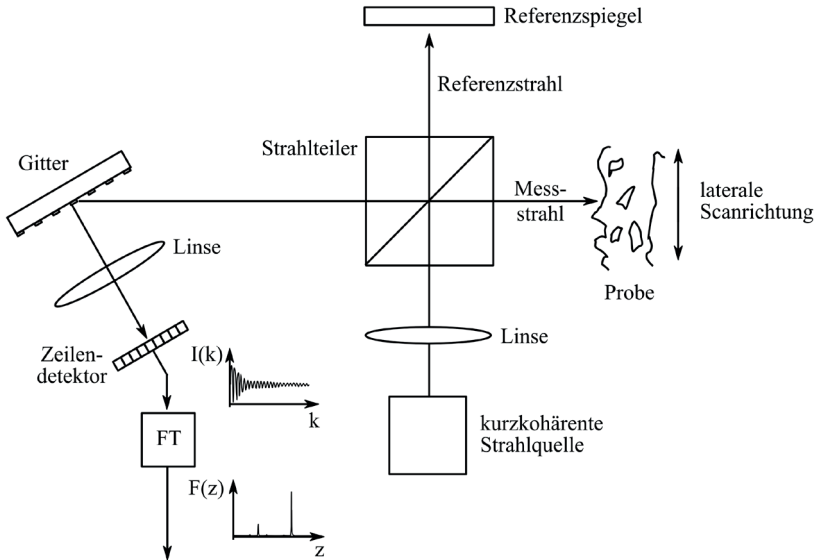


Bild 4.16: Funktionsweise eines Fourier-Domain OCT. FT steht für Fourier-Transformation, $I(k)$ ist die Signalintensität der Pixel k auf dem Zeilendetektor, $F(z)$ ist das Streuvermögen in der Tiefe z . In Anlehnung an [87]

Ein lateraler OCT-Scan $F(z, t)$ wird als B-Scan bezeichnet. Es handelt sich hierbei um ein Schnittbild, das aus sequentiell gemessenen A-Scans besteht. Unter Vorschub über die Zeit t aufgenommen ergeben diese durch Aneinanderreihen ein Schnittbild. Bei einer konstanten Scan-Geschwindigkeit des Messstrahls ist der laterale Abstand zwischen den einzelnen A-Scans konstant, wodurch $F(z, t) \triangleq F(z, x)$ entspricht und x die x -Koordinate ist.

Aus einem B-Scan lässt sich ein zeitlich gemitteltes Tiefenprofil

$$\bar{F}(z) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} F(z, t) dt \quad (4.1)$$

berechnen, wobei Δt der gesamten Messdauer entspricht. Der Mittelwert eines gesamten B-Scans berechnet sich durch

$$\bar{F} = \frac{1}{\Delta t * \Delta z} \int_0^{\Delta t} \int_0^{\Delta z} F(z, t) dt dz. \quad (4.2)$$

Δt ist hierbei die Messdauer und Δz ist Messtiefe in z-Richtung.

4.2.1.2 Definition der Schweißnahtposition

Bild 4.17 zeigt eine schematische Darstellung einer Schweißnaht mit einer für Quarzglas typischen Ansammlung von Hohlräumen in der Nähe der oberen und unteren Nahtgrenze. Typische Empfindlichkeiten von Fourier-Domain-OCT-Systemen liegen bei etwa 100 dB [90]. Da die Hohlräume im oberen und unteren Bereich der Schweißnaht mit einem Mikroskop erkennbar sind, ist zu erwarten, dass diese auch bei einer OCT-Messung brauchbare Signale liefern. Ausgehend von der oberen Glasoberfläche, ermöglicht dies die Messung der Kantenpositionen $z_{VE1...4}$ hohlraumbehafteter Bereiche. Die oberen und unteren Grenzen der Schweißnaht werden näherungsweise durch z_{VE1} und z_{VE2} dargestellt, während z_{VE3} und z_{VE4} die Grenzen des inneren, störungsfreien Bereichs der Schweißnaht bestimmen. Die maximale Höhe der Schweißnaht h_S ist daher definiert durch

$$h_S = z_{VE2} - z_{VE1} \quad (4.3)$$

Die optimale Position z_S der Schweißnaht ist dort, wo die breiteste Stelle der Naht in der Fügeebene liegt. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass sich die maximale Nahtbreite im Gegensatz zu den Ausführungen in Kapitel 4.1.4 bei etwa $\frac{2}{3}$ der maximalen Nahthöhe [95] befindet. Die Position der Schweißnaht ist daher definiert durch

$$z_S = z_{VE2} - \frac{2}{3} h_S \quad (4.4)$$

Für ein optimales Schweißergebnis muss die Position der Grenzfläche

$$d_G = z_S \pm \Delta z_S \quad (4.5)$$

erfüllen, wobei d_G die Dicke des oberen Glases ist und Δz_S einem experimentell ermittelten maximalen Toleranzbereich von $\pm 20 \mu\text{m}$ entspricht [24].

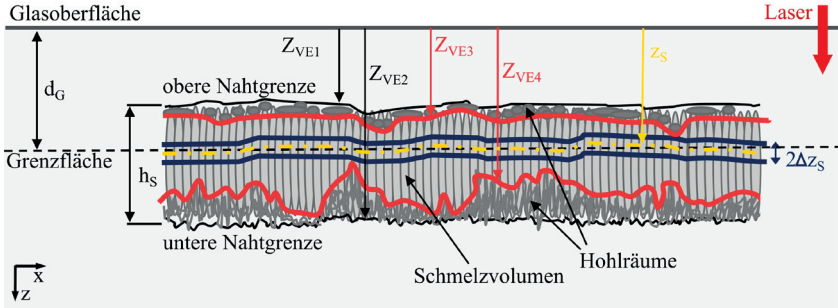


Bild 4.17: Schematische Darstellung einer Schweißnaht in Glas und Definition der für die Positionierung relevanten Größen. [75]

4.2.1.3 Versuchsaufbau

Mit Hilfe der optischen Kohärenztomographie wurden in Quarz- und Alkali-Aluminosilikatglas hergestellte Volumenmodifikationen untersucht. Bild 4.18 zeigt den Messaufbau. Die Proben bestanden aus poliertem Flachglas mit den Abmessungen $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0,7 \text{ mm}$, die in einer aufrechten Position bearbeitet und untersucht wurden. Zur Herstellung der Volumenmodifikationen fokussierte ein Mikroskopobjektiv mit einer NA von 0,25 und einer Brennweite von $f = 20 \text{ mm}$ den Ausgangsstrahl des in Kapitel 2 vorgestellten Lasers in das Material. Für die Untersuchung wurden verschiedene Parameter verwendet, die rissfreie Volumenmodifikationen in Quarz- und Alkali-Aluminosilikatglas erzeugen. Die Volumenmodifikationen wurden mit Bursts aus $n_B = 8$ Pulsen hergestellt. Die Burst-Repetitionsraten betrugen zwischen 125 kHz und 500 kHz. Die Energie pro Burst reichte von $10 \mu\text{J}$ bis $40 \mu\text{J}$. Die Vorschubgeschwindigkeit variierte zwischen 2 mm/s und 10 mm/s. Bearbeitet wurde parallel zur 40 mm langen Kante der Probe. Volumenmodifikationen waren 6 mm lang und wurden im Abstand von 2 mm parallel zur 40 mm langen Kante $600 \mu\text{m}$ unterhalb der Glasoberfläche hergestellt.

Zur Charakterisierung der Volumenmodifikationen wurde ein THORLABS Ganymede II OCT-System (FD-OCT) mit einer mittleren Wellenlänge von $\lambda = 930 \text{ nm}$, einer

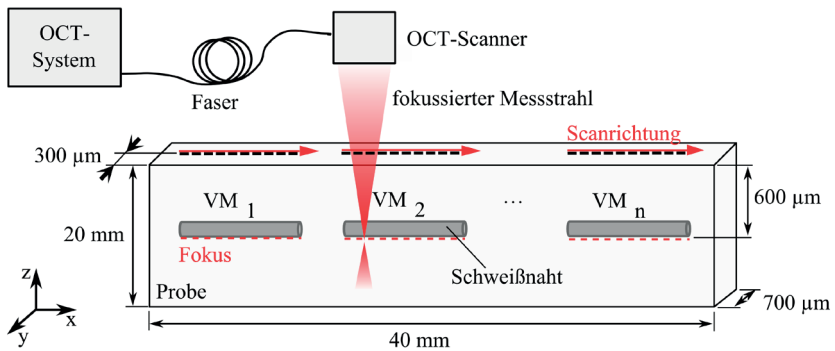


Bild 4.18: Experimenteller Aufbau zur Herstellung und Analyse von verschiedenen Volumenmodifikationen. VM_i kennzeichnet die Volumenmodifikationen, die mit unterschiedlichen Parametern hergestellt wurden. [75]

maximalen A-Scan-Rate von $f_{A\text{scan}} = 36 \text{ kHz}$, einer axialen Auflösung von $\delta_z = 6 \mu\text{m}$, einer lateralen Auflösung von $\delta_x = 8 \mu\text{m}$ und einem Objektiv mit einer Brennweite von $f = 36 \text{ mm}$ verwendet. Zur Erstellung von Schnittbildern (B-Scans) war das System mit einem Scanner ausgestattet.

Zur Untersuchung der Proben wurden B-Scans $F(z, t)$ entlang der erzeugten Volumenmodifikationen mit dem OCT-System aufgenommen. Die Profiltiefe der einzelnen A-Scans in z -Richtung betrug $= 1024$ Punkte mit einer Auflösung von $3 \mu\text{m}/\text{Punkt}$. Die Fokussposition des Messstrahls befand sich für die Messungen $600 \mu\text{m}$ unterhalb der Glasoberfläche. Da die Messstrahlausrichtung der vorherigen Ausrichtung des Bearbeitungsstrahls entspricht, wäre es denkbar, diese Konfiguration für eine nachlaufende Online-Analyse zu nutzen. Die aufgenommenen B-Scans wurden um den Brechungsindex des Glases von $n_G = 1,52$ bei einer Wellenlänge von 930 nm korrigiert. Zur Auswertung und Interpretation der Messdaten wurden Aufnahmen der Volumenmodifikationen von der Seite mit Hilfe eines Mikroskops herangezogen.

4.2.2 Charakterisierung von Volumenmodifikationen

In diesem Abschnitt werden Volumenmodifikationen in Quarzglas und Alkali-Alumino-silikatglas offline mit einem OCT-System hinsichtlich der Positionsdetektion charakterisiert.

4.2.2.1 Quarzglas

Bild 4.19 (a) zeigt eine Volumenmodifikation in Quarzglas von der Seite. Zwei kontrastreiche Bereiche im oberen und unteren Teil der Volumenmodifikation weisen auf Hohlräume hin, die während des Schweißprozesses entstanden sind. Mehrere Hohlräume an der Oberseite der Schweißnaht bilden Ketten mit einer Länge von 30 μm bis 100 μm . Die laterale Ausdehnung der Hohlräume beträgt 20 μm bis 30 μm . Die Hohlräume nahe der Wurzel der Volumenmodifikation sind mit Durchmessern im Bereich weniger Mikrometer bis sub-Mikrometer kleiner und verteilen sich in vertikaler z-Richtung über einen Bereich von bis zu 160 μm . Detaillierte Aufnahmen der Hohlräume an der oberen und unteren Grenze der Volumenmodifikation sind in Bild 4.19 (d) und (e) dargestellt. Diese Bilder wurden mit Hilfe der Polarisationskontrastmikroskopie aufgenommen. Dieselbe Schweißnaht ist in Bild 4.19 (b) als OCT-Aufnahme zu sehen (B-Scan). Die Hohlräume an der Oberseite der Volumenmodifikation weisen eine Höhe von 2 μm bis 35 μm auf. An der Wurzel der Volumenmodifikation erstreckt sich der Bereich mit den Hohlräumen über eine Tiefe von 30 μm bis 100 μm . Zum Vergleich der mittleren Lage und der Ausdehnung der oberen und unteren Hohlräume sind in Bild 4.19 (c) die integrierten Pixelintensitäten der Mikroskopaufnahme (a) und der OCT-Messungen (b) in Vorschubrichtung entlang der Längsachse (z) aufgetragen. Das resultierende Intensitätsprofil, das sich aus der Mikroskopaufnahme ergibt, ist rot dargestellt, wobei die Schwarz- und Weißwerte invertiert wurden. Die blaue Linie zeigt das aus der OCT-Messung erhaltene Intensitätsprofil. Schwarze Linien markieren die mit dem Mikroskop gemessenen Nahtgrenzen. Die durchschnittliche Höhe des geschmolzenen Bereichs ist grau schraffiert.

Die rote und die blaue Linie zeigen jeweils zwei zusammenfallende Intensitätsspitzen in einer Tiefe von etwa 200 μm und 600 μm , welche die durchschnittliche Position der Hohlräume innerhalb der Schweißnaht darstellen. Die übereinstimmende z-Position und die Breite der oberen Intensitätsverteilungen zeigen, dass die OCT-Messung gut geeignet ist, um die Höhe und die Position der Hohlräume an der Oberseite der Volumenmodifikation zu erfassen. Unterschiede in der Breite der unteren Intensitätsverteilung deuten darauf hin, dass kleinere Hohlräume in der Nähe der Nahtwurzel durch das OCT-System nicht zuverlässig erkannt werden. Daher ist die an der Nahtwurzel gemessene Ausdehnung des hohlraumbehafteten Bereichs kleiner.

In Quarzglas werden die Höhe und die Position der Schmelzzone, die sich zwischen den Hohlräumen an der Ober- und Unterseite der Naht befindet, durch die OCT-Messung in geeigneter Art und Weise erkannt. Im Hinblick auf die Anwendung in einer industriellen Umgebung ermöglicht dies durch ein zusätzliches Referenzsignal, wie das einer

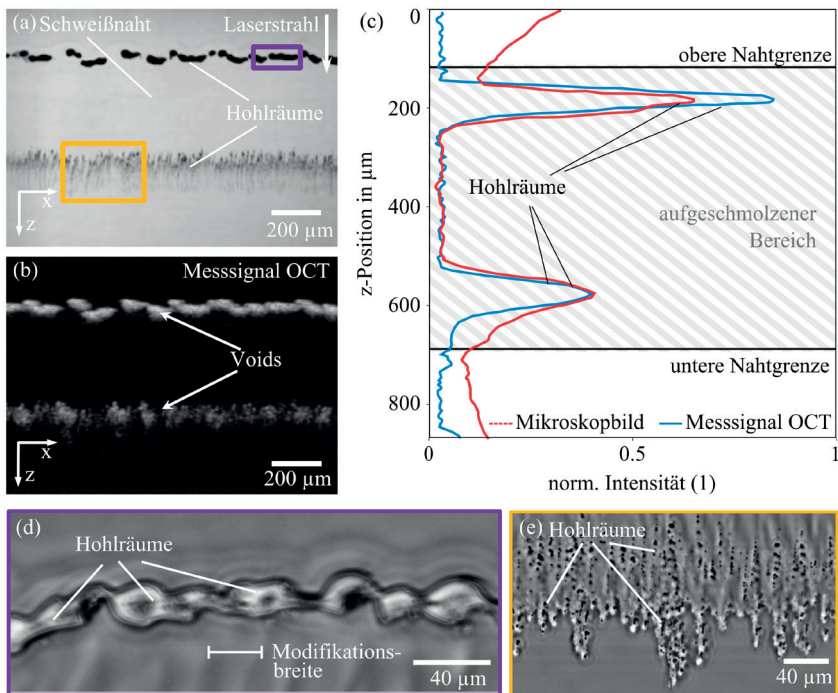


Bild 4.19: Volumenmodifikation in Quarzglas. Prozessparameter: Bursts mit $n_B = 8$ Pulsen, Burst-Repetitionsrate $f_B = 250$ kHz, Burstenergie $E_B = 40$ μ J, Vorschubgeschwindigkeit $v = 5,5$ mm/s. (a) Seitenansicht der Volumenmodifikation. Dunkle Bereiche zeigen Hohlräume an der Ober- und Unterseite der Modifikation. (b) Entsprechender B-Scan derselben Volumenmodifikation. Helle Bereiche entstammen reflektierenden oder streuenden Strukturen (Hohlräume). (c) Graustufen-Tiefenprofil der Bilder (a) und (b) gemittelt über die x-Länge der gezeigten Volumenmodifikation, Schwarz- und Weißwerte für (a) invertiert. Der grau schraffierte Bereich, der durch schwarze Linien begrenzt wird, zeigt die durchschnittliche Höhe der Schweißnaht. (d) Hohlräume an der Nahtoberseite (Aufnahme mit Polarisationskontrast). (e) Verteilung der Hohlräume in der Nähe der Wurzel der Volumenmodifikation (Aufnahme mit Polarisationskontrast). [75]

Luft-Glas-Oberfläche oder der Grenzfläche zwischen zwei Gläsern, die Überwachung oder die Steuerung der Nahtposition in Bezug zur Grenzfläche anhand der detektierten Hohlräume.

