





Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

A. J. Birnesser  
Prozessregelung beim  
Laserstrahlschweißen

# **Laser in der Materialbearbeitung**

## **Forschungsberichte des IFSW**

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. 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.



Andreas Josef Birnesser

# **Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen**



Herbert Utz Verlag · München

## **Laser in der Materialbearbeitung**

Band 68

Zugl.: Diss., Stuttgart, Univ., 2011

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2011

ISBN 978-3-8316-4133-8

Printed in EC  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Verzeichnis der Symbole</b>	<b>7</b>
<b>Kurzfassung der Arbeit</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>17</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit . . . . .	17
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	18
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>21</b>
2.1 Grundlagen des Laserstrahlschweißprozesses . . . . .	21
2.1.1 Verfahrensprinzip . . . . .	22
2.1.2 Wärmeleitungsschweißen . . . . .	23
2.1.3 Tiefschweißen . . . . .	23
2.2 Prozessüberwachung beim Laserschweißen . . . . .	24
2.2.1 Anordnung der Sensoren . . . . .	25
2.2.2 Überwachung der reflektierten Laserstrahlung . . . . .	28
2.2.3 Überwachung der Prozesssekundärstrahlung . . . . .	29
2.2.4 Überwachung von akustischen Emissionen . . . . .	33
2.2.5 Bildgebende Verfahren . . . . .	34
2.2.6 Multi-Detektor-Systeme und weitere Verfahren . . . . .	36
2.3 Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen . . . . .	38
2.3.1 Regelung der Fokuslage . . . . .	38
2.3.2 Regelung einer Durchschweißung . . . . .	40
2.3.3 Regelung der Einschweißtiefe . . . . .	41
2.4 Zusammenfassung . . . . .	42

<b>3</b>	<b>Systemtechnik und Auswertemethodik</b>	<b>45</b>
3.1	Strahlquelle . . . . .	45
3.2	Methoden zur Prozessdiagnostik . . . . .	46
3.2.1	Spektroskopie . . . . .	46
3.2.2	Highspeedaufnahmen . . . . .	47
3.2.3	Infrarotthermographie . . . . .	48
3.3	Aufbau eines Sensorsystems zur Regelung . . . . .	48
3.3.1	Anforderungen an serientaugliche Prozesssicherungssysteme . . . . .	49
3.3.2	Mechanischer und optischer Aufbau . . . . .	50
3.3.3	Elektrischer Aufbau . . . . .	52
3.4	Schliffpräparation . . . . .	53
3.5	Probekörper . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Signale gesteuerter Laserschweißungen</b>	<b>57</b>
4.1	Spektrale Eigenschaften des Sensoraufbaus . . . . .	57
4.1.1	Wellenlängenbereiche des Laserschweißprozesses . . . . .	57
4.1.2	Vergleich wellenlängenspezifischer und integraler Messungen . . . . .	59
4.2	Untersuchungen zur Faserkopplung . . . . .	60
4.2.1	Untersuchte Beobachtungsfasern . . . . .	60
4.2.2	Auswahl applikationsangepasster Beobachtungsfasern . . . . .	61
4.2.3	Positioniergenauigkeit der Faserkopplung . . . . .	66
4.2.4	Strahlungsprofile des Schweißprozesses . . . . .	68
4.2.5	Fokuslage der Faserkopplung bei defokussierter Optik . . . . .	69
4.3	Korrelation von Signalen zu Nahtkenngrößen . . . . .	70
4.3.1	Betrachtete Nahtkenngrößen . . . . .	71
4.3.2	Korrelation durch Variation der Laserleistung . . . . .	71
4.3.3	Einfluss von Schutzgas auf die Korrelation . . . . .	73
4.4	Mikrokorrelation der Einschweißtiefe . . . . .	74
4.5	Prozessphasen . . . . .	76
4.5.1	Prozessphasen für Schweißungen mit Stickstoff . . . . .	77
4.5.2	Prozessphasen für Schweißungen ohne Schutzgas . . . . .	79
4.6	Zusammenfassung . . . . .	80

<b>5</b>	<b>Geregeltes Laserstrahlschweißen</b>	<b>83</b>
5.1	Aufbau der Regelung . . . . .	84
5.1.1	Digitale Signalverarbeitung zur Regelung des Prozesses . . .	85
5.1.2	Einflüsse durch die digitale Filterung und Regelung . . . .	86
5.1.3	Reaktionszeiten des Lasers . . . . .	87
5.2	Einführung von vergleichenden Kenngrößen . . . . .	89
5.3	Funktionsweise geregelter Schweißprozesse . . . . .	91
5.4	Reduzierung der Einschweißtiefschwankung . . . . .	92
5.4.1	Nachweis für ein Einschweißtiefniveau . . . . .	93
5.4.2	Untersuchungen für den Tiefschweißbereich . . . . .	95
5.4.3	Untersuchung wärmeleitungsdominierter Schweißungen . . .	97
5.5	Regelung bei Störungen der Laserleistung . . . . .	99
5.5.1	Schwankungen der Laserleistung . . . . .	100
5.5.2	Verschmutzung des Schutzglases . . . . .	101
5.6	Variation der Fokusbildung der Bearbeitungsoptik . . . . .	104
5.7	Variation der Vorschubgeschwindigkeit . . . . .	107
5.8	Einfluss von Schutzgasen auf die Regelung . . . . .	110
5.8.1	Prozessbedingte Einschweißtiefschwankungen . . . . .	110
5.8.2	Variation der Fokusbildung der Bearbeitungsoptik . . . . .	112
5.8.3	Geregeltes Schweißen im Übergangsbereich . . . . .	114
5.9	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	116
5.10	Zusammenfassung . . . . .	118
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>121</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>125</b>
A.1	Technische Zeichnungen der Probekörper . . . . .	125
A.2	Korrelationsuntersuchungen für Argon und Helium . . . . .	126
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>



# Verzeichnis der Symbole

## Formelzeichen – Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung
$A_f$	$m^2$	Fläche des Laserfokus
$A_{ges}$		Einkoppelgrad
$\overline{A}$		mittlerer Einkoppelgrad
$A_N$		Aspektverhältnis der Schweißnaht
$b$	$m$	Nahtbreite
$d$	$m$	Öffnungsdurchmesser
$d_f$	$m$	Fokusbereich
$h(t)$	$W/m^2$	Funktion zur Beschreibung des Schweißprozesses
$H$		Tiefenkoeffizient
$I_0$	$W/m^2$	Leistungsdichte im Fokus
$I_{max}$	$W/m^2$	maximale Intensität
$I_{min}$	$W/m^2$	minimale Intensität
$P_L$	$W$	Laserleistung
$Q_{.25}$	$m$	0,25-Quantil
$Q_{.75}$	$m$	0,75-Quantil
$R_{ges}$		Reflexionsgrad
$S$	$V$	Sollwertspannung
$s$	$m$	Nahttiefe
$t$	$s$	Zeit
$u_1(t)$	$m$	Position der Bearbeitungsoptik zum Zeitpunkt $t$
$\hat{u}_1$	$m$	Amplitude der Bearbeitungsoptik
$u_2(t)$	$W/m^2$	Intensität der Photodiode zum Zeitpunkt $t$
$\hat{u}_2$	$W/m^2$	Amplitude des Photodiodensignals
$v$	$m/s$	Vorschubgeschwindigkeit

## Formelzeichen – Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\alpha$		Koeffizient der digitalen Filterung
$\beta$		Koeffizient der digitalen Filterung
$\Delta$	$m$	Spannweite der Einschweißtiefe
$\mu$	$m$	Mittelwert der Einschweißtiefe
$\omega$	$Hz$	Kreisfrequenz
$\phi$	$rad$	Phasenverschiebung
$\pi$		Kreiszahl
$\sigma$	$m$	Standardabweichung der Einschweißtiefe



## Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AC	alternating current
b.E.	beliebige Einheiten
bzw.	beziehungsweise
CCD	charge-coupled device
CMT	Cadmium Mercury Telluride
CNN	cellular neural network
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
cw	continuous wave
DC	direct current
DSP	digitaler Signalprozessor
ET	Einschweißtiefe
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FL	Nahtfläche
IIR	infinite impulse response
i.O.	in Ordnung
I/O	Input/Output
InGaAs	Indiumgalliumarsenid
InSb	Indiumantimonid
IR	Infrarot
Nd:YAG	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat
n.i.O.	nicht in Ordnung
P	Proportional
PI	Proportional-Integral
PID	Proportional-Integral-Differential
rel.	relativ
STFT	Short-Time-Fourier-Transformation
TS	Tiefschweißen
ÜB	Übergangsbereich
UV	Ultraviolett
vgl.	vergleiche
VIS	sichtbares Spektrum des Lichts
WS	Wärmeleitungsschweißen
Yb:YAG	Ytterbium:Yttrium-Aluminium-Granat



# Kurzfassung der Arbeit

Die Vorzüge des Laserstrahlschweißens führten nach der Entwicklung von Lasergeräten schnell zu einer industriellen Durchdringung dieses Fertigungsverfahrens. Den Instabilitäten des Prozesses wurde in der Vergangenheit mit der Konzeption zahlreicher Überwachungssysteme begegnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird durch die Entwicklung eines geregelten Schweißprozesses der konsequente Schritt zu einer weiteren Steigerung der Qualität und Reduzierung der Ausschussquote vollzogen.

Ein vertieftes Verständnis des gesteuerten Schweißprozesses wird zunächst durch eine detaillierte Charakterisierung des Regelsystems geschaffen. Dabei ermöglichen diese grundlegenden Untersuchungen die eindeutige Identifizierung des Keyholes als das Emissionszentrum der infraroten Prozessstrahlung. Eine Korrelation dieser Strahlungsanteile mit Nahtkenngrößen – im Speziellen der Einschweißtiefe – lässt sich sowohl auf makroskopischer als auch auf mikroskopischer Ebene ableiten. Die Phasen des Laserstrahlschweißens – Wärmeleitungsschweißen, Übergangsbereich, Tiefschweißen und Durchschweißen – sind in der Korrelationsbeziehung erkennbar.

Basierend auf dieser Korrelationsbeziehung wird ein Regelungssystem entwickelt, welches prozessspezifische Instabilitäten durch gezielte Eingriffe in den Laserschweißprozess reduziert. Ein Rückgang der Standardabweichung der Einschweißtiefe um bis zu 75,3 % wird erreicht. Auch externe Störgrößen werden untersucht wie beispielsweise Abweichungen der Laserleistung, Verschmutzungen des Schutzgases, Variationen der Fokusposition und verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten. Dabei erfolgt die qualitative und quantitative Bewertung des Verbesserungspotentials des Regelkreises sowohl für Laserschweißungen mit als auch ohne Schutzgas.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Regelung des Prozesses zu einer Verbesserung des Schweißergebnisses führt. Durch die gezielte Beeinflussung der Laserschweißung, basierend auf Informationen aus der Wechselwirkungszone, lässt sich folglich die Qualität und die Zuverlässigkeit der Verbindung steigern und die Ausschussquote reduzieren. Bezogen auf zukünftige Anwendungen des Laserstrahlschweißens ist eine klare Steigerung der Effizienz dieses Fertigungsverfahrens die Folge.



# Extended Abstract

Nowadays the environment of a high volume production is strongly faced by an advancing cost pressure as well as rising standards concerning the product quality. Therefore increasing requirements on the flexibility of manufacturing processes are demanded in order to face these upcoming changes. Laser welding offers a high potential to fulfill these general conditions because of its process specific properties. The high process velocities, the small and spatially limited heat affected zone and the precise non-contact input of energy can be mentioned as the main advantages of this manufacturing process in comparison to conventional welding processes.

But however the variety of factors influencing the laser welding process and the increasing requirements on the weld seam quality are pushing laser welding processes into narrower process windows. As a result of these conditions the sensitivity on disturbances arises simultaneously. In the past the resulting process instabilities and emerging process faults were encountered with the development of monitoring systems. These systems detected weld defects and rejected the unfinished products from the production. Regarding the creation of value a reduction of reject costs was achieved by this strategy because downstream production processes were not carried out. Both an improvement of the weld quality and a reduction of the scrap rate were not possible. Bringing this monitoring strategy to the next level means developing a closed-loop control for the laser welding process.

This thesis develops a closed-loop control system for the laser welding process. Fundamental investigations of the process signals during laser welding lead to the assembly of a system for process monitoring and process control suitable for high-volume production. The application of this system on open-loop laser weldings results in a deepening of the comprehension of process specific characteristics. Based on a correlation between signals of the welding process and parameters of the welded seam – especially the weld depth – a concept for a closed-loop laser welding process was developed. The performance of the closed-loop control was investigated either for process-related or for external disturbances.

The requirements of the sensor system for monitoring and controlling the laser welding process were defined after basic process specific investigations during open-loop welding. Based on these results the mechanical, optical and electrical setup of the system was realized. The main feature of the sensor system is the coupling of process radiation out of the interaction zone between laser radiation and workpiece into a monitoring fiber. Subsequently the radiation is guided to a sensor unit which can be located far away from the process. Therefore electromagnetic disturbances do not interfere with the sensitive sensor technology. Within this sensor unit the radiation is spectrally filtered, signal technically conditioned and evaluated with a digital signal processor. The loop is closed via a connection to the laser device.

For evaluating the interaction of the sensor system and the laser welding process the central system's characteristics are investigated in open-loop processes. Basically the impact of different system configurations on the signal quality is examined in detail. A closer look on the interaction zone of laser radiation and workpiece identifies the keyhole and the surrounding area as the main emission source of infrared secondary process radiation. Additionally the keyhole deformation and the contribution of the melt pool to the infrared process radiation can be detected in the signals. In conclusion a monitoring fiber displaying the complete keyhole area to the sensor has to be used for an optimum investigation. This requirement assures that the complete information of the actual process condition can be detected. Furthermore an accurate positioning of the fiber coupling unit is required because even small deviations from the optimum position may highly decrease the signal quality.

Further investigations on open-loop laser welding processes show a section-wise linear correlation between sensor signals and the weld depths and the cross-section areas of the welded seams. The defined sections only differ in the gradient of the regression line. Furthermore these sections can be assigned to the phases of the laser welding process – heat conduction welding, transition phase, keyhole welding and full penetration welding – by investigations of the welding process with a high speed camera, a high speed infrared camera, and by analyzing the weld geometry. The above mentioned correlation between sensor signals and weld depth can be detected in a macroscopic and in a microscopic scale. The coefficient of the correlation accounts up to 89,9 %. These results of the welding process can also be verified for laser weldings with the inert process gases nitrogen, argon and helium. It is shown that the transition phase between heat conduction welding and keyhole welding differs for laser weldings with and without process gases.

Closing the loop is the next step in order to fulfill the thesis' main targets. The infrared radiation is used as input variable and the laser power is used as manipulated variable of the closed-loop. Investigations under these conditions are performed for evaluating the enhancement capability of the controlled laser welding process. The results of these welds are compared to the results of open-loop welds. First exemplary laser weldings show the principal functionality of the closed-loop control and the qualitative reduction of weld depth disturbances. Comprehensive follow-up investigations of the heat conduction and the keyhole welding verify the prior results. Improvements in the range between minimum and maximum of weld depth and the spread of weld depth – characterized by standard deviation and interquartile-distance – up to 75,3 % are demonstrated. This reduction of disturbances is directly associated with an increasing stability of the laser welding process.

In addition to process specific disturbances external impacts on the welding process have been investigated. A change in the weld depth induced by a disturbance of the laser power can be completely eliminated by the closed-loop welding process. The controller is able to react on the loss of infrared radiation in real-time so that variations of weld depth induced by the changing laser power cannot be detected in longitudinal sections. However laser power disturbances caused by a contamination of the protective glass of the focusing optics also affect the measured intensity of process radiation. The correlation between signal and weld depth is modified and therefore the change in weld depth cannot be completely eliminated. But it can be improved compared to the open-loop welding process. A variation of the focusing optics position over a distance of  $\pm 1$  mm is also carried out. With appropriate monitoring fibers a constant weld depth or a constant area can be obtained for the closed-loop welding process respectively. In comparison the area and the depth strongly decrease at the limits of the variation for open-loop laser weldings. Regarding different welding speeds the closed-loop process is still able to improve weld quality by reducing standard deviation and range of the weld depth.

Investigations of closed-loop welding with nitrogen are also carried out concentrating on the impact of process specific disturbances. The variation of the focusing optics' position shows similar results to welding without process gases. Special attention is paid to the following effect. During open-loop welding a sudden increase of weld depth was observed while being in the transition phase. It was not possible to realize an open-loop welding with a constant weld depth in between these boundaries. The closed-loop process is able to keep these weld depths very constant.





# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Seit dem Einsatz des ersten Lasers in der modernen industriellen Fertigung hat sich das Laserstrahlschweißen als großserientaugliches Produktionsverfahren etablieren können. Die hohen Prozessgeschwindigkeiten, die geringe, lokal begrenzte Wärmebeeinflussung und die präzise, berührungslose Einbringung der Energie sind dabei besonders hervorzuhebende Vorteile gegenüber konventionellen Schweißverfahren. Auch die flexible Anpassung des Laserschweißprozesses an sich ändernde Rahmenbedingungen ist eine wichtige Eigenschaft im modernen Produktionsumfeld.

Die Vielzahl an Einflussgrößen des Laserschweißprozesses, die enger werdenden Grenzen der Verfahrensparameter und die zunehmende technische Komplexität der Anlagenkonzepte führen jedoch zu erhöhten Anforderungen an die Stabilität der Schweißprozesse. Hinzu kommen stetig steigende Qualitätsstandards aufgrund gesetzlicher Regelungen sowie wachsende Anforderungen von Kundenseite. In einem derartigen Spannungsfeld kann eine ausreichend hohe Fertigungsqualität beim Laserschweißen nur durch eine lückenlose Überwachung des Schweißprozesses und der dabei gefertigten Werkstücke erreicht werden.

Die genannten Rahmenbedingungen führten in der Vergangenheit zu einer verstärkten Entwicklung von Verfahren zur Überwachung des Schweißprozesses. Diese ermöglichen jedoch lediglich eine Klassifizierung in Qualitätscluster, wobei im einfachsten Fall eine Unterteilung in gute und schlechte Schweißungen erfolgt. Bezogen auf die Wertschöpfungskette kann dadurch eine Reduzierung von Ausschusskosten erzielt werden, indem fehlerhafte Bauteile bereits frühzeitig aus der Fertigungskette ausgeschleust werden. Nachgelagerte Produktionsschritte werden nicht ausgeführt, so dass keine weitere Wertschöpfung erfolgt. Eine Verbesserung der Schweißqualität oder eine Reduzierung der Ausschussquote kann dadurch nicht erreicht werden. Überwachungssysteme des Laserschweißprozesses sind folglich nicht in der Lage, die Ausbringung einer Fertigung zu steigern.

Die Vorteile der Prozessüberwachung lassen sich erweitern, indem die gewonnenen Informationen bei der Fehlerentstehung ausgewertet und online rückgeführt werden. Dies wird durch einen geschlossenen Regelkreis erreicht, wobei zur Vermeidung von Totzeiten eine Verarbeitung der Signale in Echtzeit angestrebt werden muss. Dadurch kann ein Prozessfehler bereits in seiner Entstehung vermieden und die Qualität der Schweißverbindung erhöht werden. Ein geschlossener Regelkreis kann demzufolge die Produktivität steigern und die Ausschusskosten weiter reduzieren.

Systeme zur Regelung des Laserschweißprozesses versuchen hauptsächlich, externe Störungen auszugleichen wie beispielsweise eine Abweichung der Fokusslage oder der Laserleistung. Auch bei der Regelung von Durchschweißungen können im wissenschaftlichen Umfeld erfolgversprechende Ansätze aufgezeigt werden. Störungen des Schweißprozesses, welche zu Schwankungen der Einschweißtiefe führen, können dabei nicht oder nur mit unzureichender Genauigkeit vermieden werden. Derartige Schwankungen sind jedoch häufig die Ursache für eine mangelhafte Qualität in einer Großserienfertigung. Der verstärkte Forschungsaufwand auf dem letztgenannten Anwendungsgebiet verdeutlicht die Relevanz für eine industrielle Umsetzung.

Ziel dieser Arbeit ist die Regelung des Laserschweißprozesses. Grundvoraussetzung ist der Aufbau eines Systems, welches Signale aus dem Wechselwirkungsbereich in Echtzeit aufzeichnet und einem Regler zuführt. Basierend auf der Korrelation von Sensorsignalen und Nahtkenngrößen wird ein vertieftes Prozessverständnis geschaffen, wobei die Einschweißtiefe als zentrale Ergebnisgröße genauer untersucht wird. Primäres Ziel ist die Reduzierung von Schwankungen der Einschweißtiefe, welche durch Prozessinstabilitäten hervorgerufen werden. Zusätzlich erfolgt eine Betrachtung externer Störgrößen. Das Verbesserungspotential der Prozessregelung wird durch einen Vergleich gesteuerter und geregelter Schweißungen aufgezeigt.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Aufbauend auf der Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit beschreibt Kapitel 2 die Grundlagen und den aktuellen Stand der Technik. Eingeleitet wird dieses Kapitel mit einer umfassenden Darstellung des Verfahrensprinzips des Laserschweißprozesses. Im Anschluss daran werden Möglichkeiten zur Prozessüberwachung vorgestellt. Die Diskussion verschiedener Ansätze zur Regelung des Schweißprozesses bildet den Anschluss des Kapitels.

Kapitel 3 gibt zunächst einen detaillierten Überblick über die eingesetzte Systemtechnik und die untersuchten Methoden zur Prozessdiagnostik. Aufbauend darauf erfolgt die detaillierte Beschreibung des entwickelten Systems zur Überwachung und Regelung des Laserschweißprozesses. Dabei wird insbesondere auf die genauen Anforderungen an ein großserientaugliches System und die daraus resultierende mechanische, optische und elektrische Auslegung eingegangen. Eine Betrachtung der Methoden zur hochaufgelösten Schliffpräparation bei Längsschliffen und der untersuchten Bauteilgeometrien bildet den Abschluss des Kapitels.

Kapitel 4 stellt eine Verbindung zwischen dem Laserschweißprozess und dem System zur Prozessregelung her, indem Sensorsignale aus dem Wechselwirkungsbereich mit den entsprechenden Nahtkenngrößen verknüpft werden. Mit Hilfe grundlegender Untersuchungen werden Auswirkungen verschiedener Ausgestaltungsmöglichkeiten des Sensorsystems auf die Signalqualität evaluiert. Beispielhaft sei hier der Einsatz verschiedener Beobachtungsfasern und die notwendige Positioniergenauigkeit des Sensorsystems erwähnt. Eine Korrelation von aufgezeichneten Signalen und Nahtkenngrößen führt schließlich zu einem direkten Zusammenhang zwischen Prozess und Sensorik. Dabei wird im Speziellen die Einschweißtiefe untersucht. Darauf folgend werden signalspezifische Merkmale mit den Phasen des Schweißprozesses verbunden, um eine Vertiefung des Prozessverständnisses zu schaffen.

Basierend auf den vorherigen Ergebnissen zur Korrelation von Sensorsignalen und Kenngrößen der Schweißnaht wird in Kapitel 5 eine Regelung des Laserschweißprozesses beschrieben. Nach einer prinzipiellen Beschreibung der Regelung erfolgt der Nachweis, dass eine eindeutige Verbesserung der Schweißqualität im Vergleich zur gesteuerten Prozessführung erreicht werden kann. Die Reduzierung von Einschweißtiefenschwankungen, welche durch prozessbedingte Schwankungen des Schweißprozesses hervorgerufen werden, stellt das primäre Ziel der Regelung dar. Aber auch die Verbesserung der Schweißqualität bei externen Störeinflüssen, wie bei einer Störung der Laserleistung oder bei einer Variation der Vorschubgeschwindigkeit oder der Fokusslage, werden untersucht. Abschließend werden Schweißungen mit Schutzgas geregelt.



## 2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel wird zunächst der Wechselwirkungsprozess von Laserstrahlung und Werkstück grundlegend beschrieben. Dabei erfolgt eine gesonderte Betrachtung der sich beim Schweißen ausbildenden Prozessphasen – Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen. Im Anschluss werden Möglichkeiten zur Überwachung des Schweißprozesses aufgezeigt. Dabei liegt der Schwerpunkt der Darstellung auf der Untersuchung elektromagnetischer Prozessstrahlung, welche während des Schweißvorgangs emittiert und mit entsprechenden Sensoren detektiert wird.

Der konsequente Schritt zu einer weiteren Erhöhung der Prozesssicherheit beim Laserstrahlschweißen stellt die Rückführung der gewonnenen Informationen in einem geschlossenen Regelkreis dar. Eine Beschreibung von Verfahren zur Regelung des Laserschweißprozesses bildet den Abschluss des Kapitels. Besonders berücksichtigt werden die Regelung der Einschweißtiefe, die Regelung von Durchschweißungen und die Regelung der Fokuslage der Bearbeitungsoptik.

### 2.1 Grundlagen des Laserstrahlschweißprozesses

In der Gruppe der Fertigungsverfahren wird das Laserstrahlschweißen von Metallen dem Fügen durch Schweißen [1, 2, 3] zugeordnet. Dabei ist das Schweißen von Metallen normgemäß definiert als der Vorgang, der Metall(e) unter Aufwand von Wärme und/oder Druck derart verbindet, dass sich ein kontinuierlicher innerer Aufbau des verbundenen Metalles bzw. der verbundenen Metalle ergibt.

Eine weitere Unterteilung der Schweißverfahren nach dem physikalischen Ablauf des Schweißens in Press- und Schmelzschweißen kann getroffen werden, wobei das Laserstrahlschweißen dem Schmelzschweißen zugeordnet werden kann. Kennzeichnend für das Laserstrahlschweißen ist, dass als Energieträger ein kohärenter, fokussierter Strahl monochromatischen Lichtes benutzt wird [4].

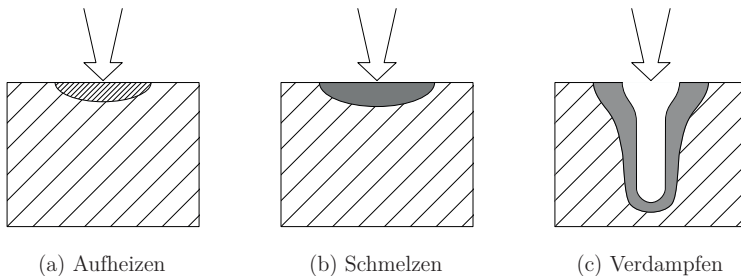
### 2.1.1 Verfahrensprinzip

Beim Laserstrahlschweißen wird die Strahlung mit Hilfe optischer Elemente auf die Oberfläche des Werkstücks fokussiert. Die mittlere Leistungsdichte  $I_0$  im Fokuspunkt des Laserstrahls berechnet sich dabei als Quotient der zur Verfügung gestellten Laserleistung  $P_L$  und der Fläche des Laserfokus  $A_f$ :

$$I_0 = \frac{P_L}{A_f} . \quad (2.1)$$

In einem Wechselwirkungsprozess der Laserstrahlung und des Schweißgutes wird Energie in das zu bearbeitende Bauteil eingebracht. Die Strahlung teilt sich in transmittierte, absorbierte und reflektierte Anteile auf, wobei die Transmission bei metallischen Werkstoffen aufgrund der geringen optischen Eindringtiefe der Laserstrahlung im Allgemeinen vernachlässigt werden kann.

Die Absorption der Laserstrahlung an der Oberfläche des Bauteils führt bei geringen Leistungsdichten zu einer Erwärmung des Bauteils. Bei einem weiteren Ansteigen wird die Schmelztemperatur des Grundmaterials erreicht und das Bauteil schmilzt lokal auf. Die absorbierte Energie der Laserstrahlung wird in Form von Wärme in das Innere des Werkstücks geleitet. Diese Phase des Laserschweißprozesses wird daher auch als Wärmeleitungsschweißen bezeichnet. Wird bei einer fortgesetzten Steigerung der Leistungsdichte die Verdampfungstemperatur erreicht, so bildet sich eine Dampfkapillare im Werkstück aus. Diese Phase des Laserschweißprozesses wird als Tiefschweißen bezeichnet. Im den beiden folgenden Kapiteln werden das Wärmeleitungsschweißen und das Tiefschweißen ausführlicher beschrieben. Bild 2.1 zeigt das Aufheizen, das Aufschmelzen und das Verdampfen des Bauteils schematisch.



**Bild 2.1:** Wechselwirkungsprozesse von Laserstrahlung und Werkstück nach [5].

### 2.1.2 Wärmeleitungsschweißen

Bei Leistungsdichten in einer Größenordnung von  $10^5 \text{ W/cm}^2$  wird das Werkstück an der Oberfläche so stark erhitzt, dass lokal begrenzt ein Schmelzprozess einsetzt [5]. Diese Phase des Laserschweißprozesses wird als Wärmeleitungsschweißen bezeichnet, da die vom Werkstück absorbierte Energie nur durch Wärmeleitung ins Bauteilinnere gelangen kann. Das wichtigste Kennzeichen dieser Prozessphase ist, dass lediglich ein Wechselwirkungsprozess zwischen Laserstrahl und Werkstück stattfindet. Folglich ergibt sich ein sehr geringer Prozesswirkungsgrad, da ein großer Anteil der Strahlung in den Raum reflektiert und somit nicht absorbiert wird.

Eine Schweißnaht im Bereich des Wärmeleitungsschweißens ist typischerweise durch eine linsenförmige Nahtgeometrie und ein geringes Aspektverhältnis geprägt. Das Aspektverhältnis  $A_N$  ist definiert als Quotient aus Nahttiefe  $s$  und Nahtbreite  $b$ :

$$A_N = \frac{s}{b} . \quad (2.2)$$

### 2.1.3 Tiefschweißen

Übersteigt die Leistungsdichte an der Oberfläche des Werkstücks eine Größenordnung von einigen  $10^5 \text{ W/cm}^2$  bis zu einigen  $10^6 \text{ W/cm}^2$ , so setzt ein starker Verdampfungsprozess ein. Eine sogenannte Dampfkapillare bildet sich aus, deren Durchmesser ungefähr dem Durchmesser des Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche entspricht [5]. Bedingt durch diese Kapillarbildung kann die Laserstrahlung nun viel tiefer in das Werkstück eindringen, weshalb beim Erreichen dieser Prozessphase häufig vom sogenannten Tiefschweißen gesprochen wird. Charakteristisch für Schweißnähte im Bereich des Tiefschweißens ist ein Aspektverhältnis größer 2.

Beim Eindringen der Laserstrahlung in die Dampfkapillare wird bei jedem Wechselwirkungsprozess ein Teil der Strahlung reflektiert. Diese verbleibt dabei aufgrund der Reflexionsbedingungen zu einem großen Anteil im Bereich des Keyholes und kann in erneuten Wechselwirkungsprozessen Energie an die Kapillarwand abgeben. Durch die Mehrfachreflexionen in der Dampfkapillare kann beim Tiefschweißen ein sehr hoher Gesamtabsorptionsgrad der Laserstrahlung erreicht werden. Lediglich ein geringer Anteil der Laserstrahlung kann die Dampfkapillare und somit den Wechselwirkungsbereich verlassen. Der Prozesswirkungsgrad beim Tiefschweißen ist folglich höher als beim Wärmeleitungsschweißen.

Die Dampfkapillare bildet sich dabei als Folge des abströmenden Metaldampfes aus, welcher die aufgeschmolzene Materie nach unten drückt. Dabei wirken dem Dampfdruck des Metaldampfes die Oberflächenspannung der Schmelze, der hydrostatische und der hydrodynamische Druck entgegen. Die Dampfkapillare ist derart geformt, dass die beschriebenen Kräfte im Gleichgewicht sind.

Die dem zu bearbeitenden Werkstück zugeführte Energie wird durch Wärmeleitung in das Bauteilinnere abgeführt. Um die Dampfkapillare bildet sich demzufolge ein schmelzflüssiger Bereich und eine Wärmeeinflusszone aus. Durch eine Relativbewegung zwischen Laserstrahlung und Werkstück wird stetig neues Material aufgeschmolzen, welches die Dampfkapillare umströmt und anschließend erstarrt.

## 2.2 Prozessüberwachung beim Laserschweißen

Der wachsende Kostendruck in der Großserienfertigung und der erhöhte Anspruch an die Qualität von Schweißverbindungen führen zu der Forderung nach überwachten Prozessen. Die am Markt verfügbaren und im wissenschaftlichen Umfeld diskutierten Konzepte zur Überwachung des Laserschweißprozesses können entsprechend ihrer Reihenfolge im Produktionsprozess in drei Kategorien unterteilt werden:

- **Pre-Process-Verfahren**

Diese Kategorie beinhaltet sämtliche Verfahren, die dem Bearbeitungsprozess vorgelagert sind. Dazu zählen die Überwachung des Werkstücks, seiner Lage und seiner Position.

- **In-Process-Verfahren**

Zu dieser Kategorie werden sämtliche Verfahren zur Überwachung von Prozessemissionen während der Wechselwirkung von Laserstrahl und Werkstück, aber auch zur Überprüfung der Anlagentechnik gezählt.

- **Post-Process-Verfahren**

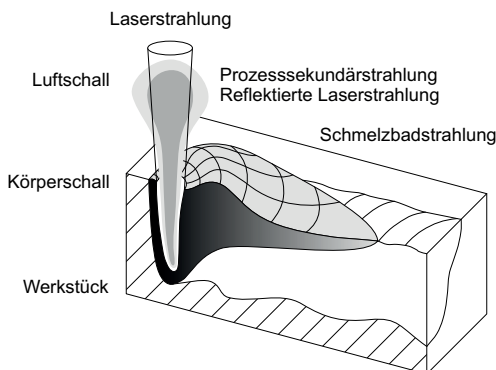
Zur dritten Kategorie werden die Maßnahmen zur Qualitätssicherung nach dem Bearbeitungsprozess zusammengefasst. Sie schließen sich oftmals direkt an den Prozess an, können aber auch in größerem zeitlichen Abstand erfolgen.

Da im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren zur Überwachung und Regelung der Einschweißtiefe konzeptioniert und realisiert werden soll, beschränkt sich die anschließende Betrachtung zum Stand der Technik auf In-Process-Verfahren.



Verfahren der ersten Klasse erlauben ebenfalls regelnde Eingriffe bezüglich Position und Lage des Werkstücks, sind aber nicht in der Lage, hochdynamische Nahtkenngrößen wie die Einschweißtiefe online zu beeinflussen. Post-Process-Verfahren ermöglichen lediglich die Überwachung der schon fertigen Schweißung und sind deshalb für die angestrebte Regelung der Laserschweißung ungeeignet. Zur ersten und dritten Klasse werden beispielsweise die Durchlichtmessung, Triangulations-, Lichtschnitt- und Auflichtreflexionsverfahren gezählt.

In-Process-Verfahren überwachen im Allgemeinen die bei der Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Werkstück entstehenden prozessspezifischen Emissionen. Diese liefern in Echtzeit Informationen über den aktuellen Verlauf des Prozesses und die Qualität der Schweißung. Werden diese Signale einer entsprechenden Auswerteeinheit zugeführt, können Rückschlüsse auf das Schweißergebnis gewonnen werden [6]. Bild 2.2 zeigt die beim Schweißprozess entstehenden Strahlungen, welche durch entsprechende Sensoren detektiert werden können.



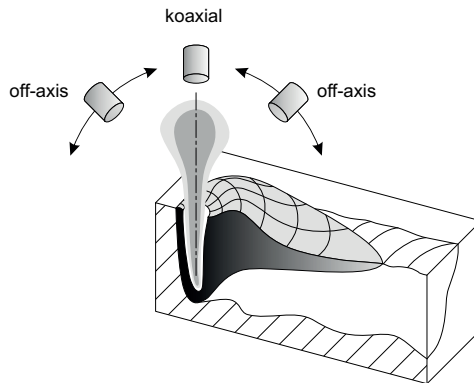
**Bild 2.2:** Prozessemissionen beim Laserstrahlschweißen.

### 2.2.1 Anordnung der Sensoren

Unabhängig von der Art der verwendeten Sensoren ist für eine Überwachung zunächst eine aufgabenangepasste Positionierung zu wählen. Zusammen mit der Art des jeweiligen Detektors entscheidet diese über die Emissionen, die damit analysiert werden können. Bezogen auf die Anordnung der Sensoren kann prinzipiell zwischen einer Ausführung unterhalb und oberhalb des Werkstücks unterschieden werden.

Bei der Anordnung des Sensors unterhalb des Werkstücks kann eine Überwachung mittels Photodiode auf der Bauteilrückseite stattfinden [7, 8]. Zur Integration der Strahlung ist auch die Verwendung einer Ulbricht-Kugel denkbar [9]. Aufgrund der Unzugänglichkeit der Werkstückunterseite scheitern die rückseitigen Messungen bei vielen Bauteilgeometrien [10]. Die Tauglichkeit dieser Verfahren für industrielle Anwendungen wird zusammenfassend als eingeschränkt eingeschätzt [11].

Neben der Positionierung des Sensors unter dem Werkstück kann die Überwachung auch mit Sensoren oberhalb des Bauteils erfolgen. Dabei ist eine Unterscheidung in eine koaxiale und eine off-axis Anordnung möglich. Bild 2.3 verdeutlicht dies.



**Bild 2.3:** Anordnung der Sensoren oberhalb des Werkstücks.

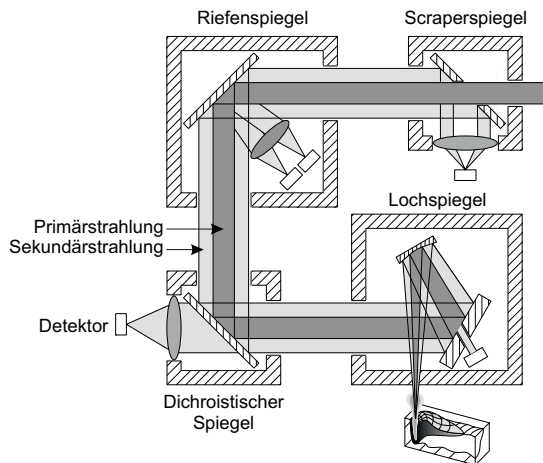
In [12, 13] betrachten die Autoren die Winkelabhängigkeit einer off-axis Anordnung bei  $\text{CO}_2$ -Schweißungen. Dabei zeigt sich, dass die Intensität der Plasmastrahlung durch eine Annäherung an die koaxiale Beobachtungsrichtung steigt. Schweißungen mit gepulstem Nd:YAG-Laser ergeben vergleichbare Ergebnisse [14].

Bei einer off-axis Anordnung wirkt sich die Verschmutzung des Sensors durch Metallstaub oder Schweißspritzer nachteilig aus. Eine gehäufte Wartung, eine zusätzliche Schutzumhausung oder die Integration in die Schutzgaszuführung können diese Einflüsse reduzieren. Technische Umsetzungen werden in [15] vorgestellt.

Bei einer koaxialen Anordnung erfolgt die Beobachtung in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls. Hauptvorteil ist der geringe Justage- und Wartungsaufwand. Nach einer Grundeinstellung des Systems wird von einer Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen wie Fehlausrichtung und Verschmutzung berichtet [16].

Für die technische Umsetzung der koaxialen Anordnung der Sensoren muss zwischen Festkörperlaser und  $\text{CO}_2$ -Laser unterschieden werden. Bei Festkörperlasern kann durch die entsprechenden Strahlführungskonzepte ein Teil der Prozessstrahlung mit Strahlteilern in der Bearbeitungsoptik ausgekoppelt und einem Sensor zugeführt werden. Alternativ kann der Strahlteiler auch in der Strahlquelle zwischen dem Resonator und dem Lichtwellenleiter angeordnet werden [17]. Das Spleißen des Lichtleitkabels ermöglicht des Weiteren die Untersuchung der Strahlung in beide Richtungen [18, 19]. Beide letztgenannten Möglichkeiten schließen Störgeometrien durch Sensoraufbauten an der Bearbeitungsoptik aus.

Beim Schweißen mit  $\text{CO}_2$ -Lasern werden in der Literatur verschiedene Konzepte zur koaxialen Überwachung des Prozesses diskutiert [20]. Bild 2.4 gibt eine Übersicht zu möglichen Anordnungen der Sensoren.



**Bild 2.4:** Koaxiale Detektoranordnungen beim  $\text{CO}_2$ -Laserschweißen nach [20].

Lochspiegel besitzen eine kleine Bohrung mit typischen Durchmessern von 1–2 mm, durch die eine Beobachtung der Prozessstrahlung möglich ist. Dichroistische Spiegel reflektieren bzw. transmittieren durch ihre spezielle Beschichtung einen Teil der Strahlung. Riefenspiegel ermöglichen durch eine Aufbringung kleiner Riefen die Reflexion der Laserstrahlung bei gleichzeitiger Auskoppplung der Sekundärstrahlung auf einen Detektor. Scraperspiegel besitzen eine große Bohrung, durch welche die Laserstrahlung durchtreten kann. Die Sekundärstrahlung wird an den Rändern auf einen Detektor reflektiert.

