

„Prozessdiagnose dynamischer Schmelzen zur Regelung von Laserschneidprozessen“

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte
Dissertation

vorgelegt von

Thomas Molitor

Berichter: Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A.
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Uwe Reisgen

Tag der mündlichen Prüfung: 10.09.2014

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Danksagung

Beginnen möchte ich mit Herrn Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A.. Für Ihre uneingeschränkte Unterstützung mit wissenschaftlichen Rat und dem konstruktiven Gespräch, möchte ich mich hiermit ausdrücklich bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen bedanken, ohne dessen Zweitkorrektur diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre, sowie bei Dr.-Ing. Arnold Gillner, der sich auch an einem Feiertag (Weiberfastnacht) nicht nehmen lässt mit seinen Doktoranden die Arbeit weiter zu entwickeln. Als auch meinem Gruppenleiter Dr. rer. nat. Dirk Petring, der durch meine Aufnahme in seine Gruppe, meine persönliche Entwicklung hat reifen lassen.

Besonderen Dank gilt meinem Arbeitskollegen Dr.-Ing. Frank Schneider, der mir jederzeit mit seinem wissenschaftlichen und persönlichen Rat zur Seite stand und zur Reifung dieser Arbeit beigetragen hat. Meinem Freund Johannes, der mich auch über das Studium hinaus motiviert hat.

Ebenso geht mein Dank an alle die, die mich während meiner Tätigkeit im ILT als wissenschaftliche Hilfskräfte unterstützt haben. Vielen Dank Philip, Marc, Mark, Selenia, Tobias B., Tobias G., Dirk, Tim, Lucas.

Meinen Eltern, Inge und Jakob, gilt ein besonderer Dank, da sie mir die Möglichkeiten zu dieser Dissertation erst eröffnet haben. Auch meiner Schwester Tanja möchte ich für Ihre Unterstützung danken.

Mein letzter und wichtigster Dank gilt meiner Freundin Marina. In den positiven und negativen Zeiten dieser Arbeit hast du mich begleitet und jederzeit an meiner Seite gestanden.

Ich liebe Dich. Danke...

Bell, 15. Dezember 2014

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Abstract	3
Abkürzungsverzeichnis	5
1 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit	7
2 Stand der Technik	11
2.1 Verfahren und Marktanalyse	11
2.2 Prozessbeobachtung und -regelung	13
3 Versuchstechnik	17
3.1 Lasersystemkomponenten	17
3.2 Prozessbeobachtung	18
3.2.1 Koaxiale Beobachtung	18
3.2.2 Außeraxiale Beobachtung	19
4 Interpretation Prozessvideos	21
4.1 Außeraxiale Beobachtung – senkrecht zur Schneidfront	21
4.2 Außeraxiale Beobachtung – 45° zur Schneidfront	22
4.3 Koaxiale Beobachtung	24
5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante	27
5.1 Vertikale Riefen	28
5.2 Horizontale Beugungsriefen	40
5.3 Bart	46

6	Prozessantwort der Verfahrensparameter	49
6.1	Fokuslage	51
6.2	Geschwindigkeit	55
6.3	Leistung	59
6.4	Schneidgasdruck	62
6.5	Düsenposition	64
6.6	Zusammenfassung	68
7	Prozessführung und -regelung	71
7.1	Prioritäre Prozessparameter	71
7.2	Prozessregelung am Beispiel der Fokuslage	81
7.2.1	Einrichtassistent	83
7.2.2	Kompensation einer instationären Fokuslage	85
7.2.3	Regelung der Fokuslage	92
8	Zusammenfassung und Ausblick	95
	Literaturverzeichnis	99

Kurzfassung

Das Laserstrahlschneiden ist bereits heute ein großflächig industriell eingesetztes Fertigungsverfahren mit hohen Ansprüchen an Produktionssicherheit, Qualität und Produktivität. Aufgrund unterschiedlichster Produktionssituationen sind diese Ansprüche nicht immer zu erfüllen. Schwerpunkt dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer Prozessregelung auf Basis direkt gemessener Prozessantworten, die mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera aus dem Prozess extrahiert werden.

Grundlage hierfür stellt die Diagnostik und Interpretation von Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen des Laserschneidprozesses dar. Durch den Einsatz unterschiedlicher Kameraperspektiven (koaxial und außeraxial zum Bearbeitungsstrahl) werden das Verständnis zur Entstehung der Schnittqualität (Riefen, Bart) verbessert sowie Parameterregime und Prozessantworten identifiziert, die eine hohe oder verbesserte Schnittqualität ermöglichen. Beispielsweise konnte ein Parameterregime für den Gasdruck bestimmt werden, bei dem sich die Ausprägungen von horizontalen Beugungsriefen verringern. Diese Riefen erhöhen die Rautiefe einer Schnittkante und werden durch einen mittleren moderaten Gasdruck minimiert. Ebenso zeigen Laserschnitte mit einer geringen Schmelzdynamik eine niedrige Rautiefe auf der Schnittkante. Ursache hierfür sind die in Hochgeschwindigkeitsaufnahmen geringer sichtbaren Wellen und Schmelzstränge auf der Schneidfront.

Diese Erkenntnisse legen den Grundstein für den Aufbau einer Prozessregelung. Koaxiale Prozessaufnahmen werden genutzt, um spezifische Prozessantworten für die Fokusslage, Vorschubgeschwindigkeit, Laserleistung, Düsenjustage und den Gasdruck zu identifizieren. Somit ist es möglich, variierende oder abweichende Prozessantworten anhand der Prozessaufnahmen eindeutig einem Verfahrensparameter zuzuordnen. Die Fokusslage hat im Rahmen dieser Untersuchungen die größte Anzahl Prozessantworten. Sowohl die Intensität der Prozessemission, die Standardabweichung der Prozessemission, die Fugenbreite, die Schneidfront-

Kurzfassung

position und die Intensitätsverteilung wird durch die Fokusslage beeinflusst. Eine besondere Stellung nimmt dabei die Fugenbreite ein; nur sie wird deutlich von der Fokusslage beeinflusst. Der Laserleistung hingegen kann keine messbare Prozessantwort zugewiesen werden.