4.2.2.2 Alkali-Aluminosilikatglas

Wie in Bild 4.20 dargestellt, lieferte die Untersuchung von Volumenmodifikationen in Alkali-Aluminosilikatglas ähnliche Ergebnisse. Obwohl sich die in diesem Material erzeugten Hohlräume sowohl nach der Größe als auch in der Geometrie von denen in Quarzglas unterscheiden, sind sie durch die OCT-Messungen zuverlässig nachweisbar. Im Messsignal werden Hohlräume mit einer Größe von $0,45\text{ }\mu\text{m}$ erkannt. Wie bei Quarzglas lässt sich in Alkali-Aluminosilikatglas die durchschnittliche Lage und Ausdehnung der Hohlräume aus den gemittelten Intensitätsprofilen bestimmen, siehe Bild 4.20 (c). Das gemittelte Intensitätsprofil der Mikroskopaufnahme (rote Linie) zeigt eine breite Intensitätsverteilung, die der Ausdehnung der Volumenmodifikation in z-Richtung in einem Tiefenbereich von etwa $100\text{ }\mu\text{m}$ bis $250\text{ }\mu\text{m}$ entspricht. Das gemittelte Profil der OCT-Messung weist zwei separate Intensitätsverteilungen nahe der oberen und unteren Grenze der Volumenmodifikation auf, die aus den detektierten Hohlräumen innerhalb der Volumenmodifikation resultieren. Wie bei Quarzglas befinden sich die Hohlräume in der Nähe der Grenzen der Volumenmodifikation und können daher zur Bestimmung der Position und der Ausdehnung der Volumenmodifikation herangezogen werden.

In einzelnen Parameterbereichen waren in den untersuchten Volumenmodifikationen keine oder lediglich in der Nähe der Nahtunterseite Hohlräume detektierbar, wodurch dort die Positionserfassung von Schweißnähten nur begrenzt möglich ist.

4.2.3 Positionsdetektion

Die vorangegangene Charakterisierung mit einem OCT-System legt nahe, dass Hohlräume, die während des Schweißprozesses entstehen, auswertbare Signale liefern und diese zur Bestimmung der Position und Höhe von Volumenmodifikationen genutzt werden können. Aufgrund der Lücken zwischen den Hohlräumen ist das Messsignal jedoch nicht kontinuierlich. Dies gilt sowohl für Hohlräume an der Ober- als auch an der Unterseite der Volumenmodifikation. Für die Prozessüberwachung ist daher eine Integration des Messsignals über einen längeren Zeitraum erforderlich.

4.2.3.1 Bestimmung der Integrationsdauer

Die minimale Integrationsdauer hängt von den Abständen zwischen den Hohlräumen an der Ober- und Unterseite der Volumenmodifikation ab. Wie in Abschnitt 4.2.2 gezeigt, ist der Abstand zwischen den Hohlräumen an der Ober- und Unterseite der Volumenmodifikation unterschiedlich. Daraus ergeben sich jeweils verschiedene erforderliche

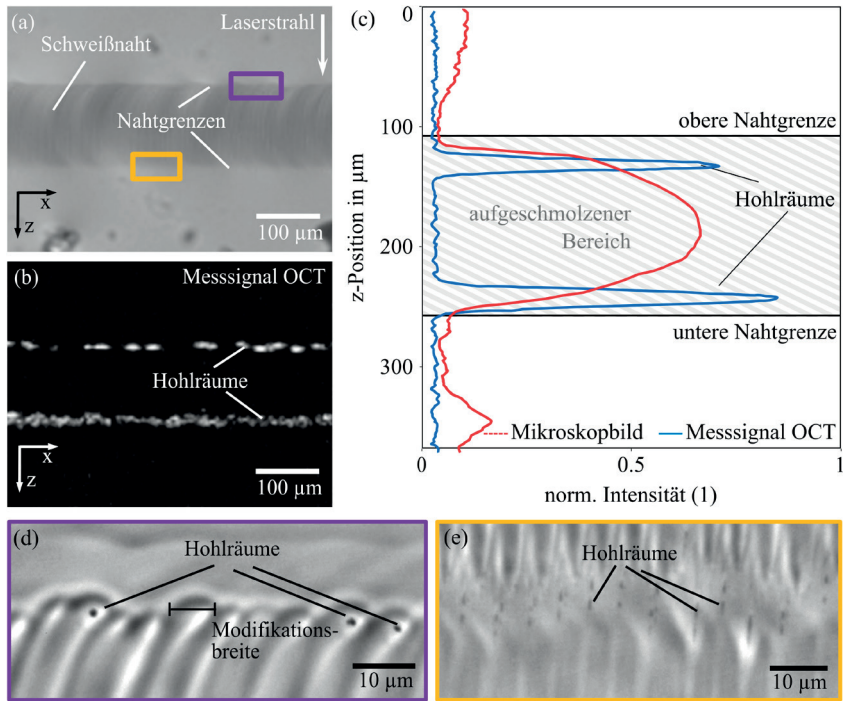


Bild 4.20: Volumenmodifikation in Alkali-Aluminosilikatglas. Prozessparameter: Bursts mit $n_B = 8$ Pulsen, Burst-Repetitionsrate $f_B = 250$ kHz, Burstenergie $E_B = 10$ μJ, Vorschubgeschwindigkeit $v = 9,3$ mm/s. (a) Polarisationskontrastmikroskopische Seitenansicht der Schweißnaht. (b) Entsprechender B-Scan derselben Volumenmodifikation. Helle Bereiche stammen von den reflektierenden oder streuenden Strukturen (Hohlräume). (c) Graustufen-Tiefenprofil der Bilder (a) und (b) gemittelt über die x-Länge der gezeigten Volumenmodifikation (Schwarz- und Weißwerte für (a) invertiert). Grau schraffierte Bereiche, die von schwarzen Linien begrenzt werden, zeigen die durchschnittliche Höhe der tatsächlichen Schweißnaht. (d) Polarisationskontrastmikroskopische Aufnahme der oberen Begrenzung der Volumenmodifikation einschließlich der Hohlräume. (e) Verteilung der Hohlräume in der Nähe der Wurzel der Volumenmodifikation (Polarisationskontrastmikroskopie). [75]

Messzeiten. Um die erforderliche Messdauer abzuschätzen, wurde die maximale Signalunterbrechung zwischen zwei Hohlräumen anhand der OCT-Messdaten ermittelt.

Zur Bestimmung der minimal erforderlichen Messdauer werden für den B-Scan einer Schweißnaht zwei Tiefenbereiche definiert: einer für die Signale im Bereich der oberen

Nahtgrenze und ein zweiter für die an der unteren Nahtgrenze, siehe Bild 4.21. Die Grafik zeigt das gemittelte Tiefenprofil $\bar{F}(z)$ einer Schweißnaht in Alkali-Aluminosilikatglas mit zwei Intensitätsspitzen.

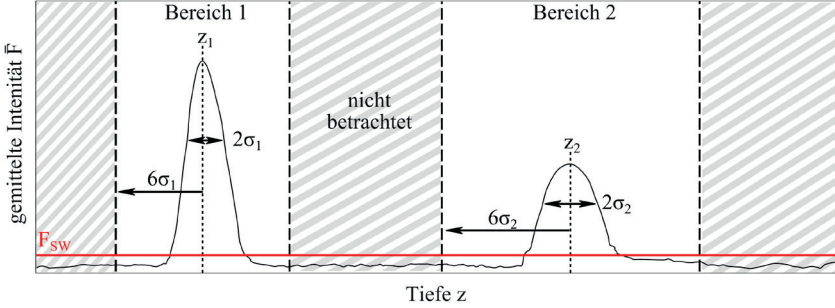


Bild 4.21: Tiefenbereiche zur Bestimmung der Messdauer.

Die z -Lage der Maxima der beiden Intensitätsspitzen kennzeichnet die mittlere Tiefe, in der sich die Hohlräume befinden und damit die Mitte der gesuchten Tiefenbereiche. z_1 kennzeichnet die Lage der Hohlräume an der oberen Nahtgrenze und z_2 an der unteren Nahtgrenze. Unter der Annahme, dass die Intensitätsspitzen normal verteilt sind, lassen sich σ_1 und σ_2 bestimmen. Im Anschluss werden Bereiche ausgeschnitten, die um z_1 und z_2 zentriert und $\pm 6\sigma$ breit sind. Daraus ergeben sich die Bereiche 1 und 2. Die Regionen außerhalb werden nicht berücksichtigt. Danach folgt eine Bewertung jedes einzelnen Tiefenprofils $F(z)$ des untersuchten B-Scans $F(z, t)$. Hierfür wird geprüft, ob $F(z)$ innerhalb der ausgewählten Bereiche 1 und 2 einen Schwellwert F_{SW} überschreitet und damit ein gültiges Messsignal durch Hohlräume vorliegt. Den Schwellwert

$$F_{SW} = \bar{F}_z + 6\sigma_{SW} \quad (4.6)$$

lieferte der Mittelwert \bar{F}_z eines B-Scans einer modifikationslosen Glasprobe, bestehend aus 5000×1024 Grauwerten und der Grauwert-Standardabweichung σ_{SW} . Durch die sechsfache Standardabweichung wird sichergestellt, dass das Hintergrundrauschen in 99,9997 % aller Messungen als ungültiges Signal erkannt wird. Das Ergebnis der Bewertung der einzelnen Tiefenprofile ergibt jeweils ein Bool'sches Array $B(t)$ für z_1 und z_2 , aus denen sich die Abstände zwischen den Hohlräumen bestimmen lassen.

In Bild 4.22 ist ein Histogramm der Signalabstände an der Oberseite einer Volumenmodifikationen dargestellt, wobei n_{ges} der Gesamtanzahl der ermittelten signalfreien

Bereiche entspricht. Die Volumenmodifikation wurde mit Bursts von $n_B = 8$ Pulsen, einer Burst-Wiederholrate $f_B = 250$ kHz, einer Burstenergie $E_B = 10$ μ J und einer Vorschubgeschwindigkeit $v = 9,3$ mm/s erzeugt. Der maximale Abstand zwischen den Signalen beträgt etwa 60 μ m, was einer Dauer von 6,3 ms entspricht. Dieser Wert wird als Integrationsdauer Δt für die weitere Auswertung genutzt und stellt sicher, dass bei jeder Messung ein Positionssignal vorliegt. Ein kleinerer Wert würde die räumliche Auflösung erhöhen, allerdings auf Kosten von Fehlmessungen.

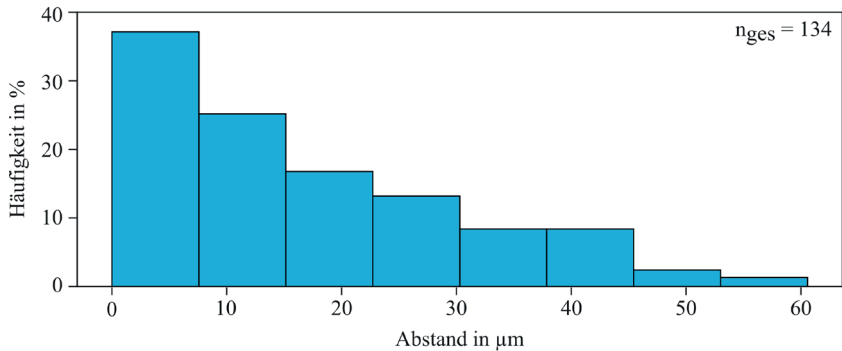


Bild 4.22: Histogramm der Signalabstände an der Oberseite einer Volumenmodifikation in Alkali-Aluminosilikatglas. n_{ges} ist die Gesamtanzahl der ermittelten signalfreien Bereiche.

4.2.3.2 Auswertung der Schweißnahtposition

Um die Tiefenmessung zu demonstrieren, wurde die in Alkali-Aluminosilikatglas hergestellte Volumenmodifikation offline analysiert. Entsprechend der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Ergebnisse betrug die Integrationsdauer $\Delta t = 6,3$ ms. Bei einer A-Scan-Rate von f_{AScan} entspricht das etwa 225 Einzelmessungen, die gemittelt werden. Ein entsprechendes Intensitätsprofil ist in Bild 4.23 dargestellt. Das Profil zeigt drei Intensitätsspitzen, wobei die erste Spitze von oben der Glasoberfläche entspricht. Die Intensität der Signale an der Nahtober- und unterkante sind deutlich kleiner als die der Nahtoberfläche und können daher von der Glasoberfläche unterschieden werden. Wird der Schwellwert F_{SW} nach der Glasoberfläche das erste Mal überschritten, handelt es sich um die Nahtoberseite. Beim zweiten Mal wird das Signal von Hohlräumen an der Nahtunterseite hervorgerufen.

Um die optimale Position z_S der Grenzfläche zu berechnen, wurden die Position z_{surf} der Glasoberfläche und die Position der Grenzen der Volumenmodifikation z_{VE1} und

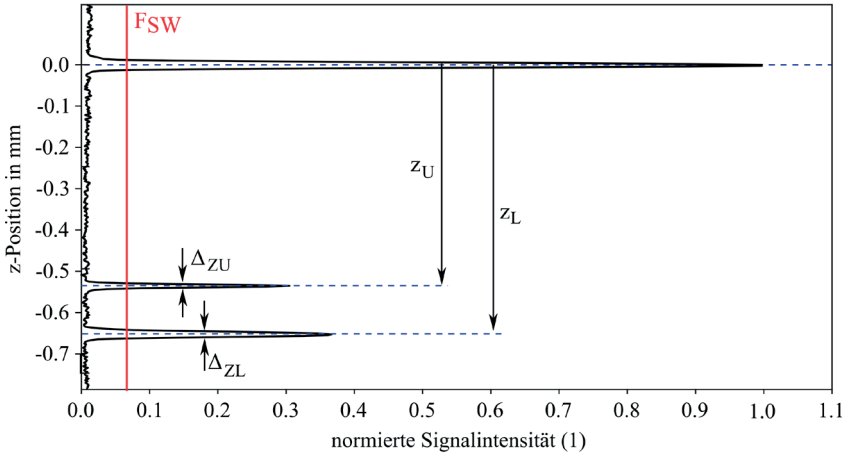


Bild 4.23: Messgrößen zur Bestimmung der Nahtposition auf der Grundlage einer gemittelten OCT-Messung (gemittelter A-Scan) einer Volumenmodifikation in Alkali-Aluminosilikatglas. Prozessparameter: Burst-Repetitionrate $f_B = 250$ kHz, Bursts mit $n_B = 8$ Pulsen, Burstenergie $E_B = 10$ μ J, Vorschubgeschwindigkeit $v = 9,3$ mm/s, Integrationsdauer $\Delta t = 6,3$ ms. [75]

z_{VE2} bestimmt. Die Position der Glasoberfläche z_{surf} dient als Bezugsebene für die Tiefenmessung. Die Position der oberen Grenze z_{VE1} und der unteren Grenze z_{VE2} der Volumenmodifikation berechnen sich nach

$$z_{VE1} = z_U - \frac{\Delta z_U}{2} \quad (4.7)$$

und

$$z_{VE2} = z_L + \frac{\Delta z_L}{2}, \quad (4.8)$$

wobei z_U die Position des Signalmaximums ist, das durch Hohlräume an der oberen Grenze der Schweißnaht hervorgerufen und z_L die Position der Signalspitze, die durch Hohlräume an der unteren Grenze der Schweißnaht verursacht wird, Δz_U ist die Breite (FWHM) des Signals an der Nahtoberseite und Δz_L die Breite (FWHM) des Signals an der Nahtunterseite.