## 2.2.2 Überwachung der reflektierten Laserstrahlung

Der einfallende Laserstrahl wird beim Tiefschweißen im Keyhole mehrfach reflektiert. Dabei wird jeweils ein Teil der Strahlung von den Kapillarwänden absorbiert. Der Einkoppelgrad  $A_{ges}$  ist nach [21] gegeben durch:

$$A_{ges} = \bar{A} \cdot \frac{1 + \frac{d}{2s} \cdot (1 - \bar{A}) \cdot (1 - \frac{d}{2s})}{\bar{A} \cdot (1 - \frac{d}{2s}) + \frac{d}{2s}} . \quad (2.3)$$

Gleichung (2.3) ergibt sich aus der Beschreibung der Hohlraumabsorption nach Gouffé für eine kegelförmige Kapillare der Tiefe  $s$  und dem Öffnungsdurchmesser  $d$ . Die Absorption durch Einkopplung der Laserstrahlung in das Plasma der Kapillare und der Schweißackel werden nicht berücksichtigt. Theoretische Betrachtungen zeigen, dass für CO<sub>2</sub>-Laser bei Laserleistungen unter 5 kW die Absorption an den Kapillarwänden überwiegt [21]. Für Schweißungen mit Nd:YAG-Lasern ist die Absorption der Laserstrahlung im Plasma komplett zu vernachlässigen [22].

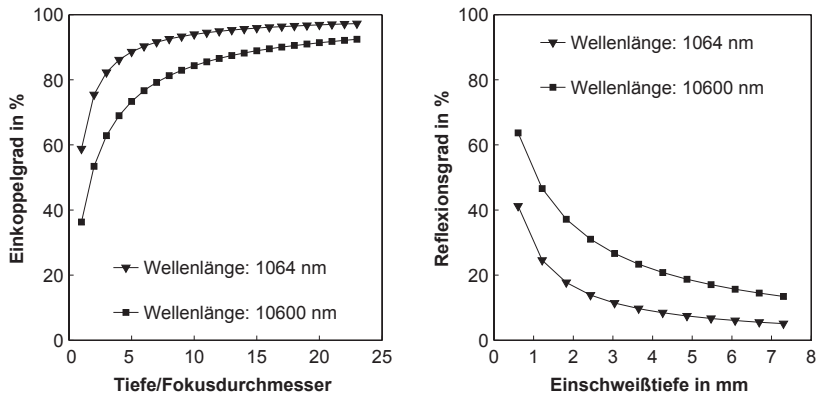
Die Energieerhaltung fordert, dass die Summe aus transmittierter, reflektierter und absorbierter Energie gleich der eingestrahnten Energie sein muss. Bei typischen Anwendungen kann die Transmission für metallische Werkstoffe vernachlässigt werden, da die Eindringtiefe der Laserstrahlung in die Materie gering ist. Für den Reflexionsgrad  $R_{ges}$  folgt somit unter Berücksichtigung der Energieerhaltung:

$$R_{ges} + A_{ges} = 1 \Leftrightarrow R_{ges} = 1 - A_{ges} . \quad (2.4)$$

Durch eine Kombination von Gleichung 2.3 und Gleichung 2.4 kann der Reflexionsgrad in Abhängigkeit des Aspektverhältnisses dargestellt werden. Wird der Durchmesser der Dampfkapillare als konstant angenommen und die Einschweißtiefe durch die Tiefe der Kapillare angenähert, so kann aus der Messung der reflektierten Laserleistung auf die aktuelle Einschweißtiefe geschlossen werden.

Der theoretisch abgeleitete Zusammenhang der reflektierten Laserleistung und der Einschweißtiefe wird in [23, 24] durch experimentelle Untersuchungen bestätigt. Er kann bis zu einer Einschweißtiefe von ca. 3,5 mm beobachtet werden [25]. Ab einem Aspektverhältnis größer 8 wird nahezu die gesamte Laserleistung absorbiert, so dass eine Änderung der Einschweißtiefe im Signalverlauf der reflektierten Strahlung nicht mehr angezeigt wird [26].

Bild 2.5 zeigt den Einkoppelgrad in Abhängigkeit des Aspektverhältnisses und den Reflexionsgrad in Abhängigkeit der Einschweißtiefe bei konstantem Kapillardurchmesser für Nd:YAG-Strahlung und CO<sub>2</sub>-Strahlung.



**Bild 2.5:** Einkoppelgrad in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Tiefe und Durchmesser des Fokus nach [21] und Reflexionsgrad in Abhängigkeit der Einschweißtiefe bei konstantem Kapillardurchmesser nach [23] bei Nd:YAG-Strahlung und CO<sub>2</sub>-Strahlung für Eisen.

### 2.2.3 Überwachung der Prozesssekundärstrahlung

Als Prozesssekundärstrahlung wird die spektrale Strahldichte verstanden, welche während des Schweißprozesses emittiert wird. Diese setzt sich aus der Strahlung des Plasmas, der Strahlung des Metalldampfes und der Wärmestrahlung des Schmelzbades zusammen [27]. Ursprung dieser Strahlung ist die Wechselwirkungszone der Laserstrahlung und des Werkstücks sowie der unmittelbar angrenzende Bereich.

Zur Überwachung der Prozesssekundärstrahlung beim Laserstrahlschweißen werden in vielen Grundlagenuntersuchungen Photodioden eingesetzt. Als optische, integral messende Sensoren beobachten diese entsprechend ihrer spektralen Sensitivität einen fest definierten Wellenlängenbereich aus dem typischerweise beobachteten Gesamtspektrum von ultraviolett bis infrarot. Zusätzlich wird der Spektralbereich der Photodioden in vielen Anwendungen durch den Einsatz optischer Filter eingeschränkt. Die Vorteile photodiodenbasierter integral messender Systeme liegen in der rückwirkungsfreien und berührungslosen Messung mit hoher Dynamik [16].

Die optischen Signale ergeben sich durch Integration der Energiedichte über das beobachtete Volumen [28]. Für eine zylindrische Kapillarform folgert der Autor, dass die optischen Emissionen und die Kapillartiefe linear voneinander abhängen. Voraussetzung ist, dass das Oberflächenplasma im Vergleich zum Kapillarplasma optisch dünn ist. Die Linearität kann für die Signale des Weldwatchers und für den Plasma-Sensor (400 nm bis 800 nm), den Rückreflex-Sensor (1064 nm) und den Temperatur-Sensor (1100 nm bis 1800 nm) des Jurca-Systems nachgewiesen werden [29]. Die Plasmafluktuationen führen zur starken Streuung des Plasma-Sensors.

Die nachfolgende Beschreibung zur Überwachung der Sekundärstrahlung ist in drei Teile gegliedert. Zuerst erfolgt eine Betrachtung der Strahlung des Plasmas bzw. des Metaldampfes. Dieser emittiert hauptsächlich im ultravioletten Spektrum. Im Anschluss wird das infrarote Spektrum betrachtet, welches auf die Dampfkapillare und das Schmelzbad zurückzuführen ist. Zum Abschluss wird aufgezeigt, welche Möglichkeiten sich durch Kombination verschiedener spektraler Bereiche ergeben.

### **Ultraviolettes Strahlungsspektrum**

Das ultraviolette Spektrum des Laserschweißprozesses wird hauptsächlich durch ein sich bildendes Plasma emittiert. Bei der Betrachtung der Plasmastrahlung muss zwischen den elektromagnetischen Emissionen des Oberflächenplasmas und des Kapillarplasmas unterschieden werden. Trotz der engen Kopplung können sie bei der Überwachung des Laserschweißprozesses unterschiedliche Informationen liefern.

Bei der Verwendung zweier off-axis Detektoren bei einer Neigung von  $5^\circ$  und  $75^\circ$  gegen die Bauteiloberfläche wird die getrennte Überwachung von Oberflächen- und Kapillarplasma realisiert [30]. Bei einer Einschweißung sind die detektierten Prozesssignale phasenverschoben, während sie bei einer Durchschweißung in Phase sind. Eine Klassifizierung der Schweißung wird durch eine Summation beider Signale realisiert, da diese sich bei einer Einschweißung gegenseitig auslöschen und bei einer Durchschweißung maximal verstärken. Weitere Untersuchungen der Plasmen zeigen, dass beim Einsatz von Helium oder Argon unter normalen Schweißbedingungen das Oberflächenplasma im Vergleich zum Keyholeplasma optisch dünn ist [31, 32].

Die Plasmastrahlung beim  $\text{CO}_2$ -Laserstrahlschweißen wird in [11] koaxial mit einer Photodiode aufgezeichnet. Nach einer Fouriertransformation der Signale verschiebt sich das Maximum der Amplitude für Durchschweißungen zu höheren Frequenzen. Eine Klassifizierung in die Kategorien Durchschweißung und Einschweißung erfolgt

kontinuierlich durch eine permanente Quotientenbildung der Frequenzbereiche von 100 Hz bis 500 Hz und von 500 Hz bis 10000 Hz. Somit wird eine Unabhängigkeit von der absoluten Signalamplitude erreicht [33]. Eine weitere Anwendung findet die Fourieranalyse von Photodiodensignalen des Metaldampfes beim Schweißen mit Nd:YAG-Laser [34]. Die Autoren leiten eine Korrelation zwischen dem Aspektverhältnis und dem Verhältnis der Signalanteile in den Bereichen von 2 kHz bis 4 kHz und von 23 kHz bis 25 kHz ab. Dieses Vorgehen ermöglicht das Erkennen des Übergangs von Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen [35].

Problematisch bei der Überwachung der Plasmastrahlung ist die hohe Dynamik der Sensorsignale. Durch den Einsatz von Tiefpassfiltern oder gleitenden Mittelwerten kann das Rohsignal geglättet werden, wobei jedoch Informationen über den Zustand des Schweißprozesses verloren gehen. Aufgrund dessen sollte eine Grenzfrequenz von 100 Hz nicht unterschritten werden [36].

### Infrarotes Strahlungsspektrum

Das Abkühlverhalten der Schweißnaht wird in [37] mit zwei Infrarotdetektoren mit den Sensitivitätsbereichen von  $0,75\text{ }\mu\text{m}$  bis  $1,05\text{ }\mu\text{m}$  und von  $0,9\text{ }\mu\text{m}$  bis  $1,9\text{ }\mu\text{m}$  untersucht. Die Temperaturstrahlung wird in verschiedenen Abständen zur Wechselwirkungszone entlang der Schweißnaht gemessen. Anomalien im Temperaturverlauf können dabei unzureichenden Anbindungen und Fehlpositionierungen der Bauteile zugeordnet werden. Zusätzlich lässt sich bei Einschweißungen ein Zusammenhang der Temperaturstrahlung und der Breite der Naht und bei Durchschweißungen ein Zusammenhang der Temperaturstrahlung und der Breite der Nahtwurzel ableiten.

Die Überwachung einer  $5\text{ mm}^2$  großen Fläche des Schmelzbades wird in [38] mit zwei Photodioden im Nachlauf durchgeführt. Die Photodioden sind in unterschiedlichen Winkeln angebracht. Das Schmelzbad emittiert entsprechend seiner Temperatur im Wellenlängenbereich von  $0,87\text{ }\mu\text{m}$  bis  $1,6\text{ }\mu\text{m}$ , so dass IR-Photodioden mit einem Hochpassfilter bei  $850\text{ nm}$  für die Überwachung verwendet werden. Durch Addition und Subtraktion der Signalverläufe lassen sich Schweißfehler erkennen. Dadurch kann sowohl die Spaltbildung als auch die Verkipfung eines Fügepartners beim Laserschweißen von Stumpfstößen detektiert werden.

Strahlungsanteile im infraroten Bereich werden beim  $\text{CO}_2$ -Schweißen von Stahl, Magnesium und Aluminium in [39] zur Überwachung verwendet. Dabei wird ein linearer Zusammenhang von Einschweißtiefe und Signal nachgewiesen, wobei die

notwendige Genauigkeit den überwachten Einschweißtiefenbereich auf kleiner 4 mm beschränkt [40]. Zusätzlich stellen die Autoren fest, dass Durchschweißungen durch einen abrupten Signalabfall des DC-Anteils und eine Erhöhung des AC-Anteils detektierbar sind. Weitere Schweißfehler zeichnen sich durch eine Erhöhung des AC-Anteils im Signalverlauf ab.

### **Kombination verschiedener spektraler Bereiche**

Die getrennte Untersuchung der Signale aus den beiden Spektralbereichen liefert wichtige Informationen über den Verlauf des Schweißprozesses. Bereits frühzeitig wurde eine parallele Betrachtung beider Einzelsignale ohne direkte Verknüpfung realisiert [41]. Der gesamte Informationsgehalt der Sensorsignale kann jedoch nur dann genutzt werden, wenn eine Verknüpfung beider Signale stattfindet.

Die ultraviolette und die infrarote Strahlung werden in [42] ausgewertet. Dabei ermöglicht die unter einem Winkel von  $30^\circ$  bis  $45^\circ$  zur Strahlachse gemessene Plasmastrahlung unter speziellen Bedingungen die Detektion von Veränderungen in der Einschweißtiefe. Die infrarote Strahlung wird zur Überwachung von Spritzern verwendet, wobei jeweils die exakte Position, die Dauer, die maximale Amplitude und die integrierte Fläche unter dem Verlauf des Signals bestimmt werden muss. Mit Hilfe dieser Parameter kann der Schweißprozess überwacht werden.

Beim  $\text{CO}_2$ -Laserschweißen von Überlappnähten im Dachbereich einer Automobilkarosserie wird der Laserstrahlschweißprozess durch den Einsatz zweier Detektoren abgesichert [43]. Eine Photodiode detektiert die Leuchtdichte des Metaldampfes im UV-Bereich (200 nm bis 400 nm), eine weitere Photodiode die Intensität der Infrarotstrahlung (1100 nm bis 1800 nm) im Nachlauf. Vorteilhaft ist, dass durch die Berechnung einer Fehlerwahrscheinlichkeit aus den Signalen nicht fehlerrelevante Fluktuationen eines einzigen Signals ausgeschlossen werden können. Übersteigt die Fehlerwahrscheinlichkeit einen Schwellwert, erfolgt eine n.i.O.-Klassifizierung.

In [44] werden beim gepulsten Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG sowohl Prozesssignale des ultravioletten als auch des infraroten Strahlungsspektrums ausgewertet. Diese liefern wichtige Informationen über die verschiedenen Phasen des gepulsten Laserschweißprozesses (Energieeinkopplung, Aufschmelzung und Verdampfung). Die Autoren stellen zusammenfassend fest, dass eine parallele Aufzeichnung von Sensorsignalen aus dem ultravioletten und dem infraroten Spektralbereich die Zuverlässigkeit einer Prozesssicherung erhöht.



### 2.2.4 Überwachung von akustischen Emissionen

Schallemissionen werden meistens durch Reibung, Rissbildung, Umklappvorgänge oder Veränderungen der inneren Struktur verursacht [45]. Auch externe Quellen wie Gaszuführung oder Umgebungsgeräusche beeinflussen die Messung [46]. Eine grundsätzliche Unterscheidung in Körperschall und Luftschall ist möglich.

Die Messung des Körperschalls erfolgt berührend mit kapazitiven oder piezoelektrischen Sensoren. Diese können die Rissbildung, Martensitbildung und Keyholeausbildung überwachen [46]. Für einen Serieneinsatz sind die nicht ausreichend reproduzierbare Anbindung des Sensors oder notwendige Kopplungsmedien von Nachteil [47]. Für den Luftschall ist eine berührungslose Messung möglich.

Die beim Laserschweißen mit einem Mikrofon detektierten Druckschwankungen korrelieren mit dem beobachteten Plasmaleuchten. Dabei kann einem Peak der Photodiode eine Verdichtungs- und Verdünnungswelle zugeordnet werden, so dass der Massenfluss des ausströmenden Plasmas im Luftschall detektierbar wird [48]. Ein detailliertes Modell zur Schallentstehung beim CO<sub>2</sub>-Schweißen wird in [49] vorgestellt. Dabei zeigt sich ein proportionaler Zusammenhang des Schalldrucks und der zeitlichen Veränderung der Abströmgeschwindigkeit des Metaldampfes.

Die Anwendung einer Short-Time-Fourier-Transformation (STFT) zeigt bei Durchschweißungen eine erhöhte Intensität im Bereich von 1 kHz bis 2 kHz [50]. Durch den Vergleich mit Schwellwerten lassen sich Einschweißungen und Durchschweißungen trennen. Beim CO<sub>2</sub>-Schweißen von Aluminium unterteilt Duley die Frequenzen von 0 kHz bis 10 kHz nach einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) in 10 Blöcke [51]. Der Bereich 3 kHz bis 9 kHz kann der Keyholebildung, der Bereich von 9 kHz bis 10 kHz Oberflächeneffekten zugeordnet werden. Für Gut-Schweißungen wird ein Bereich um 4,5 kHz identifiziert, der bei Schlechtschweißungen nicht auftritt [52]. Beim Schweißen verzinkter Bleche können hohe Intensitäten in höheren Frequenzbereichen auf das Verdampfen des Zinks zurückgeführt werden. Unzulänglichkeiten der STFT und FFT werden in [53] durch die Wavelet-Analyse behoben.

Als Maß für die Schweißqualität wird in [54] die quadratische Abweichung der blockweise akkumulierten Intensitäten von denen einer Referenzschweißung verwendet. Eine Diskriminanzanalyse ermöglicht eine Klassifizierung in überhitzte Schweißung, Einschweißung und Durchschweißung. Ein neuronales Netzwerk kann zur Einteilung in Einschweißung, Durchschweißung und Spalt genutzt werden [55].

Trotz des Einsatzes von Richtmikrophonen ist im Allgemeinen die Analyse des Luftschalls problematisch. Störgeräusche von Absaugeinrichtungen, Cross-Jets oder Achssystemen beeinträchtigen die Zuverlässigkeit durch eine deutliche Reduzierung des Signal-Rauschabstandes erheblich [56]. Zusätzlich wirken sich die geringen Schallgeschwindigkeiten im Vergleich zu optischen Verfahren nachteilig auf die Akzeptanz aus [57]. Des Weiteren ist es noch nicht gelungen, einen Zusammenhang zwischen Schallemissionen und der Einschweißtiefe abzuleiten [58].

### **2.2.5 Bildgebende Verfahren**

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Detektortypen ermöglichen die bildgebenden Verfahren eine orts aufgelöste Messung der Intensitätsverteilung in der Wechselwirkungszone. Dabei ist die Größe des überwachten Bereichs von der Größe des Sensors und vom gewählten Abbildungsverhältnis abhängig. Für die folgende Betrachtung wird zwischen der Überwachung des UV-, VIS-, IR-Spektrums und der Röntgenuntersuchung unterschieden.

Beim Einsatz bildgebender Verfahren ist die Komplexität und die damit verbundene Zeitdauer der Auswertung der Kamerabilder ein begrenzender Faktor. Zusätzlich wirkt sich bei Nd:YAG-Systemen die reduzierte Abbildungsqualität des Schmelzbades durch den vorgelagerten Metaldampf bei koaxialer Beobachtung negativ auf die Akzeptanz derartiger Systeme aus. Aus diesen Gründen konnten sich bildgebende Systeme bei Nd:YAG-Schweißungen nicht in dem Maße durchsetzen wie photodiodenbasierte Systeme zur Prozessstrahlungsdiagnostik [59].

#### **UV-, VIS-, IR-Spektrum**

Für die bildgebende Beobachtung ist eine Unterscheidung in aktive und passive Verfahren möglich. Aktive Verfahren beleuchten die Wechselwirkungszone beispielsweise mit Laserlicht und schränken den spektralen Bereich der Kamera durch Bandpassfilter ein [60]. Diese Verfahren werden vorwiegend für die Betrachtung und Vermessung des Schmelzbades eingesetzt [61, 62]. Passive Verfahren beobachten geometrische Eigenschaften des Plasmas ohne zusätzliche Beleuchtung [12]. Die Schmelzbadgeometrie kann auch hier durch Abschwächen des Plasmaleuchtens mit Hilfe verschiedener Interferenz-, Hochpass-, Polarisations- oder Graufiltern sichtbar gemacht werden [63]. Beide Ausprägungen können Abkühlvorgänge im Schmelzbad des Laserschweißprozesses darstellen.

Morgan et al. vergleichen die über den Imager integrierten Intensitäten einer Highspeedkamera mit dem Verlauf einer integral messenden Photodiode [64]. Für schmale Bänder um die Wellenlängen 514 nm und 900 nm zeigen sie, dass bei gleichen Abtastraten der Informationsgehalt vergleichbar ist. Auf Basis ähnlicher Untersuchungen mit einer Kamera folgert Kratzsch, dass bei ausreichend hohen Bildraten sämtliche mit Photodioden umgesetzte Verfahren übertragbar sind [10].

Die rückreflektierte Laserleistung beim Schweißen mit Nd:YAG-Laser wird in [65] mit Hilfe einer CCD-Kamera durch einen dichroistischen Spiegel koaxial überwacht. Die Auswirkung von Leistungs-, Geschwindigkeits-, Fokuslagenvariationen und der Vorwärmung des Bauteils werden untersucht. Die Auswertung der Kamerabilder erfolgt durch Schnitte durch die Intensitätsverteilung in Schweißrichtung.

Untersuchungen der Sekundärstrahlung mit einer CCD-Kamera zeigen charakteristische Unterschiede von Ein- und Durchschweißungen beim CO<sub>2</sub>-Schweißen. Dabei zeigt sich bei Durchschweißungen ein elliptisches Kamerabild mit einem Intensitätsminimum, verursacht durch das an der Rückseite austretende Plasma [66]. Das Fehlen des Minimums bedeutet aber nicht zwangsläufig eine fehlerhafte Durchschweißung [25]. Des Weiteren können durch die Analyse des Intensitätsbildes Abweichungen von der korrekten Nahtlage, das Auftreten von Spalten bei Stumpfstößen und sich lösende Schweißspritzer detektiert werden [67, 68].

Beersiek et al. beobachten beim CO<sub>2</sub>-Schweißen einen linearen Zusammenhang der Kapillartiefe und des Signals eines koaxialen Photodetektors [28]. Die Übertragung der Korrelation auf jeden Pixel einer koaxial angebrachten CCD-Kamera ermöglicht den Rückschluss auf die Einschweißtiefe, angenähert durch die Kapillargeometrie. Untersuchungen zur Wellenlängenabhängigkeit zeigen, dass der Bereich von 400 nm bis 1050 nm geeignet ist. Wellenlängen um 500 nm und 550 nm sind optimal [69]. Eine Weiterentwicklung erlaubt eine parallele Beobachtung von Schmelzbad und Kapillarplasma, die Detektion von Prozessfehlern und Durchschweißungen und eine kommerzielle Verfügbarkeit beim Schweißen mit Nd:YAG [70, 71, 72]. Eine Kamera, welche ebenfalls schmale Wellenlängenbänder betrachtet, wird zur Detektion von Hohlräumen und Lunkern beim Aluminiumschweißen genutzt [73].

Durch die Einschränkung der Sensitivität einer Kamera auf ein Intervall um 1100 nm erfolgt durch Vergleichsmessungen eine Kalibrierung auf eine Temperatur von 1000 °C bis 1800 °C [74]. Aus den Bildern lassen sich Isothermen extrahieren, wobei das ausströmende Kapillarplasma und der sich ändernde Emissionskoeffizient

zu Asymmetrien in der Abbildung des Schmelzbades führen. In [75] wird eine Infrarotkamera verwendet, um Defekte im Nachlauf zu detektieren. Zur Erhöhung der zeitlichen Auflösung wird die Verwendung eines Zeilendetektors vorgeschlagen.

Eine InGaAs-Kamera (0,9  $\mu\text{m}$  bis 1,7  $\mu\text{m}$ ) und eine InSb-Kamera (3  $\mu\text{m}$  bis 5  $\mu\text{m}$ ) werden in [76] zur Prozessdiagnostik des Keyholes und der Schmelze verwendet. Dabei kann der Einfluss des Metaldampfes vollständig ausgeblendet werden, da er im Sensitivitätsbereich der Imager nur vernachlässigbar emittiert. Die hohen Kosten begrenzen jedoch den industriellen Einsatz derartiger Kameras.

### Röntgenstrahlung

Ein weiteres bildgebendes Verfahren mit Bildraten von bis zu 5 kHz bietet sich durch den Einsatz von Röntgenstrahlung. Mit Hilfe von Tracerpartikeln können die Dynamik der Schmelzbewegungen nachgebildet und die wirkenden Kräfte veranschaulicht werden [77]. In weiteren Untersuchungen wird das Verfahren beim Schweißen mit Doppelfokus eingesetzt [78]. Dabei wird die Bildung von Poren bei Aluminium und die Stabilität unterschiedlicher Fokusabstände beurteilt.

Das beschriebene Vorgehen erlaubt darüber hinaus eine Darstellung der Form und Tiefe des Keyholes während der Schweißung. Zusätzlich liefert es Informationen über die Porenbildung und -vermeidung, zum Beispiel durch die Modulation des Laserstrahls [79, 80]. Dabei wird festgestellt, dass beim  $\text{CO}_2$ -Schweißen und dem Einsatz von Helium als Schutzgas durch die starke Verdampfung am Keyholegrund eine verstärkte Porenbildung auftritt, während sie beim Einsatz von Stickstoff fast vollständig unterdrückt wird [81]. Weitere Untersuchungen zur Keyholeform, zur Porenentstehung und zu Schmelzbadauswürfen werden in [82, 23] beschrieben.

### 2.2.6 Multi-Detektor-Systeme und weitere Verfahren

Eine Überwachung des Spektralbereichs von 300 nm bis 1000 nm, des Luftschalls von 20 Hz bis 20000 Hz und der Ladungen der Plasmafackel wird beim  $\text{CO}_2$ -Schweißen beschrieben [83]. Aus Korrelationsbetrachtungen folgern die Autoren, dass die Einzelsignale verbunden sind, aber nicht identische Informationen tragen. Eine Klassifizierung kann durch eine Diskriminanzanalyse in überhitzte Schweißung, Einschweißung und Durchschweißung vorgenommen werden. Dabei zeigen sich bei der Kombination mehrerer Signale bessere Ergebnisse als bei Einzelsignalen.

Eine weitere, statistische Auswertemöglichkeit mit Elementen der Fuzzy Logik wird in [84] vorgestellt. Die Autoren überwachen die optischen und die akustischen Emissionen des Schweißprozesses, werten diese mit statistischen Verfahren aus und bewerten sie mit Hilfe von Fuzzy Funktionen. Die Kombination der Einzelergebnisse ermöglicht die Ermittlung einer Ergebnisgröße, die eine Klassifizierung der Schweißnaht erlaubt. Ein Vorteil dieses Vorgehens ist die Reduzierung der Trainingsphase, da für die Beurteilung der Schweißnaht lediglich eine Referenzschweißung benötigt wird, die sowohl gute als auch schlechte Nahtabschnitte aufweist. Die Autoren beschreiben das vorgestellte Verfahren aus diesem Grund als referenzfrei [85].

In [28] werden optische Strahlungsintensitäten, die mit einer CCD-Kamera detektiert werden, und akustische Emissionen für die Überwachung des Schweißprozesses verwendet. Die CCD-Kamera alleine kann die Einschweißtiefe bei 1 mm auf  $\pm 12\%$  genau bestimmen. Die alleinige Verwendung des Luftschalls ermöglicht dagegen eine Genauigkeit von  $\pm 25\%$  bei gleicher Einschweißtiefe. Die Kombination beider Verfahren verbessert die Genauigkeit der Einschweißtiefenmessung auf  $\pm 10\%$ .

Ein industrietaugliches Multidetektorsystem wird in [86] vorgestellt. Das System zur Prozesssicherung ermöglicht die gleichzeitige Überwachung der reflektierten Laserstrahlung, der Infrarotstrahlung des Schmelzbades und eine Beobachtung des Wechselwirkungsbereichs mit einer Kameraeinheit. Durch den speziellen Aufbau der Infrarotsensorik wird mit Hilfe einer Negativblende erreicht, dass lediglich Strahlung des Schmelzbades, nicht aber Strahlung aus dem unmittelbaren Keyholebereich detektiert wird. Zur Steigerung der Fertigungstauglichkeit sind alle Komponenten zum Schutz vor Verschmutzung und externer Streustrahlung lichtdicht eingehaust.

Ein Verfahren zur direkten Messung der Kapillartiefe mit Hilfe eines konfokalen Sensors wird in [87, 88] beschrieben. Dabei wird der Fokuspunkt eines Messstrahls zu Schwingungen um die Bauteiloberfläche angeregt. Die reflektierte Messstrahlung wird detektiert und ausgewertet. Durchläuft diese Messgröße ein Maximum, so befindet sich der Fokus des Messstrahls auf der Bauteiloberfläche. Während bei Messungen ohne Laserprozess gute Ergebnisse erzielt werden, zeigen sich während des Prozesses starke Störungen des Signals. Diese werden hauptsächlich auf die unbekannten optischen Eigenschaften des Metaldampfes zurückgeführt [25].

Eine Überwachung im herkömmlichen Sinne beschränkt sich auf die Ergebnisse des Schweißprozesses. Eine Betrachtung zentraler Eingangsgrößen des Prozesses ist nicht vorgesehen. Aus diesem Grund wird in [89] eine zusätzliche Überwachung

der Strahlqualität gefordert. Dazu wird ein Teil der Strahlung mit Strahlteilern ausgekoppelt und dem Messgerät zugeführt. So können Prozessschwankungen, verursacht durch eine Verschlechterung der Strahlqualität, erkannt werden.

## 2.3 Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen

Methoden der Prozessüberwachung ermöglichen eine Aussage über die Qualität der Schweißung und die Stabilität eines Schweißprozesses. Beispielsweise kann für einen Serienprozess eine Klassifizierung in i.O. und n.i.O. erfolgen, so dass Schlechtschweißungen aussortiert oder der Nacharbeit zugeführt werden können. Eine weitere Steigerung der Prozesssicherheit kann durch die Einführung einer Regelstrategie erreicht werden, mit welcher Fehler schon im Entstehungsprozess vermieden werden können. Dazu wird eine Prozessgröße über einen geschlossenen Regelkreis rückgeführt. Die Schweißung wird nach einem Vergleich dieser Größe mit einem vorgegebenen Sollwert durch eine Stellgröße beeinflusst.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Regelverfahren, welche beim Laserstrahlschweißen eingesetzt werden. Dabei werden drei Ausprägungen genauer betrachtet: Die Regelung der Fokusslage, die Regelung einer Durchschweißung und die Regelung der Einschweißtiefe. Gleichzeitig werden die Grenzen der Verfahren aufgezeigt.

### 2.3.1 Regelung der Fokusslage

Abweichungen von der optimalen Fokusslage, charakterisiert durch ein Maximum der Einschweißtiefe, können durch die Verwendung einer Siliziumdiode ausgeregelt werden [90]. Dabei wird die vom Metaldampf emittierte Strahlung durch die Bearbeitungsfaser im Laser detektiert. Die Optik wird zu Schwingungen  $u_1(t)$  mit der Amplitude  $\hat{u}_1$  und der Kreisfrequenz  $\omega$  angeregt. Das Signal der Photodiode  $u_2(t)$  folgt mit einer Phasenverschiebung  $\phi$  und einer Amplitude  $\hat{u}_2$ . Zusätzlich ist eine Funktion  $h(t)$  überlagert, die den Einfluss des Schweißprozesses beschreibt:

$$u_1(t) = \hat{u}_1 \sin(\omega t) \quad (2.5)$$

$$u_2(t) = \hat{u}_2 \sin(\omega t + \phi) + h(t) \quad (2.6)$$

$$u_1(t) \cdot u_2(t) = \frac{1}{2} \hat{u}_1 \hat{u}_2 \cos \phi - \frac{1}{2} \hat{u}_1 \hat{u}_2 \cos(2\omega t) + \hat{u}_1 h(t) \sin(\omega t) . \quad (2.7)$$

Das Produkt beider Oszillationen wird zur Eliminierung der Zeitabhängigkeit mit Hilfe eines Tiefpasses gefiltert. Die resultierende Ergebnisgröße trägt folglich ein negatives Vorzeichen, wenn die Position des Fokus über der Bauteiloberfläche ist und vice versa. Das beschriebene Vorgehen ist somit nicht in der Lage, den exakten Abstand zur optimalen Fokusposition der Bearbeitungsoptik zu ermitteln und einzustellen. Es ermöglicht lediglich eine binäre Aussage darüber, ob sich der Fokuspunkt oberhalb oder unterhalb der Werkstückoberfläche befindet. Ein P-Regler ermöglicht eine Anpassung der Fokusslage des Lasers.

Zur Fokuslagenregelung der Schweißoptik werden in [91] eine UV/VIS-Photodiode ( $0,3\text{ }\mu\text{m}$  bis  $0,7\text{ }\mu\text{m}$ ) und eine IR-Photodiode ( $1,1\text{ }\mu\text{m}$  bis  $1,6\text{ }\mu\text{m}$ ) verwendet. Beide Photodioden sind im Laser nach der Bearbeitungsfaser angeordnet. Bedingt durch den chromatischen Fehler des Linsensystems der Bearbeitungsoptik befindet sich der Fokuspunkt der UV/VIS-Diode oberhalb des Laserfokus und der Fokuspunkt der IR-Diode unterhalb. Entsprechend durchlaufen die beim Laserschweißen ausgezeichneten Intensitäten der Detektoren bei einer Variation des Fokus ihr Maximum an unterschiedlichen Stellen. Durch die Bildung eines Differenzsignals kann die Fokusposition ermittelt werden. Bei geschlossenem Regelkreis lässt sich die Fokusslage der Bearbeitungsoptik über einen Bereich von 2 mm auf  $\pm 0,13\text{ mm}$  genau regeln [92]. In einer Weiterentwicklung des Systems, welche der Steigerung der Fertigungstauglichkeit dient, wird die Prozessstrahlung über einen Strahlteiler und eine Fokussiereinheit in der Bearbeitungsoptik mit einer Glasfaser der Sensorik zugeführt [93, 94]. Die Funktionalität des Gesamtsystems zur Überwachung und Regelung der Fokusslage bleibt auch weiterhin erhalten [95, 96].

Das Verfahren der aktiven Triangulation wird zur Regelung der Fokusslage in [97] verwendet. Dabei wird der Laserschweißprozess mit zwei off-axis angebrachten Photodioden beobachtet. Eine Photodiode ist auf einen Punkt unterhalb und die andere oberhalb der optimalen Fokusposition fokussiert. Die Differenz der Signale während des Schweißprozesses erlaubt einen Rückschluss auf die aktuelle Fokusslage. So lassen sich Fokuslagenänderungen über 8 mm ausregeln.

In [98] wird ein ähnliches Prinzip der aktiven Triangulation zur Bestimmung der optimalen Fokusslage verwendet. Die Autoren ersetzen die zwei zuvor beschriebenen Punktdetektoren durch einen optoelektronischen Sensor. Das beschriebene System kann sowohl beim Nd:YAG-Schweißen als auch beim  $\text{CO}_2$ -Schweißen verwendet werden. Zudem kann es Fokuslagenvariationen über 10 mm ohne Veränderung der Nahtqualität des Laserschweißprozesses ausregeln.

### 2.3.2 Regelung einer Durchschweißung

Eine Regelung der Durchschweißung, basierend auf einer Systemidentifikation, wird in [99] vorgestellt. In einem zweigeteilten Vorgehen wird zunächst die Übertragungsfunktion der Laserquelle und anschließend die des Schweißprozesses bestimmt. Bei der Kombination beider Modelle kann durch einen PI-Regelprozess mit 20 kHz eine Durchschweißung sichergestellt werden. Verifiziert wird dieser Ansatz durch die Variation der Vorschubgeschwindigkeit und durch die Reduzierung der Laserleistung zur Simulation von Verschmutzungen des Schutzglases. Eine Weiterentwicklung ermöglicht, dass stets die maximal mögliche Geschwindigkeit verwendet wird, bei der gerade noch durchgeschweißt wird [100]. Das gleiche Vorgehen wird verwendet, um bei Überlappschweißungen eine konstante Einschweißtiefe bei stufenförmiger Variation der Geschwindigkeit von 6 m/min auf 3,66 m/min zu erreichen [29]. Die Bandbreite der Regelung von 35 Hz führt zu starken Schwankungen der Einschweißtiefe, welche aus Sicht der Autoren in einem akzeptablen Toleranzband liegen.

Bei der Überwachung des Laserschweißprozesses mit bildgebenden Verfahren zeigt sich bei einer Durchschweißung ein Intensitätsminimum, bedingt durch das an der Rückseite austretende Plasma. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um eine Durchschweißung zu regeln [95]. Dazu wird der Tiefenkoeffizient  $H$  durch eine Regelung der Laserleistung auf einem konstanten Wert gehalten:

$$H = 100 \cdot \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}}. \quad (2.8)$$

Dabei ist  $I_{max}$  die maximale,  $I_{min}$  die minimale Intensität des Kamerabildes. Die Funktionsweise dieses Vorgehens wird für Laserschweißungen mit verschiedenen Materialdicken bei einer Regelfrequenz von 100 Hz nachgewiesen. Dabei kann eine Durchschweißung bei geschlossenem Kreis sichergestellt werden. Problematisch für die Regelung ist die Bildung von Löchern, die aufgrund ihres Intensitätsprofils vom Kamerasystem als unzureichende Einschweißung interpretiert werden können.

In [101] wird mit einer koaxial angebrachten cellular neural network (CNN) Kamera der Wellenlängenbereich von 820 nm bis 980 nm beobachtet. Das zuvor beschriebene Intensitätsminimum wird ebenfalls zur Regelung einer Durchschweißung verwendet. Durch die verwendete Kameratechnik können Regelfrequenzen bis 10 kHz realisiert werden. Die Funktion des Systems kann für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten und Materialdicken nachgewiesen werden.



### 2.3.3 Regelung der Einschweißtiefe

Ein System zur Prozessregelung beim CO<sub>2</sub>-Schweißen wird in [102] vorgestellt. Dabei dient die auf der Bauteilrückseite mit einem Pyrometer gemessene Temperatur als Eingangsgröße eines PID-Regelkreises. Eine Anpassung der Laserleistung an die aktuell gemessene Temperatur reduziert Schwankungen der Einschweißtiefe. Als Gründe für die Schwankungen werden ein Drift der Laserleistung, Bewegungen des Schmelzbades und die Plasmaabschirmung der Wechselwirkungszone genannt. In vergleichbaren Untersuchungen werden PI- und PID-Regelkreise als zu langsam identifiziert [8]. Die Autoren wählen aus diesem Grund ein abgewandeltes Vorgehen. Sie erhöhen die Laserleistung bei zu niedriger rückseitiger Temperatur et vice versa. Somit sind sie in der Lage, bei Variationen der Vorschubgeschwindigkeit und sich verändernder Materialdicke ein gleichbleibendes Prozessergebnis zu erreichen.

Die Einschweißtiefe wird in [103, 104] mit einer CCD-Kamera geregelt. Die Autoren berichten von einer Korrelation der Plasmastrahlung aus dem Keyhole und der Einschweißtiefe. Als Eingangsgröße des PI-Reglers dient ein gemittelter Intensitätswert aus dem vorderen Schmelzbadbereich. Die Laserleistung wird als Stellgröße verwendet. Veränderungen in der Einschweißtiefe, welche durch eine Variation der Vorschubgeschwindigkeit hervorgerufen werden, können auf diese Weise mit einer Regelfrequenz von 2 kHz fast vollständig ausgeregelt werden. In [69, 105] wird mit dem kamerabasierten Ansatz eine Korrelation von Einschweißtiefe und maximaler Intensität des Kamerabildes hergestellt. Ein darauf basierender Regelalgorithmus kann die Auswirkungen starker Variationen der Laserleistung verbessern, wobei die Schwankungen der Einschweißtiefe nicht vollständig ausregelbar sind. Der Autor stellt abschließend die Vermutung auf, dass durch eine Erhöhung der Regelfrequenz eine Verbesserung erreicht werden könnte.

Die geometrischen Abmessungen des Schmelzbades beim Laserschweißen dienen in [106] als Eingangsgröße des PI-Regelkreises zur Regelung der Einschweißtiefe. Dabei wird die Korrelation der Einschweißtiefe und der Schmelzbadlänge ausgenutzt, um Schwankungen der Einschweißtiefe durch eine Anpassung der Laserleistung auszuregeln. Die geometrischen Parameter werden online mit einer Frequenz von 50 Hz aus den Bildern einer Kamera ermittelt. Das System ist in der Lage, eine Erhöhung der Laserleistung um bis zu 25 % und die daraus resultierende Abweichung der Einschweißtiefe auszugleichen. Problematisch ist dabei die geringe Geschwindigkeit des Regelkreises, so dass das Ausgleichen ungefähr 1 s dauert.

Schwankungen der Einschweißtiefe, hervorgerufen durch die Plasmaabschirmung beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Lasern, sind Gegenstand der Untersuchungen in [107]. Der Laserschweißprozess wird dabei mit einem Photodetektor überwacht, dessen Spektralbereich auf eine bestimmte Spektrallinie eingeschränkt wurde. Übersteigt das Sensorsignal einen Grenzwert, wird der Laser kurzzeitig ausgeschaltet, so dass die Ausbildung eines Plasmas bereits während der Entstehung verhindert wird. Die Autoren berichten von einer Reduzierung des Schutzgaseinsatzes und einer gleichbleibenden Einschweißtiefe als Ergebnis der beschriebenen Zweipunktregelung. Eine entsprechende technische Umsetzung wird in [108] beschrieben.

## 2.4 Zusammenfassung

Aufbauend auf dem Prinzip des Laserschweißens stellte dieses Kapitel Ansätze zur Überwachung und Regelung des Schweißprozesses dar. Die Betrachtung wurde aufgrund der Ausrichtung dieser Arbeit auf In-Process-Verfahren beschränkt.

Die Betrachtung der Methoden zur Überwachung des Laserschweißprozesses macht deutlich, dass im wissenschaftlichen und industriellen Umfeld bereits zahlreiche Ansätze existieren. Viele der dargestellten Verfahren ermöglichen jedoch nur eine sehr ungenaue Überwachung des Schweißprozesses. Eine hochaufgelöste Überwachung hochdynamischer Ergebnisgrößen wie beispielsweise der Einschweißtiefe konnte mit den bekannten Ansätzen nur unzureichend dargestellt werden. Auch die technische Umsetzung der Verfahren zur Prozessüberwachung genügt in vielen Fällen nicht den Anforderungen einer Großserienfertigung.