Aufgrund der Komplexität des Laserschneidverfahrens werden die Kriterien Qualität, Detektierbarkeit, Einstellbarkeit und Instationarität zur Bewertung der Verfahrensparameter eingesetzt. Sie bewerten die Wichtigkeit der Prozessantwort für die Prozessregelung. Als Parameter mit der höchsten Priorisierung stellt sich die Fokusslage heraus. Bereits kleine Variationen erzeugen deutliche Qualitätseinbußen, wobei sie gleichzeitig eine Größe ist, die ein thermisch instabiles Verhalten aufweist. Der iterative Aufbau einer Prozessregelung wird daher mit der Fokusslage demonstriert. Diese eliminiert die Instationarität und hält die Fokusslage trotz Störungen auf einem konstanten gewünschten Wert.

Abgerundet wird die Arbeit von einem Konzept, welches den Aufbau einer multikriteriellen Prozessregelung erlaubt. Das bestehende System zur Regelung der Fokusslage kann hiermit iterativ erweitert werden und ermöglicht den Einbezug weiterer Verfahrensparameter.

Abstract

Laser cutting is already an industrially applied manufacturing processes with high-claims on production safety, quality and productivity. Due to the different production situations, these claims are not always fulfilled. Focus of this work is the development and construction of a process control which governs with the help of a high speed camera process parameters based on specific process responses to a desired set point. The aim is to increase the production safety, the cut quality and processing speed for all production conditions. Basis of the development is the diagnostics and interpretation of high-speed video recordings of the laser cutting process. The use of different camera perspectives (coaxial and off-axis) will increase the knowledge about the generation of cut quality (ripple, dross) and determines parameter regimes and process responses that allow high or increased cut quality.

With the improved understanding of the ripple generation, for example, a parameter regime for the gas pressure could be determined, in which the expression of horizontal diffraction grooves are reduced. These ripples increase the surface roughness of a cut edge and can be minimized by a moderate gas pressure. Furthermore, it was demonstrated that low melting dynamics, achieved by waves and strands on the cutting front, generate low surface roughness on the cutting edge.

These insights are already laying the first foundation stone for the construction of a process control. Coaxial process recordings are used to identify specific process-responses for the parameters focal position, feed rate, laser power, nozzle adjustment and gas pressure. With the help of this process-responses it is possible to identify varying or different parameters specifically. Here, in the context of these studies, the focal position has the largest range of process responses. The intensity of the process emission, the standard deviation of the process emission, the kerf width, the cut front position and the intensity distribution is influenced by the focal position. However, specific to the focal position is the kerf width. Only for a varying

Abstract

laser power no specific process-responses could be identified.

Due to the complexity of the laser cutting process the criteria of quality, detectability, controllability and nonstationarity are used to evaluate the process parameters in terms of their priority to the application for a process control. Here the focal position is the most relevant parameter. Already small changes in its position produce significant changes in the cutting quality and is although nonstationary because of the thermal induced focal shift. The iterative development of a process control is therefore demonstrated by this parameter. The developed control eliminates the nonstationarity of the focal position and keeps the focal position, with the help of the substitute criterion of kerf width, at the selected value.

A concept for a multi-criteria process control rounds out the thesis. It shows the iterative extension of the focal position control with additional parameters.

Abkürzungsverzeichnis

α_{max}	Beugungswinkel
b	Spaltbreite
d	Abstand von der Werkstückoberfläche in vertikaler Richtung
k	Ordnung des Beugungsmaximums
λ	Wellenlänge
ω	Fugenbreite
f	Brennweite
P	Laserleistung
η	Anteil der Laserleistung, die in Wärme konvertiert wird
k	Wärmeleitfähigkeit
r_0	Strahlradius auf der Linse
$\frac{dn}{dT}$	Temperaturkoeffizient des Brechungsindex

1 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

In der Vielfalt von Bearbeitungsverfahren nimmt das Laserschneiden durch die flexible Einsatzfähigkeit, die geringe Wärmeeinflusszone, die hohe Produktqualität und den effizienten Ressourceneinsatz einen hohen Stellenwert ein. Diese Vorteile führen zu einem wichtigen Wirtschaftszweig, der weltweit jährlich ca. fünf Milliarden US Dollar umsetzt [1].

Werkzeugmaschinenhersteller haben in diesem Marktsegment ein hohes Interesse daran, die Produktqualität und die Produktionssicherheit zu verbessern. Nur durch diesen stetigen Fortschritt können Firmen konkurrenzfähige Produkte in den Markt einführen und ihre Position im Markt behaupten. Diese Arbeit hat daher zum Ziel, eine Verbesserung der Produktqualität und der Produktionssicherheit durch eine Prozessregelung zu ermöglichen (vgl. Abb. 1.1). Hierzu werden Verfahrensparameter direkt aus dem Prozess ausgelesen und Abweichungen

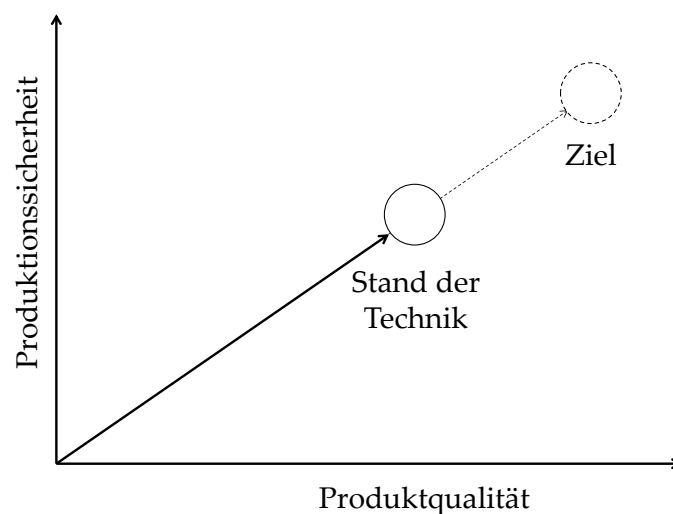


Abbildung 1.1: Grafik zur Zielsetzung der Dissertation

1 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

von den gewünschten Sollgrößen korrigiert. Als wesentlicher Baustein für diese Prozessregelung bedarf es zunächst der Erweiterung des Verständnisses zu diesem hochdynamischen schmelzebasierten Materialbearbeitungsprozess. Der Erkenntnisfortschritt ist Basis, um Optimierungspotentiale aufzudecken und diese industrietauglich und profitabel umzusetzen.