Ausgehend von den Gleichungen (4.4), (4.7) und (4.8) wurden für eine Volumenmodifikation die Positionen der oberen und unteren Begrenzung z_{VE1} bzw. z_{VE2} sowie

die optimale Position z_S der Grenzfläche berechnet. Ein 3 mm langer Ausschnitt der Volumenmodifikation ist in Bild 4.24 dargestellt. Das Bild zeigt die Volumenmodifikation von der Seite. Das entsprechend verarbeitete OCT-Messsignal ist auf der linken Seite überlagert dargestellt. Gültige Messsignale ($F(z) > F_{SW}$) sind durch grüne Punkte gekennzeichnet. Die violette Linie zeigt die detektierte Glas-Luft-Grenzfläche. Die ermittelten Modifikationsgrenzen sind rot eingezeichnet. Die gelbe Linie markiert die optimale Position der Grenzfläche z_S .

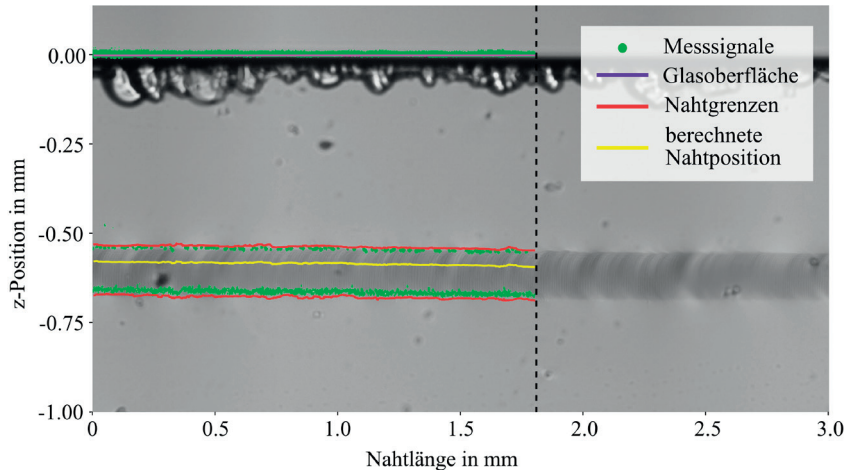


Bild 4.24: Positionsdetektion einer Volumenmodifikation in Alkali-Aluminosilikatglas mittels OCT. [75]

Die vorgestellte Messmethode ermöglicht die Positionserfassung und Tiefenmessung von Volumenmodifikationen in Glas. Basierend auf dem Signal der Oberfläche ist eine Überwachung der Position von Schweißnähten in Glas zur Qualitätskontrolle oder zur Regelung prinzipiell möglich. Dies setzt jedoch voraus, dass die Dicke des oberen Glases über das gesamte Werkstück hinweg bis auf wenige Mikrometer genau bekannt ist. Praxisrelevanter ist die Verwendung der Grenzfläche zwischen zwei Gläsern als Referenzsignal. Im verschweißten Zustand ist die Grenzfläche jedoch per Definition nicht mehr vorhanden und somit bei einer schleppenden Online-Messung in der Schweißnaht nicht detektierbar. Diese nachteilige Online-Messung mit der Grenzfläche als Referenzebene erfordert daher alternative Konzepte, bei denen die Grenzfläche außerhalb des verschweißten Bereichs - beispielsweise lateral versetzt - detektiert wird. Neben der nachteiligen Beobachtung der permanenten Schweißnaht, bei der ein Abstand zwischen beiden Brennpunkten besteht, ist eine koaxial zum Bearbeitungsstrahl durchgeführte

Tiefenmessung in der Bearbeitungszone denkbar, bei der sich die Fokuspunkte des OCT-Messtrahls und des Bearbeitungslasers an derselben Position befinden. Da die OCT-Messung auf der Frequenzanalyse von Spektraldaten basiert, ist eine Beeinflussung der Positionsdetektion durch die emittierte Prozessstrahlung nicht zu erwarten [94]. Die Umsetzbarkeit muss jedoch in weiteren Untersuchungen nachgewiesen werden.

4.2.4 Fazit

Zusammenfassend wurde gezeigt, dass Hohlräume in Volumenmodifikationen, die durch optische Kohärenztomographie offline detektiert werden, Rückschlüsse auf die Lage von Volumenmodifikation ermöglichen. Liefern Hohlräume nutzbare Signale an der Ober- und Unterseite der Volumenmodifikation, lässt sich die optimale Grenzflächenposition innerhalb der Volumenmodifikation bestimmen. Ist die Grenzflächenposition oder die Position der Glasoberfläche bekannt, kann anhand der als optimal ermittelten Grenzflächenposition eine Regelung der Nahtposition erfolgen. Die Methode könnte im Prozess dabei helfen, die Schweißnahtposition bei optisch kontaktierten Fügepartnern zu detektieren. Die Umsetzung einer OCT-basierten Online-Überwachung der Nahtposition zur Qualitätsprüfung oder -sicherung ist prinzipiell möglich, birgt jedoch einige Herausforderungen. Insbesondere wenn die Fügezone als Referenzebene dienen soll, sind weitere Überlegungen zur Umsetzung notwendig. Da der Schwerpunkt der Arbeit auf der Prozessüberwachung mit einer Fotodiode und der daraus extrahierten Qualitätsbewertung für Schweißnähte liegt, wird auf die Umsetzbarkeit nicht weiter eingegangen und soll lediglich als Ausblick dienen.

5 Entwicklung eines Überwachungssystems

In diesem Kapitel steht die Entwicklung und die Demonstration eines Systems zur Inline-Prozessüberwachung mit dem Zweck der Qualitätsprüfung geschweißter Glasbauteile im Vordergrund der Betrachtung. Wie im Abschnitt 4.1 beschrieben, liefert die Überwachung der emittierten Prozessstrahlung mit einer Fotodiode umfassende Informationen über den Prozessverlauf beim Schweißen mit modulierter Laserleistung. Um die Qualität einer Schweißverbindung anhand der Signaldaten einzelner Schmelzvolumen zu bewerten und das Ergebnis grafisch darzustellen, ist eine Auswertung der Messdaten erforderlich.

In Abschnitt 5.1 wird dazu ein Modell zur Klassifikation einzeln erzeugter Schmelzvolumen vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 5.2 die entwickelte Systemtechnik zur Überwachung des Schweißprozesses und der entworfene Algorithmus zur Schmelzvolumenklassifikation in einem System zur Inline-Prozessüberwachung zusammengeführt. Zur Demonstration der Prozessüberwachung wurde das entwickelte Verfahren in einem Industrieprozess zur Herstellung von Spiegelarrays für Multipass-Scheibenlaser-Verstärker umgesetzt, siehe Abschnitt 5.3.

5.1 Modell zur Schmelzvolumenklassifikation

Um die Qualität der Schweißverbindung anhand der einzeln erzeugten Schmelzvolumen abzuleiten, muss zunächst jedes einzelne Schmelzvolumen kategorisiert werden. Dieses Kapitel beschäftigt sich daher mit der Entwicklung eines entsprechenden Klassifikationsmodells (Entscheidungsbaum), das auf dem vorhandenen physikalischen Prozessverständnis basiert. Es handelt sich hierbei um ein Klassifikationsproblem, weshalb zunächst auf die Klassifikation und deren Bewertung eingegangen wird, siehe Abschnitt 5.1.1. Da die Entwicklung und Bewertung eines Klassifikationsmodells eine große Datenbasis erfordert, erfolgt anschließend in Abschnitt 5.1.2 eine Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Datenaufbereitung zur Datensatzerstellung. Danach folgen in Abschnitt 5.1.3 die Ausführungen zur Schmelzvolumenklassifikation und der Modellentwicklung. Abschnitt 5.1.4 fasst abschließend die gewonnenen Erkenntnisse zusammen.

5.1.1 Klassifikation und Klassifikationsbewertung

Die Klassifikation nutzt Algorithmen, mit welchen Objekte anhand von Merkmalen in Kategorien sortiert werden. Das Erlernen von Zuordnungen kann entweder überwacht oder unüberwacht erfolgen, wobei das überwachte Lernen im Gegensatz zum unüberwachten Lernen Trainingsdaten erfordert [96]. Für die Algorithmen ist in der Regel die Auswahl aussagekräftiger Kriterien und die Vermeidung redundanter Merkmale erforderlich, um den Aufwand der Modellbildung zu reduzieren und die Qualität der Ergebnisse zu verbessern [97, 98].

Zur Bewertung von Klassifikationsmodellen kommen sogenannte Performance-Metriken zum Einsatz [99]. Die hier vorgestellte Schmelzvolumenklassifikation unterscheidet zwischen zwei Klassen, weshalb im Folgenden nur auf Metriken zur Bewertung binärer Klassifikationsmodelle eingegangen wird.

Zur Bestimmung von Performance-Metriken werden Daten von Hand bewertet und in Test- und Trainingsdaten aufgeteilt. Die Trainingsdaten dienen dann dazu, ein Klassifikationsmodell zu entwerfen, das mithilfe der Testdaten geprüft wird. Die Vorhersagen für die Testdaten werden mit den gespeicherten Klassen verglichen und daraus eine Konfusionsmatrix erstellt, siehe Tabelle 5.1. Für eine absolute Bewertung erfolgt eine Normierung der Werte in der Konfusionsmatrix auf die einzelnen Klassen [99].

		<i>Vorhersage</i>	
		positiv	negativ
<i>Ist</i>	positiv	richtig positiv <i>rp</i>	falsch negativ <i>fn</i>
	negativ	falsch positiv <i>fp</i>	richtig negativ <i>rn</i>

Table 5.1: Konfusionsmatrix. [99]

Aus der Konfusionsmatrix lässt sich unter anderem die Vorhersagegenauigkeit G ableiten. Es handelt sich hierbei um eine Metrik, welche die Anzahl korrekt klassifizierter Objekte angibt, siehe Gleichung (5.1). Sie ist ein Maß zur Bewertung symmetrischer Datensätze, bei denen die Anzahl von falsch positiven und falsch negativen Werten nahezu gleich ist [99].

$$G = \frac{rp + rn}{rp + fp + rn + fn} \quad (5.1)$$

Hinsichtlich der Qualitätskontrolle stellt die Spezifität S ein wichtiges Bewertungskriterium dar. Die Spezifität ist ein Maß dafür, wie effizient negative und damit als fehlerfrei

dokumentierte Ergebnisse der Testdaten identifiziert werden [99], siehe Gleichung (5.2). Das bedeutet, je niedriger dieser Wert, desto mehr erfolgreich verschweißte Teile (Gutteile) werden als Ausschuss eingestuft.

$$S = \frac{rn}{rn + fp} \quad (5.2)$$

Weitere Kriterien, die im Bereich der Qualitätskontrolle eine bedeutende Rolle spielen, sind die Falsch-Positiv-Rate R_{FP} oder FP-Rate [siehe Gleichung (5.3)] und die Falsch-Negativ-Rate R_{FN} oder FN-Rate [siehe Gleichung (5.4)] [100, 101]. Die Falsch-Positiv-Rate gibt den Anteil der Objekte an, die fälschlicherweise als positiv klassifiziert wurden, in Wirklichkeit aber negativ sind. Dies entspricht der Wahrscheinlichkeit für einen sogenannten Fehlalarm oder Typ-1-Fehler. Die Falsch-Negativ-Rate gibt den Anteil der fälschlich als negativ klassifizierten Objekte bezogen auf alle positiven Objekte an und entspricht damit der Wahrscheinlichkeit für einen nicht erkannten Fehler, der als Typ-2-Fehler bezeichnet wird. Das bedeutet, je höher die FN-Rate, desto mehr Ausschussteile werden akzeptiert. Durch eine Qualitätsüberwachung soll Ausschuss jedoch zuverlässig erkannt werden. Daher ist ein nicht erkannter Fehler weitaus gravierender als ein vorhergesagter Fehler, der keiner ist. Für die Qualitätskontrolle sollte daher die FN-Rate bei der Evaluation eines Klassifikators ebenfalls berücksichtigt werden.

$$R_{FP} = \frac{fp}{fp + rn} \quad (5.3)$$

$$R_{FN} = \frac{fn}{fn + rp} \quad (5.4)$$

5.1.2 Versuchsaufbau und Datenaufbereitung zur Datensatzerstellung

Zur Umsetzung und Bewertung eines Klassifikationsmodells ist eine große Datenbasis erforderlich. Zur Datensatzerstellung wurden 68 Proben aus Quarzglas miteinander verschweißt und die emittierte Prozessstrahlung detektiert. Bild 5.1 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau zur Bearbeitung und Datenerfassung. Als Strahlquelle kam der bereits in Kapitel 2 vorgestellte Prototyp eines TruMicro 2030 Femto Edition zum Einsatz. Zum Schweißen wurde der Ausgangsstrahl des Lasers durch ein Mikroskopobjektiv mit einer numerischen Apertur von 0.13 und einer Brennweite von $f = 40$ mm den in das Material fokussiert. Für die Bearbeitung wurden Bursts mit einer Anzahl von $n_B = 8$ Pulsen verwendet [54]. Die Repetitionsrate f_B der Bursts betrug 250 kHz. Um

gezielt Einzelblasen zu erzeugen, wurde die mittlere Ausgangsleistung des Lasers durch ein externes Spannungssignal sinusförmig mit einer Frequenz von 100 Hz moduliert. Die mittlere Laserleistung betrug 8,75 W. Zur Überwachung der Burststabilität wurde der transmittierte Anteil des Laserstrahls nach dem Strahlteiler mit einer Fotodiode (2) detektiert.

Die Plasmaemission wurde koaxial zum Bearbeitungsstrahl mit einer Fotodiode (1) überwacht. Nach der Kollimation mit der Objektivlinse wurde das Prozesslicht durch einen Strahlteiler vom Bearbeitungsstrahlengang getrennt. Der Strahlteiler war im Gegensatz zu dem aus den vorangegangenen Untersuchungen in einem Wellenlängenbereich von 520 nm bis 650 nm transparent. Aus diesem Grund begrenzte ein Bandpassfilter den betrachteten Spektralbereich der Plasmaemission auf 575 nm bis 625 nm. Da die Detektion der Plasmaemission ähnliche Ergebnisse für unterschiedliche Wellenlängen im Bereich von 400 nm bis 1000 nm lieferte, sind hierdurch keine Unterschiede im Signalverlauf zu erwarten. Die Datenerfassung erfolgte mit einem Analog-Digital-Wandler (ADC) bei einer Sampling-Rate von 50 kS/s.

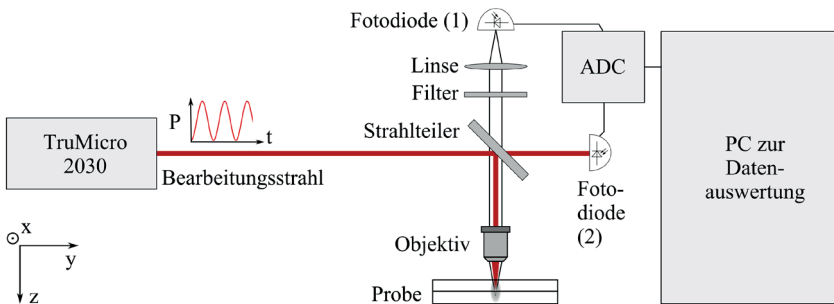


Bild 5.1: Versuchsaufbau zur Bearbeitung und Datenerfassung.

Bild 5.2 zeigt exemplarisch die erfassten Messsignale einer Schweißverbindung, die aus zehn sequenziell erzeugten Schweißnähten besteht. Jeder Signalblock entspricht einer einzelnen Schweißnaht, die wiederum aus einer Vielzahl einzelner Schmelzvolumen besteht. Das Detailbild zeigt einen Signalausschnitt der beiden Prozesssignale der sinusförmig leistungsmodulierten Laserstrahlung und der emittierten Prozessstrahlung, die ebenfalls einen periodischen Verlauf aufweist. Das Messsignal der emittierten Prozessstrahlung innerhalb einer Modulationssequenz entspricht dem eines einzelnen Schmelzvolumens [73, 80].

