

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

D. Schindhelm
In-Prozess Qualitätssicherung für das
Laserstrahlschneiden von Metallen

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.

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen

von Dr.-Ing. David Schindhelm
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

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

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

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2013

D 93

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 Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2014

ISBN 978-3-8316-4345-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Formelzeichen und Abkürzungen	5
Kurzfassung der Arbeit	9
Extended Abstract	11
1 Einleitung	15
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	15
1.2 Aufbau der Arbeit.....	16
2 Grundlagen und Stand der Technik	19
2.1 Laserstrahlschneidverfahren.....	19
2.2 Qualitätsbeurteilung laserstrahlgeschnittener Bauteile	21
2.3 Prozessbeobachtungskonzepte	22
2.4 Strahlungsphysikalische Grundlagen	24
2.4.1 Wärmestrahlung nach Planck	24
2.4.2 Plasmastrahlung	27
2.5 Stand von Wissenschaft und Technik	30
2.5.1 Optische Verfahren der Prozessdiagnostik	31
2.5.2 Akustische Verfahren der Prozessdiagnostik	35
3 Auswahl relevanter Schneidfehler und -technologien	39
4 Grundsätzliche Betrachtungen der Prozessemissionen	41
4.1 Spektrale Analyse optischer Prozessemissionen.....	41
4.2 Ableitung von Prozessmerkmalen.....	48
4.2.1 Schnittabriss S235.....	49
4.2.2 Schnittabriss 1.4301	53
4.2.3 Self-Burning S235	56
4.3 Spezifizierung der Messmittel.....	59
5 Versuchstechnik	63
5.1 Systemtechnik	63

5.1.1	Versuchsaufbau mit dichroitischem Spiegel.....	63
5.1.2	Versuchsaufbau mit Scraper-Spiegel	66
5.2	Messmittel.....	67
5.2.1	Kamerabasierte Sensorik.....	68
5.2.2	Photodiode.....	71
5.2.3	Laser-Leistungsmesskopf 10,6 μm	72
5.2.4	Widerstandsmessgerät.....	77
5.2.5	Gasdruck- und -durchflussmessgerät	78
5.3	Werkstoffe	79
5.4	Methodik der Fehlschnittterzeugung	79
5.5	Auswertungssystematik	80
5.6	Zusammenfassung	81
6	Experimentelle Ergebnisse zur Schnittabriss-Detektion in Baustahl S235	83
6.1	Kamera.....	83
6.2	Photodiode	93
6.3	Laser-Leistungsmesskopf 10,6 μm	95
6.4	Druck-/ Durchflussmessung O ₂ -Schneidgas	99
6.4.1	Untersuchungen am Schnittpaltmodell.....	99
6.4.2	Untersuchungen am realen Laserschneidprozess.....	102
6.5	Zusammenfassung Schnittabriss Baustahl S235	105
7	Experimentelle Ergebnisse zur Schnittabriss-Detektion in Edelstahl 1.4301	107
7.1	Kamera.....	107
7.2	Widerstandsmessgerät	111
7.3	Laser-Leistungsmesskopf 10,6 μm	113
7.4	Zusammenfassung Schnittabriss 1.4301.....	116
8	Experimentelle Ergebnisse zur Self-Burning-Detektion in Baustahl S235	119
8.1	Kamera.....	120
8.2	Photodiode.....	127
8.3	Laser-Leistungsmesskopf 10,6 μm	131
8.4	Zusammenfassung Self-Burning S235	133
9	Zusammenfassung und Ausblick	135
	Literatur- und Quellenverzeichnis	141

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

A	mm ²	Fläche
A _{abström}	mm ²	Abströmfläche
A _{nm}		Einsteinkoeffizient für spontane Emission
A _{zuström}	mm ²	Zuströmfläche
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
d	mm	Blechdicke
f	Hz	Frequenz
h	J·s	Planck'sches Wirkungsquantum
I	W/cm ²	Intensität der Laserstrahlung
k	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
k _B	J/K	Boltzmann-Konstante
L _λ	W/(cm ² ·μm·sr)	Spektrale Strahldichte eines realen Strahlers
L _{λ,S}	W/(cm ² ·μm·sr)	Spektrale Strahldichte eines Schwarzen Strahlers
L _S	W/(cm ² ·sr)	Strahldichte eines Schwarzen Strahlers
n	mm	Rillennachlauf
n _e	m ⁻³	Elektronen-Teilchendichte
p	bar	Druck
p _{krit}	bar	Kritischer Gasdruck des Schneidgases
P _L	W	Laserleistung
P _{L,max}	W	Maximale Laserleistung
p _{N2}	bar	Gasdruck des Stickstoff-Schneidgases
p _{O2}	bar	Gasdruck des Sauerstoff-Schneidgases
p _{O2,Soll}	bar	Soll-Gasdruck des Sauerstoff-Schneidgases
P _{RR}	W	Rückreflektierte Laserleistung
Q	J	Wärmeenergie
r _E	mm	Anschmelzradius der Schnittkante an Eintrittsseite
r _A	mm	Anschmelzradius der Schnittkante an Austrittsseite
R _Z	μm	Rauheit
R _{Z5}	μm	Gemittelte Rautiefe
t	s	Zeit

T	K	Temperatur
$t_{\text{exp.}}$	μs	Belichtungszeit
T_e	K	Elektronentemperatur
T_{Plasma}	K	Plasmatemperatur
T_S	K	Schmelztemperatur
T_{SO}	K	Temperatur auf der Schmelzfilmoberfläche
T_V	K	Verdampfungstemperatur
u	mm	Rechtwinkligkeits- oder Neigungstoleranz
v	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_{Grat}	m/min	Vorschubgeschwindigkeit Grat
$v_{\text{Gutschnitt}}$	m/min	Vorschubgeschwindigkeit Gutschnitt
v_{KP}	m/min	Vorschubgeschwindigkeit Kontinuierliches Plasma
v_{PB}	m/min	Vorschubgeschwindigkeit Plasma-Blitzen
$v_{\text{red.}}$	m/min	Vorschubgeschwindigkeit reduziert
v_{SA}	m/min	Vorschubgeschwindigkeit Schnittabriss
α	°	Blechneigungswinkel
α_F	°	Flankenwinkel
$\alpha^{\text{'}}$	m^{-1}	Absorptionskoeffizient d. inversen Bremsstrahlung
ε	-	Emissionsgrad
ϑ	°	Zenitwinkel
λ	nm	Wellenlänge
λ_{Lmax}	nm	Wellenlänge des Maximums der emittierten spektralen Strahldichte L
ρ_{Fe}	kg/m^3	Dichte von Eisen Fe
ρ_{FeO}	kg/m^3	Dichte von Eisenoxid FeO
σ	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	Stefan-Boltzmann-Konstante
φ	°	Azimutwinkel
Ω_0	sr	Einheitsraumwinkel $\Omega_0 = 1 \text{ sr}$

Abkürzungen

1.4301	Nichtrostender Edelstahl (X5CrNi18-10)
ADB	Abstand Düse-Blech
AlMg3	Aluminiumlegierung
C	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CWL	Central Wavelength – Zentrale Wellenlänge

ES	Einstellmaß (Fokuslage bezogen auf Schneiddüse)
Fe	Eisen
FeO	Eisenoxid
FFT	Fast-Fourier-Transformation
fps	frames per second – Bilder pro Sekunde
FWHM	Full Width at Half Maximum – Halbwertsbreite
G	Geometrische Auflösung
GaAs	Galliumarsenid
GaP	Galliumphosphid
Ge	Germanium
Glg.	Gleichung
HR	Hoch reflektiv
HT	Hoch transmissiv
InGaAs	Indium Gallium Arsenid
N ₂	Stickstoff
Nd	Neodym
NIR	Nahinfrarotes Spektrum
NIR-A	Kurzwelliger Teil des NIR-Bereichs (0,78 - 1,4 µm)
NIR-B	Langwelliger Teil des NIR-Bereichs (1,4 - 3,0 µm)
O ₂	Sauerstoff
OS	Oberseite
R	Reflexiv
RS	Rohstrahl
S	Spektraler Messbereich
SB	Self-Burning
Si	Silizium
S235	Baustahl
T	Transmissiv
US	Unterseite
VIS	Visuelles Spektrum
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
Z	Zeitliche Auflösung
ZnSe	Zink-Selenid

Kurzfassung der Arbeit

Das Laserstrahlschneiden gilt als das am weitesten verbreitete Verfahren unter den Lasermaterialbearbeitungsverfahren und besitzt somit eine hohe industrielle Relevanz. Kontinuierliche Verbesserungen der Strahl- und Systemtechnik haben in den letzten Jahrzehnten dazu geführt, dass der laserbasierte Trennprozess zu einem robusten Verfahren gereift ist. Dennoch werden dabei auch künftig nicht alle auf das Fertigungsergebnis wirkenden Größen wie der Maschinenzustand, die Materialqualität oder das Know-how des Maschinenbedieners in ihrer Gesamtheit beherrscht- und beeinflussbar sein. Dadurch sind Fehlschnitte wie beispielsweise Schnittabriss oder Self-Burning nicht auszuschließen. Zudem erhöhen die zunehmende Automatisierung sowie der mannlose Betrieb das Risiko von Ausschuss-Produktion, wodurch eine maschinenimmanente Prozessüberwachung zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Zu diesem Zwecke werden in dieser Arbeit systematisch alle relevanten Emissionen des Laserschneidprozesses ausgewertet und mit dem jeweiligen Prozesszustand korreliert. Ausgangspunkt der Untersuchungen ist die spektralanalytische Erfassung der Prozesssekundärstrahlung. Diese zeigt, dass die Prozessemissionen im Gutschnittfall anhand des Planck'schen Strahlungsgesetzes beschrieben werden können.

Ausgehend von zeitlich und räumlich hochaufgelösten Aufnahmen der Schnittfront werden optische, elektrische und strömungsmechanische Informationsträger analysiert. Als optische Kenngrößen werden sowohl die vom Werkstück reflektierte Laserstrahlung (Primärstrahlung) als auch die vom Prozess emittierte Wärmestrahlung (Sekundärstrahlung) in unterschiedlichen spektralen Wellenlängenbereichen sowie mit und ohne Auflichtbeleuchtung koaxial aufgezeichnet. Ein Ohm'sches Widerstandsmessgerät detektiert die zwischen Laserschneiddüse und metallischem Werkstück auftretende Plasmabildung. Des Weiteren wird eine Beeinflussung des Sauerstoff-Schneidgasdrucks und -durchflusses infolge eines Schnittabrisses in Baustahl untersucht.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Verwendung eines ortsauflösenden, optischen Messmittels (Kamera) das größte Potenzial hinsichtlich der Beurteilung des aktuellen Prozesszustandes liefert. Eine Fehlererkennung des Schnittabrisses in Edelstahl sowie des Self-Burnings in Baustahl ist mithilfe dieser Sensorik möglich. Eine zusätzliche Auflichtbeleuchtung verbessert die Erkennung von geometrischen Merkmalen wie beispielsweise Schnittpalt- oder Blechkanten auf der Werkstückoberseite.

Extended Abstract

In the last few decades laser material processing has evolved into a well-established and important manufacturing technology. Among processing technologies, laser cutting plays the most important role. The outstanding advantages of the laser cutting process compared to other thermal cutting technologies are the higher cutting feed rate, greater dimensional accuracy for both size and contour, smaller heat affected zones as well as higher flexibility in terms of contour and machinable materials. Continuous improvements of the laser beam source and system technology have resulted in a robust process. One of the main challenges in the future will be the increasing automation which will lead to more and more autonomous laser cutting machines with only little human supervision. Therefore, monitoring and control tasks will pass from the machine operator on to the machine itself. The main objective of this thesis is to develop a control system for a laser cutting machine, to diagnose the laser cutting process and to determine process attributes in order to distinguish quality cuts from failure cuts. The focus is placed on the “lost cut” and “self-burning” cutting defects during CO₂-laser flame cutting of mild steel (S235) and fusion cutting of stainless steel (1.4301).

For that purpose, all relevant laser cutting process emissions are analyzed systematically and are correlated with the respective cutting status. Optical, electrical and fluid mechanical parameters serve as possible information sources about the actual process status. As optical parameters, both the back reflected laser power (primary radiation) as well as the emitted thermal radiation (secondary radiation) in different spectral wavelength ranges and with and without additional illumination are analyzed. All optical parameters are measured coaxially to the laser beam axis in order to achieve direction independent results. In addition, an ohmmeter detects the occurrence of plasma between the metallic laser nozzle and the workpiece surface. Furthermore, measurements of the cutting gas pressure and flow rate during quality cuts and lost cuts of mild steel flame cutting are performed.

A fundamental spectroscopic investigation of the optical process emissions reveals that the thermal radiation (secondary radiation) of quality cuts can be described in good approximation by Planck’s law. Therefore, it is possible to calculate the cutting front

temperature by using the method of quotient-pyrometry. As a result, the average cutting front temperature of quality cuts is found to be between the melting and evaporating temperature of the metal. Moreover, the temperature of mild steel (S235) flame cutting is about 300-500 K higher than during fusion cutting of stainless steel (1.4301). In addition, the average cutting front temperature decreases with increasing sheet thickness.

A spatial analysis of the laser power which is coaxially reflected back from the interaction zone of the laser beam with the workpiece shows that only 10% is reflected from the cutting front in the kerf. The main part (>90%) is reflected from the overlap zone of the laser beam with the workpiece surface outside the cutting kerf. Therefore, the signal strongly depends on the surface roughness of the treated material. It will be shown that, as expected, reflective surfaces with little roughness show higher CO₂-laser reflections than surfaces with a higher level of roughness. Furthermore, the fraction of back reflected laser light increases with higher cutting feed rate which can be explained with a larger overlapping zone of the CO₂-laser beam with the workpiece surface in front of the cutting kerf.

Results concerning lost cut of mild steel (S235)

During lost cut of mild steel flame cutting, the cutting front is inclined to such an extent that the lower end of the cutting front edge could not be detected anymore by means of the camera coaxially arranged to the laser beam axis. Slag drops, which in the case of a lost cut fly into the nozzle edge and serve as a clear indication for a lost cut, can be detected with the camera. With the photodiode, a significant increase in the variation of the optical secondary emissions can be detected in all studied thicknesses from 3 mm to 25 mm.

A detection of lost cut by measuring the oxygen gas pressure and flow rate is only possible when the distance between the workpiece surface and the cutting nozzle does not exceed one fourth of the nozzle diameter (nozzle blocking state). However, this special condition does not occur with the laser cutting nozzles and the respective nozzle distances currently used in practice. The feature is thus not relevant when using the current process parameters.

Results concerning lost cut of stainless steel (1.4301)

In the sensor-based detection of lost cut of stainless steel, the concentration is placed on the detection of plasma which typically occurs during this cutting defect. It will be shown that the plasma formation can be reliably diagnosed using both optical camera

and photodiode as well as electrically with ohmmeters. The high spectral radiance of the emitting plasma results in saturation of the optical detectors in all investigated wavelengths ($\lambda = 658 \text{ nm}/ 920 \text{ nm}/ 960 \text{ nm}/ 1600 \text{ nm}$). The large number of free charge carriers in the plasma also provides a significant reduction of the electrical resistance between the cutting nozzle and the workpiece by two to three orders of magnitude which can be measured by an ohmmeter.

Besides, measurements of the back reflected laser power reveal a significant increase of the signal oscillation which is due to the more inhomogeneous and more irregular surface during lost cut.

Results concerning self-burning of mild steel (S235)

Both camera and photodiode are capable of detecting the frequency of the grooves which are formed in the upper part of the cutting edges. It is found that a decreasing frequency of scoring correlated with an increasing self-burning tendency. If self-burning occurs, the emitted thermal radiation exhibits an increase in oscillation which is caused by irregular burning process and an increase of the emitting area. However, this mentioned attribute has to be regarded as a feature which also occurs during other cutting defects, such as lost cut of mild steel. Therefore, further attributes have to be taken into account to reliably detect self-burning: widening of the kerf sidewalls (the cutting kerfs are not aligned parallel anymore), increase of the radius of the cutting front, the cutting front edge leaves the spatial operating area of the laser beam and is positioned in front of the laser beam zone. All of these attributes can be reliably monitored by means of a camera.

The laser power meter detects a significant decrease in the back reflected signal due to the widening of the cutting kerfs during self-burning.

Conclusion

Overall, the use of a spatially resolved, optical measuring device (camera) provides the greatest potential in terms of assessing the current process status. An error detection of lost cut in stainless steel as well as of self-burning in mild steel can be achieved by using this sensor. An additional illumination improves the detection of geometrical features such as cutting kerf or workpiece edges on the upper surface.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Die Materialbearbeitung mit Laserstrahlung stellt eine seit mehreren Jahrzehnten etablierte und aus der modernen Fertigungstechnik nicht mehr wegzudenkende Fertigungstechnologie dar. Unter den Lasermaterialbearbeitungsverfahren besitzt hierbei das Laserstrahlschneiden noch vor dem -schweißen das größte Einsatzgebiet [1, 2]. Die überzeugenden Vorteile des Laserschneidprozesses gegenüber anderen thermischen Trennverfahren sind in der höheren Schneidgeschwindigkeit, größeren Maßhaltigkeit und Formtreue, geringeren Abmessung der Wärmeeinflusszone sowie der hohen Flexibilität hinsichtlich Kontur und bearbeitbarer Materialien zu sehen.

Bereits heute hat das Trennen von Blechen mittels Laser einen vergleichbar hohen Automatisierungsgrad erreicht. Doch trotz der hohen Automatisierung ist die Überwachung der erzielten Schnittqualität während des Bearbeitungsprozesses noch nicht Stand der Technik. Dies ist nicht zuletzt auf noch nicht vollständig verstandene Mechanismen der Fehlerentstehung zurückzuführen. Ein zweiter Grund ist in der Tatsache zu sehen, dass die erzielte Schnittqualität von einer Vielzahl externer Faktoren, die in ihrer Gesamtheit allesamt nicht beherrschbar sind, beeinflusst wird (vgl. Bild 1.1).

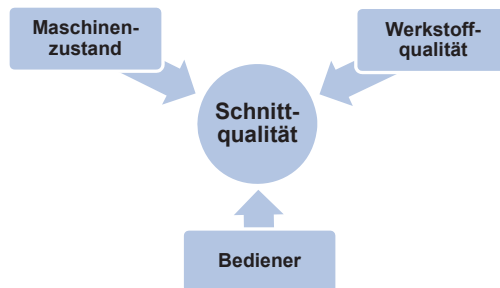


Bild 1.1: Einflussgrößen auf die Schnittqualität.

Die Bearbeitungsqualität hängt neben dem Maschinenzustand (Laserstrahl, Strahlführung, Schneidgas, Düse etc.) von der Werkstoffqualität (Chargenschwankungen der Werkstoffzusammensetzung, Wärmeleitfähigkeit, Werkstückoberfläche, etc.) und nicht zuletzt vom Know-how des Anlagenbedieners ab. Bei nicht optimal eingestellten Verfahrensparametern oder minderwertigen Materialqualitäten ist mit Qualitätseinbußen – im schlimmsten Fall mit Fehlschnitten wie beispielsweise Schnittabriss oder Self-Burning – zu rechnen.

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel dieser Arbeit, gravierende Fehlschnitte während des Laserschneidprozesses frühzeitig und automatisch zu erkennen, um eine hohe und stabile Qualität laserstrahlgeschnittener Bauteile sicherzustellen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Um das oben genannte Ziel zu erreichen, werden mittels unterschiedlicher Messmethoden optische, elektrische und strömungsmechanische Messgrößen aus dem aktuellen Prozesszustand gewonnen. Der Informationsgehalt der im Folgenden als Prozessmerkmale bezeichneten Informationsträger wird anschließend mit dem realen Prozesszustand bzw. Schneidergebnis korreliert.

Der Lösungsweg, welcher gleichzeitig eine gliederungsmäßige Übersicht über diese Arbeit gibt, ist in Bild 1.2 dargestellt.

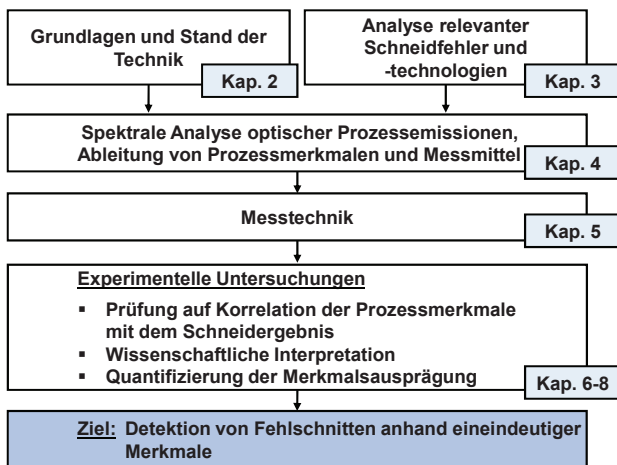


Bild 1.2: Lösungsweg und Aufbau dieser Arbeit.

In Kap. 2 werden der Prozessablauf der Laserschneidverfahren Brenn- und Schmelzschnitten sowie Kriterien zur Qualitätsbeurteilung laserstrahlgeschnittener Bauteile vorgestellt. Des Weiteren wird kurz auf die strahlungsphysikalischen Grundlagen der Wärme- und Plasma-Strahlung eingegangen. Eine Analyse des aktuellen Stands von Wissenschaft und Technik soll einen Überblick über die Forschungsfelder bzgl. der Diagnostik von Laserschneidprozessen geben.

Eine Priorisierung hinsichtlich der in dieser Arbeit zu untersuchenden Schneidfehler und -technologien erfolgt in Kap. 3. Das Auswahlkriterium stellt hierbei zweifelsfrei die praktische Relevanz der auftretenden Schneidfehler sowie der verwendeten Schneidtechnologien dar.

In Kap. 4 werden spektralanalytische Untersuchungen über die zu erwartenden Prozessemissionen während des Laserschneidprozesses vorgenommen. Ausgehend von den zuvor definierten Fehlerbildern erfolgt anhand phänomenologischer Beschreibungen des Fehlerbildes die Ableitung von Kennwerten, welche den aktuellen Prozesszustand charakterisieren. Es werden sog. Prozessmerkmale definiert, welche sensorisch erfassbare Informationsträger darstellen. Aufbauend auf diesen Vorüberlegungen erfolgt die Auswahl geeigneter Messtechnik, welche in Kap. 5 vorgestellt wird. Hierbei gilt es als Randbedingung zu beachten, dass die Erkennung der Prozessmerkmale unabhängig einer Schneidrichtung erfolgen muss.

In experimentellen Untersuchungen (Kap. 6 - 7) werden in unterschiedlichen, realitätsnahen Szenarien Gut- und Fehlschnitte erzeugt. Der Vergleich der Prozessmerkmale im Gutschnittfall mit denen im Fehlschnittfall ermöglicht es, Korrelationen zwischen den Prozessmerkmalen und dem jeweiligen Prozesszustand zu ermitteln. Wichtig hierbei ist, dass eine eindeutige Beziehung zwischen den detektierten Merkmalen und dem jeweiligen Fehlerbild besteht. Eineindeutigkeit bedeutet in diesem Kontext, dass es möglich sein muss, anhand des Merkmals zweifelsfrei auf das dazugehörige – und nur auf dieses einzige – Fehlerbild zurückzuschließen, um eine Fehlinterpretation auszuschließen.

Die anschließende wissenschaftliche Interpretation der beobachteten Phänomene ermöglicht es schließlich, die Ursachen der jeweiligen Fehlerentstehung zu verstehen und geeignete Gegenmaßnahmen abzuleiten.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Bevor auf relevante Schneidfehler eingegangen wird, werden in diesem Kapitel die Grundlagen und der Stand von Wissenschaft und Technik beschrieben. In Kap. 2.1 werden zunächst die relevanten Laserstrahlschneidverfahren charakterisiert. Wie die Qualität laserstrahlgeschnittener Bauteile beurteilt wird, findet sich in Kap. 2.2. Kap. 2.3 geht auf unterschiedliche Prozessbeobachtungs-Konzepte ein, während Kap. 2.4 die strahlungsphysikalischen Grundlagen von Wärme- und Plasmastrahlung näher beleuchtet. In Kap. 2.5 werden schließlich wissenschaftliche Ansätze der Laserschneidprozess-Beobachtung vorgestellt.

2.1 Laserstrahlschneidverfahren

Den klassischen Laserschneidverfahren Brennschneiden und Schmelzschneiden ist gemein, dass der Prozess als Zusammenspiel von Laserstrahl und Gasstrahl abläuft. Der durch die Laserschneidlinse fokussierte Laserstrahl tritt mittig aus der Laserschneiddüse aus und trifft auf das Werkstück (s. Bild 2.1). Durch die Absorption der Laserstrahlung im Werkstück wird dieses erhitzt und lokal aufgeschmolzen. Teilweise wird das Material lokal so stark erhitzt, dass Verdampfung einsetzt. Der Rest der Schmelze wird von einem koaxial durch die Düse ausströmenden Gasstrahl mittels Impulsübertragung des Gases auf die Schmelze ausgetrieben. Durch die Relativbewegung des Laserstrahls mit dem Werkstück entsteht die gewünschte Schnittfuge. Die Fokuslage des Laserstrahls befindet sich bei brenngeschnittenen Baustählen typischerweise wenige Millimeter oberhalb des Bleches (2-7 mm), bei schmelzgeschnittenen Edelstählen wird die Fokuslage mit zunehmender Blechdicke sukzessive in das Blech hinein verschoben, um qualitativ hochwertige Laserschnitte zu erhalten.

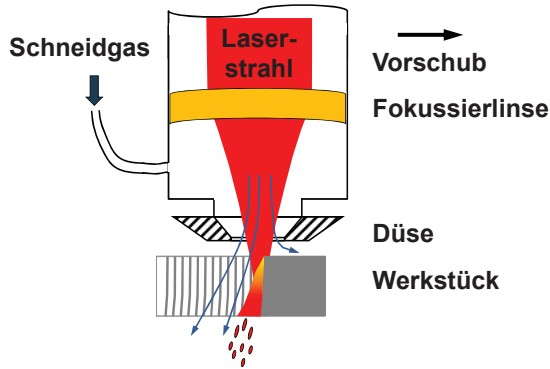


Bild 2.1: Schema des Laserschneidprozesses.

Laserschneidverfahren werden üblicherweise nach der Art und Weise, wie das Schnittfugenmaterial erhitzt und ausgetrieben wird, unterteilt. Die am häufigsten eingesetzten Verfahren sind das sauerstoffunterstützte Brennschneiden von Baustahl sowie das stickstoffunterstützte Schmelzschnitten von Edelstahl. Daneben existieren noch weitere Verfahren wie das Sublimierschneiden von Werkstoffen, die über keinen ausgeprägten Schmelzpunkt verfügen, sowie das sog. Kapillar- oder Hochgeschwindigkeitsschneiden von dünnen Blechen [3, 4]. Im Folgenden wird auf die beiden erstgenannten Verfahren näher eingegangen, da diese Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind.

Laserstrahlbrennschneiden

Für das Laserstrahlbrennschneidverfahren ist der Einsatz von Sauerstoff als Schneidgas charakteristisch. Der Vorteil im Vergleich zu inerten Schneidgasen wie beispielsweise Stickstoff liegt darin, dass der Sauerstoff nicht nur die Schmelze aus der Fuge austreibt, sondern zusätzliche Energie durch eine exotherme Eisen-Sauerstoff-Reaktion in die Wechselwirkungszone einbringt.

Der durch Laserstrahlabsorption auf Zündtemperatur erwärmte Blechbereich verbrennt unter dem Sauerstoffstrom durch eine exotherme Eisen-Sauerstoff-Reaktion. Hierbei entsteht hauptsächlich Eisenoxid FeO und es wird eine Reaktionsenthalpie von ca. 4800 kJ pro kg verbranntem Eisen freigesetzt [5]. Diese Energie trägt zusätzlich zur Laserstrahlabsorption zum Aufschmelzvorgang bei, wodurch insbesondere im Bereich niedriger Laserleistung weit höhere Vorschubgeschwindigkeiten möglich sind als im Schmelzschnidprozess. Als Nachteil seien jedoch die von einer dünnen Oxidschicht bedeckten Schnittkanten erwähnt. Diese Schicht müsste für eventuell nachgelagerte Prozessschritte wie beispielsweise Lackieren oder Schweißen entfernt werden.

Laserstrahlschmelzschnneiden

Beim Laserstrahlschmelzschnneiden wird ein inertes Gas verwendet, welches mit Hochdruck (2 - 20 bar) die Schmelze austreibt. Als Gase werden überwiegend Stickstoff oder Argon eingesetzt, welche eine Reaktion des Luftsauerstoffs mit der erstarrenden Schmelze verhindern. Dadurch werden qualitativ hochwertige, oxidfreie Schnittkanten erzielt [6]. Da beim Laserstrahlschmelzschnneiden die komplette Energie zum Aufschmelzen und teilweisen Verdampfen des Materials von der Laserstrahlung aufgewendet werden muss, ist der Leistungsbedarf beim Schmelzschnneiden höher als beim sauerstoffunterstützten Brennschnneiden. Dies führt insbesondere beim Schnneiden von dicken Blechen zu einem Geschwindigkeitsnachteil.

2.2 Qualitätsbeurteilung laserstrahlgeschnittener Bauteile

Qualitätsmerkmale nach DIN EN ISO 9013

Die DIN EN ISO 9013 [7] zieht zur Qualitätsbeurteilung laserstrahlgeschnittener Bauteile sowohl die Form- und Lagetoleranz als auch die Qualität der Schnittflächen heran. Hierbei wird die Schnittflächenqualität anhand der zwei Kenngrößen Rechtwinkligkeits- oder Neigungstoleranz u und der gemittelten Rautiefe R_{Zs} beschrieben. Als weitere Kenngrößen können zusätzlich der Rillennachlauf n , die Anschmelzung der Oberkante r sowie eventuell auftretende Bartbildung oder Schmelzetropfen an der Schnitt-Unterkante mit herangezogen werden.

Qualitätsmerkmale nach der VDI-Richtlinie 2906

Die VDI-Richtlinie 2906 [8] legt sich auf fünf Kenngrößen hinsichtlich der erreichbaren Schnittqualität fest. Analog zur DIN EN ISO 9013 werden sowohl Rechtwinkligkeits- oder Neigungstoleranz u als auch die Rauheit R_Z der Schnittfläche mit einbezogen. Die drei weiteren Kenngrößen sind die Anschmelzungen der Schnittkante an Eintritts- und Austrittsseite r_E und r_A , der Flankenwinkel α_F sowie die Gratausbildung.

Qualitätsmerkmale nach TRUMPF

Die Kriterien zur Qualitätsbeurteilung laserstrahlgeschnittener Bauteile weichen bei TRUMPF [9] im Vergleich zur DIN EN ISO 9013 und VDI-Richtlinie 2906 aus Gründen der Praxisrelevanz teilweise ab. Folgende Kriterien werden als qualitätsrelevant betrachtet:

- Gratbildung (Bartbildung oder Schmelztropfen)
- Schnittpaltbreite
- Kolkungen
- Rillennachlauf n
- Gemittelte Rautiefe R_{Z5}
- Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz u

Diese Kriterien werden ergänzt um Fehl- und Schlechtschnitte, welche von höchster Priorität sind, vgl. Kap. 3.

2.3 Prozessbeobachtungskonzepte

Hinsichtlich der räumlichen Anordnung der Detektoren wird in der Literatur häufig unterschieden zwischen einer off-axis und koaxialen Auskopplung von Prozessstrahlung. Die Ausrichtung der Sensoren wird hierbei relativ zur Laserstrahlachse angegeben. Bei der koaxialen Anordnung entspricht die Beobachtungsrichtung dem des Laserstrahls, bei Winkeln zwischen Laserstrahl und Beobachtungsrichtung von bis zu ca. 10° spricht man von quasi-koaxialer Integration. Eine seitliche bzw. laterale Beobachtung liegt bei Winkeln $>10^\circ$ vor [5].

Weiterhin wird unterschieden, ob die Beobachtung oberhalb oder unterhalb des Bleches erfolgt. Blechunterseitige Anordnungen sind hierbei aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit der Werkstückunterseite als aufwändig zu betrachten. In der Praxis sind vor allem Positionen oberhalb des Werkstücks von Bedeutung, da diese einen direkten Einblick in die Wechselwirkungszone des Laserstrahls mit dem Werkstück ermöglichen [5].

Für eine richtungsunabhängige Beobachtung ist die koaxiale Anordnung zwingend erforderlich. Erfolgt die Integration oberhalb des Werkstücks, bieten sich hierfür folgende Möglichkeiten der Auskopplung von Prozessstrahlung an (vgl. Bild 2.2):

1. Dichroitischer Spiegel
2. Scraper-Spiegel
3. Riefenspiegel (Diffraktiver Spiegel)
4. Lochspiegel

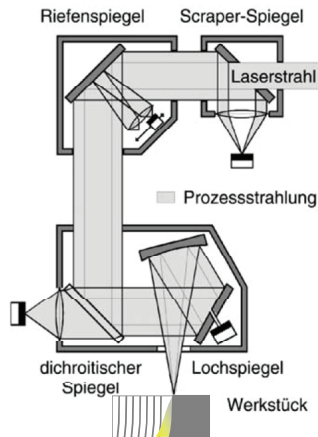


Bild 2.2: Übersicht über die Möglichkeiten einer coaxialen Prozesslichtauskopplung bei der Lasermaterialbearbeitung [10].

Dichroitischer Spiegel

Beim dichroitischen Spiegel handelt es sich um einen spektralen Strahlteiler-Spiegel, welcher abhängig von der Wellenlänge des auftreffenden Lichts ein unterschiedliches Absorptions- und Transmissions-Verhalten aufweist und somit die Beobachtungswellenlänge(n) von der Laserwellenlänge trennt. Diese Eigenschaft wird durch eine spezielle dielektrische Beschichtung erreicht (Coating). Wie in Bild 2.2 dargestellt, ist es anzustreben, dass der dichroitische Spiegel hochreflexiv für die Laserwellenlänge und gleichzeitig hochtransmissiv für die Beobachtungswellenlänge ist. Ein umgekehrtes Reflexions- und Transmissionsverhalten ist bei entsprechend angepasster Integration ebenfalls möglich. Vorteilhaft bei der Verwendung des dichroitischen Spiegels gegenüber den alternativen Beobachtungskonzepten ist die Möglichkeit, ein vollständiges, exakt coaxiales, orts aufgelöstes Abbild der Prozesszone zu gewinnen. Bei der Integration in CO₂-Lasereinrichtungen sei jedoch der Nachteil einer Erwärmung bis hin zur Zerstörung des Spiegels aufgrund der Absorption von CO₂-Laserstrahlung erwähnt. Aus diesem Grund kommen dichroitische Spiegel überwiegend bei Festkörperlaser mit Wellenlängen um 1 µm zum Einsatz.

Scraper-Spiegel

Scraper-Spiegel besitzen in der Mitte eine ausreichend große Bohrung, durch welche der Bearbeitungs-Laserstrahl ungehindert propagieren kann. Der Spiegel wird mittig in

den Laserstrahlengang platziert. Über den verspiegelten Rand wird die Prozessstrahlung seitlich auf einen Detektor abgelenkt. Ist die spiegelnde Fläche als Paraboloid ausgebildet, kann der Scraper-Spiegel gleichzeitig die Aufgabe der Fokussierung übernehmen. Der Vorteil dieser Variante liegt darin, dass der Scraper-Spiegel und der hindurch propagierende Laserstrahl keine gegenseitige Wechselwirkung vollführen. Nachteilig ist jedoch die Tatsache, dass nur der Randbereich der Prozessstrahlung ausgekoppelt wird, was zu Informations- und Helligkeitsverlust in der optischen Abbildung führt.

Riefenspiegel (Diffraktiver Spiegel)

Riefen- oder diffraktive Spiegel weisen gleichmäßige, parallele Riefen in der Oberfläche des Spiegels auf. Der Abstand der Riefen ist so klein gewählt, dass der Spiegel für die Wellenlänge des Laserlichts flach erscheint und somit eine nahezu verlustfreie Reflexion der Laserstrahlung möglich ist. Für CO₂-Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 10,6 µm sollte der Abstand der Riefen maximal 1 µm betragen [10]. Kurzwelliges Prozesslicht in der Größenordnung der Riefenstruktur wird in Abhängigkeit des Riefenabstands unter einem anderen Winkel als die langwellige Laserstrahlung aus dem Strahlengang auf einen Detektor reflektiert (Beugung). Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Ablenkung wellenlängenabhängig erfolgt.

Lochspiegel

Lochspiegel besitzen in der Mitte des Spiegels eine kleine Durchgangsbohrung, durch welche die Prozessstrahlung auf einen Detektor hindurch propagieren kann. Nachteilig bei diesem Konzept ist erstens die Beeinflussung des Laserleistungsstrahls aufgrund der Bohrung sowie zweitens die Schwierigkeit der Sensorintegration.

2.4 Strahlungsphysikalische Grundlagen

2.4.1 Wärmestrahlung nach Planck

Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes ($T = 0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$) strahlt elektromagnetische Kontinuumsstrahlung aus. Das Planck'sche Strahlungsgesetz [11, 12]

$$L_{\lambda,S}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\Omega_0} \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)^{-1} \quad (2.1)$$

beschreibt die spektrale Strahldichte $L_{\lambda,S}$ eines Schwarzen Strahlers als Funktion der Wellenlänge λ und der Temperatur T ,

mit h : Planck'sches Wirkungsquantum: $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ Js,
 c : Lichtgeschwindigkeit: $c = 2,9979 \cdot 10^8$ m/s,
 k : Boltzmann-Konstante: $k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ J/K,
 Ω_0 : Raumwinkel des Halbraums geteilt durch 2π , d.h. $\Omega_0 = 1$ sr

Die Einheit der spektralen Strahldichte $L_{\lambda,S}$ wird in $W/(cm^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ angegeben und bezieht sich demnach auf den abstrahlenden Raumwinkel Ω in Steradian (sr).

Die Strahldichte L_S eines Planck'schen Strahlers im Wellenlängenbereich λ_1 bis λ_2 berechnet sich durch Integration der spektralen Strahldichte $L_{\lambda,S}$ über λ :

$$L_S = \frac{2hc^2}{\Omega_0} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda^5} \cdot (e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1)^{-1} d\lambda. \quad (2.2)$$

Dieses Integral ist für beliebige Wellenlängenbereiche nur numerisch lösbar. Bei Integration über alle Wellenlängen von $\lambda_1 = 0$ nm bis $\lambda_2 = \infty$ ergibt das Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$L_S = \int_{\lambda=0}^{\infty} L_{\lambda,S}(\lambda, T) d\lambda = \frac{\sigma}{\pi \Omega_0} T^4 \quad (2.3)$$

eine einfache Abhängigkeit der Strahldichte L_S von der Temperatur T ,

mit σ : Stefan-Boltzmann-Strahlungskonstante: $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ W/(m² · K⁴).

Anhand dieses Zusammenhangs ist zu erkennen, dass die Strahldichte L_S eines Körpers mit der vierten Potenz seiner Temperatur T ansteigt. In Bild 2.3 sind die nach Gleichung (2.1) berechneten Emissionskurven für unterschiedliche Temperaturen von 1500 K bis 3000 K abgebildet. Das Strahlungsmaximum verschiebt sich für höhere Temperaturen hin zu kürzeren Wellenlängen. Dieser Formalismus wird durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz beschrieben, welches anhand der ersten mathematischen Ableitung von Gleichung (2.1) berechnet wird [13]:

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu m}{T/K}. \quad (2.4)$$

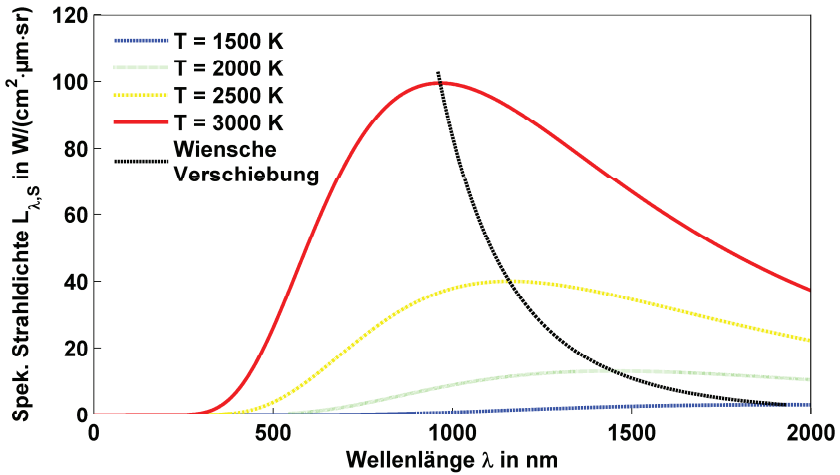


Bild 2.3: Spektrale Strahldichte $L_{\lambda,S}$ eines Planck'schen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen T in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ .

Planck'sche Strahler sind idealisierte Körper mit einem Emissionsgrad ε von genau 1. Sämtliche in der Realität vorkommende Strahler haben einen von der Wellenlänge λ , Temperatur T und den Abstrahlwinkeln ϑ und φ (Zenit- und Azimutwinkel) abhängigen Emissionsgrad $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Des Weiteren hängt der einem realen Messobjekt zugeordnete Emissionsgrad von der chemischen Zusammensetzung des Materials sowie von der Oberflächenstruktur (rau, glatt) ab [14]. Der spektrale Emissionsgrad

$$\varepsilon(\vartheta, \varphi, \lambda, T) = \frac{L_{\lambda}(\vartheta, \varphi, \lambda, T)}{L_{\lambda,S}(\lambda, T)} < 1 \quad (2.5)$$

stellt das Verhältnis der spektralen Strahldichte L_{λ} eines realen Strahlers zu der eines Schwarzen Strahlers $L_{\lambda,S}$ bei gleicher Temperatur T und Wellenlänge λ dar. Dies bedeutet, dass die spektrale Strahldichte L_{λ} eines realen Strahlers höchstens gleich wie die Strahldichte $L_{\lambda,S}$ eines Schwarzen Strahlers gleicher Temperatur ist.

Ist der Emissionsgrad über den betrachtenden Spektralbereich von der Wellenlänge unabhängig, so spricht man von einem sog. grauen Strahler.

2.4.2 Plasmastrahlung

Bei Lasermaterialbearbeitungsprozessen können in der Wechselwirkungszone von Laserstrahl, Werkstück und Atmosphäre laserinduzierte Plasmen entstehen, wenn bei hohen Laserstrahlintensitäten Teile der Gasphase ionisiert werden. Insbesondere beim CO₂-Laserstrahlschneiden von dickwandigen Edelstahl- und Aluminium-Blechen existieren Schneidverfahren, bei welchen ein Plasma gezielt in der Schnittfuge durch den Laserstrahl gezündet und kultiviert wird [15]. Zusätzlich zur ursprünglichen Fresnel-Absorption sorgt das Plasma für eine indirekte Energieübertragung an den Werkstoff, indem es dem elektromagnetischen Wechselfeld des Laserstrahls Energie mittels untenstehender Mechanismen entzieht und diese anschließend über Wärmeleitung und Plasmastrahlung an den Werkstoff abgibt. In einer Mehrzahl der Laserschneidverfahren – insbesondere in dünnen Blechen ≤ 15 mm – wird die Plasmabildung jedoch als hinderlich angesehen, da das Plasma die Energieeinkopplung und die gasdynamischen Vorgänge beeinflusst und somit nachhaltigen Einfluss auf die Bearbeitungsqualität ausübt.

Aufgrund der Bedeutung für den Laserschneidprozess sowie für die Beobachtung und Analyse der Prozessemissionen sei an dieser Stelle kurz auf die physikalischen Grundlagen der Plasmaphysik, v.a. hinsichtlich der Plasma-Entstehung, -absorption und -emission im Kontext der Lasermaterialbearbeitung eingegangen.