Der Wissensfortschritt bezieht sich dabei auf die Entstehung von Schnittriefen und Bart, der spezifischen Zuordnung von Prozessantworten zu Verfahrensparametern und dem hierauf basierenden Konzept einer Prozessregelung. Grundlegend für diese Entwicklung ist hierbei die empirische Analyse von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der schmelzdynamischen Prozesse auf der Schneidfront.

Zur Entwicklung der bereits beschriebenen Prozessregelung zeigt Abbildung 1.2 den zugrunde liegenden Aufbau der Arbeit als schematisches Flussdiagramm. Eingeteilt ist das Diagramm in die drei Stufen: Analysieren, Verstehen und Beherrschen. Unter Analysieren fällt der aktuelle Stand der Technik zum Laserstrahlschmelzschneidprozess. Weiterhin gehört hierzu die grundlegende Interpretation der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Thermische Emissionen müssen hier von Reflexionen separiert werden.

Ein Ziel für die Prozessregelung ist die Einhaltung und Verbesserung der Schnittqualität. Hierzu werden die grundlegenden Mechanismen zur Riefen- und Bartbildung beschrieben und Unterschiede zwischen vertikalen und horizontalen Beugungsriefen dargestellt. Hieraus abzuleitende Prozessregime und Prozessantworten können direkt für die Entwicklung der Prozessregelung genutzt werden. Auf Basis dieses Wissens erfolgt im nächsten Schritt die Untersuchung des Prozesses mit Hilfe einer koaxial zum Bearbeitungslaserstrahl integrierten Hochgeschwindigkeitskamera. Um Abweichungen von den Soll-Einstellungen eines Verfahrensparameters detektieren zu können, werden spezifische Prozessantworten zu jedem Verfahrensparameter gesucht. Nur mit Hilfe dieser Information können abweichende Verfahrensparameter eindeutig zugeordnet und korrigiert werden.

Die Entwicklung einer multikriteriellen Prozessregelung beinhaltet meist eine enorme Komplexität, weshalb für den weiteren Aufbau der Prozessregelung der relevanteste Verfahrensparameter identifiziert wird. Hierzu werden die Verfahrensparameter hinsichtlich der folgenden Kriterien untersucht: Qualitätseinfluss, Umsetzbarkeit einer Regelung und Instabilität des Parameters. Die Fokusslage sticht bei dieser Untersuchung hervor, da sie einen hohen Qualitätseinfluss aufweist und durch eine thermische Linsenbildung einer dauerhaften Instabilität unterliegt.