In Bild 5.3 ist ein Ausschnitt der verrauschten und Offset-behafteten Rohsignale (a) und ein vorverarbeitetes Segment des Prozessstrahlungs- und des Lasersignals eines

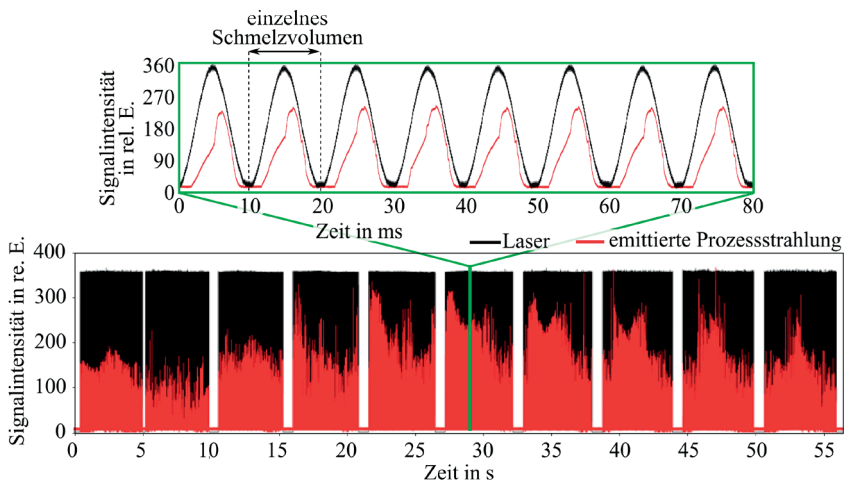


Bild 5.2: Erfasste Messsignale einer Schweißverbindung, bestehend aus zehn sequenziell erzeugten Schweißnähten.

einzelnen Schmelzvolumens (b) abgebildet. Die gestrichelten Linien in (a) kennzeichnen die lokalen Minima im Lasersignal und damit den Start einer neuen Modulationssequenz. Um eine Fehlinterpretation der Daten in den nachgelagerten Verfahrensschritten zu vermeiden, werden die Rohdaten nach der Datenerfassung per Software vorverarbeitet. Dies beinhaltet eine Offsetkorrektur, bei welcher der Gleichspannungsanteil im Signal durch Abzug des gemittelten Messsignals in den Bereichen der Bearbeitungspausen entfernt wird. Um Signalrauschen zu minimieren, filterte ein Software-Tiefpassfilter [102] das Signal der emittierten Prozessstrahlung mit einer Grenzfrequenz von 12,5 kHz und das Lasersignal mit einer Grenzfrequenz von 5 kHz. Die Grenzfrequenzen sind so gewählt, dass ein zu untersuchender Einbruch an der Grenzfläche identifizierbar bleibt, während höherfrequenten Rauschen, das keine relevante Prozessinformationen trägt, entfernt wird. Darüber hinaus erfolgt eine Normierung der Signale auf den Mittelwert der Signalmaxima der 100 größten Schmelzvolumen einer Schweißnaht. Die Mittelung auf mehrere Signalmaxima ist erforderlich, um Ausreißer durch Intensitätsspitzen, die bei der Spaltüberbrückung [80] auftreten können, zu kompensieren. Um jedes Schmelzvolumen einzeln zu analysieren und zu bewerten, wurden die Signaldaten nach der Vorverarbeitung an den lokalen Minima im Lasersignal entlang der gestrichelten Linie in (a) segmentiert.

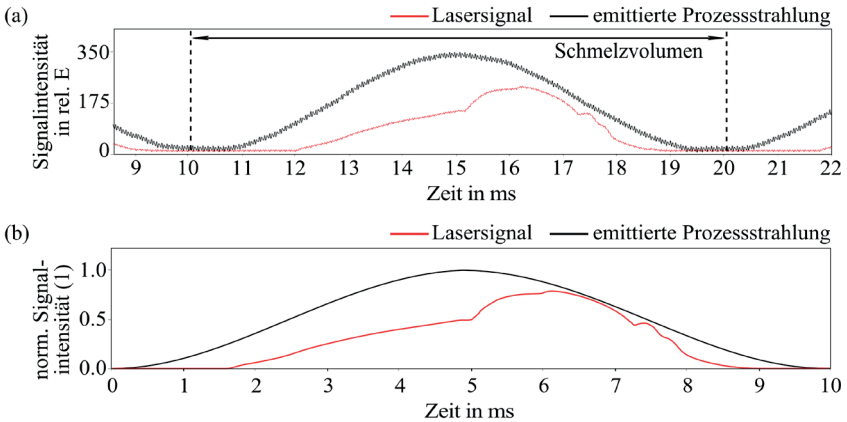


Bild 5.3: (a) Ausschnitt der verrauschten und Offset-behafteten Rohsignale. (b) Vorverarbeitetes Segment des Prozessstrahlungs- und des Lasersignals eines einzelnen Schmelzvolumens.

Zur Erstellung von Trainings- und Testdaten wurden die Signaldaten von knapp 9000 Schmelzvolumen händisch analysiert und vier verschiedenen Kategorien zugeordnet. Die Vorstellung und Diskussion der Klassen folgen im nächsten Abschnitt.

5.1.3 Modellentwicklung

Zur Modellentwicklung werden anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus Abschnitt 4.1 verschiedene Klassen und Merkmale definiert. Mit Hilfe der Merkmale erfolgt danach die Entwicklung eines Entscheidungsbaums zur Klassifikation einzelner Schmelzvolumen. Im Anschluss daran wird das Klassifikationsmodell mithilfe der händisch klassifizierten Daten und einer Konfusionsmatrix sowie durch Testschweißungen bewertet.

5.1.3.1 Klassendefinition

Basierend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 4.1 sind beim Schweißen von Glas vier Arten von Schmelzvolumen zu unterscheiden: defektfreie Schmelzvolumen (1), Schmelzvolumen mit sichtbarer Spaltüberbrückung (2), Schmelzvolumen ohne Grenzflächendurchbruch (3) und Schmelzvolumen mit Prozessabbruch (4), siehe Bild 5.4. Für die Schmelzvolumenbewertung wird jedoch nur zwischen angebundenen (1) und (2) und nicht angebundenen (3) und (4) Schmelzvolumen unterschieden. Schmelzvolumen

ohne Anbindung werden der Positiv-Klasse zugeordnet, da in der Qualitätskontrolle eine positive Entscheidung gleichbedeutend mit einem erkannten Fehler ist. Dementsprechend werden Schmelzvolumen mit Anbindung als Negativ-Klasse definiert.

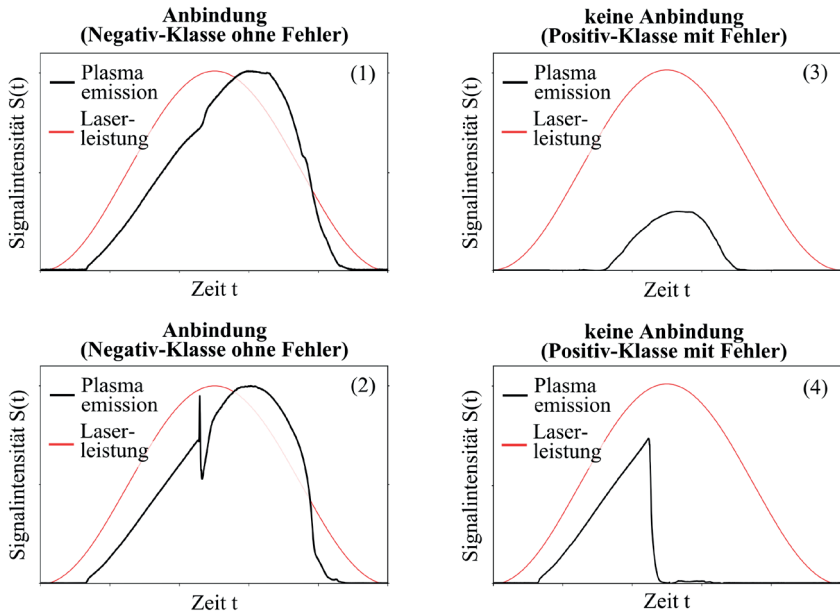


Bild 5.4: Typische Schmelzvolumen-Arten beim Schweißen von Glas: Defektfreie Schmelzvolumen (1), Schmelzvolumen mit sichtbarer Spaltüberbrückung (2), Schmelzvolumen ohne Grenzflächendurchbruch (3) und Schmelzvolumen mit Prozessabbruch (4). Es wird zudem zwischen Schmelzvolumen mit und ohne Anbindung unterschieden.

Schmelzvolumen mit Anbindung Defektfreie Schmelzvolumen (1) werden beim Schweißen optisch kontaktierter Proben beobachtet und spiegeln einen idealen Prozessverlauf mit erfolgter Anbindung wider. Die emittierte Prozessstrahlung ist durch einen Emissionspeak ohne sprunghafte Änderungen charakterisiert. Die Ausdehnung des Schmelzvolumens und die Signalintensität im Maximum der Plasmaemission sind im Vergleich zu den anderen Schmelzvolumenarten maximal. Bei Schmelzvolumen mit sichtbarer Spaltüberbrückung (2) bricht die Signalintensität beim Erreichen der Grenzfläche kurzzeitig ein und steigt danach wieder an. Dies führt zu einem charakteristischen Signalverlauf mit zwei lokalen Maxima. Auch hier findet eine Anbindung zwischen den Fügepartnern statt.

Schmelzvolumen ohne Anbindung Bei Schmelzvolumen ohne Grenzflächendurchbruch handelt es sich um Schmelzvolumen, welche die Grenzfläche nicht erreichen und somit zu keiner Anbindung zwischen den Fügepartnern führen. Sie entstehen, wenn die Intensität im Strahl durch Abschattung an Schmelzablagerungen oder Hohlräumen reduziert ist und der Prozess dadurch noch im ersten Fügepartner zum Erliegen kommt. Schmelzvolumen ohne Grenzflächendurchbruch sind wie defektfreie Schmelzvolumen durch einen einzelnen Emissionspeak ohne sprunghafte Änderungen in der Signalintensität gekennzeichnet (3). Aufgrund der verringerten longitudinalen Ausdehnung ist die Intensität im Signalmaximum gegenüber defektfreien Schmelzvolumen deutlich reduziert. Ist der Spalt zwischen den Fügepartnern zu groß, bricht der Prozess an der Grenzfläche ab. Es kommt dadurch zu keiner stoffschlüssigen Verbindung zwischen den Fügepartnern. Dies hat zur Folge, dass die Strahlungsemission vollständig einbricht und nicht wieder ansteigt (4). Eine detaillierte Erklärung der Prozesse und Signalverläufe ist in Abschnitt 4.1 oder [80] zu finden.

5.1.3.2 Merkmale

Die physikalischen Zusammenhänge zwischen Prozess und Messsignal sind bekannt und gut verstanden [80]. Bei der Merkmalfindung wird daher auf rein datengetriebene Ansätze verzichtet. Basierend auf dem vorhandenen physikalischen Verständnis (Abschnitt 4.1) lassen sich sechs Merkmale zur Unterscheidung der vier vorgestellten Schmelzvolumen ableiten, siehe Tabelle 5.2. Bild 5.5 zeigt die Signalmerkmale exemplarisch am Fotodiodensignal $S(t)$ eines Schmelzvolumens mit sichtbarer Spaltüberbrückung und dessen Ableitung $\dot{S}(t)$. Der Verlauf der Laserleistung ist rot dargestellt. Der Beginn der Schmelzvolumenentstehung t_A entspricht dem Zeitpunkt innerhalb einer Modulationssequenz, zu dem die Strahlungsemission eine Schwellintensität S_T das erste Mal überschreitet. Das letzte Mal, dass die Signalintensität innerhalb einer Modulationssequenz den Schwellwert S_T unterschreitet kennzeichnet das Ende der Schmelzvolumenbildung t_E . Die integrierte Signalintensität

$$I = \int_{t_A}^{t_E} S(t) dt \quad (5.5)$$

entspricht der Fläche unter der Signalkurve zwischen dem Beginn und dem Ende der Schmelzvolumen. Der Zeitpunkt, zu dem die Intensität des Plasmas innerhalb einer Modulationssequenz aufgrund des Erreichens der Grenzfläche einbricht wird als t_G bezeichnet. Die Dauer vom Beginn der Schmelzvolumenbildung bis zum Einbruch

der Signalintensität wird als t_p bezeichnet. P_1 und P_2 markieren die beiden Signalmaxima innerhalb einer Modulationssequenz.

Symbol	Merkmal
S_{max}	Maximale Signalintensität
I	Integrierte Signalintensität
\dot{S}_{min}	Minimale Steigung
S_{P2}	Intensität zweites lokales Maximum
S_{min}	Intensität lokales Minimum
t_p	Dauer bis zum Erreichen der Grenzfläche

Table 5.2: Identifizierte Signalmerkmale, die zur Schmelzvolumenklassifikation herangezogen werden.

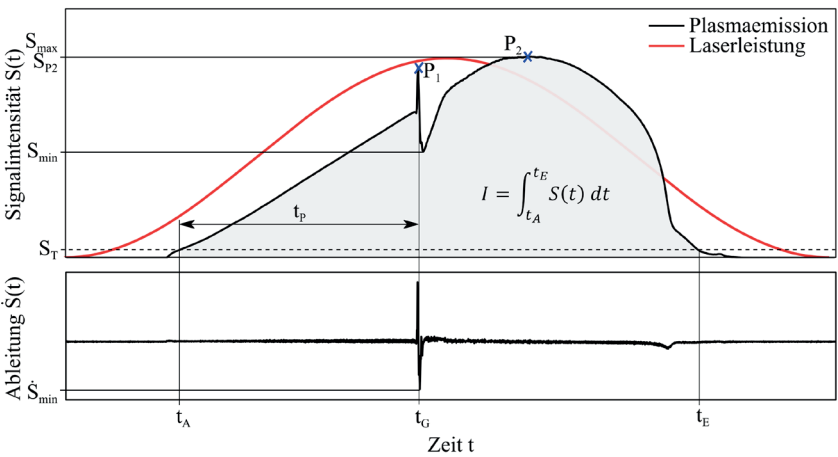


Bild 5.5: Exemplarische Darstellung der Signalmerkmale am Fotodiodensignal $S(t)$ eines Schmelzvolumens mit sichtbarer Spaltüberbrückung und der zeitlichen Änderung des Signals $\dot{S}(t)$. Der Verlauf der Laserleistung ist rot dargestellt.

5.1.3.3 Entscheidungsbaum

Basierend auf dem vorhandenen Fachwissen kann ein Entscheidungsbaum zur Unterscheidung der Schmelzvolumenarten und damit zur Bestimmung der Anbindung definiert werden. Auf Verfahren des maschinellen Lernens, wie beispielsweise neuronale Netze, kann daher verzichtet werden. Der Entscheidungsbaum ist in Bild 5.6 dargestellt. Zur

Klassifizierung wird der Entscheidungsbaum für jedes Schmelzvolumen anhand der ermittelten Merkmale von oben nach unten durchlaufen. Die Entscheidungsebenen sind als Ellipsen dargestellt und beinhalten die definierten Merkmale aus Abschnitt 5.1.3.2. Anhand von Schwellwerten, die in Tabelle 5.3 definiert sind, werden die Schmelzvolumen entweder einer Klasse zugeordnet oder an die nächste Entscheidungsebene weitergegeben. Die Ergebnisse der Klassifizierung sind als Rechtecke gekennzeichnet. Die Zuweisungen (1) – (4) entsprechen den definierten Schmelzvolumenarten aus Abschnitt 5.1.3.1 und Bild 5.4.

Symbol	Bezeichnung
S_{max}^{GW-}	unterer Schwellwert für die maximale Signalintensität S_{max}
S_{max}^{GW+}	oberer Schwellwert für die maximale Signalintensität S_{max}
I^{GW-}	unterer Schwellwert für die integrierte Signalintensität I
I^{GW+}	oberer Schwellwert für die integrierte Signalintensität I
\dot{S}_{min}^{GW}	Schwellwert für die minimale Steigung \dot{S}_{min}
S_{P2}^{GW}	Schwellwert für das zweite lokale Signalmaximum S_{P2}
S_{min}^{GW}	Schwellwert für die Intensität des lokalen Signalminimums S_{min}

Table 5.3: Schwellwerte, die im Entscheidungsbaum zur Schmelzvolumenklassifikation herangezogen werden.