Plasmaentstehung

Ein Plasma stellt ein zumindest teilweise ionisiertes gasförmiges Medium dar, in welchem Moleküle, Atome, Ionen und Elektronen in ständigem Energieaustausch miteinander und mit dem Laser-Strahlungsfeld wechselwirken [1]. Für die charakteristische Eigenschaft der elektrischen Leitfähigkeit ist die hohe Anzahl frei beweglicher Elektronen je Volumeneinheit (Elektronendichte n_e) verantwortlich. Die Ionisationsenergie, um ein freies Elektron von seiner Bindung mit dem Atom zu lösen, kann hierbei entweder durch Photoionisation oder Stoßionisation erfolgen. Der erste Fall der direkten Absorption von Strahlungsenergie spielt jedoch eine untergeordnete Rolle, da das Ionisationspotenzial von Metallen und Gasen höher als die Photonenenergie der langwelligen und somit energiearmen CO₂-Laserstrahlung ist.¹ Bei der zweiten Art der Energieeinkopplung werden Elektronen durch Stoßionisation infolge der thermischen Teilchengeschwindigkeit freigesetzt. Absorptionsvorgänge an gebundenen Elektronen

¹ Die Ionisierungsenergie für die erste Ionisationsstufe beträgt bei Eisen (Fe) 7,90 eV, bei Stickstoff (N₂) 14,53 eV und bei Sauerstoff (O₂) 13,62 eV. Demgegenüber steht eine maximale Photonenenergie der CO₂-Laserstrahlung ($\lambda = 10,6$ μ m) von lediglich 0,12 eV.

oder Mie-Absorption im Materialdampf bewirken eine Aufheizung des Dampfes bis erste Elektronen freigesetzt werden [16, 69]. Weitere freie Elektronen werden nach dem Richardson-Effekt [17] aus der heißen Schmelze emittiert. In diesem schwach ionisierten Plasma stellt schließlich die inverse Bremsstrahlung einen zunehmend effizienten Absorptionsprozess dar. Hierbei erfolgt der Energieübertrag der eingestrahnten Photonen auf die Elektronen durch einen Dreierstoß zwischen Photon, Elektron und einem Atom, Molekül oder Ion, wobei das Photon praktisch seine gesamte Energie an das Elektron abgibt und die Impulsbilanz über das am Stoß beteiligte Schwerteilchen gewährleistet wird [16]. Die so beschleunigten Elektronen wiederum erzeugen durch Kollision mit Gasteilchen weitere Elektronen, welche ihrerseits zu vermehrter Absorption mittels des Prozesses der inversen Bremsstrahlung beitragen. Bei hohen Laserstrahl-Leistungsdichten werden somit in einer Art Lawineneffekt immer mehr Elektronen erzeugt, sodass es schließlich zu einem dielektrischen Durchbruch im Plasma kommt, welches die Laserstrahlung durch Reflexion und Absorption immer stärker abschwächt [16].

Damit im physikalischen Sinn von einem Plasma als solches gesprochen werden kann, müssen die folgenden Plasmabedingungen erfüllt sein [18]:

- Elektrische Neutralität: Anzahl der Elektronen pro Volumeneinheit muss gleich der Anzahl der Ionen pro Volumeneinheit entsprechen.
- Debye-Länge („Abschirmlänge“): In einem Plasma müssen die Raumladungseffekte mindestens gleich groß sein wie die thermischen Effekte und die Debye-Länge viel kürzer als die Plasmaausdehnung.
- Die „maximale Stoßdistanz“ zweier Elektronen (mittlere kinetische Energie gleich elektrostatischer Energie) muss viel kleiner sein als die Debye-Länge („Abschirmlänge“).

Plasmaabsorption

Der oben beschriebene Mechanismus der inversen Bremsstrahlung gilt als der dominierende Absorptionsmechanismus in laserinduzierten Plasmen im infraroten Wellenlängenspektrum [69]. Die in Propagationsrichtung abfallende Intensität $I(z)$ einer durch ein laserstrahlinduziertes Plasma transmittierenden Laserstrahlung kann durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben werden:

$$I(z) = (1 - R) \cdot I \cdot e^{-\alpha z}, \quad (2.6)$$

wobei R den Reflexionsgrad, I die einfallende Gesamt-Intensität und α den Absorptionskoeffizienten für die inverse Bremsstrahlung darstellen. Der Absorptionskoeffizient α für die inverse Bremsstrahlung im Plasma ist stark wellenlängen-, druck- und temperaturabhängig. Die Wellenlängenabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten kann vereinfacht wie folgt wiedergegeben werden [1]:

$$\alpha \propto n_e \cdot \lambda^3 \quad \text{für } hf \gg k_B T \quad (2.7)$$

$$\alpha \propto n_e \cdot \lambda^2 \quad \text{für } hf \ll k_B T, \quad (2.8)$$

wobei n_e die Dichte an freien Elektronen, hf die Photonenenergie mit der Frequenz f und $k_B T$ die mittlere thermische Anregungsenergie darstellen. Daran ist zu erkennen, dass die wellenlängenabhängige Absorption durch inverse Bremsstrahlung mit der zweiten bzw. dritten Potenz der Wellenlänge anwächst. Ein höherer Umgebungsdruck vergrößert in annähernd linearer Abhängigkeit den Absorptionskoeffizienten. Die Abhängigkeit von der Plasmatemperatur wirkt sich derart aus, dass α exponentiell mit der Temperatur anwächst, bis er schließlich nach Durchschreiten eines Maximums bei etwa 12000 K und 350 m^{-1} (Werte für Eisen und Aluminium bei Atmosphärendruck) wieder stark abfällt [19].

Durch die Absorption mittels inverser Bremsstrahlung wird dem elektromagnetischen Strahlungsfeld des einfallenden Laserstrahls Energie entzogen, was zur Folge hat, dass der Laserstrahl nicht mehr mit seinen Solldaten die Materialbearbeitung durchführen kann.

Plasmaemission

Das laserinduzierte Plasma gibt seine Energie unter anderem in Form von elektromagnetischer Strahlung wieder an seine Umgebung ab. Die hierbei emittierte Strahlung kann sowohl aus Kontinuums- als auch diskreter Linienstrahlung bestehen.

Bei der kontinuierlichen Strahlung unterscheidet man zwischen dem Bremskontinuum, welches bei der Verzögerung eines Elektrons an einem Ionenrumpf unter Aussendung eines Photons entsteht („frei-frei-Strahlung“), und dem Rekombinationskontinuum („frei-gebunden-Strahlung“).

Die diskrete Linienstrahlung („gebunden-gebunden-Strahlung“) entsteht durch den Übergang von einem energetisch höher gelegenen Zustand n zu einem energetisch tiefer liegenden Zustand m unter Aussendung eines Photons, dessen Energie gleich der

Energiedifferenz der beiden beteiligten Zustände ist. Dieser Mechanismus läuft spontan ab und wird entsprechend durch den Einsteinkoeffizienten für spontane Emission A_{nm} beschrieben. Neben dieser spontanen Emission tritt noch stimulierte Emission nach vorhergehender Absorption auf.

Der Vergleich zwischen Kontinuums- und Linienstrahlung aus Plasmen zeigt, dass Linienstrahlung bei niedrigen und Kontinuumsstrahlung bei hohen Temperaturen dominiert [20].

2.5 Stand von Wissenschaft und Technik

Für die Erfassung und Beschreibung des aktuellen Zustandes von Lasermaterialbearbeitungsprozessen bietet sich die Messung unterschiedlicher Arten von Prozessemissionen an. Die Informationsträger sind schematisch in Bild 2.4 dargestellt und lassen sich vereinfacht unterteilen in optische und akustische Emissionen. Die aus der Wechselwirkung mit dem Laserstrahl entstehende Schmelze, der Metaldampf und das Plasma emittieren nach den im Kap. 2.4 beschriebenen Mechanismen elektromagnetische Kontinuums- und Linienstrahlung (Sekundärstrahlung). Des Weiteren kann sowohl transmittiertes als auch reflektiertes Laserlicht (Primärstrahlung) Informationen über den aktuellen Prozesszustand liefern.

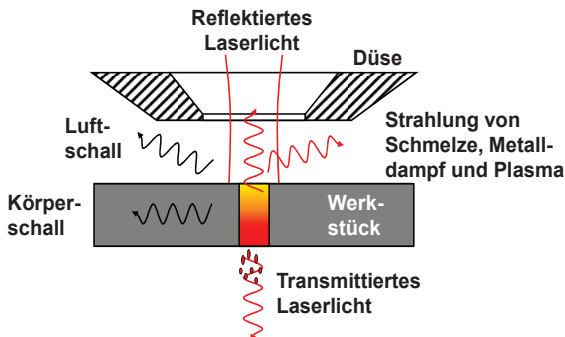


Bild 2.4: Prozessemissionen beim Laserschneidprozess.

Neben diesen genannten optischen Emissionen sendet der Prozess Luft- und Körperschallwellen in die Luft und in das Werkstück aus, welche überwiegend durch Reibung, Rissbildung, Umklappvorgänge oder Veränderungen der inneren Struktur verursacht werden [21].

Im Folgenden werden wissenschaftliche Ansätze der Prozessdiagnostik des Laserschneidverfahrens näher beleuchtet.

2.5.1 Optische Verfahren der Prozessdiagnostik

2.5.1.1 Integrale Verfahren

Jorgensen [22, 23] verwendet ein Multi-Sensor-System zur Beobachtung des Brennschneidprozesses von dünnwandigen (2 - 8 mm) Baustahl-Blechen. Als Sensoren, welche koaxial hinter einem GaAs- bzw. ZnSe-Strahlteilerspiegel integriert sind, kommen eine Si-Photodiode bei einer Peak-Wellenlänge von 860 bzw. 900 nm sowie eine CCD-Kamera im visuellen Spektralbereich und einer zeitlichen Auflösung von 25 fps zum Einsatz. Zusätzlich schätzt ein off-axis Pyrometer bei der Wellenlänge $\lambda = 1,1 \mu\text{m}$ die Temperatur auf der Schnittfront ab. Jorgensen zeigt, dass der Mittelwert der Si-Photodiode mit der Bartbildung sowie dem Schnittabriss korreliert, wohingegen die zeitliche Veränderung des Signals einen Indikator für erhöhte Rauigkeit auf den Schnittflanken darstellt. Die Bauteil-Riefenfrequenz kann mittels Frequenzanalyse aus dem Photodioden- und Pyrometer-Signal extrahiert werden.

Leidinger [24], Kaplan [25], Kaebnick [26] und Chen [27] kommen in ihren Arbeiten zu vergleichbaren Ergebnissen wie Jorgensen [22]: Die Riefenfrequenz kann anhand des Frequenzspektrums einer koaxial oder off-axis auf die Schnittfront ausgerichteten Photodiode detektiert werden (Leidinger/Kaplan/Kaebnick: Si-Photodiode; Chen: GaP-/Ge-Photodiode).

Hansmann [28] untersucht den CO₂-Laserbrennschneidprozess von Baustahl St37 der Blechdicken bis einschließlich 6 mm mittels einer hinter einem ZnSe-Strahlteilerspiegel koaxial angeordneten Si-Photodiode. Er zeigt einen Zusammenhang zwischen zunehmender Bauteil-Riefentiefe, welche anhand steigender Signalwerte und stärkerer Fluktuationen erkennbar sind, sowie eine Korrelation der Riefenfrequenz mit dem Photodiodensignal auf.

Heyn [29] analysiert – aufbauend auf den Erkenntnissen von Hansmann [28] – das Signalverhalten während des Brennschneidprozesses von 2D-Baustahl-Konturen hinsichtlich richtungsabhängig wirkender Effekte. Hierzu wird das Signalverhalten der koaxial angeordneten Photodiode bei der Peak-Wellenlänge von 850 nm mittels statistischer Signalanalyse (Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient, Minimal-/Maximalwerte, Häufigkeitsanalyse, Lineare Regression) sowie Frequenzanalyse mit dem erzielten Bearbeitungsergebnis korreliert. Es wird gezeigt, dass sich die Bau-

teil-Riefenfrequenz im Photodiodensignal widerspiegelt. Des Weiteren wird eine Korrelation zwischen der Rauigkeit und der Standardabweichung des Photodiodensignals aufgezeigt. Anhaftender Bart, unvollständige Trennung sowie verstärkter Materialabbrand sollen ebenfalls erkannt werden können. Allerdings sind bei Überlagerung mehrerer Effekte Aussagen nur durch Verknüpfung von kontinuierlich während des Anlaßbetriebes aufgezeichneten Informationen über die richtungsabhängigen Schneideigenschaften mit den am momentan gefertigten Werkstück gemessenen Prozesssignalen möglich.

Decker [30] und Martinen [31] integrieren ein Sensormodul oberhalb der Schneidlinse, welches die Prozessstrahlung quasi-koaxial mittels eines torischen Spiegels auf vier radial angeordnete Si-Photodioden ablenkt. Die vier ringförmig platzierten Dioden detektieren örtlich differenzierte Strahlungsanteile jeweils vor, hinter, links und rechts der Schnittfront. Kolkungen und unvollständige Trennung im Brennschneidprozess von Baustahl zeichnen sich durch einen erhöhten Signal-Mittelwert aus. Die Bartbildung beim Schmelzschneiden von hochlegiertem Edelstahl bewirkt ebenfalls eine Erhöhung des Mittelwerts sowie der Standardabweichung. Bei Konturschnitten sei eine Fehlererkennung anhand eines vorherigen Teach-Prozesses von Qualitätsschnitten und der anschließenden Verwendung der Toleranzbandmethode möglich. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Fehlererkennung versagt, sobald Prozessparameter wie beispielsweise Laserparameter oder Werkstücktemperatur variieren.

Graën [32] implementiert zwei Si-Photodioden mit der spektralen Empfindlichkeit von 400 - 1100 nm koaxial im Strahlengang, wovon eine Photodiode direkt im Zentrum auf die Bearbeitungszone gerichtet ist, während die zweite Photodiode lateral leicht versetzt den Nachlauf beobachtet. Die Untersuchungen zeigen, dass mit der IR-Photodiode grobe Schneidfehler wie beispielsweise unvollständige Trennung oder Kolkungen bei Titan, Aluminium und hochlegiertem Edelstahl festgestellt werden können. Bei unlegiertem Baustahl der Blechdicke 2,3 mm kann anhand des Differenzsignals zwischen zentrumsnaher und nachgeführter Photodiode eine Korrelation mit der Schnittflächenfeingestalt (Riefenstruktur) hergestellt werden. Mithilfe einer Autokorrelationsfunktion lassen sich der mittlere Riefenabstand auf der Schnittfläche und somit Schwankungen der Bearbeitungsqualität erfassen.

Tönshoff et al. [33, 34] haben einen Multi-Sensor-Kopf entwickelt, welcher eine Photodiode mittels diffraktivem Spiegel koaxial, einen Gasdrucksensor im Schneidkopf sowie ein off-axis angebrachtes Mikrophon integriert. Untersuchungen zur Gratbildung und zum Schnittabriss in 6 mm Baustahl-Blechen zeigen, dass die qualitätsbeeinflussenden Prozessveränderungen sowohl vom optischen als auch akustischen Sensor

detektiert werden. Der Auswertalgorithmus basierend auf Fuzzy-Klassifizierung muss jedoch anhand von Gutschnitten eingelesen werden.

Schneider und Petring [35] überwachen mittels zweier koaxial angeordneter Silizium- und Germanium-Photodioden unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit den Laserschmelz- und -brennschneidprozess. Das Funktionsprinzip hierbei ist, dass der Prozess durch eine leichte Modulation der Laserstrahlleistung angeregt und aus dem Antwortverhalten auf den Prozesszustand geschlossen wird. Die Auswertung ist nicht vom Absolutwert des detektierten Strahlungssignals abhängig, sondern nutzt charakteristische Merkmale der Signalform im Zeit- oder Frequenzbereich [36]. Schneidfehler wie Ausbrände, Bartbildung und Schnittabbruch sollen selbst bei Konturschnitten erkannt werden können.

De Keuster et al. [37, 38] haben drei identische Photodioden gleichmäßig an einem Ring quasi-koaxial am Schneidkopf oberhalb der ZnSe-Schneidlinse integriert. Während des Laserbrennschneidprozesses von 15 mm, 20 mm und 25 mm dicken Baustahl-Blechen werden Photodioden in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen eingesetzt. Die Autoren stellen fest, dass die interessantesten Informationen für die Beschreibung des aktuellen Prozesszustandes sowie der Schneidfehler-Erkennung aus dem nahinfraroten Spektralbereich extrahiert werden können. Ein verstärkter Riefennachlauf sowie Bartanhaftung äußern sich in einem höheren Signal-Mittelwert, wohingegen Ausbrände und erhöhte Rauigkeit in einer Zunahme der Standard-Abweichung resultieren. Ein Echtzeit-Regelalgorithmus vergleicht die aktuellen Signalwerte mit denen eines qualitativ hochwertigen Referenz-Schnitts und passt die Laserleistung, die Vorschubgeschwindigkeit, den Gasdruck bzw. das Tastverhältnis an [39, 40].

Zusammenfassung und Folgerungen für die vorliegende Arbeit

Die optisch integral messenden Systeme, welche auf Photodioden, Pyrometern etc. basieren, haben die Schwierigkeit, anhand der begrenzten Auswertbarkeit des eindimensionalen Signals auf mehrere unterschiedliche Fehlerfälle eindeutig zurückzuschließen. So stellt beispielsweise Heyn [29] fest, dass beim Auftreten mehrerer Fehlerbilder zusätzliche Informationen über den Prozessablauf herangezogen werden müssen, um zuverlässige Aussagen über den Prozesszustand abzuleiten. Ein weiteres Defizit bisheriger Arbeiten ist darin zu sehen, dass das Sensorsystem anhand Referenz-Gutschnitten eingelesen werden muss (vgl. Decker [30], Martinen [31] und Tönshoff et al. [33, 34]). Dieser zeit- und ressourcenbeanspruchende Vorgang ist in der industriellen Praxis jedoch unerwünscht. Ziel für das in dieser Arbeit zu entwickelnde Sensorsystem soll es sein, allgemeingültige Merkmale zu identifizieren, die eine eindeutige

Rückschließbarkeit auf den jeweiligen Fehlerfall – ohne vorherigen Einlernprozess – ermöglichen.

Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung erscheinen Fotodioden als sinnvolle Messmittel, um hochdynamische Vorgänge während des Laserschneidprozesses zu detektieren. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit auf eine Fotodiode zurückgegriffen – jedoch wird diese um zusätzliche integrale und bildgebende Sensoren erweitert, um die geforderte Eindeutigkeit bei der Fehlererkennung sicherzustellen: Als weiterer integraler optischer Sensor kommt in dieser Arbeit ein schneller Leistungsmesskopf zur koaxialen Messung rückreflektierter CO₂-Laserstrahlung während des Schneidprozesses zum Einsatz. Die Beobachtung des CO₂-Laserschneidprozesses mithilfe dieses Sensortyps stellt gegenüber dem Stand der Technik ein Novum dar.

2.5.1.2 Bildgebende Verfahren

Wie weiter oben bereits erwähnt, verwendet Jorgensen [22, 23] eine koaxial hinter einem GaAs-Strahlteilerspiegel positionierte CCD-Kamera, welche einen Bandpassfilter bei $\lambda = 645 - 690 \text{ nm}$ sowie eine Bildwiederholrate von 25 fps aufweist, um den Brennschneidprozess von Baustahl ortsaufgelöst zu untersuchen. Es wurde festgestellt, dass die Bilder nur bei geringen Belichtungszeiten und Vorschubgeschwindigkeiten ausreichend scharf sind, um die Schnittspaltbreite sowie die Riefen im oberen Bereich der Schnittspaltflanken erkennen zu können. Ein durch zu hohe Vorschubgeschwindigkeit provozierter Schnittabriss äußert sich in einer Zunahme der detektierten Strahlungsintensität. Die Versuche beschränken sich auf eine maximale Laserleistung von 1 kW.

Haferkamp et al. [41, 42] setzen ebenfalls wie Jorgensen [22] eine koaxial angeordnete CCD-Kamera im spektralen Empfindlichkeitsbereich von $\lambda = 0,9 - 1,3 \mu\text{m}$ und mit einer Bildwiederholrate von 50 fps während des Nd:YAG-Laserstrahlschmelzscheidens von 0,5 und 1,0 mm dünnen Edelstahl- und Titan-Blechen ein. Mittels Bildverarbeitungstechniken werden Korrelationen zwischen den Kamerabildern und der erzielten Bearbeitungsqualität hergestellt. Bartbildung resultiert demzufolge in einem größeren Strahlungsfeld, insbesondere an den Kanten. Die Schnittspaltbreite sowie das Ende des Einstechprozesses sollen ebenfalls erkannt werden.

Ein koaxiales und modular aufgebautes Sensorsystem namens Coaxial Process Control (CPC) ist für die Materialbearbeitung von Festkörper- und CO₂-Laser am Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT entwickelt worden [43, 44]. Hierbei wird das Prozesslicht über Strahlteilerspiegel ausgekoppelt und von einer Kamera, Photodiode oder einem

Spektrometer mit vorgeschalteter Optik erfasst [45]. Eine simultane Fremdbeleuchtung kann ebenfalls implementiert werden [46]. Laut diversen Untersuchungen ist es möglich, die Schnittspaltbreite [46, 47], unterschiedliche Barttypen [44, 48] sowie die Schmelze auf der Schnittfront [46] zu erkennen. Es wird berichtet, dass sich die Abbildungsqualität bei aktivem Schneidgas verschlechtert [49].

De Keuster [39] hat eine 50 fps-NIR-Kamera mit einem Bandpassfilter der Peakwellenlänge 1,5 μm und Halbwertsbreite 30 nm koaxial mittels eines ZnSe-Scraper-Spiegels in eine CO₂-Laserschneidmaschine integriert. Die veröffentlichten Ergebnisse beschränken sich auf Linearschnitte mit variierender Vorschubgeschwindigkeit während des Brennschneidprozesses von Baustahl der Blechdicken 15, 20 und 25 mm sowie des Edelstahl-Schmelzschnidprozesses der Blechdicke 12 mm. Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und somit ein erhöhtes Risiko von Bartbildung äußert sich beim Baustahl durch eine Zunahme der Schnittfront-Helligkeit, wohingegen eine Reduzierung der Schneidgeschwindigkeit zu erhöhter Rauigkeit sowie zu Verbrennungseffekten führt, welche anhand der Schnittspaltbreite detektiert werden können. Die Plasma-Bildung beim Edelstahl-Schmelzschnitt kann ebenfalls mittels der NIR-Kamera erkannt werden.

Zusammenfassung und Folgerungen für die vorliegende Arbeit

Die Verwendung einer ortsauflösenden Kamera reduziert die Interpretations-Unsicherheit, indem geometrische Merkmale und die Verteilung der Strahlungsemission ausgewertet werden. Es wurde festgestellt, dass die Beobachtung im visuellen und insbesondere im nahinfraroten Spektralbereich einen hohen Informationsgehalt hinsichtlich der Beschreibung des aktuellen Prozesszustands bietet. Bisher eingesetzte Kamera-Systeme von Jorgensen [22, 23], Haferkamp [41, 42] und De Keuster [37] leiden jedoch unter einer relativ geringen zeitlichen Auflösung von max. 100 fps und detektieren ausschließlich das Prozesseigenleuchten. Demgegenüber werden in dieser Arbeit Kameras im visuellen und insbesondere im nahinfraroten Wellenlängenbereich sowohl mit als auch ohne Aufrichtbeleuchtung eingesetzt, welche allesamt eine größere Messfrequenz bis in den kHz-Bereich bieten.

2.5.2 Akustische Verfahren der Prozessdiagnostik

Akustische Messverfahren registrieren Schallwellen, welche der Laserschneidprozess in die Luft (Luftschaall) oder in das Werkstück (Körperschaall) aussendet. Zur Messung

dieser Größen kommen überwiegend Mikrophone oder Piezo-Elemente zum Einsatz, welche die Schallwellen in elektrische Signale wandeln.

Umfangreiche Luftschall-Messungen während des Brennschneidprozesses von Baustahl hat De Keuster [37] durchgeführt. Ein off-axis und auf die Prozesszone gerichtetes Kondensator-Mikrofon ist in der Lage, nach einer Signal-Hochpassfilterung das Ende des Einstechvorgangs zu erkennen. Gratbildung während des Konturschneidens – hervorgerufen durch eine Vorschubsteigerung – äußert sich in einer Intensitätszunahme im Frequenzbereich zwischen 5 und 6 kHz. Nachteilig ist jedoch eine vorherige Referenzaufnahme eines Gutschnitts. Der Autor berichtet weiterhin, dass nur qualitative und keine quantitativen Aussagen bzgl. des Prozesszustands getroffen werden können. Des Weiteren ist die Positionierung nahe der Prozesszone aufgrund der harschen Umgebungsbedingungen problematisch.

Tönshoff et al. [50] haben einen Zusammenhang zwischen der Einschneidtiefe (keine vollständige Durchtrennung) und einer mit einem Mikrofon aufgenommenen markanten Frequenz während des Laserschneidens von Plexiglas festgestellt. Eine Kalibrierung durch eine vorherige Referenzfahrt ist notwendig, um den Einfluss der vielfältigen Störgeräusche zu reduzieren.

Habegger [51] hat sowohl den Luftschall mittels eines Mikrophons sowie den Körperschall mittels eines kontaktierenden Beschleunigungssensors aufgenommen. Während Linearschnitten wurde jeweils nur ein Parameter (Gasdruck, Fokusslage, Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit) variiert. Der Autor kommt zu dem Ergebnis, dass die Signale im Vergleich zu einem Gutschnitt stark streuen. Eine explizite Korrelation zwischen Prozesszustand und Signalverhalten wurde nicht gefunden. Problematisch sind störende Hintergrundgeräusche der Lüfter, Achsen und anderer Maschinen.

Li und Steen [52] haben zur Körperschallmessung einen piezoelektrischen Sensor auf das Blech angebracht und berichten von nachteiligen Effekten, die ein veränderlicher Abstand zwischen dem Sensor und der Prozesszone bei der Materialbearbeitung mit fliegenden Optiken nach sich zieht.

Zusammenfassung und Folgerungen für die vorliegende Arbeit

Akustische Messverfahren erscheinen aufgrund der folgenden Defizite wenig praktikabel hinsichtlich einer industriellen Umsetzung: off-axis Mikrophone weisen eine Richtungsabhängigkeit auf, sind harschen Umgebungseinflüssen ausgesetzt und werden von störenden Hintergrundgeräuschen stark beeinträchtigt. Körperschallsensoren werden ebenfalls als problematisch eingeschätzt, da eine reproduzierbare Anbindung

des Sensors auf dem Werkstück im Serieneinsatz als schwierig angesehen wird und darüber hinaus ein veränderlicher Abstand zwischen Prozesszone und Sensor für unterschiedliche Signalpegel sorgt. Aus diesen Gründen wird für die vorliegende Arbeit von dem Einsatz akustischer Messverfahren abgesehen.

3 Auswahl relevanter Schneidfehler und -technologien

In Kap 2.2 wurden die Merkmale zur Qualitätsbeurteilung laserstrahlgeschnittener Bauteile vorgestellt, wie sie sowohl in der DIN EN ISO 9013, in der VDI-Richtlinie 2906 als auch im Hause TRUMPF definiert sind. Insbesondere den offiziellen DIN- und VDI-Normen ist gemein, dass diese von vornherein davon ausgehen, dass der Laserstrahl eine Schnittfuge ausgebildet habe – das Bauteil also aus dem Restgitterblech zu entnehmen sei. Hierbei handelt es sich demzufolge um Qualitätsmerkmale von vereinzelbaren Bauteilen. In der Praxis treten jedoch noch wesentlich gravierendere Fehlerbilder infolge Prozessversagen auf. Die Auswirkungen solcher Fehler sind schwerwiegender als die geringen Qualitätseinbußen, welches ein Bauteil mit z.B. erhöhter Rauigkeit oder Kantenschräge mit sich bringt. Es handelt sich hierbei um die beiden Fehlerbilder Schnittabriss sowie Self-Burning. Diese Fehler führen häufig zu Ausschussteilen, da die Bauteile entweder nicht vom Restgitter getrennt werden können oder aufwändige Nacharbeit notwendig ist. Die sensorunterstützte Erkennung solch gravierender Fehlerbilder ist deshalb von höchster Priorität.

Während Self-Burning beim Brennschneiden dicker Baustahlbleche auftritt, kann ein unvollständiger Trennschnitt praktisch in jedem lasergeschnittenen Material vorkommen. Um die Komplexität für diese Arbeit in einem realisierbaren Rahmen zu halten, wird eine Priorisierung auf Werkstoffe und Prozesse vorgenommen, welche eine hohe Praxisrelevanz besitzen. Die Untersuchungen konzentrieren sich somit auf die Materialklassen Baustahl S235 und Edelstahl 1.4301 mit den jeweiligen Trennprozessen Brenn- und Schmelzschnitten (vgl. Tabelle 3.1). Des Weiteren wird eine Eingrenzung auf den CO₂-Laserschneidprozess vorgenommen, da dieser – trotz des steigenden Marktanteils von Festkörper-Laserschneidmaschinen – nach wie vor den hauptsächlichsten Trennprozess für laserstrahlgeschnittene Bauteile darstellt. Im Jahr 2011 betrug der Anteil der CO₂-Laser in der Metallverarbeitung 67%, das restliche Drittel teilten sich der Festkörperlaser (18%) und der Faserlaser (15%) zu etwa gleichen Teilen [53].



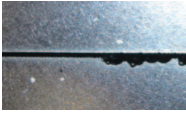
		Brennschnitt O ₂ (S235)	Schmelzschnitt N ₂ (1.4301)
Fehlschnitt	Schnittabriss		
	Self-Burning S235		<i>Technisch irrelevant</i>

Tabelle 3.1: Übersicht über die in dieser Arbeit behandelten Fehlerbilder.

Eine Definition der Fehlerbilder Schnittabriss und Self-Burning, eine tiefere Beschreibung der Fehlereintrittsmechanismen sowie die Ableitung von Prozessmerkmalen zur sensorunterstützten Detektion werden in Kap. 4.2 gegeben.

4 Grundsätzliche Betrachtungen der Prozessemissionen

Aus der Analyse über den Stand der Technik (Kap. 2.5) geht hervor, dass die Sekundär-Strahlungsemissionen einen hohen Informationsgehalt hinsichtlich der Beurteilung des aktuellen Prozesszustands liefern. Im folgenden Kapitel 4.1 wird anhand spektroskopischer Untersuchungen festgestellt, in welchen spektralen Wellenlängenbereichen die Prozessemissionen überwiegend stattfinden. Diese Betrachtung ist notwendig, um einen geeigneten Beobachtungs-Wellenlängenbereich für die optische Strahlungsdetektion zu bestimmen. In Kapitel 4.2 werden schließlich die zu detektierenden Fehlerbilder Schnittabriss im Bau- und Edelstahl sowie Self-Burning im Baustahl anhand experimenteller Aufnahmen phänomenologisch beschrieben. Ziel hierbei ist es, mögliche Prozessmerkmale zu definieren, welche sensorisch erfassbare Informationsträger darstellen und charakteristisch für den jeweiligen Prozesszustand (Gutschnitt, drohender Fehlschnitt, eingetretener Fehlschnitt) sind. Anhand dieser definierten Prozessmerkmale ergeben sich schließlich die Anforderungen an die zu verwendenden Messmittel (Kap. 4.3).

4.1 Spektrale Analyse optischer Prozessemissionen

Die Prozessemissionen der Schnittfront werden mittels einer Lichtleitfaser, welche im Abstand von ca. 50 mm und unter einem Winkel von ca. 25° zur Horizontalen von hinten in den Schnittpalt auf die Schnittfront gerichtet ist, erfasst und zu einem Spektrometer geleitet (siehe Versuchsaufbau in Bild 4.1). Der Messfleck besitzt einen Durchmesser von etwa 4 mm und befindet sich ca. 5 mm unterhalb der oberen Blechkante. Als Spektrometer wird ein Labor-Spektrograph von LOT Oriel [54] mit einem Eintrittsspalt von $10\text{ }\mu\text{m}$ und einem Gitter verwendet, welches die Prozessemissionen im Wellenlängenbereich von $\lambda = 500 - 1000\text{ nm}$ auf der 2048 Pixel zählenden Zeilenkamera spektral abbildet. Für die Wellenlängenkalibrierung dient eine kombinierte Quecksilber-Argon-Lampe CAL-2000 vom Hersteller MikroPack, welche sehr enge Spektrallinien bei bekannter Wellenlänge aussendet. Die relative Intensitätskalibrie-

rung erfolgt mit einer Wolfram-Bandlampe des Herstellers OSRAM, welche ein definiertes Spektrum bei der Farbtemperatur von 2500 K emittiert [55].



Bild 4.1: Versuchsaufbau der off-axis Spektromettermessung.

In Bild 4.2 sind exemplarisch die gemessenen spektralen Strahldichteverläufe mehrerer Baustahl-Brennschnitte sowie Edelstahl-Schmelzschnitte der Blechdicke $d = 10$ mm bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten dargestellt. Die Versuchsparmeter in der mittleren Zeile von Bild 4.2 entsprechen denen eines Gutschnitts ($v_{\text{Gutschnitt}}$). In der oberen bzw. unteren Zeile sind die Vorschubgeschwindigkeiten niedriger ($v_{\text{red.}} < v_{\text{Gutschnitt}}$) bzw. höher ($v_{\text{SA}} > v_{\text{Gutschnitt}}$) als im Gutschnittfall, sodass bei der Geschwindigkeit v_{SA} Schnittabbriss eintritt. Die Temperaturbestimmung erfolgte mithilfe des Quotientenverfahrens bei den Wellenlängen $\lambda_1 = 760$ nm und $\lambda_2 = 960$ nm. Eine genaue Beschreibung dieses Verfahrens sowie eine ausführliche Fehlerbetrachtung hinsichtlich der mit diesem Versuchsaufbau ermittelten Temperaturwerte findet sich in [56].

Ein Vergleich des spektralen Strahldichteverlaufs der Prozessekonditionstrahlung mit dem jeweiligen Kurvenverlauf des Grauen Strahlers bei gleicher Temperatur lässt den Schluss zu, dass die Prozessemissionen sowohl bei reduzierter (obere Zeile) als auch normaler Vorschubgeschwindigkeit (mittlere Zeile) durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben werden können. Weitere Autoren [32, 57, 58, 85] kommen in ihren spektralanalytischen Untersuchungen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Prozessemission der Schmelze beim Laserstrahlschneiden (bzw. -schweißen [56]) sehr gut anhand des spektralen Strahldichteverlaufs eines Grauen Strahlers beschrieben werden kann.

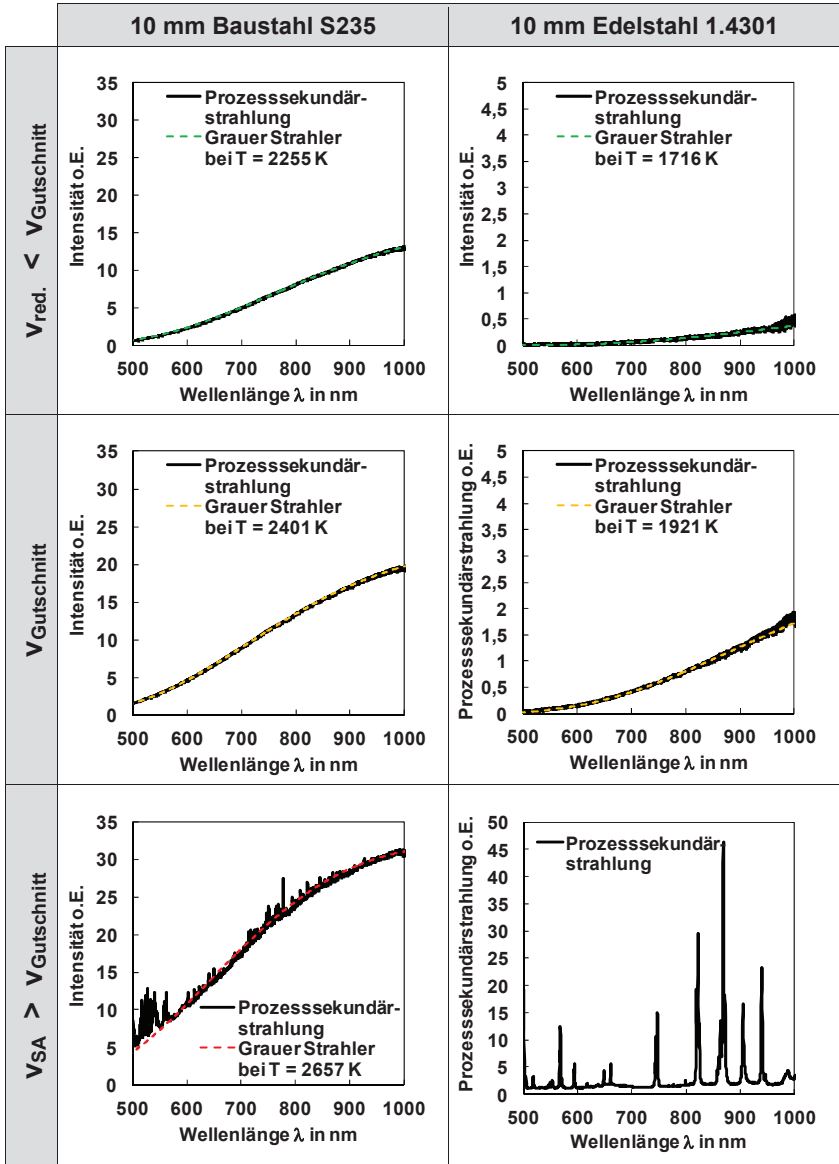


Bild 4.2: Spektraler Strahldichte Verlauf eines Baustahl-Brenn- (linke Spalte) und Edelstahl-Schmelzschnitts (rechte Sp.) in Abh. v. der Vorschubgeschw. Obere Zeile: $v_{red.} < v_{Gutschnitt}$. Mittl. Zeile: $v_{Gutschnitt}$. Untere Z.: $v_{SA} > v_{Gutschnitt}$. $d = 10$ mm.

Bei Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit bis zum Schnittabriss (Bild 4.2 untere Zeile) steigt die mittlere Temperatur auf der Schnittfront, was durch theoretische und experimentelle Arbeiten belegt ist (vgl. Kap. 6.1). Mit zunehmender Temperatur kommt es mehr und mehr zu Verdampfungseffekten des aufgeschmolzenen Materials, was anhand der auftretenden Emissionslinien in den Spektren zu erkennen ist. Eine spektralanalytische Untersuchung des Schnittabrisses in Baustahl (Bild 4.2 unten links) detektiert Fe I-Linien, also Linienstrahlung, welche aus dem angeregten Zustand des Metaldampfes stammt. Dass die Hintergrundtemperatur des Grauen Strahlers noch unterhalb der Fe-Verdampfungstemperatur liegt, ist damit zu erklären, dass der Beobachtungsfleck mit einem Durchmesser von ca. 4 mm nur einen Teilbereich in der Mitte der 10 mm langen Schnittfront abdeckt. Ortsaufgelöste Messungen der Schnittfronttemperatur von Onuseit [58, 59] sowie theoretische Arbeiten von Petring [92] zeigen, dass die Schnittfronttemperatur mit der Schmelzfilmdicke korreliert und somit in Richtung Blechunterseite ansteigt. Die Schmelze erreicht erst außerhalb des Beobachtungsbereichs Verdampfungstemperatur, sodass nur lokal Verdampfungseffekte auftreten.

Der Edelstahl-Schmelzschnitt weist während des Schnittabrisses (Bild 4.2 unten rechts) markante Spektrallinien auf, welche die Planck'sche Hintergrundstrahlung um ein Vielfaches überstrahlen. Eine Temperaturbestimmung der Planck'schen Hintergrundstrahlung liefert einen Wert von ca. 2800 K, welcher somit ca. 900 K höher liegt als im Gutschnittfall. Die Wellenlängen-Stützstellen, an welchen die Intensitäten für die quotientenpyrometrische Temperaturmessung ermittelt werden, liegen bei $\lambda_1 = 760$ nm und $\lambda_2 = 960$ nm und werden nicht von Spektrallinien beeinflusst.

Eine spektralanalytische Untersuchung, bei welcher die gemessenen Spektrallinien verglichen werden mit Spektrallinien der im Edelstahl enthaltenen chemischen Elemente sowie der beteiligten Reaktionspartner (Stickstoff N_2 als Schneidgas), kommt zu dem Ergebnis, dass es sich bei den Spektrallinien überwiegend um N I- und N II-Linien handelt. Hierfür wird die Prozesssekundärstrahlung mit Emissionslinien von N I (Bild 4.3) und N II (Bild 4.4) bei einer angenommenen Elektronentemperatur von 1 eV (≈ 11600 K) aus der NIST-Spektraldatenbank [60] gegenübergestellt. In beiden Fällen ist eine gute Übereinstimmung der detektierten Spektrallinien mit den Emissionslinien von N I und N II zu erkennen. N I-Linien entstehen in der angeregten Gasphase, wohingegen N II-Linien aus dem ionisierten Zustand des Stickstoff-Gases stammen.

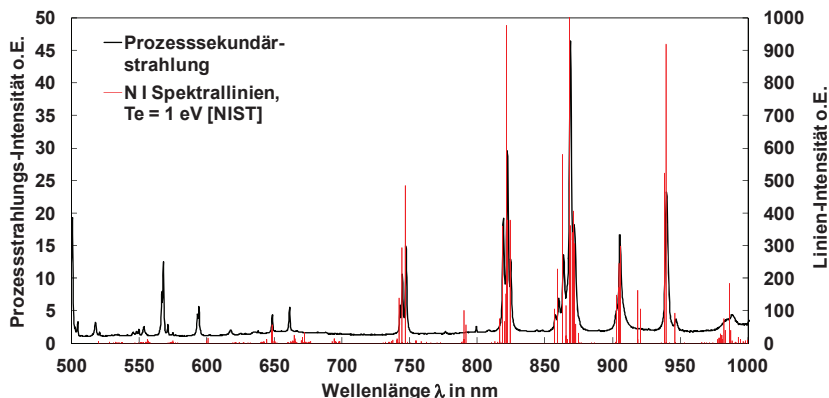


Bild 4.3: Vergleich der Prozesssekundärstrahlung vom Schnittabrisse Edelstahl (Bild 4.2 unten rechts) und den N I-Emissionslinien bei einer angenommenen Elektronentemperatur T_e von 1 eV ($\cong 11600$ K), [NIST, 60].

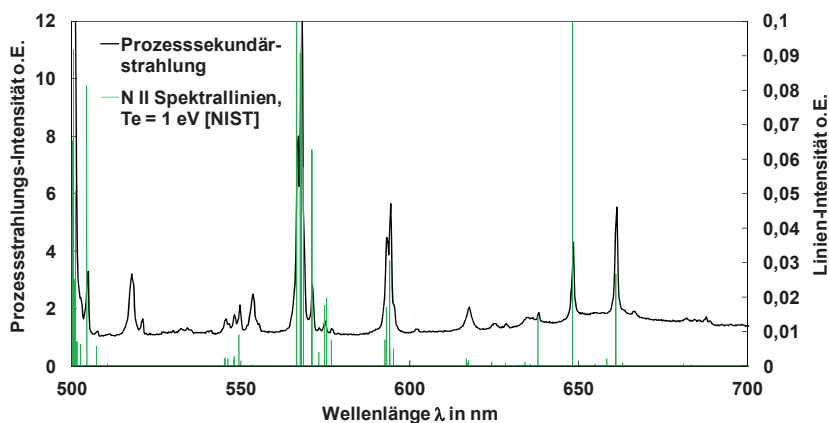


Bild 4.4: Vergrößerter Ausschnitt des Spektrums vom Schnittabrisse Edelstahl (Bild 4.2 unten rechts) im Wellenlängenbereich von 500 - 700 nm mit Einzeichnung der N II-Emissionslinien bei einer angenommenen Elektronentemperatur T_e von 1 eV ($\cong 11600$ K), [NIST, 60].