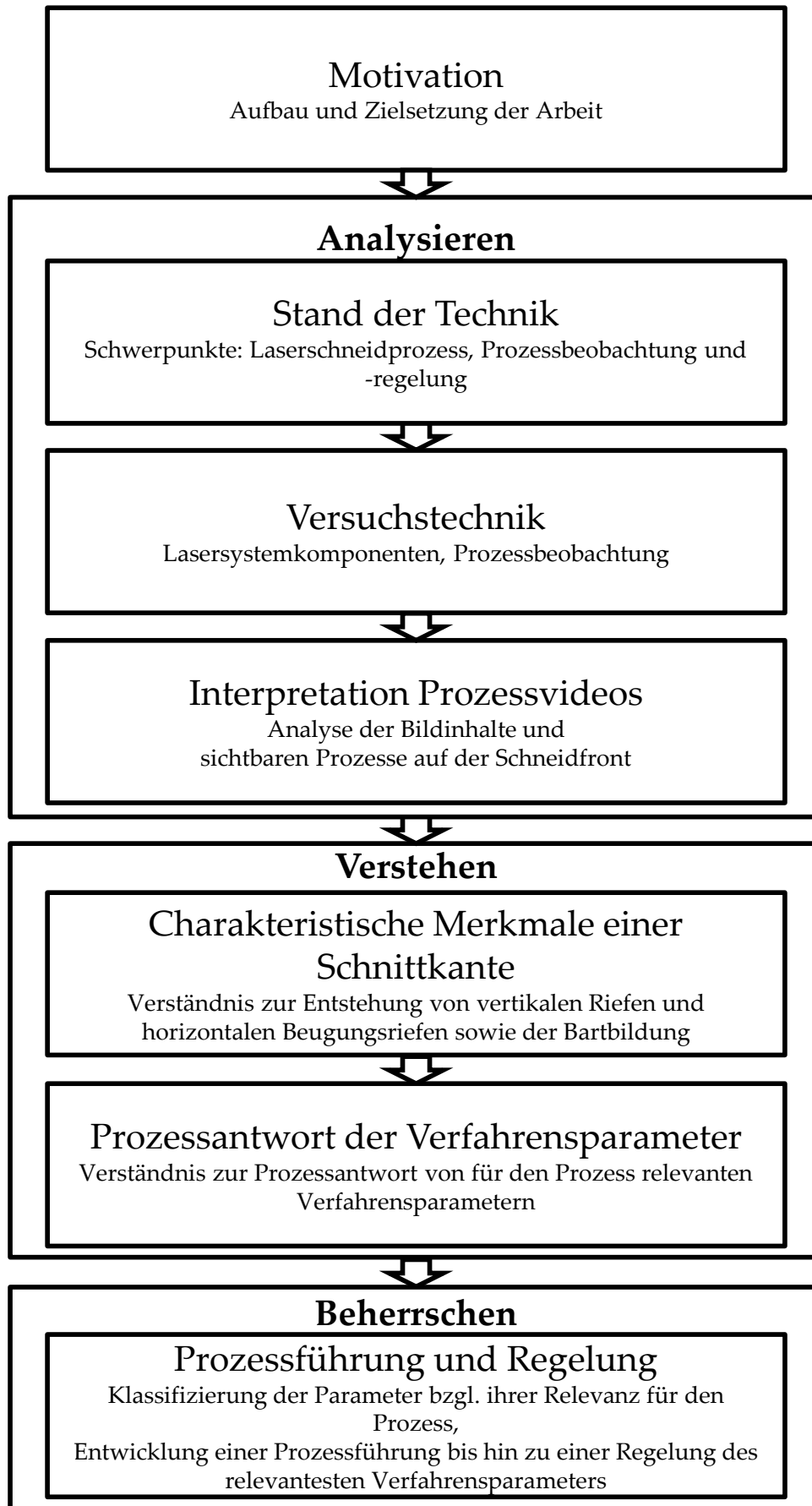


Abbildung 1.2: Flussdiagramm zum Aufbau dieser Arbeit

1 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Abbildung 1.2 zeigt als letzte Überschrift das „Beherrschen des Prozesses“. Aus den vorangegangenen Informationen wird die Prozessregelung der Fokuslage mit der Fugenbreite als Regelgröße entwickelt. Hierzu wird ein Konzept die Fokuslagenregelung dargestellt und aufgebaut.

Mit einer Entwicklungsmethode zur iterativen Erweiterung dieser Regelschleife schließt diese Arbeit ab und ermöglicht eine Mehrgrößenregelung. Die grundlegenden Prozessantworten werden in dieser Arbeit evaluiert, so dass zukünftig mit Hilfe der zuvor genannten Methodik die Produktqualität, die Prozessgeschwindigkeit und die Produktionssicherheit über das hier beschriebene Maß hinaus weiterentwickelt werden kann.

2 Stand der Technik

2.1 Verfahren und Marktanalyse

Das Laserschneiden als Fertigungsverfahren wird nach DIN EN ISO 8580 in die Hauptgruppe 3 „Trennverfahren“ einklassiert und nach DIN EN ISO 9013 in die Untergruppe der thermischen Schneidverfahren eingegliedert. Dort werden drei verschiedene Arten des Laserschneidens unterschieden. Das Laserschmelzschnitten, das Laserbrennschnitten und das Lasersublimierschnitten.

Beim Lasersublimierschnitten wird das zu bearbeitende Material von einem festen Zustand direkt in einen gasförmigen Zustand transferiert. Aufgrund des geringen thermischen Energieeintrages eignen sich hierfür auch nichtmetallische Werkstoffe wie Keramiken oder Verbundwerkstoffe.

Das Laserbrennschnitten ist ein dominant von Schmelze getriebener Prozess. Die durch die Absorption der Laserstrahlung entstehende Schmelze wird durch eine Gasströmung aus der Schnittfuge ausgetrieben. Für zusätzliche Energie sorgt beim Brennschnitten das Schneidgas Sauerstoff. Durch die Oxidation des Metalls können hohe Schnittgeschwindigkeiten erzielt werden. Dies hat zur Folge, dass Schnittkanten nicht oxidationsfrei geschnitten werden können.

Beim Laserstrahlschmelzschnitten wird auf die zusätzliche Energie des Sauerstoffs verzichtet. Zum Einsatz kommt hier ein inertes Gas, meist Stickstoff, welches die Schmelze aus der Schnittfuge austreibt.

Eine durch einen Laserstrahlschmelzschnitt resultierende Schnittfuge zeigt Abbildung 2.1. Die Betrachtung erfolgt in einer 90° Perspektive zur Schnittrichtung. Die Absorption der Laserstrahlung findet dominant auf der Schneidfront statt. Der Schneidfrontwinkel α beschreibt den

2 Stand der Technik

Winkel, der sich senkrecht zum einfallenden Laserstrahl ergibt. Zwischen Schneidfront und Schmelzfront liegt die eigentliche Schmelze, angetrieben von äußeren Kräften des Schneidgases und der Gravitation.

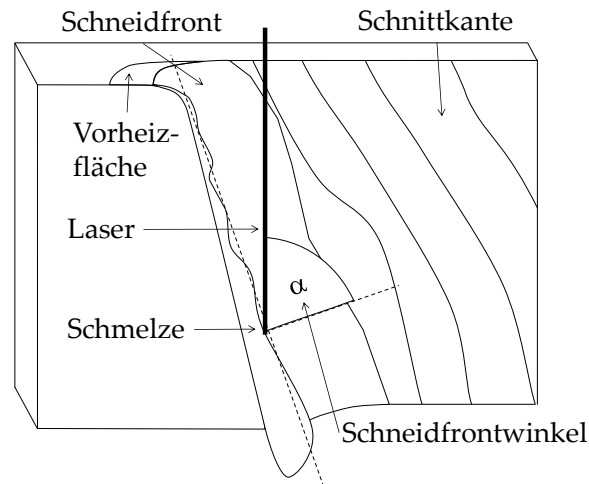


Abbildung 2.1: Skizze einer halben Schnittfuge in einer 90° Perspektive relativ zur Vorschubrichtung (in Anlehnung an Olsen [2])

Bereits 1967 untersuchten Sullivan und Houldcraft das gasunterstützte Laserschneiden von Metallen (Brennschneiden) [3]. Erweitert wurde das Bearbeitungsspektrum um den Prozess des Laserschmelzscheidens [4]. Bis heute ist der häufigste Bearbeitungslaser für das Metallschneiden ein CO₂-Laser. Hohe verfügbare Laserleistungen für die Bearbeitung werden genutzt um mehrere Millimeter dicke Edelstähle bei höchster Bearbeitungsqualität zu schneiden. Das Aufkommen neuer Laserstrahltechnologien, wie dem Scheiben- oder Faserlaser mit mehreren Kilowatt Laserleistung bei hoher Strahlqualität von $<1,1$ mm/mrad [5] ermöglichen in jüngerer Zeit den Einsatz von hochdynamischen fasergeführten Laserschneidanlagen mit Beschleunigungen bis zu 5g [6]. Die Vorteile der Faserführung lassen diese neue Strahlquellen mit dem CO₂-Laser konkurrieren [7].