- Im ersten Schritt wird die maximale Intensität S_{max} der Plasmaemission eines Schmelzvolumens überprüft. S_{max} lässt auf die Größe des erzeugten Schmelzvolumens schließen [80]. Werte von $S_{max} < S_{max}^{GW-}$ sind charakteristisch für kleine Schmelzvolumen (3). Werte von $S_{max} > S_{max}^{GW+}$ kennzeichnen defektfreie Schmelzvolumen (1).
- Liegt die Intensität zwischen den Grenzwerten, wird im nächsten Schritt das Integral I unter der Kurve betrachtet. Wie S_{max} lässt I auf die Größe des Schmelzvolumens schließen. Auch hier können anhand von zwei Grenzwerten defektfreie Schmelzvolumen (1) und Schmelzvolumen ohne Grenzflächendurchbruch (3) kategorisiert werden. Wenn $I > I^{GW+}$ handelt es sich um (1), bei $I < I^{GW-}$ um (3). Da Prozessabbrüche ebenfalls eine geringe Fläche unter dem Messsignal aufweisen können, werden Schmelzvolumen mit Prozessabbruch (4), die kurz unterhalb der Grenzfläche entstehen, aussortiert. An diesem Punkt sind alle defektfreien Schmelzvolumen (1) und Schmelzvolumen ohne Grenzflächendurchbruch (3) identifiziert.
- Um die verbleibenden Schmelzvolumen mit überbrücktem Spalt (2) von Schmelzvolumen mit Prozessabbruch (4) zu unterscheiden, wird im nächsten Schritt die minimale Steigung \dot{S}_{min} betrachtet. Eine negative Steigung im Messsignal

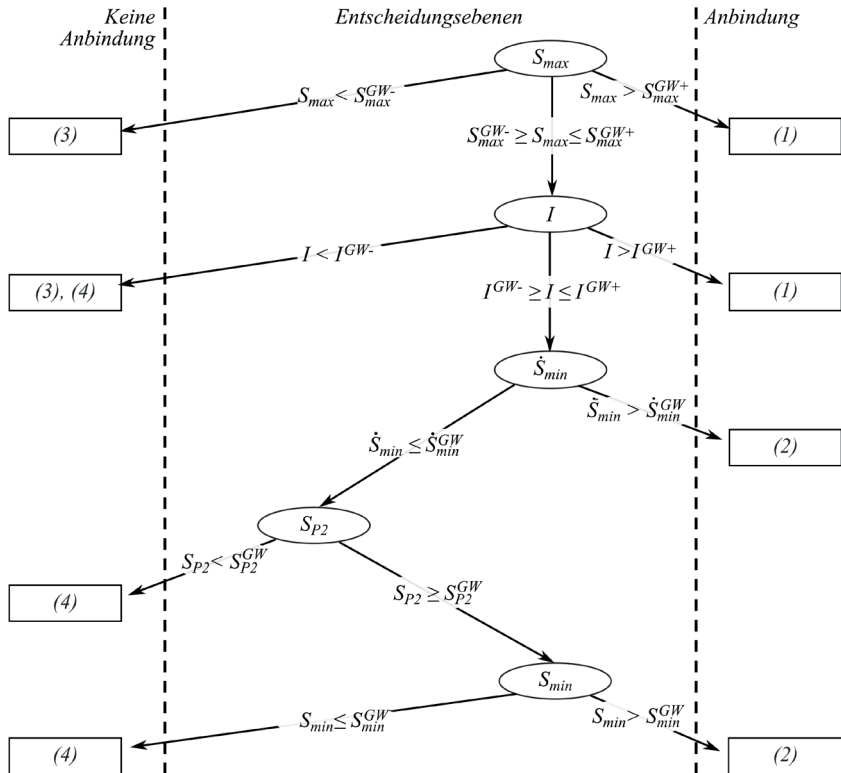


Bild 5.6: Entscheidungsbaum zur Schmelzvolumenklassifizierung. Die Entscheidungspunkte sind als Ellipsen dargestellt und fragen die definierten Merkmale aus Abschnitt 5.1.3.2 ab. Jedem Merkmal sind Schwellwerte zugeordnet. Die Ergebnisse der Klassifizierung sind als Rechtecke gekennzeichnet. Die Zuweisung (1) – (4) entsprechend den definierten Schmelzvolumenarten aus Abschnitt 5.1.3.1.

beziehungsweise eine niedrige minimale Steigung lässt auf einen Einbruch in der Signalintensität schließen. Bei Spaltgrößen $< 2,5 \mu\text{m}$ ist der Abfall im Messsignal moderat. Dadurch liegt (2) eindeutig vor, wenn $\dot{S}_{\min} > \dot{S}_{\min}^{GW}$. Prozessabbrüche (4) und große überbrückte Spalte ($> 2,5 \mu\text{m}$) weisen im Vergleich typischerweise einen sehr steilen Intensitätsabfall und damit eine große negative Steigung auf. Dementsprechend ist eine weitere Entscheidung zwischen (2) und (4) nötig, wenn $\dot{S}_{\min} \leq \dot{S}_{\min}^{GW}$.

- Ein zweites Signalmaximum P_2 (siehe Bild 5.5) deutet auf einen überbrückten Spalt hin. Zur Unterscheidung eines Prozessabbruchs (4) von einem überbrückten Spalt (2) wird daher die Intensität des Signalmaximums S_{P2} herangezogen. Ist die Intensität $S_{P2} < S_{P2}^{GW}$ oder liegt kein zweites Intensitätsmaximum vor, handelt es sich um einen Prozessabbruch (4).
- Bei den übrigen Schmelzvolumen mit Spalt wird abschließend die Tiefe des Signaleinbruchs S_{min} zwischen den zwei Signalmaxima P_1 und P_2 überprüft, siehe Bild 5.5. Die Tiefe eines Signaleinbruchs bei der Spaltüberbrückung lässt Rückschlüsse auf Größenbereiche des Spalts zu. Das Merkmal dient daher zur Unterscheidung einer guten Anbindung von einer Anbindung mit geringer Stabilität bei einer Spaltgröße $< 6 \mu\text{m}$ [80]. Ist $S_{min} \leq S_{min}^{GW}$ handelt es sich um eine Anbindung mit geringer Stabilität und wird als Prozessabbruch (4) gewertet. Für $S_{min} > S_{min}^{GW}$ liegt (2) eindeutig vor.

Aus dem Entscheidungsbaum geht hervor, dass eine Unterscheidung der einzelnen Muster fast vollständig möglich ist. Für die Qualitätskontrolle wird jedoch nur zwischen Schmelzvolumen mit und ohne Anbindung unterschieden, siehe Definition in Abschnitt 5.1.3.1).

Zusätzlich ist eine Bestimmung der Grenzflächenposition p möglich. Die Position der Grenzfläche innerhalb eines Schmelzvolumens wird bei einem überbrückten Spalt oder einem Prozessabbruch anhand der Dauer t_p bestimmt, die vom Start der Modifikationsausbildung t_A bis zum Signaleinbruch (t_G) gemessen wird [80]. Neben dem Prozessverlauf spielt die Grenzflächenposition eine wichtige Rolle für die Prozessbewertung: Ist eine Schweißnaht falsch positioniert, verringert sich die Anbindungsfläche oder es findet keine Anbindung statt. Die Belastbarkeit der Schweißverbindung nimmt mit sinkender Anbindungsfläche ab [34]. Da die Position der Schmelzvolumen beim Schweißen von Bauteilen mit einem Spalt oftmals prozessbedingt schwankt, ist es sinnvoll, dieses Merkmal über mehrere Schmelzvolumen zu betrachten und gemittelt in eine Bewertung einfließen zu lassen.

5.1.3.4 Bewertung der Methode

Die Leistungsfähigkeit der Auswertungsmethode wurde anhand von 9000 händisch kategorisierten Signaldaten mit einer normierten Konfusionsmatrix bewertet, siehe Tabelle 5.4. Die erste Spalte zeigt, ob eine Anbindung tatsächlich vorhanden war oder nicht. Aus der zweiten und dritten Spalte geht jeweils hervor, wie häufig der Entscheidungsbaum vorher sagte, ob eine Anbindung existierte oder nicht. Aus der Konfusionsmatrix ergibt sich, dass 98,4 % der Schmelzvolumen mit Anbindung korrekt erkannt wurden. Dieser Wert ist eine

wichtige Größe im Hinblick auf die Prozessüberwachung. Je niedriger dieser Wert, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass gute Schweißverbindungen als Fehlschweißung und das Bauteil somit als Ausschuss bewertet werden. Um Schweißverbindungen als gut zu bewerten, müssen nicht alle einzelnen Schmelzvolumen zu einer Anbindung führen. Da die Auswertung in 98,4 % der Fälle eine Anbindung richtig erkannte, wurde eine Schweißverbindung als fehlerhaft bewertet, obwohl die erforderliche Anzahl an Schmelzvolumen mit Anbindung exakt erreicht oder knapp überschritten wurde. Durch eine Erhöhung der Anzahl erforderlicher Schmelzvolumen um 1,6% ist sichergestellt, dass erfolgreiche Schweißverbindungen immer als solche bewertet werden. Im Gegensatz zur nicht erkannten Anbindung sind fälschlicherweise als angebunden gedeutete Schmelzvolumen weitaus gravierender. Ist dieser Anteil hoch, kann es dazu kommen, dass schlechte Schweißverbindungen akzeptiert werden. Aufgrund eines Anteils von 0,8 % ist es im vorliegenden Fall unwahrscheinlich, dass eine fehlerhafte Schweißverbindung als gut bewertet wird.

		Vorhersage	
		keine Anbindung detektiert (positiv)	Anbindung detektiert (negativ)
Ist	keine Anbindung vorhanden (positiv)	0,992	0,008
	Anbindung vorhanden (negativ)	0,016	0,984

Table 5.4: Konfusionsmatrix für die Anbindungsdetektion ausgewerteter Schmelzvolumensignale aus gelabelten Datensätzen.

Die Überprüfung der Ergebnisse aus der Leistungsbewertung mit der Konfusionsmatrix erfolgte anhand von ringförmigen Schweißverbindungen mit jeweils zehn Schweißnähten. Je Testteil wurden etwa 5000 Schmelzvolumen erzeugt. Bild 5.7 zeigt exemplarisch zwei Schweißverbindungen: (a) Schweißverbindung mit partiell fehlerhafter Anbindung, die durch eine schlechte Probenkontaktierung mit einem Spalt verursacht wurde und (b) eine Schweißverbindung mit partiell fehlerhafter Anbindung, die auf eine verunreinigte Werkstückoberfläche zurückzuführen ist, siehe Detailaufnahme in der linken Darstellung. Links sind jeweils Mikroskopaufnahmen der Schweißverbindung und rechts die Ergebnisse aus der Bewertung mittels Entscheidungsbaum dargestellt. Das Detailbild in Bild 5.7 (b) zeigt die verunreinigte Werkstückoberfläche.

Angebundene Bereiche sind typischerweise transparent und auf den Mikroskopaufnahmen als dunkle Bereiche erkennbar. Die automatisierte Bewertung zeigt Schmelzvolumen, die zu einer Anbindung geführt haben, in grüner Farbe. Die Bereiche, in denen durch einen großen Spalt keine Anbindung stattgefunden hat, erscheinen in der Mikroskopauf-

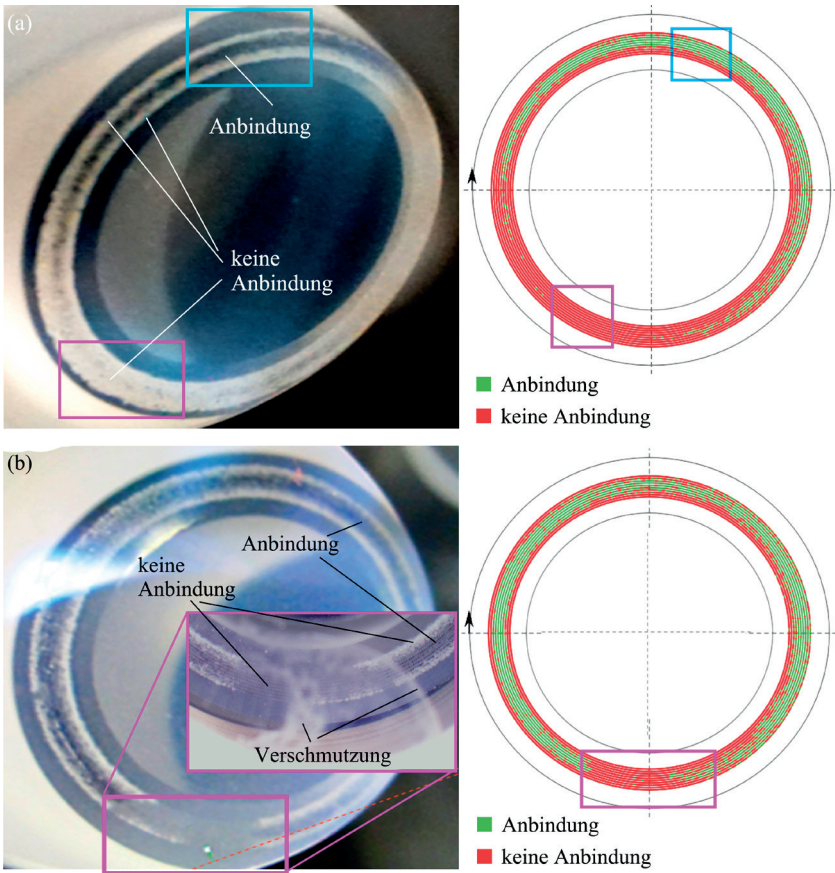


Bild 5.7: Schweißverbindungen mit (a) partiell fehlerhafter Anbindung durch schlechte Probenkontaktierung (Spalt zu groß) und (b) fehlerhafte Anbindung durch verunreinigte Werkstückoberfläche. Links: Mikroskopaufnahmen der Schweißverbindung. Rechts: Bewertung der Schmelzvolumen mittels Entscheidungsbaum.

nahme weiß. In der Auswertung werden diese Stellen in roter Farbe ausgegeben. Werkstückverunreinigungen können die Strahlpropagation stören, wodurch sich die Höhe der Schmelzvolumen verringert. Kommt der Prozess noch im unteren Fügepartner zum Erliegen, findet keine Anbindung zwischen den Fügepartnern statt. Diese Schmelzvolumen ohne Grenzflächendurchbruch sind wie die angebondenen Bereiche ebenfalls transparent

und in den Mikroskopaufnahmen damit dunkel dargestellt. Die Auswertung erkennt diese Bereiche korrekt als Fehlstellen und stellt sie in roter Farbe dar. Insgesamt zeigt die Auswertung eine sehr gute Übereinstimmung mit der optischen Bewertung und eignet sich daher zur Qualitätskontrolle.

5.1.4 Fazit

In diesem Abschnitt wird für das leistungsmodulierte Schweißen ein Verfahren zur Klassifikation von einzeln erzeugten Schmelzvolumen vorgestellt. Die Klassifikation der einzelnen Schmelzvolumen erfolgt anhand von Signaldaten einer Fotodiode, die den Intensitätsverlauf der emittierten Prozessstrahlung beim Schweißen beinhalten. Für die Klassifikation wurde ein Entscheidungsbaum entwickelt, der die Signaldaten anhand von definierten Merkmalen in vier verschiedene Arten von Schmelzvolumen einordnet und damit auf eine Anbindung hin überprüft. Sowohl die Auswahl der Merkmale als auch der entworfene Entscheidungsbaum basieren auf der zugrundeliegenden Prozessphysik, sodass kein maschinelles Lernverfahren benötigt wurde. Die Auswertung zeigt mit 98,4 % eine hohe Erkennungsrate für Schmelzvolumen mit Anbindung und mit 0,8 % eine geringe Wahrscheinlichkeit für nicht erkannte Fehler. Darüber hinaus stimmt das Ergebnis der Auswertung mit dem optischen Eindruck überein.