Mittlere Temperatur der Gutschnitte

Mithilfe des oben angewendeten Quotientenverfahrens ist es möglich, für die Gutschnitte die mittlere Temperatur der emittierenden Leuchtfläche (Schnittfront) zu berechnen, da deren Emissionsspektrum dem eines Grauen Strahlers entspricht. In Bild

4.5 sind die gemittelten Schnittfronttemperaturen von Baustahl-Brennschnitten sowie von Edelstahl-Schmelzschnitten in unterschiedlichen Blechstärken während eines qualitativ hochwertigen Laserschnitts dargestellt. Die Temperaturmessung erfolgt auf der Schnittfront in einem Bereich zwischen 3 und 7 mm unterhalb der oberen Schnittkante.

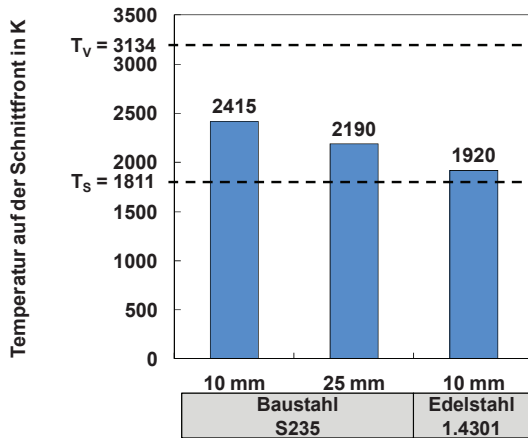


Bild 4.5: Mittlere Temperaturen eines lokalen Teilbereichs der Schnittfront von Gutschnitten in Baustahl S235 und Edelstahl 1.4301 unterschiedlicher Blechdicke ($n = 2$). Das Spektrometer wurde mit einer Argon-Quecksilber-Dampflampe wellenlängenkalibriert sowie mit einer Wolfram-Bandlampe intensitätskalibriert.

Es ist festzustellen, dass sich die mittlere Schnittfronttemperatur der Gutschnitte zwischen der Eisen-Schmelztemperatur T_s und Verdampfungstemperatur T_v befindet, d.h. es findet überwiegend Aufschmelzung und keine Verdampfung des Schnittfugenmaterials statt. Die Temperatur des Brennschnitts ist um etwa 500 K höher als die Temperatur des entsprechenden Schmelzschnitts gleicher Blechdicke. Des Weiteren fällt die mittlere Schnittfronttemperatur mit steigender Blechdicke. Vergleichbare Resultate hat Zimmermann in seiner Arbeit festgestellt [57].

Die Kenntnis, dass die Sekundäremission während des Gutschnitts durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben werden kann, ermöglicht im Weiteren die Auswahl geeigneter Detektoren. Neben der zeitlichen und örtlichen Auflösung wird ein optisches Messinstrument durch die spektrale Empfindlichkeit charakterisiert. Es ist naheliegend, dass die spektrale Empfindlichkeit des Sensors eine hohe Überein-

stimmung mit dem Wellenlängenbereich aufweisen sollte, in welchem der Prozess eine hohe Strahldichte L emittiert.

In Bild 4.6 sind die nach Glg. (2.1) berechneten spektralen Strahldichteverläufe eines Planck'schen Strahlers für die als Untergrenze gewählte Schmelztemperatur T_S (1811 K, [61]) sowie für die als Obergrenze gewählte Verdampfungstemperatur T_V (3134 K, [61]) aufgetragen. Zudem ist eine typische mittlere Prozesstemperatur von 2500 K eingezeichnet. Die Intensitätsmaxima verschieben sich gemäß dem Wien'schen Verschiebungsgesetz (Glg. (2.4)) mit zunehmender Temperatur hin zu kürzeren Wellenlängen. Die gesamte emittierte Strahlungsleistung steigt hierbei nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (Glg. (2.3)) mit der vierten Potenz der Temperatur, was durch die überproportional zunehmende Fläche unterhalb des spektralen Strahldichteverlaufs zu erkennen ist. Die Wellenlänge $\lambda_{L,max}$, bei welcher nach Glg. (2.4) temperaturabhängig die größte Strahlungsleistung emittiert wird, beträgt für die Schmelztemperatur ($T_S = 1811$ K) etwa $1,60 \mu\text{m}$, für die Verdampfungstemperatur ($T_V = 3134$ K) etwa $0,92 \mu\text{m}$.

Die Kenntnis darüber, dass der spektrale Strahldichteverlauf für prozesstypische Temperaturen zwischen Schmelz- und Verdampfungstemperatur $T_S < T < T_V$ liegt, ermöglicht im Folgenden die Auswahl passender optischer Detektoren. In Bild 4.6 sind die Quantenwirkungsgrade von zwei Photodetektoren basierend auf den Halbleitermaterialien Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs) und Silizium (Si) eingezeichnet. InGaAs besitzt einen charakteristischen Empfindlichkeitsbereich im nahen Infrarot zwischen $0,9 \mu\text{m}$ und $1,7 \mu\text{m}$. Es eignet sich somit hervorragend zur Detektion niedriger Prozesstemperaturen um den Schmelzpunkt ($\lambda_{max}(T_S) = 1,6 \mu\text{m}$). Für die Detektion von Prozessstrahlung bei höheren Temperaturen eignet sich Silizium als Halbleitermaterial, welches im Wellenlängenbereich zwischen $0,3$ und $1,1 \mu\text{m}$ sensitiv ist und welches im Vergleich zu InGaAs kostengünstiger ist und eine schnellere Auslesefrequenz bietet.

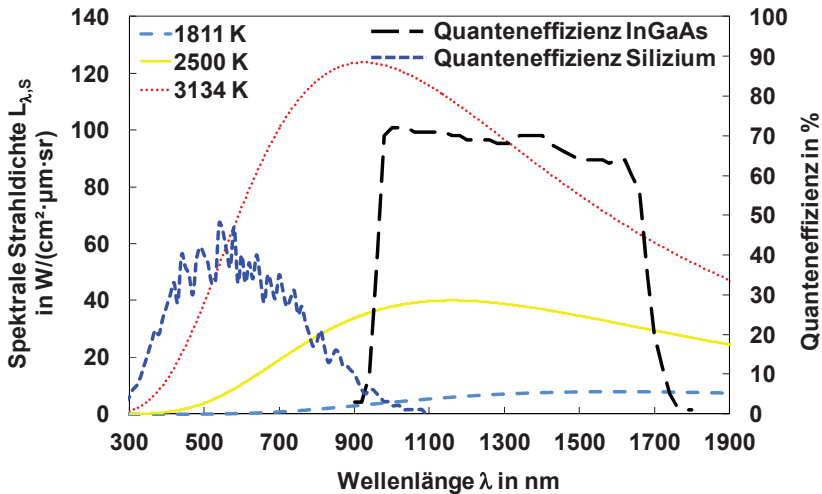


Bild 4.6: Spektrale Strahldichte $L_{\lambda,s}$ des Planck'schen Strahlers (berechnet nach Glg. (2.1) für verschiedene Temperaturen) sowie typische Quantenwirkungsgrade von Photodetektoren basierend auf Silizium (nach [62]) und InGaAs (nach [63]).

4.2 Ableitung von Prozessmerkmalen

Unter Prozessmerkmalen werden Kennwerte verstanden, welche als sensorisch erfassbare Messgrößen aus dem Prozess extrahiert werden können und welche charakteristisch für den jeweiligen Prozess- und Fehlerbildzustand sind. Die Kenngrößen dienen als Informationsträger und können mittels unterschiedlicher Messprinzipien gewonnen werden. Die Messgrößen können beispielsweise optischer, elektrischer oder strömungsmechanischer Natur sein.

Für die drei zu detektierenden Fehlschnitte (Schnittabriss im Baustahl und Edelstahl sowie Self-Burning im Baustahl) wird nachfolgend jeweils eine Beschreibung der Fehlerursache sowie des Prozessablaufs gegeben. In entsprechenden Versuchen werden anhand der phänomenologischen Beschreibung des Prozessablaufs sowie anhand der resultierenden Bauteilqualität Merkmale definiert, von welchen angenommen wird, dass diese charakteristisch für den jeweiligen Fehlerfall sowie sensorisch erfassbar sind. Die Definition dieser Prozessmerkmale stellt die Basis für die anschließend zu treffende Auswahl geeigneter Messmittel zur Fehlschnitterkennung dar.

4.2.1 Schnittabriss S235

Definition Schnittabriss S235

Ein Schnittabriss wird in dieser Arbeit definiert als eine unvollständige Ausbildung des Schnittpaltes entlang der Blechdicke. Die zu trennenden Blechteile sind im unteren Bereich des Schnittpaltes metallisch miteinander verbunden. Die metallische Verbindung besteht entweder aus Rohmaterial, welches nicht aufgeschmolzen wurde, oder aus wiedererstarrender Schlacke, welche nicht aus dem Schnittpalt ausgetrieben werden konnte und im Nachlauf die beiden Blechteile verschweißt hat.

Ursachen und Verfahrensablauf Schnittabriss S235

Die Ursachen für einen Schnittabriss können vielfältiger Natur sein. Häufig ist die Laserstrahlintensität aufgrund einer Defokussierung unzureichend oder die Vorschubgeschwindigkeit zu hoch. Dies führt zu einer Reduzierung der Streckenenergie, sodass nicht ausreichend Energie zum Aufschmelzen des kompletten Schnittpaltvolumens zur Verfügung steht.

Als weitere mögliche Fehlerquelle sei das Sauerstoff-Schneidgas genannt. Ein zu geringer Sauerstoff-Volumenstrom oder ein unzulässig stark verunreinigter Sauerstoff führen zu einer unzureichenden bzw. gestörten Eisen-Sauerstoff-Verbrennung, sodass die freiwerdende Reaktionsenthalpie nicht hinreichend als Energielieferant zum Brennschneidprozess beiträgt.

Ein Schnittabriss tritt ebenfalls häufig aufgrund einer zu starken oder schnellen Änderung der Schneidrichtung auf. Insbesondere bei dicken Blechen ist das untere Ende der Schnittfrontkante um mehrere Millimeter in den Nachlauf versetzt. Dies führt bei Eckenfahrten mit zu geringem Eckenradius dazu, dass das untere Ende der gekrümmten Schnittfront dem oberen Schnittfrontbeginn nicht mehr folgen kann, was in einem Schnittabriss resultiert.

In Bild 4.7 und Bild 4.8 ist ein typischer Ablauf eines Schnittabrisses in einem 8 mm dicken Baustahl-Blech dargestellt. Der Schnittabriss wird durch eine lineare Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit zwischen 2,8 m/min und 4,1 m/min herbeigeführt. An der Blechunterkante tritt circa ab der Hälfte der Schnittlänge ein Schlackegrat auf, welcher bei fortschreitendem Verlauf in einen Schnittabriss mündet. Bei steigender Vorschubgeschwindigkeit neigt sich die Schnittfront immer stärker, was anhand des Vergleichs der Riefenbildung in Bild 4.8 zu erkennen ist. Bei Eintritt des Schnittabris-

ses knickt die Schnittfront im unteren Blechdickendrittel nach hinten ab. Dies ist der Punkt, ab welchem die Schlacke nicht mehr hauptsächlich an der Schnittfront nach unten aus dem Schnittpalt ausgetrieben wird. Die Schlacke strömt vielmehr entgegen der Vorschubrichtung in dem nur teilweise ausgeprägten Schnittpalt nach hinten. Das bei der Reaktion mit dem Schneid-Sauerstoff entstehende Eisenoxid FeO besitzt mit $\rho_{\text{FeO}} = 5,7 \text{ kg/dm}^3$ eine um 27% geringere Dichte als das ursprüngliche Eisen Fe [64, 65]. Das entstehende Schlackevolumen erfährt somit sowohl durch die Herabsetzung der FeO -Dichte als auch durch die Massenzunahme der Oxidation eine Volumenzunahme gegenüber dem Grundwerkstoff, was dazu führt, dass die nicht nach unten austreibbare Schlacke im Nachlauf nach oben aus dem Schnittpalt heraustritt.

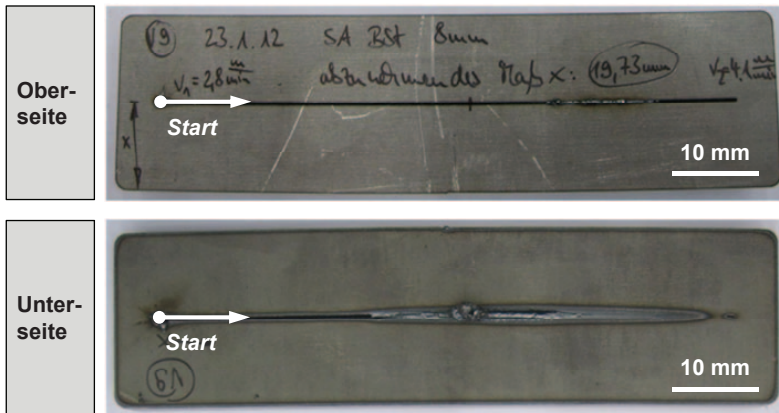


Bild 4.7: Schnittabriss in einem 8 mm dicken Baustahl-Blech. Linearschnitt von links nach rechts mit linearer Zunahme der Vorschub-Geschwindigkeit. Parameter: $P_L = 5,7 \text{ kW}$, $p_{\text{O}_2} = 0,8 \text{ bar}$, $v = 2,8 - 4,1 \text{ m/min}$, $\varnothing_{\text{Düse}} = 1,0 \text{ mm}$, $ES = 2 \text{ mm}$. Oben: Oberseite. Unten: Unterseite.

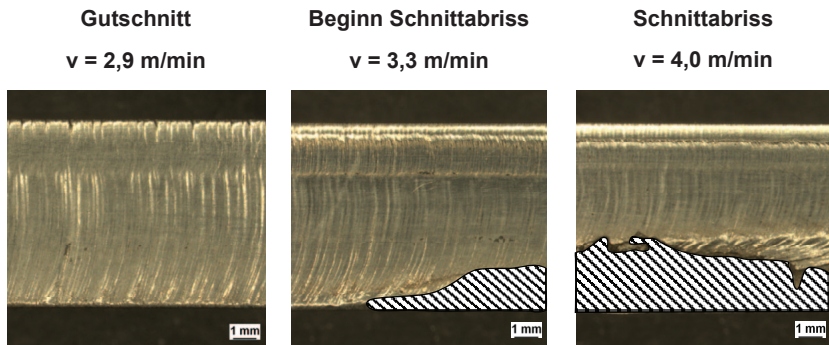


Bild 4.8: Längsschliff durch den Schnittpalt des in Bild 4.7 dargestellten 8 mm dicken Baustahl-Blechtes. Der Bereich des Schnittabrisses (metallische Verbindung zwischen rechtem und linkem Blechteil) ist schraffiert dargestellt. Links: Gutschnitt. Mitte: Beginnender Schnittabriss. Rechts: Eingetretener vollständiger Schnittabriss.

Prozessmerkmale Schnittabriss S235

Im Folgenden werden Prozessmerkmale definiert, welche charakteristisch für das Fehlerbild Schnittabriss im Baustahl S235 sind und welche demzufolge als mögliche Indikatoren zur Überwachung des Schneidprozesses genutzt werden können.

Wie oben beschrieben und anhand des Vergleichs der Riefenstruktur in Bild 4.8 ersichtlich, ist für den Fehlerfall Schnittabriss eine **Zunahme des mittleren Winkels der Schnittfrontneigung** charakteristisch. Eine Zunahme der Schnittfrontneigung geht bei konstanter Blechdicke einher mit einer **Vergrößerung des Versatzes der oberen zur unteren Schnittfrontkante**.

Im Extremfall des Schnittabrisses findet keine Laserstrahl-Transmission durch die Schnittfuge mehr statt. Dieser Strahlungsanteil verteilt sich schließlich auf die anderen beiden Komponenten „Absorption“ und „Reflexion“². Somit ist im Falle des Schnittabrisses sowohl mit einer **Erhöhung der Absorption** und somit mit einer **Zunahme der Wärmestrahlung** (Kirchoff'sches Strahlungsgesetz: Absorption = Emission) aufgrund der größeren Überlappungsfläche zwischen Laserstrahl und Schnittfront sowie aufgrund des winkelabhängigen Absorptions-/Emissionsgrades zu rechnen, als auch mit einer **Erhöhung der Laserstrahl-Rückreflexion** aufgrund des verschlossenen Schnittpaltes.

² Aufgrund der Energieerhaltung gilt: Absorptionsgrad A + Reflexionsgrad R + Transmissionsgrad T = 1

Weitere Kenngrößen, welche bei Eintritt des Schnittabrisses eine Änderung erwarten lassen, sind der Druck und Durchfluss des Sauerstoff-Schneidgases. Vergleicht man die Strömungsdynamik des aus der Schneiddüse austretenden Schneidgases eines Gutschnitts mit der eines Schnittabrisses (Bild 4.9), so stellt ein nach unten verschlossener Schnittspalt ein strömungstechnisches Hindernis dar. Die Erhöhung des Strömungswiderstands dürfte sich in einer **Erhöhung des Schneidgasdrucks** auswirken. Da der Schneidgasdruck maschinenseitig auf einen konstanten, vorgegebenen Wert geregelt wird, führt eine erneute Anpassung (Ausregelung) des Schneidgasdrucks zu einer **Änderung des Gasdurchflusses**.

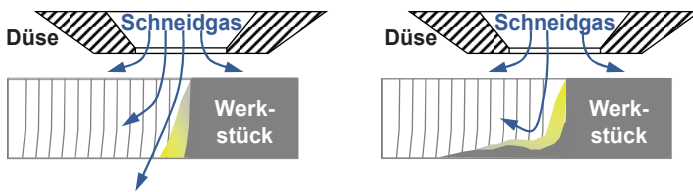


Bild 4.9: Strömungsdynamische Verhältnisse des Schneidgases bei einem Gutschnitt (links) und Schnittabriss (rechts).

Zusammenfassend gibt Tabelle 4.1 einen Überblick über die für den Fehlerfall Schnittabriss im Baustahl S235 definierten Prozessmerkmale wieder.


Fehlschnitt	Prozessmerkmal
Schnittabriss Baustahl S235 	Schnittfrontneigung: Zunahme des Versatzes der oberen zur unteren Schnittfrontkante
	Sekundärstrahlung: Erhöhung der integralen Wärmestrahlung
	Primärstrahlung: Erhöhung der Laserstrahl-Rückreflexion
	Sauerstoff-Schneidgas: Änderung des Drucks und Durchflusses aufgrund des verschlossenen Schnittspalts

Tabelle 4.1: Übersicht über die Prozessmerkmale für den Fehlerfall Schnittabriss im Baustahl S235.

4.2.2 Schnittabriss 1.4301

Definition Schnittabriss 1.4301

Analog zum Schnittabriss im Baustahl S235 wird der Schnittabriss im Edelstahl 1.4301 definiert als das unvollständige Durchtrennen des Bleches aufgrund einer nicht vollständig über die komplette Blechdicke ausgebildeten Schnittfuge. Die Blechteile sind nach wie vor durch eine metallisch feste Verbindung im unteren Bereich des Bleches miteinander verbunden. Die metallische Verbindung besteht aus nicht aufgeschmolzenem Grundmaterial.

Ursachen und Verfahrensablauf Schnittabriss 1.4301

Wie anhand des experimentellen Ergebnisses in Bild 4.10 zu erkennen ist (Linear-schnitt mit steigender Vorschubgeschwindigkeit; Parameter siehe Bildunterschrift), wird im Falle des Schnittabrisses der Schnittspalt nicht mehr vollständig ausgeprägt. Vielmehr erzeugt der Laserstrahl eine ca. 2 - 3 mm tiefe Furche, was anhand des Längsschliffs in Bild 4.11 zu erkennen ist. Der Schnittabriss geht einher mit einer äußerst hellen, bläulichen Leuchterscheinung. Das folgende Erklärungsmodell verdeutlicht, dass es sich hierbei um laserinduzierte Plasmabildung handelt: Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit neigt sich die Schnittfront stärker, dies führt aufgrund der größeren Überlappungsfläche des Laserstrahls auf der Schnittfront sowie dem winkelabhängigen Absorptionsgrad zu einer stärkeren Laserstrahlabsorption auf der selbigen. Die stärkere Absorption sowie die größere Schmelzfilmdicke bewirken einen Temperaturanstieg der Schnittfrontschmelze (Erklärungsmodell siehe Kap. 6.1), sodass der Verdampfungsanteil kontinuierlich ansteigt. Durch die in Kap. 2.4.2 beschriebenen Mechanismen der Stoßionisation werden zudem mehr und mehr freie Elektronen aus dem Metaldampf herausgelöst. Ist die kritische Startelektronendichte überschritten, wird durch den lawinenartigen Einsatz des Absorptionsmechanismus der inversen Bremsstrahlung das Plasma gezündet. Die Laserstrahlintensität des eingesetzten 6 kW CO₂-Lasers ist mit etwa 10^7 W/cm² ausreichend hoch, um ein laserinduziertes Plasma zu zünden [56, 66, 67, 68].

Das Vorhandensein eines Plasmas in der Wechselwirkungszone hat gravierenden Einfluss auf den Prozessverlauf. Durch die Wechselwirkung des elektromagnetischen Strahlungsfelds des Lasers mit freien Elektronen wird dem Laserstrahl ein Teil seiner Energie entzogen, sodass nicht mehr die volle Laserstrahlleistung zum Aufheizen und Schmelzen des Schnittfugenmaterials vorhanden ist (Plasmaabsorption). Des Weiteren erfährt der Laserstrahl bei der Propagation durch das Plasma eine Defokussierung so-

wie eine mögliche Ablenkung aufgrund der sog. Plasmalinse (Brechungsindexgradient aufgrund Temperatur- und Dichteschwankungen innerhalb des Plasmas) [1, 69]. Beide Effekte – Leistungsreduzierung aufgrund von Plasmaabsorption sowie Defokussierung – führen dazu, dass der Laserstrahl nicht mehr mit seinen Solldaten mit dem Werkstück wechselwirken kann. Dies resultiert schließlich in einem Schnittabriss, von welchem in Bild 4.11 ein Längsschliff dargestellt ist.

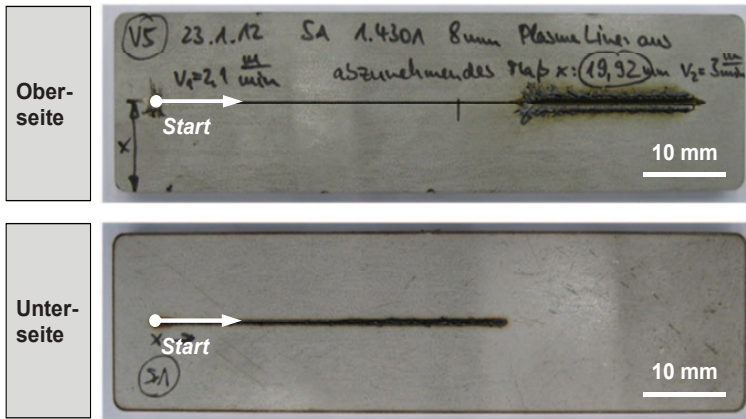


Bild 4.10: Schnittabriss in einem 8 mm dicken 1.4301 Edelstahl-Blech. Linearschnitt von links nach rechts mit linearer Zunahme der Vorschub-Geschwindigkeit. Parameter: $P_L = 6,0 \text{ kW}$, $p_{N_2} = 20 \text{ bar}$, $v = 2,1 - 3,0 \text{ m/min}$, $\varnothing_{\text{Düse}} = 2,3 \text{ mm}$, $ES = -3 \text{ mm}$. Oben: Oberseite. Unten: Unterseite.

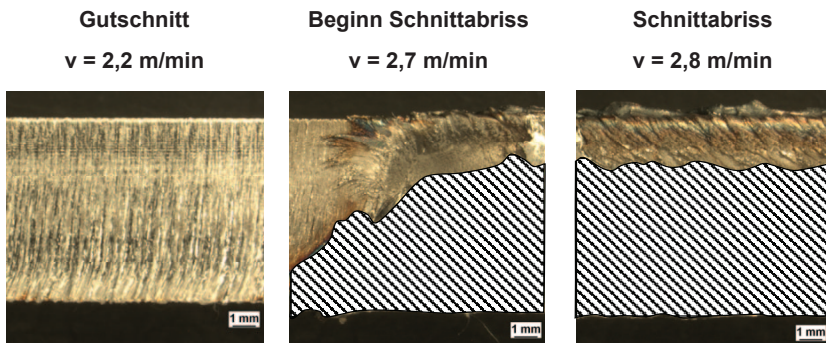


Bild 4.11: Längsschliff durch den Schnittpalt des in Bild 4.10 dargestellten 8 mm dicken 1.4301 Edelstahl-Blech. Der Bereich des Schnittabrisses (metallische Verbindung zwischen rechtem und linkem Blechteil) ist schraffiert dargestellt. Links: Gutschnitt. Mitte: Beginnender Schnittabriss. Rechts: Eingetretener vollständiger Schnittabriss.

Prozessmerkmale Schnittabriss 1.4301

Die unkontrollierte Plasmaentstehung ist beim Stickstoff-Hochdruckschneiden von Edelstahl 1.4301 grundsätzlich unerwünscht, da dies zu einem Schnittabriss führen kann. Es existieren zwar Schneidtechnologien, welche gezielt ein Plasma in der Schnittfuge zünden, um die Energieeinkopplung insbesondere beim Schneiden von dicken Blechen bzw. im Hochgeschwindigkeitsschneidbereich zu unterstützen, allerdings laufen diese Prozesse mit einer kontrollierten und prozessunterstützenden Plasmaausbildung ab (vgl. das plasmaunterstützte Schmelzschnneiden von dickwandigen 1.4301-Edelstählen [15] oder das Hochgeschwindigkeitsschneiden von dünnwandigen 1.4301-Edelstählen [3, 4]).

Es ist demzufolge ein Ziel dieser Arbeit, die beim konventionellen stickstoffunterstützten Schmelzschneidprozess unerwünschte **Plasmaentstehung** in der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Werkstück zu detektieren.

Aufgrund der geometrischen Veränderungen in der Prozesszone ist zudem mit einer **Änderung der Laserstrahl-Rückreflexion** zu rechnen.

Mit einer im Schneidkopf messbaren Änderung des Schneidgasdrucks bzw. -durchflusses, welche sich aufgrund des strömungstechnischen Hindernisses des verschlossenen Schnittspaltes einstellen könnte, ist hingegen nicht zu rechnen. Typische Schneidgasdrücke beim Stickstoff-Schmelzschnneiden liegen im Hochdruckbereich zwischen 12 und 22 bar und somit weit oberhalb des kritischen Schneidgasdrucks von $p_{krit} = 1,89$ bar, ab welchem die Gasströmungsgeschwindigkeit in Überschallgeschwindigkeit übergeht. Die entstehende Überschallgasströmung sowie die im Gasstrahl ausgeprägten Mach'schen Scheiben lassen keine stromaufwärtige Fortpflanzung des Störungsimpulses erwarten.

In Tabelle 4.2 sind die Prozessmerkmale für den Fehlerfall Schnittabriss im Edelstahl 1.4301 zusammenfassend dargestellt. Diese Merkmale dienen im Folgenden als mögliche Indikatoren zur Überwachung des Schneidprozesses.

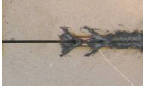
Fehlschnitt	Prozessmerkmal
Schnittabriss Edelstahl 1.4301 	Sekundärstrahlung: Plasmabildung
	Primärstrahlung: Änderung der Laserstrahl-Rückreflexion aufgrund geometrischer Veränderungen der Prozesszone

Tabelle 4.2: Übersicht über die Prozessmerkmale für den Fehlerfall Schnittabriss im Edelstahl 1.4301.

4.2.3 Self-Burning S235

Definition Self-Burning S235

Unter Self-Burning wird – wie der Name schon nahelegt – das selbstständige und unkontrollierte Verbrennen des Baustahls unter Sauerstoffatmosphäre verstanden. Die resultierende Schnittfugenbreite ist in diesem Fall um Faktoren größer als im Gutschnittfall. Das zusätzlich aufgeschmolzene Materialvolumen kann häufig nicht mehr vollständig aus dem Schnittspalt nach unten ausgetrieben werden und erstarrt am unteren Ende des Bleches. Dies sorgt für eine feste, metallische Verbindung, sodass das Bauteil – wenn überhaupt – nur unter großem Kraftaufwand vom Restgitter heraus trennbar ist. Zudem verliert das Bauteil durch die vielfache Zunahme der Schnittspaltbreite seine Maßhaltigkeit.

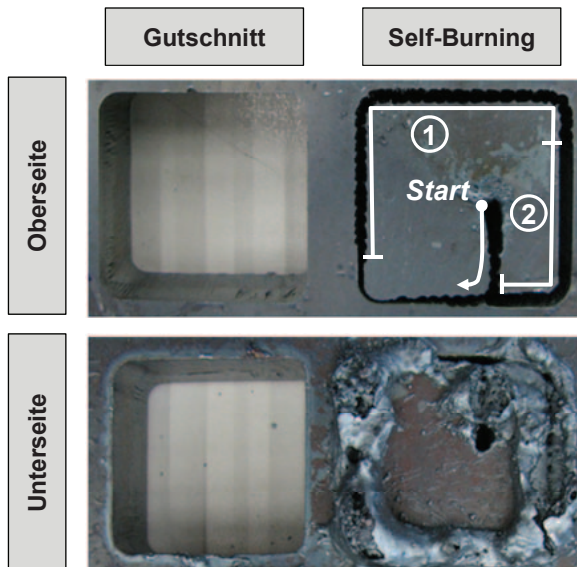


Bild 4.12: Gutschnitt (links) und Self-Burning (rechts), Baustahl, $d = 25$ mm. Parameter: $P_L = 5,6$ kW, $p_{O_2} = 0,6$ bar, $v = 0,9$ m/min, $\varnothing_{Düse} = 2,3$ mm, $ES = 5$ mm.
 ①: Zwischenstadium zwischen laserstrahl- und gasstrahlgeföhrtem Prozess.
 ②: Gasstrahlgeföhrter Self-Burning-Prozess.

Ursachen und Verfahrensablauf Self-Burning S235

Die Ursache für Self-Burning liegt häufig in einer zu großen Erwärmung des Gebietes um die Wechselwirkungszone herum, sodass das Bauteil unter der Zuföhrung von Sauerstoff lokal selbstständig verbrennt. Voraussetzung hierfür ist, dass der Werkstoff eine Zündtemperatur besitzt, welche niedriger als die eigentliche Schmelztemperatur des Grundwerkstoffs ist. Die Zündtemperatur ist definiert als diejenige Temperatur, ab welcher sich ein Stoff ausschließlich aufgrund seiner Temperatur in Gegenwart von Sauerstoff und ohne eine externe Zündquelle selbst entzünden kann. Diese liegt nach Teske [70] für Eisen mit einer Reinheit von 99,5% bei 1155 °C, für einen Stahl mit 0,9% Kohlenstoffgehalt bei 1220 °C und somit ca. 300 K niedriger als die eigentliche Schmelztemperatur eines typischen Baustahls.

Self-Burning tritt beim Laserstrahlbrennschneiden häufig dann auf, wenn die Konturbearbeitung in Bereichen auf der Blechtafel erfolgt, welche bereits eine hohe Blechtemperatur besitzen. Dies geschieht beispielsweise dann, wenn die zu fertigenden Bauteile auf einer Blechtafel zu eng geschachtelt sind, also kein ausreichender Ab-

stand zwischen den einzelnen Bauteilen oder innerhalb der Kontur berücksichtigt wird. Bei dem Versuch, welcher in Bild 4.12 zu sehen ist, erfolgte der Gutschnitt in eine 25 mm dicke Baustahl-Platte, welche zunächst Raumtemperatur besaß. Bei dem zweiten (rechten) Quadrat, welches in zu geringem Abstand zum ersten (linken) Quadrat geschnitten wurde, tritt schließlich aufgrund der zu hohen Blechtemperatur Self-Burning auf. Im Konturabschnitt ① schlägt der Prozess zwischen laserstrahl- und gasstrahlgeführtem Prozess zyklisch hin und her, während im Konturabschnitt ② der reine gasstrahlgeführte Self-Burning-Fehlerfall vorliegt. Beide Quadrate wurden mit identischen Verfahrensparametern laserstrahlgeschnitten – an dem höchst unterschiedlichen Prozessergebnis des ersten und zweiten Quadrates lässt sich erkennen, wie temperatursensibel der Laserbrennschneidprozess insbesondere in dicken Baustahl-Blechen ist. Für eine tiefergehende Fehlerbeschreibung sei auf das Erklärungsmodell zur Riefenentstehung beim Brennschneiden dickwandiger Baustahl-Bleche auf Seite 123 verwiesen.

Versuche von Scott [71], welcher die Blechtemperatur unmittelbar im Vorlauf der Schnittfuge während des Laserstrahl-Brennschneidprozesses mittels eines Infrarot-Thermometers gemessen hat, zeigen, dass bereits bei einer vorlaufenden Blechtemperatur von ca. 200 °C (12 mm Blechdicke) bzw. 100 °C (25 mm Blechdicke) Self-Burning eintreten kann.

Darüber hinaus kann Self-Burning bei zu geringer Vorschubgeschwindigkeit entstehen. Um Self-Burning zu vermeiden, sollte laut Arata [72] die Vorschubgeschwindigkeit höher als die Geschwindigkeit der Reaktionsfront sein.

Prozessmerkmale Self-Burning S235

Bei einem qualitativ hochwertigen Laserstrahl-Brennschnitt liegt die Schnittspaltbreite für eine 6 kW Laserflachbettanlage blechdickenabhängig typischerweise zwischen 0,35 und 0,55 mm. Wie anhand des rechten Ausschnitts in Bild 4.12 gut zu erkennen ist, vergrößert sich die **Schnittspaltbreite** im Falle des Self-Burnings ② auf mehrere Millimeter. Zudem ist in dem pulsierenden Zwischenstadium zwischen laserstrahl- und gasstrahlgeführtem Prozess ① (vgl. vorherigen Abschnitt sowie Erklärungsmodell auf S. 123) eine deutliche **Zunahme der Riefenbildung** erkennbar, sodass die **Parallelität** der linken und rechten Schnittspaltflanke zueinander nicht mehr gegeben ist. Da das Self-Burning nicht mehr vom Laserstrahl sondern vielmehr vom Sauerstoff-Gasstrahl aufrecht erhalten wird, wird erwartet, dass die **Position der Schnittfront** in Vorschubrichtung nach vorne wandert, da der aus der Schneiddüse strömende Gas-

strahl eine geometrisch größere Ausdehnung auf der Blechoberseite aufweist als der fokussierte Laserstrahl.

Beim Auftreten von Self-Burning ist mit einer **Zunahme der integralen Helligkeit** der emittierten Wärmestrahlung zu rechnen, da die strahlungsemittierende Fläche der Schmelze um Faktoren größer ist als im Gutschnittfall. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass die **zeitliche Veränderung der integralen Helligkeit** stark oszilliert, da der Verbrennungsprozess – insbesondere im Zwischenstadium (vgl. Bild 4.12 ①) – aufgrund der zyklischen Verbrennungen keinen homogen ablaufenden Prozess darstellt.

Aufgrund der geometrischen Veränderungen in der Prozesszone ist ebenfalls mit einer **Variation der Laserstrahl-Rückreflexion** zu rechnen.

Diese Merkmale, welche allesamt als mögliche Fehlschnitt-Indikatoren dienen können, sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.


Fehlschnitt	Prozessmerkmal
Self-Burning Baustahl S235 	Geometrische Schnittspaltausprägung: Änderung von Schnittspaltbreite, -parallelität, Riefenbildung, Position der oberen Schnittfrontkante relativ zur Laserstrahlachse
	Sekundärstrahlung: Niveau und zeitliche Veränderung der integralen Wärmestrahlung
	Primärstrahlung: Änderung der Laserstrahl-Rückreflexion aufgrund geometrischer Veränderungen der Prozesszone

Tabelle 4.3: Übersicht über die Prozessmerkmale für den Fehlerfall Self-Burning im Baustahl S235.

4.3 Spezifizierung der Messmittel

In der folgenden Tabelle 4.4 sind die definierten Prozessmerkmale der jeweiligen Fehlschnittarten zusammengefasst. Aus den Prozessmerkmalen werden schließlich die notwendigen Messmittel abgeleitet, mit welchen die Merkmale detektiert werden können.


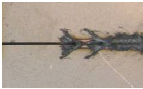

Fehlschnitt	Prozessmerkmal	Messmittel	Spezifikation
Schnittabriss Baustahl S235 	Schnittfrontneigung: Versatz der oberen zur unteren Schnittfrontkante	Kamera	<ul style="list-style-type: none"> ▪ G: 200 x 200 Pixel ▪ S: NIR ▪ Z: 100 - 1000 Hz
	Sekundärstrahlung: Erhöhung der integralen Wärmestrahlung	Photodiode	<ul style="list-style-type: none"> ▪ G: integral ▪ S: NIR ▪ Z: >10 kHz
	Primärstrahlung: Erhöhung Laserstrahl-Rückreflexion	Leistungsmesskopf	<ul style="list-style-type: none"> ▪ G: integral ▪ S: 10,6 µm ▪ Z: >10 kHz
	Sauerstoff-Schneidgas: Änderung Druck und Durchfluss	Druck-, Durchflussmessgerät	<p>p: 0...1 bar</p> <p>\dot{V}: 0...10 m³n/h</p>
Schnittabriss Edelstahl 1.4301 	Sekundärstrahlung: Plasmabildung	Kamera	<ul style="list-style-type: none"> ▪ G: 200 x 200 Pixel ▪ S: VIS/NIR ▪ Z: 100 - 1000 Hz
		Widerstandsmessgerät	
	Primärstrahlung: Änderung Laserstrahl-Rückreflexion	Leistungsmesskopf	<ul style="list-style-type: none"> ▪ G: integral ▪ S: 10,6 µm ▪ Z: >10 kHz
Self-Burning Baustahl S235 	Geometrische Schnittspalt- ausprägung: Änderung von Schnittspaltbreite, -parallelität, Riefenbildung, Position der oberen Schnittfrontkante relativ zur Laserstralachse	Kamera	<p>Kamera:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ G: 200 x 200 Pixel ▪ S: VIS/NIR ▪ Z: 100 - 1000 Hz
	Sekundärstrahlung: Niveau und zeitl. Veränderung der integralen Wärmestrahlung	Photodiode	<ul style="list-style-type: none"> ▪ G: integral ▪ S: NIR ▪ Z: >10 kHz
	Primärstrahlung: Änderung Laserstrahl-Rückreflexion	Leistungsmesskopf	<ul style="list-style-type: none"> ▪ G: integral ▪ S: 10,6 µm ▪ Z: >10 kHz

Tabelle 4.4: Übersicht der Prozessmerkmale und der Messmittel sowie deren Spezifikation.
G: Geometr. Aufl., S: Spekt. Messbereich, Z: Zeitl. Auflösung/ Messfrequenz.

Dem Einsatz einer ortsauflösenden Kamera wird das größte Potenzial hinsichtlich der Fehlererkennung zugesprochen, da viele Fehlerbilder mit einer Änderung der geometrischen Schnittpaltausprägung einhergehen. Der Vorteil der Ortsauflösung ist jedoch verbunden mit dem Nachteil der Reduzierung der zeitlichen Auflösung. Für die zeitlich hochaufgelöste Detektion der elektromagnetischen Sekundärstrahlung wird der Einsatz von geometrisch integral messenden Photodioden bevorzugt, die eine hohe Messfrequenz von mehreren 10 kHz aufweisen. Zur Erfassung von rückreflektierter CO₂-Laserstrahlung der Wellenlänge 10,6 µm eignet sich ein Laser-Leistungsmesskopf, welcher ebenfalls eine hohe Messfrequenz von mehreren 10 kHz bietet. Aufgrund der Tatsache, dass ein Plasma ein elektrisch leitfähiges Gas darstellt, kommt für seine Detektion zwischen der Schneiddüse und dem Werkstück ein Widerstandsmessgerät zum Einsatz, welches die durch das Plasma hervorgerufene Verringerung des elektrischen Widerstands zwischen Düse und Blech misst. Die strömungsmechanischen Größen Druck und Durchfluss des Laserschneidgases werden mittels Druck- und Durchflussmessgeräte gemessen, welche den Schneidgasdruck und -durchfluss zwischen dem Gasdruckregelventil und Laserschneidkopf messen.

In Tabelle 4.5 findet sich eine qualitative Übersicht der in dieser Arbeit eingesetzten Messmittel, differenziert hinsichtlich der physikalischen Messgröße (optisch, elektrisch, strömungsmechanisch) sowie der örtlichen und zeitlichen Auflösung.

		Optisch				Elektr.	Strömungsmech.	
Orts-	Zeitlich-	VIS	NIR-A	NIR-B	10,6 µm	Widerstand	Druck	Durchfl.
Integriert	Niedrig-aufgelöst					Widerstands-messgerät	Druck-messgerät	Durchfluss-messgerät
	Hoch-aufgelöst		Photo-diode		Laser-Leistungs-messkopf			
Aufgelöst	Niedrig-aufgelöst			NIR-B-Kamera (InGaAs)				
	Hoch-aufgelöst	VIS-Kamera (Si)	NIR-A-Kamera (Si)					

Tabelle 4.5: Übersicht über die in dieser Arbeit eingesetzten Messmittel.

5 Versuchstechnik

In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit eingesetzten Versuchsträgermaschinen (Kap. 5.1), die unterschiedlichen Messmittel (Kap. 5.2) sowie die untersuchten Werkstoffe (Kap. 5.3) kurz vorgestellt. Bei den Messmitteln wird insbesondere der Leistungsmesskopf näher qualifiziert, da es sich hierbei um einen neuartigen Sensor handelt, von welchem keine Erfahrung hinsichtlich der Tauglichkeit zur koaxialen Prozessbeobachtung beim CO₂-Laserschneidprozess vorliegt. Abgeschlossen wird das Kapitel durch die Vorstellung der dreistufigen Auswertungssystematik (Kap. 5.5).

5.1 Systemtechnik

Als Versuchsträger stehen zwei CO₂-Laserflachbettmaschinen des Herstellers TRUMPF mit jeweils unterschiedlicher maximaler Laserstrahlleistung sowie unterschiedlichen Konzepten hinsichtlich der Art und Weise, wie das Prozesslicht aus dem Strahlengang des Laserstrahls ausgekoppelt wird, zur Verfügung. Die erste in Kap. 5.1.1 vorgestellte Anlage verwendet einen dichroitischen Strahlteilerspiegel anstelle des letzten Umlenkspiegels, um eine koaxiale Prozessbeobachtung zu ermöglichen. In der zweiten in Kap. 5.1.2 vorgestellten Laserschneidmaschine kommt hingegen ein Scraper-Spiegel zum Einsatz.

5.1.1 Versuchsaufbau mit dichroitischem Spiegel

Die in diesem Abschnitt beschriebene Versuchsmaschine basiert auf dem Auskoppelkonzept des dichroitischen Strahlteiler-Spiegels. Die Anlage besitzt einen längsgeströmten CO₂-Laserresonator TruFlow 3200 mit einer maximalen Laserleistung von 3,2 kW. Der Laserstrahl wird vom Resonator über mehrere Spiegel zur ZnSe-Fokussierlinse des Laserschneidkopfs gelenkt. Die Relativbewegung zwischen senkrechtem Laserstrahl und Werkstück erfolgt durch die horizontale X-Y-Verfärbewegung der Achsen inkl. dem darauf fixierten Werkstück, sodass der Schneidprozess ortsfest ist. Für die Sicherstellung eines konstanten Abstands zwischen Schneiddüse und Blech sorgt eine kapazitive Abstandsregelung des Laserschneidkopfes in Z-Richtung.

An dieser Versuchsmaschine werden zeitsynchron ortsauflösende Aufnahmen des Laserschneidprozesses in unterschiedlichen spektralen Wellenlängenbereichen aufgezeichnet. Hierfür werden zwei Kameras mit differierender spektraler Empfindlichkeit koaxial zum Laserstrahlengang in die Anlage integriert. Die erste Kamera basiert auf InGaAs-Technologie und ist demzufolge im nahinfraroten Spektralbereich (NIR-B) sensitiv. Die zweite Kamera besitzt einen Detektor-Chip aus Silizium und ist somit im visuellen Wellenlängenbereich (VIS) sensitiv. Zusätzlich ist für die VIS-Kamera über einen 50%-Neutralstrahlteilerspiegel eine koaxiale Auflichtbeleuchtung mittels einer Laserdiode vorgesehen, welche eine optische Leistung von ca. 100 mW bei der Zentralwellenlänge von 658 nm besitzt [73]. Durch die Auflichtbeleuchtung sollen geometrische Merkmale der Prozesszone erkennbar gemacht werden.