Qualitativ ist der CO₂-Laser weiterhin das Referenzobjekt. Sowohl hinsichtlich der Riefen auf der Schnittkante als auch hinsichtlich des Auftretens von Bart. Die Bildung von Riefen wird von den Autoren Yudin und Kovalev als ein Ergebnis einer unstetigen Erstarrung der Schmelze auf der Schnittkante beschrieben, die durch Schwankungen der Schmelzmenge, spontane Umlenkung der Schmelze oder Wellen auf der Schmelzoberfläche gebildet werden

[8].

Trotz der seit vielen Jahrzehnten bekannten Technologie und der hohen Industriereife ist die Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet ungebremsst. Radovanovic konnte seit 2005 eine Zunahme der Veröffentlichungen mit experimentellem Schwerpunkt nachweisen [9]. Weiterhin weist Overton bis 2012 einen deutlichen Zuwachs an F&E Investitionen für den gesamten Lasermarkt nach [1].

2.2 Prozessbeobachtung und -regelung

Die Verbesserung eines bestehenden Prozesses kann nach Abbildung 1.2 in drei Teilprozesse gegliedert werden. Demnach folgt nach der Analyse eines Prozesses das Verstehen, so dass im letzten Schritt das Beherrschen des Prozesses zu einem verbesserten Prozessergebnis führt.

Zu den Stufen Analysieren und Verstehen existieren bereits heute eine Vielzahl verschiedener Methoden und Technologien, die das Verständnis der Teilprozesse verbessern. Jedoch ist das Beherrschen, in Form einer Regelung, bisher nicht umfänglich untersucht.

Das häufigste Werkzeug zur Prozessbeobachtung sowohl für Schmelz- und Brennschneiden ist die Photodiode. Durch eine kleine Bauart und die niedrigen Produktkosten weisen sie eine hohe Relevanz für das industrielle Umfeld auf. Die Photodiode nimmt durch ihren technischen Aufbau ein räumliches Integral der Prozessintensität auf. Dies ist gleichzeitig der Nachteil dieser Diagnosetechnik. Geometrische Abmessungen einer Emission, die räumliche Ausdehnung eines Vorganges und die Intensitätsverteilungen eines Objektes kann nicht analysiert werden.

Trotz dieses Nachteiles konnten beispielsweise Kaplan et al. mit Hilfe einer Photodiode die Güte einer Schnittkante beim Laserbrennschneiden bestimmen. Die Autoren nutzen hierzu eine Qualitätszahl, die die Rautiefe auf der Schnittkante bestimmt [10]. Begründet wird diese Korrelation damit, dass die periodischen Schwankungen der Schneidfront im Messsignal auffindbar sind und sich diese als Riefen auf den Schnittkanten ablagern. Eine ähnliche Korrelation konnten auch Decker et al. [11] für das Brennschneiden von Baustahl zeigen. Auch hier konnte aus der Varianz des Photodiodensignals eine Korrelation zur Rautiefe einer Schnittkante bestimmt werden. Weiterhin konnten die Autoren feststellen, dass die Hauptfrequenz des Signals mit der Riefenfrequenz übereinstimmt.

2 Stand der Technik

Für das Schneiden von Edelstahl und der Detektion der Prozessstrahlung mit einer Photodiode, konnten Jorgensen und Olsen bereits nachweisen, dass die Bildung von Bart mit einer deutlichen Zunahme der Intensität einhergeht [12].

Ebenso wie beim Laserschweißen wurden auch vom Laserschneidprozess Aufnahmen mit Mikrofonen angefertigt und die akustischen Signale analysiert [13]. Keuster wies 2007 Korrelationen zwischen der Schnittqualität und akustischen Signalen nach [14]. Insbesondere wurde der vollständiger Durchbruch beim Einstechen detektiert. Durch einen Vergleich mit den Signalen einer Photodiode, konnte er den Vorteil einer Photodiode durch geringeren Aufwand bei der Signalverarbeitung nachweisen. Allerdings trägt auch der akustische Sensor den Nachteil einer nicht räumlich aufgelösten Detektion von Signalen. Durch die Betrachtung einer Schneidfront wird jedoch ersichtlich, dass eine flächige Analyse des Prozesses sinnvoll ist. Unterschiedliche Schmelzfilmdicken auf der Front, eine halbkreisförmige Form und unterschiedliche Prozessemissionen je nach Parameter machen eine Beobachtung mit einer Kamera unumgänglich. Erst durch diese Diagnosetechniken wird die Zugänglichkeit zu den Teilprozessen des Laserstrahlschneidprozesses ermöglicht.

Ein Beispiel hierzu sind die Ergebnisse von Fushimi et al., die mit Hilfe einer CCD-Kamera eine wiederkehrende Bewegung der Schmelze mit nahezu festen Zeitkonstanten beim Brennschneiden von Baustahl detektierten [15]. In jüngerer Zeit leisteten insbesondere Hirano et al. mit Hilfe der Kameratechnik wichtige Beiträge zum Verständnis des Laserschmelzschneidens. Die Autoren konnten nachweisen, dass der sonst hochdynamische Schmelzprozess auf der Schneidfront in spezifischen Parameterbereichen einen nahezu stabilen Schmelzprozess ohne Wellenbildung auf der Schneidfront bildet [16][17].

Zusammengefasst zeigt Tabelle 2.1 die unterschiedlichen Sensoren, die häufig bei der Prozessbeobachtung von Laserschneidprozessen eingesetzt werden. Dabei ist Interpretierbarkeit von Prozessaufnahmen, sowohl bei der Photodiode als auch beim Mikrofon, aufgrund ihrer eindimensionalen Beobachtungsmöglichkeiten nur befriedigend einzustufen. Mangelnde zwei oder dreidimensionale Auflösung lassen hier Wünsche offen.