5.2 Überwachungssystem

Für die industrielle Anwendung wurden die oben aufgeführten Bausteine zu einem Überwachungssystem zusammengeführt und dieses um eine Gesamtbewertung der Schweißverbindung sowie eine Ergebnisausgabe ergänzt, siehe Bild 5.8. Die Unterscheidung von Schmelzvolumen mit und ohne Anbindung ermöglicht eine klare Bewertung der Bauteilanbindung anhand weiterer spezifischer Merkmale in einem zweiten Entscheidungsbaum. Im einfachsten Fall wird die Qualität durch die Anzahl der Schmelzvolumen mit Anbindung ermittelt. Je nach Anwendungsfall können zusätzliche Merkmale zur Gesamtbewertung herangezogen werden. Unter der Voraussetzung, dass die Schmelzvolumen innerhalb der Naht überlappen, kann die Dichtheit einer Schweißnaht anhand der angeordneten Schmelzvolumen überprüft werden. Bleibt die Ortsinformation während der Schmelzvolumenklassifikation erhalten, kann zudem eine grafische Ausgabe des Schweißergebnisses erfolgen, siehe Abbildungen zur Schmelzvolumenbewertung in Bild 5.7.

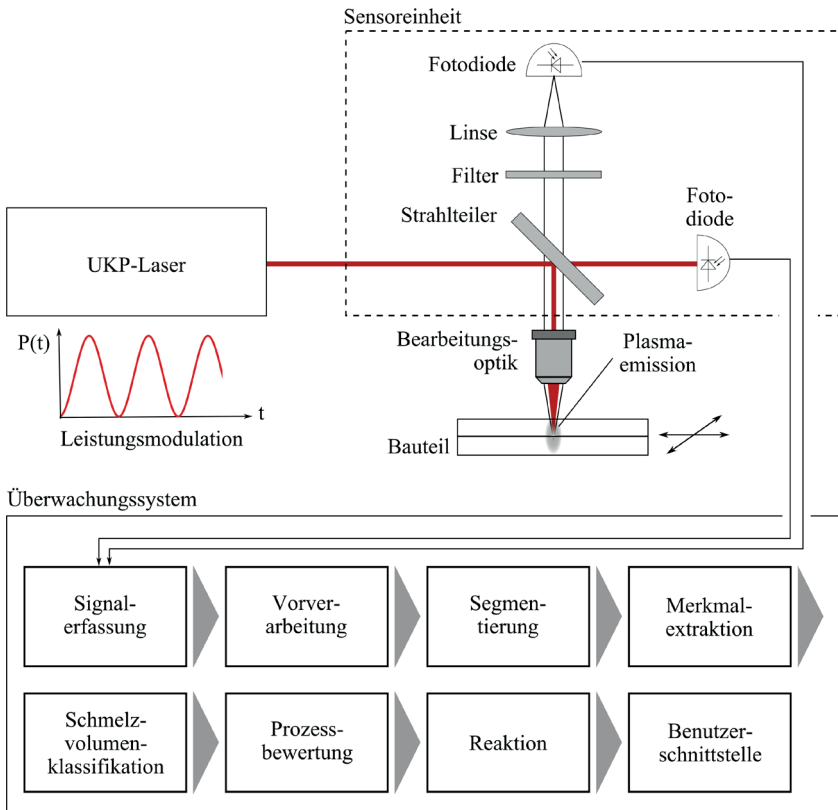


Bild 5.8: Überwachungssystem für das leistungsmodulierte Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslaser.

5.3 Anwendung in der industriellen Fertigung

Im Hinblick auf industriell einsetzbare Strahlquellen mit Grundmode-Strahlqualität, ultrakurzen Pulsen, Pulsenergien im mJ-Bereich und flexiblen Pulsparametern bei kW-Ausgangsleistungen werden neben Faserlasers auch Scheibenlaser mit Multipassverstärker eingesetzt [103]. Multipassverstärker falten den Strahl mehrfach geometrisch über das scheibenförmige Verstärkermmedium [5, 103]. Die Firma TRUMPF realisiert die Faltung des Strahlengangs mit einer Vielzahl an Umlenkspiegeln, die auf einer Grundplatte aus Quarzglas ausgerichtet und montiert sind [5, 103]. Bild 5.9 zeigt ein Foto

des Spiegelarrays. Durch das Verschweißen der ausgerichteten Umlenkspiegel mit der Grundplatte entsteht ein kompaktes, monolithisches Bauteil aus Quarzglas, das eine hervorragende Belastbarkeit, mechanische Stabilität und Temperaturstabilität aufweist [5, 103]. Der Fertigungsprozess der Spiegelarrays ist automatisiert. Da bisher keine Inline-Prozessüberwachung zur Verfügung stand, erfolgte die Qualitätsprüfung der Schweißnaht bisher manuell durch eine Sichtprüfung und damit subjektiv. Darüber hinaus besteht durch die manuelle Qualitätsprüfung die Gefahr der Bauteilverunreinigung.



Bild 5.9: Spiegelarray aus Quarzglas für Multipass-Scheibenlaser-Verstärker.

Um einen vollautomatisierten Betrieb der Anlage zu ermöglichen und damit eine wirtschaftliche Produktion der Spiegelarrays bei gleichbleibend hoher und objektiv bewerteter Bauteilqualität zu gewährleisten, wurde in einem ersten Schritt der bestehende Schweißprozess in der Fertigung auf leistungsmoduliertes Schweißen umgestellt. Im zweiten Schritt erfolgte die Integration der erforderlichen Sensorkomponenten zur Strahldiagnostik und Überwachung der emittierten Prozessstrahlung in die bestehende Anlage. Bild 5.10 zeigt die Strukturübersicht des realisierten Überwachungssystems. Zur Datenauswertung wurde basierend auf dem in Abschnitt 5.1 vorgestellten Verfahren eine Software implementiert, welche die erfassten und lokal gespeicherten Messdaten nach jedem Prozessschritt auswertet und das Schweißergebnis grafisch darstellt. In die Bewertung der Schweißverbindung fließt die Anzahl der Schmelzvolumen mit Anbindung sowie die mittlere Grenzflächenposition im Schmelzvolumen ein, siehe Abschnitt 5.1. Im Falle

einer erfolgreichen Schweißverbindung lässt sich der Prozess automatisch fortsetzen. Kann dagegen aufgrund einer Verschmutzung oder einer unzureichenden Kontaktierung der Bauteile keine Schweißverbindung mit ausreichender Qualität hergestellt werden, besteht durch die Überwachung die Möglichkeit, vor dem nächsten Prozessschritt eine Nachbearbeitung des fehlerhaft verschweißten Umlenkspiegels durchzuführen.

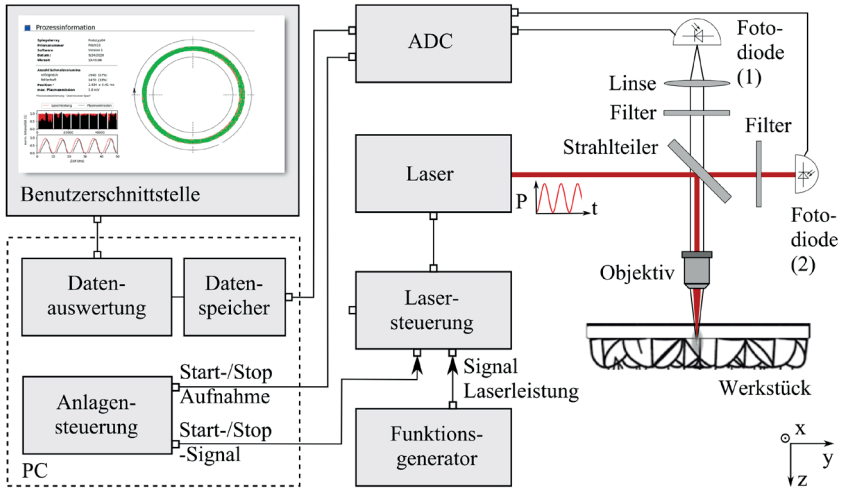


Bild 5.10: Strukturübersicht des realisierten Überwachungssystems.

Die grafische Benutzeroberfläche der implementierten Software beinhaltet unter anderem eine Funktion zur Darstellung der Auswertungsergebnisse für produzierte Spiegelarrays in Form einer Produkthistorie. Neben einer Gesamtübersicht der Spiegelarrays werden detaillierte Informationen über die Schweißverbindungen der einzelnen Umlenkspiegel bereitgestellt. Zudem gibt es Funktionen zur erweiterten Fehlerdiagnose. Diese umfassen beispielsweise die Fehlerhäufigkeit an den einzelnen Umlenkspiegelpositionen oder den Trend der Grenzflächenposition.

In ersten Tests konnte die Tauglichkeit der Prozessüberwachung nachgewiesen werden. Zur Validierung der entwickelten Prozessüberwachung wurden 140 Testteile ohne und 15 Testteile mit fehlerhafter Anbindung überwacht hergestellt. Die Auswertesoftware ordnete alle Testteile korrekt zu. Des Weiteren bewirkte die Umstellung auf einen modulierten Schweißprozess eine Verbesserung im Schweißergebnis.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Glas ist ein Werkstoff, der aufgrund seiner mechanischen, optischen und chemischen Eigenschaften im Alltag unzählige Anwendungsmöglichkeiten findet. Optische Komponenten oder technische Gehäuse erfordern oftmals eine dauerhafte und stoffschlüssige Verbindung von Gläsern, um ihre Funktion zu erfüllen. Beim Fügen durch Schweißen wird das Material lokal aufgeschmolzen, wodurch sich eine langzeitstabile und flüssigkeits- und gasdichte Verbindung erreichen lässt. Die mechanischen und chemischen Eigenschaften dieser Verbindung entsprechen in der Regel denen des Grundmaterials. Dadurch ist das Schweißen alternativen Füge-techniken wie dem Kleben, Löten, Anspren-gen oder Diffusionsschweißen oftmals überlegen. Zum Schweißen von Glas werden neben CO₂-Lasern auch Ultrakurzpulslaser eingesetzt. Aufgrund von nicht idealen Prozessparametern, wie beispielsweise einem Spalt zwischen den Fügepartnern, kann es zu Prozessunregelmäßigkeiten und damit zu fehlerhaften Schweißverbindungen kommen. Die Qualitätsprüfung beim Schweißen von Glas mit UKP-Lasern erfolgt oftmals subjektiv durch eine manuelle Prüfung. Dadurch kann es vorkommen, dass unzureichende Infor-mationen über die Qualität der Verbindung vorliegen. Eine Inline-Prozessüberwachung liefert im Gegensatz dazu eine objektive Bewertung, wodurch die Auslieferung von fehlerhaften Bauteilen reduziert werden kann. Zur Inline-Prozessüberwachung sind für das Glasschweißen bisher keine Verfahren dokumentiert. Das Ziel dieses Forschungspro-jekts war daher, die Entwicklung eines Verfahrens zur Inline-Prozessüberwachung für das Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslasern.

In einem ersten Schritt wurde hierzu die Nahtentstehung durch eine Analyse der emit-tierten Prozessstrahlung systematisch in Quarz- und Alkali-Aluminosilikatglas untersucht. Es hat sich gezeigt, dass beim Schweißen mit einem gaußförmigen Strahlprofil und konstanter Laserleistung zwei übergeordnete Formen der Nahtentstehung beobachtet werden können: Im ersten Fall entstehen Schmelzvolumen einzeln nacheinander. Im zweiten Fall entstehen mehrere Schmelzvolumen gleichzeitig. Reicht die durch eine Wechsel-wirkungszone transmittierte Strahlung aus, in der Nähe des geometrischen Fokus eine Wechselwirkungszone zu induzieren, werden mehrere Schmelzvolumen gleichzeitig gebildet. Ist die Wechselwirkungszone dagegen nicht transparent genug, um die Bildung weiterer Wechselwirkungs-zonen zu ermöglichen, bilden sich die Schmelzvolumen einzeln nacheinander aus. Insbesondere die gleichzeitige Entstehung von Schmelzvolumen führt

zu Schweißnähten mit unregelmäßigen Nahtstrukturen, die zu hohen Spannungen führen können. Eine regelmäßige Nahtausbildung lässt dagegen eine erhöhte Festigkeit und eine verminderte Rissbildung erwarten, weshalb diese als vorteilhaft angesehen wird.

Gleichzeitig auftretende Wechselwirkungszonen und die damit einhergehende unregelmäßige Nahtentstehung wurde durch Modulation der mittleren Laserleistung und durch Verwendung eines Bessel-ähnlichen Strahlprofils vermieden. Mit einer modulierten Laserleistung wurde sowohl bei einem gaußförmigem als auch bei einem Bessel-ähnlichen Strahlprofil die Bildung einzelner Schmelzvolumen in regelmäßigen Abständen erreicht, wodurch eine vorhersagbare und reproduzierbare Schweißnaht mit regelmäßiger Struktur entstand. Die Entstehungsweise der einzelnen Schmelzvolumen hängt allerdings von der Strahlform ab. Bei einem Gaußstrahl wachsen die Schmelzvolumen in Längsrichtung, in der Nähe des geometrischen Fokus beginnend, in Richtung des einfallenden Laserstrahls. Beim Bessel-ähnlichen Strahlprofil dehnt sich die Wechselwirkungszone hingegen symmetrisch vom Zentrum weg aus. Der zylindersymmetrische seitliche Einfall beim Bessel-ähnlichen Strahlprofil vermeidet eine Abschattung entlang der Strahlachse und verhindert so eine periodische Aufwärtsbewegung der Wechselwirkungszonen. Im Gegensatz zur Leistungsmodulation wird das Material bei einem geformten Strahl mit konstanter mittlerer Leistung kontinuierlich aufgeschmolzen, wodurch eine homogene Schweißnaht ohne periodische Signatur entsteht.

Die Untersuchungen zur Nahtentstehung bildeten die Grundlage für die Entwicklung eines Verfahrens zur Inline-Prozessüberwachung mit einer Fotodiode. Während des Schweißprozesses liefert eine Aufzeichnung der emittierten Prozessstrahlung mit einer Fotodiode Informationen über die Art des Prozesses und kann daher zur Unterscheidung verschiedener Nahtentstehungsformen herangezogen werden. Sequentiell erzeugt, lässt sich die Entstehung jedes einzelnen Schmelzvolumens innerhalb einer Schweißnaht individuell überwachen. Entstehen die einzelnen Schmelzvolumen dabei reproduzierbar durch eine Modulation der mittleren Laserleistung ergibt sich für ein einzeln erzeugtes Schmelzvolumen ein typischer Verlauf im Fotodiodensignal. Abweichungen von diesem Verlauf deuten auf Prozessunregelmäßigkeiten und Defekte hin. Anhand von charakteristischen Merkmalen im Signalverlauf kann sowohl in Quarz- als auch in Alkali-Aluminosilikatglas eine Aussage über die Qualität der Anbindung erfolgen. Liegt ein Spalt vor, ist eine Lokalisierung der Grenzfläche innerhalb der Schmelzvolumen möglich. Zur erweiterten Diagnose lässt sich die Überwachung mit einer Fotodiode beispielsweise um ein OCT-basiertes Verfahren zur Detektion der Nahtposition in optisch kontaktierten Fügepartnern oder einem kamerabasierten System zur Risserkennung ergänzen.

Basierend auf den Signaldaten der Fotodiode wurde abschließend für leistungsmodierte Prozesse ein Überwachungssystem entwickelt. Um die Nahtqualität mit Hilfe der emittierten Prozessstrahlung zu bewerten, wurden einzeln erzeugte Schmelzvolumen innerhalb einer Schweißnaht auf ihre Anbindung hin überprüft. Die Klassifizierung der Schmelzvolumen erfolgte mit einem Entscheidungsbaum anhand von ausgewählten Merkmalen, die den Prozesszustand eines Schmelzvolumens eindeutig definieren. Sowohl die Auswahl der Merkmale als auch der entworfene Entscheidungsbaum basieren auf der zugrundeliegenden Prozessphysik, sodass bei der Entwicklung des Klassifikationsmodells auf maschinelle Lernverfahren verzichtet werden konnte. Für die letztendliche Bewertung einer Schweißverbindung wurden zusätzlich spezifische Bewertungskriterien herangezogen. Zur Demonstration der Prozessüberwachung wurde das entwickelte Verfahren bei TRUMPF in einem Industrieprozess zur Herstellung von Spiegelarrays für Multipass-Scheibenlaser-Verstärker umgesetzt. Das Verfahren ermöglicht dort den vollautomatisierten Betrieb der Fertigungsanlage und gewährleistet die wirtschaftliche Produktion von Spiegelarrays.