Die Darstellung der Verfahren zur Regelung des Laserschweißprozesses macht im Gegensatz dazu deutlich, dass trotz eines hohen Forschungsaufwands und eines gesteigerten industriellen Interesses vergleichsweise wenige, erfolgsversprechende Ansätze realisiert werden konnten. Verfahren zur Fokusbereichsregelung ermöglichen die Anpassung der Position der Bearbeitungsoptik an die Bauteilgeometrie über einen Bereich von mehreren Millimetern. Die erreichte Genauigkeit der Fokusbereichsregelung ist für zahlreiche Anwendungen, beispielsweise im Automobilbau, ausreichend, muss aber für Anwendungen mit geringer Einschweißtiefe verbessert werden. Die Verfahren zur Regelung von Durchschweißungen zeigen ein hohes Umsetzungspotential. Mit innovativen Kameratechniken können sie bei kontinuierlicher Weiterentwicklung in viele Anwendungsgebiete in der Fertigung Einzug erhalten.

Bei den Verfahren zur Regelung der Einschweißtiefe ist im Gegensatz dazu ein gesteigerter Forschungsaufwand notwendig. Bisherige Versuche der Regelung der Einschweißtiefe sind in den meisten Fällen nur zu einem Ausregeln großer Leistungsvariationen in der Lage. Dabei müssen jedoch große Schwankungen der Einschweißtiefe akzeptiert werden. In vielen Fällen ist die Geschwindigkeit, mit welcher der Regler auf eine Änderung im Schweißprozess reagiert, nicht ausreichend, um die hohe Dynamik des Schweißprozesses abzubilden. Die Reduzierung von Einschweiß-tiefenschwankungen, welche durch Instabilitäten des Schweißprozesses hervorgerufen werden, ist mit den dargestellten Konzepten noch nicht realisierbar.



## 3 Systemtechnik und Auswertemethodik

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der detaillierten Beschreibung der verwendeten Systemtechnik und der angewandten Auswertemethodik. Ausgehend von der Strahlquelle und den Konzepten zur Strahlführung und -formung werden die untersuchten Methoden zur Prozessdiagnostik vorgestellt. Der Aufbau eines Sensorsystems für die Überwachung und Regelung des Schweißprozesses nimmt im Anschluss eine zentrale Stellung innerhalb des Kapitels ein. Basierend auf den Anforderungen, die sich im Umfeld einer Großserienfertigung für ein derartiges Sensorsystem ergeben, wird die entsprechende technische Umsetzung dargestellt. Die Beschreibung einer neuartigen Methode zur Vermessung von Längsschliffen und eine Darstellung der Schweißproben bilden den Abschluss des Kapitels.

### 3.1 Strahlquelle

Die im Folgenden dargestellten Untersuchungen zur Prozessregelung von Laserstrahlschweißungen werden mit dem diodengepumpten cw-Yb:YAG-Scheibenlaser HLD 1001.5 der Firma TRUMPF durchgeführt. Bei einer maximalen Laserleistung von 1 kW und einer zentralen Wellenlänge von 1030 nm beträgt das realisierte Strahlparameterprodukt 6 mm mrad [109].

Die Laserstrahlung wird von ihrem Entstehungsort über Lichtleitkabel mit Faserdurchmessern von 150/300/600  $\mu\text{m}$  zur Bearbeitungsstation geleitet. Nach dem Austritt aus dem Lichtleitkabel wird die Laserstrahlung einer Bearbeitungsoptik für das Schweißen zugeführt. Hierbei steht die Bearbeitungsoptik BEO D70 der Firma TRUMPF mit einer Kollimation von 200 mm und Fokussierlinsen mit Brennweiten von 100/150/200 mm zur Verfügung. Die Bearbeitungsoptik ist zum Auskoppeln der Prozesssekundärstrahlung mit einem entsprechenden Strahlteiler ausgerüstet. Für die Untersuchungen zur Prozessüberwachung und Prozessregelung wird ausschließlich ein Lichtleitkabel mit einem Kerndurchmesser von 300  $\mu\text{m}$  und eine Fokussierlinse mit einer Brennweite von 150 mm verwendet.

Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht der Fokusbereich, welche mit den zur Verfügung stehenden Lichtleitkabeln und Fokussierlinsen erzielt werden können. Für die zuvor beschriebene Konfiguration ergibt sich ein Durchmesser von 225 µm.

Eigenschaften BEO D70			
Kollimationslinse	200 µm		
Fokussierlinse	150 µm	300 µm	600 µm
Fokusbereich			
Lichtleitkabel 150 µm	75 µm	112,5 µm	150 µm
Lichtleitkabel 300 µm	150 µm	225 µm	300 µm
Lichtleitkabel 600 µm	300 µm	450 µm	600 µm

**Tabelle 3.1:** Rechnerische Fokusbereich für die Optik BEO D70 bei verschiedenen Brennweiten der Fokussierlinse und Durchmessern des Lichtleitkabels.

### 3.2 Methoden zur Prozessdiagnostik

Die Überwachung und Regelung von Laserstrahlschweißungen setzt ein detailliertes Verständnis des Materialbearbeitungsprozesses voraus. Dabei kann eine Korrelation zwischen den relevanten Nahtkenngrößen und den zugehörigen Sensorsignalen nur nach einer Untersuchung der grundlegenden Vorgänge während der Wechselwirkung von Laserstrahlung und Werkstück erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Prozessuntersuchungen ein VIS-Spektrometer, ein IR-Spektrometer, eine High-speedkamera und eine Thermographiekamera verwendet. Im Folgenden wird ein Überblick über die technischen Daten und die Funktionsweise der Geräte gegeben. Entsprechende Möglichkeiten zur Prozessdiagnostik werden aufgezeigt.

#### 3.2.1 Spektroskopie

Mit Hilfe von Spektrometern werden Informationen über die spektrale Verteilung der Prozessstrahlung gewonnen. Abhängig von der Art des Spektrometers lassen sich verschiedene Spektralbereiche untersuchen. Die beiden verwendeten Spektrometer im sichtbaren und im infraroten Bereich sind fasergekoppelt und werden nachfolgend genauer dargestellt. Beide Spektrometer sind nicht absolut kalibriert, so dass lediglich ein relativer Vergleich der spektralen Verteilung möglich ist.

### VIS-Spektrometer – Sichtbares Spektrum

Für die spektroskopische Untersuchung des Laserschweißprozesses im sichtbaren Bereich des Gesamtspektrums wird ein TranSpec-Spektrometer der Firma Ingenieurbüro für Angewandte Spektrometrie verwendet. Die aus der Glasfaser austretende Strahlung trifft zunächst auf einen Eingangsspalt und wird im direkten Anschluss mit einem holographischen Konkavgitter auf ein Diodenarray abgebildet. Nach einer Analog/Digital-Konvertierung kann das Spektrum dargestellt werden [110].

Das Spektrometer stellt einen Wellenlängenbereich von 190 nm bis 1015 nm dar. Die Diodenzeile kann mit 256/512/1024 Einzeldioden ausgestattet werden, so dass sich ein spektraler Pixelabstand von ungefähr 0,8 nm bis 3,2 nm ergibt. Die spektrale Auflösung des spektroskopischen Gesamtsystems beträgt hierbei nach dem Rayleighkriterium 3 nm bis 10 nm. Das verwendete Spektrometer ist mit 1024 Einzeldetektoren ausgerüstet. Die Integrationszeit kann von 1,2 ms bis 5 s variiert werden, so dass eine zeitliche Überwachung mit einer Aufnahmezeit von maximal 833 Hz stattfinden kann. Der Dynamikbereich beträgt 16 bit.

### IR-Spektrometer – Infrarotes Spektrum

Zur photometrischen Messung im infraroten Bereich des Schweißspektrums steht ein PSS-1750 Spektrometer der Firma Polytec GmbH zur Verfügung. Die aus der Glasfaser austretende Strahlung wird nach dem Passieren eines Beleuchtungsspalts zunächst kollimiert und trifft nach dem Durchgang durch ein Transmissionsgitter auf einen InGaAs-Zeilendetektor mit 512 Einzeldetektoren [111].

Die Detektorsensitivität umfasst einen Bereich von ungefähr 850 nm bis 1650 nm. Dabei wird eine spektrale Auflösung von kleiner 4 nm erreicht. Eine Variation der Integrationszeit von 32  $\mu$ s bis 5 s ermöglicht eine Anpassung der Beleuchtungsdauer an die Strahlungsverhältnisse. Der Dynamikbereich beträgt 16 bit.

#### 3.2.2 Highspeedaufnahmen

Neben der photometrischen Analyse der Strahlung können bildgebende Verfahren zum besseren Verständnis des Prozesses beitragen. Für die Beurteilung der Vorgänge im Schweißbereich wird die Highspeedkamera MotionPro HS-4 der Firma Redlake verwendet. Ihre hohe zeitliche Auflösung bietet die Möglichkeit, hochdynamische Prozesse im Keyholeumfeld und im Schmelzbad zu visualisieren.

Die Kamera ist mit einem quadratischen Detektor der Größe  $512 \times 512$  Pixel ausgestattet, welcher im Bereich von ungefähr 400 nm bis 1100 nm sensitiv ist. Der Dynamikbereich der Kamera ist mit 8 bit angegeben. Dadurch erreicht die Kamera bei einer Vollbilddarstellung eine maximale Aufnahmezeit von 5130 Hz. Die Belichtungszeit kann im Bereich von 1  $\mu$ s bis 1 s verändert werden [112].

Zur Beleuchtung des Schweißprozesses wird ein Diodenlaser mit einer zentralen Wellenlänge von 808 nm verwendet. Dieser Beleuchtungslaser der Firma LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH besitzt eine maximale Ausgangsleistung von 110 W [113]. Mit Fasern der Durchmesser 400 nm und 600 nm wird die Laserstrahlung zur Beleuchtungsoptik geleitet. Bandpassfilter vor dem Kameraobjektiv mit einer zentralen Wellenlänge von 808 nm blockieren die übrigen Strahlungsanteile.

### 3.2.3 Infrarotthermographie

Eine IR-Kamera erlaubt eine bildgebende Darstellung der Infrarotstrahlung aus der Wechselwirkungszone von Laserstrahl und Werkstück. Für die grundlegenden Untersuchungen zum Prozessverlauf wird die Infrarotkamera Velox 65k M pro der Firma IRCAM GmbH verwendet. Mit dem eingesetzten CMT-Detektor kann ein Wellenlängenbereich von 3,4  $\mu$ m bis 5  $\mu$ m dargestellt werden [114].

Im Vollbildmodus kann der Sensor mit einer Größe von  $256 \times 256$  Pixel mit einer maximalen Frequenz von 885 Hz ausgelesen werden. Die Integrationszeit lässt sich von 1  $\mu$ s bis 2,15 ms variieren. Der Dynamikbereich beträgt 14 bit. Mit den zur Verfügung stehenden IR-Objektiven lassen sich Bildfelder von 4,5 mm  $\times$  4,5 mm darstellen, so dass eine hohe örtliche Auflösung der Schweißnaht möglich ist.

## 3.3 Aufbau eines Sensorsystems zur Regelung

Zur Prozessüberwachung des Laserschweißprozesses werden in vielen industriellen Anwendungen photodiodenbasierte Sensorsysteme eingesetzt. Derartige Systeme befinden sich beispielsweise im Karosseriebereich in der Automobilbranche im Serieneinsatz [43]. Oftmals erlauben diese Systeme jedoch nur die Detektion von Prozessfehlern, indem sie die aufgezeichneten Prozesssignale mit denen von Referenzschweißungen vergleichen. Die Bestimmung hochdynamischer Nahtkenngrößen wie der Einschweißtiefe ist im Allgemeinen nicht möglich.



Kommerziell erhältliche Prozesssicherungssysteme sind zur Regelung des Schweißprozesses nur eingeschränkt geeignet, da für derartige Anwendungen höhere Anforderungen an die Signalgüte gestellt werden müssen. Als Beispiel sei hier die bauartbedingte Nähe der Sensorik zum Achssystem vieler Systeme angeführt. Dies kann zu Störungen der sensiblen Photodiodenströme durch elektromagnetische Streustrahlung der Achsregelung führen. Die bei zahlreichen Sensorsystemen eingeschränkte und ungenaue mechanische Justage ist für eine Regelung des Prozesses nicht tolerierbar. Auch die Größe und das Gewicht dieser Systeme dürfen bei der Auslegung der Schweißstationen und Achssysteme nicht vernachlässigt werden.

In diesem Kapitel werden zunächst die Anforderungen an ein System zur Regelung des Laserschweißprozesses in einer Großserienfertigung detailliert analysiert. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen wird der mechanische und optische Aufbau zur Detektion elektromagnetischer Strahlung aus dem Laserschweißprozess beschrieben. Eine Betrachtung des elektrischen Aufbaus erfolgt getrennt, da dieser Grundlage für eine hohe Signalqualität bildet.

### **3.3.1 Anforderungen an serientaugliche Prozesssicherungssysteme**

Vor der Konzeption eines Überwachungs- bzw. Regelungssystems für den Laserschweißprozess in der Großserienfertigung müssen Anforderungen definiert werden. Diese ergeben sich aus dem Umfeld der Schweißung und den daraus resultierenden Einflüssen auf die Systemtechnik. Werden sie bei der Entwicklung der Sensorik nicht ausreichend berücksichtigt, so besteht die Gefahr, dass sich Störungen des Prozessumfeldes negativ auf das Überwachungs- oder Regelungsergebnis auswirken. Im Folgenden werden wichtige Randbedingungen der Sensorik dargestellt.

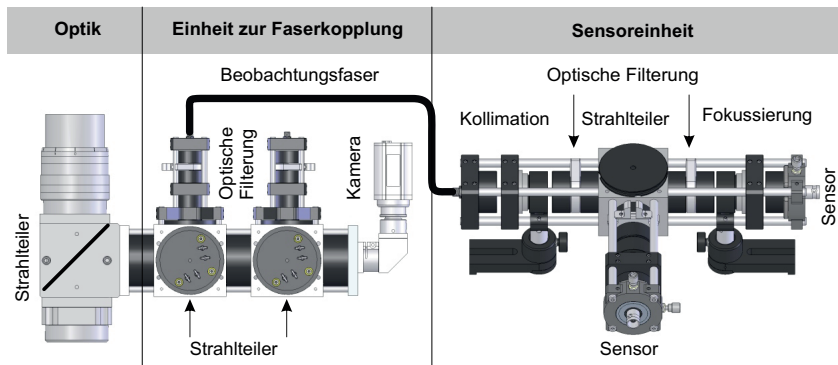
Die reproduzierbare und stabile mechanische Justage des Sensorkonzeptes nimmt dabei eine zentrale Rolle ein. Durch die geringen geometrischen Ausdehnungen der zu überwachenden Wechselwirkungszone von Laserstrahl und Werkstück ist eine exakte Positionierung unerlässlich. Bereits kleinste Abweichungen von der idealen Sensorposition können bei einem regelnden Prozesseingriff eine Verschlechterung des Schweißergebnisses bewirken. Diese würden den Vorteilen eines geregelten Prozesses entgegen wirken und würden die Akzeptanz des Systems verschlechtern. Eine Dejustage durch Erschütterungen, wie sie beispielsweise durch eine Relativbewegung der Bearbeitungsoptik entstehen, muss vollständig ausgeschlossen werden.

Zusätzliche Randbedingungen resultieren aus den Anforderungen an die Signalqualität, die für eine robuste Überwachung oder Regelung notwendig ist. Durch einen optisch dichten Aufbau des Systems müssen Einflüsse durch Streustrahlung vermieden werden. Des Weiteren dürfen sich elektromagnetische Störeinflüsse des Prozessumfeldes, wie sie beispielsweise durch Antriebsverstärker des Achssystems verursacht werden, nicht auf die Sensorik auswirken. Eine weitere Prämisse ist, dass mit Hilfe einer rauscharmen Signalverstärkung eine hochwertige Aufbereitung der Signale zu realisieren ist. Dabei ist die Bandbreite des elektrischen Aufbaus und die Geschwindigkeit der Signalverarbeitung zu berücksichtigen.

Zusätzlich darf durch die Masse der Sensorik nur eine geringe zusätzliche Belastung des Achssystems entstehen, da andernfalls die Adaption an bestehende Schweißstationen erschwert wird. Auch die geometrischen Abmessungen müssen auf ein Minimum begrenzt werden, da Störkonturen an der Bearbeitungsoptik in zahlreichen Fällen einen möglichen Einsatz erschweren. Aufgrund der ständigen Verkleinerung von Schweißstationen ist eine kompakte Bauweise der Sensorik unabdingbar.

### 3.3.2 Mechanischer und optischer Aufbau

Bild 3.1 zeigt eine schematische Darstellung des Sensorsystems zur Prozessüberwachung und -regelung beim Laserschweißen. Es besteht aus zwei Teilsystemen: Einer Einheit zur Einkopplung der Prozessstrahlung in eine Glasfaser und einer Sensoreinheit. Verbunden sind die Teilsysteme über eine Glasfaserführung.



**Bild 3.1:** Schematische Darstellung des Sensorsystems für die Prozessüberwachung und Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen.

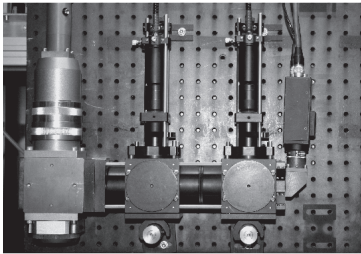
Die Prozessemissionen aus der Wechselwirkungszone gelangen durch die Fokussierlinse in die Bearbeitungsoptik. Der kollimierte Strahl wird durch einen Strahlteiler um  $90^\circ$  abgelenkt und tritt in die Einheit zur Faserkopplung ein. Diese besteht in der dargestellten Bauweise aus zwei weiteren Strahlteilern, die jeweils einen Anteil der Strahlung nach oben ablenken. Die spektrale Empfindlichkeit wird an den jeweiligen Prozess angepasst, indem optische Filter in den Strahlengang eingebracht werden. Eine Linse fokussiert die Strahlung auf ein Faserende.

Das Faserende kann entlang der drei Raumrichtungen reproduzierbar mittels Stellschrauben justiert werden, so dass eine orts aufgelöste Messung erfolgt. Mit Hilfe der Variation senkrecht zur Strahlachse können verschiedene Bereiche der Wechselwirkungszone untersucht werden, während die Verschiebung in Strahlrichtung eine Einstellung der Fokusposition auf der Bauteiloberfläche erlaubt. Des Weiteren bietet sich die Möglichkeit, durch den Einsatz einer zweiten Faserkopplung Strahlung aus dem Kapillarumfeld und dem Schmelzbad gleichzeitig zu beobachten.

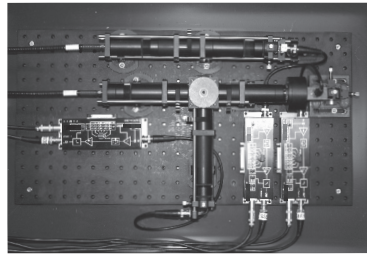
Die Strahlung wird über eine Beobachtungsfaser zur Sensoreinheit geführt, wobei die Führung der Strahlung in einer Faser zahlreiche Vorteile gegenüber herkömmlichen Systemen bietet. Die Beobachtungsfaser wirkt dabei gleichzeitig als Blende, so dass die Beobachtung auf scharf abgegrenzte Bereiche beschränkt ist. Diese können in ihrer Größe variiert werden, indem der Durchmesser der Beobachtungsfaser oder der Abbildungsmaßstab angepasst wird. Des Weiteren wirkt die Beobachtungsfaser auf die Strahlung homogenisierend, da eine ungleichmäßige Intensitätsverteilung durch die Vielfachreflexionen in der Beobachtungsfaser ausgeglichen wird. Zusätzlich ermöglicht die Führung der Strahlung in einer Beobachtungsfaser eine vollständige Trennung der sensiblen Sensorik vom Bearbeitungsort. Eine Störung durch elektromagnetische Einflüsse ist ausgeschlossen. Bezogen auf die Sierientauglichkeit der Sensorik kann diese, bedingt durch das Faserkonzept, bei einem Defekt ohne Unterbrechung der Produktion gegen eine vorjustierte Sensoreinheit ausgetauscht werden. Eine Duplizierung ist dank der Erweiterbarkeit ebenfalls möglich.

In der Sensoreinheit wird die Strahlung kollimiert und mit Hilfe eines Strahlteilers aufgeteilt. Durch die Verwendung von Photodioden unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit lassen sich verschiedene Wellenlängenbereiche untersuchen. Filter im kollimierten Strahl sorgen dafür, dass der Wellenlängenbereich der Strahlung weiter eingeschränkt wird, so dass eine Anpassung an die Überwachungsaufgabe realisierbar ist. Anschließend werden die Signale auf Photodioden fokussiert, welche entlang der drei Raumrichtungen reproduzierbar positionierbar angeordnet sind.

Bild 3.2 zeigt die mechanische und optische Umsetzung des Sensorsystems.



(a) Einheit zur Faserkopplung



(b) Sensoreinheit

**Bild 3.2:** Einheit zur Faserkopplung und Sensoreinheit des Sensorsystems.

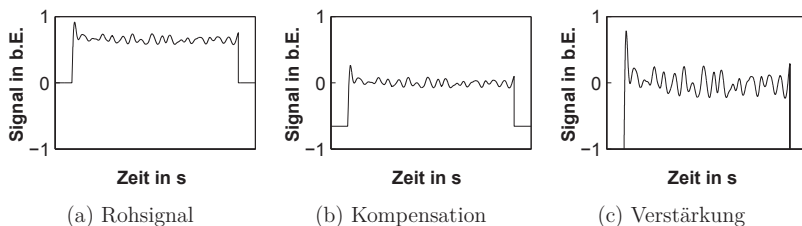
### 3.3.3 Elektrischer Aufbau

Der elektrische Aufbau des Sensorsystems wirkt sich auf die Signalqualität und die Bandbreite der Signale aus. Zusätzlich beeinflusst dieser die Schnelligkeit, mit der Daten aus dem Schweißprozess aufbereitet, ausgewertet und bei geschlossenem Regelkreis zur Verbesserung der Nahtqualität verwendet werden können.

Die elektromagnetischen Emissionen werden mit Hilfe von Photodioden erfasst. Die Sensitivitätsbereiche sind zusätzlich durch optische Filter einschränkbar. Entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Sensorsignale hat die Umwandlung der geringen Photodiodenströme in Spannungen, die entsprechend gemessen werden können. Bei der Auswahl eines Transimpedanzverstärkers ist darauf zu achten, dass eine möglichst hohe Bandbreite bei minimalem Rauschverhalten realisiert wird.

Zusätzlich bieten die eingesetzten Transimpedanzverstärker die Möglichkeit, durch eine Kompensation des Offsetstroms sehr hohe Verstärkungsfaktoren zu realisieren. Signale des Schweißprozesses haben gewöhnlich einen hohen DC-Anteil, wodurch die sich im Sensorsignal abzeichnenden Schwankungen des Prozesses auf einen schmalen Spannungsbereich eingeschränkt werden. Durch einen dem Photodiodenstrom entgegen wirkenden Offsetstrom ist es nun möglich, den hohen DC-Anteil vollständig zu kompensieren. Eine Verstärkung des verbleibenden Signals erlaubt es, Prozessschwankungen mit einer höheren Auflösung bei gleichzeitiger Kenntnis des DC-Anteils zu analysieren. Das Zielniveau der Regelung ergibt sich folglich aus dem eingestellten Sollwert und der Vorgabe des Offsetstroms.

Bild 3.3 verdeutlicht das beschriebene Vorgehen schematisch.

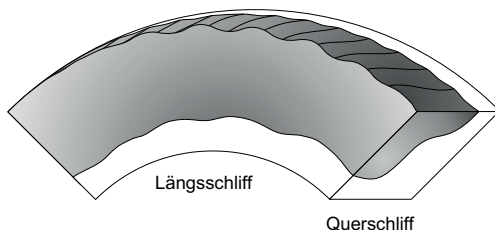


**Bild 3.3:** Kompensation des DC-Signalanteils durch einen Gegenstrom im Photodiodenkreis mit anschließender Verstärkung des kompensierten Signals.

Die Verarbeitung der Signale erfolgt volldigital auf dem ADWin Pro II System der Firma Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH. Der digitale Signalprozessor (DSP) ermöglicht durch schnelle I/O-Operationen und einer internen Taktfrequenz von 300 MHz die Abarbeitung innerhalb weniger  $\mu\text{s}$  [115]. Der Laserschweißprozess kann entsprechend der aktuellen Sensorsignale in Echtzeit beeinflusst werden.

### 3.4 Schliffpräparation

Für eine genaue Korrelation von Nahtkenngrößen und Sensorsignalen des Laserschweißprozesses ist es notwendig, dass sich die hohe zeitliche Auflösung der Sensorik in der örtlichen Auflösung der betrachteten Zielgröße widerspiegelt. Da im Rahmen dieser Arbeit Schwankungen der Einschweißtiefe und Ansätze zur Reduzierung selbiger betrachtet werden, muss eine genaue Vermessung der Einschweißtiefe umgesetzt werden. Bild 3.4 zeigt den Unterschied der beiden eingesetzten Verfahren zur Schlifferstellung.

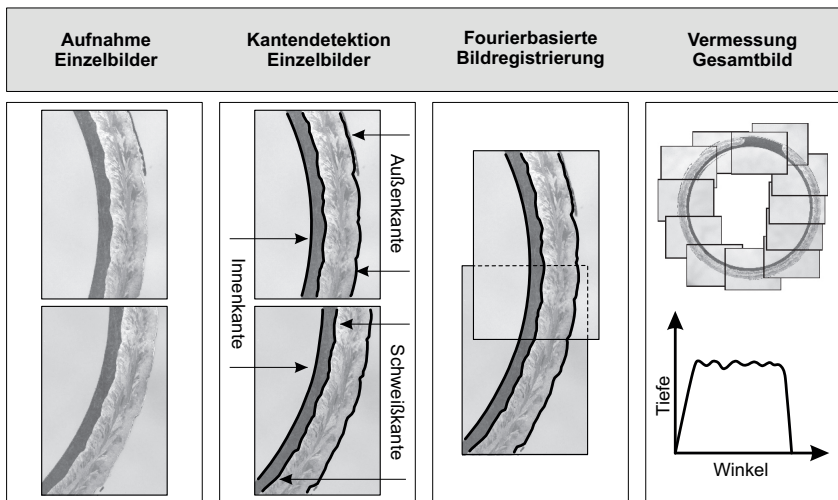


**Bild 3.4:** Unterschied zwischen Quer- und Längsschliffen.

Bei einem Querschliff wird der Probekörper quer zur Naht getrennt. Anschließend wird nach Schleif- und Polierprozessen die geätzte Naht mit Hilfe eines Mikroskops sichtbar. Dabei können die Nahtkenngrößen sehr genau vermessen werden, wobei die Messgenauigkeit durch die Auflösung des Mikroskops bestimmt wird. Dieses Verfahren ermöglicht es nicht, den Verlauf der Einschweißtiefe entlang der Schweißnaht zu bestimmen. Lediglich wenige Stützstellen des Einschweißtiefenverlaufs können durch eine Segmentierung der Naht betrachtet werden. Querschliffe sind nur dazu geeignet, Tendenzen der mittleren Einschweißtiefe aufzuzeigen.

Soll die Einschweißtiefe entlang der Naht hochaufgelöst vermessen werden, so müssen Längsschliffe erstellt werden. Dazu wird die radialsymmetrische Schweißprobe bis kurz vor der Nahtmitte abgedreht. Mit Hilfe von sich anschließenden Schleif-, Polier- und Ätzprozessen wird die Schweißnaht sichtbar gemacht.

Aufgrund des Durchmessers der verwendeten Schweißproben (siehe Kapitel 3.5) kann bei Aufnahme eines Mikroskopeinzelbildes der gesamten Schweißnaht keine ausreichende Genauigkeit bei der Messung der Einschweißtiefen erreicht werden. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein spezielles Verfahren zur hochaufgelösten Vermessung der Einschweißtiefe entwickelt und angewendet. Dieses Verfahren ist in Bild 3.5 prinzipiell dargestellt und wird im Folgenden detailliert beschrieben.



**Bild 3.5:** Schematische Darstellung des entwickelten Verfahrens zur hochaufgelösten Vermessung der Einschweißtiefe bei Längsschliffen.

Entlang des gesamten Nahtumfangs werden Einzelbilder angefertigt, so dass für jedes Bild eine hohe Messgenauigkeit der Einschweißtiefe umgesetzt werden kann. Die Einzelbilder werden im Anschluss einem Algorithmus zugeführt, welcher die Innen-, die Schweiß- und die Außenkante erkennt. Aufgrund des speziellen Verlaufs der betrachteten Kanten und den verfahrensbedingten Kontrast- und Helligkeitsunterschieden verschiedener Schliffbilder lässt sich diese Detektion mit kommerziell verfügbaren Bildverarbeitungsalgorithmen nur mit hohem Parametrierungsaufwand umsetzen. Außerdem bieten derartige Programme in zahlreichen Fällen nur eine begrenzte Möglichkeit zur Stapelverarbeitung und unzureichende Schnittstellen für die Weiterverarbeitung der relevanten Daten. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit ein speziell entwickelter Algorithmus zur gradientenbasierten Kanten-detektion eingesetzt. Dieser erreicht die notwendige Erkennungsleistung durch die Verwendung angepasster Anfangsbedingungen und schliffbezogener Prämissen auch bei stark unterschiedlichen Bildqualitäten ohne aufwändige Parametrierung.

Eine fourierbasierte Bildregistrierung, welche in den entwickelten Algorithmus eingebunden ist, vereint die Einzelbilder bei ausreichender Überlappung im Anschluss wieder zu einem Gesamtbild. Voraussetzung hierfür ist, dass eine ausreichend hohe Korrelation zwischen den Einzelbildern besteht. Etwaige Fehlstellungen einzelner Bilder werden durch eine weiterführende Verarbeitung der Daten korrigiert.

Mit den Informationen über die Lage der Innenkante und den Ergebnissen der Bildregistrierung ermittelt der entwickelte Algorithmus den Mittelpunkt der Schweißprobe. Dadurch kann sowohl der Abstand des geometrischen Mittelpunktes von der Schweißkante als auch von der Innenkante bestimmt werden. Die Resttiefe ergibt sich durch die Differenzenbildung, so dass mit Hilfe der Wandstärke die resultierende Einschweißtiefe berechnet werden kann. Dabei ist wichtig, dass bei der Fertigung der Probekörper hohe Toleranzanforderungen gestellt werden, so dass Ungenauigkeiten in der Wandstärke nur geringe Auswirkungen auf die Einschweißtiefe haben. Die Einschweißtiefe als Differenz aus Außenkante und Schweißkante kann nicht ermittelt werden, da sich beim Schweißen eine unregelmäßige Nahtoberraupe ausbildet.

Das im Rahmen dieser Arbeit umgesetzte und beschriebene Verfahren ermöglicht für das zusammengefügte Gesamtbild eine Vermessung der Einschweißtiefe mit ähnlicher Genauigkeit wie bei Querschliffen identischer Auflösung ( $3,73 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ ). Somit bildet es die Grundlage für die in den folgenden Kapiteln durchgeführten Untersuchungen zur Korrelation von zeitlich hochaufgelösten Prozesssignalen zu geometrischen Nahtparametern, wie beispielsweise der Einschweißtiefe.

### 3.5 Probekörper

Die Untersuchungen zur Prozesssicherung und Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen werden ausschließlich mit radialsymmetrischen Bauteilen durchgeführt. Als Werkstoff wird ein X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer: 1.4301) verwendet. Die Wandstärke der Schweißproben beträgt 500  $\mu\text{m}$  und 1000  $\mu\text{m}$ .

Die Gesamtwandstärke von 1000  $\mu\text{m}$  ergibt sich als Ergebnis einer Verschweißung zweier 500  $\mu\text{m}$ -Hülsen im Überlapp. Das Laserstrahlfügen zweier 250  $\mu\text{m}$ -Hülsen führt zu einer Gesamtwandstärke von 500  $\mu\text{m}$ . Zusätzlich stehen für die Grundlagenuntersuchungen Blindproben mit identischen Wandstärken zur Verfügung. Besondere Beachtung bei der Auslegung der Schweißproben muss auf eine sehr geringe Fertigungstoleranz gelegt werden. Bei großen Abweichungen der Wandstärke kann das in Kapitel 3.4 erläuterte Verfahren zur genauen Vermessung der Einschweißtiefe bei Längsschliffen nicht angewendet werden. Technische Zeichnungen der verwendeten Probekörper sind in Anhang A.1 dargestellt.



## 4 Signale gesteuerter Laserschweißungen

In diesem Kapitel wird zunächst die spezielle Strahlungscharakteristik des Laserschweißprozesses und der Einfluss des Sensoraufbaus durch eine Betrachtung der wellenlängenspezifischen Emissionen untersucht. Darauf aufbauend wird mittels grundlegender Versuche der Einfluss des Sensorsystems auf die Signalqualität der photodiodenbasierten Messung aufgezeigt. Basierend auf diesen Ergebnissen wird eine Korrelation zwischen Prozesssignalen und Nahtkenngrößen hergestellt. Abschließend führt eine Analyse der beobachteten charakteristischen Signalverläufe im Hinblick auf die Vorgänge beim Schweißen zu einem vertieften Prozessverständnis.

### 4.1 Spektrale Eigenschaften des Sensoraufbaus

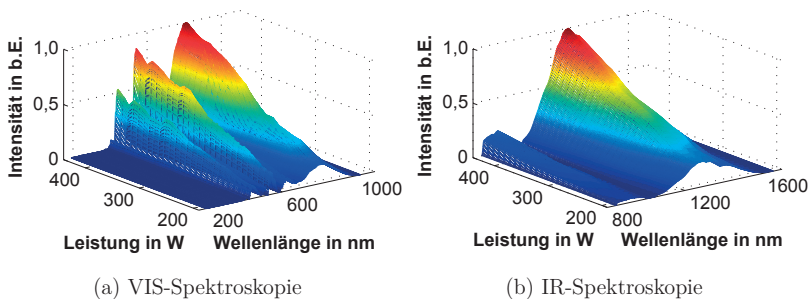
Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Eignung spektroskopischer Messungen für eine Überwachung und Regelung des Laserschweißprozesses in umfangreichen Versuchen analysiert. Diese grundlegenden Untersuchungen verdeutlichten jedoch, dass spektral aufgelöste Prozesssignale für die angestrebten Ergebnisse nicht zielführend genutzt werden können. Aus diesem Grund beschränkt sich die folgende Betrachtung auf eine Darstellung der spektroskopischen Eigenschaften des Sensoraufbaus. Dabei werden im Speziellen die Einflüsse des optischen Aufbaus und das Zeitverhalten spektraler und integraler Messverfahren untersucht.

#### 4.1.1 Wellenlängenbereiche des Laserschweißprozesses

Die Faserkopplung des vorgestellten Sensorsystems zur Prozessüberwachung des Laserstrahlschweißprozesses ermöglicht eine spektroskopische Untersuchung der emittierten elektromagnetischen Strahlung. Dazu werden die zuvor in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Spektrometer über ein Lichtleitkabel direkt mit der Faserkopplung des Sensorsystems verbunden. In den gemessenen Spektrogrammen sind somit die Charakteristika aller verwendeten optischen Elemente berücksichtigt.

Im Bereich der zentralen Wellenlänge zeigt sich, bedingt durch die hohe Intensität der rückreflektierten Laserstrahlung, eine Übersteuerung des Spektrometers. Aus diesem Grund wird die Prozessstrahlung mit einem Notchfilter der Sperrwellenlänge von 1030 nm gefiltert. Die gleichmäßige Charakteristik des Notchfilters führt – abgesehen vom Bereich der Laserwellenlänge – nur zu einer geringen Beeinflussung.

Bild 4.1 zeigt zeitlich gemittelte Spektren des Schweißprozesses im sichtbaren und im infraroten Bereich des Gesamtspektrums bei einer Variation der Laserleistung von 190 W bis 440 W, bei welcher eine Durchschweißung zu beobachten ist.



**Bild 4.1:** VIS- und IR-Spektren bei einer Variation der Laserleistung von 190 W bis 440 W ohne Schutzgas, 300  $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser, Blindproben mit einer Wandstärke von 1 mm,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Beide Spektren zeigen eine steigende Tendenz bei der Erhöhung der Laserleistung. Diese Eigenschaft lässt sich auf eine stetige Zunahme der Strahlungsintensität des Beobachtungsflecks zurückführen. Der Einfluss des eingesetzten Notchfilters ist durch die reduzierte Intensität im Bereich von 1030 nm zu erkennen. Zusätzlich sind im sichtbaren Bereich des Spektrums Einflüsse der Bearbeitungsoptik zu sehen. Die für die optischen Elemente verwendete Glassorte ist für den Bereich unter 400 nm nicht transmittierend, so dass keine Intensitäten gemessen werden. Des Weiteren wird durch die Beschichtung der optischen Elemente die Bestrahlung des Spektrometers in den Bereich um 420 nm/480 nm/520 nm/580 nm und 670 nm verringert. Diese Bereiche sind stark von der verwendeten Optik bzw. der Art der Beschichtung abhängig und sind bei einer direkten Beobachtung nicht sichtbar. Eine Nutzung der Strahlungsanteile des sichtbaren Spektrums ist, bedingt durch diese Störeinflüsse, erschwert. Im infraroten Spektrum des Schweißprozesses sind die Einflüsse der Bearbeitungsoptik nicht zu erkennen. Die weiteren Untersuchungen beschränken sich daher auf die Analyse der infraroten und rückreflektierten Strahlung.

### 4.1.2 Vergleich wellenlängenspezifischer und integraler Messungen

Die Qualität einer Sensorik zur Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen wird maßgeblich von der Güte der aus dem Prozess extrahierten Signale bestimmt. Die in ihnen enthaltenen Informationen erlauben Rückschlüsse auf den aktuellen Prozesszustand. Eine eindeutige Korrelationsbeziehung von Nahtdefekten bzw. Nahtkenngrößen zu Signalverläufen kann aber nur dann abgeleitet werden, wenn das Zeitverhalten des hochdynamischen Prozesses geeignet abgebildet werden kann.

Eine spektroskopische Betrachtung des Laserschweißprozesses liefert detaillierte Informationen über die spezifischen Emissionen in den entsprechenden Wellenlängenbereichen. Nachteilig wirkt sich beim Einsatz von Spektroskopen das unzureichende zeitliche Auflösungsvermögen aus. Das verwendete VIS-Spektroskop kann bei den Messungen mit minimaler Integrationszeit bis zu 833 Einzelspektren pro Sekunde, das IR-Spektroskop bis zu 1000 Einzelspektren pro Sekunde aufzeichnen.

Aufgrund der hohen Dynamik des Laserprozesses kann eine Beurteilung der Schweißqualität durch spektroskopische Messungen mit den vorhandenen Geräten nicht erfolgen. Zusätzlich ist eine direkte Verarbeitung der gemessenen Spektren in Echtzeit mit den zur Verfügung stehenden Geräten nicht möglich, so dass diese bestenfalls zur Überwachung, nicht aber zur Regelung verwendet werden können.

Das in Kapitel 3.3 dargestellte photodiodenbasierte Sensorsystem kann im Gegensatz dazu den Schweißprozess mit einer Aufnahmerate von bis zu 200 kHz überwachen. Regelnde Eingriffe in die Schweißung sind aufgrund des erhöhten Rechenzeitbedarfs auf dem digitalen Signalprozessor mit Frequenzen bis zu 150 kHz möglich. Aufgrund des integralen Messverfahrens ist eine wellenlängenspezifische Beurteilung des Schweißprozesses allerdings nicht möglich. Lediglich durch die Einschränkung der Prozessstrahlung aus der Wechselwirkungszone mit optischen Filtern kann der Strahlungsbereich der Laserschweißung differenziert betrachtet werden.

Spektroskopische Untersuchungen eignen sich beim Laserstrahlschweißen folglich zur Identifikation relevanter Strahlungsbereiche aus dem betrachteten Gesamtspektrum. Dieses wird im Bereich der Wechselwirkungszone emittiert. Zur Überwachung hochdynamischer Größen, wie beispielsweise der Einschweißtiefe, sind die entsprechenden Datenraten der verfügbaren Geräte zu gering. Eine Überwachung und Regelung derartiger Prozessgrößen muss mit schnellen Photodiodensystemen erfolgen.

## 4.2 Untersuchungen zur Faserkopplung

In Kapitel 3.3 wurde eine neuartige Möglichkeit vorgestellt, Emissionen des Schweißprozesses qualitativ hochwertig aufzunehmen und zu verarbeiten. Das elementare Kernstück ist dabei die Einkopplung der elektromagnetischen Strahlung in eine Beobachtungsfaser und der Transport zur Sensoreinheit. Dadurch ist eine Trennung von Prozess und Überwachungssensorik möglich, so dass Störsignale des Prozesses vollständig ausgeschlossen werden können. Im Folgenden werden Besonderheiten, die durch ein derartiges Vorgehen entstehen, detailliert beschrieben.