In Bild 5.1 ist der Aufbau des in dieser Anlage integrierten Messsystems skizziert. Die Prozessstrahlung wird koaxial mittels eines dichroitischen Spiegels ausgekoppelt, welcher anstelle des letzten Umlenkspiegels in den CO₂-Laserstrahlengang eingebaut ist. Dieser Strahlteilerspiegel, dessen Substrat aus ZnSe besteht, ist hochreflektiv beschichtet für die Laserwellenlänge $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ bei gleichzeitig guter Transmission für die Beobachtungswellenlängen von 658 nm und 1600 nm (vgl. Transmissionsspektrum in Bild 5.2). Ein zweiter Strahlteilerspiegel teilt die Prozessstrahlung erneut spektral für die NIR-B-Kamera und VIS-Kamera auf. Dieser Spiegel ist transmissiv für den Wellenlängenbereich um $\lambda = 1600 \text{ nm}$ und reflexiv für den Wellenlängenbereich um $\lambda = 658 \text{ nm}$. Über Fokussierlinsen sowie Bandpassfilter wird die Prozessstrahlung schließlich auf den jeweiligen Detektorchip abgebildet. Die Bandpassfilter haben die Aufgabe, durch die Abbildung eines nur engen Spektralbereiches chromatische Aberrationen zu minimieren.

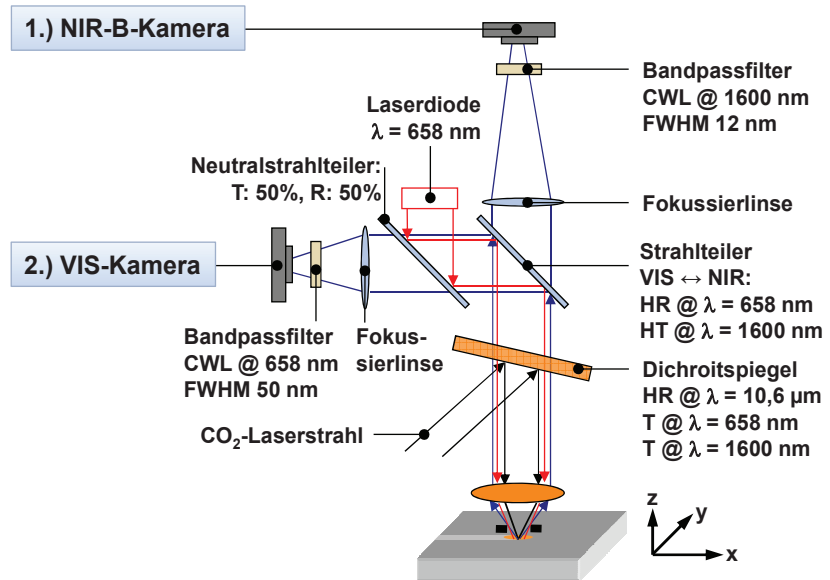


Bild 5.1: Prinzipische Versuchsaufbau mit dichroitischem Spiegel.

Die Transmissionsspektren des dichroitischen Spiegels (Bild 5.2) sowie der ZnSe-Laserschneidlinse (Bild 5.3) weisen über die Wellenlänge einen stark modulierten Transmissionsverlauf auf. Es ist jedoch zu erkennen, dass eine ausreichend hohe Transmission in den für die Prozessbeobachtung relevanten Bereichen im visuellen und nahinfraroten Wellenlängenspektrum stattfindet.

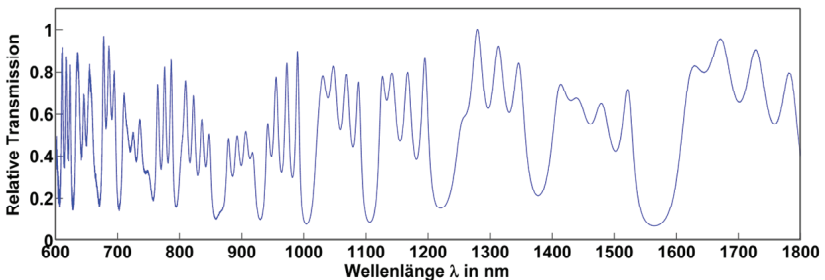


Bild 5.2: Relatives Transmissionsspektrum des dichroitischen Spiegels.

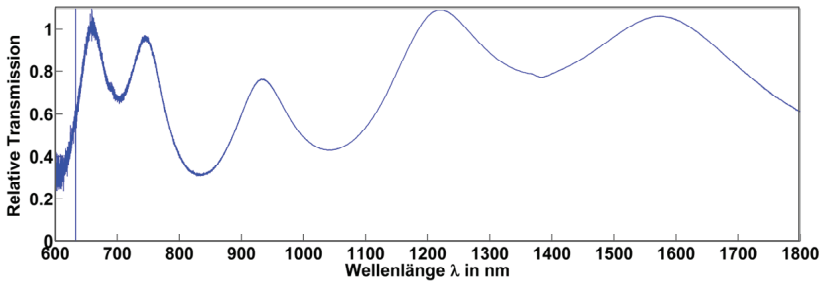


Bild 5.3: Relatives Transmissionsspektrum der ZnSe-Laserschneidlinse.

Als nachteilig bei diesem Beobachtungsprinzip ist der Einfluss von thermischen Effekten auf die Abbildungsqualität zu nennen. Die Beobachtung erfolgt flächig durch die ZnSe-Linse sowie durch den dichroitischen Spiegel. Beide Elemente absorbieren zwar einen geringen, aber nicht zu vernachlässigenden Anteil an CO_2 -Laserstrahlung. Die thermisch induzierte Brechzahländerung der ZnSe-Linse und des dichroitischen Spiegels – insbesondere der radiale Brechzahlgradient – sorgt für Abbildungsfehler der Sekundärstrahlung auf der Kameraaufnahme. Vor diesem Hintergrund musste die Laserleistung an diesem Versuchsstand auf max. 2 kW begrenzt werden. Für Laserschneidversuche mit höherer Laserleistung wurde ein zweiter Versuchsaufbau basierend auf dem Auskoppelprinzip des Scraper-Spiegels entwickelt. Dieser Versuchsstand wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

5.1.2 Versuchsaufbau mit Scraper-Spiegel

Bei dieser Laserschneidmaschine des Herstellers TRUMPF handelt es sich um eine serienmäßige CO_2 -Laserflachbettanlage. Als Strahlquelle dient ein CO_2 -Laser mit einer maximalen Ausgangsleistung von 6 kW. Das Bewegungskonzept beruht auf dem System der „fliegenden Optik“, d.h. das zu schneidende Blech ist horizontal auf den Auflagestegen positioniert, während der Laserschneidkopf an kartesisch orientierten Achsen die Relativbewegung ausführt.

An dieser Versuchsmaschine wurden weitere in Kap. 4.3 definierte Messmittel eingesetzt (siehe Bild 5.4): Ein Widerstandsmessgerät misst den elektrischen Widerstand zwischen Schneiddüse und Blech. In der Zuleitung des Schneidgases zum Laserschneidkopf erfasst ein Messgerät den Durchfluss des Schneidgases, während ein Druckmessgerät im Schneidkopf den Druck des Schneidgases detektiert. Neben diesen elektrischen und strömungsmechanischen Messgrößen ist weiterhin auch die Erfassung

von elektromagnetischer Primär- und Sekundärstrahlung von Interesse. Die Detektion dieser optischen Größen erfolgt koaxial mittels Scraper-Spiegel. Der Vorteil dieser Beobachtungsmethode gegenüber der Verwendung eines dichroitischen Spiegels liegt darin, dass der CO_2 -Laserleistungsstrahl den Spiegel nicht erwärmt und somit keine Abbildungsfehler durch das auskoppelnde Element entstehen. Dadurch kann die Schneidmaschine mit der vollen Nennleistung von $P_L = 6 \text{ kW}$ betrieben werden. Als Nachteil sei jedoch erwähnt, dass prinzipbedingt nur die Randstrahlen ausgekoppelt werden, was zu einem ortsabhängigen Helligkeitsverlust führt. Als Detektoren kommen eine Silizium-Photodiode, ein Leistungsmesskopf zur Erfassung rückreflektierter CO_2 -Laserstrahlung sowie eine NIR-A-Kamera im nahinfraroten Spektralbereich bei $\lambda = 920 \text{ nm}$ zum Einsatz.

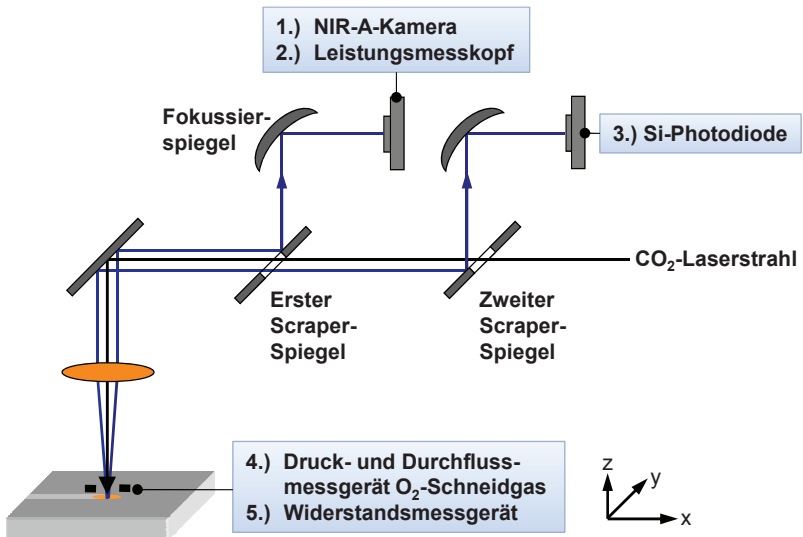


Bild 5.4: Prinzipskizze Versuchsaufbau mittels Scraper-Spiegel.

5.2 Messmittel

In Kap. 4.3 wurden die notwendigen Messmittel anhand der zu detektierenden Prozessmerkmale abgeleitet. Im Folgenden werden diese Sensorik-Komponenten näher vorgestellt.

5.2.1 Kamerabasierte Sensorik

Aufgabe der eingesetzten Kameras ist es, die durch die Prozessmerkmale (Kap. 4.2) formulierten geometrischen Größen aus der Laserstrahl-Werkstück-Wechselwirkungszone zu detektieren. Zu den Merkmalen zählen u.a. die Positions- und Abstandserkennung der Schnittpaltkanten absolut und relativ, die Intensität(-sverteilung) der Wärmestrahlung auf der Schnittfront sowie die Detektion von Plasmaleuchten. Einen Überblick über die technischen Daten der verwendeten Kameras gibt Tabelle 5.1. Die Kameras unterscheiden sich hauptsächlich im spektralen Empfindlichkeitsbereich sowie in der geometrischen und zeitlichen Auflösung (Bildwiederholrate).

	VIS-Kamera	NIR-A-Kamera	NIR-B-Kamera
			
Hersteller	Photonfocus	Baumer	VDS Vosskühler
Modell	MV-D1024E-160-CL-12	HXC20	NIR-300FCL
Sensor	Silizium	Silizium	InGaAs
Spektraler Empfindlichkeitsbereich	400 - 900 nm	400 - 1000 nm	0,9 - 1,7 μm
Bandpassfilter	CWL: 658 nm FWHM: 50 nm	CWL 920 nm FWHM 10 nm	CWL 1600 nm FWHM 12 nm
Pixelgröße	10,6 x 10,6 μm^2	5,5 x 5,5 μm^2	30 x 30 μm^2
Chipgröße	10,9 x 10,9 mm ²	11,3 x 6,0 mm ²	9,6 x 7,68 mm ²
Graustufenauflösung	8 Bit	8 Bit	12 Bit
Zeitliche und geometrische Auflösung	149 fps @ 1024 x 1024 Pixel 1200 fps @ 292 x 292 Pixel	340 fps @ 2048 x 1088 Pixel 1160 fps @ 256 x 256 Pixel	100 fps @ 320 x 256 Pixel 186 fps @ 160 x 256 Pixel

Tabelle 5.1: Technische Daten der eingesetzten Kameras und Bandpassfilter. Daten aus [62, 63, 74, 75].

Die Bezeichnung der Kameras mit dem Vorsatz VIS, NIR-A und NIR-B bezieht sich auf den Wellenlängenbereich, in welchem die jeweilige Kamera aufgrund des vorgeschalteten Bandpassfilters einen spektral eingegrenzten Bereich der Prozessstrahlung detektiert.

Visuelle Kamera (VIS: $\lambda = 658 \text{ nm}$)

Die VIS-Kamera des Herstellers Photonfocus besitzt aufgrund des Silizium-Chips eine spektrale Empfindlichkeit im Bereich von 400 - 900 nm, welche allerdings durch einen vorgeschalteten Bandpassfilter des Herstellers Thorlabs mit einer zentralen Wellenlänge von 658 nm und einer Halbwertsbreite von 50 nm spektral eingeschränkt wird. Die Peak-Wellenlänge des Bandpassfilters ist auf die Wellenlänge der externen Beleuchtungsquelle abgestimmt. Als Beleuchtungsmodul kommt eine ebenfalls koaxial angeordnete Laserdiode des Herstellers Hitachi zum Einsatz, welche monochromatisches Laserlicht im Wellenlängenbereich um $\lambda = 658 \text{ nm}$ emittiert. Die Kamera wird an der Versuchsmaschine mit dem dichroitischen Spiegel eingesetzt (vgl. Kap. 5.1.1). Eine Reduzierung der geometrischen Auflösung zugunsten einer Erhöhung der zeitlichen Auflösung ist möglich (Region of Interest, ROI). Die Kamera dient primär der Erfassung geometrischer Strukturen, indem das von der Werkstückoberseite reflektierte Licht der Fremdbeleuchtung erfasst wird.

Nahinfrarot-Kamera (NIR-A: $\lambda = 920 \text{ nm}$)

Die NIR-A-Kamera des Herstellers Baumer basiert ebenfalls auf Silizium als Halbleitmaterial, allerdings wird diese Kamera mit einem vorgeschalteten Bandpassfilter (Hersteller: Thorlabs; Zentralwellenlänge: 920 nm; Halbwertsbreite: 10 nm) im nahinfraroten Spektralbereich betrieben. Die Wahl der Beobachtungswellenlänge von $\lambda = 920 \text{ nm}$ ist ein Kompromiss einerseits zwischen der Intention, möglichst im Wellenlängenbereich zwischen 920 nm und $1,6 \mu\text{m}$ zu beobachten (nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz werden in jenem Spektralbereich die stärksten Emissionen der zwischen Schmelz- und Verdampfungstemperatur befindlichen Schmelze erwartet), und andererseits zwischen dem Quantenwirkungsgrad, welcher zu langen Wellenlängen hin abfällt. Die Kamera ist in die in Kap. 5.1.2 vorgestellte Anlage mittels Scraper-Spiegel integriert. Auch hier ist eine Reduzierung der auszulesenden Pixelanzahl (ROI) zugunsten einer höheren zeitlichen Auflösung möglich.

Nahinfrarot-Kamera (NIR-B: $\lambda = 1600 \text{ nm}$)

Die NIR-B-Kamera des Herstellers Vosskühler arbeitet auf Basis des Halbleitermaterials Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs) und ist demzufolge im nahinfraroten Spektralbereich zwischen $0,9$ und $1,7 \mu\text{m}$ sensitiv. Der Transmissionsbereich des Bandpassfilters (Hersteller: Thorlabs; Zentralwellenlänge: 1600 nm ; Halbwertsbreite: 12 nm) ist danach ausgelegt, die Wärmestrahlung der Schmelze zu detektieren. Nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz (Glg. (2.4)) besitzt die spektrale Strahldichte von schmelzflüssigem Eisen ($T_S = 1811 \text{ K}$) genau bei $\lambda = 1,60 \mu\text{m}$ das Maximum an emittierender Strahlung. Als Nachteil dieser InGaAs-Kameratechnologie ist die relativ geringe zeitliche Auflösung von max. 186 fps zu betrachten. Die NIR-B-Kamera wird zeitlich synchron mit der VIS-Kamera an der in Kap. 5.1.1 beschriebenen Anlage mittels des dichroitischen Spiegels betrieben. Dadurch ist es möglich, die Prozesszone zeitgleich in zwei unterschiedlichen Spektralbereichen ($\lambda = 658 \text{ nm}$ und $\lambda = 1600 \text{ nm}$) zu erfassen, wobei die Aufnahmen der VIS-Kamera mit einer externen Auflichtbeleuchtung durchgeführt werden. Die Graustufenauflösung der NIR-B-Kamera beträgt 12 Bit , sodass bei der Bilder-Darstellung auf herkömmlichen 8 Bit -Monitoren ein Kontrastverlust in Kauf genommen werden müsste. Von daher werden die Graustufen-Aufnahmen dieser Kamera in eine Falschfarbendarstellung transformiert, um den aufgenommenen Dynamikumfang zu visualisieren. Als Übertragungsfunktion kommt die colormap „jet“ von MATLAB zur Anwendung.

Merkmale in den Kamerabildern

In Bild 5.5 ist eine beispielhafte Aufnahme der VIS- und NIR-B-Kamera eines Laserbrennschnitts in einem 10 mm dicken Baustahlblech zu sehen. Die Auflichtbeleuchtung der VIS-Kamera ermöglicht insbesondere die Erkennung von geometrischen Begrenzungen, wie bspw. des Düsenrands, der Schnittkanten und der horizontalen Blechkanten (Letztere sind nicht dargestellt). Des Weiteren sind Strukturen auf der Oberfläche (Wärmeeinflusszone) auszumachen. Die NIR-B-Kamera detektiert hingegen ausschließlich die thermische Strahlung bei $\lambda = 1600 \text{ nm}$. Hierbei ist insbesondere die Verteilung der Wärmestrahlung der Schnittfront von Interesse, aber auch geometrische Begrenzungen wie die Riefen der Schnittkanten können gut erkannt werden. Die in Tabelle 4.4 aufgeführten Prozessmerkmale können mit dieser Sensorkombination gut detektiert werden.

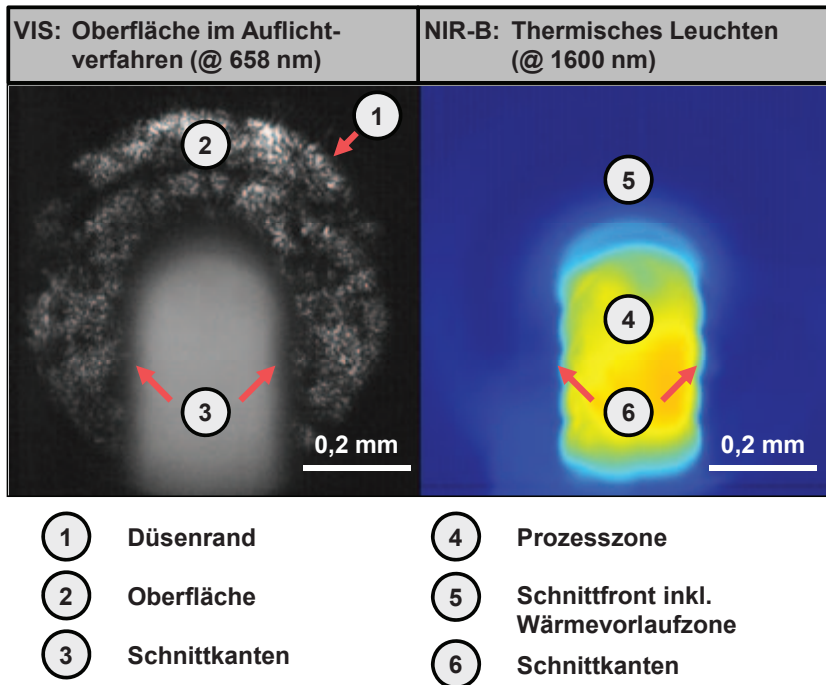


Bild 5.5: Merkmale in den Kamerabildern. Links: Aufnahme mit der VIS-Kamera und zusätzlicher Auflichtbeleuchtung. Rechts: Aufnahme mit der NIR-B-Kamera. Baustahl S235, Blechdicke 10 mm; Parameter: $P_L = 1,2$ kW, $p_{O_2} = 0,6$ bar, $v = 0,7$ m/min, $\varnothing_{Düse} = 1,4$ mm, $ES = 2$ mm.

5.2.2 Photodiode

Die eingesetzte Photodiode detektiert die gemittelten Intensitätsveränderungen der Sekundärstrahlung mit einer höheren zeitlichen Dynamik als die ortsauflösenden Kameras. Die Prozesslichtauskopplung erfolgt ähnlich wie bei der Kamera-Diagnostik mittels eines Scraper-Spiegels koaxial zum CO_2 -Laserstrahl. Das Halbleitermaterial der Photodiode besteht aus Silizium, der spektrale Empfindlichkeitsbereich wird zusätzlich durch einen Filter auf den nahinfraroten Wellenlängenbereich von $\lambda = 800 - 1100$ nm mit einem Maximum bei $\lambda = 960$ nm eingegrenzt (vgl. Bild 5.6). Die Auslesefrequenz beträgt ca. 8 kHz.

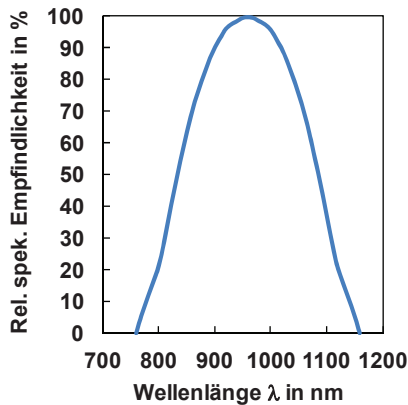


Bild 5.6: Relative spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Silizium-Photodiode inklusive Filter.

5.2.3 Laser-Leistungsmesskopf 10,6 μm

Aufgrund der hohen zeitlichen Dynamik der ablaufenden Prozesse beim Laserstrahlschneiden ist es für die Detektion der rückreflektierten CO_2 -Laserstrahlung von Bedeutung, einen Sensor mit hoher zeitlicher Auflösung zu verwenden. Ein Leistungsmesskopf der Firma Fortech HTS GmbH [76] bietet aufgrund der effizienten Wasserkühlung sowie einer auf dem Sensorchip aufgedampften Absorptionsschicht für 10,6 μm eine sehr hohe Messfrequenz von 300 kHz. Das Messprinzip des schnellen Leistungsmesskopfs basiert auf dem Effekt der Thermokraft in anisotropen Materialien. Dieser besagt, dass senkrecht zu einem elektrischen Strom in einem anisotropen Kristall eine Temperaturdifferenz und umgekehrt senkrecht zu einem Wärmestrom eine Potenzialdifferenz auftritt [77]. Die aktive Fläche des Sensors beträgt 15 x 15 mm² und die Messfrequenz 50 kHz.

Die Integration dieses thermoelektrischen Sensors erfolgt koaxial zur Laserstrahlachse mithilfe des Scraper-Spiegels (vgl. Bild 5.4).

In den folgenden Abschnitten wird evaluiert, welche Strahlungsanteile (Primär- und/oder Sekundärstrahlung) der Sensor aus welcher Region der Prozesszone (Schnittspalt und/oder Werkstückoberfläche) detektiert. Die Qualifizierung ist notwendig, um bei der Auswertung und Interpretation der Signale zwischen Nutz- und Störsignal unterscheiden zu können.

Detektion von Primär- und/ oder Sekundärstrahlung

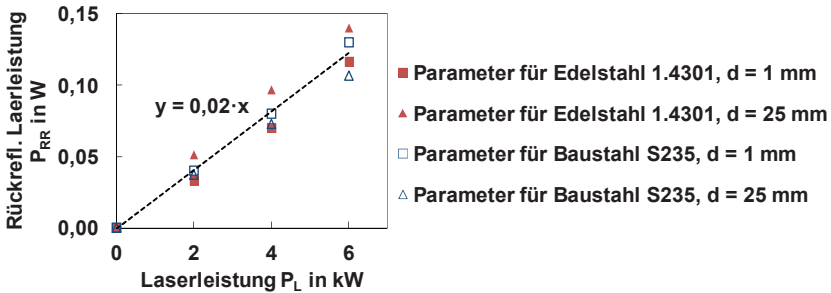
Das Funktionsprinzip des Leistungsmesskopfs basiert auf der Einstellung eines Temperaturgradienten zwischen Ober- und Unterseite der dünnen Detektorschicht aufgrund der vorderseitigen Laserstrahlabsorption und der rückseitigen Kühlung [78]. Zur Klärung der Frage, ob neben der Primärstrahlung (10,6 μm) ebenfalls die Wärmestrahlung der Schmelze (vgl. Kap. 2.4.1) zu einer ungewollten Absorption und somit Temperaturerhöhung im Detektor führt, wurde der Prozess von einem laserstrahlgeführten Brennschneidprozess in einen autogenen Brennschneidprozess ohne eingeschaltetem Laserstrahl überführt, welcher jedoch nach wie vor thermische Strahlung emittiert. Dies wurde erreicht, indem während eines normalen Baustahl-Laserbrennschneidvorgangs simultan der Laserstrahl ausgeschaltet, die Vorschubgeschwindigkeit reduziert und der Sauerstoff-Gasdruck erhöht wurde. Durch die Tatsache, dass die vom Leistungsmesskopf registrierte Strahlungsleistung instantan mit dem Abschalten des CO_2 -Laserstrahls auf null abfiel, folgt, dass der Sensor für die thermische Strahlung aus der Schnittfuge nicht sensitiv ist, sondern nur den gewünschten Anteil an rückreflektierter CO_2 -Laserstrahlung detektiert.

Störstrahlung

In einem weiteren Versuch wurde derjenige Strahlungsanteil des Rückreflexes bestimmt, welcher nicht von der Wechselwirkungszone des Laserstrahls mit dem Werkstück stammt, sondern von Stör-Reflexionen an Bauteilen im Beobachtungsstrahlengang wie beispielsweise der Schneidlinse oder -düse. Hierzu wurde anstelle eines zu schneidenden Blechs eine Strahlfalle unter dem Laserschneidkopf positioniert und die rückreflektierte Laserleistung P_{RR} in Abhängigkeit der Vorwärts-Laserleistung P_L gemessen. Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Parameterkonfigurationen durchgeführt (siehe Parametertabelle in Bild 5.7), welche den Gutschnitt-Parametern für Baustahl S235 und Edelstahl 1.4301 der jeweiligen Blechdicke 1 und 25 mm entsprechen. Die jeweiligen Parametersätze variieren hinsichtlich des Düsen- und Rohstrahldurchmessers sowie des Einstellmaßes (Fokusslage).

In Bild 5.7 sind die Messwerte sowie die Ausgleichsgerade in Abhängigkeit der Laserleistung P_L dargestellt. Die Ausgleichsgerade lässt sich durch einen linearen Zusammenhang zwischen der einfallenden Laserleistung P_L und der detektierten Störstrahlung gemäß der folgenden Gleichung annähern:

$$\Delta P = 0,02 \frac{W}{kW} \cdot P_L. \quad (5.1)$$



	Material	Blechdicke d in mm	$\varnothing_{\text{Düse}}$ in mm	\varnothing_{RS} in mm	Einstellmaß ES in mm
■	1.4301	1	1,7	24	4
▲	1.4301	25	2,7	14	-6,5
□	S235	1	0,8	20	4,5
△	S235	25	2,3	20	5

Bild 5.7: Zusammenhang zwischen einfallender CO₂-Laserleistung P_L und rückreflektierter Störstrahlung P_{RR} für unterschiedliche Parameterkonfigurationen.

Für die Versuchsauswertung werden im Folgenden die Messergebnisse stets um diesen Störstrahlungsanteil reduziert. Aufgrund der geringen Streuung der Messwerte um die lineare Ausgleichsgeraden wird der Störstrahlungsanteil gemäß Gleichung (5.1) berechnet.

Strahlungsanteil aus der Schnittfuge

Der Laserstrahldurchmesser auf dem Werkstück besitzt eine größere geometrische Ausdehnung als die resultierende Breite des von ihm erzeugten Schnittspalts, da die Intensität im Laserstrahl radial zum Randbereich stark abfällt. Unterhalb der sog. Schmelzintensität reicht die Laserstrahlintensität nicht mehr aus, um den Werkstoff aufzuschmelzen. Der Überlappungsbereich des Laserstrahls mit der Werkstück-Oberfläche trägt neben der Schnittfront ebenfalls zur Rückreflexion bei. Im Folgenden wird evaluiert, wie groß der jeweilige Anteil der Schnittfrontreflexion bzw. der Oberflächenreflexion an der detektierten Gesamt-Rückreflexion ist.

Hierzu wurden Laserschneidversuche mit unterschiedlichen Blechneigungswinkeln α durchgeführt und die Laser-Rückreflexionen verglichen. Beim Standard-Laserschnitt ($\alpha = 0^\circ$) werden die Gesamt-Reflexionen – bestehend aus Reflexionen von der Oberfläche und Reflexionen aus der Schnittfuge – detektiert (Bild 5.8 links). Beim Schräg-Schnitt (Bild 5.8 rechts) wird das Blech um einen Neigungswinkel α angestellt, sodass

(bei hinreichend großem Winkel α) direkte Reflexionen von der Werkstückoberfläche nicht in die Düse und zum Leistungsmesskopf, sondern an der Düse vorbei reflektiert werden. Da die Messung koaxial durch die Düse erfolgt, werden somit in diesem Fall bei Vernachlässigung diffuser Oberflächen-Strahlungsanteile ausschließlich die Reflexionen aus der Schnittfuge detektiert.

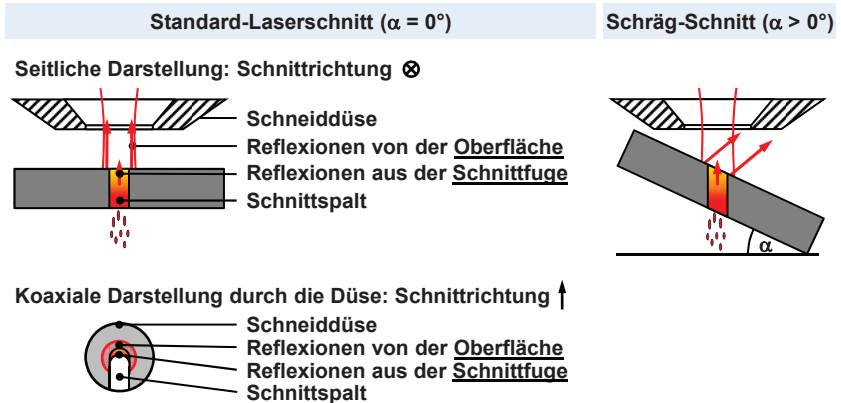


Bild 5.8: Skizze der direkten Laserstrahl-Reflexionsrichtungen beim Standard- und Schräg-Schnitt. Der Blechneigungswinkel α ist im Schrägschnittfall so groß gewählt, dass direkte Reflexionen von der Werkstückoberfläche nicht in die Düse reflektiert werden können.

In Bild 5.9 ist exemplarisch der Verlauf der gemessenen Rückreflexionen eines Standard- und eines Schräg-Schnitts dargestellt. Der Wert der gesamten Rückreflexion (oberer Kurvenverlauf, $\alpha = 0^\circ$) – bestehend aus Anteilen aus der Schnittfuge und der Oberfläche – beträgt im zeitlichen Mittel 3,25 W und ist erwartungsgemäß größer als die Rückreflexionen nur aus der Schnittfuge – diese betragen lediglich 0,24 W (unterer Kurvenverlauf, $\alpha = 35^\circ$), sodass deren Anteil an der Gesamt-Rückreflexion nur 7,4% beträgt. Dieser überraschend geringe Wert muss sogar als Maximalwert verstanden werden, da erstens die Schnittfront um ca. 22% verlängert ist (aufgrund des um 35° geneigten Blechs vergrößert sich die effektive Blechdicke auf: $1/\cos(35^\circ) = 122\%$) und zweitens diffuse Reflexionen von der Werkstück-Oberfläche nicht vollständig ausgeschlossen werden können, sodass der Anteil der Schnittfugenreflexionen an den Gesamtreflexionen sogar noch kleiner werden könnte.

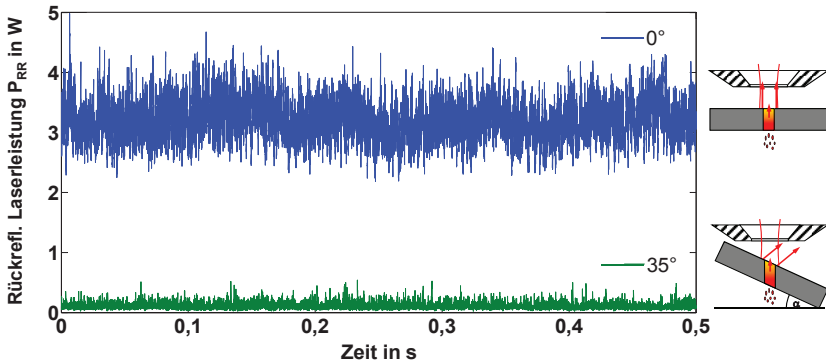


Bild 5.9: Rückreflektierte Laserleistung einer 3 mm Edelstahlprobe. Oben: Standard-Laserschnitt. Unten: Schräg-Schnitt. Parameter: $P_L = 5,3$ kW, $p_{N2} = 17$ bar, $v = 4,7$ m/min, $\varnothing_{Düse} = 2,0$ mm.

Einen Überblick über die gemessenen Anteile der Rückreflexionen sowie deren Verhältnis gibt Tabelle 5.2 für mehrere Materialien und Blechdicken. Daraus ist zu entnehmen, dass der Anteil der Rückreflexion aus der Schnittfuge maximal 10% der Gesamt-Reflexion ausmacht. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass mindestens 90% der Gesamt-Reflexion von der Werkstück-Oberfläche stammt – das Signal ist somit stark oberflächendominiert.

Material	Blechdicke in mm	$P_{RR} (\alpha = 0^\circ)$ „Gesamt“ in W	$P_{RR} (\alpha > 0^\circ)$ „Schnittfuge“ in W	Verhältnis P_{RR} „Schnittfuge“ zu P_{RR} „Gesamt“
Aluminium	1	10,37	0,37	3,6%
	3	8,95	0,76	8,4%
Edelstahl 1.4301	1	4,18	0,16	3,9%
	3	3,25	0,24	7,4%
Baustahl S235	1	1,06	0,10	9,6%
	3	0,76	0,04	5,7%

Tabelle 5.2: Rückreflektierte Laserleistungen P_{RR} „Gesamt“ (Standard-Laserschnitt $\alpha = 0^\circ$) und P_{RR} „Schnittfuge“ (Schrägschnitt $\alpha > 0^\circ$) sowie deren prozentuale Verhältnisswerte für unterschiedliche Materialien und Blechdicken.

5.2.4 Widerstandsmessgerät

Das Widerstandsmessgerät misst den Ohm'schen Widerstand R_L zwischen der Laserschneiddüse und der Werkstückoberfläche mit einer Auslesefrequenz von ca. 500 Hz. Hierbei fungieren die metallische Düse einerseits sowie das Werkstück andererseits als Elektroden (vgl. Bild 5.10). Im üblichen Laserschneidbetrieb wird mit einem Abstand von ca. 1 mm zwischen Düse und Blech geschnitten. Das sich zwischen Düse und Blech befindliche Dielektrikum (Schneidgas, Metaldampf, Umgebungsluft) sorgt für einen sehr hohen elektrischen Widerstand – die elektrische Schaltung des Messgeräts ist so ausgelegt, dass hierbei ein Widerstand von mehreren hundert Mega-Ohm ($>100 \text{ M}\Omega$) gemessen wird.

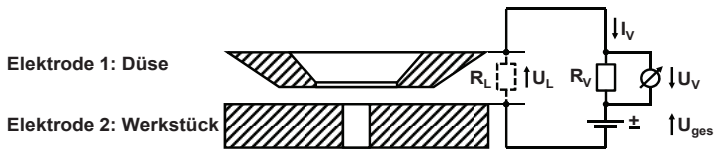


Bild 5.10: Prinzipskizze der Ohm'schen Widerstandsmessung zwischen Düse und Werkstück.

Die Berechnung des Ohm'schen Widerstands/Lastwiderstands R_L zwischen metallischer Laserschneiddüse und dem Blechwerkstück erfolgt nach folgender Formel:

$$R_L = \frac{U_L}{I} . \quad (5.2)$$

Der Stromfluss I im Stromkreis ergibt sich durch das Verhältnis der zu messenden Spannung U_V und dem bekannten Vorwiderstand R_V :

$$I = \frac{U_V}{R_V} . \quad (5.3)$$

Die über den Lastwiderstand R_L abfallende Spannung U_L berechnet sich aus der Differenz der Gesamtspannung U_{ges} und der über einen bekannten Vorwiderstand R_V abfallenden Spannung U_V :

$$U_L = U_{ges} - U_V . \quad (5.4)$$

Einsetzen von Gleichung (5.3) und (5.4) in Gleichung (5.2) ergibt:

$$R_L = \frac{U_{ges} - U_V}{U_V} \cdot R_V. \quad (5.5)$$

Tritt unerwünschte Ionisation zwischen Düse und Blech auf, so verringert sich der elektrische Widerstand R_L aufgrund der hohen Anzahl an freien Ladungsträgern (Elektronen und Ionen). Diese Widerstandsänderung wird durch die Messung der Vorwiderstandsspannung U_V der oben beschriebenen elektrischen Schaltung des Widerstandsmessgerätes erfasst.

5.2.5 Gasdruck- und -durchflussmessgerät

Anhand der kombinierten Druck- und Durchflussmessung des Sauerstoff-Schneidgases soll beim Brennschneiden von Baustahl ein Schnittabriss aufgrund der veränderten Schneidgasdynamik erkannt werden. Hierfür wird ein elektronisches Druckmessgerät (PA9027) des Herstellers ifm electronic in den Schneidkopf eingebaut, welches den Gasdruck in der Druckkammer unterhalb der ZnSe-Schneidlinse erfasst. Der Messbereich beträgt 0 - 1 bar und die Messfrequenz 1 kHz. Die Durchflussmessung erfolgt in der Schneidgas-Zuleitung zwischen dem Gasdruckregelventil und dem Schneidkopf mit einem Durchflussmessgerät des Herstellers Bronkhorst bei einer Messfrequenz von 100 Hz. Im folgenden Bild 5.11 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

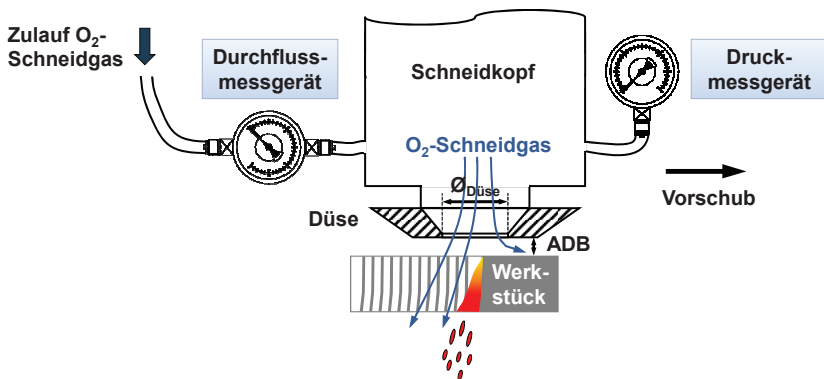


Bild 5.11: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus zur Messung von Durchfluss und Druck des Sauerstoff-Schneidgases.

5.3 Werkstoffe

In Kap. 3 wurde bereits erläutert, dass sich die Laserschneid-Experimente im Rahmen dieser Arbeit auf die Werkstoffe Baustahl und Edelstahl beschränken. Bei dem in den Brennschneiduntersuchungen verwendeten Baustahl handelt es sich um einen niedriglegierten Stahl für den Stahl- und Maschinenbau mit der Bezeichnung S235, Werkstoffnummer 1.0038. Bei den Blechdicken 15, 20 und 25 mm kommt der Lasergüte-Baustahl Raex® des Herstellers Ruukki zum Einsatz. Für die Schmelzschneiduntersuchungen wird der chemisch- und hitzebeständige Edelstahl X5CrNi18-10, Werkstoffnummer 1.4301, verwendet, von welchem ausgewählte Blechdicken bis einschließlich 15 mm untersucht werden.

5.4 Methodik der Fehlschnitterzeugung

Die Fehlschnitte Schnittabriss und Self-Burning werden in unterschiedlichen Szenarien untersucht. Ziel soll es sein, aufgrund vielfältiger Fehlereintrittsmechanismen möglichst allgemeingültige und parameterunabhängige Merkmale zu identifizieren. Zur Herbeiführung eines Schnittabrisses werden in dieser Arbeit die folgenden Szenarien durchgeführt:

- Linearschnitt mit steigender Vorschubgeschwindigkeit v
- Linearschnitt mit sinkendem Schneidgasdruck p
- Linearschnitt in ein Blech mit zunehmender Blechdicke d (Keil)
- 2D-Konturschnitt mit stark ausgeprägten Richtungswechsel (Zickzack-Mäander)

Zur Erzielung des Fehlerfalls Self-Burning wird ein 2D-Konturschnitt in Blechbereiche geführt, welche aufgrund eines vorangegangenen Laserschchnitts eine erhöhte Blechtemperatur aufweisen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in den Ergebniskapiteln (Kap. 6 - 8) diejenigen Versuche dargestellt, bei welchen die jeweiligen Prozessmerkmale am stärksten ausgeprägt sind.

5.5 Auswertungssystematik

Für das Erreichen des Ziels dieser Arbeit, Fehlschnitte in laserstrahlgeschnittenen Bauteilen zu erkennen, ist es notwendig, eindeutige Merkmale aus den Messdaten zu extrahieren, welche für den jeweiligen Prozesszustand charakteristisch sind. Hierfür ist eine systematische Auswertung der Messdaten unerlässlich. Die Auswertungssystematik dieser Arbeit gliedert sich, wie Tabelle 5.3 zeigt, in die folgenden drei Schritte:

- Korrelation der Merkmale mit den Fehlschnitten
- Wissenschaftliche Interpretation der korrelierten Merkmale und Phänomene
- Quantifizierung der Merkmalsausprägung

Korrelation der Merkmale mit den Fehlschnitten	In einem ersten Schritt wird untersucht, ob die in Kap. 4.2 definierten Prozessmerkmale mit dem jeweiligen Schneidergebnis korrelieren. Die Auswertung erfolgt getrennt je nach Art des Fehlschnittes (Schnittabriss Edelstahl, Schnittabriss Baustahl, Self-Burning Baustahl). Es wird – wenn möglich – unterschieden, ob das Merkmal bereits den Fehlerfall zeitlich im Vorlauf ankündigt, oder ob es erst bei Eintritt des Fehlschnittfalls auftritt.
Wissenschaftliche Interpretation der korrelierten Merkmale und Phänomene	Nach der Korrelation der Prozessmerkmale mit den jeweiligen Fehlschnittfällen erfolgt in einem zweiten Schritt die physikalische Erklärung der beobachteten Phänomene und Beschreibung der Wirkzusammenhänge. Die Generierung von Prozessverständnis hilft einerseits, die Ursachen für die jeweilige Fehlerentstehung zu verstehen, als auch geeignete Gegenmaßnahmen abzuleiten. Des Weiteren wird die Eineindeutigkeit zwischen den Fehlerfällen und den Merkmalen überprüft, d.h. es wird analysiert, ob die Merkmale eindeutig einem Fehlerfall zuzuordnen sind oder ob diese auch in anderen Zusammenhängen auftreten können.
Quantifizierung der Merkmalsausprägung	Im dritten Schritt werden die Prozessmerkmale, für welche eine eineindeutige Korrelation mit dem jeweiligen Fehlschnittfall gefunden wurde, hinsichtlich der Ausprägung zwischen Gut- und Fehlschnitt quantifiziert. Ziel ist hierbei festzustellen, wie weit bzw. deutlich sich ein Merkmal im Fehlerfall im Vergleich zum Gutschnitt verändert.