Aufgrund der fortschreitenden Entwicklungen auf dem Gebiet des Schweißens von Gläsern mit Ultrakurzpulslasern ist auch in Zukunft mit weiteren Anwendungen und industriellen Umsetzungen zu rechnen. Das entwickelte Verfahren zur Prozessüberwachung ist dabei ein richtungsweisender Bestandteil zur Prozessautomatisierung und kann dazu beitragen, die industrielle Umsetzung von UKP-Glasschweißprozessen zu fördern. Eine Weiterentwicklung des Verfahrens stellt die Korrektur von Fehlschweißungen dar. Bisher muss hierfür, wenn überhaupt möglich, auf das Kleben zurückgegriffen werden. Um dies zu vermeiden, sollten zukünftig laserbasierte Methoden zur Korrektur spaltbedingter Unterbrechungen der Anbindung zur Verfügung stehen. Eine zweite Möglichkeit zur Weiterentwicklung ist die Integration eines OCT-Systems. Dieser Schritt ermöglicht die Nahtposition im Volumen zu detektieren und gewährleistet damit die Überwachbarkeit der Nahtposition bei optisch kontaktierten Werkstücken zur Qualitätsüberwachung oder Regelung. Darüber hinaus stellt prozessseitig die zeitliche Form der Modulation einen bisher ungenutzten Freiheitsgrad zur Prozessoptimierung dar. Vorstellbar sind beispielsweise die Verwendung einer sinusförmigen Modulation mit Plateau oder eine asymmetrische Modulationsform.

Literaturverzeichnis

- [1] SCHAEFFER, H. A.; LANGFELD, R.: *Werkstoff Glas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [2] CONRADT, R.: *Chemical Durability of Oxide Glasses in Aqueous Solutions: A Review*. Journal of the American Ceramic Society **91** (2008) Nr. 3, S. 728–735.
- [3] WALTON, D.; AMIN, J.; SHASHIDHAR, N.: *Special glass: A New Design Element in Consumer Electronic*".
- [4] MACFARLANE, A.: *The glass bathyscaphe : how glass changed the world*. London, England: Profile Books Ltd, 2002.
- [5] KUMKAR, M.; JENNE, M.; GROSSMANN, D. G.; HECKER, S.; ZIMMERMANN, F.; KLEINER, J.; FLAMM, D.; KAISER, M.; SCHÄFER, M.; BEER, S.; NOLTE, S.: *Advances in transparent materials processing by ultrashort laser pulses*. In: Klotzbach, U.; Kling, R.; Watanabe, A. (Hrsg.): *Laser-based Micro- and Nanoprocessing XIV*. SPIE, 2020, S. 13.
- [6] HÉLIE, D.; GOUIN, S.; VALLÉE, R.: *Assembling an endcap to optical fibers by femtosecond laser welding and milling*. Optical Materials Express **3** (2013) Nr. 10, S. 1742.
- [7] KAISER, E.: *Laser Welding of Glass Replaces Glueing Procedure*. Laser Technik Journal **13** (2016) Nr. 3, S. 22–25.
- [8] KIM, S.; PARK, J.; SO, S.; AHN, S.; CHOI, J.; KOO, C.; JOUNG, Y.-H.: *Characteristics of an Implantable Blood Pressure Sensor Packaged by Ultrafast Laser Microwelding*. Sensors (Basel, Switzerland) **19** (2019) Nr. 8.
- [9] *DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. 2003.
- [10] BERTHOLD, A.; NICOLA, L.; SARRO, P.; VELLEKOOP, M.: *Glass-to-glass anodic bonding with standard IC technology thin films as intermediate layers*. Sensors and Actuators A: Physical **82** (2000) Nr. 1-3, S. 224–228.
- [11] GOSS, B.: *Bonding glass and other substrates with UV curing adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives **22** (2002) Nr. 5, S. 405–408.
- [12] WANG, H.; FOOTE, R.; JACOBSON, S.; SCHNEIBEL, J.; RAMSEY, J.: *Low temperature bonding for microfabrication of chemical analysis devices*. Sensors and Actuators B: Chemical **45** (1997) Nr. 3, S. 199–207.
- [13] CHAMINADE, C.; OLOWINSKY, A.; KIND, H.: *Laser-based glass soldering for MEMS packaging*. In: International Congress on Applications of Lasers &

- Electro-Optics. Laser Institute of America, 2007, S. M602.
- [14] GRECO, V.; MARCHESINI, F.; MOLESINI, G.: *Optical contact and van der Waals interactions: The role of the surface topography in determining the bonding strength of thick glass plates*. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics **3** (2001) Nr. 1, S. 85–88.
- [15] ST. HECHT-MIJIC; HARNISCH, A.; HÜLSENBERG, D.; SCHUNDAU, S.; PFEIFER, J.; SCHROETER, T.: *Thermisches Bonden von Bauteilen aus mikrostrukturiertem Glas*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik **34** (2003) Nr. 7, S. 645–647.
- [16] SHIMBO, M.; FURUKAWA, K.; FUKUDA, K.; TANZAWA, K.: *Silicon-to-silicon direct bonding method*. J. Appl. Phys. **60** (1986) Nr. 8, S. 2987–2989.
- [17] MIYAMOTO, I.: *Laser welding of glass*. In: Handbook of Laser Welding Technologies, Elsevier, ISBN 9780857092649, 2013, S. 301–331.
- [18] DIN 8593-0: 2003-09, *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. 2003.
- [19] POHL, L.; VON WITZENDORFF, P.; CHATZIZYRLI, E.; SUTTMANN, O.; OVERMEYER, L.: *CO₂ laser welding of glass: Numerical simulation and experimental study*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **90** (2017) Nr. 1-4, S. 397–403.
- [20] JESSE, K.: *Femtosekundenlaser*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [21] GATTASS, R. R.; MAZUR, E.: *Femtosecond laser micromachining in transparent materials*. Nature Photonics **2** (2008) Nr. 4, S. 219–225.
- [22] SCHAFFER, C. B.; BRODEUR, A.; MAZUR, E.: *Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses*. Measurement Science and Technology **12** (2001) Nr. 11, S. 1784–1794.
- [23] SCHAFFER, C. B.; GARCÍA, J. F.; MAZUR, E.: *Bulk heating of transparent materials using a high-repetition-rate femtosecond laser*. Applied Physics A: Materials Science & Processing **76** (2003) Nr. 3, S. 351–354.
- [24] CVECEK, K.; MIYAMOTO, I.; STRAUSS, J.; BUI, V.; SCHARFENBERG, S.; FRICK, T.; SCHMIDT, T.; SCHMIDT, M.: *Strength of Joining Seams in Glass Welded by Ultra-fast Lasers Depending on Focus Height*. Journal of Laser Micro/Nanoengineering **7** (2012) Nr. 1, S. 68–72.
- [25] MIYAMOTO, I.; CVECEK, K.; OKAMOTO, Y.; SCHMIDT, M.: *Novel fusion welding technology of glass using ultrashort pulse lasers*. Physics Procedia **5** (2010), S. 483–493.
- [26] RICHTER, S.: *Direct laser bonding of transparent materials using ultrashort*

- laser pulses at high repetition rates*. Jena: Institute of Applied Physics, 2014. Friedrich Schiller University, dissertation.
- [27] CVECEK, K.; DEHMEL, S.; MIYAMOTO, I.; SCHMIDT, M.: *A review on glass welding by ultra-short laser pulses*. International Journal of Extreme Manufacturing **1** (2019) Nr. 4, S. 042001.
- [28] MIYAMOTO, I.; CVECEK, K.; SCHMIDT, M.: *Advances of Laser Welding Technology of Glass -Science and Technology-*. Journal of Laser Micro/Nanoengineering **15** (2020) Nr. 2.
- [29] RICHTER, S.; ZIMMERMANN, F.; EBERHARDT, R.; TÜNNERMANN, A.; NOLTE, S.: *Toward laser welding of glasses without optical contacting*. Appl. Phys. A **121** (2015) Nr. 1, S. 1–9.
- [30] CVECEK, K.; ODATO, R.; DEHMEL, S.; MIYAMOTO, I.; SCHMIDT, M.: *Gap bridging in joining of glass using ultra short laser pulses*. Opt. Express **23** (2015) Nr. 5, S. 5681–5693.
- [31] ZIMMERMANN, F.; HECKER, S.; JENNE, M.; FLAMM, D.; KAISER, M.; KLEINER, J.; SCHAEFER, M.: *Towards industrial usage of ultrashort pulse welding*. In: Lasers in Manufacturing Conference, Munich, Germany, 24–27 June 2019, 2019.
- [32] RICHTER, S.; DÖRING, S.; TÜNNERMANN, A.; NOLTE, S.: *Bonding of glass with femtosecond laser pulses at high repetition rates*. Appl. Phys. A **103** (2011) Nr. 2, S. 257–261.
- [33] ALEXEEV, I.; CVECEK, K.; CHRISTIAN, S.; MIYAMOTO, I.; FRICK, T.; SCHMIDT, M.: *Characterization of Shear Strength and Bonding Energy of Laser Pro-duced Welding Seams in Glass*. Journal of Laser Micro/Nanoengineering **7** (2012) Nr. 3, S. 279–283.
- [34] OKAMOTO, Y.; MIYAMOTO, I.; CVECEK, K.; OKADA, A.; TAKAHASHI, K.; SCHMIDT, M.: *Evaluation of Molten Zone in Micro-welding of Glass by Picosecond Pulsed Laser*. Journal of Laser Micro/Nanoengineering **8** (2013) Nr. 1, S. 65–69.
- [35] NAKAMURA, A.; SAKAKURA, M.; SHIMOTSUMA, Y.; MIURA, K.: *Suppression of Stress and Crack Generation in Local Glass Melting by Picosecond Laser Irradiation at a High Repetition Rates with Temporal Energy Modulation*. Journal of Laser Micro/Nanoengineering **12** (2017) Nr. 2, S. 126–131.
- [36] CVECEK, K.; ALEXEEV, I.; MIYAMOTO, I.; SCHMIDT, M.: *Defect formation in glass welding by means of ultra short laser pulses*. Physics Procedia **5** (2010), S. 495–502.
- [37] WECK, M.; BRECHER, C.: *Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme: Vorschubantriebe und Prozessdiagnose*, 6. Aufl. Berlin: Springer, 2006 (VDI).

- [38] CAI, W.; WANG, J.; JIANG, P.; CAO, L.; MI, G.; ZHOU, Q.: *Application of sensing techniques and artificial intelligence-based methods to laser welding real-time monitoring: A critical review of recent literature*. Journal of Manufacturing Systems **57** (oct 2020), S. 1–18.
- [39] YOU, D. Y.; GAO, X. D.; KATAYAMA, S.: *Review of laser welding monitoring*. Science and Technology of Welding and Joining **19** (dec 2013) Nr. 3, S. 181–201.
- [40] STAVRIDIS, J.; PAPACHARALAMPOPOULOS, A.; STAVROPOULOS, P.: *Quality assessment in laser welding: a critical review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **94** (may 2017) Nr. 5-8, S. 1825–1847.
- [41] DUPRIEZ, N. D.; DENKL, A.: *Advances of OCT Technology for Laser Beam Processing*. Laser Technik Journal **14** (sep 2017) Nr. 4, S. 34–38.
- [42] MÜLLER, M.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung*. München: Utz, Wiss, 2002.
- [43] MIRAPEIX, J.; RUIZ-LOMBERA, R.; VALDIANDE, J.; RODRIGUEZ-COBO, L.; ANABITARTE, F.; COBO, A.: *Defect detection with CCD-spectrometer and photodiode-based arc-welding monitoring systems*. Journal of Materials Processing Technology **211** (dec 2011) Nr. 12, S. 2132–2139.
- [44] ABT, F.: *Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laser-schweißprozessen*. utzverlag GmbH, 2018.
- [45] POHL, L.; VON WITZENDORFF, P.; SUTTMANN, O.; OVERMEYER, L.: *Automated laser-based glass fusing with powder additive*. In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Laser Institute of America, 2014.
- [46] POHL, L.; VON WITZENDORFF, P.; CHATZIZYRLI, E.; SUTTMANN, O.; OVERMEYER, L.: *CO2 laser welding of glass: numerical simulation and experimental study*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **90** (sep 2016) Nr. 1-4, S. 397–403.
- [47] RUSS, S.; MÜLLER, C.; BUDNICKI, A.; WIEDUWILT, J.; LANG, M.; RICHTER, S.; HESSE, T.: *Lasers in Manufacturing Conference 2017 Strong connection : welding of different kinds of glass using femtosecond laser pulses*. 2017.
- [48] MIYAMOTO, I.; OKAMOTO, Y.; TANABE, R.; ITO, Y.; CVECEK, K.; SCHMIDT, M.: *Mechanism of dynamic plasma motion in internal modification of glass by fs-laser pulses at high pulse repetition rate*. Opt. Express **24** (2016) Nr. 22, S. 25718–25731.
- [49] MIYAMOTO, I.; OKAMOTO, Y.; TANABE, R.; ITO, Y.: *Characterization of Plasma in Microwelding of Glass Using Ultrashort Laser Pulse at High Pulse*

- Repetition Rates*. Physics Procedia **56** (2014), S. 973–982.
- [50] NORDIN, I. H. W.; OKAMOTO, Y.; OKADA, A.; TAKEKUNI, T.; SAKAGAWA, T.: *Effect of focusing condition on molten area characteristics in micro-welding of borosilicate glass by picosecond pulsed laser*. Appl. Phys. A **122** (2016) Nr. 5, S. 879.
- [51] SAHOO, P. K.; FENG, T.; QIAO, J.: *Dynamic pulse propagation modelling for predictive femtosecond-laser-microbonding of transparent materials*. Opt. Express **28** (2020) Nr. 21, S. 31103–31118.
- [52] MIYAMOTO, I.; CVECEK, K.; SCHMIDT, M.: *Nonlinear absorption dynamics simulated in internal modification of glass at 532nm and 1064nm by ultrashort laser pulses*. Procedia CIRP **74** (2018), S. 344–348.
- [53] ALEXEEV, I.; HEBERLE, J.; CVECEK, K.; NAGULIN, K.; SCHMIDT, M.: *High Speed Pump-Probe Apparatus for Observation of Transitional Effects in Ultrafast Laser Micromachining Processes*. Micromachines **6** (2015) Nr. 12, S. 1914–1922.
- [54] HECKER, S.; BLOTHE, M.; GROSSMANN, D.; GRAF, T.: *Process regimes during welding of glass by femtosecond laser pulse bursts*. Appl. Optics **59** (2020) Nr. 22, S. 6452–6458.
- [55] JENNE, M.; ZIMMERMANN, F.; FLAMM, D.; GROSSMANN, D.; KLEINER, J.; KUMKAR, M.; NOLTE STEFAN: *Multi Pulse Pump-Probe Diagnostics for Development of Advanced Transparent Materials Processing*. Journal of Laser Micro/Nanoengineering **13** (2018) Nr. 3, S. 273–279.
- [56] ZIMMERMANN, F.; RICHTER, S.; DÖRING, S.; TÜNNERMANN, A.; NOLTE, S.: *Ultrastable bonding of glass with femtosecond laser bursts*. Appl. Optics **52** (2013) Nr. 6, S. 1149–1154.
- [57] RETHFELD, B.; SOKOŁOWSKI-TINTEN, K.; VON DER LINDE, D.; ANISIMOV, S. I.: *Timescales in the response of materials to femtosecond laser excitation*. Appl. Phys. A **79** (2004) Nr. 4-6, S. 767–769.
- [58] RETHFELD, B.: *Free-electron generation in laser-irradiated dielectrics*. Phys. Rev. B **73** (2006) Nr. 3, S. 1307.
- [59] CORNING: *Corning® HPFS® 7979, 7980, 8655 Fused Silica: Optical Materials Product Information: Specialty Materials Division*. 2014.
- [60] CORNING: *Corning® Gorilla® Glass 3: Product Information*. 2020.
- [61] KOTZ, F.; SCHNEIDER, N.; STRIEGEL, A.; WOLFSCHLÄGER, A.; KELLER, N.; WORGULL, M.; BAUER, W.; SCHILD, D.; MILICH, M.; GREINER, C.; HELMER, D.; RAPP, B. E.: *Glassomer-Processing Fused Silica Glass Like a Polymer*. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.) **30** (2018) Nr. 22, S. e1707100.