Im Vergleich hierzu sind Hochgeschwindigkeits-Kameras mit einem Preis von mehreren Tausend Euro teuer und daher nur selten in der industriellen Anwendung zu finden. Trotz des hohen Preises ist die Kamera durch ihre zweidimensionale Auflösung hinsichtlich der Interpretierbarkeit im Vorteil. Neben der integralen Auswertung der Bildintensität, welche auch bei der Photodiode ausgewertet werden kann, sind auch geometrische Spezifikationen auswert-

Sensortyp	Antwort	räuml. Auflösung	Interpretierbarkeit	Kosten
Hochgeschwindigkeits-Kamera		2D (hier bis zu 1.696x1.710 pix)	sehr gut	hoch (mehrere T€)
Photodiode		1D (1 pix)	befriedigend	niedrig (einige hundert bis T€)
Mikrofon		1D	befriedigend	niedrig (einige hundert bis T€)

Tabelle 2.1: Geeignete Prozesssensoren für den Einsatz im Laserschneidprozess

bar. Intensitätsverteilung und geometrische Änderungen können mit der Kamera detektiert werden und mit Hilfe eines Bildverarbeitungsalgorithmus automatisch ausgewertet werden. Diese Eigenschaft erhöht die Aussage von Prozessaufnahmen mit einem Sensor so stark, dass insbesondere für Regelungsaspekte die Kamera, trotz des hohen Preises, im Vorteil ist. Für diese Arbeit wurde daher die Kameratechnik als Sensor für die Prozessregelung gewählt.

Regelungssysteme ermöglichen es, eine Größe auf einem statischen Wert zu halten, obwohl Störgrößen den Prozess negativ beeinflussen. Hierdurch ist es möglich, Verbesserungen der Schnittqualitäten, der Prozessgeschwindigkeit und eine höhere Prozesssicherheit zu gewährleisten. Industriell werden bereits heute in verschiedenen Teilgebieten Regler und Messsysteme eingesetzt. Beispielsweise ist die kapazitive Abstandregelung zwischen Schneiddüse und Werkstück ein häufig eingesetztes Werkzeug in Schneidanlagen [18]. Diese Einrichtung ist besonders relevant, da die Werkstücke meist keine ebene Oberfläche aufweisen oder nicht eben aufgelegt werden. Die gewünschten Schneidergebnisse werden gleichzeitig bei Düsenabständen zwischen 0,5 und 1,5mm realisiert, sodass eine Regelung des Düsenabstandes während des Schneidbetriebes für eine konstante Qualität unabdingbar ist.

Bereits 1989 konnten Beyer et al. ein Verfahren zur Regelung des Einstechvorganges beim Laserschneiden patentieren [19]. Hierbei wird die Laserleistung so geregelt, dass die Prozessemission in einem zuvor definierten Fenster variiert. Beim Überschreiten einer definierten Prozessemission wird die Leistung reduziert, bis die Emission unter einen Schwellwert gelangt, bei dem die Leistung wieder erhöht werden kann. Dies soll das Aufheizen der Schmelze

2 Stand der Technik

über Verdampfungstemperatur verhindern und zu einer verminderten Spritzerbildung auf der Werkstückoberfläche führen.

Zur kamerabasierten Regelung konnten insbesondere Haferkamp et al. [20] 1999 in Untersuchungen mit einer 50Hz Thermokamera bei geringen Blechdicken von 0,5 bis 1mm mit einem lampengepumpten Laser beispielsweise nachweisen, dass mit steigender Schneidgeschwindigkeit die Intensität der Prozessemission zunimmt. Mit Hilfe dieser ersten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Verfahrensparameter einen direkten Einfluss auf die Emission des Prozesses haben. Aufgrund des Einsatzes einer Thermokamera mit niedriger Bildrate konnten schmelzdynamische Prozesse, wie von Hirano nachgewiesen, nicht untersucht werden. Ebenso fehlt durch diese Untersuchungsmethode die Möglichkeit, geometrische Eigenschaften des Prozesses, wie beispielsweise die Fugenbreite, in Bereichen ohne thermische Emission zu ermitteln.

Eine Erweiterung der Prozessbeobachtungsmöglichkeiten zeigten die Autoren Bautze et al. für den Laserschweißprozess. Sie verwendeten nicht die Analyse der direkten Prozessemission, sondern nutzen den Unschärfegrad bei der Bildung einer thermischen Linse als ein Ersatzkriterium zur Bestimmung der Fokuslage [21]. Da sowohl Laserleistungen als auch die optischen Komponenten des Laserschweißens dem Laserschneiden ähneln, zeigen diese Ergebnisse das Potential einer Regelung mit dem Nachteil der indirekten Messgröße.

Zusammenfassend zeigt diese Auflistung, dass bereits Entwicklungsschritte im Bereich Prozessbeobachtung insbesondere für das Verfahren des Brennschneidens durchgeführt wurden. Forschungsbedarf besteht allerdings bei der Prozessbeobachtung des Laserschmelzscheidens von Edelstählen mit Hilfe flächige auflösender Kameratechnik. Diese Arbeit soll daher einen Teil dazu beitragen, ein tieferes Verständnis über die physikalischen Phänomene des Schmelzscheidens zu erhalten und den Weg zu einem geregelten Prozess zu ebnen.

3 Versuchstechnik

3.1 Lasersystemkomponenten

Die Schneidexperimente werden an Anlagen mit CO₂- und Faserlasern durchgeführt und mit dem folgendem Verfahrensparameter-Spektrum verwendet:

Parameter \ Lasertyp	CO ₂ -Laser	Faserlaser
Wellenlänge [µm]	10,6	1,07
Laserleistung [kW]	bis 6	bis 4
Faserdurchmesser [µm]		100
Brennweite Kollimation [mm]		120
Rohstrahldurchmesser [mm]	15-25	18
Brennweite Fokussierlinse [mm]	250	220
Fokusdurchmesser [mm]	280 - 480	100
Düsendurchmesser [mm]	2,3 - 2,7	2,3 - 2,7
Gasdruck [bar]	4 - 22	4 - 22
Werkstoff	1.4301	1.4301

Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Prozesssensoren

Je nach Aufgabenstellung werden die Verfahrensparameter so angepasst, dass ein optimales Schnittergebnis resultiert. Die Untersuchungen fokussieren sich dabei auf relative Unterschiede zwischen den einzelnen Parametervariation, ohne das Ziel zu verfolgen absolute

Analysewerte anzugeben.