### 4.2.1 Untersuchte Beobachtungsfasern

Der auf dem Werkstück beobachtete Bereich lässt sich durch die Verwendung einer geeigneten Beobachtungsfaser unter Berücksichtigung der Abbildungsverhältnisse frei wählen. Dieses wird sowohl durch die Einkoppellinse der Faserkopplung als auch durch die Fokussierlinse der Bearbeitungsoptik bestimmt. Für die folgenden Untersuchungen des Schweißprozesses wird eine Einkoppellinse mit einer Brennweite von 100 mm und eine Fokussierlinse mit einer Brennweite von 150 mm verwendet, so dass sich ein Abbildungsverhältnis von 1:1,5 einstellt. Aufgrund dieser Konstanz lassen sich durch die Verwendung von Beobachtungsfasern mit unterschiedlichen Kerndurchmessern die Strahlungscharakteristika verschiedener Nahtgeometrien auf den Sensor abbilden. Bei einer Prozessentwicklung ist das beschriebene Sensorsystem somit an verschiedene Applikationen adaptierbar.

Für die Untersuchungen werden die in Tabelle 4.1 dargestellten Beobachtungsfasern mit unterschiedlichen Kerndurchmessern verwendet. Zusätzlich ist die geometrische Abmessung des Beobachtungsflecks für die unterschiedlichen Faserdurchmesser angegeben. Die numerische Apertur aller verwendeten Fasern ist identisch.

Eigenschaften					
Faserdurchmesser	100 µm	200 µm	300 µm	400 µm	600 µm
Beobachtungsfleck	150 µm	300 µm	450 µm	600 µm	900 µm
Numerische Apertur	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22

**Tabelle 4.1:** Physikalische Eigenschaften der verwendeten Beobachtungsfasern bei einem Abbildungsverhältnis von 1:1,5.

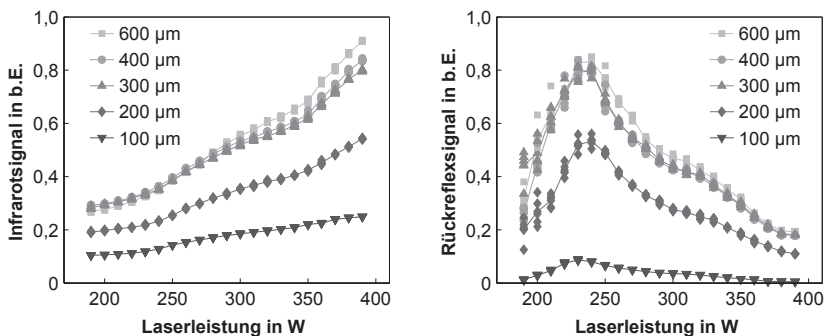
### 4.2.2 Auswahl applikationsangepasster Beobachtungsfasern

Im vorangegangenen Kapitel wurde dargestellt, wie das Sensorsystem an den zu überwachenden Laserschweißprozess angepasst werden kann. Die Verwendung von Beobachtungsfasern mit unterschiedlichen Faserdurchmessern ermöglicht eine Anpassung des auf dem Werkstück beobachteten Bereichs.

Dieses Kapitel untersucht nun den Zusammenhang zwischen dem verwendeten Kerndurchmesser der Beobachtungsfaser und der damit realisierbaren Signalqualität. Ziel ist es, einen optimalen Faserdurchmesser für die nachfolgenden Untersuchungen zu ermitteln. Dazu wird in den folgenden Abschnitten eine Variation der Laserleistung und der Fokusbildung der Bearbeitungsoptik durchgeführt. Basierend auf der mit den unterschiedlichen Beobachtungsfasern erzielbaren Signalqualität wird eine Auswahl für die weiterführenden Untersuchungen getroffen.

#### Variation der Laserleistung

Bild 4.2 verdeutlicht die Auswirkung einer Variation der Laserleistung auf die Infrarotsignale und die Rückreflexsignale des Schweißprozesses. Eine Betrachtung des sichtbaren Spektrums der Prozessstrahlung findet nicht statt, da die spektroskopischen Untersuchungen dieses Bereichs Störeinflüsse durch die verwendeten Bearbeitungsoptiken aufzeigen. Die Faserkopplung ist jeweils so justiert, dass für eine Schweißung im Fokus die maximal mögliche Intensität in die Beobachtungsfaser eingekoppelt wird.



**Bild 4.2:** Infrarotsignal und Rückreflexsignal in Abhängigkeit der Laserleistung für diverse Durchmesser der Beobachtungsfaser, Blindschweißungen mit einer Wandstärke von 1 mm ohne Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

In Bild 4.2 ist deutlich zu erkennen, dass mit einem Ansteigen der Laserleistung auch eine Zunahme der Signalintensität der infraroten Strahlung verbunden ist. Dabei weisen die Beobachtungsfasern, deren Kerndurchmesser größer als  $300\text{ }\mu\text{m}$  ist, einen nahezu identischen Intensitätsverlauf auf. Lediglich für hohe Laserleistungen über  $300\text{ W}$  können für diese Beobachtungsfasern geringe Unterschiede im Verlauf des infraroten Signals festgestellt werden. Beobachtungsfasern mit kleinerem Kerndurchmesser zeigen für alle betrachteten Laserleistungen eine geringere Intensität und somit einen reduzierten Dynamikbereich.

Diese Untersuchungen des Laserschweißprozesses verdeutlichen, dass der Ursprung der infraroten Strahlung mit Beobachtungsfasern ab einem Kerndurchmesser von  $300\text{ }\mu\text{m}$  vollständig abgebildet werden kann. Dabei beträgt der Durchmesser des Beobachtungsflecks der  $300\text{ }\mu\text{m}$ -Faser auf der Werkstückoberfläche  $450\text{ }\mu\text{m}$ . Folglich werden die relevanten Strahlungsanteile in einem radialsymmetrischen Bereich emittiert, welcher einen maximalen Durchmesser von  $450\text{ }\mu\text{m}$  aufweist.

Aufgrund des konstanten Abbildungsverhältnisses bilden die Beobachtungsfasern mit größerem Kerndurchmesser eine Fläche auf die Photodiode ab, deren Durchmesser größer als  $450\text{ }\mu\text{m}$  ist. Da bei der Verwendung dieser Beobachtungsfasern kein signifikanter Anstieg der Intensität beobachtet werden kann, ist zu folgern, dass die Randbereiche nur vernachlässigbar gering im infraroten Spektrum emittieren. Die geringfügigen Abweichungen für höhere Laserleistungen lassen sich durch die Verbreiterung der Naht bzw. der Keyholeöffnung und somit einer Vergrößerung des Ursprungs der infraroten Strahlung bei erhöhter Laserleistungen begründen.

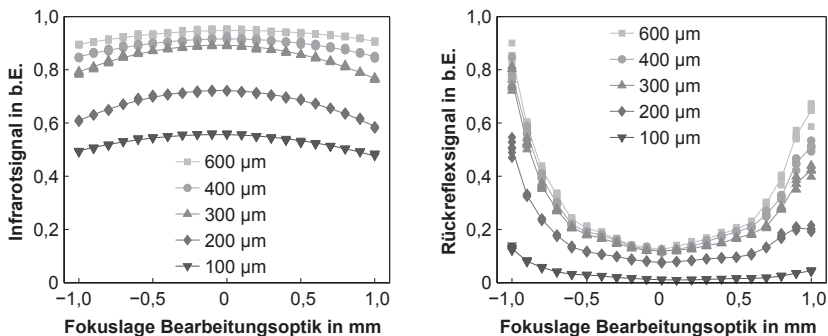
Bei der Verwendung von Beobachtungsfasern mit geringerem Kerndurchmesser kann nicht die gesamte Prozessstrahlung auf die Photodiode abgebildet werden, wodurch die Signale eine niedrigere Intensität und einen geringeren Dynamikbereich zeigen. Der Informationsgehalt der Signale aus der Wechselwirkungszone sinkt, da aufgrund des zu geringen Beobachtungsflecks Signalanteile abgeschnitten werden.

Die während des Schweißprozesses reflektierte Laserstrahlung zeigt, bezogen auf den Kerndurchmesser der Beobachtungsfaser, ein vergleichbares Verhalten. Dabei sinkt die Intensität für die  $100\text{ }\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser und die  $200\text{ }\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser stark ab, da auch hier nicht alle Strahlungsanteile auf die Photodiode abgebildet werden können. Beobachtungsfasern, deren Kerndurchmesser größer als  $300\text{ }\mu\text{m}$  ist, zeigen ein identisches Signalniveau bei gleicher Laserleistung. Die für die Infrarotstrahlung getroffenen Aussagen sind folglich übertragbar.

Die reflektierte Strahlung weist zusätzlich bei einer Laserleistung von 240 W ein Maximum der Intensität auf. Der untersuchte Prozess geht in diesem Bereich vom Wärmeleitungsschweißen in das Tiefschweißen über. Folglich wird mehr Laserleistung während der Wechselwirkung absorbiert, weshalb die Intensität der reflektierten Strahlung bei einem weiteren Anstieg der Laserleistung sinkt. Gleichzeitig ist für geringere Laserleistungen eine sehr hohe Streuung zu beobachten. Verursacht wird diese durch die Oberflächenbewegungen der flüssigen Schmelze bei einem noch nicht vollständig ausgebildeten Keyhole. Die Intensität der rückreflektierten Strahlung ist folglich abhängig vom Oberflächenwinkel der Schmelze im Auftreffpunkt des Lasers. Eine Prozessüberwachung mit Hilfe der reflektierten Strahlung nach [23] ist deswegen im hier betrachteten Bereich nicht bzw. nur eingeschränkt möglich.

### Variation der Fokusslage der Bearbeitungsoptik

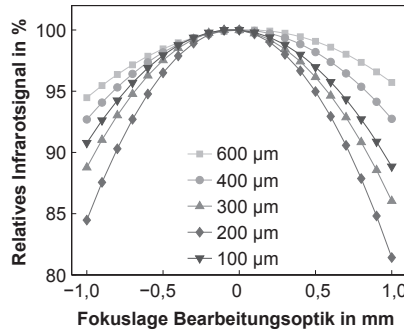
Die Schweißungen bei einer Fokusslagenvariation der Bearbeitungsoptik werden mit einer konstanten Leistung von 350 W durchgeführt. Die Faserkopplung der Sensorik ist für jeden Faserdurchmesser derart justiert, dass Schweißungen im Laserfokus maximale Intensität zeigen. Bild 4.3 stellt diese Zusammenhänge dar.



**Bild 4.3:** Infrarotsignal und Rückreflexsignal dargestellt in Abhängigkeit der Fokusslage der Bearbeitungsoptik für verschiedene Durchmesser der Beobachtungsfaser, Schweißungen auf Blindproben mit einer Wandstärke von 1 mm ohne Schutzgas,  $P_L = 350$  W,  $d_f = 225$  µm,  $v = 1,75$  m/min.

Die in die Beobachtungsfaser eingekoppelten Intensitäten der infraroten und rückreflektierten Strahlung unterscheiden sich ab einem Durchmesser von 300 µm nur unwesentlich. Für kleinere Fasern sinkt die Intensität bei identischer Fokusslage ab. Dieses Verhalten ist äquivalent zur Leistungsvariation im vorherigen Abschnitt.

Bei einer genauen Betrachtung der relativen Infrarotsignale in Bild 4.4 zeigen sich eindeutige Unterschiede im Krümmungsverhalten der Kurvenverläufe. Dabei sind die Infrarotsignale auf das Maximum der Intensität normiert.



**Bild 4.4:** Relatives Infrarotsignal in Abhängigkeit der Fokusslage für verschiedene Durchmesser der Beobachtungsfaser, Schweißungen auf Blindproben mit einer Wandstärke von 1 mm ohne Schutzgas,  $P_L = 350$  W,  $d_f = 225$  µm,  $v = 1,75$  m/min.

Für die größte betrachtete Beobachtungsfaser mit einem Durchmesser von 600 µm ist lediglich ein durchschnittlicher Rückgang des relativen Infrarotsignals um ca. 5 % in den Randlagen zu beobachten. Im Gegensatz dazu fällt die normierte Intensität der 200 µm-Beobachtungsfaser für eine Fokussierung unterhalb der Bauteiloberfläche auf bis zu 81 % ihres maximalen Wertes ab.

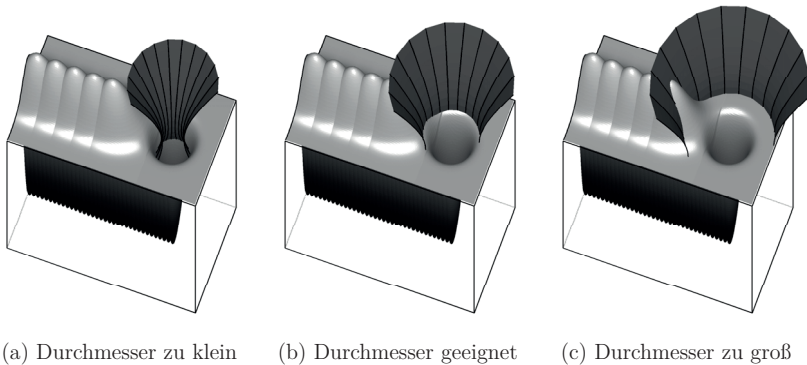
Dieses Verhalten lässt sich mit Hilfe der sich vergrößernden Ausdehnung der Dampfkapillare und der Verbreiterung der Naht in den defokussierten Bereichen erklären. Die 600 µm-Beobachtungsfaser kann mit ihrem Beobachtungsfleck von 900 µm diese Veränderung in den defokussierten Bereichen vollständig abbilden. Folglich ist sie zur Prozessüberwachung ungeeignet, da Abweichungen der Fokusslage unzureichend auf das Sensorsystem abgebildet werden. Bei der Verwendung kleinerer Fasern verringert sich der um das Keyhole betrachtete Bereich, und die Intensität fällt in den Randbereichen prozentual stärker ab. Wird der Durchmesser der Faser zu gering gewählt, so kehrt sich der beschriebene Effekt um. Die 100 µm-Beobachtungsfaser mit einem Beobachtungsfleck von 150 µm bildet einen Bereich auf die Photodiode ab, der kleiner als der Fokussdurchmesser der Laserstrahlung ist. Dieser entspricht in der Tiefschweißphase ungefähr den Abmessungen der Dampfkapillare. Änderungen in den Randbereichen der Fokusslage lassen sich folglich nicht mehr detektieren, und das relative Infrarotsignal vergrößert sich im Vergleich zur 200 µm-Beobachtungsfaser.



### Zusammenfassung

Sowohl die Variation der Laserleistung als auch der Fokusbildung zeigen, dass für Faserdurchmesser größer als 300  $\mu\text{m}$  die Intensität nahezu identisch ist. Bei einer zusätzlichen Berücksichtigung der Krümmung der relativen Intensitätsverläufe für die Fokusbildung bildet die 200  $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser eine Grenze nach unten. Mit kleineren Fasern lässt sich die Defokussierung der Bearbeitungsoptik nicht mehr ausreichend abbilden. Folglich sollten im beschriebenen Prozessfenster Beobachtungsfasern mit Durchmessern im Bereich von 200  $\mu\text{m}$  bis 300  $\mu\text{m}$  für eine geeignete Überwachung verwendet werden.

Die Verallgemeinerung dieser Untersuchungen ermöglicht die Definition prinzipieller Auswahlregeln für die Beobachtungsfaser. Der Durchmesser der Beobachtungsfaser muss unter Berücksichtigung der Abbildungsverhältnisse derart gewählt werden, dass ein Beobachtungsfleck realisiert wird, welcher der Keyholeöffnung entspricht. Bild 4.5 verdeutlicht dies, indem der Beobachtungsbereich verschiedener Faserdurchmesser bei identischem Abbildungsmaßstab dargestellt wird.



**Bild 4.5:** Größe des Beobachtungsflecks und Strahlkegels für verschiedene Durchmesser der Beobachtungsfaser bei konstantem Abbildungsverhältnis.

Durch einen zu klein gewählten Beobachtungsfleck gelangen nicht alle relevanten Signalanteile in die Faser, da der Strahlkegel im Keyholebereich einen zu geringen Durchmesser aufweist. Ein zu groß gewählter Messfleck fokussiert stattdessen auch Signalanteile des Schmelzbades und des Keyholeumfeldes auf das Faserende. Bei der korrekten Wahl der Beobachtungsfaser werden Informationen aus dem direkten Keyholeumfeld der Sensorik zugeführt.

### 4.2.3 Positioniergenauigkeit der Faserkopplung

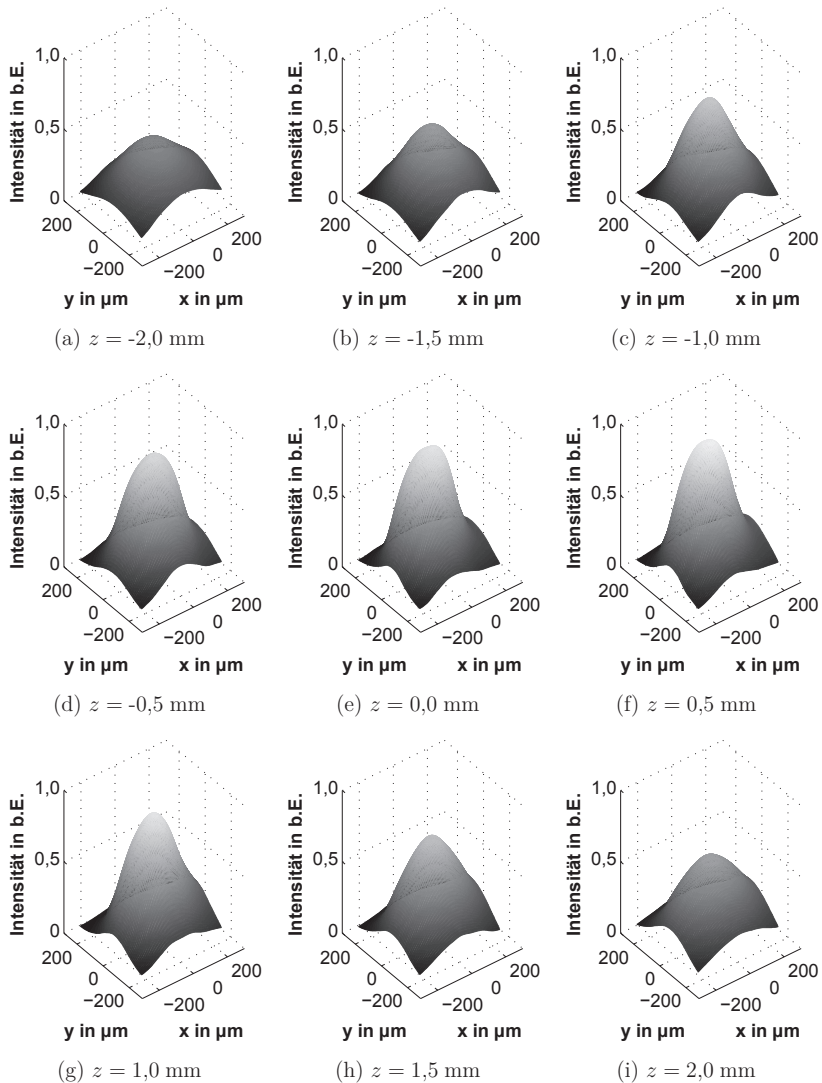
Neben der Wahl der Beobachtungsfaser ist auch ihre korrekte Justage von zentraler Bedeutung. Die sechs Freiheitsgrade lassen sich durch den Sensoraufbau auf drei Translationsfreiheitsgrade beschränken, indem die Rotationsfreiheitsgrade durch eine entsprechende Führung eliminiert werden. Die Faserkopplung ist in Richtung der optischen Achse und quer dazu mit Mikrometerschrauben feinjustierbar.

Bild 4.6 zeigt Intensitätsprofile von Laserschweißungen mit 365 W. Die  $z$ -Position der Faserkopplung wird in  $\Delta z = 0,5$  mm-Schritten, die  $x$ -Position und die  $y$ -Position in  $\Delta x = \Delta y = 63,5$   $\mu\text{m}$ -Schritten variiert. Die  $z$ -Achse ist in Ausbreitungsrichtung der Prozesssekundärstrahlung, die  $x$ -Achse in Schweißrichtung und die  $y$ -Achse quer dazu orientiert. Die Faserposition, bei welcher die höchste Intensität gemessen wird, definiert den Ursprung. Für Werte  $x > 0$  wird folglich die Wechselwirkungszone im Vorlauf und für  $x < 0$  im Nachlauf überwacht. Parallel dazu wird mit einer zweiten ideal positionierten Beobachtungsfaser ein Referenzsignal aufgezeichnet. Durch die Bildung eines Relativsignals lassen sich Prozessschwankungen der Einzelmessungen eliminieren. Die Messung erfolgt mit einer 300  $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser.

Die Intensitätsprofile zeigen eine starke Abhängigkeit in allen Raumrichtungen. Entlang der optischen Achse erreicht die Intensität bei  $z = 0,0$  mm ihr Maximum und fällt durch die Strahltaillierung in beiden Richtungen wieder ab. In den Ebenen senkrecht dazu führt bereits ein geringer Versatz zu einem erheblichen Abfall der Intensität. Eine exakte Justage der Faserkopplung muss gefordert werden.

Die Intensitätsprofile weisen in Ebenen senkrecht zur Strahlachse eine annähernd radialsymmetrische Form auf. Daraus folgt, dass der Ursprung der Infrarotstrahlung ebenfalls radialsymmetrisch geformt ist und das Keyhole als Emissionszentrum angenommen werden kann. Lediglich für die Positionen  $z = -0,5/0,0/0,5$  mm ist eine asymmetrische Verbreiterung in Schweißrichtung zu beobachten.

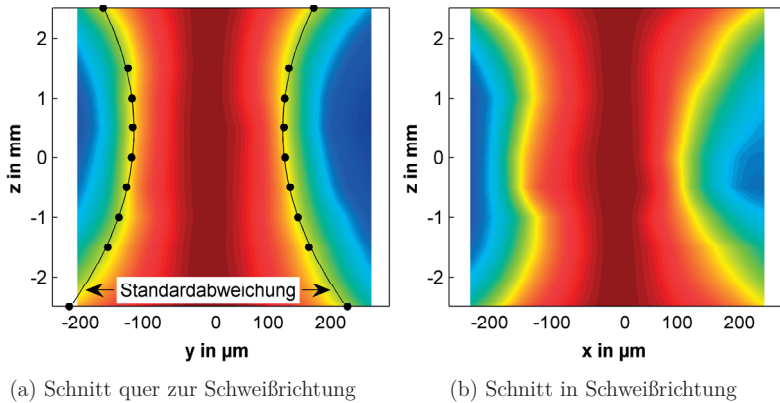
Bei einer genauen Betrachtung ist festzustellen, dass die gemessene Intensität, ausgehend von ihrem Maximum, im Nachlauf des Laserstrahls langsamer abfällt als im Vorlauf. Diese Asymmetrie deutet auf einen in Schweißrichtung verlängerten Keyholebereich hin. Des Weiteren führt die vom Schmelzbad emittierte Infrarotstrahlung zu einem Anstieg der Intensität im Nachlauf, welche den zuvor beschriebenen Effekt vertärkt. Für weitere  $z$ -Positionen kann diese Asymmetrie aufgrund der starken Defokussierung der Beobachtungsfaser nicht detektiert werden.



**Bild 4.6:** Intensitätsprofile der Infrarotsignale bei einer Variation der Position der Faserkopplung in Schweißrichtung ( $x$ ) und quer zur Schweißrichtung ( $y$ ) für unterschiedliche Abstände der Faserkopplung zur Fokussierlinse ( $z$ ) bei Schweißungen ohne Schutzgas,  $P_L = 365$  W,  $d_f = 225$   $\mu\text{m}$ ,  $v = 1,75$  m/min.

#### 4.2.4 Strahlungsprofile des Schweißprozesses

Bild 4.7 zeigt die Strahlungsprofile des Laserschweißprozesses als Schnitte durch die in Kapitel 4.2.3 untersuchten Intensitätsprofile. Im Strahlungsprofil quer zur Schweißrichtung sind der beschriebene symmetrische Verlauf und die Taillierung der Strahlung zu erkennen. In Schweißrichtung ergibt sich durch die Deformierung des Keyholes und das Schmelzbad ein asymmetrischer Verlauf des Profils.



**Bild 4.7:** Strahlungsprofile des Laserschweißprozesses bei Schweißungen ohne Schutzgas, dargestellt als Schnitt durch die Intensitätsprofile in Schweißrichtung und quer zur Schweißrichtung,  $P_L = 365$  W,  $d_f = 225$  µm,  $v = 1,75$  m/min.

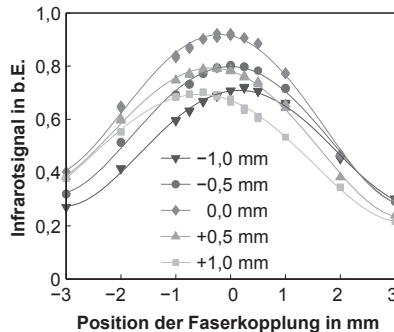
Zur Analyse der Strahlungsprofile sind die Intensitätsprofile des Schweißprozesses (siehe Bild 4.6) in den Messebenen durch asymmetrische Gaußsche Glockenkurven angenähert. Die daraus abgeleiteten Standardabweichungen entlang der Hauptachsen werden als idealisierte Kenngröße des Intensitätsprofils verwendet. Dabei gibt die Standardabweichung quer zur Schweißrichtung gemäß Definition den Abstand vom Maximum, innerhalb dessen ungefähr 68,3 % der Gesamtintensität liegt. Für die Standardabweichung in Schweißrichtung gilt diese Aussage äquivalent, wobei zusätzlich die Deformation des Keyholes und der Strahlungsanteil des Schmelzbades berücksichtigt werden müssen. Die Standardabweichungen sind aus diesem Grund nur für den Schnitt quer zur Schweißrichtung in Bild 4.7 (a) dargestellt.

Der minimale Abstand der in Bild 4.7 dargestellten Strahltaille beträgt 252 µm, so dass bei der Verwendung einer 300 µm-Beobachtungsfaser mindestens 68,3 % der Strahlung in die Faser eingekoppelt wird. Da Randstrahlungen im Allgemeinen nur

von nachgeordneter Wichtigkeit und mitunter für die Qualität der Sensorik nachteilig sind, sollte ein größerer Faserdurchmesser nicht verwendet werden. Dies deckt sich mit den Untersuchungen zum optimalen Faserdurchmesser aus Kapitel 4.2.2, welche belegen, dass der optimale Durchmesser der Beobachtungsfaser für das betrachtete Prozessfenster zwischen 200  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$  liegt.

#### 4.2.5 Fokusslage der Faserkopplung bei defokussierter Optik

In den vorangegangenen Kapiteln wurde deutlich, dass für eine optimale Ausnutzung der Beobachtungsfaser und für eine entsprechend hohe Qualität der Sensorsignale die Position der Faserkopplung sehr genau einzustellen ist. Nun wird untersucht, wie sich die bestmögliche Position der Faserkopplung durch eine Defokussierung der Bearbeitungsoptik verändert. Die Schweißungen werden mit einer konstanten Laserleistung von 365 W durchgeführt. In der Ebene senkrecht zur optischen Achse ist die Faserkopplung jeweils auf die maximale Signalintensität justiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 4.8 dargestellt.

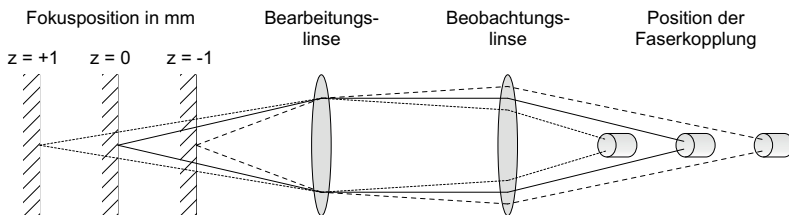


**Bild 4.8:** Infrarotsignal in Abhängigkeit der Position der Faserkopplung für verschiedene Fokuspositionen der Bearbeitungsoptik bei Laserschweißungen ohne Schutzgas,  $P_L = 365 \text{ W}$ ,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Dabei sind drei Haupteinflüsse auf die gemessene Intensität der Infrarotsignale zu berücksichtigen. Eine Veränderung der Position der Beobachtungsfaser entlang der optischen Achse, ausgehend von der Stelle maximaler Intensität, führt zu einer Verringerung der eingekoppelten Signalamplitude. Verursacht wird dieser Rückgang durch die Taillierung der Strahlung. Diese Auswirkung einer Variation entlang der optischen Achse wurde in Kapitel 4.2.3 ausführlich diskutiert.

Des Weiteren zeigt sich, dass eine Defokussierung der Schweißoptik bei konstanter Positionierung der Beobachtungsfaser ein Absinken der eingekoppelten Intensität zur Folge hat. Bild 4.8 belegt dies für Defokussierungen bis zu  $\pm 1$  mm. Dieser Rückgang der Signalintensität wird durch die Reduzierung der Einschweißtiefe bei defokussierten Schweißungen mit konstanter Leistung verursacht. Der genaue Zusammenhang zwischen Einschweißtiefe und gemessener Intensität der infraroten Strahlung wird in Kapitel 4.3 untersucht.

Ein dritter Einfluss bildet die Verlagerung des Maximums der in die Beobachtungsfaser eingekoppelten Intensität. Dabei verschiebt sich das detektierte Maximum der Intensität für eine Fokusposition der Bearbeitungsoptik  $z > 0$  entlang der negativen  $z$ -Achse und für  $z < 0$  äquivalent in Richtung der positiven  $z$ -Achse. Dieses Verhalten entsteht dadurch, dass die Beobachtungsstrahlen bei einer Defokussierung der Schweißoptik die Bearbeitungslinse unter einem anderen Winkel verlassen. Aufgrund dessen werden sie auch in einem anderen Punkt fokussiert. Bild 4.9 zeigt diesen Zusammenhang.



**Bild 4.9:** Darstellung zur Verdeutlichung der Verschiebung der Fokusposition der Faserkopplung bei einer Defokussierung der Bearbeitungsoptik.

### 4.3 Korrelation von Signalen zu Nahtkenngrößen

Für eine sichere Überwachung und Regelung von Laserschweißprozessen mit der beschriebenen Sensorik muss eine Korrelation zwischen den Nahtkenngrößen bzw. Nahtfehlern und den Signalintensitäten existieren. Nur dann kann von beobachteten charakteristischen Verläufen der Sensorsignale auf Nahtkenngrößen und eventuelle Defekte geschlossen werden. Sind für einen möglichen Signalzustand mehrere Ausprägungen der Nahtkenngrößen vorhanden, kann eine eindeutige Zuordnung nicht oder nur bereichsweise erfolgen. Dementsprechend ist für eine sichere Detektion ein abschnittsweise eindeutiger Zusammenhang beider Kenngrößen notwendig.

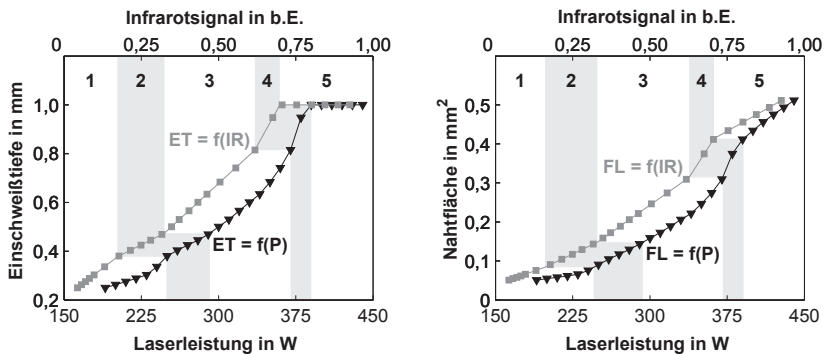
### 4.3.1 Betrachtete Nahtkenngrößen

Die in Kapitel 3.5 vorgestellten Probekörper werden ausschließlich im Überlappstoß gefügt. Andere Nahtgeometrien, wie beispielsweise der Stumpfstoß, stellen sehr hohe Ansprüche an die Positioniergenauigkeit der Fügepartner, so dass eine Analyse grundlegender Zusammenhänge von Sensorsignalen und Nahtkenngrößen erschwert wird. Für Verbindungen im Überlappstoß ist die vorrangig zu überwachende Kenngröße die Einschweißtiefe. Anhand dieser kann festgestellt werden, ob eine ausreichende Anbindung des unteren Fügepartners realisiert werden konnte.

Als weitere Kenngröße der Schweißverbindung wird die aufgeschmolzene Nahtfläche betrachtet. Diese Kenngröße ist sehr eng mit der während des Wechselwirkungsprozesses vom Werkstück absorbierten Laserleistung verbunden. Die Nahtfläche kann allerdings nur bei einer Anfertigung von Querschliffen vermessen werden. Soll die Einschweißtiefe hochaufgelöst aus Längsschliffen bestimmt werden, kann keine parallele Auswertung der Nahtfläche erfolgen.

### 4.3.2 Korrelation durch Variation der Laserleistung

Bild 4.10 zeigt den Verlauf der mittleren Einschweißtiefe und der mittleren Nahtfläche bei einer Variation der Laserleistung von 190 W bis 440 W. Zusätzlich sind die untersuchten Nahtkenngrößen als Funktion der gemittelten Intensitäten der Infrarotsignale dargestellt.



**Bild 4.10:** Einschweißtiefe und Nahtfläche in Abhängigkeit der Laserleistung und des Infrarotsignals, kein Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Die grau hinterlegten Bereiche der Abbildung dienen zur Verdeutlichung von Teilabschnitten des Schweißprozesses, welche im weiteren Verlauf genauer beschrieben werden. Des Weiteren sorgen sie für eine Verbindung der beiden Abszissen. Dazu wird die Laserleistung über die Kurve  $ET=f(P)$  mit der Einschweißtiefe verknüpft, die sich nach einer Horizontalbewegung mit Hilfe der Kurve  $ET=f(IR)$  auf das Infrarotsignal übertragen lässt. (z. B.:  $370\text{ W} \rightarrow 810\text{ }\mu\text{m} \rightarrow 0,61$ )

Die Steigerung der Laserleistung bei Schweißungen ohne Schutzgas bildet sich in dem dafür typischen, progressiven Wachstum der Einschweißtiefe ab. Dagegen zeigt die Betrachtung der Einschweißtiefe in Abhängigkeit des Infrarotsignals einen abschnittsweise linearen Zusammenhang zwischen beiden Kenngrößen. Dabei kann der Verlauf der Einschweißtiefe in fünf Teilbereiche gegliedert werden, welche in Bild 4.10 entsprechend gekennzeichnet sind. In den dargestellten Bereichen steigt die Einschweißtiefe jeweils proportional zum Infrarotsignal an. Die Grenzen sind durch die Schnittpunkte der linearen Regressionsgeraden definiert.

Die mittlere Nahtfläche in Abhängigkeit der Laserleistung zeigt zunächst einen progressiven und anschließend einen degressiven Verlauf. Dagegen kann bei der Betrachtung der mittleren Nahtfläche als Funktion der mittleren Signalintensität des infraroten Strahlungsspektrums eine zur Einschweißtiefe äquivalente Beziehung aus Bild 4.10 abgeleitet werden. Die Gliederung des Kurvenverlaufs in fünf lineare Teilabschnitte ist ebenfalls deutlich zu erkennen. Die Grenzen der Bereiche sind nahezu identisch zu denen der zuvor betrachteten mittleren Einschweißtiefe. Diese Tatsache legt die Vermutung nahe, dass sich die linearen Teilabschnitte im Verlauf der Nahtkenngrößen durch prozessbedingte Vorgänge während der Schweißung ausbilden. Die Interpretation der einzelnen Phasen, bezogen auf den Schweißprozess, erfolgt in Kapitel 4.5 mittels Schliffbildern, Highspeed- und Thermographieaufnahmen.

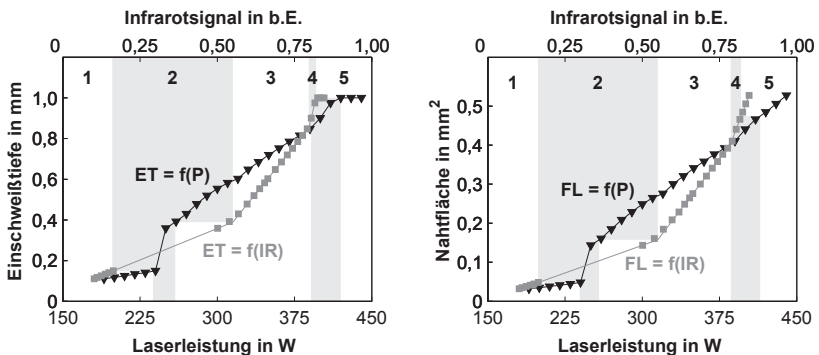
Die Linearitätsbeziehungen der Signalintensität der infraroten Strahlung und der Nahtkenngrößen ermöglichen eine Qualitätsbeurteilung der mittleren Einschweißtiefe durch eine Überwachung der mittleren Signalintensität. Beispielsweise können dabei statische oder dynamisch angepasste Toleranzbänder für die einzelnen Phasen verwendet werden. Eine Verletzung der definierten Bänder wird als Indikator für einen möglichen Schweißfehler durch eine Abweichung der Einschweißtiefe verwendet. An den Grenzen der dargestellten linearen Bereiche wird die Überwachung durch die sich ändernde Geradensteigung erschwert. Auch für eine Prozessregelung muss dieses Verhalten berücksichtigt werden, da die sich ändernde Geradensteigung zu einem geänderten Reglerverhalten führen kann.



### 4.3.3 Einfluss von Schutzgas auf die Korrelation

Der eindeutige, abschnittsweise lineare Zusammenhang zwischen Nahtkenngrößen und beobachteten Sensorsignalen wurde im vorangegangenen Kapitel für Laserschweißungen ohne Schutzgaseinfluss abgeleitet. Dabei gliedert sich der betrachtete Schweißbereich in fünf Teilabschnitte. Beim industriellen Einsatz des Laserstrahlschweißens kommen häufig Schutzgase zum Einsatz, so dass die zuvor dargestellten Ergebnisse auf Schweißungen mit Schutzgas überführt werden müssen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der inerten Schutzgase Stickstoff, Argon und Helium auf die gefundenen Korrelationsbeziehungen untersucht.

Die Variation der Nahtgeometrie wird mittels einer Veränderung der Laserleistung realisiert. Bild 4.11 zeigt die Zusammenhänge zwischen dem Infrarotsignal, der Laserleistung, der Einschweißtiefe und der Nahtfläche für Schweißungen mit Stickstoff als Schutzgas.



**Bild 4.11:** Einschweißtiefe und Nahtfläche in Abhängigkeit der Laserleistung und des Infrarotsignals bei Laserschweißungen mit Stickstoff als Schutzgas (10 l/min),  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Auch für Schutzgase können Bereiche mit linearem Zusammenhang zwischen der Einschweißtiefe und der Signalintensität definiert werden. Diese sind in Bild 4.11 für Schweißungen mit Stickstoff als Schutzgas eingezeichnet. Die Bereichsgrenzen und die Signalverläufe der inerten Schutzgase Argon und Helium sind in Anhang A.2 dargestellt. Sie weichen nur minimal von den hier gezeigten Ergebnissen für Stickstoff ab. Die nachfolgenden Untersuchungen zum Einfluss von Schutzgasen auf die Signale und auf die Regelung werden aus diesem Grund auf Stickstoff beschränkt.

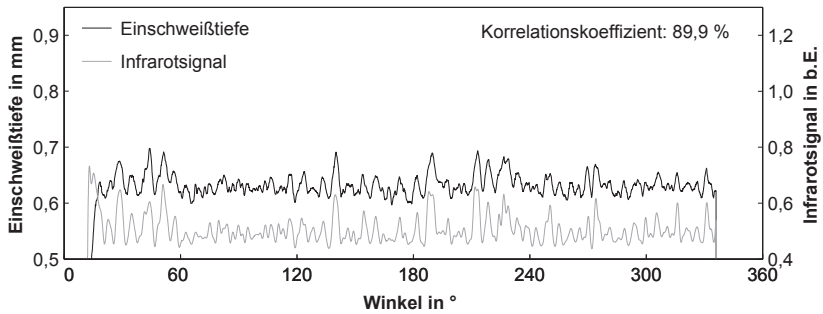
Besonders zu beachten ist der sprunghafte Anstieg der Einschweißtiefe und der Nahtfläche in Phase zwei. Eine detaillierte Analyse zeigt, dass für Stickstoff keine Schweißung eine Einschweißtiefe im Bereich zwischen 155  $\mu\text{m}$  und 340  $\mu\text{m}$  aufweist. Eine analoge Aussage folgt für die Nahtfläche. Begleitet wird diese Änderung der Nahtkenngrößen von einem sprunghaften Anstieg des Infrarotsignals. Eine genauere Untersuchung dieses Phänomens und der Prozessphasen erfolgt in Kapitel 4.5.

## 4.4 Mikrokorrelation der Einschweißtiefe

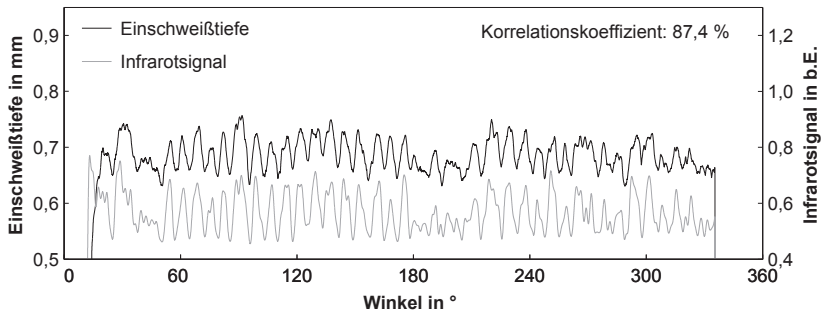
Der in Kapitel 4.3 gezeigte Zusammenhang zwischen den mittleren Nahtkenngrößen und Infrarotsignalen führt zu einer eindeutigen Beziehung der Kenngrößen im makroskopischen Rahmen. Dieser eindeutige, abschnittsweise lineare Zusammenhang ermöglicht eine Überwachung des Schweißprozesses auf makroskopischer Ebene.