Tabelle 5.3: Auswertungssystematik.

5.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die verwendete Systemtechnik sowie die eingesetzten Messmittel näher spezifiziert (vgl. Tabelle 5.4). Für die experimentellen Untersuchungen stehen zwei Laserschneidmaschinen mit unterschiedlichen Prozesslicht-Auskoppelprinzipien zur Verfügung.

Die erste Anlage verfügt über einen dichroitischen Spiegel, wodurch die Laserleistung auf maximal 2 kW begrenzt ist. Als Messmittel werden an dieser Anlage die VIS- und NIR-B-Kamera zeitlich simultan betrieben. Zusätzlich beleuchtet eine Laserdiode koaxial die Wechselwirkungszone.

An der zweiten Anlage mit Scraper-Spiegel werden als optische Messmittel die NIR-A-Kamera, die Photodiode sowie der Leistungsmesskopf eingesetzt. Weitere Messmittel bilden das Schneidgas-Druck- und Durchflussmessgerät sowie das elektrische Widerstandsmessgerät.

Anlage	Auskoppel- prinzip	$P_{L,max}$	Koaxiale Be- leuchtung	Messmittel
1	Dichroitischer Spiegel	2 kW	Laserdiode $\lambda = 658 \text{ nm}$ $P_L = 100 \text{ mW}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ VIS-Kamera (Si) ▪ NIR-B-Kamera (InGaAs)
2	Scraper- Spiegel	6 kW	-----	<ul style="list-style-type: none"> ▪ NIR-A-Kamera (Si) ▪ Photodiode (Si) ▪ Leistungsmesskopf ▪ Druck- und Durchflussmess- gerät ▪ Widerstandsmessgerät

Tabelle 5.4: Übersicht über die verwendete Systemtechnik und Messmittel.

6 Experimentelle Ergebnisse zur Schnittab- riss-Detektion in Baustahl S235

Wie in Kap. 4.2.1 ausgeführt, ist der Schnittabriss beim Brennschneidprozess von Baustahl das Ergebnis einer unzureichenden Energiezufuhr (Laserstrahl und/oder Sauerstoff) in die Prozesszone, sodass das Schnittpaltvolumen nicht vollständig aufgeschmolzen und aus dem Schnittkanal ausgetrieben wird.

Als mögliche Prozessmerkmale, welche den Fehlereintrittsfall kennzeichnen können, sind im Vorfeld durch die phänomenologische Beschreibung des Fehlerfalls (vgl. Kap. 4.2.1) identifiziert worden:

- Stärkere Neigung der Schnittfront (zunehmender Versatz der oberen zur unteren Schnittfrontkante)
- Erhöhung der Sekundärstrahlung (Wärmestrahlung)
- Erhöhung der Primärstrahlung (Laserstrahl-Rückreflexion)
- Änderung von Druck und Durchfluss des Sauerstoff-Schneidgases

Für die Bestimmung des Versatzes der oberen zur unteren Schnittfrontkante werden simultan zwei ortsauflösende Kameras in Kap. 6.1 eingesetzt, sodass unterschiedliche Schärfeebenen (Oberkante und Unterkante) eingestellt werden können. Zeitliche Fluktuationen der Sekundärstrahlung werden mittels einer Photodiode erfasst (Kap. 6.2). Zur Detektion der rückreflektierten Laserleistung kommt in Kap. 6.3 ein Leistungsmesskopf zum Einsatz. Das Potenzial der Informationsträger Sauerstoff-Gasdruck und -durchfluss hinsichtlich der Erkennung des Schnittabrisse wird in Kap. 6.4 evaluiert.

6.1 Kamera

Die Detektion des geometrischen Abstands der Schnittfrontober- zur -unterkante erfolgt durch die koaxiale und zeitlich simultane Beobachtung der Wechselwirkungszone sowohl mit der VIS- als auch mit der NIR-B-Kamera (vgl. Versuchsaufbau mit dem dichroitischen Spiegel, Kap. 5.1.1). Somit ist es möglich, unterschiedliche Schärfeebe-

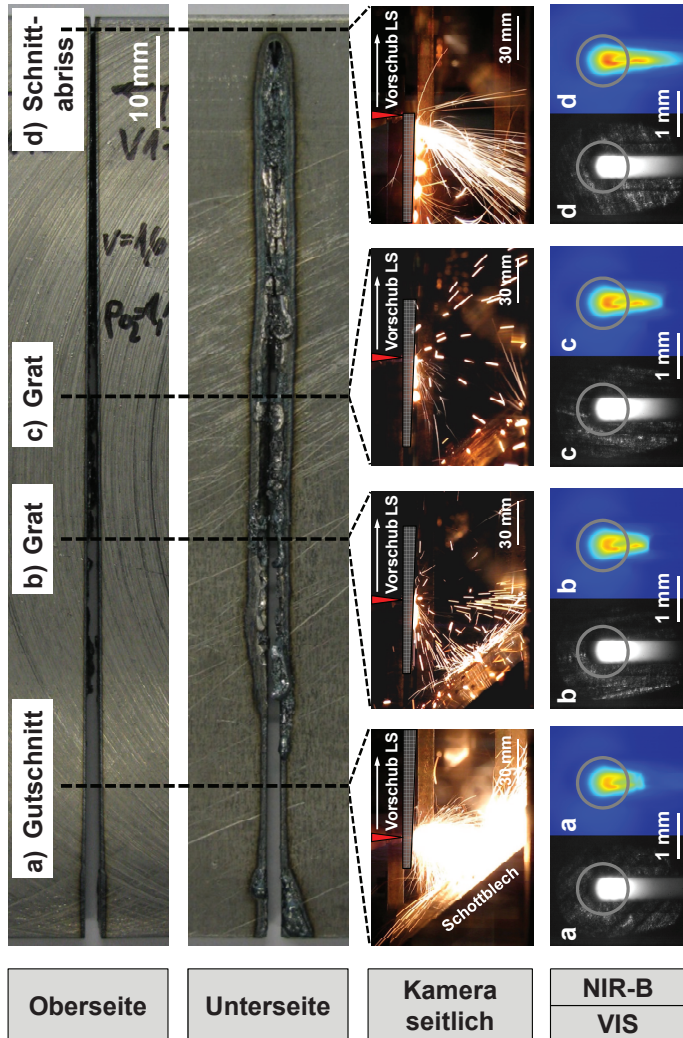
nen einzustellen: die VIS-Kamera ist auf die Blechoberseite scharfgestellt und kann mithilfe der Auflichtbeleuchtung die obere Schnittfrontkante detektieren. Die NIR-B-Kamera ist hingegen auf die untere Schnittfrontkante fokussiert.

Um den Schnittabriss bei konstanten Verfahrensparametern herbeizuführen, wird ein Blech mit zunehmender Blechdicke (Blechkeil beginnend bei Blechdicke $d = 5,0$ mm und endend bei $d = 7,5$ mm) lasergeschnitten. Es wird zwar erwartet, dass sich aufgrund der Blechdickenzunahme der Versatz der oberen zur unteren Schnittfrontkante selbst ohne Veränderung der Schnittfrontneigung vergrößert; das Ziel dieser Untersuchung soll es jedoch sein, zu bestimmen, ab welchem Versatz der Schnittabriss eintritt.

In Bild 6.1 sind die Ober- und Unterseite einer exemplarischen Versuchsprobe dargestellt. Die Parameter (siehe Bildunterschrift in Bild 6.1) sind so gewählt, dass zu Beginn des Laserschnitts ein Gutschnitt (a) vorliegt, welcher mit fortschreitender Wegstrecke und Blechdicke in Grat (b+c) übergeht, bevor kurz vor Ende der Kontur der Schnittabriss (d) eintritt (erkennbar an der undurchtrennten Stelle am rechten Ende der Unterseite). Unterhalb der Probenfotos sind für charakteristische Zeitpunkte die koaxialen und zeitlich synchronen Aufnahmen der VIS- und NIR-B-Kamera dargestellt. Zur Erweiterung des Sichtfeldes, insbesondere dem im Nachlauf, wird eine Langlochdüse mit einer Breite von 2,0 mm und einer Länge von 3,0 mm verwendet. Standardmäßig würde diese Blechdicke mit einer kreisförmigen Düse, welche einen Durchmesser von lediglich 1,0 mm aufweist, lasergeschnitten. Der Durchmesser der Standard-Düse ist in den Kameraaufnahmen nachträglich eingezeichnet.

Zusätzlich wird der Schneidprozess seitlich unter einem Winkel von 90° zur Vertikalen mit einer Kompaktkamera aufgezeichnet, um den Schmelzaustrieb aufnehmen zu können. Hierbei sei angemerkt, dass der Schneidprozess ortsfest stattfindet, d.h. das Werkstück wird horizontal von rechts nach links unter dem gezündeten Laserstrahl hindurchbewegt.

Der Gutschnittbereich (a) zeichnet sich durch einen starken Funkenflug aus, d.h. das komplette aufgeschmolzene Schnittspaltvolumen wird nach unten aus dem Schnittspalt ausgetrieben. Die Abströmrichtungen der Funken streuen stark und sind typischerweise sowohl in als auch gegen die Vorschubrichtung geneigt, d.h. der Funkenflugkegel besitzt einen großen Öffnungswinkel. In den koaxialen VIS- und NIR-B-Kameraaufnahmen sind jeweils die obere als auch die untere Schnittfrontkante zu erkennen (vgl. Bild 6.2). Auffallend ist jedoch, dass die untere Schnittfrontkante bereits außerhalb des Sichtbereichs der Standarddüse ($\varnothing_{\text{Düse}} = 1,0$ mm) liegt und nur dank der Langlochdüse zu sehen ist.

**Bild 6.1:**

Schnittabriss S235. Zunehmende Blechdicke: 5 - 7,5 mm. Konstante Verfahrensparameter: $P_L = 1,0 \text{ kW}$, $p_{O_2} = 1,1 \text{ bar}$, $v = 1,6 \text{ m/min}$, Langlochdüse $2,0 \times 3,0 \text{ mm}$, $ES = 2 \text{ mm}$. VIS-Kamera: $292 \times 360 \text{ Pixel}$, $t_{exp} = 400 \mu\text{s}$, 910 fps. NIR-B-Kamera: $320 \times 256 \text{ Pixel}$, $t_{exp} = 600 \mu\text{s}$, 100 fps. Zur Erweiterung des Sichtfeldes im Nachlauf wird eine Langlochdüse verwendet. In den VIS/NIR-B-Aufnahmen sind der Durchmesser und die Position der Standard-Schneiddüse ($\varnothing_{Düse} = 1,0 \text{ mm}$) sowie in den seitlichen Kameraaufnahmen die Position des Laserstrahls eingezeichnet. LS: Laserstrahl.

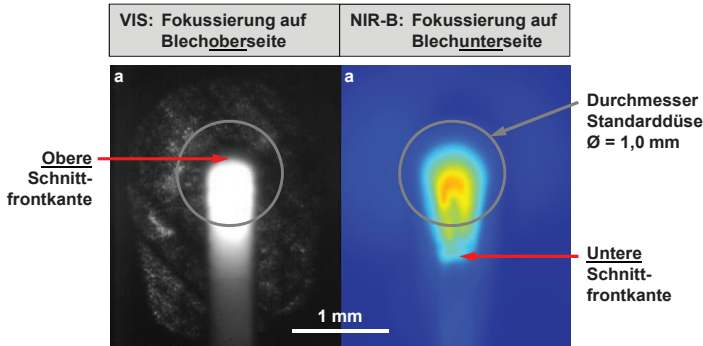


Bild 6.2: Gutschnittbereich aus Bild 6.1 mit Einzzeichnung der Positionen der oberen und unteren Schnittfrontkanten.

Mit zunehmender Blechdicke muss für die Ausbildung des Schnittkanals kontinuierlich mehr Material aufgeschmolzen und aus dem Schnittspalt ausgetrieben werden. Dieser Vorgang kann aufgrund der konstant gehaltenen und für eine Blechdicke von 5 mm ausgelegten Verfahrensparameter nicht mehr so effizient ablaufen wie im Gutschnittbereich, sodass zunächst Grat (b+c) entsteht. Am Punkt (b) ändert sich der Schmelzaustrieb mit prozessrelevanten Folgen: Die Schmelze wird nicht mehr primär am Schnittfrontscheitel nach unten ausgetrieben, vielmehr strömt diese entlang der Schnittfront entgegen der Vorschubrichtung schräg nach hinten unten und haftet an den unteren Schnittkanten im Nachlauf an. Für diesen Effekt ist folgendes Erklärungsmodell vorstellbar, welches auch De Keuster verwendet [37]: Die Schnittfrontneigung bzw. der Versatz der oberen zur unteren Schnittfrontkante ist so groß, dass die nach unten strömende Schmelze den Wirkbereich des Laserstrahls verlässt und somit abkühlt. Durch die Abkühlung der Schmelze im unteren Bereich der Schnittfront steigen sowohl die temperaturabhängige Schmelzviskosität [80, 88] als auch die Oberflächenspannung an, sodass die Schmelze vielmehr an den unteren Schnittkanten nach hinten strömt, als nach unten abgelöst zu werden [88]. Einen zusätzlichen Einfluss könnte der Coanda-Effekt haben, welcher die Eigenschaft eines Fluides beschreibt, sich beim Ausblasen tangential oder annähernd tangential zu einer gekrümmten Oberfläche (= untere Schnittkante) an diese gekrümmte Wand anzulegen und daran entlang zuströmen [79]. In den seitlichen Kameraaufnahmen im Bild 6.1b und Bild 6.1c ist erkennbar, dass nahezu kein Funkenflug mehr stattfindet, sondern annähernd die komplette Schmelze aus dem Schnittspaltvolumen den nachläufigen Bart an den unteren Schnittkanten speist (erkennbar an den anhaftenden, leuchtenden Schlacketropfen). Die Aufnahmen der coaxialen VIS- und NIR-B-Kamera verdeutlichen die im Vergleich zum Gutschnitt noch weiter in den Nachlauf versetzte untere Schnittfrontkante.

Bei Eintritt des Schnittabrisses (Bild 6.1d) strömt die Schmelze – vergleichbar wie bei der Gratbildung – an den unteren Schnittkanten entlang und speist die hellleuchtenden Grat-Tropfen im Nachlauf. Des Weiteren wird die Schmelze durch Funkenflug aus dem Schnittspalt nach unten ausgetrieben. Anhand der seitlichen Kameraaufnahme ist sehr deutlich zu erkennen, dass hierbei der Schmelzaustrieb um mehrere Millimeter im Nachlauf stattfindet. Das Ende der unteren Schnittfrontkante ist in den VIS- und NIR-B-Aufnahmen selbst unter Verwendung der Langlochdüse nur noch zu erahnen.

Der zeitliche Verlauf der nach hinten wandernden unteren Schnittfrontkante ist anhand der Streak-Aufnahme in Bild 6.3 gut zu erkennen. Zur Erzeugung der Streak-Aufnahme wird aus jedem Einzelbild der Bilderfolge der NIR-B-Kameraaufnahme ein jeweils ein Pixel breiter Streifen (sog. Streak) aus der Mitte der Prozesszone extrahiert und aneinandergereiht. Durch diese Darstellungsweise erhält man ein Bild, dessen eine Dimension die des Ortes ist, wohingegen die andere Dimension den zeitlichen Ablauf kennzeichnet. Die Position des Streaks ist im linken Teilbild ersichtlich. Die Streak-Aufnahme ist nicht in Falschfarben dargestellt, des Weiteren ist die räumliche Ausdehnung der 1,0 mm Standard-Laserschneiddüse, welche als Feldblende normalerweise das Sichtfeld begrenzen würde, eingezeichnet. Es ist gut erkennbar, dass bereits im Gutschnittbereich die untere Schnittfrontkante außerhalb des Sichtfeldes der Standarddüse liegt. Die Kante wandert mit fortschreitendem Laserschnitt und zunehmender Blechdicke weiter in den Nachlauf. Bei Punkt (b) erfolgt die weiter oben beschriebene Änderung hinsichtlich des Schmelzaustriebs, bei welcher die Schmelze nicht mehr primär als Funkenflug den Schnittspalt nach unten verlässt, sondern vielmehr an den unteren, horizontalen Schnittspaltkanten entgegen der Vorschubrichtung entlang strömt und Schlacketrophen als Grat bildet. Dieser Punkt ist anhand eines sprunghaften Rückgangs (Punkt (b) in Bild 6.3) der unteren Schnittfrontkante zu erkennen.

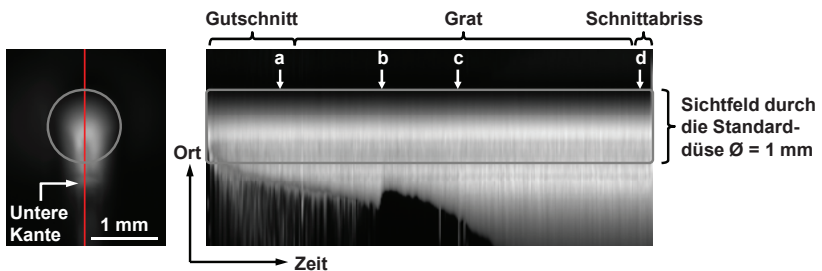


Bild 6.3: Streak-Aufnahme der NIR-B-Aufnahme des Schnittabrisses aus Bild 6.1. Die Position des Streaks ist im linken Teilbild eingezeichnet. Die Graustufen-Bilder sind im Gegensatz zu den Aufnahmen aus Bild 6.1 nicht in Falschfarben konvertiert.

Es kann festgehalten werden, dass anhand des Versatzes der oberen zur unteren Schnittfrontkante auf den Fehlerfall Schnittabriss geschlossen werden kann. Allerdings ist die koaxiale Detektion der unteren Schnittfrontkante durch die normale Laserschneiddüse hindurch selbst im Gutschnittfall nicht möglich, da die untere Schnittfrontkante außerhalb des durch den Düsenrand begrenzten Sichtfeldes der Kamera liegt.

Aus diesem Grund werden daher weitere Prozessmerkmale wie bspw. die örtliche Verteilung sowie die zeitliche Fluktuation der Sekundärstrahlung näher untersucht. Die Versuchsrandbedingungen werden ebenfalls geändert, um eine höhere Laserleistung für den Laserschneidprozess verwenden zu können: Die folgenden Versuche finden auf der Schneidanlage mit Scraper-Spiegel (vgl. Kap. 5.1.2) statt, wo aufgrund dieses Auskoppelpinzips eine maximale Laserleistung von 6 kW eingesetzt werden kann.

Der Schnittabriss wird durch eine konstante Vorschub-Steigerung während eines Linearschnitts herbeigeführt. In Bild 6.4 ist exemplarisch eine Versuchsprobe der Blechdicke 15 mm dargestellt. Die Geschwindigkeitsrampe beginnt bei $v_1 = 1,0$ m/min und endet bei $v_2 = 3,0$ m/min. In den Probenfotos ist gut zu erkennen, dass kurz oberhalb der Standard-Vorschubgeschwindigkeit, welche für diese Blechdicke und Laserleistung $v_{\text{Gutschnitt}} = 1,75$ m/min beträgt, Gratbildung einsetzt. Ist die Vorschubgeschwindigkeit schließlich so groß, dass der Schnittpalt nach unten hin verschlossen ist, tritt die aufgeschmolzene Schmelze aus dem nur teilweise ausgebildeten Schnittpalt nach oben aus. Dies ist an den Schlacke-Tropfen, welche auf der Blechoberseite zum Vorschein kommen, ersichtlich.

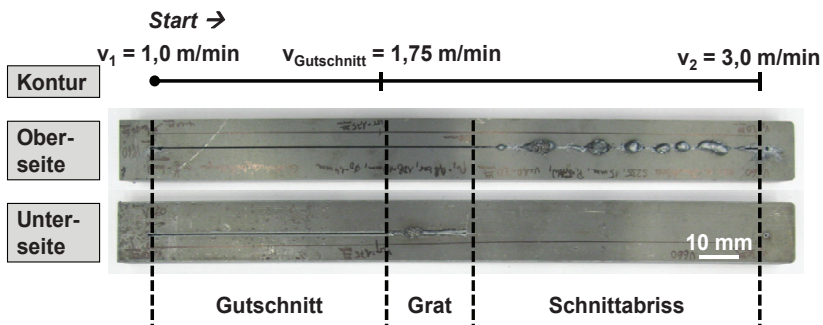
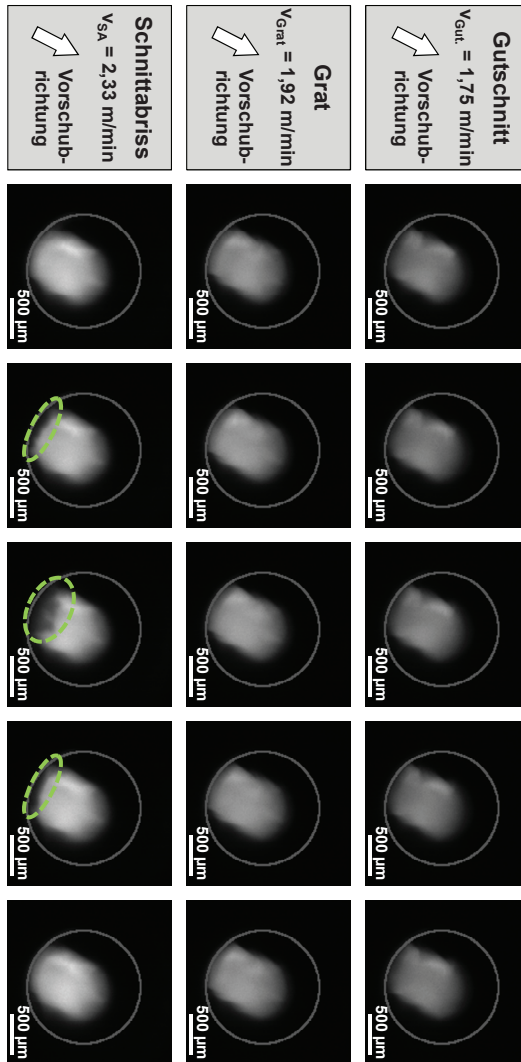


Bild 6.4: Schnittabriss S235. Blechdicke: 15 mm. Lineare Geschwindigkeitsrampe von $v_1 = 1,0$ m/min bis $v_2 = 3,0$ m/min. $P_L = 5,7$ kW, $p_{O_2} = 0,8$ bar, $\varnothing_{\text{Düse}} = 1,4$ mm, $ES = 6$ mm.

Die Beobachtung erfolgte koaxial mittels der NIR-A-Kamera im Wellenlängenbereich um 920 nm. Die Kamera bietet bei der gewählten geometrischen Auflösung von 160 x 160 Pixeln eine Aufnahmezeit von 1900 fps und eignet sich somit im Gegensatz zur NIR-B-Kamera besser, um schnell fluktuierende Ereignisse zu detektieren. In Bild 6.5 sind kurze Sequenzen von jeweils fünf aufeinanderfolgenden Bildern der jeweiligen Abschnitte Gutschnitt, Grat und Schnittabriss abgebildet.

Sowohl im Gutschnitt- als auch im Gratbildungsbereich sind in den koaxialen Kamerabildern keine Auffälligkeiten festzustellen. Die geometrische Form des Schnittspaltes sowie die Strahlungsemission der Schmelze auf der Schnittfront sind homogen. Die Zunahme der integralen Helligkeit basiert auf der Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit – auf diesen Effekt wird weiter unten näher eingegangen.

In der Bildsequenz des Schnittabrisses (untere Zeile in Bild 6.5) sind deutliche Schlacketropfen im hinteren Bereich der Düsenberandung zu erkennen (siehe elliptische Markierung). Die Schlacke kann aufgrund des verschlossenen Schnittspaltes nicht mehr nach unten ausgetrieben werden und strömt entgegen der Laservorschubrichtung nach hinten. Aus den in Kap. 4.2.1 erläuterten Gründen (Volumenzunahme der FeO-Schlacke aufgrund Massenzunahme (Oxidation) sowie Dichtereduzierung des FeO gegenüber Fe) quillt die FeO-Schlacke im Nachlauf aus dem Schnittspalt heraus und erstarrt. Die Schlacketropfen erreichen teilweise eine solche geometrische Ausdehnung, dass diese für kurzzeitige elektrische Kurzschlüsse zwischen Düse und Blech sorgen können. Dies ist mithilfe des im Kap. 5.2.4 vorgestellten Widerstandsmessgerätes messbar, welches im Falle des Schnittabrisses eine signifikante Reduzierung des elektrischen Widerstands auf $0\ \Omega$ zwischen Düse und Blech detektiert, was durch die leitfähige Verbindung des Schlacketropfens zwischen Düse und Blech hervorgerufen wird. Dieses Merkmal ist als eindeutiges Merkmal für den Fehlschnittfall Schnittabriss im Baustahl-Brennschneidprozess anzusehen, da bei keinem anderen Fehlerfall die Schmelze derart im Nachlauf nach oben gegen die Düsenberandung strömt wie bei diesem Fehlerfall. Es muss jedoch noch geprüft werden, ob dieses Merkmal zuverlässig auch bei dünneren Blechdicken $<15\text{ mm}$ auftritt.

**Bild 6.5:**

Schnittabriss S235. Koaxiale Aufnahme mit der NIR-A-Kamera von der Versuchssprobe aus Bild 6.4. Bildsequenz von jeweils fünf aufeinanderfolgenden Bildern. Obere Zeile: Gutschnitt mit $v_{\text{Gutschnitt}} = 1,75$ m/min. Mittlere Zeile: Gratbildung mit $v_{\text{Grat}} = 1,92$ m/min. Untere Zeile: Schnittabriss mit $v_{\text{SA}} = 2,33$ m/min. Kreisrunde Markierung: Düsendurchmesser. Elliptische Markierung: Nach hinten oben gegen die Düsenberandung strömende Schlacketrophen. NIR-A-Kamera: 160×160 Pixel, $t_{\text{exp}} = 10$ μs , 1900 fps.

Des Weiteren ist auffällig, dass während des Schnittabbrisses die Prozessemissionen der Schnittfrontschmelze stärker fluktuieren als im Gutschnittbereich. Um diesen Effekt zu verdeutlichen, ist in Bild 6.6 der zeitliche Verlauf der über die Düsenquerschnittsfläche gemittelten Helligkeitsswerte der NIR-A-Kamera wiedergegeben. Zusätzlich zum Helligkeitssignal ist der Betrag seiner zeitlichen Ableitung eingezeichnet. Der Gradient ist als betragsmäßige Größe dargestellt, um ausschließlich positive Werte zu erhalten. Die Analyse des zeitlichen Gradienten eignet sich insofern sehr gut, als dass dieser Wert sowohl bei einer Zunahme der Amplitudenausschläge als auch bei einer Zunahme der Frequenz der Helligkeitsschwankungen ansteigt. Darüber hinaus ist das Ergebnis vom Absolutniveau des Helligkeitsswertes unabhängig.

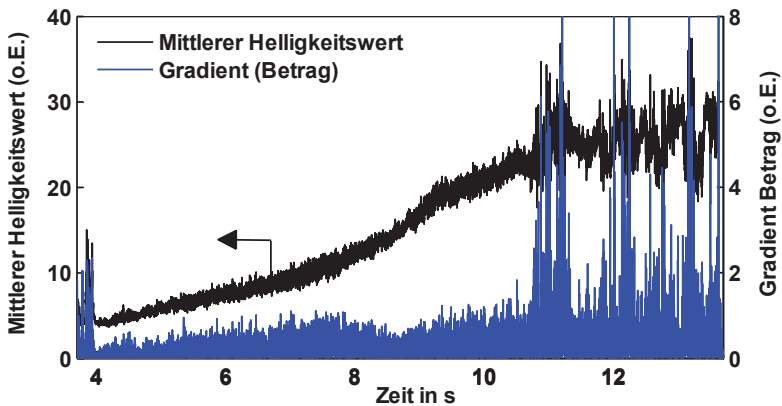


Bild 6.6: Zeitlicher Verlauf der mittleren Helligkeit sowie der Gradient der NIR-A-Kameraaufnahme aus Bild 6.5.

Mit Beginn des Schneidprozesses bei 3,7 s steigt das Signal kurzzeitig sprunghaft an, da die emittierende Leuchtfläche aufgrund zweier anfänglicher Ausbrände größer wird. Im Gutschnitt- und Gratbildungsbereich (bis ca. 10 s) steigt die mittlere Helligkeit mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit kontinuierlich an. Dieser Effekt basiert zum einen auf geometrischen Änderungen der Schnittfrontneigung (Erklärung weiter untenstehend) sowie zum zweiten auf der Steigerung der Oberflächentemperatur der Schnittfrontschmelze. Diesem zunächst paradox anmutenden Phänomen liegt folgendes Erklärungsmodell zugrunde, welches von Powell et al. [80] formuliert wurde: Bei steigender Vorschubgeschwindigkeit muss pro Zeiteinheit mehr Wärme (Zunahme von dQ/dt) über den Mechanismus der Wärmeleitung durch den Schmelzfilm zur fest-flüssigen Phasengrenze transportiert werden, um das größer werdende Schnittspaltvolumen aufzuschmelzen. Dies hat zur Folge, dass der Temperaturgradient ∇T

zwischen der fest-flüssigen und der flüssig-gasförmigen Phasengrenze steiler werden muss. Unter der Annahme, dass mit steigender Vorschubgeschwindigkeit die Schmelzfilmdicke auf der Schnittfront zunimmt, was anhand Simulationsrechnungen verifiziert wurde [81, 82, 83, 84, 92, 93], muss auf der Schmelzfilmoberseite eine höhere Temperatur vorliegen als bei geringerer Vorschubgeschwindigkeit und niedrigerer Schmelzfilmdicke.

Diese Beziehung wird durch das von Fourier formulierte Gesetz der Wärmeleitung

$$\frac{dQ}{dt} = -k \oint_S \nabla T \cdot dS \quad (6.1)$$

beschrieben, wobei k die Wärmeleitfähigkeit der Schmelze darstellt. Dieses Gesetz besagt, dass die durch Wärmeleitung übertragene Wärmeleistung dQ/dt durch eine Querschnittsfläche S proportional zum Temperaturgradienten ∇T ist. Für den vereinfachten Fall der Wärmeleitung zwischen zwei parallelen Wandflächen A , welche eine Temperaturdifferenz von ΔT und einen Abstand von x aufweisen, kann Gleichung (6.1) integriert werden zu:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -k \frac{A}{x} \Delta T = k \frac{A}{x} (T_{so} - T_s), \quad (6.2)$$

wobei die Temperaturdifferenz ΔT im vorliegenden Fall des Laserstrahlschneidens definiert ist als die Differenz zwischen der Temperatur auf der Schmelzfilmoberfläche T_{so} und der Schmelztemperatur T_s (1811 K).

Eigene Temperaturmessungen (vgl. Bild 4.2) sowie experimentelle Ergebnisse von anderen Autoren bestätigen die positive Abhängigkeit der Schnittfronttemperatur von der Vorschubgeschwindigkeit [22, 28, 29, 57, 58, 72, 85, 86, 87, 88, 89, 93].

Einen weiteren Grund für die Zunahme der integralen Helligkeit ist in den geometrischen Verhältnissen der abstrahlenden Schnittfront zu sehen. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit wird die Schnittfront immer flacher (siehe Bild 6.1 unten), so dass der Winkel der Oberflächennormalen zur Beobachtungsrichtung abnimmt. Unter Anwendung des Kirchhoff'schen Strahlungsgesetzes [90] („Absorption gleich Emission“) und unter Berücksichtigung der Fresnel'schen Gleichungen für die winkelabhängige Absorption (=Emission) [91] ist mit einer Zunahme der detektierten Strahlungssintensität zu rechnen, umso flacher die Schnittfront geneigt ist.

Für eine quantitative Abschätzung des Anteils der Helligkeitssteigerung, welche aufgrund der geometrischen Abstrahlungscharakteristik gegenüber der Temperaturzunahme hervorgerufen wird, müsste der Schnittfrontwinkel bekannt sein. Die in-process Bestimmung des mittleren Schnittfrontwinkels ist jedoch aus den coaxialen Kameraaufnahmen nicht möglich.

Ist die Vorschubgeschwindigkeit schließlich so hoch, dass die Laserleistung und die Reaktionsenthalpie aus der Eisen-Sauerstoff-Verbrennung gemeinsam nicht mehr ausreichen, um das Schnittpaltvolumen vollständig aufzuschmelzen, reißt der Schnitt ab (ab der 10. Sekunde in Bild 6.6). Die Prozessemissionen fluktuieren sehr stark, was erstens an den größeren Amplitudenausschlägen der Helligkeitswerte und zweitens an der starken Zunahme des (betragsmäßigen) Gradienten erkannt werden kann. Eine zeitlich hochaufgelöstere Detektion und Quantifizierung der Strahlungsfluktuationen erfolgt im folgenden Kapitel 6.2 mithilfe der Photodiode.

6.2 Photodiode

Die Photodiode bietet im Gegensatz zu den in dieser Arbeit verwendeten Kameras eine um etwa zwei bis drei Größenordnungen erhöhte zeitliche Auflösung, welche es ermöglicht, schnelle Änderungen der Sekundäremissionen zu registrieren und zu quantifizieren.

Der Fehlschnitt wird durch eine schrittweise Reduzierung des O_2 -Gasdrucks während eines Linearschnitts erzeugt, sodass drei Teilbereiche Gutschnitt, Grat und Schnittabriss entstehen. Anschließend wird das Sensorverhalten der Bereiche Schnittabriss und Gutschnitt verglichen.

In Bild 6.7 ist der zeitliche Signalverlauf der Photodiode während eines Linearschnitts in einem 5 mm dicken Baustahl-Blech dargestellt. Der Intensitätsverlauf ist exemplarisch für das komplette Blechdickenspektrum: Mit fortschreitender Reduzierung des O_2 -Gasdrucks und dem sich daraufhin einstellenden Schnittabriss erhöht sich das mittlere Niveau der detektierten Prozessstrahlung in Abhängigkeit von Blechdicke und Parameter um 50% - 200% gegenüber dem mittleren Niveau des Gutschnittbereichs bei gleichzeitiger Zunahme der Schwankungsbreite des Signals. Für eine quantifizierte Auswertung eignet sich das Helligkeitsniveau jedoch nur bedingt, da der Absolutwert von vielen weiteren Faktoren wie beispielsweise der Vorschubgeschwindigkeit, der Schnittfronttemperatur, dem Abstrahlwinkel oder dem Oxidationsanteil abhängig ist und die Gefahr einer Fehlinterpretation dieses eindimensionalen Signals somit sehr

hoch ist. Zur Quantifizierung wird vielmehr die Schwankung des Signals analysiert, indem erneut der Gradient des Rohsignals – also die zeitliche Ableitung – gebildet wird. Um negative Steigungen als positive Werte darzustellen, ist in Bild 6.7 der Betrag des Gradienten abgebildet. Somit ist es möglich, einen zeitlichen Mittelwert zu errechnen, ohne dass sich positive und negative Werte heraus mitteln.

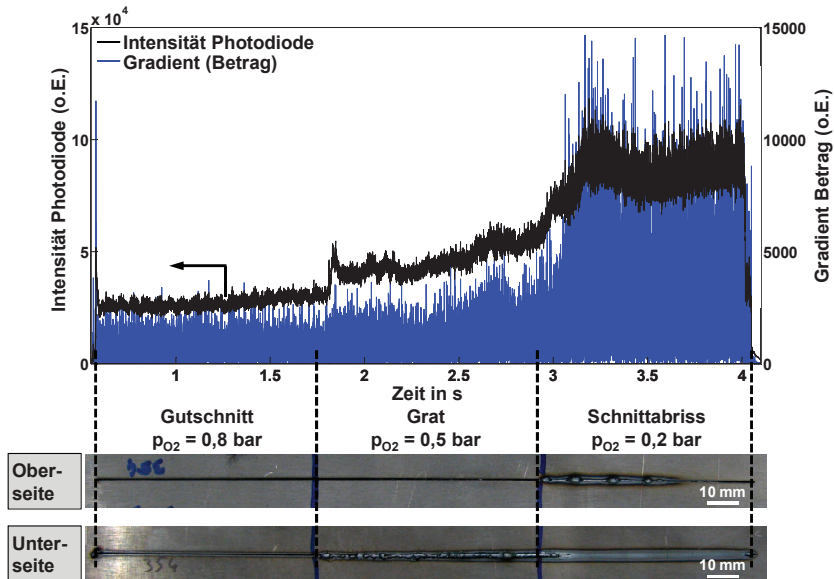


Bild 6.7: Zeitlicher Verlauf der Photodiodenintensität und deren Gradienten (Betrag) bei einem Schnittabriss S235, $d = 5$ mm. Linearschnitt von links nach rechts mit schrittweise sinkendem O_2 -Gasdruck. Parameter: $P_L = 4,0$ kW, $p_{O_2} = 0,8/0,5/0,2$ bar, $\varnothing_{Düse} = 1,4$ mm, $ES = 2$ mm, $v = 3,6$ m/min.

Der so berechnete Mittelwert des betragsmäßigen Gradienten wird für die jeweiligen Bereiche „Schnittabriss“ und „Gutschnitt“ ins Verhältnis gesetzt. Bild 6.8 ist zu entnehmen, dass im Bereich des Schnittabrisses die Prozessemissionen in sämtlichen Blechdicken stärker schwanken als im Gutschnittbereich.

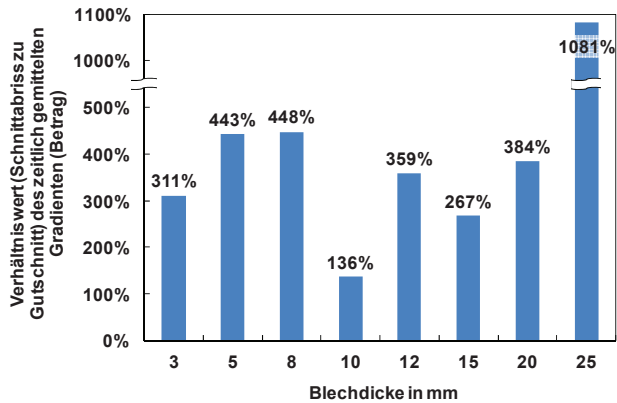


Bild 6.8: Verhältnswerte der zeitlich gemittelten Gradienten (Betrag) vom Schnittabriss- zum Gutschnittbereich.

Das Merkmal der schwankenden Photodiodenintensität ist jedoch als ein nicht eindeutiges Merkmal anzusehen. Wie in Kap. 8.2 gezeigt werden wird, ist auch bei Eintritt von anderen Fehlerbildern wie z.B. Self-Burning mit einer Zunahme von Helligkeitsschwankung zu rechnen. Von daher ist eine zweifelsfreie Aussage hinsichtlich der Erkennbarkeit eines Schnittabrisses in Baustahl mit dem Photodioden-Signal allein nicht möglich. Vielmehr müssen zusätzliche Informationen aus weiteren Sensoren gewonnen und mit den Erkenntnissen des Photodiodensignals kombiniert werden.

6.3 Laser-Leistungsmesskopf 10,6 μm

Die Hypothese, dass sich bei Eintritt eines Schnittabrisses die Laserstrahl-Rückreflexion erhöht, ist darin begründet, dass im Falle des Schnittabrisses der Schnittspalt nach unten hin verschlossen ist und somit keine Laserstrahl-Transmission durch den Spalt mehr erfolgen kann. Dieser Strahlungsanteil verteilt sich folglich aus Energieerhaltungsgründen auf die anderen beiden Wechselwirkungsmechanismen Absorption und Reflexion.

Für die Herbeiführung des Schnittabrisses wurden unterschiedliche Szenarien überprüft, um die Interpretations-Sicherheit hinsichtlich der geforderten Eineindeutigkeit zwischen Merkmal und Prozesszustand zu erhöhen. Anhand von Linearschnitten wurden einzelne Parameter wie der O_2 -Gasdruck oder die Vorschubgeschwindigkeit variiert, um einen Schnittabriss zu erzielen. Im Folgenden behandelt die Versuchsauswer-

tung die diskrete Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit in drei Stufen ($v_{\text{Gutschnitt}} < v_{\text{Grat}} < v_{\text{SA}}$) und ist von den Ergebnissen auf die anderen Versuchs-Szenarien übertragbar. Die Parameter bei $v_{\text{Gutschnitt}}$ entsprechen den Gutschnitt-Parametern, bei v_{Grat} und v_{SA} ist die Vorschubgeschwindigkeit so weit erhöht, dass Gratbildung respektive Schnittabriss eintritt.

In Bild 6.9 ist exemplarisch der zeitliche Verlauf der detektierten rückreflektierten Laserstrahlung sowie der über 500 Werte gleitende Mittelwert für die Baustahl-Blechdicke 15 mm aufgetragen. Das Signalverhalten für die Blechdicken 20 und 25 mm sind diesem Verlauf sehr ähnlich.

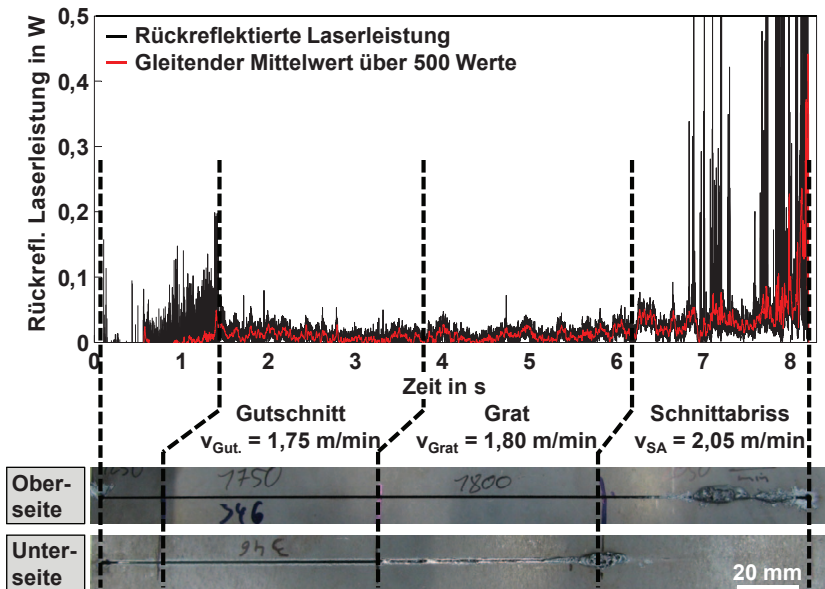


Bild 6.9: Zeitlicher Verlauf der rückreflektierten Laserleistung bei einem Schnittabriss S235, $d = 15$ mm. Linearchnitt von links nach rechts mit schrittweise steigender Vorschubgeschwindigkeit v . Parameter: $P_L = 5,7$ kW, $p_{O_2} = 0,8$ bar, $\varnothing_{\text{Düse}} = 1,4$ mm, $ES = 6$ mm, $v_{\text{Gutschnitt}} = 1,75$ m/min, $v_{\text{Grat}} = 1,80$ m/min, $v_{\text{SA}} = 2,05$ m/min.

Nach Abzug der laserleistungsabhängigen Störstrahlung nach Glg. (5.1) in Höhe von 0,144 W tendiert die tatsächlich von der Prozesszone rückreflektierte Laserstrahlung in den Bereichen Gutschnitt und Gratbildung nahezu gegen null. Im Bereich des Schnittabrisses werden deutliche Peaks mit Spitzenwerten von bis zu 20 W gemessen – die

Peakbildung setzt allerdings um ca. 0,7 s zeitlich verzögert ein (entspricht einer Wegstrecke von ca. 24 mm) und ist blechdickenabhängig. Die Ursache für diesen zeitlichen Versatz ist bisher unbekannt.

Die geringe Reflexion im Gutschnitt- und Gratbildungsbereich ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Blechdicken 15, 20 und 25 mm eine gezünderte Oberfläche aufweisen. Da – wie in Kap. 5.2.3 dargelegt – die Rückreflexionen stark oberflächen-dominant sind, wird ein Großteil der Strahlung im Randbereich des Laserstrahls von der gezünderten Oberfläche absorbiert anstatt reflektiert.