3.2 Prozessbeobachtung

In dieser Arbeit werden zweidimensional auflösende Hochgeschwindigkeits-Kamerasysteme zur Beobachtung des Schneidprozesses genutzt.

Neben zwei verschiedenen Kamerateypen mit farb- und monochromer Aufnahmetechnik werden drei unterschiedliche Perspektiven eingesetzt. Dazu zählen eine koaxiale Beobachtung und zwei außeraxiale Perspektiven.

Die außeraxialen Kameraperspektiven werden im Wesentlichen genutzt, um schmelzdynamische Prozesse auf der Schneidfront und der Schnittkante zu untersuchen. Für die konkreten Regelungsaufgaben wird hingegen eine koaxiale Perspektive gewählt. Diese ist richtungsunabhängig und besitzt durch die Montage der Kamera auf dem Schneidkopf eine kontinuierlich scharfe Abbildung des Prozesses.

3.2.1 Koaxiale Beobachtung

Beim Einsatz der koaxialen Perspektive wird die Kamera mittels Strahlteiler in den Strahlengang des Bearbeitungslaserstrahls eingebunden. Sie kann mit dem Schneidkopf mitbewegt werden und ist schnittlängen- und richtungsunabhängig. Abbildung 3.1 zeigt eine Skizze der koaxialen Beobachtungsperspektive inklusive einer Nomenklatur („II“) links im Bild. Diese Nomenklatur ist in allen folgenden Grafiken mit koaxialer Perspektive abgebildet.

Die Schnitttrichtung ist bei der koaxialen Prozessbeobachtung lediglich für den Bildverarbeitungsalgorithmus relevant und muss auf die jeweilige Richtung adaptiert werden.

Neben der Auswahl einer besonders schnellen und hochsensitiven Kamera sollte das Kamerasystem möglichst kompakt ausfallen. Ein niedriges Gewicht verringert eine durch Schwingungen induzierte Bewegungsunschärfe des Bildes. Die Graustufen-Kamera „Mikrotron Motion-BLITZ EoSens mini 2“ mit einer Bildfrequenz von 200.000 Bildern pro Sekunde und einem Dynamikumfang von bis zu 80dB [22] kann aufgrund ihrer geringen Baugröße und einem Gewicht von 280g ideal genutzt werden.

Durch den koaxialen Aufbau kann für die Abbildung des Objektes ein einfaches Linsensystem mit einem Vergrößerungsmaßstab von 1:1 gewählt werden.

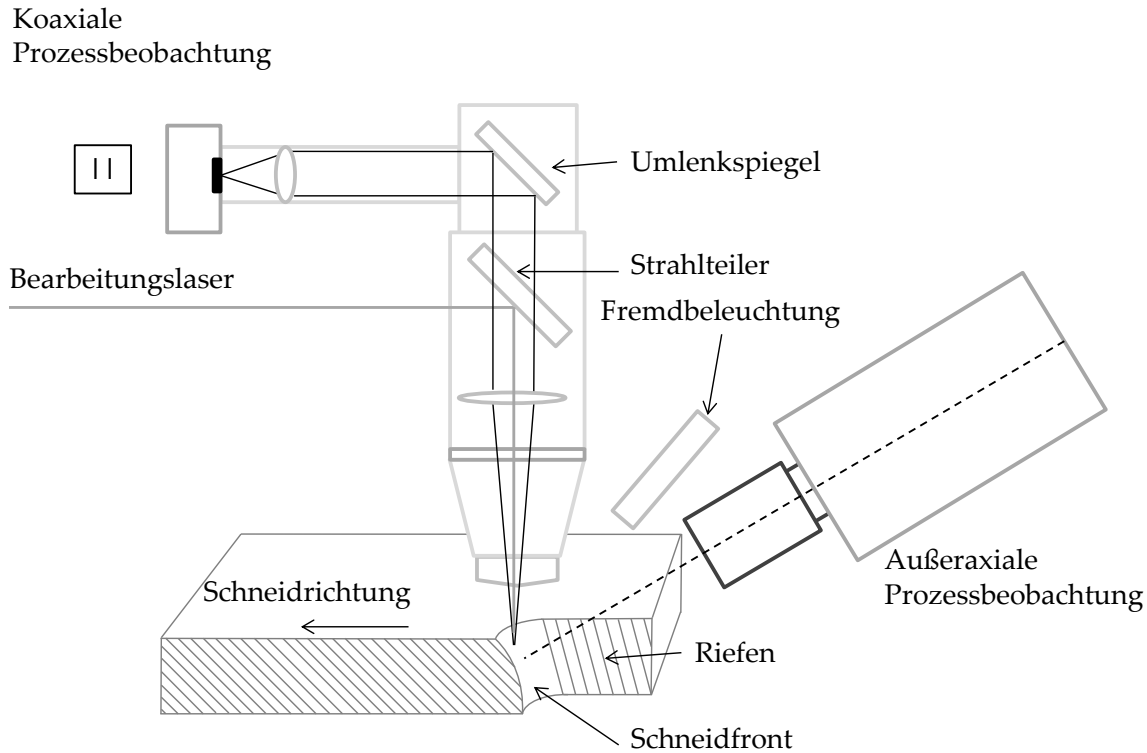


Abbildung 3.1: Aufbau der Prozessbeobachtung in koaxialer und außeraxialer Beobachtungsperspektive

3.2.2 Außeraxiale Beobachtung

Außeraxiale Aufnahmeperspektiven zeigen ihre Vorteile in der Beobachtung des Schmelzfilmes auf der Schneidfront und der Erstarrung der Schmelze an der Schnittkante. Koaxiale Aufnahmen sind hierbei deutlich im Nachteil, da die projizierte Fläche der Front sehr klein ist und einzelne Schmelzwellen schlecht detektiert werden können.