Prozessbedingte Schwankungen hochdynamischer Ergebnisgrößen beim Laserstrahlschweißen zeichnen sich allerdings nicht nur auf makroskopischer, sondern verstärkt auf mikroskopischer Ebene ab. Eine zeitlich hochaufgelöste Prozessüberwachung ist folglich nur dann realisierbar, wenn sich diese Störungen auch im Signalverlauf abbilden. Bild 4.12 zeigt die Gegenüberstellung von Einschweißtiefen- und Signalverläufen für verschiedene Laserleistungen im mikroskopischen Bereich.

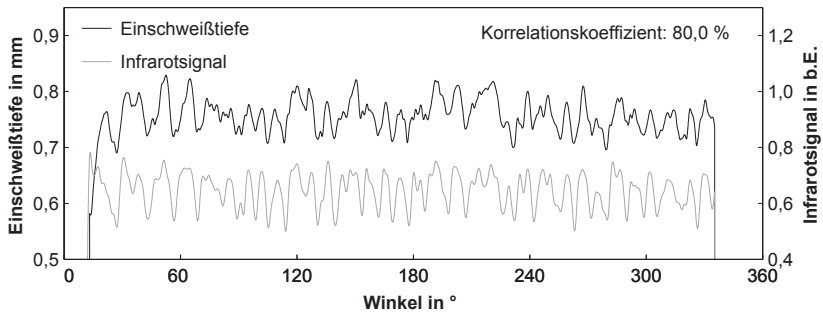
Bild 4.12 vernachlässigt jedoch die tatsächliche zeitliche Differenz, welche zwischen den zu korrelierenden Prozessgrößen auftritt. Ein Ansteigen des Infrarotsignals ist die Folge einer erhöhten Abstrahlleistung des Keyholebereichs, welche sich in einer Vergrößerung der Einschweißtiefe niederschlägt. Da sich diese Veränderung der Einschweißtiefe verglichen mit der Ausbreitung der Prozessekondärstrahlung langsam vollzieht, ist zu erwarten, dass die Einschweißtiefe dem Sensorsignal hinterherhinkt. Gleichzeitig stellt sich jedoch durch die digitale Filterung der Sensorsignale ein entgegengesetzter Zeitverzug zwischen dem dargestellten gefilterten und dem ungefilterten Sensorsignal ein (vgl. Kapitel 5.1.2). Die zeitliche Differenz lässt sich nicht ermitteln, da bei der Schliffpräparation Start- und Endpunkte der Schweißung nur unzureichend genau aufgelöst werden können. Somit ist die Erzeugung eines eindeutigen Triggerimpulses zu den Sensorsignalen nicht möglich. Untersuchungen zur Ermittlung des zeitlichen Verzugs zwischen den Prozessgrößen mit Hilfe einer Kreuzkorrelation zeigen stark variierenden Ergebnissen, da die Bestimmung des Start- bzw. Endpunktes des Einschweißtiefenverlaufs stark subjektiv geprägt ist.



(a) Mikrokorrelation für eine Laserleistung von 350 W



(b) Mikrokorrelation für eine Laserleistung von 360 W



(c) Mikrokorrelation für eine Laserleistung von 370 W

**Bild 4.12:** Mikrokorrelation des Infrarotsignals zur Einschweißtiefe für Schweißungen ohne Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Die qualitative Analyse der Verläufe von Einschweißtiefe und Infrarotsignal zeigt, dass auch auf mikroskopischer Ebene ein eindeutiger Zusammenhang besteht. Dabei kann nahezu jeder Abweichung der Einschweißtiefe eine entsprechende Veränderung des Infrarotsignals zugeordnet werden. Die Korrelationskoeffizienten der Kurven ermöglichen demgegenüber eine quantitative Beschreibung des Zusammenhangs. Auch sie belegen, dass durch die Analyse des Signalverlaufs auf die Einschweißtiefe geschlossen werden kann. Folglich behält die Korrelation auch bei einer hochauflösenden Betrachtung auf mikroskopischer Ebene ihre Gültigkeit.

In den in Kapitel 2 dargestellten Arbeiten zum Stand der Technik wurde bereits von einem grundsätzlichen Zusammenhang zwischen verschiedenen Sensorsignalen und der Einschweißtiefe auf makroskopischer Skala berichtet. Die Untersuchungen dieses Kapitels erweitern diese prinzipielle Abhängigkeit zu einer eindeutigen Korrelation der Prozessgrößen auch auf mikroskopischer Skala. Wichtigste Voraussetzung für diese Ergebnisse ist die hochauflösende Vermessung der Einschweißtiefe im Längsschliff nach dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und in Kapitel 3.4 vorgestellten Verfahren. Dadurch konnten erstmalig optisch gefilterte Signale des Laserschweißprozesses identifiziert werden, welche stark zu der Einschweißtiefe korreliert sind. Die grundsätzlichen Untersuchungen zur Signalqualität in Kapitel 4.2 verdeutlichen dabei die Relevanz einer möglichst hohen Signalgüte für die Ermittlung eines funktionalen Zusammenhangs zu Ergebnisgrößen des Laserschweißprozesses. Zusätzlich wurde durch den vom Schweißprozess entkoppelten Sensoraufbau und den damit verbundenen Schutz der sensitiven Auswerteelektronik eine Störung der Signale durch elektromagnetische Streustrahlung vermieden. Das Zusammenspiel dieser Faktoren ermöglichte im Rahmen dieser Arbeit eine Mikrokorrelation von Einschweißtiefe und Sensorsignalen mit Korrelationskoeffizienten bis zu 89,9%.

## 4.5 Prozessphasen

In Kapitel 4.3.2 und Kapitel 4.3.3 wurde ein linearer Zusammenhang der mittleren Nahtkenngrößen und der Signalintensitäten des Infrarotsignals bei einer Variation der Laserleistung beobachtet. Da die beschriebenen Bereiche sowohl für die mittlere Einschweißtiefe als auch für die mittlere Fläche der Schweißnaht existieren, muss eine enge Verbindung mit prozessbedingten Vorgängen beim Laserstrahlschweißen vorliegen. In diesem Kapitel wird eine Verknüpfung zwischen den beobachteten linearen Bereichen und den Phasen des Schweißprozesses abgeleitet.

Mittels Schliffbildern, Highspeed- und Thermographiaufnahmen werden den beschriebenen linearen Bereichen Änderungen im Laserschweißprozess zugeordnet. Dabei erfolgt eine getrennte Betrachtung für Schweißungen mit und ohne Schutzgas, da sich die jeweiligen charakteristischen Signalverläufe der beiden Prozesse grundlegend unterscheiden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich die unterschiedliche Ausgestaltung der zuvor beschriebenen linearen Bereiche des Schweißprozesses genauer untersucht. Für eine umfassende Darstellung des Einflusses der Umgebungsatmosphäre und im Speziellen des Einflusses von Schutzgasen auf das Schweißergebnis sei auf [5] verwiesen. Die Autoren geben einen detaillierten Überblick über die Auswirkungen des Metaldampf- bzw. Schutzgasplasmas und der Streuung in der Metaldampffackel auf die Strahlpropagation und somit das Prozessergebnis.

4.5.1 Prozessphasen für Schweißungen mit Stickstoff

Aus Bild 4.11 lassen sich für Schweißungen mit Stickstoff fünf Prozessphasen ableiten. Die definierten Bereiche zeichnen sich durch einen linearen Zusammenhang von Nahtkenngrößen und Infrarotsignalen aus. Diese Phasen unterscheiden sich durch die Steigungen der Korrelationsgeraden, deren Schnittpunkte die Grenzen des jeweiligen Bereichs definieren. Bild 4.13 stellt Schliffbilder, Highspeed- und Thermographiaufnahmen für die Prozessphasen gegenüber.

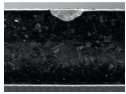
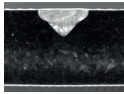
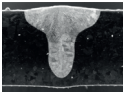
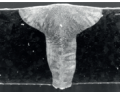


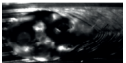
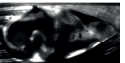

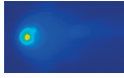
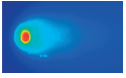
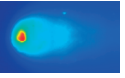
Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
	...			
	...			
	...			
Keyhole geschlossen		Keyhole geöffnet	Keyhole geöffnet	Keyhole geöffnet

Bild 4.13: Schliffbilder, Highspeed- und Thermographiaufnahmen zur Darstellung der Prozessphasen beim Schweißen mit Stickstoff.

Die dargestellten Einzelbilder der Highspeedaufnahme zeigen, dass sich in Phase eins noch keine Dampfkapillare im Schweißprozess ausgebildet hat. Daraus folgt die Zuordnung zum Wärmeleitungsschweißbereich. Unterstützt wird diese Aussage durch die Aufnahmen der Thermokamera, die im Bereich des Auftreffpunktes des Lasers lediglich eine geringe Emission infraroter Strahlung belegen. Ein vollständig ausgebildetes Keyhole ist auch hier nicht zu erkennen. Des Weiteren zeigt sich im Querschliff die charakteristische, linsenförmige Nahtgeometrie einer Wärmeleitungsschweißung, wodurch die Zuordnung der ersten Phase bestätigt wird.



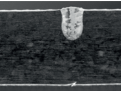

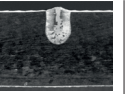






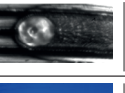

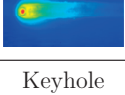




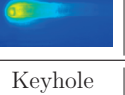
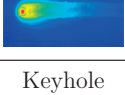

Die Prozessphase zwei kann bei Laserschweißungen unter Schutzgasatmosphäre nicht direkt beobachtet werden. In ihr findet ein sprunghafter Anstieg der Einschweißtiefe und der Nahtfläche statt. In der sich anschließenden Phase drei sind beide Nahtkenngrößen voll ausgeprägt. Dabei lässt sich ein stetiger Übergang mit der gegebenen zeitlichen Auflösung nicht beobachten. Sowohl die Aufnahmen der Highspeedkamera als auch der Thermokamera zeigen ein quasi instantanes Öffnen der Dampfkapillare. Somit bildet Phase zwei die Schwelle zum Tiefschweißbereich, in der sich das Verhalten des Laserschweißprozesses schlagartig ändert.

Phase drei zeichnet sich durch eine Änderung der Geometrie der Naht im Querschliff aus, da die sich ausbildende Dampfkapillare ein Anwachsen der Einschweißtiefe bewirkt. Dieses Verhalten kann mit Hilfe der Highspeedaufnahmen belegt werden, die beim Auftreffpunkt des Lasers einen geöffneten Dampfkanal zeigen. Dabei zeigt die dargestellte Momentaufnahme noch ein verhältnismäßig kurzes Schmelzbad. Des Weiteren wird aus den Thermographieaufnahmen deutlich, dass die Infrarotemission im Wechselwirkungsbereich stark ansteigt. Verursacht wird dieser Anstieg durch die Vergrößerung der abstrahlenden Fläche und die geänderte Abstrahlcharakteristik durch das weitere Aufheizen des Bauteils. Diese Zunahme der Emission ist ebenfalls im Verlauf der mit der Photodiode gemessenen Intensität erkennbar.

Phase vier ist durch einen weiteren Anstieg der Steigung der Korrelationsgeraden für die Einschweißtiefe und Nahtfläche gekennzeichnet. Bezogen auf die Einschweißtiefe ist der Übergang von Phase drei in Phase vier für Schweißungen mit Stickstoff bei  $853\text{ }\mu\text{m}$  zu finden. Die Übergänge für die Schutzgase Helium ( $905\text{ }\mu\text{m}$ ) und Argon ( $860\text{ }\mu\text{m}$ ) weichen nur gering ab. Dabei ist Phase vier nicht prozessbedingt, sondern lediglich geometriebedingt begründbar. Durch die geringe Restwandstärke von ungefähr  $100\text{ }\mu\text{m}$  bis  $150\text{ }\mu\text{m}$  wird aufgrund des Wärmestaus an der Bauteilrückseite eine Beschleunigung des Prozessfortschrittes verursacht. Die sich anschließende Phase fünf ergibt sich durch die vollständige Durchschweißung des Rohres.

4.5.2 Prozessphasen für Schweißungen ohne Schutzgas

Der Vergleich von Schweißungen mit und ohne Schutzgas zeigt Unterschiede in den charakteristischen Signalverläufen. Während Phase zwei für Schweißungen mit Schutzgas sprunghaft verläuft, ergibt sich für Schweißungen ohne Schutzgas ein langsamer und instabiler Übergangsbereich von Phase eins in Phase drei. Da die übrigen Phasen identisch verlaufen, zeigt Bild 4.14 das Verhalten des Prozesses ohne den Einfluss von Schutzgas lediglich in den Phasen eins, zwei und drei.

Phase 1	Phase 2					Phase 3
						
						
						
Keyhole geschlossen	Keyhole geöffnet	Keyhole geschlossen	Keyhole geöffnet	Keyhole geschlossen	Keyhole geöffnet	Keyhole geöffnet

**Bild 4.14:** Schliffbilder, Highspeed- und Thermographieaufnahmen zur Darstellung der Prozessphasen beim Schweißen ohne Schutzgas.

Die Highspeedaufnahmen zeigen beim Wärmeleitungsschweißen in Phase eins eine geschlossene Dampfkapillare. Es schließt sich ein sehr instabiles Verhalten in Phase zwei an. Dies äußert sich in einem ständigen Wechsel zwischen Wärmeleitungs- und Tiefschweißen, gekennzeichnet durch das Ausbilden und Zusammenbrechen der Dampfkapillare. Selbst für eine geschlossene Dampfkapillare ist noch eine kleine Vertiefung der Schmelzbadoberfläche zu beobachten. Bei steigender Laserleistung in Phase zwei reduziert sich der Zeitabschnitt, innerhalb dessen das Keyhole geschlossen ist. Ab Phase drei ist eine dauerhafte Öffnung der Dampfkapillare zu beobachten.

Die sprunghafte Schwelle, welche sich für die Nahtkenngrößen und Sensorsignale bei Schweißungen mit Stickstoff ausbildet, kann bei Schweißungen ohne Schutzgas nicht beobachtet werden. Stattdessen verändert sie sich zu einem langgezogenen Übergangsbereich vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißeffekt. Unterstützt wird diese Feststellung durch die Aufnahmen der Thermokamera.

Im Übergangsbereich ist ein stetiger Wechsel von starken und schwachen Infrarotemissionen beim Auftreffpunkt des Lasers zu beobachten. Verursacht wird dieses Phänomen durch eine sich öffnende und schließende Kapillare. In den Schliffbildern der Phase zwei kann dieser Übergangsbereich nicht beobachtet werden, da die Einschweißtiefe nahezu kontinuierlich mit der Laserleistung ansteigt.

## 4.6 Zusammenfassung

Die beim Laserschweißen entstehenden Emissionen aus der Wechselwirkungszone wurden in diesem Kapitel detailliert analysiert. Untersuchungen zur Charakteristik der emittierten und reflektierten Strahlung und dem Einfluss des Sensorsystems konnten zu einem erweiterten Prozessverständnis zusammengeführt werden. Dies mündete in einer Korrelation von Infrarotsignalen und Nahtkenngrößen des Laserschweißprozesses auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene. Eine direkte Verknüpfung von Sensorsignalen und spezifischen Phasen des Schweißprozesses konnte für Schweißungen mit und ohne Schutzgas nachgewiesen werden.

Mit Hilfe von spektroskopischen Messungen wurden die Wellenlängenbereiche von 190 nm bis 1650 nm untersucht. Besonders im sichtbaren Spektrum zeigten sich starke Einflüsse der spektralen Kennlinien der optischen Komponenten. Eine Einschränkung des betrachteten Wellenlängenbereichs auf das infrarote Spektrum war die Folge. Beim Einsatz von Spektrometern konnte aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung eine Überwachung hochdynamischer Prozessgrößen, wie beispielsweise der Einschweißtiefe, nicht erfolgen. Aus diesem Grund wurde für die Folgemessungen ein photodiodenbasiertes Sensorsystem eingesetzt.

Die Faserkopplung und ihr Einfluss auf die Signalintensität des Sensorsystems wurde im weiteren Verlauf des Kapitels untersucht. Dabei wurde nachgewiesen, dass der Durchmesser der Beobachtungsfaser unter Berücksichtigung der spezifischen Abbildungsverhältnisse an die Größe der Wechselwirkungszone angepasst werden muss. Die korrekte mechanische Justage ist ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Signalgüte. Dabei konnte durch die Analyse von Strahlungsprofilen das Keyhole als Ursprung der infraroten Strahlung identifiziert werden. Eine Vermessung der Strahlungsprofile bestätigte die Ergebnisse der Untersuchungen zum Durchmesser der Beobachtungsfaser. Die Deformation des Keyholes in Schweißrichtung und der Einfluss des Schmelzbades zeichneten sich im Signal ab.



Bei der Untersuchung der Korrelation von Nahtkenngrößen zu Prozesssignalen wurde die Betrachtung auf den Verlauf der Einschweißtiefe und der Nahtfläche beschränkt. Für Schweißungen ohne Schutzgas konnten fünf lineare Bereiche beider Kenngrößen identifiziert werden, die sich nur durch die Steigung der Korrelationsgeraden unterschieden. Die Grenzen der Bereiche wurden durch die Schnittpunkte der Regressionsgeraden definiert, wobei für die Einschweißtiefe und die Nahtfläche nahezu identische Teilbereiche eingeführt werden konnten. Bei Schweißungen mit den Schutzgasen Stickstoff, Argon und Helium konnte ebenfalls ein Zusammenhang von Signalen und Nahtkenngrößen abgeleitet werden. Die Ausprägung der einzelnen Bereiche unterscheidet sich allerdings grundlegend von den Schweißungen ohne Schutzgas. Die Korrelationsbeziehung auf makroskopischer Skala wurde bei einer Betrachtung im Mikroskopischen nachgewiesen.

Die bei der Korrelation von Sensorsignalen zu Nahtkenngrößen definierten linearen Teilbereiche wurden den einzelnen Phasen des Schweißprozesses zugeordnet. Dabei sind der Wärmeleitungs- und Tiefschweißbereich für Schweißungen mit und ohne Schutzgas ähnlich ausgeprägt. Beim Übergangsbereich der beiden Prozessphasen zeigen sich jedoch große Unterschiede. Für Schweißungen mit Schutzgas verläuft der Übergang sprunghaft. Das quasi instantante Öffnen der Dampfkapillare, welches mit der zeitlichen Auflösung der Highspeedkamera nicht dargestellt werden konnte, ist mit einem starken Anwachsen der Einschweißtiefe und Nahtfläche verbunden. Für Schweißungen ohne Schutzgas verbreitert sich die beschriebene sprunghafte Schwelle zu einem Übergangsbereich zum Tiefschweißen.



## 5 Geregeltes Laserstrahlschweißen

Die in den vorangegangenen Kapitel vorgestellten Untersuchungen belegen, dass zwischen den beobachteten Sensorsignalen und den Nahtkenngrößen – im Speziellen der Einschweißtiefe – eine abschnittsweise lineare Korrelationsbeziehung besteht. Der Laserschweißprozess kann folglich mit Hilfe der Sensorik auf Basis der eindeutigen Beziehung der Kenngrößen überwacht werden. Schweißfehler lassen sich, beispielsweise durch eine Hüllkurvenüberwachung, detektieren. Verletzungen der Einhüllenden werden als Schweißfehler interpretiert, wodurch das Bauteil aus der Produktion ausgeschleust und wenn möglich der Nacharbeit zugeführt wird.

Die Reproduzierbarkeit von Laserschweißprozessen lässt sich erhöhen, indem durch gezielte Regeleingriffe Schweißfehler reduziert oder bestenfalls vermieden werden. Dabei werden Messgrößen des Prozesses durch eine Stellgröße derart beeinflusst, dass sie sich einem zuvor festgelegten Referenzwert annähern, wodurch sich eine Verbesserung des Schweißergebnisses ergibt. Eine derartige Regelstrategie kann dazu beitragen, die Quote an fehlerhaften Schweißungen zu verringern. Geregelte Prozesse haben in einer Großserienfertigung folglich das Potential, prozessbedingte Schwankungen zu reduzieren und die Ausschusskosten zu verringern.

In diesem Kapitel wird zunächst, basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Untersuchungen, ein Regelungssystem für den Laserstrahlschweißprozess aufgebaut. Die Einflüsse der digitalen Verarbeitung der Prozesssignale und die Reaktionszeiten des Lasers werden betrachtet, da sie entscheidenden Einfluss auf das Zeitverhalten des Regelkreises haben. Zur Beurteilung werden Kenngrößen eingeführt, die einen Vergleich von geregelten und gesteuerten Laserschweißungen ermöglichen. Die Einschweißtiefe stellt dabei die vorrangige Zielgröße für Schweißungen im Überlapp dar. Die vergleichenden Untersuchungen werden sowohl für prozessbedingte als auch für externe Störgrößen durchgeführt. Abschließend werden die Ergebnisse der Laserstrahlschweißungen unter Umgebungsatmosphäre auf Laserstrahlschweißungen mit Schutzgas überführt.

## 5.1 Aufbau der Regelung

Instabilitäten im Verlauf des Laserschweißprozesses sowie Einflüsse von externen Störgrößen können zu einer Verschlechterung der Schweißqualität beitragen. Eine Steigerung der Prozessstabilität von cw-Schweißungen kann durch die Entwicklung eines Konzepts zur Regelung des Laserprozesses erreicht werden. Dabei wird ein geschlossener Regelkreis durch eine Anpassung ausgewählter Laserparameter in Abhängigkeit aktuell gemessener Prozesszustände realisiert. Diese Rückkopplung der Prozesssignale mit Hilfe einer Stellgröße ermöglicht eine Steigerung der Qualität der Schweißverbindung und bedingt dadurch eine Reduzierung der Ausschussquote.

Während des Laserschweißprozesses können geometrische Nahtkenngrößen, wie beispielsweise die Einschweißtiefe, nicht oder nur mit unzureichender zeitlicher Auflösung gemessen werden. Die direkte Verwendung der Nahtkenngrößen als Eingangsgröße des Regelkreises ist demzufolge nicht möglich. Stattdessen muss, ausgehend von einer Korrelation von Messgrößen des Laserschweißprozesses und entsprechenden Nahtkenngrößen, eine indirekte Regelung erfolgen. Anschließend ist der Nachweis zu erbringen, dass eine Regelung der indirekten Größe auch eine Verbesserung der direkten Größe, also der Nahtqualität bewirken kann.

Bild 5.1 stellt den schematischen Aufbau des Regelkreises dar.

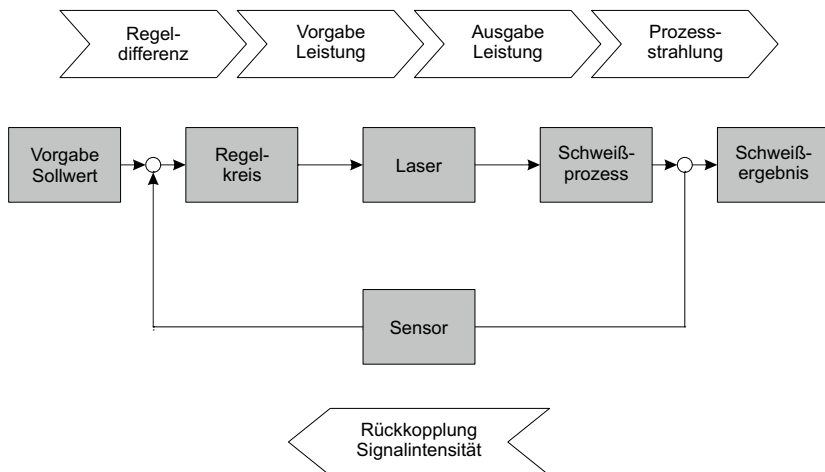
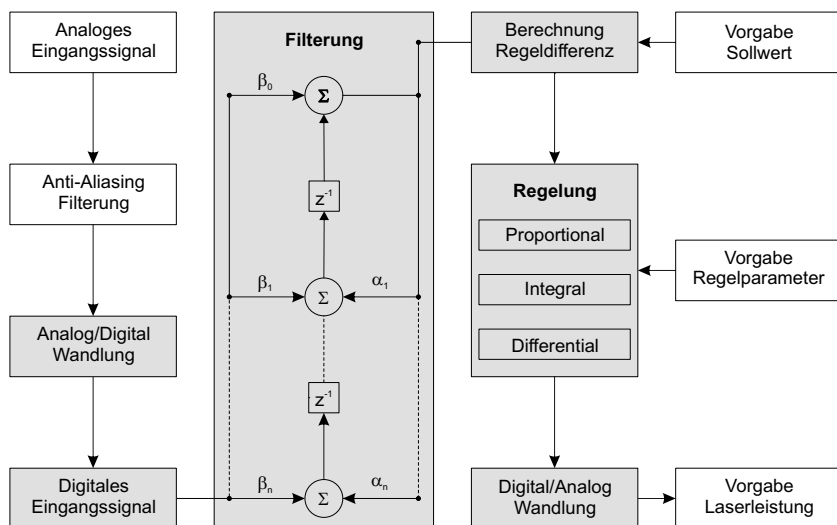


Bild 5.1: Schematischer Aufbau des geschlossenen Regelkreises.

Die Prozessstrahlung aus der Wechselwirkungszone von Laserstrahl und Werkstück wird mit der in Kapitel 3.3 dargestellten Sensorik aufgenommen. Aus dem von außen vorgegebenen Sollwert und dem aktuellen Messwert des infraroten Spektrums wird die Regeldifferenz berechnet und dem Regelalgorithmus zugeführt. Dieser gibt an den Laser eine zur Laserleistung proportionale Spannung als Hilfsstellgröße aus. Entsprechend der vorgegebenen Spannung beeinflusst der Laser durch die Ausgabe der Laserleistung als Stellgröße des Regelkreises den Schweißprozess. Die Rückführung der Regelgröße über das Messglied schließt den Regelkreis.

### 5.1.1 Digitale Signalverarbeitung zur Regelung des Prozesses

In Kapitel 3.3 wurde der elektrische Aufbau der Sensorik grundlegend dargestellt. Dabei wurde auch die echtzeitfähige Verarbeitung der Signale auf einem digitalen Signalprozessor (DSP), dem ADWin Pro II System, beschrieben. Dieses Kapitel verdeutlicht den weiteren Umgang mit den Prozesssignalen. Hierfür ist der Ablauf der Signalverarbeitung und Regelung in Bild 5.2 schematisch dargestellt, wobei sämtliche auf dem Prozessor realisierten Operationen grau unterlegt sind.



**Bild 5.2:** Schematische Darstellung der digitalen Signalverarbeitung und Regelung, bei welcher die auf dem DSP realisierten Operationen grau unterlegt sind.

Das analoge Eingangssignal des Regelkreises wird zur Vermeidung des Alias-Effekts mit der Nyquist-Frequenz gefiltert. Nach einer Analog/Digitalwandlung durchläuft das Signal eine zeitdiskrete Filterung dargestellt als transponierte Direktform II nach [116]. Die Untersuchungen zur Prozessregelung werden mit einem digitalen Filter mit unendlicher Impulsantwort (IIR-Filter) durchgeführt. Aus dem gefilterten Signal und dem extern vorgegebenen Sollwert berechnet sich die Regelabweichung, welche einem Regelalgorithmus zugeführt wird. Dieser ist in der schematischen Darstellung in Bild 5.2 als Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler) ausgeführt. Mit Hilfe von extern vorgegebenen Regelparametern wird eine Hilfsstellgröße berechnet, aus welcher sich nach einer Digital/Analogwandlung die Vorgabe der Laserleistung ergibt. Diese wird vom Lasergerät über eine analoge Eingangskarte aufgenommen und entsprechend umgesetzt. Durch die so beschriebene Rückführung der Prozessemissionen in einem geschlossenen Regelkreis soll eine Verbesserung der Schweißqualität erzielt werden.

### 5.1.2 Einflüsse durch die digitale Filterung und Regelung

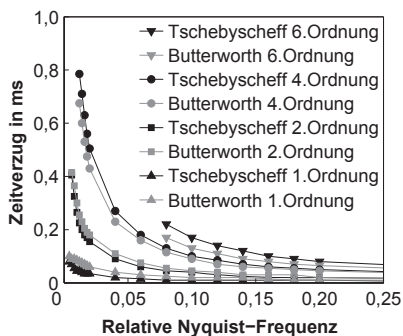
Die digitale Verarbeitung der aufgezeichneten Sensorsignale steigert die Flexibilität des Prozessregelungssystems beim Laserschweißen erheblich. Die Implementierung der zeitdiskreten Filterung und des Regelalgorithmus in digitaler Form ermöglichen eine direkte Parametrierbarkeit des Systems mit Hilfe einer speziell entwickelten Software. Besonders bei der Anpassung des Systems an neue Applikationen ist dadurch eine hohe Reproduzierbarkeit und eine rasche Optimierung der Datensätze realisierbar. Zusätzlich sind Schwankungen der Signalfilterung und Regelung durch Bauteiltoleranzen und Alterungsprozesse der Analogtechnik ausgeschlossen.

Nachteilig wirkt sich jedoch bei einer komplexen digitalen Filterungs- und Regelungsalgorithmik der gesteigerte Rechenzeitbedarf auf dem Signalprozessor aus. Die damit verbundene Reduzierung der maximal möglichen Abtastfrequenz führt zu einer Verringerung der Bandbreite der zu verarbeitenden Signale. Dies hat einerseits negative Auswirkungen auf die Signalgüte, aber auch auf die Schnelligkeit, mit welcher der Regelkreis auf Signaländerungen reagieren kann. Diese Einschränkungen müssen bereits bei der Konzeption des Regelkreises berücksichtigt werden.

Die digitale Tiefpassfilterung der Rohsignale des Laserschweißprozesses reduziert den Einfluss hochdynamischer Signalschwankungen. Verursacht werden diese durch prozessbedingte Fluktuationen in der Wechselwirkungszone, welche sich jedoch,

bedingt durch die hohe Dynamik, nicht in den Nahtkenngrößen abzeichnen. Dabei müssen die verwendeten Filter so parametrisiert werden, dass die Korrelation zwischen den Sensorsignalen und den Nahtkenngrößen weiterhin ihre Gültigkeit behält.

Mit der digitalen Filterung ist stets ein Zeitverzug zwischen den Rohsignalen und den gefilterten Signalen verbunden, welcher in Bild 5.3 für verschiedene Ordnungen und Ausführungsformen der Filter dargestellt ist. Dabei sind lediglich stabile Zustände in Abhängigkeit der relativen Nyquist-Frequenz gegeben.



**Bild 5.3:** Zeitverzug für verschiedene Ordnungen der digitalen Filter Butterworth und Tschebyscheff Typ I durch Vergleich von gefilterten und ungefilterten realen Prozessdaten auf dem ADWin Pro II System mit einer Taktrate von 100 kHz.

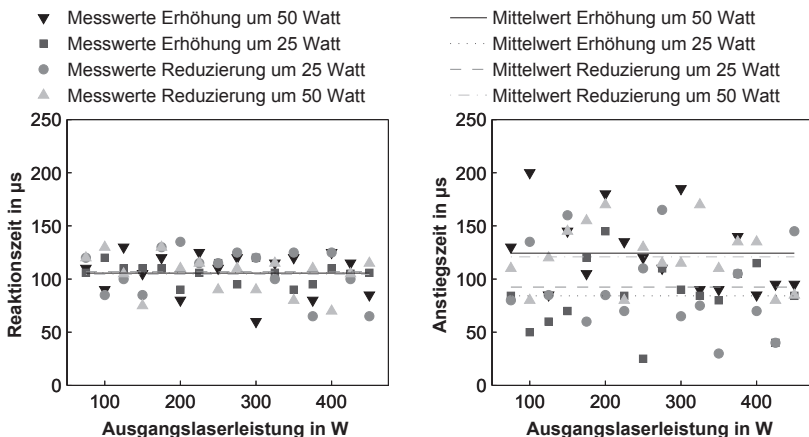
Zeitverzögerungen der digitalen Filterung wirken sich als Totzeiten des Regelkreises aus. Die Reaktion auf ein die Nahtkenngrößen beeinflussendes Ereignis in der Wechselwirkungszone setzt zeitlich verzögert ein. Für die Regelung des hochdynamischen Schweißprozesses ist jedoch eine möglichst instantane Reaktion notwendig. Aus diesem Grund sollte die Ordnung des verwendeten Filters gering gewählt werden. Andererseits ist mit der Reduzierung der Filterordnung eine Verschlechterung der Signalqualität verbunden. Die Wahl des Filters ergibt sich folglich als Kompromiss aus dem Spannungsfeld einer hohen Signalqualität bei geringem Zeitverzug.

### 5.1.3 Reaktionszeiten des Lasers

Zusätzlich zum Zeitverzug durch die digitale Filterung und Regelung der Sensorsignale wird das Zeitverhalten des Regelkreises durch die technischen Eigenschaften des Lasers bestimmt. Diesem wird die auszugebende Laserleistung als Spannung

skaliert über eine analoge Eingangskarte vorgegeben. Dabei ergibt sich ein Zeitverzug sowohl durch die internen, elektrischen Schaltzeiten als auch durch die Zeitdauer bis zur Ausgabe der geänderten Laserleistung. Nach Herstellerangaben ist mit einer elektrischen Signalverzögerung von ungefähr 100  $\mu\text{s}$  zu rechnen [109].

Für die Regelung des Schweißprozesses sind hauptsächlich geringfügige Leistungsänderungen um eine mittlere Leistung von Interesse. Die zeitlich gemittelte Leistung bestimmt die mittlere Einschweißtiefe, während kleine Änderungen der Leistung als Reaktion auf Abweichungen des Sensorsignals vom Sollwert durch den Regelalgorithmus eingestellt werden müssen. Entscheidend ist dabei die Zeit von der Anforderung der Laserleistung durch den Regler bis zum Auftreffen der Strahlung auf dem Werkstück. Bild 5.4 zeigt das beschriebene Zeitverhalten für typische Leistungsänderungen während des Regelprozesses.



**Bild 5.4:** Reaktionszeiten und Anstiegszeiten des Lasers für verschiedene Änderungen der Laserleistung, ausgehend von unterschiedlichen Laserleistungsniveaus.

In der Abbildung sind die Reaktionszeiten und die Anstiegszeiten des Lasers bei einer Änderung der Laserleistung um  $\pm 25$  W und  $\pm 50$  W, ausgehend von verschiedenen Ausgangsniveaus der Laserleistung, dargestellt. Die Reaktionszeit ist definiert als das Zeitintervall, nach welchem eine Änderung um 10 % der Leistungsdifferenz eintritt. Die Anstiegszeit stellt dagegen das Intervall dar, während dessen sich die Leistung von 10 % auf 90 % der Leistungsdifferenz verändert. Gemessen werden die Reaktions- und Anstiegszeiten mit Hilfe von Photodiodenverläufen, welche während des Änderungsprozesses der Ausgangsleistung aufgezeichnet werden.



Die Reaktionszeit des Lasers zeigt keine direkte Abhängigkeit vom Ausgangsniveau der Laserleistung und von der vorgegebenen Leistungsänderung. Das zeitliche Mittel der Reaktionszeit beträgt für alle dargestellten Parameter 106  $\mu\text{s}$ . Die Anstiegszeit zeigt ebenfalls keine Abhängigkeit vom Ausgangsniveau der Laserleistung, ist aber abhängig von der vorgegebenen Leistungsänderung. Es treten jedoch starke Schwankungen der Einzelmessungen auf. Dabei zeigen jeweils Änderungen um eine Leistungsdifferenz von  $\pm 25\text{ W}$  und von  $\pm 50\text{ W}$  ein ähnliches Verhalten. Die mittlere Anstiegszeit beträgt für eine Variation um  $\pm 25\text{ W}$  88  $\mu\text{s}$  und um  $\pm 50\text{ W}$  123  $\mu\text{s}$ .

## 5.2 Einführung von vergleichenden Kenngrößen

Die Leistungsfähigkeit eines geregelten Laserschweißprozesses kann nur im Vergleich zur gesteuerten Schweißung beurteilt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass beide Prozesse unter möglichst identischen Randbedingungen durchgeführt werden. Andernfalls kann nicht gewährleistet werden, dass die gleichartigen Störgrößen den Schweißprozess beeinflussen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Parameter der zu vergleichenden geregelten und gesteuerten Prozesse derart gewählt, dass eine identische mittlere Einschweißtiefe realisiert wird. Es ist davon auszugehen, dass beide Schweißprozesse unter dieser Voraussetzung eine ähnliche Nahtgeometrie aufweisen und vergleichbare prozessbedingte Schwankungen auftreten. Zusätzlich müssen eindeutige Bewertungskenngrößen definiert werden, die eine objektive Vergleichbarkeit ermöglichen. Bezogen auf Fertigungsprozesse sollten sie zusätzlich eine Aussage bezüglich des quantitativen Verbesserungspotentials beinhalten. Für den Vergleich eines geregelten und eines gesteuerten Schweißprozesses werden die nachfolgend beschriebenen Bewertungskenngrößen verwendet.

### Mittelwerte der geometrischen Nahtkenngrößen

Bei einer Variation der Prozessparameter, wie beispielsweise der Fokusslage oder der Vorschubgeschwindigkeit, werden die Mittelwerte der geometrischen Nahtkenngrößen als Bewertungsgröße verwendet. Diese ermöglichen den direkten Vergleich gesteuerter und geregelter Prozesse bezüglich ihrer Reaktion auf die Veränderung des Prozessumfeldes. Dabei wird im Speziellen die Einschweißtiefe und vereinzelt auch die Querschnittsfläche der Schweißnaht untersucht. So kann beispielsweise beurteilt werden, ob die mittlere Einschweißtiefe eines geregelten oder gesteuerten Prozesses in den Randbereichen einer Fokusslagenvariation stärker abfällt.

### **Streuung der Einschweißtiefe**

Eine detaillierte Betrachtungsweise zum Vergleich zweier Schweißprozesse bietet die Bewertung der Streuung der Einschweißtiefe. Als statistische Streumaße werden die Standardabweichung und der Interquartilabstand verwendet. Dabei gibt die Standardabweichung die mittlere quadratische Abweichung der Messwerte vom arithmetischen Mittel an. Der Interquartilabstand ist als Differenz der Quantile  $Q_{.25}$  und  $Q_{.75}$  definiert, wobei das Quantil  $Q_{.25}$  der Punkt einer Verteilung ist, unterhalb dessen sich 25 % aller Messwerte befinden. Die Definition des Quantils  $Q_{.75}$  erfolgt analog zum Quantil  $Q_{.25}$ .

Diese beiden Bewertungskenngrößen ermöglichen den direkten Vergleich zweier Schweißungen ohne eine Variation der Prozessparameter. Im Besonderen können sie die Anfälligkeit auf prozessbedingte Schwankungen der Nahtkenngrößen aufzeigen. Diese Methode kann jedoch nur für die Einschweißtiefe bei einer Schliffauswertung nach dem in Kapitel 3.4 eingeführten Verfahren verwendet werden, da andernfalls eine unzureichende Datenbasis vorliegt. Eine parallele Betrachtung der Nahtfläche kann aus diesem Grund nicht erfolgen.

Werden zur Auswertung mehrere Einschweißtiefenverläufe miteinander verglichen, so werden die Streumaße über eine Aneinanderreihung sämtlicher Einschweißtiefen berechnet. Demnach werden die Einschweißtiefenverläufe so behandelt, als seien sie durch eine einzige Laserschweißnaht entstanden. Der direkte Vergleich der mittleren Standardabweichung der Einschweißtiefenverläufe vernachlässigt die Tatsache, dass die mittleren Einschweißtiefen der einzelnen Schweißungen variieren können. Bei stark voneinander abweichenden mittleren Einschweißtiefen würden durch dieses Vorgehen Schweißungen mit geringer Standardabweichung falsch bewertet.

### **Abstand minimaler und maximaler Einschweißtiefe**

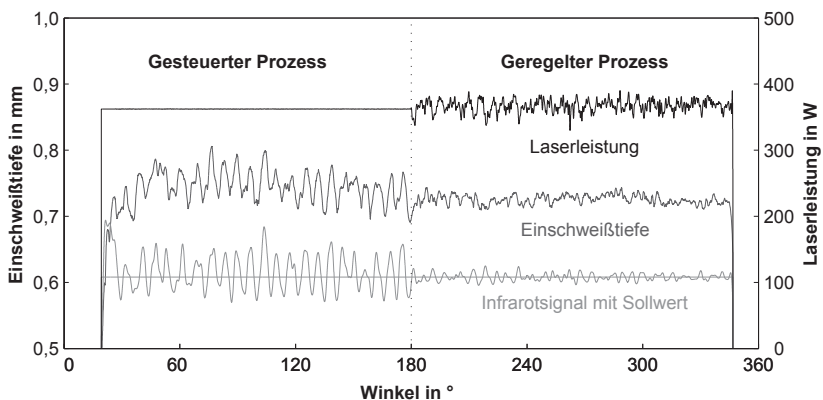
Die Standardabweichung und der Interquartilabstand der Einschweißtiefe erlauben keine direkte Aussage über das Auftreten von Extremwerten. Somit kann eine lokal unzureichende Anbindung bzw. eine partielle Durchschweißung als Folge des Auftretens eines Extremums der Einschweißtiefe nicht unmittelbar bewertet werden. Viele Anwendungen vor allem im Bereich von Dichtschweißungen setzen dies jedoch voraus. Als weitere wichtige Bewertungsgröße wird daher der Abstand der minimalen zur maximalen Einschweißtiefe eingeführt. Im weiteren Verlauf wird der statistische Begriff der Spannweite für diesen Abstand verwendet.