Die Messwerte der Blechdicke 5 mm (Bild 6.10) zeigen ein differenziertes Bild im Vergleich zu den Resultaten der Blechdicken 15 - 25 mm.

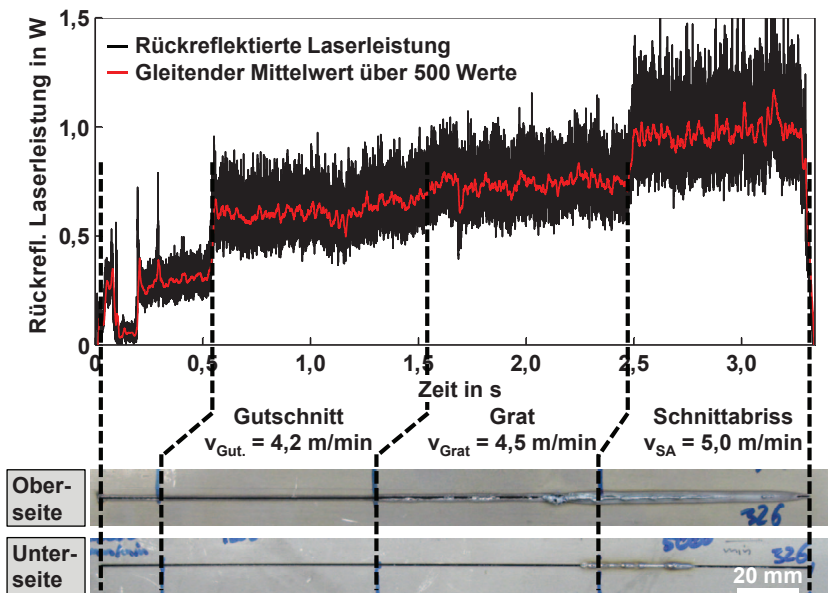


Bild 6.10: Zeitlicher Verlauf der rückreflektierten Laserleistung bei einem Schnittabriss S235, $d = 5$ mm. Linearschnitt von links nach rechts mit schrittweise steigender Vorschubgeschwindigkeit v . Parameter: $P_L = 4,0$ kW, $p_{O_2} = 0,8$ bar, $\varnothing_{Düse} = 1,2$ mm, $ES = 2$ mm, $v_{Gutschnitt} = 4,2$ m/min, $v_{Grat} = 4,5$ m/min, $v_{SA} = 5,0$ m/min.

Im Falle des Schnittabrisses treten keine markanten Peaks mehr auf. Der Mittelwert der detektierten Strahlung steigt proportional zur Vorschubgeschwindigkeit an. Die Zunahme der Rückreflexion bei steigender Vorschubgeschwindigkeit bestätigt die

Vermutung, dass – aufgrund der starken Oberflächendominanz des Signals – bei höherer Vorschubgeschwindigkeit die Überlappungsfläche des Laserstrahls mit der Werkstückoberfläche vergrößert ist. Es kann angenommen werden, dass die Position, an welcher der Werkstoff aufgeschmolzen wird und die Schnittfront beginnt, entgegen der Vorschubrichtung versetzt ist.

Die positive Abhängigkeit des detektierten Rückreflexsignals von der Vorschubgeschwindigkeit ist für sämtliche untersuchten Blechdicken <15 mm festgestellt worden. In Bild 6.11 sind die auf den Gutschnittfall normierten Werte der rückreflektierten Laserleistung über die Vorschubgeschwindigkeit für unterschiedliche Blechdicken aufgetragen.

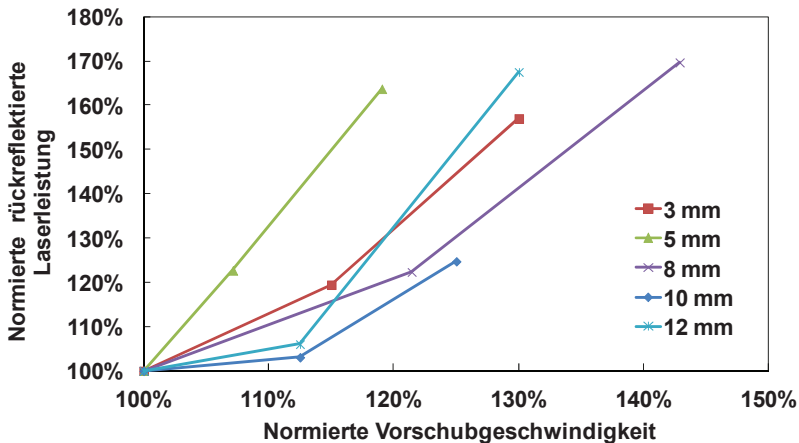


Bild 6.11: Auf den Gutschnittfall normierte rückreflektierte Laserleistung in Abhängigkeit der normierten Vorschubgeschwindigkeit für unterschiedliche Baustahl-Blechdicken. Werte für 100% (Gutschnittfall):

3 mm: 635 mW bei 5,0 m/min,	5 mm: 598 mW bei 4,2 m/min,
8 mm: 222 mW bei 2,8 m/min,	10 mm: 208 mW bei 2,4 m/min,
12 mm: 138 mW bei 2,0 m/min.	

Als Fazit lässt sich festhalten, dass ein über alle Blechdicken gültiger Zusammenhang zwischen dem Laserstrahl-Rückreflex und dem Schnittabriss im Baustahl S235 nicht gefunden wurde. Da über 90% der Laserstrahlung von der Werkstückoberfläche reflektiert wird, ist das Signal stark abhängig von den gewählten Verfahrensparametern (insbesondere der Vorschubgeschwindigkeit) sowie von den Oberflächeneigenschaften des Werkstoffs.

Das Potenzial des Informationsträgers „Laserstrahl-Rückreflex“ hinsichtlich der Erkennung eines Schnittabrisses wird somit insgesamt als niedrig eingeschätzt.

6.4 Druck-/ Durchflussmessung O₂-Schneidgas

6.4.1 Untersuchungen am Schnittpaltmodell

Die Untersuchungen an einem Schnittpaltmodell dienen dazu, grundlegende Grenzen der Erkennbarkeit eines Schnittabrisses auf Basis gasdynamischer Messgrößen zu finden. Hierzu wird der Laserschneidkopf ohne aktiven Laserstrahl jedoch mit aktivem Schneidgas entlang des ortsfesten Schnittpalts eines idealisierten Schnittpaltmodells geführt, siehe Bild 6.12:

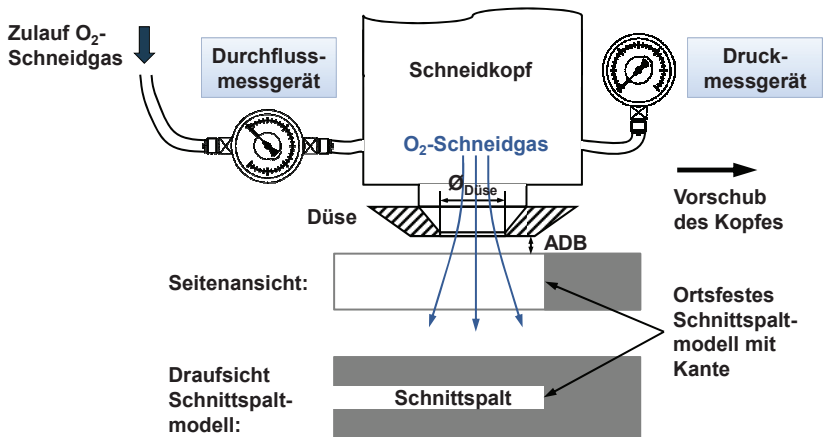


Bild 6.12: Skizze der Gasdruck- und Durchflussmessung im Schnittpaltmodell. ADB = Abstand zwischen Düse und Blech.

Das Modell besitzt eine Schnittpaltbreite von 0,5 mm sowie eine annähernd senkrechte Kante. Durch die Bewegung des Kopfes über den feststehenden Schnittpalt über die Kante bis hin zur Prallplatte (ohne Schnittpaltausprägung) soll der Extremfall eines Schnittabrisses simuliert werden, indem die gasdynamischen Größen einmal mit und einmal ohne das Vorliegen des Schnittpalts verglichen werden. Durch die Überfahrt über die Kante ändert sich die Ausströmbedingung des Schneidgases, was wiederum in eine Druck- und Durchflussänderung resultiert. Die Veränderungen des Gasdrucks und -durchflusses werden mittels eines Druckmessgeräts direkt im Schneidkopf

sowie mittels eines Durchflussmessgeräts im Zulauf zwischen Druckregelventil und Schneidkopf gemessen. Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Düsendurchmessern $\varnothing_{\text{Düse}}$ und Abständen Düse-Blech (ADB) sowie in unterschiedlichen Druckstufen $p_{\text{O}_2, \text{Soll}}$ durchgeführt. Als Resultat zeigt sich, dass bei der Überfahrt vom Schnittpalt auf die Kante nur dann eine Änderung im Gasdruck und -durchfluss messbar ist, wenn der sog. Düsensperrzustand vorliegt. Dieser Düsensperrzustand tritt ein, sobald die Schneidgas-Abströmfläche $A_{\text{abström}}$ kleiner ist als deren Zuströmfläche $A_{\text{zuström}}$:

$$A_{\text{abström}} < A_{\text{zuström}} \quad (6.3)$$

Die Zuströmfläche $A_{\text{zuström}}$ ist hierbei definiert als die Querschnittsfläche der Düsenöffnung. Die Abströmfläche $A_{\text{abström}}$ entspricht der Mantelfläche des Zylinders mit dem Durchmesser der Düse $\varnothing_{\text{Düse}}$ und der Höhe ADB . In Bild 6.13 ist diese Situation bei einer Gasströmung gegen eine Prallplatte dargestellt.

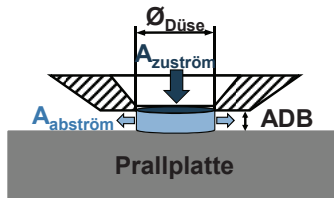


Bild 6.13: Betrachtung der Zu- und Abströmflächen des Schneidgases durch die Düse auf eine Prallplatte. ADB = Abstand zwischen Düse und Blech.

Das Einsetzen dieser geometrischen Größen in Gleichung (6.3) ergibt

$$\varnothing_{\text{Düse}} \cdot \pi \cdot ADB < \left(\frac{\varnothing_{\text{Düse}}}{2} \right)^2 \pi, \quad (6.4)$$

woraus – nach ADB aufgelöst – der Formalismus des Düsensperrzustands folgt:

$$ADB < \frac{\varnothing_{\text{Düse}}}{4}. \quad (6.5)$$

Demzufolge ist nur dann eine Änderung im Gasdruck und -durchfluss messbar, wenn der Abstand zwischen Düse und Blech ADB kleiner als ein Viertel des Düsendurchmessers $\varnothing_{\text{Düse}}$ ist. Dieser Zusammenhang konnte in den experimentellen Untersuchungen am Schnittpaltmodell verifiziert werden. Wird der in Glg. (6.5) dargestellte Dü-

sensperrzustand eingehalten, also bei Verwendung eines möglichst großen Düsendurchmessers $\varnothing_{\text{Düse}}$ bei gleichzeitig geringem Abstand Düse-Blech ADB , ist eine maximale Veränderung im Gasdruck und -durchfluss messbar. In Bild 6.14 ist exemplarisch der Verlauf des Gasdrucks und -durchflusses bei drei unterschiedlich vorgegebenen Soll-Drücken $p_{O_2, \text{Soll}}$ dargestellt, wobei in diesem Versuch die Bedingung des Düsenperrzustands erfüllt ist (großer Düsendurchmesser von 2,3 mm bei gleichzeitig geringem ADB von 0,3 mm). Es ist zu erkennen, dass der Gasdruck beim Überfahren der Kante einen kurzzeitigen Druckanstieg erfährt, was auf das strömungstechnische Hindernis der Prallplatte zurückzuführen ist. Da der Gasdruck maschinenseitig eine regelungstechnische Sollgröße darstellt, wird dieser von dem Gasdruckregelventil auf deren ursprüngliche Soll-Größe zurück geregelt. Diese Gasdruck-Anpassung resultiert in einer simultanen Reduzierung des Gasdurchflusses.

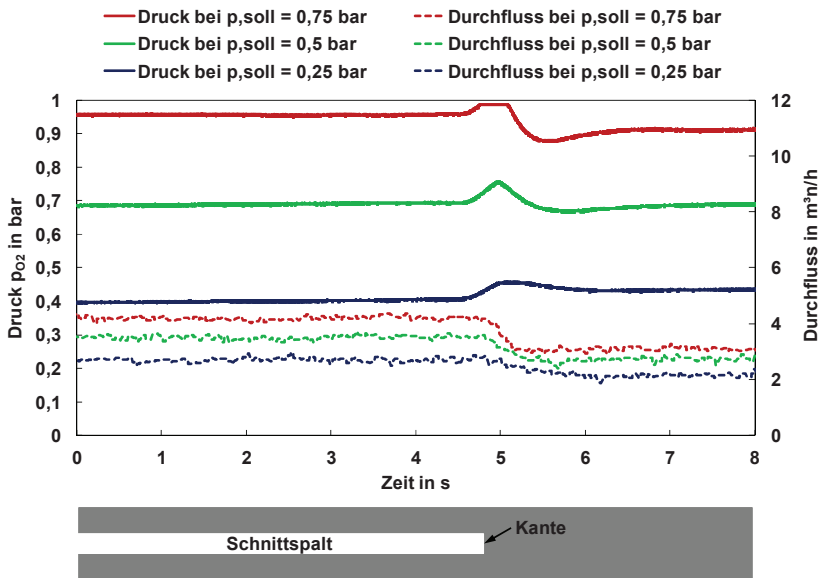


Bild 6.14: Gasdruck und -durchfluss bei unterschiedlichen Soll-Druck-Vorgaben $p_{O_2, \text{Soll}}$ bei Überfahren der Kante im Schnittspaltmodell; Düsendurchmesser $\varnothing_{\text{Düse}} = 2,3$ mm, Abstand Düse-Blech $ADB = 0,3$ mm → Düsenperrzustand liegt vor.

Eine quantitative Auswertung der jeweiligen Druck- und Durchflussänderung beim Überfahren des Schneidkopfes über die Kante des Schnittspaltmodells liefert Tabelle 6.1. Die prozentuale Druckänderung wird hierbei als Maximalwert des Gasdrucks bezogen auf das mittlere Gasdruckniveau vor der Kantenüberfahrt ermittelt, während die

Durchflussänderung als prozentuale Veränderung des mittleren Niveaus vor und nach der Kantenüberfahrt berechnet wird. Versuche mit $ADB = 0,7$ mm und $1,0$ mm sind hierbei nicht mit aufgeführt, da bei diesen Konfigurationen zu keiner Zeit das notwendige Kriterium des Düsenperrzustands vorgelegen hat und somit folgerichtig keine Änderung des Gasdrucks und -durchflusses messbar war.

Es ist hervorzuheben, dass bei den Versuchen, bei welchen der Düsenperrzustand erfüllt ist, eine signifikante Änderung des Gasdrucks und -durchflusses erkennbar ist. Die Änderungen werden umso deutlicher, je geringer der Abstand Düse-Blech und je größer der Düsendurchmesser wird. Im hier dargestellten besten Fall mit $ADB = 0,3$ mm und $\varnothing_{\text{Düse}} = 2,3$ mm beträgt die Druckänderung je nach angewähltem Soll-druckniveau zwischen 6,5% und 12,7% bei gleichzeitiger Durchflussreduzierung um über 20% (vgl. letzte Zeile in Tabelle 6.1).

ADB in mm	$\varnothing_{\text{Düse}}$ in mm	Druckänderung in %			Durchflussänderung in %			Düsenperr- zustand
		$p_{O_2, \text{Soll}, 1}$	$p_{O_2, \text{Soll}, 2}$	$p_{O_2, \text{Soll}, 3}$	$p_{O_2, \text{Soll}, 1}$	$p_{O_2, \text{Soll}, 2}$	$p_{O_2, \text{Soll}, 3}$	
0,5	0,8	0,0	0,0	0,0	-5,5	+4,9	+2,9	-
	1,4	+5,6	+3,7	+3,0	-4,9	-5,6	-6,5	-
	2,3	+7,1	+6,7	+6,9	-16,5	-16,2	-12,4	✓
0,3	0,8	0,0	0,0	0,0	-7,8	-3,8	-1,7	-
	1,4	+8,2	+5,5	+6,0*	-17,0	-17,0	-16,2	✓
	2,3	+12,7	+9,0	+6,5*	-20,0	-21,7	-25,9	✓

Tabelle 6.1: Druck- und Durchflussänderung des O_2 -Gases beim Überfahren der Kante im Schnittspaltmodell. $p_{O_2, \text{Soll}, 1} = 0,25$ bar, $p_{O_2, \text{Soll}, 2} = 0,5$ bar, $p_{O_2, \text{Soll}, 3} = 0,75$ bar.

*: Extrapolierter Wert (Messbereichsbegrenzung des Druckmessgeräts).

Im folgenden Kapitel gilt es zu überprüfen, inwiefern die Erkenntnisse des Schnittspaltmodells auf den realen Laserschneidprozess übertragbar sind.

6.4.2 Untersuchungen am realen Laserschneidprozess

Zur Verifizierung der Erkenntnisse aus den Versuchen am Schnittspaltmodell wurden Schnittabriss-Versuche in den Baustahl-Blechdicken 5, 10, 15, 20 und 25 mm durchgeführt. Der Schnittabriss wurde durch eine stufenhafte Anhebung der Vorschubgeschwindigkeit von $v_{\text{Gutschnitt}}$ (Gutschnitt) über v_{Grat} (Gratbildung) auf v_{SA} (Schnittabriss) provoziert. Nach dem Einstechvorgang erfolgt zur Beruhigung der Gasdynamik eine Ausblaszeit von 5 Sekunden ($v_0 = 0$), wobei der ADB dem des Einstechvorgangs entspricht ($ADB = 5$ mm). Erst zu Beginn des Schneidvorgangs ($v_{\text{red.}}$) erfolgt die Schneidkopfabenkung auf den Ziel- ADB (≤ 1 mm).

In Bild 6.15 und Bild 6.16 sind exemplarisch die Resultate der Versuche mit dem 15 mm dicken Blech dargestellt. In Bild 6.15 erfüllen die Versuchsparameter die in Glg. (6.5) hergeleitete Bedingung des Düsensterrzustands nicht. Somit ist folgerichtig weder bei der Absenkung des Schneidkopfes vom Einstechabstand auf den Zielabstand von $ADB = 1$ mm (Übergang von v_0 auf $v_{red.}$) noch bei der Ausbildung des Schnittabrisses (Übergang von v_{Grat} auf v_{SA}) eine Änderung des Gasdrucks und -durchflusses messbar. Der Gasdruck bleibt konstant bei 0,65 bar, der Durchfluss bei ca. 2,8 m³n/h.

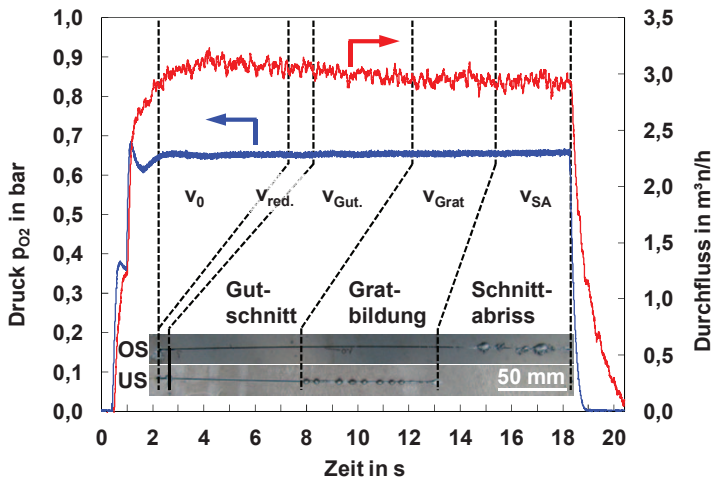


Bild 6.15: Sauerstoff-Gasdruck und -Durchfluss bei Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit. Parameter: $d = 15$ mm, $P_L = 4,8$ kW, $p_{O_2} = 0,7$ bar, $ADB = 1,0$ mm, $\varnothing_{Düse} = 1,4$ mm, $ES = 4$ mm, $v_0 = 0$, $v_{red.} = 0,6$ m/min, $v_{Gutschnitt} = 1,55$ m/min, $v_{Grat} = 1,8$ m/min, $v_{SA} = 2,1$ m/min. **Kein Düsensterrzustand.** OS: Oberseite, US: Unterseite.

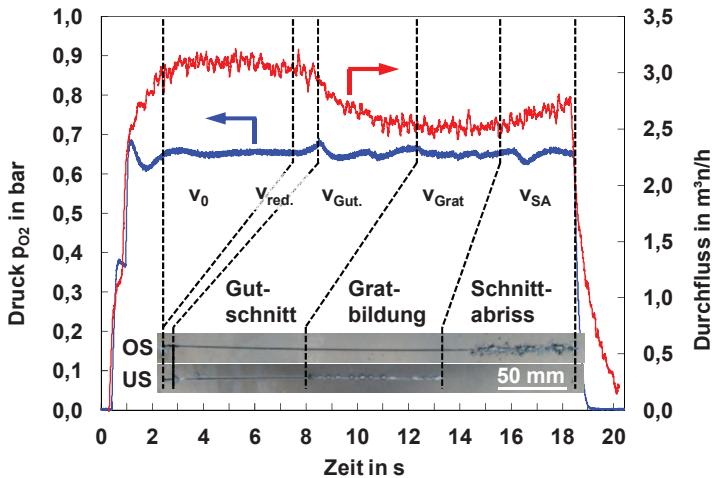


Bild 6.16: Identischer Versuch wie in Bild 6.15, außer: $ADB = 0,3 \text{ mm} \rightarrow$ Düsensperrzustand. OS: Oberseite, US: Unterseite.

Bei dem in Bild 6.16 gezeigten Versuch ist der ADB im Schneidbetrieb von 1,0 auf 0,3 mm so weit verringert, dass mit der eingesetzten Düse ($\varnothing_{\text{Düse}} = 1,4 \text{ mm}$) der Düsensperrzustand vorliegt. Geometrische Veränderungen im Schnittspalt wirken sich auf die Gasdynamik und somit auf den Gasdruck und -durchfluss aus. Während des Einstechvorgangs und der Ausblaszeit ($v_0 = 0$) ist im Vergleich zu Bild 6.15 ein identischer Signalverlauf festzustellen, da hierbei der Schneidkopf den gleichen ADB von 5 mm aufweist. Erst zu Beginn des Laserschnitts mit $v_{\text{red.}}$ wird der Kopf auf Schneidabstand $ADB = 0,3 \text{ mm}$ gesenkt. Dies führt aufgrund des Sperrzustands zu einem strömungstechnischen Hindernis, was folgerichtig in einen kurzzeitigen Druckanstieg um ca. 6% resultiert. Durch die einsetzende Regelung des Druckregelventils auf den ursprünglichen Gasdruck-Sollwert verringert sich entsprechend der Gasdurchfluss auf ca. $2,5 \text{ m}^3/\text{n/h}$. Beim Einsetzen des Schnittabrisses im Bereich von v_{SA} ist der Schnittspalt nach unten verschlossen und die Schlacke strömt entgegen der Laser-Vorschubrichtung nach hinten. Wie in Kap. 4.2.1 beschrieben und anhand der Probenfotos in Bild 6.15 und Bild 6.16 ersichtlich, tritt die Schlacke aus dem Schnittspalt ebenfalls nach oben aus. Messwerte des Widerstandsmessgeräts zwischen Düse und Blech bestätigen einen elektrischen Kurzschluss zwischen Düse und Blech, welcher durch herausquellende Schlacketrophen verursacht wird. Die kapazitive Abstandsregelung zwischen Düse und Werkstück vergrößert hierauf hin automatisch den ADB für eine definierte Zeitdauer. Diese Düsen-Anhebung geht einher mit einer kurzzeitigen Gas-

druckverringering im Bereich von v_{SA} , was aufgrund der Gasdruck-Regelung in einen Durchflussanstieg auf etwa 2,75 m³n/h (+10%) mündet.

Somit ist nachgewiesen, dass auch beim realen Niederdruck-Laserschneidprozess eine Schnittabrisserkennung mithilfe der strömungsmechanischen Größen Schneidgas-Druck und -Durchfluss möglich ist – sofern die notwendige Randbedingung des „Düsensterrzustands“ (Glg. (6.5)) vorliegt.

6.5 Zusammenfassung Schnittabriss Baustahl S235

Die zeitlich synchronen und koaxialen Aufnahmen zweier Kameras, bei welchen die erste Kamera auf die Blechoberseite und die zweite Kamera auf die -unterseite fokussiert ist, belegen, dass beim Schnittabriss die untere Schnittfrontkante – selbst bei Verwendung einer Langlochdüse – außerhalb des durch die Düse begrenzten Sichtfeldes wandert. Die nach hinten gegen die Düsenberandung strömenden Schlacketropfen können erkannt werden, wenn diese eine gewisse Größe erreichen.

Während des Schnittabrisses fluktuieren die Prozessemissionen sehr stark und die Photodiode registriert eine Zunahme des mittleren, betragsmäßigen Gradienten (zeitliche Ableitung des Signals) um mehr als 260%.

Die Messung des Laserstrahl-Rückreflexes wird stark von der Eigenschaft dominiert, dass das rückreflektierte Signal zu über 90% von der Werkstückoberfläche reflektiert wird. Somit zeigt sich eine starke Abhängigkeit des detektierten Signals von den gewählten Verfahrensparametern sowie den Oberflächeneigenschaften des Werkstücks. Ein über alle Blechdicken (1 - 25 mm) gültiges Merkmal konnte nicht gefunden werden.

Die Untersuchung der strömungsdynamischen Größen Schneidgas-Druck und -Durchfluss beim Schnittabriss während des Niederdruck-Brennschneidprozesses von Baustahl S235 zeigt, dass eine Rückwirkung des verschlossenen Schnittspalts auf diese Kenngrößen nur dann gegeben ist, wenn im sog. Düsensterrzustand geschnitten wird. Die geforderte Kombination von großem Düsendurchmesser bei gleichzeitig geringem Düsenabstand liegt jedoch bei den üblicherweise eingesetzten Schneidparametern nicht vor. Eine Schnittabriss-Detektion mittels des Gasdrucks und -durchflusses erscheint mit den heutigen Standard-Schneidparametern somit nicht möglich.

In Tabelle 6.2 sind die für den Schnittabriss Baustahl S235 relevanten Prozessmerkmale sowie deren Ausprägungen zusammengefasst.


Fehlschnitt	Prozessmerkmal	Ausprägung
Schnittabriss Baustahl S235 	Schnittfrontneigung: Versatz der oberen zur unteren Schnittfrontkante	Kamera: <ul style="list-style-type: none"> Untere Schnittfrontkante befindet sich außerhalb des durch die Düse begrenzten Sichtfeldes
	Schlacketropfen im Nachlauf strömen gegen Düsenberandung	Kamera: <ul style="list-style-type: none"> Erkennbar bei Blechdicke $d = 15 \text{ mm}$
	Sekundärstrahlung: Niveau und zeitliche Veränderung der integralen Wärmestrahlung	Photodiode: <ul style="list-style-type: none"> Zunahme des betragsmäßigen Gradienten um $>260\%$
	Primärstrahlung: Erhöhung Laserstrahl-Rückreflexion	Leistungsmesskopf: <ul style="list-style-type: none"> Dünne Bleche $<15 \text{ mm}$: Signaleffekte durch Parametervariation (v, p_{O_2}) verursacht Dicke Bleche $\geq 15 \text{ mm}$: Kein Signal im Gutschnitt; Starke Schwankungen im Schnittabriss
	Sauerstoff-Schneidgas: Änderung Druck und Durchfluss	Druck- und Durchflussmessgerät: <ul style="list-style-type: none"> Messbare Änderung des Gasdrucks und -durchflusses nur im Sperrzustand der Düse; Sperrzustand momentan nicht praxisrelevant

Tabelle 6.2: Prozessmerkmale sowie deren Ausprägung im Fehlschnittfall Schnittabriss Baustahl S235.

7 Experimentelle Ergebnisse zur Schnittabriss-Detektion in Edelstahl 1.4301

Analog zum Schnittabriss im Baustahl S235 ist dieser Fehlerfall im Edelstahl 1.4301 definiert als das nicht vollständige Durchtrennen des Bleches über die komplette Blechdicke. Die Ursache für diesen Fehlschnitt ist häufig in einer zu geringen Streckenenergie (zu geringe Laserleistung P_L , zu hohe Vorschubgeschwindigkeit v) oder in einer zu starken bzw. schnellen Richtungsänderung der Konturbearbeitung zu sehen. In der Praxis ist der Schnittabriss eng verbunden mit der Entstehung von Plasma (vgl. Kap. 4.1 und Kap. 4.2.2), welches für eine Defokussierung und Absorption der einfallenden Laserstrahlung sorgt. Die Detektion des Prozessmerkmals Plasmabildung hat somit oberste Priorität. Hierfür wird zum einen eine Kamera eingesetzt, welche die Plasmaemissionen optisch detektiert (Kap. 7.1), zum anderen ein elektrisches Widerstandsmessgerät, welches die durch das Plasma hervorgerufene Änderung des elektrischen Widerstands zwischen der Laserschneiddüse und dem Werkstück misst (Kap. 7.2).

Des Weiteren wird evaluiert, inwiefern der nach unten verschlossene Schnittspalt eine Erhöhung des Laserstrahl-Rückreflexes verursacht. Zur Detektion der Primärstrahlung kommt ein Laser-Leistungsmesskopf zum Einsatz (Kap. 7.3).

7.1 Kamera

Der Schnittabriss wird – vergleichbar den Versuchen im Baustahl S235 – durch eine lineare Geschwindigkeitsrampe herbeigeführt. In Bild 7.1 ist exemplarisch eine 8 mm dicke Edelstahl-Probe dargestellt, bei welcher die jeweilige Start- bzw. End-Geschwindigkeit 1,5 m/min respektive 3,0 m/min beträgt. Die Referenz-Geschwindigkeit, bei welcher sich ein Gutschnitt einstellt, beträgt für diese Blechdicke und Laserleistung $v_{\text{Gutschnitt}} = 2,1 \text{ m/min}$. Die Trenngrenze, also jene Geschwindigkeit, ab welcher der Schnitt abreißt, beträgt in diesem Experiment 2,62 m/min.

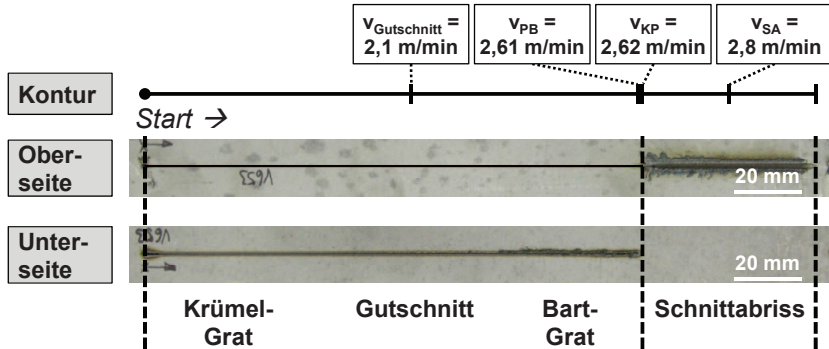


Bild 7.1: Schnittabriss Edelstahl 1.4301. Blechdicke: $d = 8 \text{ mm}$. Lineare Geschwindigkeitsrampe von $v = 1,5 \text{ m/min}$ bis $v = 3,0 \text{ m/min}$. $P_L = 6,0 \text{ kW}$, $p_{N2} = 20 \text{ bar}$, $\varnothing_{\text{Düse}} = 2,3 \text{ mm}$, $ES = -3 \text{ mm}$.

Für die Prozessbeobachtung wurde die NIR-A-Kamera im Wellenlängenbereich um 920 nm koaxial eingesetzt. In Bild 7.2 sind mehrere aus je fünf Einzelbildern bestehende Bildsequenzen der jeweiligen relevanten Abschnitte zu sehen. Die einzelnen Bilder folgen mit einem zeitlichen Abstand von etwa $0,86 \text{ ms}$ (entsprechend einer Bildwiederholrate von 1160 fps).

In der obersten Zeile ist der Bereich des Gutschnitts ($v_{\text{Gutschnitt}} = 2,1 \text{ m/min}$) mit einem homogenen zeitlichen Verlauf der Prozessemissionen wiedergegeben.

Bei Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit (zweite Zeile) steigt die detektierte integrale Helligkeit an, was mit dem bereits in Kap. 6.1 erläuterten, positiven Zusammenhang der Vorschubgeschwindigkeit mit der Temperatur auf der Schmelzfilmoberfläche erklärt werden kann. Mit steigender Schmelzfilmtemperatur werden schließlich durch den Richardson-Effekt [17] mehr und mehr Elektronen aus der Schmelzfilmoberfläche freigesetzt, sodass die Elektronendichte steigt. In diesem Umfeld stellt der Absorptionsprozess der inversen Bremsstrahlung einen zunehmend effizienten Absorptionsmechanismus dar (vgl. Kap. 2.4.2 und Kap. 4.2.2). Die so beschleunigten Elektronen erzeugen durch Kollision mit Gasteilchen weitere Elektronen, welche wiederum mittels des Prozesses der inversen Bremsstrahlung zur Laserstrahlabsorption beitragen. Auffallend ist jedoch, dass das Vorhandensein des Plasmas in der Schnittfuge nur von kurzer Dauer ist (sog. „Plasma-Blitzen“).

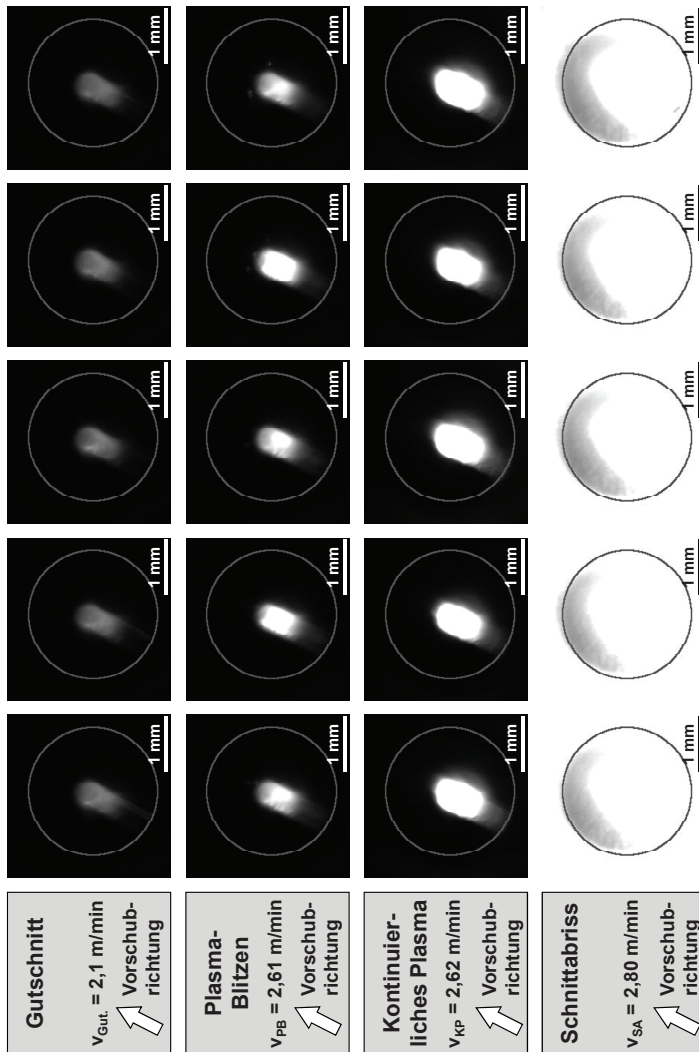


Bild 7.2: Schnittabriss Edelstahl 1.4301. Koaxiale Aufnahme mit der NIR-A-Kamera von der Versuchsprobe aus Bild 7.1. NIR-A-Kamera: 224 x 224 Pixel, $t_{\text{exp}} = 200 \mu\text{s}$, 1160 fps. Markierung: Düsendurchmesser.

1. Zeile: Gutschnitt mit $v_{\text{Gutschnitt}} = 2,10 \text{ m/min}$.
2. Zeile: Plasma-Blitzen kurz vor dem Schnittabriss mit $v_{\text{PB}} = 2,61 \text{ m/min}$.
3. Zeile: Kontinuierliches Plasmaleuchten mit $v_{\text{KP}} = 2,62 \text{ m/min}$.
4. Zeile: Schnittabriss mit $v_{\text{SA}} = 2,80 \text{ m/min}$.

Bei weiterer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit geht das Plasma-Blitzen über in ein kontinuierliches Plasmaleuchten (dritte Zeile). Ein Größenvergleich der Plasma-Wolke zwischen dem Plasma-Blitzen und dem kontinuierlichen Plasmaleuchten verdeutlicht, dass das Plasma-Blitzen seinen Ursprung im Schnittspalt hat. Dies erscheint bei Betrachtung der ortsabhängigen Schnittfronttemperatur als nachvollziehbar, da die Schnittfronttemperatur mit zunehmender Wegstrecke entlang der Schnittfront nach unten wurzelförmig ansteigt [92], sodass im unteren Bereich der Schnittfront vermehrt Elektronen aus der Schnittfrontschmelze freigesetzt werden. Das kontinuierliche Plasma-Leuchten wandert schließlich nach oben aus dem Schnittspalt, was an der größeren Breite des Leuchtflecks bezogen auf die Schnittspaltbreite erkannt werden kann.

Beim eingetretenen Schnittabriss in der vierten Zeile von Bild 7.2 ist die Plasma-Wolke aus dem Schnittspalt herausgetreten und befindet sich oberhalb des Werkstücks.

Beim Vorhandensein des Plasmas kommen die in Kap. 4.2.2 beschriebenen Wechselwirkungsmechanismen des Laserstrahls mit der Plasma-Fackel voll zum Tragen. Temperatur- und Dichtegradienten im Plasma sorgen sowohl für eine Defokussierung des Laserstrahls als auch für eine Ablenkung des Laserstrahls bezogen auf seine ursprüngliche Einfallrichtung (vgl. Bild 7.3, [69]).

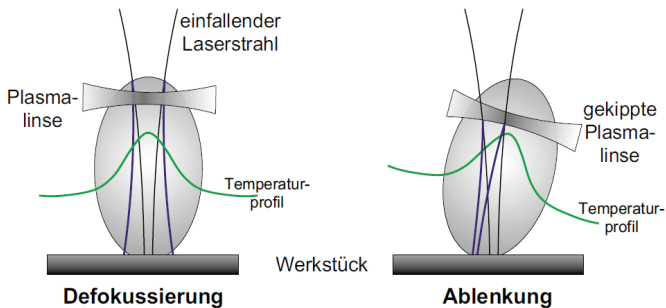


Bild 7.3: Schematische Darstellung des Einflusses einer Brechungsindexveränderung (Plasmalinse) auf die Strahlpropagation des einfallenden Laserstrahls [69].

Des Weiteren wird ein gewisser Anteil der einfallenden Laserleistung im Plasma absorbiert, indem die Laserstrahlung einen Teil der elektromagnetischen Energie mittels inverser Bremsstrahlung an die Elektronen im Plasma übergibt. All jene Mechanismen führen dazu, dass der Aufschmelzprozess in der Schnittfuge massiv gestört ist und somit nicht mehr das komplette Schnittspaltvolumen verflüssigt wird. Anhand des

Längsschliffs des im Bild 4.11 dargestellten Schnittabrisses kann abgeschätzt werden, dass nur noch ca. das obere Viertel der Blechdicke aufgeschmolzen wird. Die Schmelze wird aufgrund des hohen Stickstoff-Schneidgasdrucks ($p_{N_2} = 20$ bar) sowie des Plasmadrucks entgegen der Vorschubrichtung nach rechts und links hinten weggeblasen, sodass eine Schweißfurche auf der Blechoberseite entsteht.

Im folgenden Kapitel 7.2 wird analysiert, inwiefern die Plasmaausprägung nicht nur optisch, sondern auch elektrisch mittels eines Widerstandsmessgerätes detektiert werden kann.

7.2 Widerstandsmessgerät

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, bildet sich bei einem Schnittabriss in Edelstahl 1.4301 ein laserinduziertes Plasma in der Wechselwirkungszone des Laserstrahls mit dem Werkstück aus. Die Messung des elektrischen Widerstands zwischen der metallischen Laserschneiddüse und der mit Masse verbundenen Werkstückoberfläche soll aufzeigen, inwiefern das Plasma auch elektrisch erfasst werden kann (Versuchsaufbau: siehe Kap. 5.2.4).

Im Gutschnittfall sorgt das Dielektrikum (Schneidgas, Metaldampf, Umgebungsluft) für einen sehr hohen elektrischen Widerstand zwischen der sich im Abstand von typischerweise 1 mm befindlichen Düse und dem Blech, da praktisch keine freien Ladungsträger vorhanden sind. Die elektrische Schaltung des Widerstandsmessgerätes ist so ausgelegt, dass es in jenem Fall einen sehr hohen elektrischen Widerstand von ca. 350 M Ω misst.

Im Bereich des Schnittabrisses zeichnet sich die große Anzahl an freien Ladungsträgern (Elektronen und Ionen) in der Plasmawolke verantwortlich für eine signifikante Reduzierung des elektrischen Widerstands um zwei bis drei Größenordnungen auf ca. 1 M Ω . Dieser Effekt konnte in allen untersuchten Blechdicken ($d = 5, 10, 15$ mm; $n = 3$) reproduzierbar nachgewiesen werden, vgl. Bild 7.4.

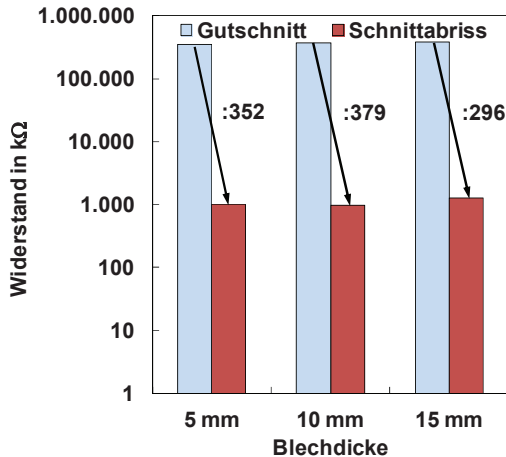


Bild 7.4: Vergleich des zeitlich gemittelten elektrischen Widerstandswerts zwischen Laserschneiddüse und Blech während Gutschnitt und Schnittabriss (logarithmische Skalierung). Im Falle des Schnittabrisses reduziert sich der Widerstand um zwei bis drei Größenordnungen.

In Bild 7.5 ist der zeitliche Verlauf der Plasmaentstehung des Versuches aus Bild 7.2 nachvollziehbar. Im Gutschnittfall wird ein sehr hoher elektrischer Widerstand von 350 MΩ gemessen. Der Ursprung der Plasma-Entstehung befindet sich im Schnittspalt. Darauf deutet sowohl die räumliche Begrenzung der Plasma-Leuchterscheinung durch die rechte und linke Schnittspaltwand, als auch eine im Vergleich zum Schnittabriss nur geringfügige Reduzierung des gemessenen elektrischen Widerstandswertes hin. Beim Eintritt des Schnittabrisses verringert sich der Widerstand signifikant um mehr als drei Größenordnungen.