- [62] ONBAŞLI, M. C.; TANDIA, A.; MAURO, J. C.: *Mechanical and Compositional Design of High-Strength Corning Gorilla® Glass*. In: Andreoni, W.; Yip, S. (Hrsg.): *Handbook of Materials Modeling: Applications: Current and Emerging Materials*. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 1997–2019.
- [63] SCHOTT: *Technical Glasses: Physical and Technical Properties*. 2014.
- [64] SUDRIE, L.; COUAIRON, A.; FRANCO, M.; LAMOUROUX, B.; PRADE, B.; TZORTZAKIS, S.; MYSYROWICZ, A.: *Femtosecond laser-induced damage and filamentary propagation in fused silica*. *Physical review letters* **89** (2002) Nr. 18, S. 186601.
- [65] GREHN, M.; SEUTHE, T.; TSAI, W.-J.; HÖFNER, M.; ACHTSTEIN, A. W.; MERMILLOD-BLONDIN, A.; EBERSTEIN, M.; EICHLER, H. J.; BONSE, J.: *Nonlinear absorption and refraction of binary and ternary alkaline and alkaline earth silicate glasses*. *Optical Materials Express* **3** (2013) Nr. 12, S. 2132.
- [66] KANAL, F.; KAHMANN, M.; TAN, C.; DIEKAMP, H.; JANSEN, F.; SCHELLE, R.; BUDNICKI, A.; SUTTER, D.: *TruMicro Series 2000 sub-400 fs class industrial fiber lasers: Adjustment of laser parameters to process requirements*. In: Robin, C. A.; Hartl, I. (Hrsg.): *Fiber Lasers XIV: Technology and Systems*. SPIE, 2017, S. 444–452.
- [67] CVECEK, K.; MIYAMOTO, I.; SCHMIDT, M.: *Gas bubble formation in fused silica generated by ultra-short laser pulses*. *Opt. Express* **22** (2014) Nr. 13, S. 15877–15893.
- [68] RICHTER, S.; DÖRING, S.; BURMEISTER, F.; ZIMMERMANN, F.; TÜNNERMANN, A.; NOLTE, S.: *Formation of periodic disruptions induced by heat accumulation of femtosecond laser pulses*. *Opt. Express* **21** (2013) Nr. 13, S. 15452–15463.
- [69] KISSI, E. O.; BELLOUARD, Y.: *Self-organized nanostructures forming under high-repetition rate femtosecond laser bulk-heating of fused silica*. *Opt. Express* **26** (2018) Nr. 11, S. 14024.
- [70] GHALEH, K. J.; MANSOUR, N.; ASHKENASI, D.; HOFFMANN, H.-J.: *Nonlinear optical response in alkali-silicate glasses at 800 nm femtosecond irradiations*. *Optics Communications* **246** (2005) Nr. 1-3, S. 213–218.
- [71] GUERTLER, Y.; KAHMANN, M.; HAVRILLA, D.: *Beam shaping as an enabler for new applications*. SPIE, 2017, S. 1009706 (SPIE Proceedings).
- [72] ZHANG, G.; STOIAN, R.; ZHAO, W.; CHENG, G.: *Femtosecond laser Bessel beam welding of transparent to non-transparent materials with large focal-position tolerant zone*. *Opt. Express* **26** (2018) Nr. 2, S. 917–926.
- [73] HECKER, S.; BLOTHE, M.; GRAF, T.: *Reproducible process regimes during*

- glass welding by bursts of subpicosecond laser pulses*. Appl. Optics **59** (2020) Nr. 36, S. 11382–11388.
- [74] SCHWARZ, S.; ROTH, G.-L.; RUNG, S.; ESEN, C.; HELLMANN, R.: *Fabrication and evaluation of negative axicons for ultrashort pulsed laser applications*. Opt. Express **28** (2020) Nr. 18, S. 26207–26217.
- [75] HECKER, S.; WEBER, R.; GRAF, T.: *Position sensing of ultrashort pulsed laser-welded seams in glass by optical coherence tomography*. J. Laser Applications **32** (2020) Nr. 2, S. 022003.
- [76] MIYAMOTO, I.; CVECEK, K.; OKAMOTO, Y.; SCHMIDT, M.: *Internal modification of glass by ultrashort laser pulse and its application to microwelding*. Appl. Phys. A **114** (2014) Nr. 1, S. 187–208.
- [77] VOGEL, A.; NOACK, J.; HÜTTMAN, G.; PALTAUF, G.: *Mechanisms of femtosecond laser nanosurgery of cells and tissues*. Appl. Phys. B **81** (2005) Nr. 8, S. 1015–1047.
- [78] MCGLOIN, D.; DHOLAKIA, K.: *Bessel beams: Diffraction in a new light*. Contemporary Physics **46** (2005) Nr. 1, S. 15–28.
- [79] DUCASTELLA, M.; ARNOLD, C. B.: *Bessel and annular beams for materials processing*. Laser & Photonics Reviews **6** (2012) Nr. 5, S. 607–621.
- [80] HECKER, S.; SCHARUN, MICHAEL, GRAF, THOMAS: *Process monitoring based on the plasma emission for power-modulated glass welding with bursts of sub-picosecond laser pulses*. Appl. Optics **60** (2021) Nr. 12, S. 3526–3534.
- [81] WAHL, K. J.; CHROMIK, R. R.; LEE, G. Y.: *Quantitative in situ measurement of transfer film thickness by a Newton's rings method*. Wear **264** (2008) Nr. 7-8, S. 731–736.
- [82] HORN, A.: *Investigations on Melting and Welding of Glass by Ultra-short Laser Radiation*. Journal of Laser Micro/Nanoengineering **3** (2008) Nr. 2, S. 114–118.
- [83] GROSSMANN, D.; REININGHAUS, M.; KALUPKA, C.; JENNE, M.; KUMKAR, M.: *In-situ microscopy of front and rear side ablation processes in alkali aluminosilicate glass using ultra short pulsed laser radiation*. Opt. Express **25** (2017) Nr. 23, S. 28478.
- [84] ZIMMERMANN, F.; JENNE, M.; GROSSMANN, D.; GRUBER, A.; KUMKAR, M.: *Advanced welding of transparent materials by ultrashort laser pulses*. In: Neuenschwander, B.; Grigoropoulos, C. P.; Makimura, T.; Račiukaitis, G. (Hrsg.): *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXIII. SPIE, 2018*, S. 22–27.
- [85] FISCHER, B.; ROHRINGER, W.; PANZER, N.; HECKER, S.: *Acoustic Process Control for Laser Material Processing*. Laser Technik Journal **14** (2017) Nr. 5, S. 21–25.

- [86] HECKER, S.; HESSE, T.: *Verfahren und Vorrichtung zur Überwachung eines Schweißprozesses zum Verschweißen von Werkstücken aus Glas*, 2020.
- [87] FERCHER, A. F.; DREXLER, W.; HITZENBERGER, C. K.; LASSER, T.: *Optical coherence tomography - principles and applications*. Reports on Progress in Physics **66** (2003) Nr. 2, S. 239–303.
- [88] DREXLER, W.; FUJIMOTO, J. G.: *State-of-the-art retinal optical coherence tomography*. Progress in retinal and eye research **27** (2008) Nr. 1, S. 45–88.
- [89] FERCHER, A. F.: *Optical coherence tomography*. Journal of biomedical optics **1** (1996) Nr. 2, S. 157–173.
- [90] HUANG, D.; SWANSON, E. A.; LIN, C. P.; SCHUMAN, J. S.; STINSON, W. G.; CHANG, W.; HEE, M. R.; FLOTTE, T.; GREGORY, K.; PULIAFITO, C. A.: *Optical coherence tomography*. Science (New York, N.Y.) **254** (1991) Nr. 5035, S. 1178–1181.
- [91] KIM, K.; KIM, P.; LEE, J.; KIM, S.; PARK, S.; CHOI, S. H.; HWANG, J.; LEE, J. H.; LEE, H.; WIJESINGHE, R. E.; JEON, M.; KIM, J.: *Non-Destructive Identification of Weld-Boundary and Porosity Formation During Laser Transmission Welding by Using Optical Coherence Tomography*. IEEE Access **6** (2018), S. 76768–76775.
- [92] KIM, S.-W.; KIM, G.-H.: *Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry*. Appl. Optics **38** (1999) Nr. 28, S. 5968.
- [93] SCHMITT, R.; MALLMANN, G.; DEVRIENT, M.; SCHMIDT, M.: *3D Polymer Weld Seam Characterization Based on Optical Coherence Tomography for Laser Transmission Welding Applications*. Physics Procedia **56** (2014), S. 1305–1314.
- [94] DUPRIEZ, N. D.; TRUCKENBRODT, C.: *OCT for Efficient High Quality Laser Welding*. Laser Technik Journal **13** (2016) Nr. 3, S. 37–41.
- [95] MIYAMOTO, I.; CVECEK, K.; OKAMOTO, Y.; SCHMIDT, M.: *Internal modification of glass by ultrashort laser pulse and its application to microwelding*. Appl. Phys. A **114** (2014) Nr. 1, S. 187–208.
- [96] RICHTER, S.: *Statistisches und maschinelles Lernen: Gängige Verfahren im Überblick*. 2019 (Lehrbuch).
- [97] ZEBARI, R.; ABDULAZEEZ, A.; ZEEBAREE, D.; ZEBARI, D.; SAEED, J.: *A Comprehensive Review of Dimensionality Reduction Techniques for Feature Selection and Feature Extraction*. Journal of Applied Science and Technology Trends **1** (2020) Nr. 2, S. 56–70.
- [98] ZHENG, A.; CASARI, A.: *Feature engineering for machine learning: Principles and techniques for data scientists*, first edition Aufl. Beijing and Boston and

- Farnham and Sebastopol and Tokyo: O'Reilly, 2018.
- [99] SOKOLOVA, M.; LAPALME, G.: *A systematic analysis of performance measures for classification tasks*. Information Processing & Management **45** (2009) Nr. 4, S. 427–437.
- [100] FAWCETT, T.: *An introduction to ROC analysis*. Pattern Recognition Letters **27** (2006) Nr. 8, S. 861–874.
- [101] MAYR, A.; LUTZ, B.; WEIGELT, M.; GLABEL, T.; KIBKALT, D.; MASUCH, M.; RIEDEL, A.; FRANKE, J.: *Evaluation of Machine Learning for Quality Monitoring of Laser Welding Using the Example of the Contacting of Hairpin Windings*. In: 2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE, 2018, S. 1–7.
- [102] BUTTERWORTH, S.: *On the Theory of Filter Amplifiers*. Experimental Wireless and the Wireless Engineer **7** (1930), S. 536–541.
- [103] DIETZ, T.: *Multipass-Scheibenlaserverstärker für ultrakurze Laserimpulse mit flexiblen Parametern zur Materialbearbeitung*. Konstanz, 2020. Universität Konstanz, Dissertation.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit basiert auf Arbeiten aus meiner Tätigkeit als Doktorand der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit der Firma TRUMPF Laser GmbH und dem Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart. Hiermit möchte ich all jenen danken, die mir diese Arbeit ermöglicht und zum Gelingen beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt meinem Erstgutachter Herrn Prof. Dr. phil. nat. Graf für das Ermöglichen und die Betreuung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Herkommer danke ich für Übernahme des Mitberichts und das Interesse an meiner Arbeit.

Ich möchte mich außerdem bei den Mitarbeitern der Firma TRUMPF bedanken, im Besonderen bei Herrn Dr. Hesse, der diese Arbeit unternehmensseitig ermöglicht und mich während meiner Zeit als Doktorand unterstützt hat. Des Weiteren danke ich Herrn Dr. Fehrenbacher und der Gruppe Applikation Mikro für die Unterstützung, die tolle Zeit und die gute Stimmung im Arbeitsalltag. Besonders danken möchte ich an dieser Stelle Herrn Großmann für sein offenes Ohr und die vielen wertvollen Diskussionen. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dr. Scharun für seine Unterstützung und Hilfsbereitschaft: Danke für die hilfreichen fachlichen Diskussionen, die kritische Durchsicht des ersten Entwurfs dieser Arbeit und die vielen konstruktiven Anregungen.

Außerdem möchte ich mich bei den Studenten bedanken, die mich im Rahmen einer studentischen Arbeit oder eines Praktikums unterstützt haben.

Herrn Jacobi danke ich für seine Hingabe und die Zeit, die er die Begutachtung des ersten Entwurfs investiert hat sowie für die vielen hilfreichen Diskussionen und Anregungen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern: Danke für den stetigen Rückhalt, die Förderung und die Unterstützung auf meinem bisherigen Lebensweg.

Abschließend möchte ich meiner Frau Nina von ganzem Herzen danken. Vor allem in schwierigen Zeiten hast du mir den Rückhalt gegeben, den ich gebraucht habe. Danke, dass du immer für mich da bist!

Diese Arbeit ist meinen Kindern Dominik und Emily gewidmet.

Salem, im Oktober 2021

Sebastian Hecker

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorriz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO₂-Laser
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünwald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebsch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen
1997, 142 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Plaß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Mo-lybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspansung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramik
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas
beim Abtragen und Schweißen
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlaser für den Karoseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtrags von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinz, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und
-führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer
Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-
ramischen Werkstoffen mittels repetierender
Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von
Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen
zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sys-
temkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumi-
numguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim
Laserstrahlschweißen durch Simulation und
Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-
sion mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von
Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variab-lem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontakterierung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breitting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

Christian Stolzenburg

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

Svent-Simon Beyertt

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

Andreas Josef Birnesser

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

Christoph Neugebauer

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

Andreas Dauner

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

Axel Heß

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

Christian Gehrke

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

Tilman Froschmeier-Hanns

Festigkeitsverhalten laserstrahlgeschweißter belastungsangepasster Stahlwerkstoffverbindungen
2014, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-4347-9

Moritz Vogel

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

Andreas Michalowski

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

Georg Stöppler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

Patrick Mucha

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

Claus-Dieter Reiniger

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

Andreas Leitz

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

Peter Stritt

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrissen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

Katrin Sarah Wentsch

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

Jan-Philipp Negel

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

Christian Freitag

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Andreas Popp

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4643-2

Karin Heller

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8

Stefan Piehler

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern
2017, 148 Seiten, ISBN 978-3-8316-4690-6

Felix Abt

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen
2017, 232 Seiten, ISBN 978-3-8316-4691-3

Volker Rominger

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brillanz
2017, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-4692-0

Thomas Rataj

Hochleistungstaugliche faserintegrierte Strahlweichen
2018, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4733-0

Michael Diez

Pulsformung zur schädigungsarmen Laserbearbeitung von Silizium
2018, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4737-8

Andreas Heider

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5

Marcel Schäfer

Energetische Beeinflussung von Schmelzeffluss und Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl
2018, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-4742-2

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2019 erschienen im utzverlag, München

Tom Dietrich

Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern
2019, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4785-9

Martin Rumpel

Applications of Grating Waveguide Structures in Solid-State Lasers
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4801-6

Michael Eckerle

Generation and amplification of ultrashort pulsed high-power cylindrical vector beams
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4804-7

Martin Stubenvoll

Messung und Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontdeformationen in optischen Elementen
2019, 118 Seiten, ISBN 978-3-8316-4819-1

Christian Hagenlocher

Die Kornstruktur und der Heißrisswiderstand von Laserstrahlschweißnähten in Aluminiumlegierungen
2020, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4864-1

Florian Fetzner

Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahl-tiefschweißen mittels reduzierter Modelle.
2020, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-4874-0

Michael Jarwitz

Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften.
2020, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4882-5

Christian Röhner

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern
2020, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4888-7

Martin Sommer

Laserstrahlschweißen der Aluminiumlegierung
AlMgSi mittels Strahloszillation
2021, 110 Seiten, ISBN 978-3-8316-4898-6

Birgit Weichelt

Experimental Investigations on Power Scaling of
High-Brightness cw Ytterbium-Doped Thin-Disk
Lasers.
2021, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4914-3

Sebastian Faas

Oberflächenfunktionalisierung von Stahl mit UKP-
Lasern mit mehreren Hundert Watt mittlerer La-
serleistung.
2021, 95 Seiten, ISBN 978-3-8316-4935-8

Daniel Weller

Erhöhung der Prozesssicherheit beim Remote-
Laserstrahlfügen von Aluminiumwerkstoffen.
2021, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4940-2

Sebastian Hecker

Verfahren zur Inline-Prozessüberwachung für
das Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslasern
2022, 132 Seiten, ISBN 978-3-8316-4955-6