## 5.3 Funktionsweise geregelter Schweißprozesse

Die Korrelation von speziell aufbereiteten Infrarotsignalen und der Einschweißtiefe wurde in Kapitel 4.3 nachgewiesen. Dieser funktionale Zusammenhang beider Kenngrößen im makroskopischen und mikroskopischen Bereich bildet die Grundlage für eine Regelung des Laserschweißprozesses. Der zuvor erläuterte digitale Ansatz zur Regelung soll zur Verbesserung des Schweißergebnisses verwendet werden.

Wird durch den Regelalgorithmus eine Abweichung des gemessenen Infrarotsignals vom Verlauf des Sollwertes festgestellt, so wird versucht durch eine Anpassung der Laserleistung eine Annäherung zu erreichen. Die Reaktion sollte dabei mit hoher zeitlicher Dynamik erfolgen, da andernfalls starke Abweichungen der Einschweißtiefe möglich sind. Zur Umsetzung dieser Anforderung können verschiedene regelungstechnische Konzepte angewendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler) verwendet.

Bild 5.5 verdeutlicht die Funktionsweise der Regeleinriffe genauer. Die Schweißung einer Radialnaht wird in zwei Abschnitte zerlegt. Während der ersten Hälfte der Schweißung wird durch eine gesteuerte Prozessführung ein herkömmliches Schweißergebnis herbeigeführt. Die Rückkopplung des Regelkreises ist geöffnet, so dass eine konstante Laserleistung ausgegeben wird. In der zweiten Phase der Schweißung wird der Regelkreis zur Verbesserung des Prozessergebnisses geschlossen.



**Bild 5.5:** Exemplarische Darstellung eines halbseitig gesteuerten und geregelten Schweißprozesses auf einem radialsymmetrischen Bauteil, wobei der Regelkreis in der ersten Hälfte geöffnet und in der zweiten Hälfte geschlossen ist.

Die Konstanz der Laserleistung führt im ersten Abschnitt der Schweißung zu sehr starken Schwankungen der Einschweißtiefe. Die Korrelation der Einschweißtiefe zum Sensorsignal auf mikroskopischer Ebene lässt sich deutlich erkennen. Störungen, hervorgerufen durch die hohe Dynamik des Schweißprozesses, können aufgrund der Konstanz der Laserleistung nicht ausgeglichen werden. Durch das Schließen des Regelkreises im zweiten Abschnitt werden die Abweichungen des Sensorsignals vom geforderten Sollwert durch digitale Echtzeiteingriffe verringert. Die Laserleistung wird dabei stets an den aktuellen Prozessverlauf angepasst. Die Reduzierung der Schwankungen im Verlauf der Einschweißtiefe durch die geregelte Prozessführung im zweiten Abschnitt der Schweißung ist deutlich zu erkennen.

## 5.4 Reduzierung der Einschweißtiefenschwankung

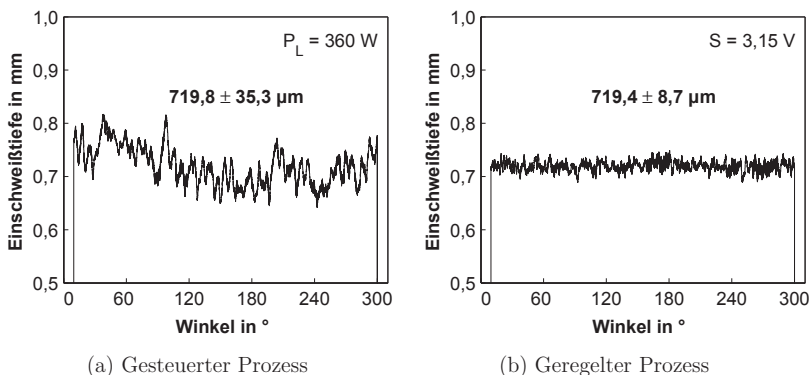
In Kapitel 5.3 wurde die Funktionsweise eines geregelten Laserschweißprozesses vorgestellt. Primäres Ziel der Regeleingriffe ist die Reduzierung prozessbedingter Einschweißtiefenschwankungen während der Laserschweißung. Des Weiteren wird eine Reduzierung der Schwankungen der mittleren Einschweißtiefe angestrebt, wie sie für gesteuerte Prozesse beim Vergleich mehrerer Bauteile existieren.

In diesem Kapitel wird nachgewiesen, dass die Regelung des Laserschweißprozesses auf Basis von Infrarotsignalen eine Verbesserung des qualitativen Prozessergebnisses bewirken kann. Des Weiteren ergibt sich aus einer quantitativen Bewertung das Verbesserungspotential einer Prozessregelung. Die Untersuchungen werden zunächst für ein Einschweißtiefeniveau durchgeführt. Ausgehend davon erfolgt ein Übertrag der Ergebnisse auf Schweißungen mit unterschiedlichen Einschweißtiefen im Bereich des Wärmeleitungs- und des Tiefschweißens. Dabei werden lediglich Störeinflüsse untersucht, die ihre Ursache in dem jeweiligen Prozessverlauf selbst haben.

Für die gesteuerten Laserschweißungen in Kapitel 4.2.2 wurde nachgewiesen, dass für die 200  $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser und die 300  $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser ein Optimum der Signalqualität vorliegt. Voruntersuchungen zur Prozessregelung ergaben, dass mit der größeren der beiden eingesetzten Beobachtungsfasern leicht bessere Prozessergebnisse erzielbar sind. Zusätzlich sinkt dadurch die Anfälligkeit des Sensorsystems gegenüber einer Dejustage. Daher werden die Untersuchungen zum geregelten Laserschweißen mit einer 300  $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser durchgeführt. Abweichungen werden im jeweiligen Kapitel gesondert diskutiert.

### 5.4.1 Nachweis für ein Einschweißtiefenniveau

Bild 5.6 zeigt exemplarisch den Unterschied im Verlauf der Einschweißtiefe zwischen regelten und gesteuerten Prozessen. Zusätzlich sind zur Bewertung der beiden Schweißnähte die Standardabweichungen angegeben. Die Regelparameter sind derart gewählt, dass für den geschlossenen Regelkreis die gleiche mittlere Einschweißtiefe wie bei einem gesteuerten Prozess mit einer Leistung von 360 W erreicht wird. Für beide Schweißungen wirken aufgrund der identischen mittleren Einschweißtiefe von ungefähr 720  $\mu\text{m}$  ähnliche prozessbedingte Störeinflüsse.

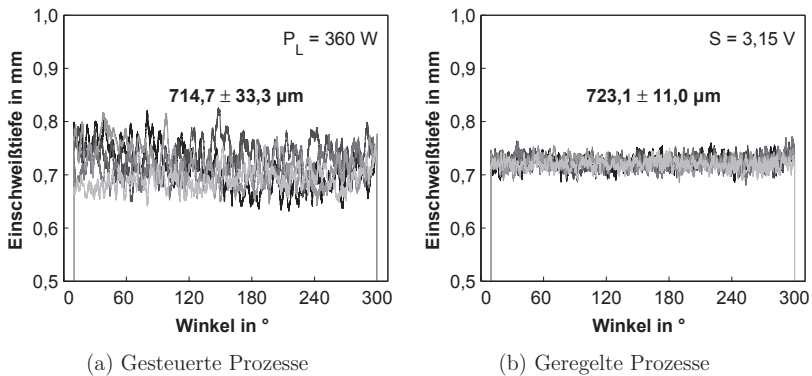


**Bild 5.6:** Einschweißtiefenverlauf gesteuerter und geregelter Schweißprozesse ohne Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Der visuelle Vergleich der Laserschweißungen zeigt eine Beruhigung des Einschweißtiefenverlaufs und eine Reduzierung der Extremwerte durch die Anpassung der Laserleistung an den Prozessverlauf. Durch die Regelung der Laserschweißung wird folglich eine eindeutige Verbesserung des Prozessergebnisses erreicht. Die Standardabweichung der Einschweißtiefe kann für diese exemplarische Schweißung um 75,3 % von 35,3  $\mu\text{m}$  auf 8,7  $\mu\text{m}$  reduziert werden. Des Weiteren sinkt die Abweichung von minimaler zu maximaler Einschweißtiefe um 65,6 % von 174,5  $\mu\text{m}$  auf 60,1  $\mu\text{m}$ .

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Schlechtschweißung, beispielsweise durch eine mangelhafte Anbindung des unteren Fügepartners, wird durch die beschriebenen Eingriffe in den Laserprozess reduziert. Eine vollständige Eliminierung der Schwankungen um die mittlere Einschweißtiefe ist aufgrund der hohen Dynamik des Laserschweißprozesses selbst bei einer Echtzeitregelung nicht realisierbar.

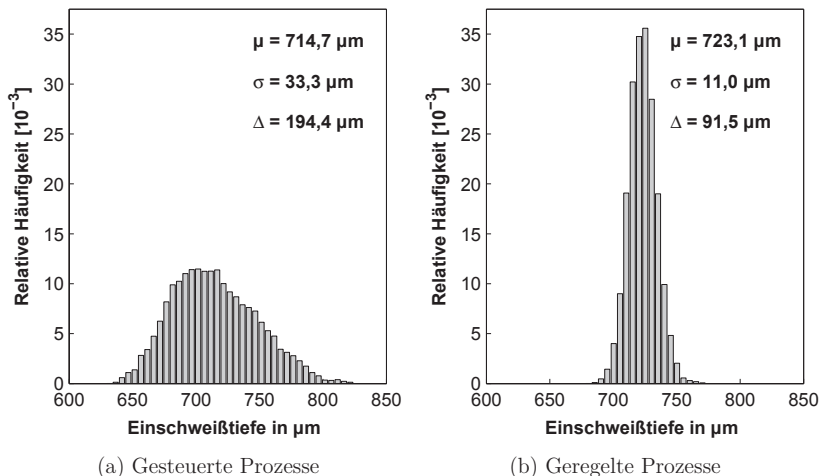
Eine Aussage über die Streuung der mittleren Einschweißiefen ist mit Hilfe von Bild 5.6 nicht möglich, da lediglich Einzelnähte betrachtet werden. Für eine prozesssichere Schweißverbindung müssen auch die mittleren Einschweißiefen verschiedener Schweißungen mit identischen Parametern in einem möglichst geringen Toleranzband liegen. Aus diesem Grund überführt Bild 5.7 die Ergebnisse auf eine erhöhte Grundgesamtheit, so dass sich auch Abweichungen der mittleren Einschweißiefe in die Betrachtung einbeziehen lassen. Dabei werden fünf gesteuerte mit fünf geregelten Messungen verglichen, die jeweils mit identischen Parametern geschweißt wurden.



**Bild 5.7:** Einschweißiefenverläufe gesteuerter und geregelter Schweißprozesse ohne Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Der Vergleich der gesteuerten und geregelten Laserschweißungen in Bild 5.7 zeigt ein ähnliches Ergebnis wie zuvor exemplarisch für einzelne Schweißungen (siehe Bild 5.6). Durch eine Regelung lassen sich sowohl die Streuung als auch die Spannweite der Einschweißiefe signifikant reduzieren. Für die Gesamtstandardabweichung ergibt sich dabei ein Rückgang um 66,9 % von 33,3 µm auf 11,0 µm und für den Abstand der Extremwerte um 52,9 % von 194,4 µm auf 91,5 µm.

Daraus folgt, dass auch bei der Betrachtung von mehreren Schweißungen eine Verbesserung des Prozessergebnisses durch die Regelung erzielt werden kann. Darüber hinaus liegen die mittleren Einschweißiefen bei geregelter Prozessführung in einem engeren Toleranzband. Die Standardabweichung der mittleren Einschweißiefen beträgt für den gesteuerten Prozess 16,0 µm und für den geregelten 2,2 µm. Besonders deutlich zeigen sich die Unterschiede von geregelten und gesteuerten Schweißungen in der Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Einschweißiefe in Bild 5.8.



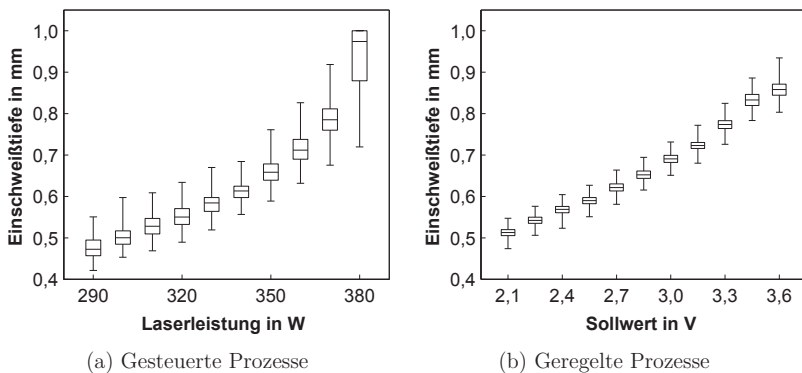
**Bild 5.8:** Häufigkeitsverteilung bei geregelten und gesteuerten Laserschweißungen.

Der gesteuerte Schweißprozess zeigt einen flachen breiten Verlauf der Häufigkeitsverteilung. Besonders zu beachten sind dabei die Extremwerte der Einschweißtiefe. Mit wachsendem Abstand steigt die Wahrscheinlichkeit einer mangelhaften Anbindung bzw. einer Durchschweißung des unteren Fügepartners bei Überlappschweißungen. Beide Fälle sind bei einer entsprechend ausgelegten Verbindung nicht tolerierbar. Demgegenüber zeigen die geregelten Messungen einen steilen, sehr schmalen Verlauf. Ein Schweißfehler, bedingt durch eine Durchschweißung bzw. unzureichende Anbindung, kann hier mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

#### 5.4.2 Untersuchungen für den Tiefschweißbereich

Die qualitativen Verbesserungen beschränken sich bei den Untersuchungen im vorangegangenen Kapitel auf ein einziges Einschweißtiefenniveau. In diesem Kapitel erfolgt die Übertragung auf weitere Einschweißtiefen. Im Speziellen wird der Bereich zwischen 500 µm und 1000 µm durch Verbindung zweier 500 µm-Hülsen betrachtet. Nach unten werden die Prozessgrenzen durch eine unzureichende Anbindung des unteren Fügepartners und nach oben durch eine Durchschweißung beider Hülsen festgelegt. Da sich bei diesen Einschweißtiefen eine Kapillare im Schmelzbad ausbildet, werden diese Schweißungen dem Tiefschweißbereich zugeordnet.

Bild 5.9 zeigt die Einschweißtiefen gesteuerter Schweißungen im Vergleich zu den geregelten Messungen. Dabei wird die Laserleistung von 290 W bis 380 W und der Sollwert von 2,10 V bis 3,60 V variiert. Die weiteren Regelparameter sind an die jeweiligen Prozessrandbedingungen angepasst. Die statistische Auswertung in Boxplots verdeutlicht die Unterschiede der beiden Prozesse. Die Größe der Box ist so gewählt, dass sie durch das untere und das obere Quartil begrenzt wird. Sie dient durch die Veranschaulichung des Interquartilabstands als Maß für die Streuung der Schweißprozesse und verdeutlicht den Bereich, in welchem die mittleren 50 % der Messwerte streuen. Zusätzlich ermöglicht der eingezeichnete Median eine Aussage über die Schiefe der Verteilung. Unterer und oberer Whisker geben die minimale und maximale Einschweißtiefe und somit die Spannweite an.



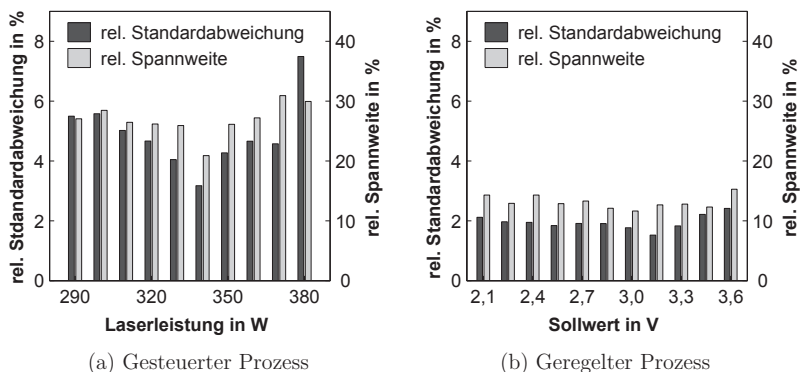
**Bild 5.9:** Boxplots der Einschweißtiefen bei gesteuerter und geregelter Schweißprozesse für Schweißungen im Tiefschweißbereich,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Bei der dargestellten Steigerung der Laserleistung wächst die mittlere Einschweißtiefe bei gesteuerter Prozessführung überproportional an. Verstärkt wird dieses Verhalten durch den sich an der Bauteilrückseite bildenden Wärmestau. Die dem Werkstück zugeführte Energie kann durch die Grenzfläche nur vermindert abfließen und sorgt für eine Beschleunigung des Prozessfortschritts. Des Weiteren bewirkt die Steigerung der Laserleistung ein Ansteigen des Interquartilabstandes. Die prozessbedingten Schwankungen der Einschweißtiefe nehmen zu. Auch die Distanz von minimaler zu maximaler Einschweißtiefe vergrößert sich. Für Schweißungen mit einer Leistung von 380 W zeigen sich im Längsschliff partielle Durchschweißungen entlang der Naht, wodurch die Streuung und die Spannweite maximal werden.



Der Verlauf der Einschweißtiefen des geregelten Prozesses unterscheidet sich deutlich. Bedingt durch den linearen Zusammenhang der Einschweißtiefe und des Sensorsignals zeigt sich ein nahezu geradliniger Anstieg bei einer Erhöhung der Sollwertspannung. Die Streuung, veranschaulicht durch den Interquartilabstand, ist für alle Einschweißtiefenniveaus reduziert. Durch eine Anpassung der Laserleistung werden die Auswirkungen prozessbedingter Schwankungen verringert. Der geregelte Prozess ist störunanfällig, was sich auch in der reduzierten Spannweite äußert.

Abschließend verdeutlicht Bild 5.10 durch eine Gegenüberstellung der auf die Einschweißtiefe bezogenen Standardabweichung und Spannweite das Verbesserungspotential einer geregelten Prozessführung. Bemerkenswert ist die Konstanz der Vergleichskenngößen der geregelten Schweißungen. Demgegenüber zeigen die starken Schwankungen auf gesteuerter Seite die Anfälligkeit gegen kleinste Veränderungen. Ein eindeutiges Verhalten ist nicht erkennbar. Zusammenfassend sind die Ergebnisse des vorherigen Kapitels auf den Bereich von 500  $\mu\text{m}$  bis 1000  $\mu\text{m}$  übertragbar.

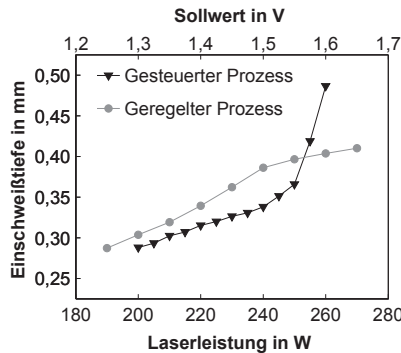


**Bild 5.10:** Auf die mittlere Einschweißtiefe bezogene Standardabweichung und Spannweite für gesteuerte und geregelte Schweißungen im Tiefschweißbereich.

### 5.4.3 Untersuchung wärmeleitungsdominierter Schweißungen

Die Untersuchungen zur Prozessregelung beim Laserschweißen werden in diesem Kapitel auf wärmeleitungsdominierte Verbindungen ausgedehnt. Durch das Verschweißen zweier 250  $\mu\text{m}$ -Hülsen bietet sich des Weiteren die Möglichkeit, den Übergangsbereich zum Tiefschweißen detailliert zu betrachten.

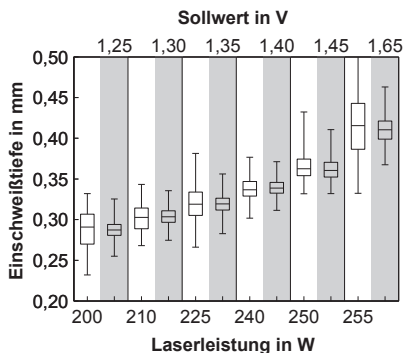
Bild 5.11 zeigt die Einschweißtiefe gesteuerter und geregelter Laserschweißprozesse. Die untere Grenze des Prozessfensters bildet die schwache Anbindung des unteren Fügepartners, während die Durchschweißung der inneren Hülse den Abschluss nach oben bildet. Die Laserleistung muss dabei von 210 W bis 255 W und die Sollwertspannung von 1,25 V bis 1,65 V variiert werden. Die weiteren Regelparameter sind an die Schweißung angepasst.



**Bild 5.11:** Einschweißtiefe in Abhängigkeit der Laserleistung und der Sollwertspannung bei wärmeleitungsdominierten Laserstrahlschweißprozessen ohne Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Für Einschweißtiefen des gesteuerten Schweißprozesses unter  $350 \mu\text{m}$  zeichnet sich ein nahezu lineares Anwachsen mit der vorgegebenen Laserleistung ab. Danach folgt ein überproportional starker Anstieg bis zur Durchschweißung. Bereits ab einer Laserleistung von 255 W sind in den Längsschliffen partielle Durchschweißungen zu erkennen. Eine prozesssichere Anbindung des inneren Fügepartners ohne Durchschweißung ist folglich nur unterhalb dieser Laserleistung möglich. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der Regelung des Prozesses ein abschnittsweise linearer Anstieg, welcher im unteren Bereich eine größere Steigung aufweist.

Bei der Stabilitätsbetrachtung geregelter und gesteuerter Schweißungen erschwert dieser Unterschied im Anstiegsverhalten der Einschweißtiefe die Vergleichbarkeit. Da lediglich für identische Einschweißtiefen vergleichbare Prozessschwankungen vorliegen, kann eine übergeordnete Betrachtung wie für den Tiefschweißbereich nicht erfolgen. Stattdessen müssen die Prozessschwankungen für identische mittlere Einschweißtiefen von gesteuerten und geregelten Schweißungen verglichen werden. Bild 5.12 verdeutlicht diesen Zusammenhang.



**Bild 5.12:** Boxplot gesteuerter (weiß unterlegt) und geregelter (grau unterlegt) Wärmeleitungsschweißprozesse mit jeweils identischer mittlerer Einschweißtiefe.

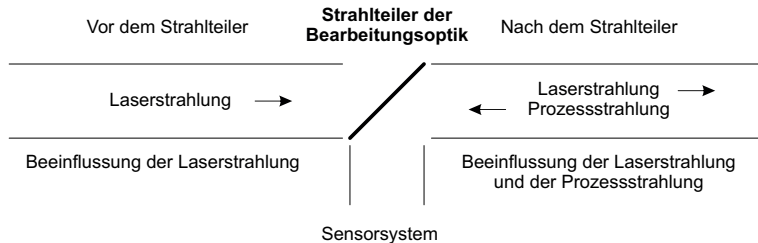
Bei den dargestellten mittleren Einschweißtieffenniveaus kann durch die Regelungseingriffe der Interquartilabstand reduziert werden. Des Weiteren verringert sich der Abstand von minimaler zu maximaler Einschweißtiefe. Die Wahrscheinlichkeit einer unzureichenden Anbindung bzw. einer Durchschweißung des unteren Fügepartners sinkt. Die Prozessregelung kann somit auch bei wärmeleitungsdominierten Laserschweißungen Störungen durch Instabilitäten des Schweißprozesses verringern. Der Vergleich mit Bild 5.9 zeigt jedoch, dass für den Bereich des Tiefschweißens ein höheres Verbesserungspotential verzeichnet werden kann.

## 5.5 Regelung bei Störungen der Laserleistung

Im vorigen Kapitel wurden prozessbedingte Störungen und ihre Auswirkungen auf gesteuerte und geregelte Schweißungen untersucht. Der Schweißprozess selbst ist die Ursache für Schwankungen der Einschweißtiefe. Die Analyse des geregelten Schweißprozesses soll nun für eine aktive Beeinflussung der Prozessparameter fortgesetzt werden. Für gesteuerte Prozesse ist die Laserleistung ein die Einschweißtiefe maßgeblich bestimmender Parameter. Zusätzlich wird sie bei der Prozessregelung als Stellgröße zum Eingreifen in den Prozessverlauf verwendet.

Bezogen auf das Sensorsystem muss eine Störung der Laserleistung zweigeteilt analysiert werden. Eine Beeinflussung vor dem Strahlteiler der Bearbeitungsoptik führt zu keiner Beeinträchtigung der Prozessstrahlung. Die Korrelation zwischen

den Signalen und Nahtkenngrößen behält ihre Gültigkeit. Die Auswirkungen werden in Kapitel 5.5.1 untersucht. Störungen, die nach dem Strahlteiler auftreten, können sich auch auf die Prozessstrahlung auswirken. Als Folge kann sich der funktionale Zusammenhang von Signal und Nahtkenngrößen verändern, worauf in Kapitel 5.5.2 detailliert eingegangen wird. Bild 5.13 verdeutlicht diese Aussagen.



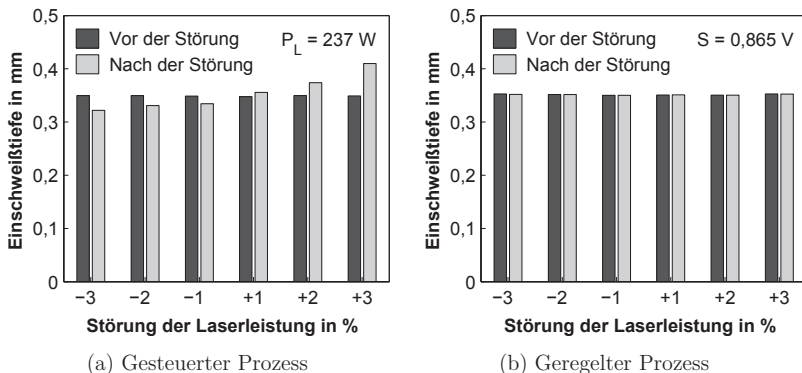
**Bild 5.13:** Störungen vor und nach dem Strahlteiler der Bearbeitungsoptik.

### 5.5.1 Schwankungen der Laserleistung

Störungen der Laserleistung vor dem Strahlteiler können durch verschiedene Einflussgrößen verursacht werden. Beispielsweise führen Verschmutzungen im offenen Strahlengang des Lasers und Verluste bei der Einkopplung in die Bearbeitungsfaser zu einer Veränderung. Ähnliche Auswirkungen hätte eine fehlerhaft justierte oder verschmutzte Kollimation. Letztendlich kann die Laserleistung, bedingt durch den Entstehungsprozess, nur innerhalb einer Toleranz ausgegeben werden.

Die beschriebenen Störungen werden durch eine Variation der Laserleistung nachgebildet. Dazu wird die vorgegebene Laserleistung nach der halben Prozesszeit mit einer Störgröße beaufschlagt. Für die geregelten Schweißungen bedeutet dies, dass die Stellgröße nach dem Regelalgorithmus mit einer Fehlergröße verfälscht wird. Beim gesteuerten Prozess resultiert diese Störung in einer Veränderung der Einschweißtiefe, während der Regler diese idealerweise vollständig ausgleicht.

Bild 5.14 zeigt die Veränderung der Einschweißtiefe durch eine Variation der Laserleistung um bis zu  $\pm 3\%$  des Ursprungswertes. Die gesteuerten Schweißungen werden mit einer Laserleistung von 237 W auf zwei 250  $\mu\text{m}$ -Hülsen durchgeführt. Die Parametrierung des Reglers wird derart gewählt, dass die Einschweißtiefe vor der Störung identisch zum gesteuerten Prozess ist.



**Bild 5.14:** Störung der Laserleistung um bis zu  $\pm 3\%$  für Schweißungen ohne Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Der gesteuerte Prozess zeigt bei einer Variation der Laserleistung um bis zu  $\pm 3\%$  der Ausgangsleistung erhebliche Abweichungen von der mittleren Einschweißtiefe. Eine Reduzierung der Leistung resultiert in einem Rückgang der Einschweißtiefe, während bei einer Steigerung der Leistung eine Zunahme der Einschweißtiefe zu beobachten ist. Durch die Entstehung eines Wärmestaus an der Bauteilrückseite ist der Einfluss der Störung bei einer positiven Abweichung größer.

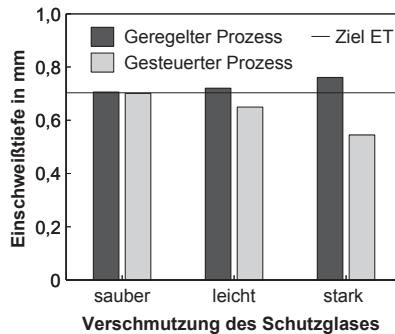
Für den geregelten Prozess kann keine eindeutige, durch die Variation verursachte Abweichung festgestellt werden. Die durch das Auftreten der Leistungsänderung verursachte Signalschwankung wird vom Algorithmus instantan durch eine Veränderung der Stellgröße ausgeglichen. Die hier betrachteten Störungen haben bei einer Regelung keinen Einfluss auf das Prozessergebnis. Längsschliffe im Bereich der Störstelle der Schweißungen belegen die Reaktion des Algorithmus in Echtzeit.

### 5.5.2 Verschmutzung des Schutzglases

Störungen der Laserleistung nach dem Strahlteiler der Bearbeitungsoptik werden hauptsächlich durch Störkonturen im Strahlverlauf oder Verschmutzungen von Schutzgläsern oder Fokussierlinsen verursacht. Die beschriebenen Ausprägungen können auch die mit dem Sensorsystem analysierte Prozessstrahlung beeinflussen. Im Gegensatz zu der zuvor betrachteten Variation der Laserleistung ist nun die Eingangsgröße des Regelkreises direkt von der Störung betroffen.

Die beschriebenen Störeinflüsse werden exemplarisch durch eine Verschmutzung des Schutzglases der Fokussierlinse nachgebildet. Eine objektive Beschreibung des Verschmutzungsgrades ist für den Laserschweißprozess nicht möglich, da sich zum Beispiel Faktoren wie die exakten Positionen von Schmelzspritzern unterschiedlich auf das Prozessergebnis auswirken können. Aus diesem Grund können hier nur prinzipielle Unterschiede von gesteuerten und geregelten Laserschweißprozessen untersucht werden. Bei einer applikationsbezogenen Prozessentwicklung müssen real auftretende Verschmutzungen des Schutzglases detailliert analysiert werden.

Bild 5.15 vergleicht die Einschweißtiefen, welche mit sauberem, leicht und stark verschmutztem Schutzglas realisiert werden. Das leicht verschmutzte Schutzglas absorbiert ungefähr 11,6 W (5,1 %), das stark verschmutzte 20,2 W (8,9 %) der ursprünglichen Leistung. Bei der Verschmutzung der Schutzgläser handelt es sich um Schmauchrückstände, welche bei vorherigen Schweißungen aufgebracht wurden.

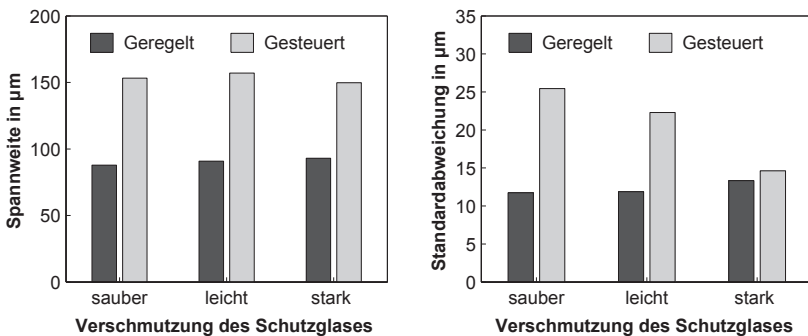


**Bild 5.15:** Einschweißtiefe für Schweißungen mit verschmutzten Schutzgläsern ohne Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ ,  $P_L = 345 \text{ W}$ ,  $S = 1,32 \text{ V}$ .

Die Parameter beider Prozesse werden derart gewählt, dass die mittlere Einschweißtiefe bei sauberem Schutzglas  $700 \mu\text{m}$  beträgt. Bei einer Verschweißung zweier  $500 \mu\text{m}$ -Hülsen ist dadurch eine Anbindung des unteren Fügepartners gewährleistet. Die Absorption der Laserstrahlung im verschmutzten Schutzglas hat zur Folge, dass weniger Leistung auf der Werkstückoberfläche zur Verfügung steht. Beim gesteuerten Prozess ergibt sich dementsprechend ein Rückgang der mittleren Einschweißtiefe um  $51 \mu\text{m}$  (7,3 %) für die leichte und  $156 \mu\text{m}$  (22,2 %) für die starke Verschmutzung des Schutzglases. Zusätzlich zeigen die Längsschliffe, dass die Fügepartner bei starker Verschmutzung partiell nicht mehr miteinander verschweißt werden.

Beim geregelten Schweißprozess zeigt sich ein gegenläufiges Verhalten, welches zweigeteilt betrachtet werden muss. Die Verschmutzung des Schutzglases beeinflusst sowohl die Leistung als auch die detektierte Strahlungsintensität. Die Reduzierung der Leistung führt wie beim gesteuerten Prozess zu einer verminderten Einschweißtiefe. Ein Rückgang des Infrarotsignals ist die Folge. Der Regelalgorithmus erhöht die Laserleistung, so dass, ausgehend von den Untersuchungen des vorangegangenen Kapitels, der Rückgang der Einschweißtiefe vollständig kompensiert wird. Die in Bild 5.15 dargestellten Verläufe der Einschweißtiefe zeigen allerdings, dass eine Überkompensation durch den Regler stattfindet und die mittlere Einschweißtiefe um  $15\text{ }\mu\text{m}$  (2,1 %) bzw.  $55\text{ }\mu\text{m}$  (7,8 %) erhöht wird. Verursacht wird dieses Verhalten durch einen zusätzlichen Absorptionsprozess beim Durchgang der Prozessstrahlung durch das verschmutzte Schutzglas. Die dem Regler zugeführte Intensität wird weiter reduziert, wodurch eine zu hohe Leistungsvorgabe ausgegeben wird.

In Bild 5.16 sind zwei Streumaße dargestellt. Die Spannweite ist für gesteuerte und geregelte Laserschweißungen unabhängig vom Verschmutzungsgrad. Für den geschlossenen Regelkreis ist die Standardabweichung nahezu konstant und nimmt bei offenem Regelkreis mit steigender Verschmutzung ab. Dieses Verhalten ist durch den starken Rückgang der Einschweißtiefe für den gesteuerten Laserschweißprozess begründet. Bereits in Kapitel 5.4.2 konnte nachgewiesen werden, dass beim Rückgang der Einschweißtiefe auch eine Reduzierung der Standardabweichung bei gesteuerten Prozessen zu beobachten ist. Grundsätzlich zeigt sich, dass die Streuung durch eine Prozessregelung verringert werden kann.



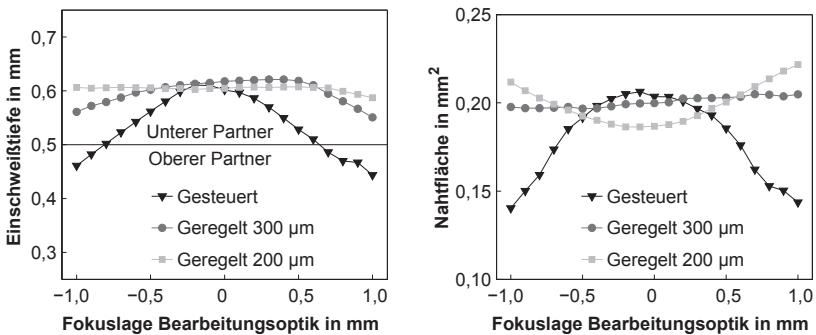
**Bild 5.16:** Spannweite und Standardabweichung für Schweißungen mit verschmutzten Schutzgläsern ohne Schutzgas,  $d_f = 225\text{ }\mu\text{m}$ ,  $v = 1,75\text{ m/min}$ ,  $P_L = 345\text{ W}$ ,  $S = 1,32\text{ V}$ .

Störungen der Leistung durch eine Verschmutzung nach dem Strahlteiler können nicht vollständig ausgeglichen werden. Die Ursache hierfür ist die Beeinflussung der Prozessstrahlung, welche eine Veränderung der Korrelationsbeziehung bewirkt. Die hier dargestellten positiven Tendenzen der Regelung können nur als Richtwert dienen. Sie müssen bei einer Prozessentwicklung verifiziert werden.

## 5.6 Variation der Fokusslage der Bearbeitungsoptik

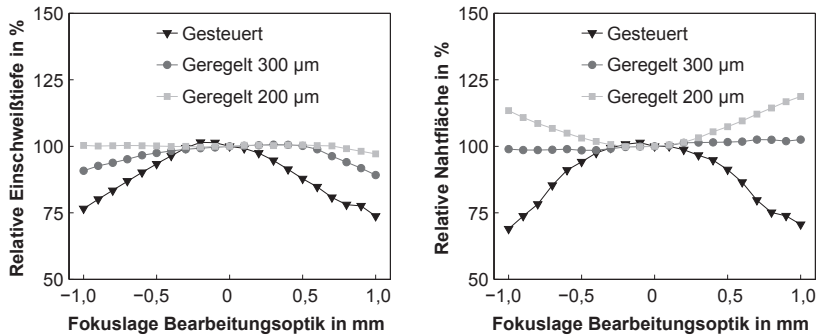
Schweißprozesse unter Serienbedingungen unterliegen stets Schwankungen in der Fokusslage. Diese können durch eine mangelhafte Positionierung oder eine unzureichende Bauteiltolerierung verursacht werden. Auch die Erwärmung optischer Elementen kann Ursache sein [117]. Derartige Schwankungen führen häufig zur Veränderung der Einschweißtiefe und der Nahtfläche. Eine ausreichende Anbindung kann bei Überlappschweißungen unter Umständen nicht sichergestellt werden.

Die Bilder 5.17 und 5.18 zeigen die Unterschiede beider Schweißprozesse für eine Defokussierung der Schweißoptik um maximal  $\pm 1$  mm. Die Untersuchungen werden abweichend zu den vorangegangenen Messungen mit Beobachtungsfasern mit einem Durchmesser von 200  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$  durchgeführt, da diese Fasern bei einer Fokusslagenvariation spezifische Unterschiede im Prozessergebnis zeigen. Die Parameter der Regelung sind dabei derart gewählt, dass äquivalent zum gesteuerten Prozess mit 340 W eine mittlere Einschweißtiefe von 600  $\mu\text{m}$  im Fokus realisiert wird.



**Bild 5.17:** Einschweißtiefe und Nahtfläche für eine Fokusvariation um  $\pm 1$  mm bei Schweißungen ohne Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ ,  $P_L = 340 \text{ W}$ ,  $S_{200} = 1,355 \text{ V}$ ,  $S_{300} = 2,62 \text{ V}$ .





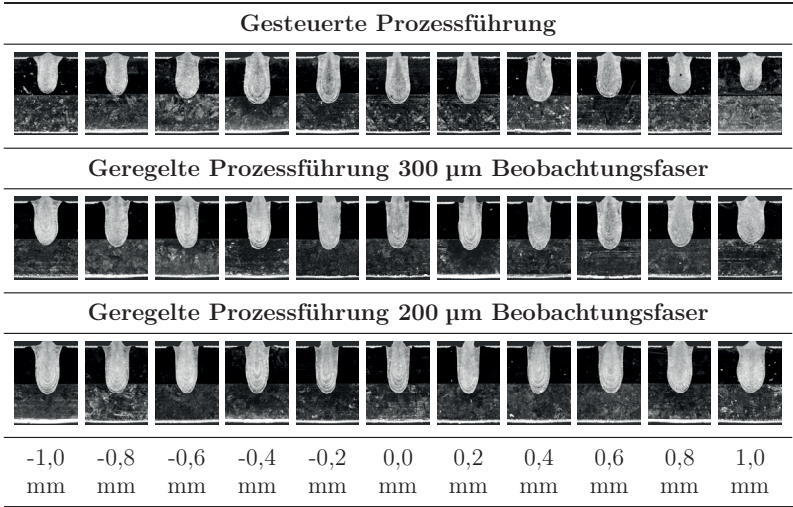
**Bild 5.18:** Relative Einschweißtiefe und Nahtfläche für eine Fokusvariation um  $\pm 1$  mm bei Schweißungen ohne Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ ,  $P_L = 340 \text{ W}$ ,  $S_{200} = 1,355 \text{ V}$ ,  $S_{300} = 2,62 \text{ V}$ .

Durch die Defokussierung verringert sich bei konstanter Laserleistung die Leistungsdichte auf der Bauteiloberfläche. Als Folge dessen ergibt sich für den gesteuerten Schweißprozess eine Verringerung der Einschweißtiefe und der Nahtfläche in den defokussierten Bereichen. Dabei ist ein maximaler Rückgang der Einschweißtiefe um 23 % bzw. um 26 % in den Randbereichen zu beobachten. Eine Anbindung des unteren Fügepartners ist ab einer Defokussierung der Bearbeitungsoptik von  $-0,8 \text{ mm}$  bzw.  $0,6 \text{ mm}$  nicht mehr sichergestellt. Auch der Rückgang der Nahtfläche um bis zu 32 % kann zu einer Verschlechterung der Nahteigenschaften führen.