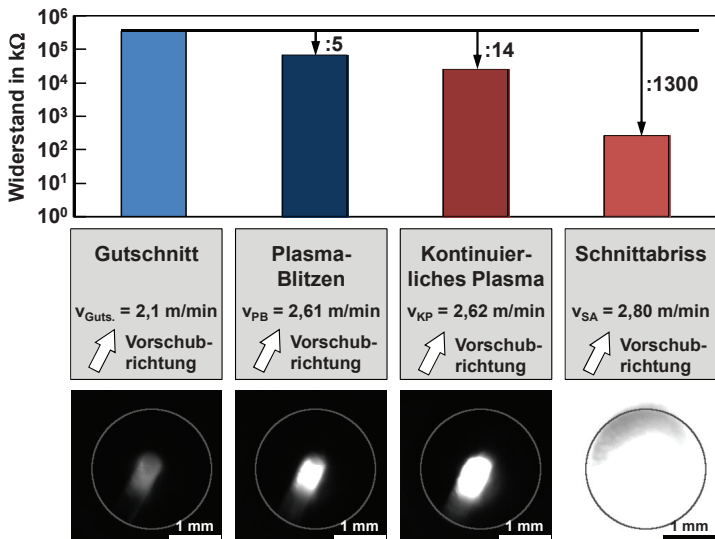


Bild 7.5: Elektrischer Widerstand zwischen Düse und Blech während der vier Bereiche Gutschnitt, Plasma-Blitzen, Kontinuierliches-Plasma, Schnittabriss (logarithmische Skalierung). In der unteren Zeile sind die zeitlich zugeordneten Aufnahmen der coaxialen Kamera dargestellt. Parameter siehe Bild 7.2.

7.3 Laser-Leistungsmesskopf 10,6 μm

Im folgenden Kapitel wird der Schnittabriss einzig durch eine starke Änderung der Vorschubrichtung (bei konstanten Gutschnitt-Parametern) herbeigeführt. Dadurch ist es möglich, die rückreflektierte Primärstrahlung ohne eine Variation von externen Parametern wie bspw. der Laserleistung oder Vorschubgeschwindigkeit zu analysieren. In Bild 7.6 sind die geschnittene Kontur sowie exemplarisch die Ober- und Unterseite einer 10 mm dicken Edelstahl 1.4301 Probe dargestellt. In der linken Konturhälfte des Mänders (Gutschnitt-Bereich) ist der Eckenradius ausreichend groß dimensioniert (1 mm bei $d = 5 \text{ mm}$, 2 mm bei $d = 10 \text{ mm}$, 3 mm bei $d = 15 \text{ mm}$), sodass der Laserschnitt nicht abreißt. Bei der zweiten „Kurve“ handelt es sich um eine Spitzkehre ohne programmierten Eckenradius. Die Änderung der Vorschubrichtung ist in jenem Fall so stark, dass die gekrümmte Schnittfront dem Richtungswechsel nicht mehr folgen kann und der Laserschnitt somit abreißt. Mit Eintritt des Schnittabrisses entsteht – vergleichbar mit den Resultaten aus Kap. 4.2.2 und Kap. 7.1 – die charakteristische

„Schweißbraupe“ auf der Blechoberseite. Die Blechunterseite bestätigt anschaulich, dass kein Schnittpalt mehr ausgeprägt ist.

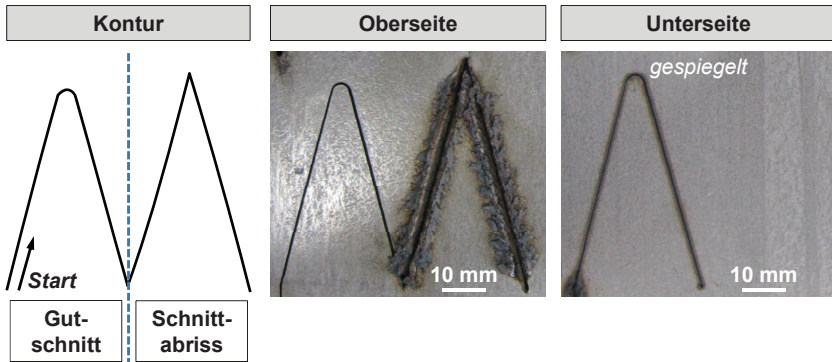


Bild 7.6: Kontur (Zickzack-Mäander) zur Herbeiführung des Schnittabrisses in Edelstahl 1.4301 (links) sowie das erzielte Bearbeitungsergebnis (Mitte: Oberseite; rechts: Unterseite).

Beim Vergleich der detektierten, rückreflektierten Laserstrahlung zwischen Gut-schnitt- und Schnittabriss-Bereich ist in Bild 7.7 ein deutlicher Unterschied im Signalverhalten zu erkennen. Die Störstrahlung nach Gleichung (5.1) ist hierbei bereits berücksichtigt und abgezogen. Der Verlauf des Rohsignals (schwarze Kurve) sowie dessen über 500 Werte gleitenden Mittelwerts (rote Kurve) beginnen bei Eintritt des Schnittabrisses auf annähernd identischem mittleren Niveau stark zu schwanken. Für die starken Signalschwankungen wird die beim Schnittabriss auf der Oberseite entstehende Kraterbildung mit einer wechselnden Oberflächenstruktur verantwortlich gemacht. Des Weiteren ist vorstellbar, dass die rückreflektierte Laserstrahlung beim erneuten Propagieren durch die nicht stationäre Plasmafackel (vgl. Bild 7.3) mit einer hohen zeitlichen Dynamik defokussiert und/oder abgelenkt wird.

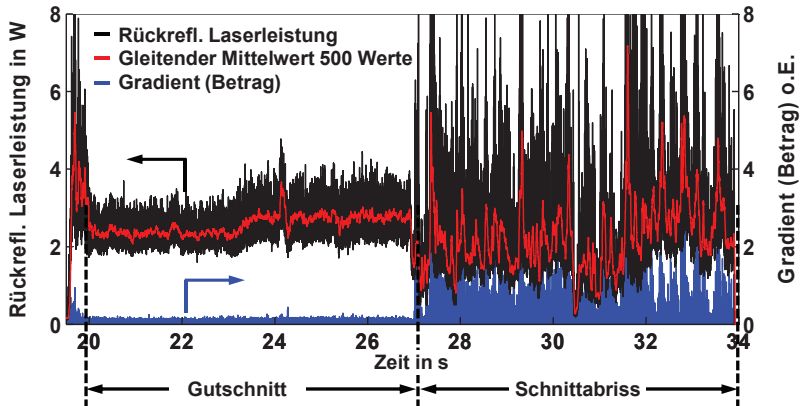


Bild 7.7: Zeitlicher Verlauf der rückreflektierten Laserleistung (schwarz), deren gleitender Mittelwert (rot) und deren Gradienten (blau) bei einem Schnittabriss Edelstahl 1.4301, $d = 15$ mm. Kontur: Zickzack-Mäander. Parameter: $P_L = 6,0$ kW, $p_{N_2} = 22$ bar, $v = 0,71$ m/min, $\varnothing_{Düse} = 2,7$ mm, $ES = -11$ mm.

Die quantitative Auswertung der Schwankungen erfolgt erneut mittels des zeitlichen, betragsmäßigen Gradienten (blaue Kurve), da dieser erstens vom Absolutwert unabhängig ist und zweitens sowohl bei einer Zunahme der Frequenz als auch bei einer Zunahme der Amplitudenausschläge ansteigt.

Bild 7.8 ist zu entnehmen, dass der zeitliche Mittelwert der rückreflektierten Laserleistung während des Schnittabrisses im Vergleich zum Gutschnitt-Bereich annähernd identisch ist (insbesondere für die Blechdicken 10 und 15 mm). Der Vergleich des zeitlich gemittelten Gradientenverlaufs in Bild 7.9 offenbart die signifikante Zunahme der Signalschwankungen im Bereich des Schnittabrisses um 164%, 216% bzw. 358% je nach Blechdicke.

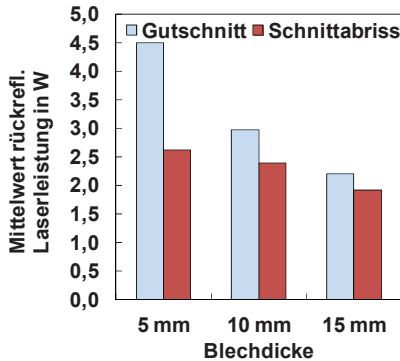


Bild 7.8: Mittelwert der rückreflektierten Laserleistung.

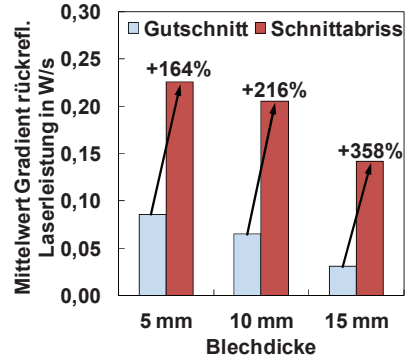


Bild 7.9: Mittelwert des Gradienten der rückreflektierten Laserleistung.

Dieses Signalverhalten (Zunahme der Schwankungen auf nahezu identischem mittleren Niveau) konnte bei allen untersuchten Blechdicken (5, 10, 15 mm) festgestellt werden. Ob das Signal jedoch als uneindeutig, d.h. als eindeutig auf das Fehlerbild Schnittabriss rückschließbar, zu bewerten ist, müssen weitere Untersuchungen, insbesondere der Vergleich mit anderen Fehlerbildern wie beispielsweise Gratbildung und erhöhte Rauigkeit etc., ergeben.

Weiter sei erwähnt, dass im Falle des Schnittabrisse temporär sehr kurze, jedoch über der Zerstörschwelle des Sensorchips liegende Intensitäts-Peaks der CO₂-Laserstrahlung auf die Detektorfläche auftreffen, sodass der Sensor zerstört wird. Diese Tatsache erschwert eine Implementierung des Leistungsmesskopfs in eine industrielle Laserschneidmaschine zum Zwecke der Fehlschnitterkennung.

7.4 Zusammenfassung Schnittabriss 1.4301

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Detektion des Schnittabrisse im Edelstahl 1.4301 mittels unterschiedlicher Messmethoden möglich ist. Das Auftreten von Plasmabildung kann als charakteristische Begleiterscheinung des Schnittabrisse angesehen werden. Die Plasmabildung kann sowohl optisch mithilfe einer Kamera als auch elektrisch mithilfe eines Widerstandsmessgerätes zuverlässig und uneindeutig diagnostiziert werden. Die optische Prozessbeobachtung ermöglicht es zudem, die Plasma-

bildung in Form von Plasma-Blitzen bereits vor dem Auftreten des Schnittabrisses zu erkennen.

Der Leistungsmesskopf registriert im Falle des Schnittabrisses im zeitlichen Mittel einen geringeren Wert an zurückreflektierter Laserleistung als im Gutschnittfall. Charakteristisch ist jedoch die signifikante Zunahme der Signal-Schwankungen, welche sich in einer Steigerung des mittleren, betragsmäßigen Gradienten um $>160\%$ niederschlägt.

Eine Übersicht über die beim Schnittabriss Edelstahl 1.4301 relevanten Prozessmerkmale sowie deren Ausprägungen findet sich in Tabelle 7.1.


Fehlschnitt	Prozessmerkmal	Ausprägung
Schnittabriss Edelstahl 1.4301 	Sekundärstrahlung: Plasmabildung	Kamera: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Ankündigung</u>: Plasma-Blitzen in der Schnittfuge ▪ <u>Eintritt</u>: Kontinuierliches Plasma oberhalb des Werkstücks
		Elektr. Widerstandsmessgerät: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Eintritt</u>: Reduzierung des Widerstands um 2 - 3 Größenordnungen
	Primärstrahlung: Änderung der Laserstrahl-Rückreflexion	Leistungsmesskopf: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Eintritt</u>: Zunahme des betragsmäßigen Gradienten um $>160\%$

Tabelle 7.1: Prozessmerkmale sowie deren Ausprägung im Fehlschnittfall Schnittabriss Edelstahl 1.4301.

8 Experimentelle Ergebnisse zur Self-Burning-Detektion in Baustahl S235

In Kap. 4.2.3 wurde erläutert, dass die Ursache für den Fehlschnittfall Self-Burning in einer zu hohen Gesamtenergie in der Bearbeitungszone zu sehen ist, sodass der Werkstoff in einer unkontrollierten, selbstständigen und exothermen Eisen-Sauerstoff-Reaktion verbrennt. Die Gesamtenergie kumuliert sich aus der bereits im Werkstück vorhandenen Energie in Form der Blechtemperatur sowie der zusätzlich in das Werkstück eingebrachten Energie in Form der Laserstrahl-Absorption sowie der freiwerdenden Reaktionsenthalpie der Eisen-Sauerstoff-Verbrennung. In der Praxis tritt Self-Burning häufig durch eine zu enge Tafelbelegung der Bauteile zueinander oder bei zu kleinen Konturen innerhalb der Bauteilgeometrie auf. Als problematisch ist hierbei die hohe Wärmeleitfähigkeit des Baustahls anzusehen: Die durch den Laserschnitt eingebrachte Wärme verteilt sich über weite Bereiche des Werkstoffs, sodass die Gefahr des Self-Burnings steigt, je näher der neue Laserschnitt in diese vorgewärmte Zone fährt.

Einen zweiten Grund für Self-Burning stellt eine zu geringe Vorschubgeschwindigkeit dar. Für einen stabilen, laserstrahlgeführten Brennschneidprozess sollte nach Arata [72] die Vorschubgeschwindigkeit schneller als die Reaktionsfront – also die durch Wärmeleitung bedingte vorlaufende Zündisotherme ($T_{\text{Zünd}} = 1220^\circ\text{C}$, vgl. Kap. 4.2.3) – sein. Ist die Vorschubgeschwindigkeit langsamer als die Reaktionsfront oder ist das Blech durch oben genannte Gründe bereits vorgewärmt, zündet der großflächig aus der Schneiddüse ausströmende Sauerstoff-Gasstrahl die Verbrennung selbstständig wie bei einem autogenen Brennschneidprozess.

Die sensorisch erfassbaren Prozessmerkmale, welche in Kap. 4.2.3 beschrieben wurden und durch welche Self-Burning erkannt werden soll, sind die folgenden:

- Schnittpaltbreite
- Parallelität der Schnittpaltkanten
- Riefenbildung
- Position der Schnittfrontkante bezogen auf den Laserstrahl
- Niveau und zeitl. Veränderung der integralen Helligkeit der Prozessemissionen
- Änderung der Primärstrahlung (Laserstrahl-Rückreflexion)

Da es sich hierbei größtenteils um Merkmale handelt, die eine Ortsauflösung benötigen, kommt als Messmittel eine Kamera zum Einsatz (Kap. 8.1). Für die Erfassung von zeitlich hochdynamischen Veränderungen der Prozessemissionen findet eine Photodiode Verwendung (Kap. 8.2). Die Laserstrahl-Rückreflexionen werden mittels eines Leistungsmesskopfes detektiert (Kap. 8.3).

8.1 Kamera

Das Szenario, mit welchem der Eintritt des Fehlschnittfalls Self-Burning herbeigeführt wird, ist ein in der Praxis häufig auftretender Fall: Ein Laserschnitt erfolgt in einem Blech-Bereich, welcher nahe eines bereits zeitlich vorher ausgeführten Laserschnitts liegt. Die Blechtemperatur steigt, je näher der Laserschnitt in die vorgewärmte Zone verfährt.

Um Self-Burning in dieser Versuchsreihe zu erzwingen, wird ein Teilbereich des Werkstücks mit dem Laserstrahl vorgewärmt (siehe schematisch eingezeichneter „Vorgewärmter Bereich“ in Bild 8.1). Anschließend verfährt der Laserstrahl in einem Winkel von 45 Grad in Richtung dieser vorgewärmten Zone. Alle Versuchsparameter – also auch die Laserleistung P_L , Vorschubgeschwindigkeit v und der Sauerstoff-Gasdruck p_{O_2} – werden konstant gehalten. In Bild 8.1 ist exemplarisch der Ablauf des Self-Burnings bei einem 15 mm dicken Baustahl-Blech dargestellt. Beim Vergleich der Ober- und Unterseite der Probe wird ersichtlich, dass im Bereich des Self-Burnings, welches ca. 20 mm vor der Eckenfahrt erstmalig auftritt, die Schlacke nicht mehr komplett aus dem Schnittspalt nach unten ausgetrieben wird. Vielmehr kommt es zu einer Verschweißung der zu trennenden Blechteile im unteren Bereich der Schnittfuge, sodass die Bauteile nicht getrennt werden.

Der Prozess wird zeitlich synchron mittels der VIS-Kamera im Auflichtverfahren bei 658 nm sowie der NIR-B-Kamera bei 1600 nm beobachtet. Zur besseren Orientierung ist in den VIS- und NIR-B-Kamerabildern die Position des Laserstrahls eingezeichnet. Der Laserstrahldurchmesser auf dem Werkstück wurde mittels des Messgerätes FokusMonitor des Herstellers PRIMES nach der 2. Momenten-Methode ermittelt.

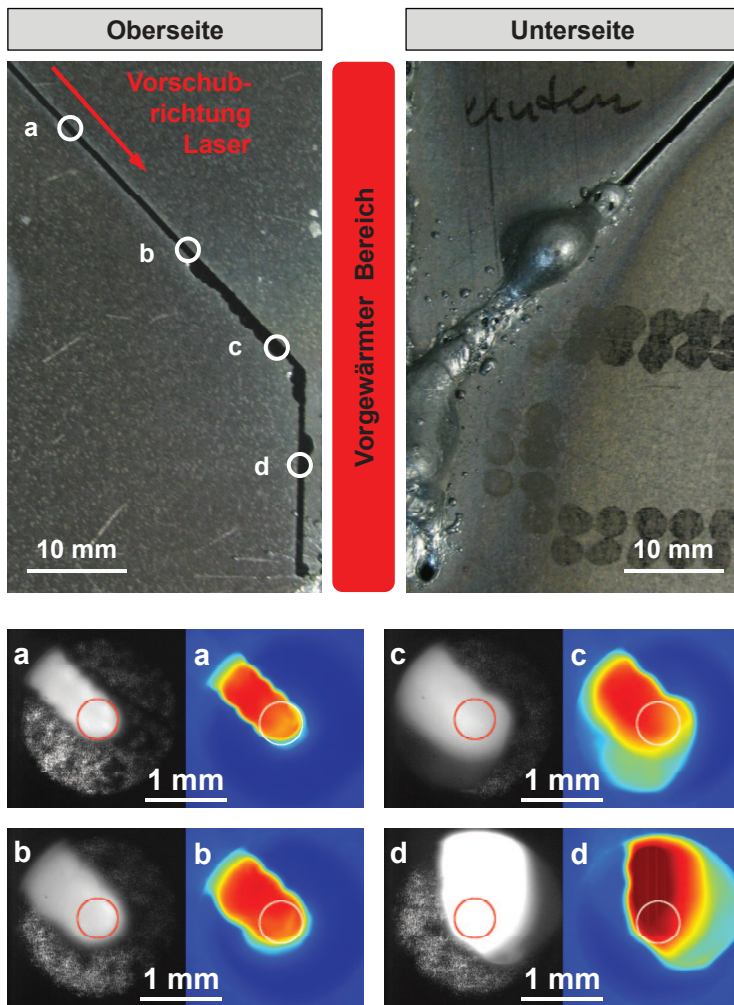


Bild 8.1: Übergang von Gutschnitt zu Self-Burning. Baustahl, $d = 15$ mm; Parameter: $P_L = 2,0$ kW, $p_{O_2} = 0,5$ bar, $v = 0,7$ m/min, $\varnothing_{Düse} = 2,0$ mm, $ES = 4$ mm. VIS-Kamera: 292×292 Pixel, $t_{exp} = 250$ μ s, 1220 fps. NIR-B-Kamera: 320×256 Pixel, $t_{exp} = 650$ μ s, 100 fps. In den VIS-/NIR-B-Aufnahmen sind der Durchmesser und die Position des Laserstrahls eingezeichnet.

Der Prozessablauf lässt sich in die Teilbereiche (a) Gutschnitt, (b) bevorstehendes Self-Burning, (c) Self-Burning rechtsseitig und (d) Self-Burning linksseitig unterteilen.

Merkmale vor dem Fehlerfall

Für den Gutschnittbereich sind die periodisch auftretenden Riefen an der linken und rechten Oberkante („Nagelfeile“) charakteristisch. Die Riefenfrequenz unterscheidet sich geringfügig zwischen der linken und rechten Schnittkante, was auf die unsymmetrische Temperaturverteilung im Blech zurückzuführen ist. Im Folgenden wird jeweils immer die in Schneidrichtung rechte Schnittkante auf deren Riefenfrequenz analysiert. Im Gutschnittbereich der in Bild 8.2 dargestellten Probe entsteht – wie weiter unten erläutert – eine mittlere Riefenfrequenz von 31,6 Hz. Je näher in den vorgewärmten Bereich des Blechs gefahren wird, desto größer werden die Riefenabstände, d.h. die Riefenfrequenz sinkt auf einen Wert von 23,2 Hz kurz vor Ausbruch des Self-Burnings. Die Verringerung der Riefenfrequenz kann in Bild 8.2 sowohl anhand der resultierenden Schnittspaltgeometrie als auch in den Kamera-Bildern, insbesondere in denen der NIR-B-Kamera, sehr gut erkannt werden.

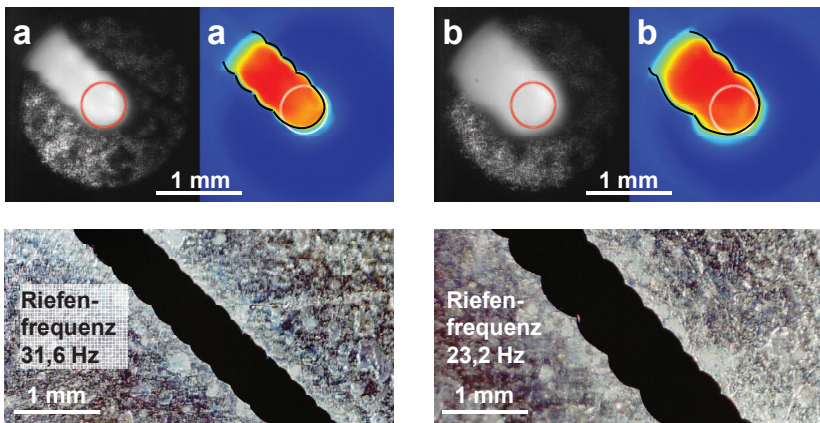


Bild 8.2: Oben: Detailvergrößerung der Bereiche Gutschnitt (a) und bevorstehendes Self-Burning (b) aus Bild 8.1: Abnahme der Riefenfrequenz von 31,6 Hz auf 23,2 Hz als Merkmal des bevorstehenden Self-Burnings. In den VIS-/NIR-B-Aufnahmen sind der Durchmesser und die Position des Laserstrahls eingezeichnet sowie in den NIR-B-Aufnahmen die Schnittkanten zeichnerisch nachträglich hervorgehoben.

Unten: Makro-Fotografie der jeweiligen Schnittfuge mit Angabe der Riefenfrequenz der in Vorschubrichtung rechten Schnittkante.

Die physikalischen Wirkzusammenhänge dieses „Nagelfeilen“-Effektes lassen sich erklären, indem die Entstehung der Riefen im Gutschnittfall näher betrachtet wird. Die Riefenbildung beim Brennschneidprozess von Baustahl ist das Ergebnis eines zykli-

schen Prozesses, welcher erstmalig von Arata [72] formuliert und später von Franke [93] weiterentwickelt wurde (vgl. Bild 8.3):

- A) Der Laser- und Sauerstoffgasstrahl bewegen sich auf die Kante des Blechs zu, der Werkstoff wird lokal vom fokussierten Laserstrahl auf Zündtemperatur (1220 °C) aufgeheizt, sodass dieser unter Sauerstoff-Atmosphäre verbrennt.
- B) Die bei der exothermen Eisen-Sauerstoff-Reaktion freiwerdende Energie sowie die weiterhin absorbierte Laserstrahlung sorgen dafür, dass die Verbrennungsfront sich mit einer höheren Geschwindigkeit in Vorschubrichtung fortbewegt als der eigentliche Laserstrahl. Die räumlich größere Ausdehnung des Sauerstoff-Gasstrahls gegenüber dem Laserstrahl sorgt dafür, dass die Verbrennungsfront den Wirkbereich des Laserstrahls verlässt. Franke [93] postuliert, dass der Verbrennungsprozess von nun an autogen ablaufen könnte, also ohne weitere Energiezufuhr durch den Laserstrahl.
- C) Die autogene Verbrennung kommt jedoch aufgrund der kühlenden Wirkung des Sauerstoff-Gasstrahls dort zum Erliegen, wo die Blechtemperatur die Zündtemperatur unterschreitet.
- D) Der Laserstrahl erreicht die Schnittfront und heizt die Prozesszone erneut auf Zündtemperatur auf. Der Zyklus beginnt von vorne.
- E) Durch den rhythmischen Wechsel zwischen laserstrahlgezündetem Verbrennungsprozess und dem darauf folgenden autogenen Brennschneiden mit anschließendem Abkühlvorgang entstehen die für den Brennschneidprozess charakteristischen Riefen.

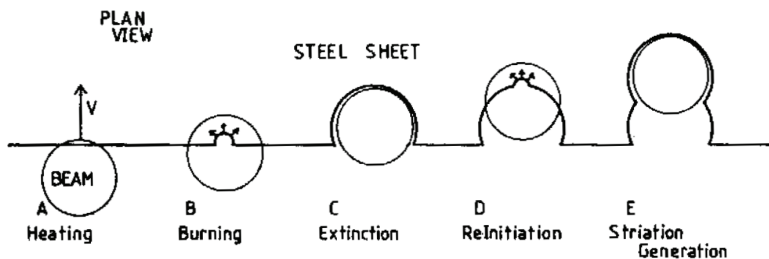


Bild 8.3: Entstehung der Riefen beim O₂-Brennschneidprozess von Baustahl [72].

Die Abnahme der Riefenfrequenz im drohenden Self-Burning-Fall basiert auf der folgenden Modellvorstellung (siehe Bild 8.4): Die unterschiedliche Riefenfrequenz ist auf die unterschiedliche Temperatur der jeweiligen Blechbereiche zurückzuführen. Im

Gutschnittfall befindet sich die Blechtemperatur T_1 auf Raumtemperatur (25°C), während die für den Schlechtschnittfall präparierte Blechzone lokal eine höhere Temperatur $T_2 > T_1$ aufweist. Vergleicht man die Temperaturverteilung einer typischen Prozesstemperatur von $T_{\text{Prozess}} = 2500^\circ\text{C}$ mit der jeweiligen umgebenden Blechtemperatur, so verläuft der Temperaturgradient im vorgewärmten Blech flacher als im Blech bei Raumtemperatur. Die Zündisotherme, also diejenige Temperatur, bis zu welcher der Verbrennungsprozess unter Sauerstoffatmosphäre autogen verläuft ($T_{\text{Zünd}} = 1220^\circ\text{C}$), befindet sich somit um die Strecke Δx weiter im Vorlauf des Laserstrahls. Folglich schreitet die Verbrennungsfront im letztgenannten Fall pro Verbrennungszyklus um die Wegstrecke Δx weiter voran, was einen größeren Riefenabstand und somit eine geringere Riefenfrequenz zur Folge hat.

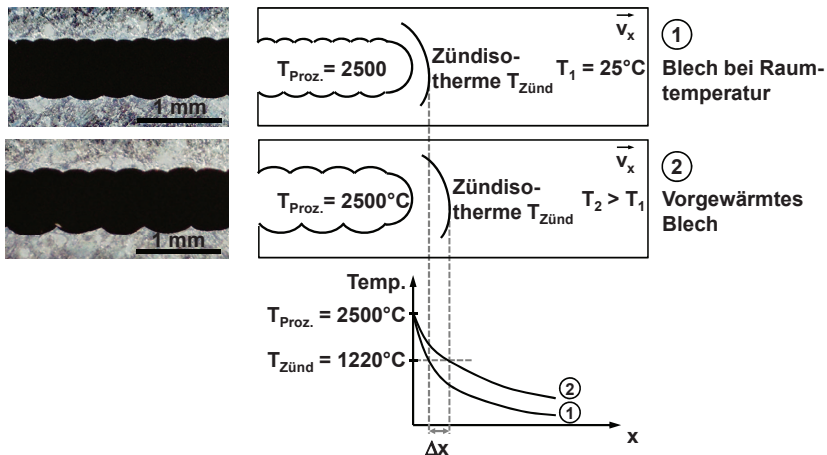


Bild 8.4: Erklärungsmodell zur Bildung grober Riefen beim Brennschneiden als Vorstufe des Self-Burnings.

Der Grund für die Abweichung der Riefenfrequenz zwischen der linken und rechten Schnittkante ist darin zu sehen, dass der Laserschnitt unter einem Winkel von 45° in die vorgewärmte Zone erfolgte (vgl. Bild 8.1). Somit stellt sich anstelle einer achsensymmetrischen eine geneigte Zündisotherme ein (vgl. Skizze in Bild 8.4). Da bei jedem Verbrennungszyklus das Baustahl-Material bis zur Position der vorlaufenden Zündisotherme verbrannt wird, resultiert eine asymmetrische Zündisotherme in unterschiedliche Riefenabstände zwischen linker und rechter Schnittkante.

Die Entstehung von groben Riefen mit einer geringeren Riefenfrequenz als im Gutschnittfall ist als Vorstufe des eigentlichen Self-Burnings anzusehen und eignet sich demzufolge als Frühindikator des drohenden Fehlschnitts.

Im Folgenden gilt es zu klären, inwiefern das qualitativ beobachtete Merkmal „Riefenfrequenz“ aus den Kamerabildern extrahiert und somit quantifizierbar gemacht werden kann. Hierzu wird der mittlere Helligkeitswert der mit der NIR-B-Kamera detektierten Wärmestrahlung über die Zeit aufgetragen (vgl. Bild 8.5 oben) und in die drei Teilbereiche „Gutschnitt“, „Self-Burning Ankündigung“ sowie „Self-Burning“ unterteilt (vgl. Bild 8.5 unten). Für jeden Teilbereich wird anhand einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) das Frequenzspektrum erstellt, um somit auf markante Frequenzen im Helligkeitssignal zu schließen.

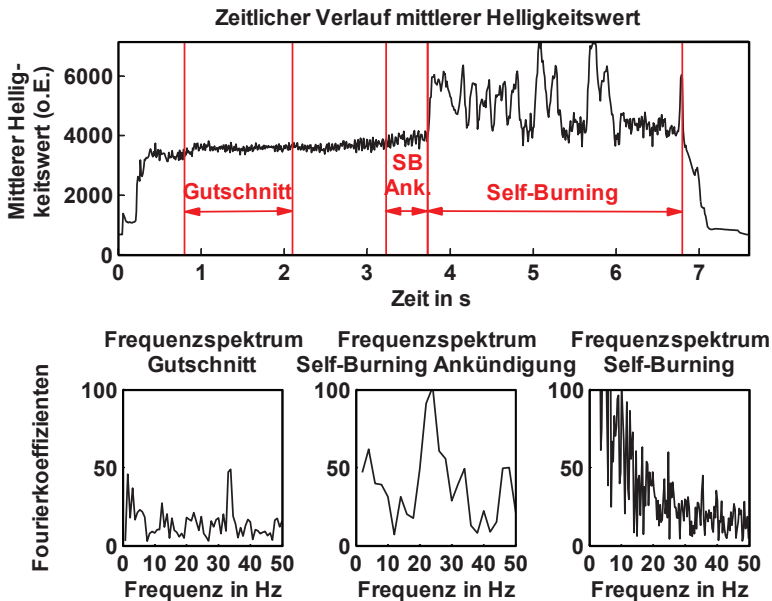


Bild 8.5: Oben: Zeitlicher Verlauf der mittleren Helligkeitswerte der Wärmestrahlung der in Bild 8.1 und Bild 8.2 dargestellten Versuchsprobe.

Unten: Fast-Fourier-Transformation (Frequenzspektrum) der drei Teilbereiche „Gutschnitt“, „Self-Burning (SB) Ankündigung“ und „Self-Burning“.

Im Gutschnittbereich beträgt die mittels der NIR-B-Kamera detektierte markante Frequenz 33 Hz, welche mit der unter einem Mikroskop ermittelten Bauteil-Riefen-

frequenz von 31,6 Hz gut übereinstimmt. Im Teilbereich „Self-Burning Ankündigung“ verschiebt sich die Frequenz im gemessenen Signal zu einem kleineren Wert von 24 Hz, was ebenfalls sehr gut mit der Riefenfrequenz im Bauteil von 23,2 Hz korreliert (vgl. Riefenfrequenzen in Bild 8.2). Beim Eintritt von „Self-Burning“ bildet sich schließlich keine markante Frequenz heraus.

Somit bestätigt sich die Hypothese, dass die Bauteil-Riefenfrequenz anhand der Hellichtschwankungen im Kamera-Signal detektiert werden kann. Eine ortsauflösende Kamera erscheint für diese Art der Detektion jedoch nicht zwingend erforderlich, sondern aufgrund des Geschwindigkeitsdefizits sowie der höheren Kosten im Gegensatz zu einer integral messenden Photodiode eher hinderlich. Aus diesen Gründen wird in Kap. 8.2 untersucht, inwiefern eine Photodiode für die Detektion der Riefenfrequenz ausreichend ist.

Merkmale im Fehlerfall

Bei Betrachtung obiger Wirkzusammenhänge scheint es eine logische Konsequenz zu sein, dass Self-Burning – also der gasstrahlgeführte, autogene Schneidprozess – ausbricht, wenn der Laserschnitt in Bereiche mit noch höherer Blechtemperatur verfährt. Der Temperaturgradient zwischen Prozesszone und Blech verläuft mit geringer werdender Differenztemperatur immer flacher (vgl. Bild 8.4), sodass die Zündtemperatur weit außerhalb des Wirkungsbereichs des Laserstrahls liegt. Die Verbrennungsfront liegt somit dauerhaft im Vorlauf des Laserstrahls. In den Kameraaufnahmen in Bild 8.6 ist sehr eindeutig die vorlaufende Schnittfrontkante zu erkennen, welche dauerhaft außerhalb des Laserstrahldurchmessers liegt. Vergleicht man diese Aufnahmen mit denen des Gutschnittfalls (Bild 8.2a), so ist keine Überlappung des Laserstrahls mit der Schnittfront zu erkennen. Des Weiteren verlaufen die Schnittspaltkanten nicht mehr parallel und der Schnittfrontradius vergrößert sich. Diese beobachteten Merkmale sind allesamt als uneindeutig anzusehen, da sie einen eindeutigen Rückschluss auf den Fehlschnittfall Self-Burning erlauben. Bei anderen Fehlschnittfällen treten diese Merkmale nicht auf (vgl. Tabelle 6.2 und Tabelle 7.1).

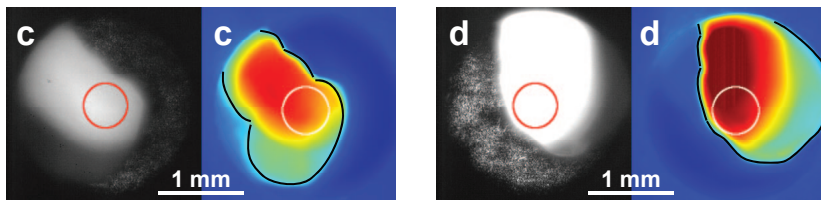


Bild 8.6: Ausprägung beim Self-Burning. Detailvergrößerung der Bereiche Self-Burning rechtsseitig (c) und Self-Burning linksseitig (d) aus Bild 8.1. In den VIS-/NIR-B-Aufnahmen sind der Durchmesser und die Position des Laserstrahls eingezeichnet sowie in den NIR-B-Aufnahmen die Schnittkanten zeichnerisch nachträglich hervorgehoben.

8.2 Photodiode

Die Photodiode bietet gegenüber der ortsauflösenden Kamera-Diagnostik den Vorteil einer höheren zeitlichen Auflösung, was insbesondere bei der Bestimmung der Riefenfrequenz vorteilhaft ist. Zwar würde die im vorherigen Kapitel 8.1 verwendete Kamera mit ihrer Taktrate von 100 Hz ausreichen, um Riefenfrequenzen < 50 Hz zu detektieren, allerdings können Veränderungen der Riefenfrequenz durch Verwendung eines schneller abtastenden Messmittels wie der Photodiode schneller und präziser erkannt werden. Die gleichzeitig geringeren Kosten der Photodiode gegenüber einer Kamera machen dieses Messmittel interessant für die Detektion des Fehlerfalls Self-Burning.

Merkmale vor dem Fehlerfall

Anhand der Kameraaufnahmen im vorherigen Kapitel konnte gezeigt werden, dass sich die Bauteil-Riefenfrequenz in Form von Schwankungen im Helligkeitssignal niederschlägt. Da eine Ortsauflösung für die Detektion dieser Helligkeitsschwankungen nicht notwendig ist und es vielmehr auf eine zeitlich hochauflösende Erfassung ankommt, wird nachfolgend evaluiert, inwiefern eine integral messende Photodiode für die Bestimmung der Riefenfrequenz ausreichend ist. Hierfür wurde eine Si-Photodiode, welche im nahinfraroten Spektralbereich bei 960 nm sensitiv ist, koaxial mittels Scraper-Spiegel in die Laserschneidmaschine integriert (vgl. Bild 5.4). Die zeitliche Auflösung betrug hierbei ca. 8 kHz.

Die Versuche wurden in den Blechdicken 15, 20 und 25 mm durchgeführt. Nach einer Linearfahrt mit Gutschnitt-Parametern erfolgte eine 180°-Kurve und eine anschließende Fahrt in Gegenrichtung parallel zum ursprünglichen Laserschnitt mit einem seitli-

chen Versatz von 2,5 mm (vgl. Bild 8.7). Hierbei tritt Self-Burning ohne Parameterwechsel allein durch die erhöhte Blechtemperatur ab der 180°-Kurve auf.

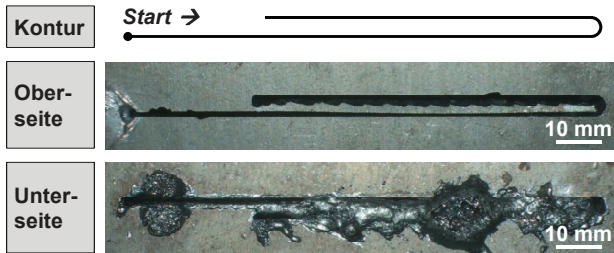


Bild 8.7: Probenfoto Gutschnitt und Self-Burning. Baustahl, $d = 20$ mm; Parameter: $P_L = 5,7$ kW, $p_{O_2} = 0,8$ bar, $v = 1,08$ m/min, $\varnothing_{Düse} = 2,0$ mm, $ES = 5,5$ mm.

In Bild 8.8 ist oben der zeitliche Verlauf des Photodiodensignals aufgetragen. Nach dem Einstechvorgang (nicht dargestellt) erfolgt der Gutschnitt von ca. 0,7 - 3,9 Sekunden, bevor nach der Kurvenfahrt Self-Burning bis zum Ende der Kontur eintritt. Das Signal im Gutschnittbereich verläuft homogen auf einem konstanten Niveau, während im Fehlschnittfall starke Schwankungen auftreten. Im Frequenzspektrum des Gutschnittbereichs sind zwei markante Frequenzen bei 38,5 und 42,7 Hz erkennbar, welche gut mit den Bauteil-Riefenfrequenzen der linken bzw. rechten Schnittkanten, welche mittels eines Mikroskops gemessen wurden, übereinstimmen: der Schnittspalt weist an der linken Kante eine Riefenfrequenz von 38,8 Hz und an der rechten Kante von 42,6 Hz auf. Im Self-Burning-Bereich bildet sich aufgrund des aperiodischen Verbrennungsvorgangs keine markante Frequenz mehr heraus.

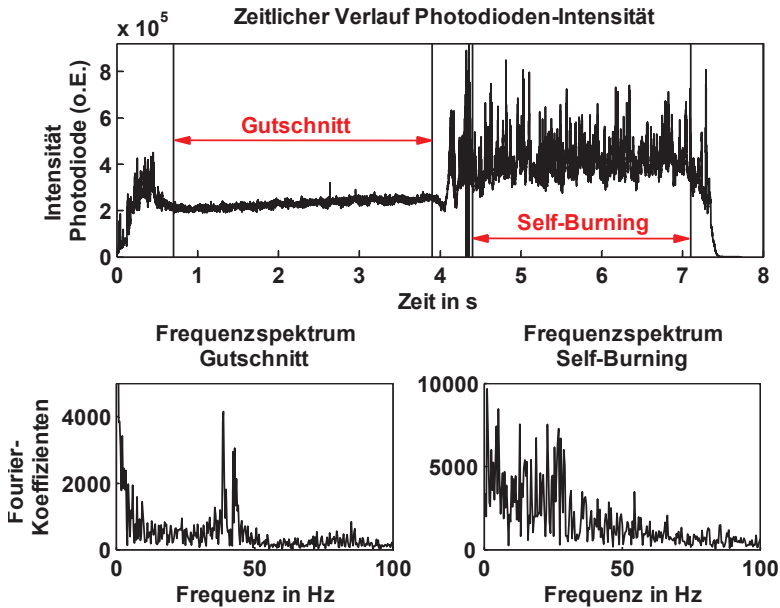


Bild 8.8: Oben: Zeitlicher Verlauf der Photodiodenintensität der in Bild 8.7 dargestellten Versuchsprobe.

Unten: Fast-Fourier-Transformation (Frequenzspektrum) der beiden Teilbereiche Gutschnitt und Self-Burning.

Ein Vergleich über mehrere Versuche und Blechdickenbereiche verdeutlicht in Bild 8.9, dass die mittels der Photodiode detektierte markante Frequenz jeweils gut mit der Bauteil-Riefenfrequenz korreliert, welche mithilfe eines Mikroskops ermittelt wurde (es wird jeweils nur eine Seite der beiden Schnittkanten betrachtet). Die Riefenfrequenz stellt ein für die Detektion von Self-Burning wichtiges Merkmal dar: Wie anhand den Kameraaufnahmen in Kap. 8.1 gezeigt, deutet eine abnehmende Riefenfrequenz auf eine steigende Gefahr hinsichtlich des Eintritts von Self-Burning hin. Im Falle des eingetretenen Self-Burnings ist schließlich keine markante Frequenz mehr erkennbar.

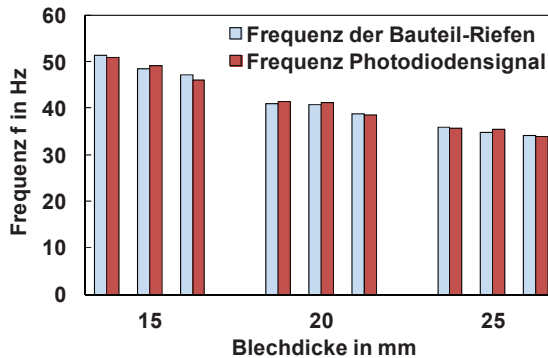


Bild 8.9: Gegenüberstellung der Bauteil-Riefenfrequenz: Blaue Balken (links): Gemessen mittels Mikroskop. Rote Balken (rechts): Gemessen im Photodiodensignal. Baustahl-Brennschneidprozess im Gutschnittbereich.

Weiterhin ist es möglich, anhand der ermittelten Riefenfrequenz und der bekannten Vorschubgeschwindigkeit auf die Rauigkeit der Schnittflanken zu schließen. Eine geringe Riefenfrequenz ist gleichbedeutend mit einem großen Riefenabstand. Ein großer Riefenabstand wiederum bedeutet eine erhöhte Rauigkeit der Schnittflanken, da der Verbrennungsvorgang einen größeren Blechbereich pro Riefen-Zyklus verbrennt als dies bei einer hohen Riefenfrequenz bzw. kurzen -abständen der Fall wäre. Dadurch lassen sich Angaben zur Qualität des Gutschnittes gewinnen.

Merkmale im Fehlerfall

Der erste Indikator für die Self-Burning-Erkennung ist das Verschwinden der markante(n) Riefenfrequenz(en) im Frequenzspektrum (FFT) des Photodioden-Signals (vgl. Bild 8.8 unten).