Die Regelung kann im Gegensatz dazu eine Anbindung des unteren Fügepartners auch in den stark defokussierten Bereichen gewährleisten. Bei der Verwendung einer Beobachtungsfaser mit einem Kerndurchmesser von  $300 \mu\text{m}$  kann noch ein leichtes Abfallen der Einschweißtiefe beobachtet werden. Trotz dieses Rückgangs um 9 % bzw. 11 % in den maximal defokussierten Bereichen werden beide Fügepartner verbunden. Eine  $200 \mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser erreicht dagegen einen nahezu konstanten Einschweißtiefenverlauf über den gesamten Variationsbereich, so dass Anbindefehler durch eine Defokussierung mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen sind.

Bezogen auf die Nahtfläche zeigt die  $300 \mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser einen konstanten Verlauf. Die Reduzierung der Nahtfläche aufgrund des Rückgangs der Einschweißtiefe wird vollständig mit der Flächenzunahme durch das Anwachsen der Nahtbreite kompensiert. Bei der  $200 \mu\text{m}$ -Faser sorgt die Zunahme der Nahtbreite bei konstanter Einschweißtiefe für ein Anwachsen der Nahtfläche in den Randbereichen.

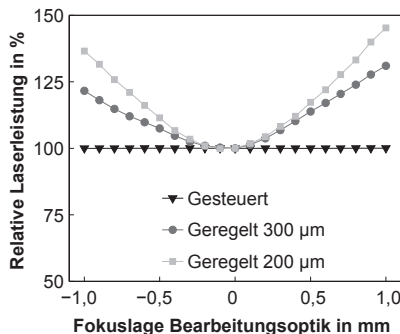
Bild 5.19 zeigt die bei der Variation der Fokuslage realisierten Nahtgeometrien zur Verdeutlichung der Unterschiede gesteuerter und geregelter Schweißprozesse. Dabei ist für die Einschweißtiefe deutlich zu erkennen, dass der gesteuerte Prozess im defokussierten Bereich eine Anbindung nicht mehr sicherstellen kann.



**Bild 5.19:** Nahtgeometrien für eine Fokusvariation für Schweißungen ohne Schutzgas.

Die Anbindung des unteren Fügepartners wird bei der Regelung durch eine Erhöhung der Laserleistung in den defokussierten Bereichen sichergestellt. Bild 5.20 zeigt die relativen Laserleistungen der Schweißprozesse für die Fokuslagenvariation. Dabei wird die mittlere Laserleistung im Verhältnis zu ihrem Wert im Fokus dargestellt.

Die Abbildung verdeutlicht, dass die Anpassung der Laserleistung eine Verbesserung der Nahteigenschaften in den defokussierten Bereichen bewirkt. Der unterschiedliche Verlauf der relativen Leistung für verschiedene Beobachtungsfasern ist mit Hilfe von Bild 4.4 erklärbar. Dabei zeigt die 200 µm-Beobachtungsfaser eine stärkere Krümmung des Signalverlaufs bei einer Variation der Fokuslage mit gesteuertem Prozessverlauf als die 300 µm-Beobachtungsfaser. Für eine Prozessregelung passt der Regler die aktuelle Laserleistung an die jeweilige Signalintensität an. Folglich muss sich bei einer defokussierten Schweißung für die 200 µm-Beobachtungsfaser eine höhere Laserleistung einstellen als für die 300 µm-Beobachtungsfaser. Dies führt zu einer Vergrößerung der Einschweißtiefe und der Nahtfläche.



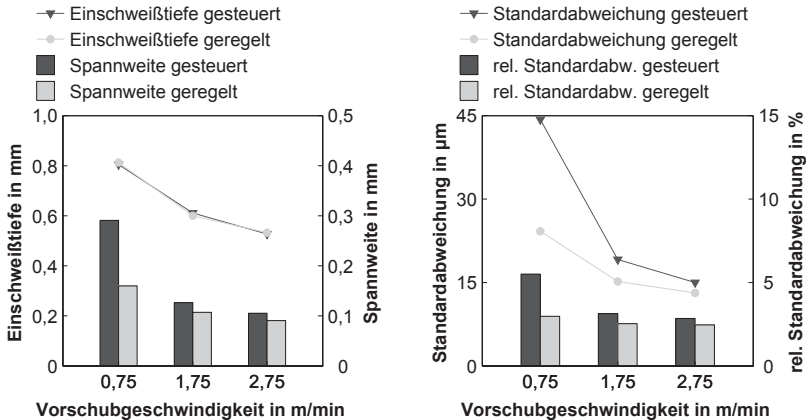
**Bild 5.20:** Mittlere relative Laserleistung für eine Fokusvariation um  $\pm 1$  mm bei Laserschweißungen ohne Schutzgas,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ ,  $P_L = 340 \text{ W}$ ,  $S_{200} = 1,355 \text{ V}$ ,  $S_{300} = 2,62 \text{ V}$ .

## 5.7 Variation der Vorschubgeschwindigkeit

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass durch eine Regelung von Laserschweißungen eine Verbesserung des Prozessergebnisses erreicht werden kann. Dabei wurden alle Untersuchungen mit einer identischen Geschwindigkeit von  $1,75 \text{ m/min}$  durchgeführt. Eine Aussage über die Qualität der geregelten Schweißverbindungen ist bei einer abweichenden Vorschubgeschwindigkeit nicht möglich.

Es wird nun untersucht, ob durch die Prozessregelung auch eine Verbesserung der Nahtqualität bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten erzielt werden kann. Dazu wird für die drei Vorschubgeschwindigkeiten  $0,75 \text{ m/min}$ ,  $1,75 \text{ m/min}$  und  $2,75 \text{ m/min}$  die Standardabweichung und die Spannweite der Einschweißtiefe durch Auswertung von Längsschliffen genauer untersucht.

Bild 5.21 zeigt die mittleren Einschweißtiefen, die Standardabweichungen und die Spannweiten der Schweißungen mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten. Zur Berechnung der relativen Standardabweichung dient jeweils die mittlere Einschweißtiefe als Referenzwert. Ein Vergleich dieser Kenngrößen für eine bestimmte Vorschubgeschwindigkeit ist nur dann sinnvoll, wenn die mittleren Einschweißtiefen der geregelten und gesteuerten Schweißungen übereinstimmen. Dazu werden die gesteuerten Schweißungen durch eine Veränderung der verwendeten Laserleistung an den Einschweißtiefenverlauf der geregelten Schweißungen angepasst. Andernfalls würden unterschiedliche prozessbedingte Störgrößen wirken.



**Bild 5.21:** Einschweißtiefe, Spannweite, relative und absolute Standardabweichung von gesteuerten und geregelten Schweißungen bei einer Variation der Vorschubgeschwindigkeiten,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $S = 2,65 \text{ V}$ .

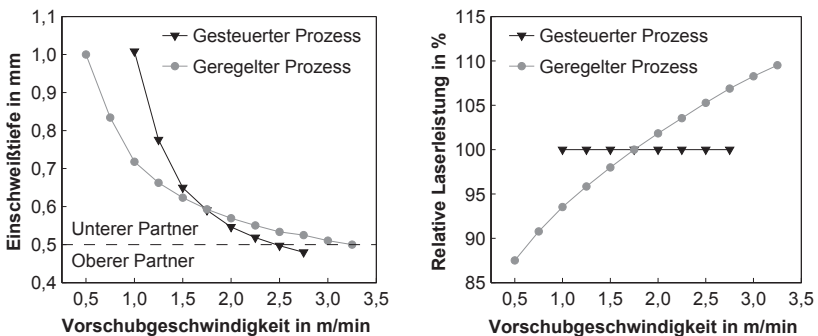
Die Spannweite der Einschweißtiefe sinkt sowohl für den geregelten als auch für den gesteuerten Prozess mit steigender Vorschubgeschwindigkeit ab. Verursacht wird dieses Verhalten durch den Rückgang der Einschweißtiefe und die damit verbundene Reduzierung von Prozessschwankungen. Durch die Regelung kann eine deutliche Reduzierung der Kenngröße erreicht werden. Somit sinkt die Wahrscheinlichkeit einer Durchschweißung bzw. einer mangelhaften Anbindung des unteren Fügepartners durch eine Abweichung der Einschweißtiefe von ihrem Mittelwert.

Auch die Standardabweichung zeigt für steigende Geschwindigkeiten bei beiden Prozessen einen abfallenden Verlauf. Daraus folgt, dass durch eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und der damit verbundenen Reduzierung der Einschweißtiefe eine Beruhigung des Prozesses verbunden ist. Die auf die jeweilige Einschweißtiefe bezogene relative Standardabweichung verdeutlicht, dass durch einen geregelten Laserprozess eine nahezu identische prozentuale Schwankung der Einschweißtiefe realisiert wird. Ein gesteuerter Schweißprozess zeigt demgegenüber ein Ansteigen der prozentualen Schwankungen bei einer Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit.

Der Vergleich beider Prozessverläufe bestätigt, dass der Regler in der Lage ist, Einschweißtiefe-schwankungen bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten zu reduzieren. Es soll nun verdeutlicht werden, wie der geregelte Schweißprozess auf eine Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit reagiert.

Dazu wird für beide Prozesse, ausgehend von identischen Einschweißtiefen bei einem Vorschub von 1,75 m/min, die Geschwindigkeit bei sonst konstanten Bedingungen variiert. Gesteuerte Schweißungen bei einer mittleren Laserleistung von 340 W dienen als Referenzmessungen. Für eine Vorschubgeschwindigkeit von 1,75 m/min ergibt sich eine Einschweißtiefe von ungefähr 600  $\mu\text{m}$ . Sämtliche Parameter des geregelten Prozesses werden so gewählt, dass bei einer Schweißgeschwindigkeit von 1,75 m/min eine identische mittlere Einschweißtiefe realisiert wird.

Bild 5.22 zeigt für gesteuerte und geregelte Schweißungen den Verlauf der Einschweißtiefe und der relativen Laserleistung bei einer Variation der Vorschubgeschwindigkeit. Als Referenzwert der relativen Laserleistung dient die mittlere Leistung bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 1,75 m/min. Das Prozessfenster ist durch die geometrischen Randbedingungen der untersuchten Bauteile beschränkt. Die Durchschweißung beider Fügepartner begrenzt die Vorschubgeschwindigkeit nach unten. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit des Laserschweißprozesses ist erreicht, wenn keine Anbindung des unteren Fügepartners gegeben ist.



**Bild 5.22:** Verlauf der Einschweißtiefe und der relativen Laserleistung bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit,  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $P_L = 340 \text{ W}$ ,  $S = 2,50 \text{ V}$ .

Für die gesteuerten Schweißungen sind bei einer Variation um  $\Delta v = \pm 0,75 \text{ m/min}$  die Prozessgrenzen erreicht. Bei dem geregelten Prozess verläuft die Einschweißtiefe deutlich flacher. Die vollständige Durchschweißung der beiden Fügepartner ist bei Vorschubgeschwindigkeit unterhalb von  $v = 0,50 \text{ m/min}$  zu beobachten. Eine unzureichende Anbindung des unteren Fügepartners wird erst bei einer Erhöhung auf  $v = 3,25 \text{ m/min}$  erreicht. Das Prozessfenster von  $\Delta v = 1,5 \text{ m/min}$  im gesteuerten Fall kann durch die Regelung auf  $\Delta v = 2,75 \text{ m/min}$  nahezu verdoppelt werden.

Realisiert wird das Verhalten des geregelten Prozesses durch eine Anpassung der Laserleistung an die Signalintensität. Im gesteuerten Fall reduziert sich bei steigender Vorschubgeschwindigkeit die Einschweißtiefe. Ein Absinken der Signalintensität ist die Folge. Der geregelte Prozess erhöht deswegen die zugeführte Laserleistung. Das Verhalten für geringere Geschwindigkeiten erklärt sich dabei analog. Eine vollständige Kompensation der Einschweißtiefenabweichung ist nicht zu realisieren, da mit der Geschwindigkeitsvariation auch eine Änderung der Nahtgeometrie und somit der Korrelationsbeziehung von Einschweißtiefe und Sensorsignal verbunden ist. Für eine industrielle Anwendung ist die Vorschubgeschwindigkeit konstant, so dass dieses Verhalten des geregelten Prozesses keine Einschränkung darstellt.

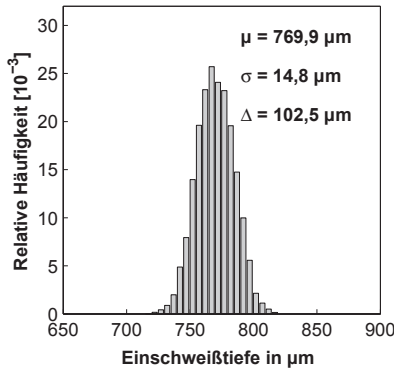
## 5.8 Einfluss von Schutzgasen auf die Regelung

Die bisherigen Untersuchungen beschränken sich auf Schweißungen ohne Schutzgas. Beim Laserstrahlschweißen werden häufig Schutzgase zur Abschirmung der Wechselwirkungszone zugeführt. Diese wirken sich auch auf das Entgasungsverhalten des Schmelzbades, die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes, die Viskosität der Schmelze, die Einbrandgestaltung und das Benetzungsverhalten aus [118].

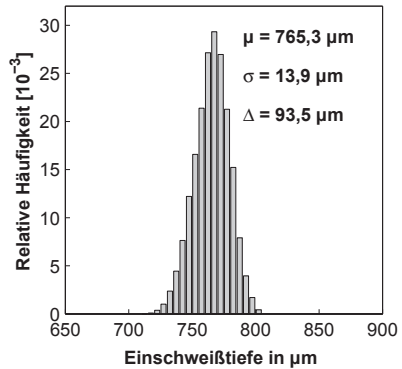
In Kapitel 4.3.3 wurde nachgewiesen, dass, bezogen auf die Korrelationsbeziehung von Nahtkenngrößen zu Signalen, lediglich Unterschiede zwischen Schweißungen mit und ohne Schutzgas festzustellen sind. Die Signale für die inerten Schutzgase Stickstoff, Helium und Argon zeigen ein ähnliches Verhalten. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse für Schweißungen ohne Schutzgas auf Schweißungen mit Schutzgas übertragen werden, wobei die Betrachtung auf Stickstoff beschränkt wird.

### 5.8.1 Prozessbedingte Einschweißtiefenschwankungen

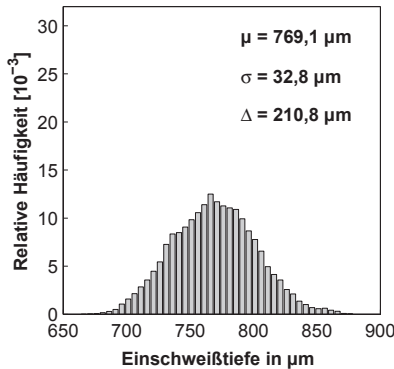
In Kapitel 5.4 konnte für geregelte Laserschweißungen ohne Schutzgas gezeigt werden, dass eine Reduzierung prozessbedingter Schwankungen der Einschweißtiefe erzielt wird. Der Einfluss des Schutzgases Stickstoff auf die Regelung ist in Bild 5.23 dargestellt. Die Schweißparameter sind für beide Prozesse derart gewählt, dass eine mittlere Einschweißtiefe von ungefähr 770  $\mu\text{m}$  realisiert wird. Für beide Prozesse wirken somit ähnliche prozessbedingte Störgrößen. Zusätzlich zu den Histogrammen der Schweißungen mit Stickstoff sind die Ergebnisse ohne Schutzgas dargestellt.



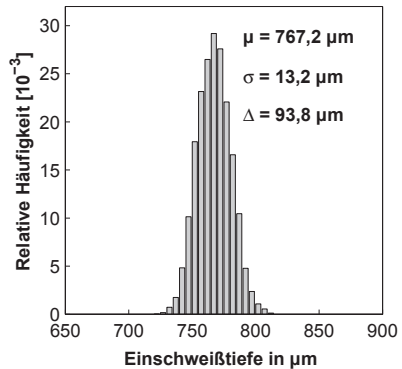
(a) Gesteuerter Prozess – Stickstoff



(b) Geregelter Prozess – Stickstoff



(c) Gesteuerter Prozess – kein Gas



(d) Geregelter Prozess – kein Gas

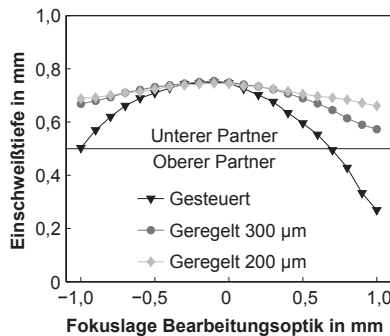
**Bild 5.23:** Histogramme gesteuerter und geregelter Prozesse ohne Schutzgas und mit Stickstoff als Schutzgas (10 l/min),  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

Beim Einsatz von Stickstoff als Schutzgas kann die Standardabweichung der Einschweißtiefe durch die Regelung nur marginal von  $14,8 \mu\text{m}$  auf  $13,9 \mu\text{m}$  reduziert werden. Auch die Spannweite der Einschweißtiefe zeigt nur einen geringfügigen Rückgang von  $102,5 \mu\text{m}$  auf  $93,5 \mu\text{m}$ . Die Häufigkeitsverteilungen der gesteuerten und geregelten Laserschweißungen mit dem Schutzgas Stickstoff zeigen folglich keine signifikanten Unterschiede bezüglich der definierten Vergleichskenngrößen. Bei beiden Prozessen können prozessbedingte Schwankungen der Einschweißtiefe ausgeglichen werden.

Es stellt sich nun die Frage, aus welchen Gründen die Verbesserungen des Prozessergebnisses bei Schweißungen ohne Schutzgas nicht erreicht werden. Die Betrachtung der Histogramme für gesteuerte Schweißungen mit und ohne Schutzgas verdeutlicht, dass der Prozess durch den Stickstoffeinfluss sehr stark beruhigt wird. Sowohl die Standardabweichung als auch die Spannweite werden mehr als halbiert. Der Vergleich der Histogramme für geregelte Schweißungen mit und ohne Schutzgas zeigt dagegen, dass für beide Prozesse nahezu identische Ergebnisse realisiert werden. Durch die Regelung kann folglich eine gleichbleibende Qualität der Schweißung mit und ohne Schutzgas erzeugt werden. Dementsprechend verschlechtert der Schutzgas-einfluss die Funktion der Regelung nicht. Die applikationsangepasste Entwicklung einer Schweißung mit Schutzgas muss folglich untersuchen, welcher der Prozesse, bezogen auf nicht prozessbedingte Störungen, eine größere Fehlertoleranz zeigt.

### 5.8.2 Variation der Fokuslage der Bearbeitungsoptik

Kapitel 5.6 untersuchte die Auswirkung einer Fokuslagenvariation auf Schweißungen ohne Schutzgas. Dieses Kapitel überträgt die Ergebnisse auf Schweißungen mit Schutzgas. Dazu werden die Prozesse so ausgelegt, dass im Fokus eine Einschweißtiefe von ungefähr 750  $\mu\text{m}$  erreicht wird. Analog zu den Versuchen ohne Schutzgas werden die Messungen für Beobachtungsfasern mit einem Durchmesser von 200  $\mu\text{m}$  und von 300  $\mu\text{m}$  durchgeführt, da diese Fasern spezifische Unterschiede zeigen. Bild 5.24 stellt die Einschweißtiefe bei einer Variation der Fokuslage dar.



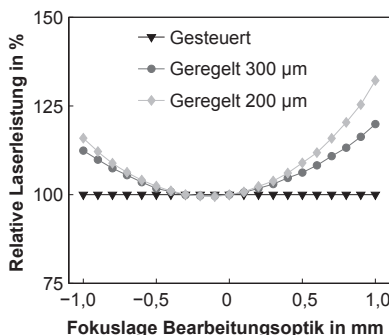
**Bild 5.24:** Einschweißtiefe bei einer Fokusvariation um  $\pm 1$  mm für Laserschweißungen mit dem Schutzgas Stickstoff (10 l/min),  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75$  m/min,  $P_L = 345$  W,  $S_{200} = 2,73$  V,  $S_{300} = 3,35$  V.



Die Einschweißtiefe für Schweißungen mit Schutzgas zeigt für eine Variation der Fokuslage der Bearbeitungsoptik ein ähnliches Verhalten zu den Schweißungen ohne Schutzgas. Ab einer Defokussierung von  $-0,9$  mm bzw.  $0,5$  mm fällt die mittlere Einschweißtiefe durch die Reduzierung der Leistungsdichte auf der Bauteiloberfläche unter  $500$   $\mu\text{m}$ . Eine sichere Anbindung des unteren Fügepartners ist besonders für eine Verlagerung des Fokus in positiver Richtung nicht mehr gewährleistet.

Die Prozessregelung erlaubt eine Anbindung des unteren Fügepartners über den gesamten Variationsbereich sowohl für die  $200$   $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser als auch für die  $300$   $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser. Lediglich für eine starke Defokussierung kann ein geringfügiger Rückgang der Einschweißtiefe für den geregelten Prozess festgestellt werden. Dabei zeigt die  $200$   $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser analog zu den Schweißungen ohne Schutzgas ein tendenziell besseres Verhalten als die  $300$   $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser. Ein von der Fokuslage unabhängiges Verhalten der Einschweißtiefe ist jedoch für die betrachteten Beobachtungsfasern nicht umsetzbar.

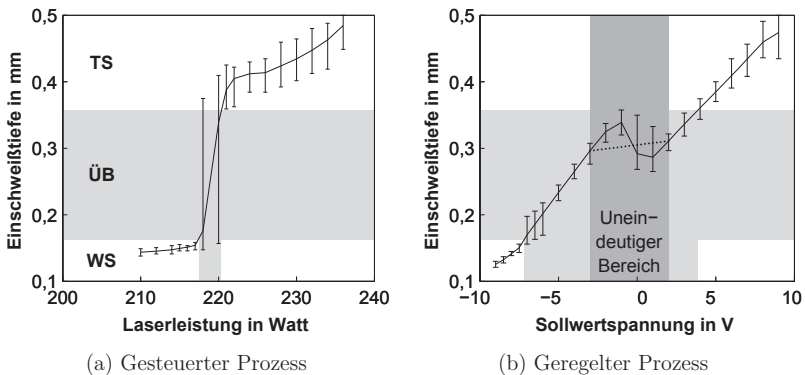
Die beschriebenen Verbesserungen des Einschweißtiefenverlaufs bei einer Variation der Fokuslage der Bearbeitungsoptik erklären sich mit Hilfe der relativen Leistung. Für beide Beobachtungsfasern zeigt sich in Bild 5.25 in den Randbereichen des Kurvenverlaufs eine erhöhte Laserleistung. Die Leistungsdichte wird dadurch erhöht, so dass eine größere Einschweißtiefe realisiert werden kann.



**Bild 5.25:** Relative Laserleistung bei einer Fokusvariation um  $\pm 1$  mm für Schweißungen mit dem Schutzgas Stickstoff ( $10$  l/min),  $d_f = 225$   $\mu\text{m}$ ,  $v = 1,75$  m/min,  $P_L = 345$  W,  $S_{200} = 2,73$  V,  $S_{300} = 3,35$  V.

### 5.8.3 Geregelter Schweißen im Übergangsbereich

In Kapitel 4.3.3 wurde beim Schweißen mit Schutzgas ein charakteristischer Sprung in den Signalen des gesteuerten Prozesses beobachtet. Dieser Abschnitt wurde in Kapitel 4.5 als Übergangsbereich (ÜB) zwischen Wärmeleitungsschweißen (WS) und Tiefschweißen (TS) identifiziert. Die Einschweißtiefe steigt dabei für einen gesteuerten Prozess sprunghaft an. Bild 5.26 verdeutlicht dies und stellt den Einschweißtiefenverlauf für eine geregelte Prozessführung gegenüber. Dabei geben die Fehlerbalken die minimal bzw. maximal erreichte Einschweißtiefe wieder.



**Bild 5.26:** Einschweißtiefe in Abhängigkeit der Laserleistung und der Sollwertspannung im Übergangsbereich für gesteuerte und geregelte Schweißungen mit Stickstoff ( $10 \text{ l/min}$ ),  $d_f = 225 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

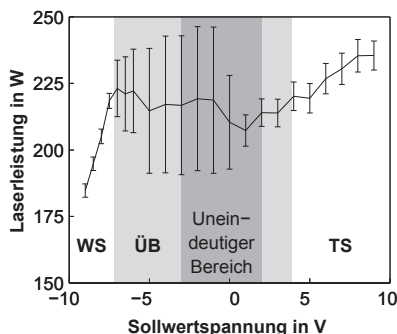
Für die gesteuerte Schweißung wächst die Einschweißtiefe zunächst nahezu linear an. Die geringen prozessbedingten Schwankungen sind charakteristisch für das Wärmeleitungsschweißen. Bei der Leistung von  $218 \text{ W}$  steigt die Einschweißtiefe sprunghaft an. Bemerkenswert ist, dass im hellgrau hinterlegten Bereich zwischen  $163 \text{ }\mu\text{m}$  und  $358 \text{ }\mu\text{m}$  kein stabiles Einschweißtiefenniveau erzielt werden kann. Längsschliffe belegen, dass die Einschweißtiefe zwischen den Grenzen stetig springt. Lediglich durch Mittelwertbildung kann eine mittlere Einschweißtiefe in diesem Bereich erreicht werden. Bis zur Durchschweißung folgt der Tiefschweißbereich.

Für den geschlossenen Regelkreis ist der Übergangsbereich ebenfalls hellgrau hinterlegt, wobei die Einschweißtiefungrenzen des gesteuerten Prozesses übernommen wurden. Auch hier zeigt sich beim Wärmeleitungsschweißen ein ruhiger Verlauf des

Prozesses, charakterisiert durch die geringen Schwankungen der Einschweißtiefe. Das sprunghafte Anwachsen der Einschweißtiefe im sich anschließenden Übergangsbereich kann durch die Regeleingriffe verhindert werden. Lediglich eine leichte Vergrößerung der Spannweite im unteren Abschnitt ist zu beobachten. Deutlich ist auch die geänderte Steigung in diesem Abschnitt zu erkennen. Durch die Eingriffe in den Schweißprozess ist es somit möglich, Einschweißtiefenniveaus prozesssicher zu erreichen, die für einen gesteuerten Prozess nicht realisierbar sind.

Der dunkelgrau hinterlegte Bereich der geregelten Einschweißtiefe ist durch eine Besonderheit gekennzeichnet. Im Gegensatz zum sonst üblichen Verhalten reduziert sich die Einschweißtiefe in diesem Bereich bei einer Erhöhung der Sollwertspannung. Daraus kann gefolgert werden, dass die Korrelationsbeziehung im Übergangsbereich eine Uneindeutigkeit zeigt. Die Regelung wird durch dieses Prozessverhalten jedoch nicht negativ beeinflusst, da bei der Vermeidung von Sollwerten zwischen -3 V und 2 V trotzdem sämtliche Einschweißtiefen realisierbar sind. Beide Eckpunkte sind deshalb durch eine gepunktete Linie miteinander verbunden.

Die vom geregelten Prozess eingesetzte mittlere Laserleistung und die Standardabweichung selbiger sind in Bild 5.27 dargestellt. Die hellgrauen und dunkelgrauen Bereiche sind äquivalent Bild 5.26 eingezeichnet.



**Bild 5.27:** Laserleistung in Abhängigkeit der Sollwertspannung.

Es zeigt sich, dass sowohl für den Wärmeleitungsschweißbereich als auch für den Tiefschweißbereich mit steigendem Sollwert die vom Laser abgerufene Leistung steigt. Die Standardabweichung, welche durch die Fehlerbalken dargestellt wird, ist in diesen beiden Abschnitten vergleichsweise gering. Im Übergangsbereich muss die Leistung durch den Regelalgorithmus stark variiert werden. Diese Tatsache

verdeutlicht, dass der geregelte Laserschweißprozess die Einschweißtiefe auf ein Zwischenniveau drängt, welches mit einem gesteuerten Prozess nicht zu erreichen ist. Sobald die Einschweißtiefe zu stark anzuwachsen droht und der Prozess in Richtung Tiefschweißbereich abdriftet, muss der Regelalgorithmus die Laserleistung stark zurücknehmen. Analog folgt, dass bei sinkender Einschweißtiefe der Regler die Laserleistung entsprechend stark erhöhen muss, um ein Zurückfallen in den Wärmeleitungsschweißbereich zu verhindern. Ursache dieser starken Reaktion des Regelalgorithmus ist das sprunghafte Anwachsen des Infrarotsignals im Übergangsbereich (vgl. Bild 4.11). Eine eindeutige Tendenz der mittleren Laserleistungen ist nicht erkennbar. Abhängig vom jeweiligen Verlauf des Laserschweißprozesses kann es trotz eines Ansteigens des Sollwerts bzw. der mittleren Einschweißtiefe zu einem Rückgang der Laserleistung kommen.

## 5.9 Diskussion der Ergebnisse

In Kapitel 2.3 wurden die in der Literatur vorgestellten Untersuchungen zur Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen zusammengefasst. Dabei zeigten sich positive Ergebnisse bei der Regelung von Abweichungen in der Fokuslage, welche jedoch speziell für Schweißungen mit geringer Einschweißtiefe verbesserungsbedürftig sind. Bei der Regelung der Einschweißtiefe sind die gegenwärtigen Verfahren lediglich zu einem Ausregeln großer Leistungsvariationen in der Lage, wobei trotz Regelung große Schwankungen der Einschweißtiefe zu beobachten sind. Zahlreiche Autoren führen dies auf zu geringe Geschwindigkeiten des Regelkreises zurück, die eine Abbildung der hohen Dynamik des Laserschweißprozesses nicht ermöglichen. Eine Reduzierung von Einschweißtiefe-Schwankungen, welche durch prozessspezifische Vorgänge hervorgerufen werden, ist gegenwärtig nicht möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Sensorsystem für das Laserschweißen entwickelt, welches prozessbedingte Störungen ausregeln und die Streuung der Einschweißtiefe reduzieren kann. Diese Eigenschaften wurden für verschiedene Einschweißtiefen in unterschiedlichen Prozessphasen nachgewiesen. Des Weiteren konnten die Vorteile des geregelten Prozesses im Vergleich zu Schweißungen bei konstanter Laserleistung durch Variation der Fokuslage und der Vorschubgeschwindigkeit aufgezeigt werden. Auch für Schweißungen mit Schutzgas ergab sich ein Verbesserungspotential der Regelung. Dieses Kapitel fasst die Gründe zusammen, welche beim geregelten Schweißen zu einer Verbesserung im Vergleich zum Stand der Technik beitragen.

Besonders zu berücksichtigen ist der Aufbau des photodiodenbasierten Sensorsystems. Bedingt durch die Einkopplung der Sekundärstrahlung in eine Beobachtungsfaser und die Führung zu einer Auswerteeinheit ergeben sich zahlreiche Vorteile, welche sich in einer Verbesserung der Signalqualität äußern. Die reproduzierbaren Justagemöglichkeiten, die Blendenwirkung der Faser und die Vermeidung von elektromagnetischer Störstrahlung sind dabei besonders hervorzuheben. Auch die elektrische Weiterverarbeitung der Signale mit Hilfe speziell ausgewählter Transimpedanzverstärker kann die Qualität der Signale entscheidend verbessern. Am Ende der Sensorkette bietet ein leistungsfähiger digitaler Signalprozessor die Möglichkeit, die hohe Prozessdynamik abzubilden und durch eine Regelung zu beeinflussen.

Ausgehend von den Hardwareeigenschaften des Sensorsystems bildet die Analyse der Strahlungsverhältnisse in Kapitel 4.2 die Grundlage einer Regelung der Einschweißtiefe. Dabei wird deutlich, dass für eine optimale Beurteilung des gegenwärtigen Prozesszustands eine angepasste Sensorik – in Form speziell gewählter Beobachtungsfasern – verwendet werden muss. Durch diese Adaption des Sensorsystems an die Schweißaufgabe kann der Beobachtungsbereich auf dem Werkstück derart gewählt werden, dass alle relevanten Informationen auf den Sensor abgebildet werden. Die Untersuchungen belegen, dass der Beobachtungsfleck exakt dem Keyholebereich entsprechen muss. Die so ermittelten Signale können zu Ergebnisgrößen korreliert werden und bilden die Basis für eine Regelung.

Eine Korrelation hochaufgelöster Prozesssignale mit der Einschweißtiefe ist jedoch nur dann möglich, wenn diese mit einer vergleichbaren Genauigkeit über den Zeitverlauf abgebildet werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aus diesem Grund ein Verfahren entwickelt und in Kapitel 3.4 beschrieben, mit welchem sich die Einschweißtiefe im Längsschliff sehr genau ermitteln lässt. Mit Hilfe der so vermessenen Einschweißtiefe ist es nun möglich, Strahlungsbereiche des Laserschweißprozesses zu identifizieren, welche stark mit der Einschweißtiefe korreliert sind. Dabei zeigen sich Korrelationskoeffizienten von bis zu 89,9%.

Letztendlich führt auch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Lasergeräte zu einer Verbesserung der Regelungsstrategien. Je schneller die vom Regelsystem angeforderte Leistung im internen Regelkreis des Lasergeräts umgesetzt und ausgegeben werden kann, desto besser kann auf Änderungen im Prozessverlauf reagiert werden. Dadurch reduzieren sich die Totzeiten in der Regelschleife und die Dynamik des Schweißprozesses kann durch den geschlossenen Regelkreis besser abgebildet werden. Stichversuche mit neueren schnelleren Lasern bestätigen diese Aussage.

## 5.10 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Regelung des Laserschweißprozesses auf Basis der infraroten Strahlung aus der Wechselwirkungszone grundlegend dargestellt. Nach einer detaillierten Beschreibung des Regelsystems und der Definition von Vergleichskenngößen gesteuerter und geregelter Prozesse wurde die Funktionsweise des geregelten Laserstrahlschweißens beschrieben. Daran anschließend wurde nachgewiesen, dass prozessbedingte Schwankungen der Einschweißtiefe sowohl im Bereich des Wärmeleitungsschweißens als auch des Tiefschweißens durch eine Regelung des Schweißprozesses reduziert werden. Auch bei externen Einflussgrößen, wie einer Störung der Laserleistung oder einer Variation der Fokusposition der Bearbeitungsoptik oder der Vorschubgeschwindigkeit, ist der Regelalgorithmus in der Lage, das Prozessergebnis deutlich zu verbessern. Abschließend wurden die Ergebnisse der Schweißungen ohne Schutzgas auf Schweißungen mit Stickstoff übertragen.

Ein Vergleich zwischen gesteuerten und geregelten Laserschweißprozessen kann nur nach der Definition eindeutiger Kenngrößen der Schweißung erfolgen. Dabei wurden in diesem Kapitel die geometrischen Nahtkenngößen, die Streuung und die Spannweite zur Beschreibung der Laserschweißung gewählt. Mit Hilfe dieser Kenngrößen wurde zunächst in grundlegenden Untersuchungen nachgewiesen, dass sich durch die Regelung der Schweißung der Einfluss prozessbedingter Störungen reduzieren lässt. Dabei verringert sich die bei Einzelmessungen erzielte Standardabweichung der Einschweißtiefe um bis zu 75,3 % und die Spannweite um bis zu 65,6 %. Eine zusätzliche Berücksichtigung der Schwankungen der mittleren Einschweißtiefe bei mehreren Messungen mit identischen Schweißparametern ergibt, dass durch die Regelung eine Verbesserung der Standardabweichung um 66,9 % erreichbar ist. Die Spannweite sinkt dabei um 52,9 %. Die Übertragung der erzielten Ergebnisse auf den betrachteten Tiefschweißbereich zeigt, dass durch die Regelung eine generelle Stabilisierung des Schweißergebnisses zu beobachten ist. Die Streumaße wurden für alle Einschweißtiefenniveaus verringert. Auch für wärmeleitungsdominierte Laserschweißungen zeigt der Vergleich der Streumaße bei gesteuerten und geregelten Prozessen für identische Einschweißtiefen das Potential der Prozessregelung.

Zusätzlich zu den prozessbedingten Störgrößen wurden externe Einflüsse auf den Laserschweißprozess untersucht. Schwankungen der Laserleistung erfordern dabei eine zweigeteilte Analyse. Treten sie vor dem Strahlteiler der Bearbeitungsoptik auf, so können sie durch den Regelalgorithmus ausgeglichen werden. Störungen, die

allerdings nach dem Strahlteiler, beispielsweise durch die Verschmutzung des Schutzglases auftreten, beeinflussen zusätzlich die Prozessstrahlung und somit auch die Korrelationsbeziehung zur Einschweißtiefe. Sie können nicht vollständig ausgeglichen werden. Bei einer Variation der Fokusposition der Bearbeitungsoptik konnte für die 200  $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser ein von der Fokuslage unabhängiger Einschweißtiefenverlauf und für die 300  $\mu\text{m}$ -Beobachtungsfaser ein von der Fokuslage unabhängiger Nahtflächenverlauf realisiert werden. Durch die Anpassung der Laserleistung an die Intensität der infraroten Strahlung verändert sich zusätzlich die Nahtgeometrie im Vergleich zum gesteuerten Prozess. Bezogen auf die Vorschubgeschwindigkeit ist der geregelte Prozess auch bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten in der Lage, eine Reduzierung der Streumaße umzusetzen.

Abschließend wurden die Ergebnisse auf Schweißungen mit Schutzgas übertragen. Es stellte sich heraus, dass die Regelung bei Schweißungen mit und ohne Schutzgas gleichbleibende Prozessergebnisse ermöglicht. Die Gesamtstandardabweichung und die Spannweite zeigen für beide Prozessverläufe nur geringfügige Unterschiede. Die Auswirkungen einer Variation der Fokusposition der Bearbeitungsoptik lassen sich bei einer Regelung auch für Schweißungen mit Schutzgas weitgehendst reduzieren. Entscheidende Vorteile birgt die Regelung an der Schwelle vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen. Für einen gesteuerten Prozess ist dabei ein sprunghaftes Ansteigen der Einschweißtiefe von 163  $\mu\text{m}$  auf 358  $\mu\text{m}$  zu beobachten. Mit den verwendeten Prozessparametern sind Einschweißtiefen in diesem Bereich nicht zu realisieren. Der geregelte Prozess kann durch die Anpassung der Laserleistung an den Prozesszustand auch Einschweißtiefen innerhalb dieses Bereichs realisieren.





## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Umfeld einer industriellen Großserienfertigung werden durch den zunehmenden Kostendruck und die wachsenden Qualitätsanforderungen steigende Ansprüche an die Flexibilität der Prozesse gestellt. Das Laserschweißen bietet durch seine prozessspezifischen Eigenschaften ein hohes Potential, die geforderten Rahmenbedingungen zu erfüllen. Die Vielzahl an Parametern, welche den Schweißprozess beeinflussen, und die stetige Ausweitung der Anforderungen an die Nahtqualität drängen die Schweißprozesse jedoch in immer engere Grenzen. Gleichzeitig erhöht sich dadurch die Anfälligkeit gegenüber Störgrößen. Die resultierenden Instabilitäten führten in der Vergangenheit zur Entwicklung von Überwachungssystemen, die Fehlteile aus der Produktion ausschleusen. Der konsequente Schritt zur Erhöhung der Prozesseffizienz und Reduzierung des Ausschusses ist die Regelung des Schweißprozesses.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen untersucht. Grundlegende Untersuchungen zu den Signalen des Schweißprozesses führten zum Aufbau eines großserientauglichen Systems zur Überwachung und Regelung. Die Anwendung dieses Systems auf gesteuerte Schweißungen mündete in einer Vertiefung des Verständnisses der prozessspezifischen Vorgänge. Ausgehend von einer daraus resultierenden Korrelationsbeziehung von Sensorsignalen und Nahtkenngrößen wurde ein Regelungskonzept entwickelt. Die Funktion der Regelung wurde sowohl für prozessbedingte als auch für externe Störgrößen nachgewiesen.

Bei der Konzeption des Sensorsystems zur Prozessregelung wurden Anforderungen, basierend auf Ergebnissen grundlegender prozessdiagnostischer Untersuchungen, abgeleitet. Darauf aufbauend erfolgte der mechanische, optische und elektrische Aufbau des Systems. Zentrales Kernstück ist die Einkopplung der Prozessstrahlung in eine Beobachtungsfaser und der Transport zur Sensoreinheit. Dort wird die Strahlung spektral gefiltert, signaltechnisch aufbereitet und einem DSP zugeführt.

Zur Beschreibung des Zusammenspiels von Sensorsystem und Laserschweißprozess wurden die zentralen Eigenschaften des Sensorsystems und ihre Auswirkungen auf die detektierten Signale analysiert. Untersuchungen des Wechselwirkungsbereichs

identifizierten das Keyhole als Ursprungsort der infraroten Strahlung. Dabei zeigte sich, dass das Emissionszentrum in Nachlaufrichtung durch die Verlängerung des Keyholes und den Beitrag des Schmelzbades deformiert ist. Für eine optimale Überwachung des Schweißprozesses muss, basierend auf diesen Ergebnissen, die Beobachtungsfaser derart gewählt werden, dass sie unter Berücksichtigung der Abbildungsverhältnisse den gesamten Keyholebereich auf die Photodiode abbildet. Nur dann kann die Information über den gegenwärtigen Prozesszustand sinnvoll detektiert werden. Darüber hinaus muss eine exakte Positionierung erfolgen.

Basierend auf diesen grundlegenden Untersuchungen leitet sich ein abschnittsweise linearer Zusammenhang von Nahtkenngrößen und Signalen ab. Dabei unterscheiden sich die definierten Teilabschnitte durch die Steigung der Regressionsgeraden. Eine Zuordnung zu den Phasen des Laserschweißprozesses – Wärmeleitungsschweißen, Übergangsbereich, Tiefschweißen und Durchschweißen – konnte mit Hilfe prozessdiagnostischer Untersuchungen vollzogen werden. Die Korrelationsbeziehung äußert sich sowohl bei einer makroskopischen als auch einer mikroskopischen Betrachtung, wobei der Korrelationskoeffizient bis zu 89,9 % beträgt. Die Ergebnisse wurden auf Schweißungen mit den Schutzgasen Stickstoff, Argon und Helium übertragen.

Die Regelung des Laserschweißprozesses wurde im folgenden Verlauf der Arbeit umgesetzt und das resultierende Verbesserungspotential grundlegend untersucht. Anhand exemplarischer Schweißungen konnte die prinzipielle Funktion nachgewiesen werden. Eine qualitative Beruhigung der Einschweißtiefenschwankungen war zu beobachten. In Folgeuntersuchungen wurde der geregelte Schweißprozess für den Wärmeleitungs- und den Tiefschweißbereich evaluiert. Dabei konnte eine eindeutige Verbesserung sowohl in der Spannweite als auch in den statistischen Streumaßen – Standardabweichung und Interquartilabstand – von bis zu 75,3 % gegenüber herkömmlichen Prozessen nachgewiesen werden. Die Reduzierung dieser Vergleichskenngrößen ist direkt mit der Erhöhung der Prozessstabilität verbunden.

Neben prozessspezifischen Störgrößen wurden auch externe Einflüsse untersucht. Veränderungen der Einschweißtiefe aufgrund einer Störung der Laserleistung vor dem Strahlteiler der Beobachtungsoptik lassen sich vollständig ausregeln. Störungen durch eine Verschmutzung des Schutzglases führen zusätzlich zur Beeinflussung der detektierten Strahlung. Ihre Auswirkungen können abgeschwächt, aber nicht ausgeschlossen werden. Bei entsprechend gewählten Beobachtungsfasern sind Veränderungen der Einschweißtiefe und des Nahtquerschnitts, hervorgerufen durch eine Defokussierung der Schweißoptik, vermeidbar. Auch bei unterschiedlichen

Vorschubgeschwindigkeiten ergibt sich durch die Regelung eine Verbesserung des Prozessergebnisses. Untersuchungen der prozessspezifischen Störgrößen und der Fokusvariation bei Schweißungen mit Stickstoff verifizierten die Ergebnisse auch beim Einsatz von Schutzgasen. Dabei wurde festgestellt, dass durch eine Regelung Einschweißiefen im Übergangsbereich vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen realisiert werden können, die für gesteuerte Schweißungen ausgeschlossen sind.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden ausschließlich mit dem Werkstoff X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer: 1.4301) bei einer Verschweißung im Überlappstoß durchgeführt. Die prinzipielle Funktionsweise eines geregelten Laserschweißprozesses konnte nachgewiesen und das Verbesserungspotential abgeleitet werden. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Nahtgeometrien und Werkstoffe muss in weiterführenden Arbeiten erfolgen. Dabei ist auch die Verbindung von artungleichen Werkstoffen von großem Interesse. Die jeweils unterschiedliche Abstrahlcharakteristik der verschiedenen Materialien kann zu einer veränderten Korrelationsbeziehung und somit zu einer Beeinflussung der Regelung führen.

Die Beurteilung des Regelsystems erfolgte in dieser Arbeit mit Hilfe realitätsnaher Bauteile. Allerdings musste für die genaue Ermittlung der Einschweißtiefe eine strikte Tolerierung der Bauteile gefordert werden. Insbesondere eine Spaltbildung zwischen den Hülsen wurde durch eine entsprechende Passung minimiert. Bedingt durch den Kostendruck in einer Großserienfertigung können diese Anforderungen nicht gehalten werden. Störgrößen, die in diesem Umfeld entstehen, müssen folglich in die Weiterentwicklung des Systems einfließen, so dass das Verbesserungspotential in einer applikationsangepassten Prozessentwicklung verifiziert werden kann.

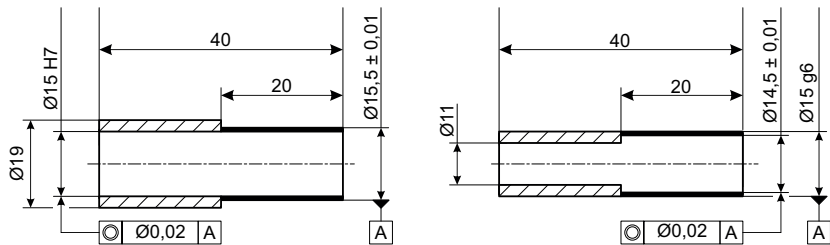
Die stetige Weiterentwicklung des Laserschweißprozesses aufgrund neuartiger Anwendungsfelder erfordert eine zusätzliche Erweiterung des Regelungskonzeptes. Hier sei beispielsweise die Entwicklung von Strahlquellen höchster Brillanz genannt. Der Einsatz dieser Laser führt zu Prozessen mit sehr hohen Einschweißiefen bei geringen Nahtbreiten. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass bei konstanten Randbedingungen die Schwankungen der Einschweißtiefe mit zunehmender Tiefe steigen. Folglich muss in weiterführenden Untersuchungen das Regelungskonzept auf diese Anforderungen überführt werden. Besonders die exakte Positionierung der Faserkopplung auf den Keyholebereich und die geänderte Abstrahlcharakteristik dieses Bereichs müssen entsprechend berücksichtigt werden. Auch bezogen auf den steigenden Einsatz von Scannersystemen, die eine Relativbewegung des Bauteils unnötig machen, muss eine Adaption des optischen Aufbaus des Regelsystems erfolgen.



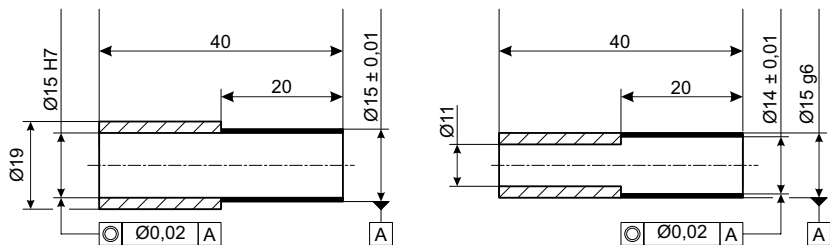
# A Anhang

## A.1 Technische Zeichnungen der Probekörper

In Kapitel 3.5 wurden die Geometrien der verwendeten Schweißproben erläutert und Anforderungen an die Fertigungstoleranzen definiert. Bild A.1 zeigt technische Zeichnungen der verwendeten Schweißproben.



(a) Gesamtwandstärke 500  $\mu\text{m}$

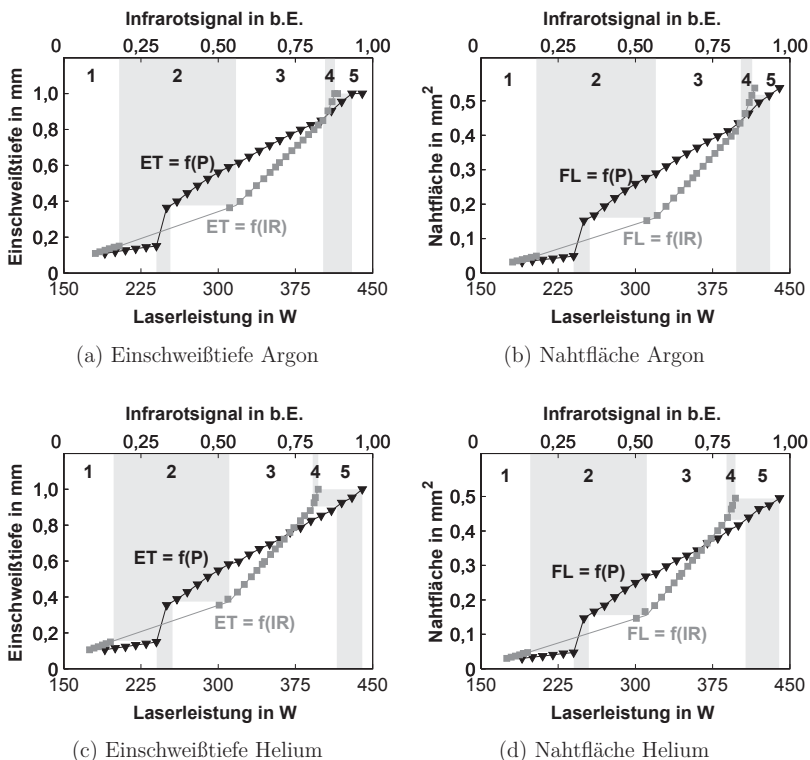


(b) Gesamtwandstärke 1000  $\mu\text{m}$

Bild A.1: Technische Zeichnungen der untersuchten Schweißproben.

## A.2 Korrelationsuntersuchungen für Argon und Helium

In Kapitel 4.3.2 wurde ein abschnittsweise linearer Zusammenhang zwischen dem Infrarotsignal und der Einschweißtiefe bzw. der Nahtfläche nachgewiesen. Die Überführung der Ergebnisse auf Schweißungen mit dem Schutzgas Stickstoff konnte in Kapitel 4.3.3 dargestellt werden. Bild A.2 erweitert die Korrelationsbeziehung auf Schweißungen mit Argon und Helium.



**Bild A.2:** Einschweißtiefe und Nahtfläche in Abhängigkeit der Laserleistung und der Signalintensität der Infrarotstrahlung bei Schweißungen mit den Schutzgasen Argon (15 l/min),  $d_f = 225 \mu\text{m}$ ,  $v = 1,75 \text{ m/min}$ .

# Literaturverzeichnis

- [1] Norm DIN 8580: 09.03. *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.*
- [2] Norm DIN 8593 – Teil 0: 09.03. *Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0: Allgemeines – Einordnung, Unterteilung, Begriffe.*
- [3] Norm DIN 8593 – Teil 6: 09.03. *Fertigungsverfahren Fügen – Teil 6: Fügen durch Schweißen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe.*
- [4] Norm DIN EN 14610: 02.05. *Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe für Metallschweißprozesse.*
- [5] HÜGEL, H. und GRAF, T.: *Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren.* Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [6] DILTHEY, U. (Hrsg.): *Laserstrahlschweißen: Prozesse, Werkstoffe, Fertigung und Prüfung.* Düsseldorf: DVS-Verlag, 2000 (Handbuch zum BMBF-Projektverband “Qualifizierung von Laserverfahren“ im Rahmen des Förderkonzeptes Laser 2000).
- [7] BAGGER, C. und OLSEN, F.O.: *Fundamental laser welding process investigations.* In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Orlando, 1998. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1998, S. C43–52, (LIA Vol. 85).
- [8] BAGGER, C. und OLSEN, F.O.: *Laser welding closed-loop power control.* Journal of laser applications **15** (2003), Nr. 1, S. 19–24.
- [9] FABBRO, R.; SLIMANI, S.; COSTE, F. und BRIAND, F.: *Study of keyhole behaviour for full penetration Nd:YAG cw laser welding.* Journal of Physics D: Applied Physics **38** (2005), S. 1881–1887.
- [10] KRATZSCH, C.: *Realisierung eines kamerabasierten Prozessüberwachungssystems am Beispiel des Laserstrahlschweißens.* Aachen: Shaker Verlag, 2003. Technische Hochschule Aachen, Maschinenwesen, Dissertation, 2003.

- [11] MAISCHNER, D.; DRENKER, A.; SEIDEL, B.; ABELS, P. und BEYER, E.: *Process control during laser beam welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Symposium ICALEO, San Jose, 1991. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1992, S. 150–155, (LIA Vol. 74).
- [12] MIYAMOTO, I.; KAMIMUKI, K.; MARUO, H.; MORI, K. und SAKAMOTO, M.: *In-process monitoring in laser welding of automotive parts*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Orlando, 1993. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1993, S. 413–424, (LIA Vol. 77).
- [13] INOUE, T.; MIYAMOTO, I.; ONO, K.; ADACHI, K. und MATSUMOTO, Y.: *In-process monitoring of penetration depth in 20 kW-class CO<sub>2</sub> laser welding of thick sections*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Diego, 1999. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1999, S. E34–42, (LIA Vol. 87).
- [14] IKEDA, T.; KOJIMA, T.; TU, J.F.; OHMURA, E.; MIYAMOTO, I.; NAGASHIMA, T.; TSUBOTA, S. und ISHIDE, T.: *In-process monitoring of weld qualities using multi photo-sensor system in pulsed Nd:YAG laser welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Diego, 1999. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1999, S. D59–66, (LIA Vol. 87).
- [15] OVERMEYER, L.: *Beitrag zur Prozesskontrolle und -regelung beim Schneiden und Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1996. Universität Hannover, Dissertation, 1996 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 570: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik).
- [16] SPECKER, W. und VERSTRAETEN, R.: *Prozessüberwachung – Einzelpulsschweißen mit Laserstrahlung an Elektronenstrahlquellen*. QZ – Qualität und Zuverlässigkeit **48** (2003), Nr. 1, S. 46–48.
- [17] TÖNSHOFF, H.K.; BREUER, P.; ALVENSLEBEN, F. v.; OVERMEYER, L. und SCHUMACHER, J.: *Qualitätssicherung beim Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Karosseriebauteilen*. In: GEIGER, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderungen an die Fabrik 2000, München, 1995. Bamberg: Meisenbach, 1995, S. 187–196.
- [18] BOECHAT, A.A.P.; SU, D. und JONES, J.D.C.: *Bi-directional cladding power monitor for fibre-optic beam delivery systems*. Measurement Science and Technology **3** (1992), S. 897–901.



- [19] SU, D.; NORRIS, I.; PETERS, C.; HALL, D.R. und JONES, J.D.C.: *In-Situ laser material process monitoring using a cladding power detection technique*. Optics and Lasers in Engineering **18** (1993), S. 371–376.
- [20] BEYER, E.; ABELS, P.; DRENKER, A.; MAISCHNER, D. und SOKOLOWSKI, W.: *New device for on-line process diagnostics during laser machining*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Symposium ICALEO, San Jose, 1991. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1992, S. 133–139, (LIA Vol. 74).
- [21] DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*. Stuttgart: Teubner, 1995. Universität Stuttgart, Habilitationsschrift, 1995 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [22] GLOWACKI, M.H.; DUCHARME, R.; KAPADIA, P. und DOWDEN, J.M.: *The welding of thin sheets with CO<sub>2</sub>, CO and pseudo continuous Nd:YAG lasers investigated by means of an integrated mathematical model*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Orlando, 1993. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1993, S. 224–232, (LIA Vol. 77).
- [23] MÜLLER, M.G.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung*. München: Utz Verlag Wissenschaft, 2002. Universität Stuttgart, Konstruktions- und Fertigungstechnik, Dissertation, 2002 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [24] MÜLLER, M.G.; DAUSINGER, F. und HÜGEL, H.: *Online process monitoring of laser welding by measuring the reflected laser power*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Orlando, 1998. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1998, S. C122–131, (LIA Vol. 85).
- [25] MÜLLER-BORHANIAN, J. (Hrsg.): *Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen (INESS)*. München: Herbert Utz Verlag, 2005.
- [26] MÜLLER, J.: *On-line Prozessüberwachung beim Laserstrahl-tiefschweißen*. Laser Magazin **6** (2000), S. 20–21.
- [27] KIRBY, C.; ABELS, P.; DRENKER, A.; NITSCH, H. und BEYER, E.: *Process monitoring for laser beam welding and applications*. In: GEIGER, M. und VOLLERTSEN, F. (Hrsg.): Proc. of the 26th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems (LANE), Erlangen, 1994. Bamberg: Meisenbach, 1994, S. 125–134.

- [28] BEERSIEK, J.; POPRAWA, R.; SCHULZ, W.; GU, H.; MÜLLER, R.E. und DULEY, W.W.: *On-line monitoring of penetration depth in laser beam welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Diego, 1997. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1997, S. C30–39, (Lia Vol. 83).
- [29] POSTMA, S.; AARTS, R.G.K.M. und HESEMANS, A.J.F.M.: *Penetration feedback control in overlap laser welding of sheet metal*. In: Proc. of the 3rd Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration (WESIC), Twente, 2001. Newport: Mechatronic Research Centre, University of Wales College, 2001, S. 495–503.
- [30] MIYAMOTO, I. und MORI, K.: *Development of in-process monitoring system for laser welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Diego, 1995. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1995, S. 759–767, (LIA Vol. 80).
- [31] SOKOŁOWSKI, W.; HERZINGER, G. und BEYER, E.: *Spectral plasma diagnostics in welding with CO<sub>2</sub> lasers*. In: Proc. of SPIE: High Power CO<sub>2</sub>-Laser Systems and Applications, Hamburg, 1988. Bellingham: SPIE, 1989, S. 96–102, (SPIE Vol. 1020).
- [32] MIYAMOTO, I.; OHMURA, E. und MAEDE, T.: *Dynamic behavior of plume and keyhole in CO<sub>2</sub> laser welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Diego, 1997. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1997, S. G210–218, (Lia Vol. 83).
- [33] KLUFT, W.; BOERGER, P. und SCHWARTZ, R.: *On-line monitoring of laser welding of sheet metal by special evaluation of plasma radiation*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Detroit, 1996. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1996, S. 62–71, (LIA Vol. 81).
- [34] NAKAMURA, S.; ITO, Y.; NAKABAYASHI, T.; WATANABE, M. und INOUE, T.: *Analysis of optical and acoustic emissions during CO<sub>2</sub> laser welding of a stainless steel*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Diego, 1997. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1997, S. G256–262, (Lia Vol. 83).
- [35] NAKAMURA, S.; HOSHINO, M. und ITO, Y.: *Monitoring of cw YAG laser welding using optical and acoustic signals*. In: Proc. of the Laser Materials

- Processing Conference ICALEO, Jacksonville, 2001. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2001, (LIA Vol. 90).
- [36] BREITSCHWERDT, S.: *Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen*. München: Utz Verlag Wissenschaft, 2001. Universität Stuttgart, Konstruktions- und Fertigungstechnik, Dissertation, 2001 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [37] DOONG, J.; WU, C. und HWANG, J.: *Infrared temperature sensing of laser welding*. International Journal of Machine Tools & Manufacture - Design, Research and Application **31** (1991), Nr. 4, S. 607–616.
- [38] NAVA-RÜDIGER, E. und HOULOT, M.: *Integration of real time quality control systems in a welding process*. Journal of laser applications **9** (1997), S. 95–102.
- [39] SANDERS, P.G.; KESKE, J.S.; KORNECKI, G. und LEONG, K.H.: *Capabilities of infrared weld monitor*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Diego, 1997. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1997, S. C1–10, (Lia Vol. 83).
- [40] SANDERS, P.G.; LEONG, K.H.; KESKE, J.S. und KORNECKI, G.: *Real-time monitoring of laser beam welding using infrared weld emissions*. Journal of laser applications **10** (1998), Nr. 5, S. 205–211.
- [41] CHEN, H.B.; LI, L.; BROOKFIELD, D.J.; WILLIAMS, K. und STEEN, W.M.: *Laser process monitoring with dual wavelength optical sensors*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Symposium ICALEO, San Jose, 1991. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1992, S. 113–122, (LIA Vol. 74).
- [42] JURCA, M.: *Industrial monitoring of the CO<sub>2</sub>-laser welding process*. In: Proc. on Laser Applications in the Automotive Industries (ISATA), Aachen, 1993. Croydon: Automotive Automation, 1993, S. 179–184.
- [43] GRIEBSCH, J.; SCHLICHTERMANN, L.; JURCA, M.; HEISSLER, S. und FUNK, D.: *Selbstlernendes Mehrdetektorensystem für die Online-Prozeßkontrolle und Qualitätssicherung beim Laserschweißen von Automobilkarosserien*. In: DAUSINGER, F.; BERGMANN, H.W. und SIGEL, J. (Hrsg.): Proc. of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT), Stuttgart, 1996. Wiesbaden: AWT, 1996, S. 89–96.

- [44] ALAVI, M.; LORENZ, M. und BÜTTGENBACH, S.: *Lichtemission während des Laserschweißprozesses - Optical emission during laser welding*. Laser und Optoelektronik **21** (1989), S. 69–72.
- [45] SCHMITT-THOMAS, K.G.; MAIER, W.; WOLLRAB, P. und ZEITLER, H.: *Erscheinungsformen der Schallemission, Methoden zu ihrer Auswertung und ihre Zuordnung zu werkstoffkundlichen Vorgängen*. In: Die Schallemissionsanalyse: Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens: Kolloquium des TÜV Rheinland, Köln-Poll, 1978. Köln: Verlag TÜV Rheinland GmbH, S. 38–62.
- [46] SUN, A. und KANNATEY-ASIBU, E.: *Sensor systems for real-time monitoring of laser weld quality*. Journal of laser applications **11** (1999), Nr. 4, S. 153–168.
- [47] HAMANN, C.: *Schallemissionsanalyse in Abhängigkeit von Leistungsdichte und Fügegeometrie beim Schweißen mit gepulstem Laserstrahl*. Technische Universität München, Maschinenwesen, Dissertation, 1993.
- [48] GATZWEILER, W.; MAISCHNER, D. und BEYER, E.: *Messung von Plasma-dichtefluktuationen und Schallemissionen beim Laserstrahlschweißen zur Prozessüberwachung*. Laser und Optoelektronik **20** (1988), Nr. 5, S. 64–69.
- [49] FARSON, D.F. und KIM, K.R.: *Optical and acoustic emissions in laser welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Orlando, 1998. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1998, S. C1–10, (LIA Vol. 85).
- [50] FARSON, D.; HILLSLEY, K.; SAMES, J. und YOUNG, R.: *Frequency-time characteristics of air-borne signals from laser welds*. Journal of laser applications **8** (1996), S. 33–42.
- [51] DULEY, W.W. und MAO, Y.L.: *The effect of surface condition on acoustic emission during welding of aluminium with CO<sub>2</sub> laser radiation*. Journal of Physics D: Applied Physics **27** (1994), S. 1379–1383.
- [52] GU, H. und DULEY, W.W.: *Acoustic emission from modulated laser beam welding of materials*. Journal of laser applications **8** (1996), S. 205–210.
- [53] ZENG, H.; ZHOU, Z.; CHEN, Y.; LUO, H. und HU, L.: *Wavelet analysis of acoustic emission signals and quality control in laser welding*. Journal of laser applications **13** (2001), Nr. 4, S. 167–173.

- [54] GU, H. und DULEY, W.W.: *A statistical approach to acoustic monitoring of laser welding*. Journal of Physics D: Applied Physics **29** (1996), S. 556–560.
- [55] FARSON, D.F.; FANG, K.S. und KERN, J.: *Intelligent laser welding control*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Symposium ICALEO, San Jose, 1991. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1992, S. 104–112, (LIA Vol. 74).
- [56] GEBHARD, M.: *Untersuchungen zur Prozeßüberwachung beim CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschweißen von verzinkten und unbeschichteten Blechen im Überlappstoß*. Technische Universität München, Maschinenwesen, Dissertation, 1991.
- [57] GRIEBSCH, J.: *Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen*. Stuttgart: B. G. Teubner, 1996. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 1996 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [58] HILLERS, O.: *Fehlerklassifizierende Prozesskontrolle mittels multivarianter Statistik beim Laserstrahlschweißen*. Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2003. Universität Hannover, Maschinenbau, Dissertation, 2003 (Berichte aus dem IFW).
- [59] HESSE, T.: *Prozesskontrolle mittels optischer Spektralanalyse für das Schweißen verzinkter Stahlbleche mit Nd:YAG-Lasern*. Hannover: PZH, 2006. Universität Hannover, Maschinenbau, Dissertation, 2006 (Berichte aus dem LZH).
- [60] VOELKEL, D.D. und MAZUMDER, J.: *Visualization of a laser melt pool*. Applied Optics **29** (1990), Nr. 12, S. 1718–1720.
- [61] JÜPTNER, W. und HOLLERMANN, B.: *Opto-elektronischer Sensor für die Echtzeitbeobachtung beim Laserschweißen zur Nahtführung und adaptiven Prozeßbeeinflussung*. Laser und Optoelektronik **22** (1990), Nr. 6, S. 56–62.
- [62] VOELKEL, D.D. und MAZUMDER, J.: *Visualization and dimensional measurement of the laser weld pool*. In: Proc. of the Laser Materials Processing ICALEO, Boston, 1990. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1991, S. 422–429, (LIA Vol. 71).
- [63] BRÜGGEMANN, G. und HEINDÖRFER, F.: *Analyse thermografischer Bilddaten zur On-line-Überwachung von Laserstrahlschweißprozessen*. Schweißen & Schneiden **46** (1994), Nr. 12, S. 622–625.

- [64] MORGAN, S.A.; HAND, D.P.; MARAN, F.M.; PETERS, C.; STEEN, W.M. und JONES, J.D.C.: *Origin of oscillations in optical signals for Nd:YAG laser welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Detroit, 1996. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1996, S. D28–35, (LIA Vol. 81).
- [65] PETERS, C.; FOX, M.D.T.; HARAN, F.M.; HAND, D.P.; JONES, J.D.C. und STEEN, W.M.: *Nd:YAG welding penetration-monitoring using back-scattered laser light from in and around the keyhole*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Orlando, 1998. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1998, S. C149–157, (LIA Vol. 85).
- [66] ABELS, P.; KAIERLE, S.; KRATZSCH, C.; POPRAWÉ, R. und SCHULZ, W.: *Universal coaxial process control system for laser materials processing*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Diego, 1999. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1999, S. E99–108, (LIA Vol. 87).
- [67] KAIERLE, S.; ABELS, P.; KAPPER, G.; KRATZSCH, C.; MICHEL, J.; SCHULZ, W. und POPRAWÉ, P.: *State of the art and new advances in process control for laser materials processing*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Jacksonville, 2001. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2001, (LIA Vol. 90).
- [68] KRATZSCH, C.; ABELS, P.; KAIERLE, S.; POPRAWÉ, R. und SCHULZ, W.: *Coaxial process control during laser beam welding of tailored blanks*. In: Proc. of SPIE: High Power Lasers in Manufacturing, Osaka, 1999. Bellingham: SPIE, 2001, S. 472–480, (SPIE Vol. 3888).
- [69] BEERSIEK, J. (Hrsg.): *Überwachung der Einschweißtiefe und Qualitätskontrolle beim Laserstrahlschweißen*. Aachen: ILT, 1998.
- [70] BEERSIEK, J.: *On-line monitoring of keyhole instabilities during laser beam welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Diego, 1999. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1999, S. D49–58, (LIA Vol. 87).
- [71] BEERSIEK, J.: *A CMOS camera as a tool for process analysis not only for laser beam welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Jacksonville, 2001. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2001, S. 1185–1193, (LIA Vol. 90).

- [72] BEERSIEK, J.: *New aspects of monitoring with a CMOS camera for laser materials processing*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Scottsdale, 2002. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2002, (LIA Vol. 81).
- [73] BECK, T. und FLORIN, C.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen von Aluminium*. Schweißen & Schneiden **53** (2001), Nr. 8, S. 474–475.
- [74] LHOSPITALIER, S.; BOURGES, P.; BERT, A.; QUESADA, J. und LAMBERTIN, M.: *Temperature measurement inside and near the weld pool during laser welding*. Journal of laser applications **11** (1999), Nr. 1, S. 32–37.
- [75] TÖNSHOFF, H.K.; ALVENSLEBEN, F. v.; OSTENDORF, A.; HILLERS, O. und STALLMACH, M.: *Online quality control of laser welding using supporting line-shaped IR-detection*. In: Proc. of SPIE: Sensors and Controls for Intelligent Machining and Manufacturing Mechatronics, Boston, 1999. Bellingham: SPIE, 1999, S. 138–147, (SPIE Vol. 3832).
- [76] MÜLLER-BORHANIAN, J.; DEININGER, C.; DAUSINGER, F. und HÜGEL, H.: *Spatially resolved on-line monitoring during laser beam welding of steel and aluminum*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Francisco, 2004. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2004, (LIA Vol. 97).
- [77] MATSUNAWA, A.; SETO, N.; MIZUTANI, M. und KATAYAMA, S.: *Liquid motion in keyhole laser welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Orlando, 1998. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1998, S. G151–160, (LIA Vol. 85).
- [78] IWASE, T.; SHIBATA, K.; SAKAMOTO, H.; DAUSINGER, F.; HOHENBERGER, B.; MÜLLER, M.; MATSUNAWA, A. und SETO, N.: *Real time x-ray observation of dual focus beam welding of aluminum alloys*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Dearborn, 2000. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2000, S. C26–34, (LIA Vol. 89).
- [79] MATSUNAWA, A.; KIM, J.; SETO, N.; MIZUTANI, M. und KATAYAMA, S.: *Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding*. Journal of laser applications **10** (1998), Nr. 6, S. 247–254.
- [80] MATSUNAWA, A.: *Problems and solutions in deep penetration laser welding*. Science and Technology of Welding and Joining **6** (2001), Nr. 6, S. 351–354.

- [81] SETO, N.; KATAYAMA, S. und MATSUNAWA, A.: *High-speed simultaneous observation of plasma and keyhole behavior during high power CO<sub>2</sub> laser welding: Effect of shielding gas on porosity formation*. Journal of laser applications **6** (2000), Nr. 12, S. 245–250.
- [82] MÜLLER, M.G.; HOHENBERGER, B.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.; IWA-SE, T.; SAKAMOTO, H.; SHIBATA, H.; SETO, N. und MATSUNAWA, A.: *An online monitoring system validated by visualization of laser welding phenomena*. In: Proc. of the First International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, München, 2001. Stuttgart: AT-Fachverlag, 2001, S. 155–166.
- [83] FARSON, D.F.; ALI, A. und LI, X.C.: *Laser weld penetration monitoring with multiple emission signal measurements*. Journal of laser applications **11** (1999), Nr. 2, S. 47–53.
- [84] TÖNSHOFF, H.K.; OSTENDORF, A.; HILLERS, O. und KRAL, V.: *Strategies for the quality inspection of laser welding processes based on a multiple sensor system*. In: GEIGER, M. und OTTO, A. (Hrsg.): Proc. of the 3rd International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE), Erlangen, 2001. Bamberg: Meisenbach, 2001, S. 675–686.
- [85] TÖNSHOFF, H.K.; OSTENDORF, A.; HILLERS, O. und KRAL, V.: *Methods for a reference-free quality inspection of laser welding processes based on a multiple sensor system*. In: Proc. of the First International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, München, 2001. Stuttgart: AT-Fachverlag, 2001, S. 254–258.
- [86] DEININGER, C.; MÜLLER-BORHANIAN, J.; DAUSINGER, F. und HÜGEL, H.: *Development of multi-detector systems for the process monitoring of laser beam welding capable for industrial use*. In: GEIGER, M. und OTTO, A. (Hrsg.): Proc. of the 4th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE), Erlangen, 2004. Bamberg: Meisenbach, 2004, S. 107–117.
- [87] WIESENDANGER, T.; RUPRECHT, A.; KÖRNER, K.; TIZIANI, H. und OSTEN, W.: *Konfokaler Sensor zur Messung der Einschweißtiefe im Keyhole*. In: 105. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO), Bad Kreuznach, 2004. S. 80.



- [88] WIESENDANGER, T.F.; KÖRNER, K.; RUPRECHT, A.; TIZIANI, H.J. und OSTEN, W.: *Fast confocal point-sensor for in-process control of laser welding*. In: 8th International Symposium on Measurement and Quality Control in Production (ISMQ2004), Erlangen, 2004. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2004, (Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Berichte ; 1860).
- [89] GREEN, L.: *Monitoring the process*. Photonics Spectra (2001), S.118–124.
- [90] TÖNSHOFF, H.K.; OSTENDORF, A. und SPECKER, W.: *Quality assurance of laser welding process by adaptive closed-loop process control*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Dearborn, 2000. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2000, S.E252–261, (LIA Vol. 89).
- [91] HARAN, F.M.; HAND, D.P.; PETERS, C. und JONES, J.D.C.: *Real-time focus control in laser welding*. Measurement Science and Technology **7** (1996), S.1095–1098.
- [92] HARAN, F.M.; HAND, D.P.; PETERS, C. und JONES, J.D.C.: *Focus control system for laser welding*. Applied Optics **36** (1997), Nr. 21, S.5246–5251.
- [93] COBO, A.; LÓPEZ-HIGUERA, J.M.; GONZÁLEZ, G.A.; BARDIN, F.; HAND, D.P. und JONES, J.D.C.: *Optoelectronic Unit for a laser welding monitoring system*. In: Proc. of IEEE: Sensors, Wien, 2004. Piscataway: IEEE, 2004, S.908–910.
- [94] COBO, A.; BARDIN, F.; MIRAPEIX, J.; HAND, D.P.; JONES, J.D.C. und LÓPEZ-HIGUERA, J.M.: *Optoelectronic device for non-invasive focal point measurement and control of the laser welding process*. Measurement Science and Technology **16** (2005), S.N1–N6.
- [95] BARDIN, F.; COBO, A.; LÓPEZ-HIGUERA, J.M.; COLLIN, O.; AUBRY, P.; DUBOIS, T.; HÖGSTRÖM, M.; NYLEN, P.; JONSSON, P.; JONES, J.D.C. und HAND, D.P.: *Closed-loop power and focus control of laser welding for full-penetration monitoring*. Applied Optics **44** (2005), Nr. 1, S.13–21.
- [96] BARDIN, F.; COBO, A.; LÓPEZ-HIGUERA, J.M.; COLLIN, O.; AUBRY, P.; DUBOIS, T.; HÖGSTRÖM, M.; NYLEN, P.; JONSSON, P.; JONES, J.D.C. und HAND, D.P.: *Optical techniques for real-time penetration monitoring for laser welding*. Applied Optics **44** (2005), Nr. 19, S.3869–3876.

- [97] GU, H. und DULEY, W.W.: *A novel detector for closed-loop focus control during laser beam welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Orlando, 1998. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1998, S. C69–C75, (LIA Vol. 85).
- [98] NEGENDANCK, M. und SCHWAB, J.: *Process monitoring in laser beam welding*. In: GEIGER, M. und OTTO, A. (Hrsg.): Proc. of the 3rd International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE), Erlangen, 2001. Bamberg: Meisenbach, 2001, S. 697–706.
- [99] POSTMA, S.; AARTS, R.G.K.M.; MEIJER, J. und JONKER, J.B.: *Penetration control in laser welding of sheet metal*. Journal of laser applications **14** (2002), Nr. 4, S. 210–214.
- [100] POSTMA, S.; AARTS, R.G.K.M.; MEIJER, J. und JONKER, B.: *Feedback control for optimal production speed in laser beam welding of mild steel*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Scottsdale, 2002. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2002, (LIA Vol. 94).
- [101] ABT, F.; NICOLosi, L.; CARL, D.; BLUG, A.; GEESE, M.; DAUSINGER, F.; DEININGER, C.; HÖFLER, H. und TETZLAFF, R.: *Closed loop control of laser welding processes with cellular neural network (CNN) cameras*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Temecula, 2008. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2008, S. 817–825, (LIA Vol. 101).
- [102] DEINZER, G.; OTTO, A.; HOFFMANN, P. und GEIGER, M.: *Optimizing systems for laser beam welding*. In: GEIGER, M. und VOLLERTSEN, F. (Hrsg.): Proc. of the 26th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems (LANE), Erlangen, 1994. Bamberg: Meisenbach, 1994, S. 193–206.
- [103] KAIERLE, S.; BEERSIEK, J.; KREUTZ, E.W.; POPRAWA, R.; GÜNNEWIG, J. und RAKE, H.: *Online control of penetration depth in laser beam welding*. In: Proc. of the 24th Annual Conference of the IEEE (IECON), Aachen, 1998. Piscataway: IEEE, 1998, S. 1694–1698.
- [104] DAHMEN, M.; KAIERLE, S.; ABELS, P.; KRATZSCH, C.; KREUTZ, E.W. und POPRAWA, R.: *Adaptive quality control for laser beam welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, San Diego, 1999. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1999, S. D29–38, (LIA Vol. 87).

- [105] BEERSIEK, J.: *Überwachung und Regelung der Einschweißtiefe beim Schweißen mit Laserstrahlung*. Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2004. Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 2004 (Berichte aus der Lasertechnik).
- [106] DIETZ, C.; JURCA, M.; SCHLICHTERMANN, L.; KOGEL-HOLLACHER, M.; BREITSCHWERDT, S.; SCHMID, C. und ROWOLD, L.: *Closed-loop control system for laser welding of transmission parts*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Orlando, 1998. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 1998, S. C178–186, (LIA Vol. 85).
- [107] SEIDEL, B.; BEERSIEK, J. und BEYER, E.: *Process control in continuous high power CO<sub>2</sub> laser beam welding*. In: Proc. of SPIE: Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications, Wien, 1994. Bellingham: SPIE, 1994, S. 290–300, (SPIE Vol. 2207).
- [108] SEIDEL, B.; BEERSIEK, J.; BEHLER, K. und BEYER, E.: *Quality assurance and advanced use of process gas by means of process monitoring and control for laser beam welding*. In: Proc. of the 5th European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT), Bremen, 1994. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1994, S. 240–245, (DVS-Berichte: 163).
- [109] NN: *Produktinformation HLD1001.5*. Trumpf Laser GmbH, Deutschland.
- [110] NN: *Produktinformation Transpec Spektrometer*. Engineer's Office for Applied Spectroscopy, Deutschland.
- [111] NN: *Produktinformation Polytec PSS-1750*. Polytec GmbH, Deutschland.
- [112] NN: *Produktinformation MotionPro HS-4*. Redlake, Deutschland.
- [113] NN: *Produktinformation Beleuchtungslaser*. LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH, Deutschland.
- [114] NN: *Produktinformation Velox 65k M pro*. IRCAM GmbH, Germany.
- [115] NN: *Produktinformation ADWin Pro II*. Jäger Messtechnik GmbH, Deutschland.
- [116] OPPENHEIM, A.V.; SCHAFER, R.W. und BUCK, J.R.: *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. München: Pearson Studium, 2004.

- [117] ABT, F.; HESS, A. und DAUSINGER, F.: *Temporal behaviour of the focal shift of beam forming optics for high power single mode lasers*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Temecula, 2008. Orlando: Laser Institute of America (LIA), 2008, S. 561–568, (LIA Vol. 101).
- [118] KERN, M.: *Gas- und magnetofluidynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen*. Stuttgart: B. G. Teubner, 1999. Universität Stuttgart, Konstruktions- und Fertigungstechnik, Dissertation, 1999 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

# Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der Robert Bosch GmbH in den Abteilungen PA-ATMO1/SGP und CR/APJ. Stellvertretend möchte ich mich bei Dr. sc. techn. Christian Gebauer, Dr.-Ing. Godehard Schmitz, Dr.-Ing. Bernd Hohenberger und Dr.-Ing. Joachim Radtke für die Überlassung dieses spannenden Themas und das mir entgegengebrachte Vertrauen bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Thomas Graf, dem Leiter des Instituts für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart, für die fachliche Betreuung der Arbeit. Für die Übernahme des Mitberichts bedanke ich mich bei Herrn Prof. Werner Osten, dem Leiter des Instituts für Technische Optik der Universität Stuttgart.

Besonders erwähnen möchte ich die hervorragende Arbeitsatmosphäre und die fantastische Zusammenarbeit mit den Fachkollegen in den genannten Abteilungen. Ihre Unterstützung und Hilfsbereitschaft waren für das Gelingen dieser Arbeit von zentraler Bedeutung. Für die fachliche Betreuung der Arbeit bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Reiner Ramsayer und Dr.-Ing. Andreas Ruß. In zahlreichen Diskussionen haben sie die vorliegenden Lösungsansätze und die aktuellen Ergebnisse kritisch hinterfragt und somit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Des Weiteren bedanke ich mich bei meinen Doktorandenkollegen Jens Ackermann, Thomas Keller, Sonja Kittel, Simone Letsch, Christiane Liebing und Mario Matic. Sie haben mich stets bei der Arbeit im Labor unterstützt, aber auch in zahlreichen Kaffeepausen für die notwendige Zerstreuung und die kreativen Pausen gesorgt.

Die langjährige Unterstützung und Bestärkung durch meine Familie hat das Entstehen dieser Arbeit erst ermöglicht. Hierfür werde ich ihnen für immer dankbar sein. Vor allem danke ich Corinna von ganzem Herzen, die durch ihren liebevollen und geduldigen Zuspruch und durch ihr unermessliches Verständnis maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat.



# 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

### **Gorritz, Michael**

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

### **Mohr, Ursula**

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO<sub>2</sub>-Laserschneiden von Metallen  
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

### **Rudlaff, Thomas**

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärrens 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 CO<sub>2</sub>-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

### **Grünewald, Karin M.**

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>- 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 CO<sub>2</sub>-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, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

**Bea, Martin**

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 Zerspänung  
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 CO<sub>2</sub>-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 Keramiken  
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 3-89675-811-9

### 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 Festkörperlasern 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

### Schinzl, 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 Hochleistungsdiodelnlasern  
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 Alumini-  
umguß- und Knetlegierungen mit CO<sub>2</sub>-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. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart

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

### Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahltiefschweißen 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 variabel-em 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 Nahteigen-schaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

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

### Mikhail Larionov

Kontakterung 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 Getriebe-  
bau – 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