Als zweiter Indikator bietet sich die Ermittlung der relativen Standardabweichung des Photodioden-Signals an. Im zeitlichen Verlauf der Photodioden-Intensität im oberen Teil von Bild 8.8 ist qualitativ eine starke Zunahme der Helligkeitsschwankung zu erkennen, was auf die impulsiven Verbrennungsvorgänge im Self-Burning-Fall zurückzuführen ist. Für die quantitative Auswertung wird die relative Standardabweichung berechnet, indem die jeweilige Standardabweichung auf den über ± 500 Werten gleitenden Mittelwert bezogen wird.

In Bild 8.10 bestätigt sich die qualitative Vermutung: Vergleicht man die relative Standardabweichung im Self-Burning-Fall mit dem Gutschnitt-Bereich, so steigt diese je nach Blechdicke um 50%, 200% oder gar 300% an.

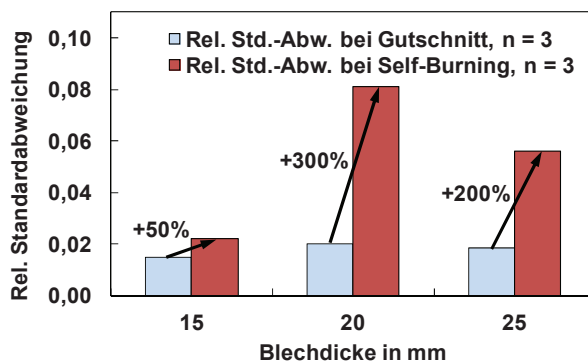


Bild 8.10: Vergleich der rel. Standardabweichung im Gutschnitt- und Self-Burning-Fall.

Es muss jedoch angemerkt werden, dass die Zunahme der Strahlungsschwankungen nicht uneindeutig mit dem Fehlerfall des Self-Burnings verknüpft ist. Wie ein Merkmals-Vergleich mit dem Schnittabriss in Baustahl (vgl. Tabelle 6.2) zeigt, weisen sowohl das Self-Burning als auch der Schnittabriss starke Fluktuation der detektierten Sekundärstrahlung auf. Es handelt sich hierbei also um ein nicht uneindeutiges Merkmal.

8.3 Laser-Leistungsmesskopf 10,6 μm

Die markanten Änderungen der Prozesszone während des Self-Burnings (insbesondere die Vergrößerung der Schnittspaltbreite) lassen die Hypothese zu, dass der rückreflektierte Laserstrahl ebenfalls Änderungen unterworfen ist. Zur Überprüfung dieser These wurden Versuche in 20 und 25 mm dicken Baustahl-Blechen durchgeführt. Die Kontur ist identisch zu der in Kap. 8.2 beschriebenen Kontur (Linearschnitt mit anschließender 180°-Kurve), sodass zuerst ein Gutschnitt und nach der Kurve Self-Burning entsteht, ohne dass Verfahrensparameter verändert werden mussten.

In Bild 8.11 sind die zeitlichen Verläufe der detektierten Laserrückreflexionen wiedergegeben (oben: Blechdicke 20 mm; unten: Blechdicke 25 mm). Beim Eintritt von Self-Burning ist im Signal ein deutlicher Abfall der mittleren Leistung zu erkennen, wobei

die Signifikanz im 25 mm dicken Blech (Rückgang um 34%) stärker ausgeprägt ist als im 20 mm dicken Blech (Rückgang um 27%). Die Reduzierung der rückreflektierten Laserleistung ist darauf zurückzuführen, dass das Signal stark oberflächendominiert ist (vgl. Kap. 5.2.3) und somit empfindlich auf Veränderungen der Schnittpaltausprägung reagiert. Im Falle von Self-Burning vergrößert sich die Schnittpaltbreite um einige Faktoren, sodass ein Großteil der Oberfläche fehlt, von welcher die Laserleistung in Richtung des Schneidkopfes und des Detektors zurückreflektiert werden könnte.

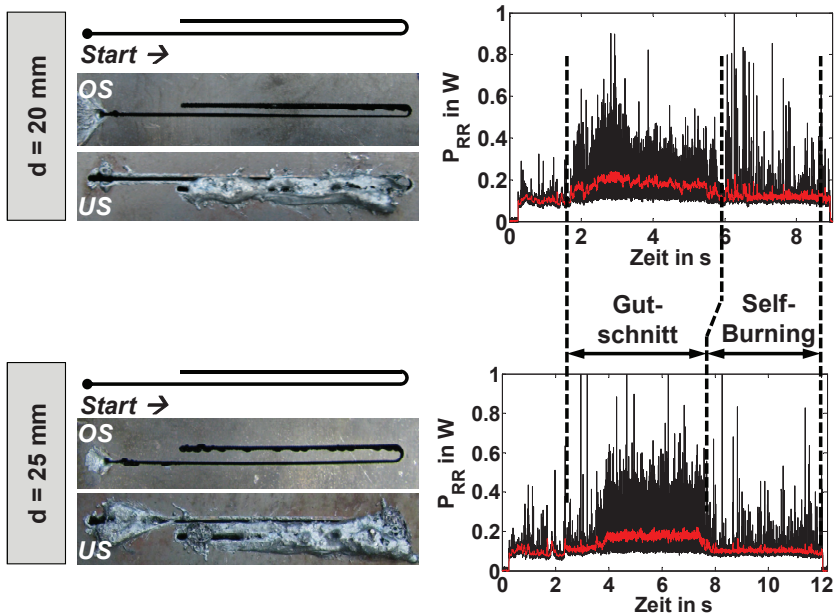


Bild 8.11: Self-Burning bei Blechdicke $d = 20$ mm (oben) und $d = 25$ mm (unten) mit dem jeweiligem Signalverlauf der rückreflektierten Laserleistung P_{RR} (schwarz: Rohsignal; rot: gleitender Mittelwert). Kontur: Haken. OS: Oberseite. US: Unterseite. Parameter:
 $d = 20$ mm: $P_L = 5,7$ kW, $p_{O_2} = 0,8$ bar, $v = 1,08$ m/min, $\varnothing_{Düse} = 2,0$ mm, $ES = 5,5$ mm;
 $d = 25$ mm: $P_L = 5,6$ kW, $p_{O_2} = 0,6$ bar, $v = 0,81$ m/min, $\varnothing_{Düse} = 2,3$ mm, $ES = 5,0$ mm.

8.4 Zusammenfassung Self-Burning S235

Sowohl die ortsauflösende Prozessbeobachtung mittels Kamera, die flächig integral messende Photodiode als auch der Laser-Leistungsmesskopf ermöglichen die Detektion des Fehlschnittfalls Self-Burning. Hierbei ist es sogar möglich, anhand eindeutiger Merkmale die Ankündigung des Fehlschnittfalls bereits frühzeitig zu erkennen, sodass ein rechtzeitig regelnder Eingriff in den Prozess möglich erscheint.

Für die kamerabasierte Überwachung ist eine Aufsichtbeleuchtung nicht notwendig. Die relevanten Merkmale, insbesondere die Detektion der geometrischen Kontur der Schnittpaltkanten, können mittels einer Nahinfrarot-Kamera ausreichend gut erkannt werden. Der Fehlschnittfall kündigt sich durch eine Verringerung der Riefenfrequenz deutlich an. Im Fehlerfall ist kein typisch parallel verlaufender Schnittpalt mehr erkennbar, die Schnittpaltflanken weiten sich auf, der Schnittfrontradius vergrößert sich und die obere Schnittfrontkante befindet sich in Vorschubrichtung außerhalb des Wirkbereichs des Laserstrahls. Alle Merkmale gelten als eindeutig für den Fehlerfall Self-Burning.

Die Photodiode detektiert im nahinfraroten Spektralbereich ebenfalls die Wärmestrahlung des Prozesses. Dem Nachteil der Ortsintegration steht der Vorteil einer vielfach höheren Messfrequenz von ca. 8 kHz gegenüber. Dies erlaubt im Gegensatz zur 100 Hz Kamera eine detailliertere Analyse von Signalschwankungen. Zwar liegen die Riefenfrequenzen je nach Blechdicke zwischen 30 und 55 Hz, sodass laut dem Abtasttheorem theoretisch eine Kamera mit 110 fps ausreichen würde, jedoch wird eine Veränderung der Riefenfrequenz durch Verwendung einer 8 kHz Photodiode schneller und präziser erkannt. Es kann gezeigt werden, dass die Riefenfrequenz der oberen Schnittkanten anhand eines Frequenzspektrums (FFT) aus dem Helligkeitssignal extrahiert werden kann. Im Gutschnittfall bilden sich zwei markante Riefenfrequenzen der jeweils rechten und linken Schnittkante heraus. Im Self-Burning-Fehlerfall ist keine markante Frequenz im Photodioden-Signal mehr erkennbar. Des Weiteren steigt die relative Standardabweichung im Fehlschnittfall signifikant gegenüber dem Gutschnittfall an. Dieses Merkmal ist jedoch aufgrund seines Auftretens sowohl beim Fehlerfall Self-Burning als auch beim Schnittabriss in Baustahl als ein nicht eindeutiges Merkmal zu werten.

Der Laser-Leistungsmesskopf registriert im Self-Burning-Fall eine deutliche Abnahme der rückreflektierten Laserleistung aufgrund der stark vergrößerten Schnittpaltbreite.

Die für die sensorgestützte Detektion des Fehlerfalls Self-Burning bedeutsamen Prozessmerkmale samt Ausprägung sind nachfolgend in Tabelle 8.1 zusammengefasst.


Fehlschnitt	Prozessmerkmal	Ausprägung
Self-Burning S235 	Geometrische Schnittspaltausprägung: Änderung von Schnittspaltbreite, -parallelität, Riefenbildung, Position der oberen Schnittfrontkante relativ zur Laserstrahlachse	Kamera: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Ankündigung</u>: Reduzierung der Riefenfrequenz(en) ▪ <u>Eintritt</u>: Aufweitung der Schnittspaltflanken, Vergrößerung Schnittfrontradius, Schnittfront verlässt Wirkbereich des Laserstrahls
	Sekundärstrahlung: Niveau und zeitliche Veränderung der integralen Wärmestrahlung	Photodiode: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Ankündigung</u>: Reduzierung der einen (bzw. zwei) markanten Riefenfrequenz(en) im Frequenzspektrum (FFT) ▪ <u>Eintritt</u>: Wegfall der markanten Riefenfrequenz(en) im Frequenzspektrum (FFT), Erhöhung der rel. Standardabweichung um 50 - 300%
	Primärstrahlung: Änderung der Laserstrahl-Rückreflexion	Leistungsmesskopf: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Eintritt</u>: Reduzierung der rückreflektierten Laserleistung um ca. 30%

Tabelle 8.1: Prozessmerkmale sowie deren Ausprägung im Fehlschnittfall Self-Burning S235.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, Fehlschnitte während des CO₂-Laserstrahlschneidprozesses automatisch und frühzeitig zu erkennen. Die Priorisierung lag hierbei auf der Erkennung von Schnittabriss und Self-Burning während des Brennschneidens von Baustahl S235 sowie des Schmelzschneidens von nichtrostendem Edelstahl 1.4301.

Eine grundlegende spektralanalytische Untersuchung der optischen Prozessemissionen kam zu dem Ergebnis, dass die emittierte Sekundärstrahlung während des Gutschnitts in guter Näherung durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben werden kann. Beim Auftreten von Metaldampf und Plasma konnten diskrete Linien im emittierten Spektrum diagnostiziert werden. Messungen der Schnittfront-Temperatur während eines Gutschnitts, welche aus dem kalibrierten spektralen Strahldichteverlauf mittels des Verfahrens der Quotientenpyrometrie berechnet wurde, ergaben, dass die mittlere Schnittfronttemperatur zwischen der Schmelz- T_S und Verdampfungstemperatur T_V von Eisen liegt. Die Temperaturmessungen zeigten weiterhin, dass die mittlere Schnittfronttemperatur eines Brennschnitts von Baustahl um etwa 300-500 K höher liegt als die Temperatur eines entsprechenden Edelstahl-Schmelzschnitts gleicher Blechdicke. Weiterhin sank die mittlere Schnittfront-Temperatur mit steigender Blechdicke.

Erkenntnisse zum Schnittabriss Baustahl S235

Beim Schnittabriss im Baustahl S235 neigte sich die Schnittfront so stark, dass die untere Schnittfrontkante mittels der koaxial zum Laserstrahl angeordneten Kamera nicht mehr durch die Laserschneiddüse erkannt werden konnte. Als eindeutiges Merkmal für einen Schnittabriss konnten jedoch mit der Kamera Schlacketrophen detektiert werden, die im Falle des Schnittabrisses gegen die Düsenberandung stoßen.

Mit der Photodiode konnte bei allen untersuchten Blechdicken von 3 mm bis 25 mm eine signifikante Zunahme der Schwankung der optischen Sekundäremissionen festgestellt werden.

Der Laser-Leistungsmesskopf registrierte die von der Wechselwirkungszone koaxial zurückreflektierte CO₂-Laserstrahlung. Es wurde nachgewiesen, dass maximal 10% des Gesamt-Rückreflexes aus der Schnittfuge und mindestens 90% von der Werk-

stückoberfläche zurückreflektiert wurden. Somit war das Signal des Rückreflexes stark oberflächendominiert und abhängig von den Verfahrensparametern wie beispielsweise der Vorschubgeschwindigkeit oder den Werkstückeigenschaften wie der Oberflächenrauigkeit. Während des Schnittabrisses in Blechdicken ≥ 15 mm traten deutliche Schwankungen des detektierten Rückreflexes auf – ein über das komplette Blechdickenspektrum gültiges Merkmal konnte mithilfe des Leistungsmesskopfs für den Schnittabriss im Baustahl S235 jedoch nicht gefunden werden.

Eine Schnittabriss-Erkennung durch Messung des Schneidgasdrucks und -durchflusses war nur dann möglich, wenn der Abstand zwischen Schneiddüse und Blech maximal einem Viertel des Düsendurchmessers entsprach (Düsenstoppzustand). Diese Bedingung ist jedoch mit den momentan in der Praxis eingesetzten Laserschneiddüsen und den jeweiligen Düsenabständen nicht gegeben – das Merkmal ist somit unter Verwendung praxisrelevanter Verfahrensparameter nicht tauglich.

Erkenntnisse zum Schnittabriss Edelstahl 1.4301

Bei der sensorunterstützten Erkennung des Schnittabrisses in Edelstahl 1.4301 lag die Konzentration auf der Detektion der mit dem Fehlerfall typischerweise eintretenden Plasmabildung. Es konnte gezeigt werden, dass die Plasmabildung sowohl optisch mittels Kamera und Photodiode als auch elektrisch mittels Widerstandsmessgerät zuverlässig diagnostiziert werden kann. Die hohe spektrale Strahldichte des emittierenden Plasmas bewirkte eine Aussteuerung der optischen Detektoren in allen untersuchten Wellenlängenbereichen ($\lambda_{\text{VIS-Kamera}} = 658$ nm, $\lambda_{\text{NIR-A-Kamera}} = 920$ nm, $\lambda_{\text{Photodiode}} = 960$ nm, $\lambda_{\text{NIR-B-Kamera}} = 1600$ nm). Die hohe Anzahl an freien Ladungsträgern im Plasma sorgte zudem für eine im Vergleich zum Gutschnittfall signifikante Reduzierung des elektrischen Widerstands zwischen der Schneiddüse und dem Werkstück um zwei bis drei Größenordnungen.


Die rückreflektierte Laserleistung erfuhr beim Schnittabriss eine signifikante Zunahme der Signal-Schwankungen, welche durch die inhomogene Oberfläche während des Schnittabrisses verursacht wurde.

Erkenntnisse zum Self-Burning S235

Sowohl die Kamera als auch die Photodiode waren geeignet, die Frequenz der sich im oberen Teil der Schnittflanken bildenden Riefen zu erkennen. Es wurde festgestellt, dass eine abnehmende Riefenfrequenz mit einer zunehmenden Self-Burning-Neigung korreliert. Im eingetretenen Self-Burning-Fall stellt die Zunahme der Schwankung der detektierten Sekundärstrahlung ein weiteres Merkmal dar, welches jedoch ebenfalls

beim Schnittabriss in Baustahl S235 auftritt und somit als nicht eindeutiges Merkmal zu betrachten ist. Für die sichere Detektion von Self-Burning müssen somit weitere Merkmale herangezogen werden: Die Aufweitung der Schnittspaltflanken, die Vergrößerung des Schnittfrontradius sowie die außerhalb des Laserstrahl-Wirkbereichs liegende obere Schnittfrontkante stellen Merkmale dar, welche mittels Kameras eindeutig detektiert werden konnten. Der Laser-Leistungsmesskopf detektiert eine signifikante Abnahme der in Richtung Schneidkopf rückreflektierten Laserleistung.

In Tabelle 9.1 sind die in dieser Arbeit untersuchten Prozessmerkmale mit ihren jeweiligen Ausprägungsformen für die Fehlerfälle Schnittabriss Baustahl und Edelstahl sowie Self-Burning Baustahl übersichtlich zusammengefasst.

Fehlschnitt	Prozessmerkmal	Ausprägung
Schnittabriss Baustahl S235 	Schnittfrontneigung: Versatz der oberen zur unteren Schnittfrontkante	Kamera: <ul style="list-style-type: none"> Untere Schnittfrontkante befindet sich außerhalb des durch die Düse begrenzten Sichtfeldes
	Schlacketrophen im Nachlauf strömen gegen Düsenberandung	Kamera: <ul style="list-style-type: none"> Erkennbar bei Blechdicke $d = 15 \text{ mm}$
	Sekundärstrahlung: Niveau und zeitl. Veränderung der integralen Wärmestrahlung	Photodiode: <ul style="list-style-type: none"> Zunahme des betragsmäßigen Gradienten um $>260\%$
	Primärstrahlung: Erhöhung Laserstrahl-Rückreflexion	Leistungsmesskopf: <ul style="list-style-type: none"> Dünne Bleche $<15 \text{ mm}$: Signaleffekte durch Parametervariation (v, p_{O_2}) verursacht Dicke Bleche $\geq 15 \text{ mm}$: Kein Signal im Gutschnitt; Starke Schwankungen im Schnittabriss
	Sauerstoff-Schneidgas: Änderung Druck und Durchfluss	Druck- und Durchflussmessgerät: <ul style="list-style-type: none"> Messbare Änderung des Gasdrucks und -durchflusses nur im Sperrzustand der Düse



Fehlschnitt	Prozessmerkmal	Ausprägung
Schnittabriss Edelstahl 1.4301 	Sekundärstrahlung: Plasmabildung	Kamera: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Ankündigung</u>: Plasma-Blitzen in der Schnittfuge ▪ <u>Eintritt</u>: Kontinuierliches Plasma oberhalb des Werkstücks
		Elektr. Widerstandsmessgerät: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Eintritt</u>: Reduzierung des Widerstands um 2 - 3 Größenordnungen
	Primärstrahlung: Änderung der Laserstrahl-Rückreflexion	Leistungsmesskopf: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Eintritt</u>: Zunahme des betragsmäßigen Gradienten um >160%
Self-Burning Baustahl S235 	Geometrische Schnittpaltausprägung: Änderung von Schnittpaltbreite, -parallelität, Riefenbildung, Position der oberen Schnittfrontkante relativ zur Laserstrahlachse	Kamera: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Ankündigung</u>: Reduzierung der Riefenfrequenz(en) ▪ <u>Eintritt</u>: Aufweitung der Schnittpaltflanken, Vergrößerung Schnittfrontradius, Schnittfront verlässt Wirkbereich des Laserstrahls
	Sekundärstrahlung: Niveau und zeitliche Veränderung der integralen Wärmestrahlung	Photodiode: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Ankündigung</u>: Reduzierung der einen (bzw. zwei) markanten Riefenfrequenz(en) im Frequenzspektrum (FFT) ▪ <u>Eintritt</u>: Wegfall der markanten Riefenfrequenz(en) im Frequenzspektrum (FFT), Erhöhung der rel. Standardabweichung um 50 - 300%
	Primärstrahlung: Änderung der Laserstrahl-Rückreflexion	Leistungsmesskopf: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Eintritt</u>: Reduzierung der rückreflektierten Laserleistung um ca. 30%

Tabelle 9.1: Zusammenfassung der Prozessmerkmale und deren Ausprägungen.

Ausblick

Die Zielstellung dieser Arbeit, gravierende Fehlschnitte während des CO₂-Laserstrahlschneidens von Baustahl und Edelstahl sensorgestützt zu erkennen, konnte für die Fehlerfälle Schnittabriss im Edelstahl 1.4301 sowie Self-Burning im Baustahl S235 erfüllt werden. Hinsichtlich der Detektion des Schnittabrisses in Baustahl S235 sind weitere Untersuchungen notwendig – insbesondere gilt es zu überprüfen, ob die bisher bekannten Fehler-Merkmale zuverlässig über das komplette Blechdickenspektrum von $d = 1 \text{ mm} - 25 \text{ mm}$ auftreten und ob diese eine eindeutige Rückschließbarkeit auf den Fehlerfall ermöglichen (Prüfen auf Eineindeutigkeit).

Neben der Erkennbarkeit von gravierenden Fehlschnitten ist es darüber hinaus von hohem Interesse, weitere qualitätsbestimmende Eigenschaften wie beispielsweise Grattbildung, erhöhte Rauigkeit und Kolkungen automatisch zu erkennen. Insbesondere die ortsaufgelöste Erfassung der Prozesszone bietet hierfür großes Potenzial.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit fußen auf experimentellen Ergebnissen, welche mit einer CO₂-Laserschneidmaschine erzielt wurden. Vor dem Hintergrund des stetig wachsenden Marktanteils von Festkörperlaser-Schneidanlagen gilt es zu überprüfen, inwiefern die bisherigen Erkenntnisse des 10,6 μm -Laserschnitts auf den 1 μm -Laserschnitt übertragbar sind.

Die vorliegende Arbeit legt mit der sensorgestützten Erkennung von Fehlschnitten die Grundlage, einen Prozessregelkreis aufzubauen. Ziel hierbei ist, dass die Laserschneidmaschine durch eine selbstständige Anpassung von Verfahrensparametern den Schneidprozess automatisch derart beeinflusst, dass der Eintritt eines Fehlerfalls korrigiert oder im besten Fall die Entstehung eines Fehlschnitts gänzlich vermieden wird.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] HÜGEL, H.; GRAF, T.: *Laser in der Fertigung : Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [2] LENTJES, M.; BRUNS, P.; VOSS, M.; REINECKE, K.; LISSOTSCHENKO, V.: *Process-reliable & cost-effective laser materials processing*. In: Proc. of ICALEO, 2012, S. 314-316.
- [3] PREIBIG, K.U.: *Verfahrens- und Anlagenentwicklung zum Laserstrahl-Hochgeschwindigkeitsschneiden von metallischem Bandmaterial*. RWTH Aachen, Dissertation, 1995.
- [4] SCHNEIDER, F.: *Überwachung, Regelung und Automatisierung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden von Elektroblechen mit Laserstrahlung*. RWTH Aachen, Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Dissertation, 2005.
- [5] POPRAWÉ, R.: *Lasertechnik für die Fertigung : Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005.
- [6] DILTNEY, U.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologien*. Berlin: Springer, 2006.
- [7] Norm DIN EN ISO 9013:2003-07. *Thermisches Schneiden : Einteilung thermischer Schnitte : Geometrische Produktspezifikation und Qualität*.
- [8] NORM VDI 2906 BLATT 8: *Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall : Laserstrahlschneiden*.
- [9] TRUMPF: *Technische Information Laserbearbeitung : CO₂-Laser*. 09/2009.

- [10] BEYER, E.; ABELS, P.; DRENKER, A.; MAISCHNER, D.; SOKOLOWSKI, W.: *New devices for online process diagnostics during laser machining*. In: Proc. of ICALEO, 1991, S. 133-139.
- [11] PLANCK, M.: *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*. Annalen der Physik, 309, 1901.
- [12] BERNHARD, F.: *Technische Temperaturmessung*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004.
- [13] SCHMIDT, W.: *Optische Spektroskopie: Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Techniker*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1994.
- [14] RICHTLINIE VDI/VDE 3511 BLATT 4: *Technische Temperaturmessung : Strahlungsthermometrie*. Dezember 2011.
- [15] TRUMPF: *NitroLine - Plasma*. Technical Telegram, 10/2006.
- [16] BREITLING, D.: *Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung*. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag, 2009. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 2009 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [17] NOTTINGHAM, W.B.: *Thermionic Emission*. Berlin, Handbuch Physik 21, 1956.
- [18] WEBER, R.: *Anlagentechnik für die laserbasierte Fertigung – Teil I: von der Anwendung zur Anlage*. Universität Stuttgart, Vorlesungsmanuskript, Institut für Strahlwerkzeuge, 2011.
- [19] BECK, M.: *Modellierung des Lasertiefschweißens*. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag, 1995. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 1995 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [20] V. ARDENNE, M.; MUSIOL, G.; KLEMRADT, U.: *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*. Frankfurt: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, 2005.
- [21] SCHMITT-THOMAS, K.G.; MAIER, W.; WOLLRAB, P.; 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 TÜV Rheinland, Köln-Poll, 1978. Köln: Verlag TÜV Rheinland GmbH, S. 38-62.
- [22] JORGENSEN, H.: *Investigations of On-line Process Monitoring and Control in CO₂ Laser Cutting*. Technical University of Denmark, Institute of Manufacturing Engineering, Dissertation, 1990.
- [23] JORGENSEN, H.; KECHEMAIR, D.; OLSEN, F. O.: *On-line detection of the cut quality during CO₂ laser beam cutting*. Schweißen und Schneiden (DVS), Band 135 (1991), S. 172-177.
- [24] LEIDINGER, D.; PENZ, A.; SCHUÖCKER, D.: *Improved manufacturing processes with high power lasers*. Infrared Phys. Technol. **36** (1995) No.1, S. 251-266.
- [25] KAPLAN, A.F.H.; WANGLER, O.; SCHUÖCKER, D.: *Laser cutting: Fundamentals of the periodic striations and their on-line detection*. Lasers in Engineering (1997) Nr. 6, S. 103-126.
- [26] KAEBERNICK, H.; JEROMIN, A.; MATHEW, P.: *Adaptive Control for Laser Cutting Using Striation Frequency Analysis*. In: Annals of the CIRP, 1998, S. 137-140.
- [27] CHEN, S.-L.: *In-Process Monitoring of the Cutting Front of CO₂ Laser Cutting with Off-Axis Optical Fibre*. Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology (1997) Nr. 13, S. 685-691.
- [28] HANSMANN, M.: *Laserstrahlschneiden mit rechnergestützter Prozessführung*. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, Dissertation, 1989.
- [29] HEYN, H.: *Prozeßüberwachung und -diagnose beim Schneiden und Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern*. Aachen: Verlag Shaker, 1995. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, Dissertation, 1995 (Berichte aus der Lasertechnik).
- [30] DECKER, I.; HEYN, H.; MARTINEN, D.; WOHLFAHRT, H.: *Process monitoring in laser beam cutting on its way to industrial application*. In: Proc. of the SPIE, 1997, S. 29-37 (SPIE Vol. 3097).

- [31] MARTINEN, D.; DECKER, I.; WOHLFAHRT, H.: *Automatische Fehlererkennung beim Laserstrahlschneiden*. In: Schweißen und Schneiden (DVS), Band 204 (1999), S. 257-262.
- [32] GRAËN, G.: *On-line Qualitätsprüfung und Konzept zur Qualitätssicherung beim Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern*. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, Dissertation, 1992.
- [33] TÖNSHOFF, H.K.; OSTENDORF, A.; KRAL, V.; HILLERS, O.: *Process and Condition Monitoring Features Incorporated in Laser Heads*. In: Proc. of the Materials Processing Conference ICALEO 1999. Laser Institute of America (LIA), 1999, S. 109-117.
- [34] TÖNSHOFF, H.K.; OSTENDORF, A.; KÖRBER, K.; HILLERS, O.: *Principles of Reference-Free Process Monitoring for Laser Material Processing Based on a Multiple Sensor System*. In: Proc. of the Materials Processing Conference ICALEO 2001. Laser Institute of America (LIA), 2001.
- [35] SCHNEIDER, F.; PETRING, D.: *Aktuelle Fortschritte und on-line Prozessüberwachung beim Laserstrahlschneiden*. Aachener Laser Seminare: Innovative Laserschneid- und Laserschweißprozesse für die Metallverarbeitung, 14.11.2005.
- [36] SCHNEIDER, F.; PETRING, D.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschneiden mit PRE*. Aachen: Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT Jahresbericht 2004, S. 69.
- [37] KEUSTER, J. DE; DUFLOU, J. R.; KRUTH, J.-P.: *Methods for Monitoring of Laser Cutting by Means of Acoustic and Photodiode Sensors*. Advanced Materials Research Vols. 6-8, Mai 2005, S. 809-816.
- [38] KEUSTER, J. DE; DUFLOU, J. R.; KRUTH, J.-P.: *Monitoring of high-power CO₂ laser cutting by means of an acoustic microphone and photodiodes*. Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology (2007) Nr. 35, S. 115-126.
- [39] KEUSTER, J. DE: *Development of an adaptive, real-time control and optimisation system for high-power CO₂ laser cutting of thick plates*. Katholieke Universiteit Leuven, Belgien, Dissertation, 2007.

- [40] KEUSTER, J. DE; DUFLOU, J. R.; KRUTH, J.-P.: Real-time adaptive control and optimisation of high-power CO₂ laser cutting using photodiodes. In: Geiger, M. (Hrsg.): Proc. of the LANE, Erlangen, 2007, S. 979-992.
- [41] HAFERKAMP, H.; GOEDE, M.; BUSSE, A. VON; THÜRK, O.: *On-line quality monitoring during laser beam cutting using a thermographic system*. In: Proc. of the Materials Processing Conference ICALEO 1998. Laser Institute of America (LIA), 1998.
- [42] HAFERKAMP, H.; ALVENSLEBEN, F. V.; BUSSE, A. VON; GOEDE, M.; THÜRK, O.: *Thermographic system for process monitoring of laser beam cutting*. In: Proc. of the SheMet Int. Conf., 2000, S. 261-270.
- [43] SCHNEIDER, F.; WOLF, N.; PETRING, D.: *Selbstoptimierende Schneidmaschine*. Aachen: Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT Jahresbericht 2008, S. 112.
- [44] ABELS, P.; SCHULZ, W.: *Prozessüberwachung beim Schneiden mit Laserstrahlung*. Aachen: Mitteilung aus dem Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT.
- [45] REGAARD, B.; KAIERLE, S.: *Optikmodulbaukasten für die Prozessüberwachung und -beobachtung*. Aachen: Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT Jahresbericht 2004, S. 91.
- [46] MOALEM, A.; SCHULZ, W.; KAIERLE, S.: *Simulation und Prozessdiagnose mit koaxialer Fremdbeleuchtung*. Aachen: Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT Jahresbericht 2004, S. 71.
- [47] MOLITOR, T.; SCHNEIDER, F.; BUßKAMP, T.; THOMBANSEN, U.; EPELT, U.; PETRING, D.; SCHULZ, W.: *Self-Optimizing focus technique (SOFT) - A new approach on the way to next generation cognitive laser cutting machines*. In: Proc. of the Materials Processing Conference ICALEO 2010. Laser Institute of America (LIA), 2010.
- [48] SCHULZ, W.; MICHEL, J.; KAIERLE, S.: *Bartbildung beim Schneiden: Simulation und Steuerung*. Aachen: Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT Jahresbericht 2001, S. 59.

- [49] KAIERLE, S.: *Qualitätssicherung und Prozessüberwachung beim Schweißen und Schneiden*. Vortrag auf LASER+BLECH, Lasereinsatz in der Blechbearbeitung, Dortmund, 05.03.2009.
- [50] TÖNSHOFF, H.K.; CHRYSSOLOURIS, G.; ALVENSLEBEN, F. V.; ROSENTHAL, A.; SHENG, P.: *Verfahren zur Qualitätskontrolle für den Materialabtrag mit dem CO₂-Laser*. Laser und Optoelektronik **22**(2), 1990, S.62-66.
- [51] HABEGGER, J.: *Prozessüberwachung Laserschneiden*. Mitteilung aus dem Zentralschweizerischen Technikum Luzern ZTL, Fachstelle für Produktionstechnik und Automation, Zentralschweizerisches Technikum Ingenieurschule Luzern, 1997.
- [52] LI, L.; STEEN, W.M.: *Non-contact acoustic emission monitoring during laser processing*. In: Proc. of the Materials Processing Conference ICALOE 1992. Laser Institute of America (LIA), 1992, S. 719-728.
- [53] BELFORTE, D. A.: *2011 Annual Economic Review and Forecast*. Industrial Laser Solutions for Manufacturing (2012) January/February, S. 4-12.
- [54] ORIEL INSTRUMENTS: *1/8m Spektrograph Oriel MS125*. Datenblatt, 2011.
- [55] OSRAM: *Scientific Lamps WI 17/G. Technical Information*. Datenblatt, 2008.
- [56] HESSE, T.: *Prozesskontrolle mittels optischer Spektralanalyse für das Schweißen verzinkter Stahlfeinbleche mit Nd:YAG-Lasern*. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2006. Universität Hannover, Dissertation, 2006 (Berichte aus dem LZH, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Laser Zentrum Hannover e.V.).
- [57] ZIMMERMANN, M.: *Qualifizierung einer Sensorik zur direkten Beurteilung der Schnittqualität an einer CO₂-Laserschneidanlage*. Studienarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, IFSW 09-14, 2009.
- [58] ONUSEIT, V.; ABDOLAHMED, M.; WEBER, R.; GRAF, T.: *Space-resolved Spectrometric Measurements of the Cutting Front*. In: Proceedings of Lasers in Manufacturing (LIM), München, 2011, S. 584-590.

- [59] ONUSEIT, V., JARWITZ, M.; DANNECKER, B.: *Influence of Cut Front Temperature Profile on Cutting Process*. Proc. of 14th International Workshop on Process diagnostic and control in laser beam welding and cutting - II. Hirschegg, Österreich. Stuttgart: Institut für Strahlwerkzeuge, 2012.
- [60] RALCHENKO, YU.; KRAMIDA, A.E.; READER, J.; and NIST ASD Team: *NIST Atomic Spectra Database* (Version 5), [Online]. Abgerufen: <http://physics.nist.gov/asd> [06.04.2013]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [61] HAYNES, W.M.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010.
- [62] PHOTONFOCUS: *User Manual MV-D1024E CameraLink Series : CMOS Area Scan Cameras*, 07/2008.
- [63] VOSSKÜHLER: *NIR-300(P)CL/GE – NIR Camera (320 x 256 Pixels) with Integrated Image Processing and Camera Link or Gigabit Ethernet Output : Manual Version 2.00*, 02/2008.
- [64] KUBASCHESKI, O.; ALCOCK, C.B.; SPENCER, P.J.: *Materials Thermochemistry*. Oxford: Pergamon, 6th edn., 1993.
- [65] BARIN, I.; KNACKE, O.; KUBASCHESKI, O.: *Thermochemical Properties of Inorganic Substances*. Berlin: Springer, 1991.
- [66] PETRING, D.; PREIBIG, K.U.; ZEPPERER, H.; BEYER, E.: *Plasma-Absorptionseffekte beim Laserstrahlschneiden*. Schweißen und Schneiden, Band 135 (1991) S. 12-15.
- [67] BEYER, E.: *Schweißen mit Laser : Grundlagen*. Berlin: Springer, 1995.
- [68] SOKOŁOWSKI, W.: *Diagnostik des laserinduzierten Plasmas beim Schweißen mit CO₂-Lasern*. Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1991. TH Aachen, Dissertation, 1991 (Aachener Beiträge zur Lasertechnik; Bd. 2).
- [69] SCHITTENHELM, H.: *Diagnostik des laserinduzierten Plasmas beim Abtragen und Schweißen*. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag, 2000. Universität Stuttgart,

- Maschinenbau, Dissertation, 2000 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [70] TESKE, K.: *Über die Thermodynamik und Thermochemie des Brennschneidens*. Dissertation, TU Berlin-Charlottenburg, 1955.
- [71] SCOTT, WILLIAM B.: *Verfahren und Einrichtung zur Steuerung einer mit einem Laser ausgerüsteten Werkzeugmaschine*. Offenlegungsschrift DE 101 29 751 A1, 2002.
- [72] ARATA, Y.; MARUO, H.; MIYAMOTO, I.; TAKEUCHI, S.: *Dynamic Behavior in Laser Gas Cutting of Mild Steel*. Transactions of JWRI **8** (1979) Nr. 2, S. 175-186.
- [73] OPNEXT: *HL6545MG Visible High Power Laser Diode for Recordable-DVD*. Datenblatt, 08/2005.
- [74] BAUMER: *Baumer HXC Series : User's Guide for CameraLink® Cameras with CMOSIS Sensors*. 03/2011.
- [75] CMOSIS IMAGE SENSORS: *2.2 Megapixel machine vision CMOS image sensor : Datasheet CMV2000*. 2010.
- [76] FORTECH HTS GMBH: *Ultrafast Powermeter for CO₂-Laser*. Dokumentation, 2006.
- [77] REDDEMANN, H.: *Transversale Thermokraft in Einkristallen*. In: Annalen der Physik 5. Folge, Band 29 (1937), S. 286-296.
- [78] PAULUS, D.: *Entwicklung und Adaption eines optischen Messsystems an eine Laserflachbettanlage und Qualifizierung von optischen Messgrößen zur Qualitätsbeurteilung von Laserschneidprozessen*. Bachelorarbeit, Hochschule Aschaffenburg, 2011.
- [79] TRUCKENBRODT, E.: *Fluidmechanik : Band 2: Elementare Strömungsvorgänge dichteveränderlicher Fluide sowie Potential- und Grenzschichtströmungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.

- [80] POWELL, J.; PETRING, D.; KUMAR, R. V.; AL-MASHIKHI, S. O.; KAPLAN, A.; VOISEY, K. T.: *Laser-oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction*. Journal of Physics D: Applied Physics **42** (2009).
- [81] KAPLAN, A.F.H.: *An analytical model of metal cutting with a laser beam*. Journal Applied Physics **79** (1996) Nr. 5, S. 2198-2208.
- [82] WEE, L. M.; LI, L.: *Application of control volume method to modelling of laser cutting striation formation*. In: Proc. of the Materials Processing Conference ICALEO 2004. Laser Institute of America (LIA), 2004.
- [83] VICANEK, M.; SIMON, G.: *Momentum and heat transfer of an inert gas jet to the melt in laser cutting*. Journal of Physics D: Applied Physics **20** (1987), S. 1191-1196.
- [84] TIRUMALA RAO, B.; NATH, A.K.: *Melt flow characteristics in gas-assisted laser cutting*. Sadhana **27** (2002) Nr. 5, S. 569-575.
- [85] GRAËN, G.; DECKER, I.: *Prozeßüberwachung beim Laserstrahlschneiden durch Messung der Lichtemission*. Schweißen und Schneiden (DVS), Band 135 (1991), S. 251-255.
- [86] SCHULZ, W.; SIMON, G.; VICANEK, M.: *Influence of the oxidation process in laser gas cutting*. In: SPIE Vol. 801 (1987), S. 331-336.
- [87] GOLUBEV, V. S.; DUBROV, A. V.; ZAVALOV, YU N.; DUBROV, V. D.; DUBROVIN, N. G.: *Diagnostics of laser radiance penetration into material by multi-channel pyrometer*. In: Proc. of Int. Conf. on Adv. Optoelectronics & Lasers CAOL 2010. Sevastopol, Ukraine: IEEE, 2010, S. 182-187.
- [88] MIYAMOTO, I.; MARUO, H.: *The mechanism of laser cutting*. In: Welding in the world **29** (1991) Nr. 9/10, S. 12-23.
- [89] WOODS, K. J.; PARKER, R.: *Two-Color Imaging Pyrometer Temperature Measurements of the Kerf Front During Laser Cutting*. In: Proc. of the Materials Processing Conference ICALEO 1999. Laser Institute of America (LIA), 1999.
- [90] BAEHR, H.D.; STEPHAN, K.: *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.

- [91] DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser : Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität*. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag, 1995. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Habilitationsschrift, 1995 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [92] PETRING, D.: *Anwendungsorientierte Modellierung des Laserstrahlschneidens zur rechnergestützten Prozeßoptimierung*. RWTH Aachen, Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Dissertation, 1995.
- [93] FRANKE, J. W.: *Modellierung und Optimierung des Laserstrahlbrennschneidens niedriglegierter Stähle*. DVS-Berichte Band 161, RWTH Aachen, Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Dissertation, 1994.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand an der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) in Stuttgart und dem Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart in Kooperation mit der Firma TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG in Ditzingen.

Zu allererst möchte ich mich ganz herzlich bei Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf für die Übernahme und fachliche Betreuung dieses sehr spannenden Themas bedanken. Die regelmäßig stattgefundenen Diskussionsgespräche unter anderem im Rahmen des Thesis Committees haben sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth, Leiter des Instituts für Elektrische und Optische Nachrichtentechnik (INT) der Universität Stuttgart, danke ich für die Übernahme des Mitberichts und das Interesse an meiner Arbeit. Ein weiterer Dank geht an Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Nicht unerwähnt lassen möchte ich die fachlichen Diskussionsrunden und die kollegiale Zusammenarbeit am IFSW. Hierfür ein großer Dank an die Kolleginnen und Kollegen vom IFSW, insbesondere denen der Abteilung Verfahrensentwicklung sowie an den Leiter der Verfahrensentwicklung, Herrn Dr. phil. nat. Rudolf Weber.

Ein Großteil dieser Arbeit entstand in der Abteilung Grundlagen Laserschneiden der Firma TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG. Meinen beiden fachlichen Betreuern, Herrn Dr. Gerhard Hammann sowie Herrn Dr. Tim Hesse, möchte ich für die hervorragende fachliche Betreuung und die optimalen Rahmenbedingungen danken. Besonders hervorheben möchte ich die ausgezeichnete Arbeitsatmosphäre und die freundschaftliche Zusammenarbeit mit den Kolleginnen und Kollegen bei TRUMPF. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Markus Zimmermann, Andreas Klein, Raphael Jenski und Daniel Paulus, welche allesamt im Rahmen ihrer jeweiligen studentischen Abschlussarbeit wertvolle Beiträge zu dieser Arbeit geleistet haben.

Abschließend sei natürlich ein großer Dank gerichtet an meine Eltern, welche schon frühzeitig mein Interesse an der Technik geweckt und somit meinen Weg geebnet haben. Meiner lieben Frau Corinna danke ich von ganzem Herzen für ihre Geduld und Unterstützung beim Anfertigen dieser Arbeit.

Stuttgart, im März 2014

David Schindhelm

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

Zoske, Uwe

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

Gorriz, Michael

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

Mohr, Ursula

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

Rudlaff, Thomas

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

Borik, Stefan

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

Paul, Rüdiger

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

Wahl, Roland

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

Frederking, Klaus-Dieter

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

Grünewald, Karin M.

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

Shen, Jialin

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

Arnold, Johannes M.

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

Holzwarth, Achim

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

Dausinger, Friedrich

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

Meiners, Eckhard

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

Beck, Markus

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

Breining, Klaus

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

Griebsch, Jürgen

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

Krepulat, Walter

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

Xiao, Min

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

Glumann, Christiane

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

Gross, Herbert

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

Rapp, Jürgen

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

Wittig, Klaus

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

Grünenwald, Bernd

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

Lee, Jae-Hoon

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

Albinus, Uwe N. W.

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

Wiedmaier, Matthias

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

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

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

Stöhr, Michael

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

Plaß, Wilfried

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

Schaller, Markus K. R.

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

Hack, Rüdiger

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

Krupka, René

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

Pfeiffer, Wolfgang

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

Volz, Robert

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

Bartelt-Berger, Lars

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

Müller-Hummel, Peter

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

Rohde, Hansjörg

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

Huonker, Martin

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

Callies, Gert

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

Schubert, Michael E.

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

Kern, Markus

Gas- und magnetofluidynamische 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 3-89675-851-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen

2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten

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

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit 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 CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

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

Thomas Wawra

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

Michael Honer

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

Thomas Herzinger

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

Reiner Heigl

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

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. 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 Nahteigensschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

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

Mikhail Larionov

Kontaktierung 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

Christoph Neugebauer

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

Andreas Dauner

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

Axel Heß

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

Christian Gehrke

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

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das
Laserstrahlschneiden von Metallen
2014, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