Abbildung 3.2 zeigt mit „Kamera 1“ eine um ca. 45° zur Schneidrichtung und oberhalb der Blechoberfläche (vgl. Abbildung 3.1) angeordnete Kameraperspektive. Diese Perspektive vereint sowohl die Möglichkeit zur Beobachtung der Schmelzwellen auf der Schneidfront als

3 Versuchstechnik

auch der Erstarrung auf der Schnittkante. Wesentlich ist die Entstehung von Riefen und die hieraus resultierende Rautiefe des Schnittes. Bei dieser Perspektive kann es von Vorteil sein, eine Fremdbeleuchtung einzusetzen. Dies erhöht die Interpretierbarkeit, da die Fremdbeleuchtung dominant die Helligkeit der Blechoberfläche verbessert. Somit wird die Trennbarkeit zwischen kalter bzw. fester Blechoberfläche und Schmelze im Einzugsbereiches des Lasers vereinfacht. Die mit Kamera 1 beschriebene Beobachtungsperspektive erhält im Folgenden die Nomenklatur eines 45° Winkels (vgl. Symbol).

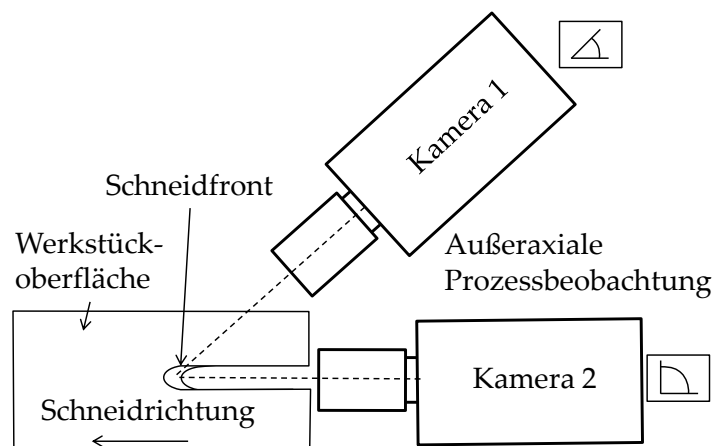


Abbildung 3.2: Aufsicht der beiden außeraxialen Prozessdiagnose-Perspektiven, Kamera 1: 45° zur Schneidfront, Kamera 2: senkrecht zur Schneidfront

Die zweite eingesetzte Perspektive ist durch „Kamera 2“ in Abbildung 3.2 bezeichnet. Hierbei wird ausschließlich die Schneidfront beobachtet. Schwerpunkt liegt auf dem Schneidfrontscheitel und ermöglicht dort bspw. die Analyse der Schmelzwellengeschwindigkeit und des Schmelzaustriebes. Da der Kamerachip senkrecht zur Schneidrichtung eingestellt ist, erhält diese Perspektive im Folgenden die Nomenklatur und das Symbol eines rechten Winkels.

Die Farbkamera „Redlake HG100K“ mit einer maximalen Bildfrequenz von 100.000 Bildern pro Sekunde und einem Dynamikumfang von 62dB [23] besitzt ein deutlich höheres Gewicht als die Mikrotron Kamera. Allerdings ist dies aufgrund der Montageposition als unkritisch zu bewerten. Entscheidender Vorteil dieser Kamera ist die verfügbare Farbinformation. Dies erhöht die Interpretationsmöglichkeit durch das menschliche Auge und dient daher besonders dem Verständnis des Bildinhaltes.

Im außeraxialen Fall wird die Abbildung mit einem 105mm Fotoobjektiv realisiert. Es entsteht auch in dieser Perspektive ein Abbildungsmaßstab von 1:1.

4 Interpretation Prozessvideos

Für ein umfassendes Verständnis der, in den Prozessvideos, sichtbaren Schmelzbewegungen werden zunächst die unterschiedlichen Emissionserscheinungen auf der Schneidfront analysiert. Die erste Beobachtungsperspektive ist senkrecht zur Schneidfront und parallel zu den Schnittkanten (vgl. Abbildung 3.2 „Kamera 2“). Die zweite Perspektive ist in einem Winkel von 45° zu den Schnittkanten und leicht erhöht über der Blechoberfläche angeordnet. Die letzte Beobachtungsperspektive ist koaxial zum Bearbeitungslaserstrahl und somit lotrecht zur Blechoberfläche. Eingesetzt werden industrieübliche Verfahrensparameter aber auch eine starke Defokussierung zur Vergrößerung der begrenzenden Fugenapertur.

4.1 Außeraxiale Beobachtung – senkrecht zur Schneidfront

Abbildung 4.1 zeigt eine Bildsequenz über sechs Einzelbilder der außeraxialen Prozessbeobachtung senkrecht zur Front bei industrieüblichen Verfahrensparametern. Rechts neben den Einzelbildern ist eine Skizze der Aufnahmen eingezeichnet. In dieser sind die Bereiche sichtbar, die auch in der Bildsequenz dargestellt sind. Die schmelzflüssige Schneidfront ist zu erkennen und die links und rechts davon bereits erstarrten Schnittkante. Die dominante Prozessemission stammt von einem schmalen Schmelzstrom auf der Schneidfront. Seitlich von diesem Schmelzstrom sind Reflexionen auf den Schnittkanten sichtbar. Ein Pfeil am ersten Bild zeigt ein Beispiel für Reflexionen an einer Riefe, welche sich in jeder Sequenz unabhängig von der Dynamik im Schmelzstrom wiederfinden lässt. Diese statische Eigenschaft zeigt, dass diese Struktur unbeweglich ist, sodass die Emission von dieser Oberfläche nur durch Re-

flexionen an der bereits erstarrten Riefe entstehen kann. Eine Analyse der Schmelzdynamik wird daher auf den schmelzflüssigen Bereich der Schneidfront beschränkt.

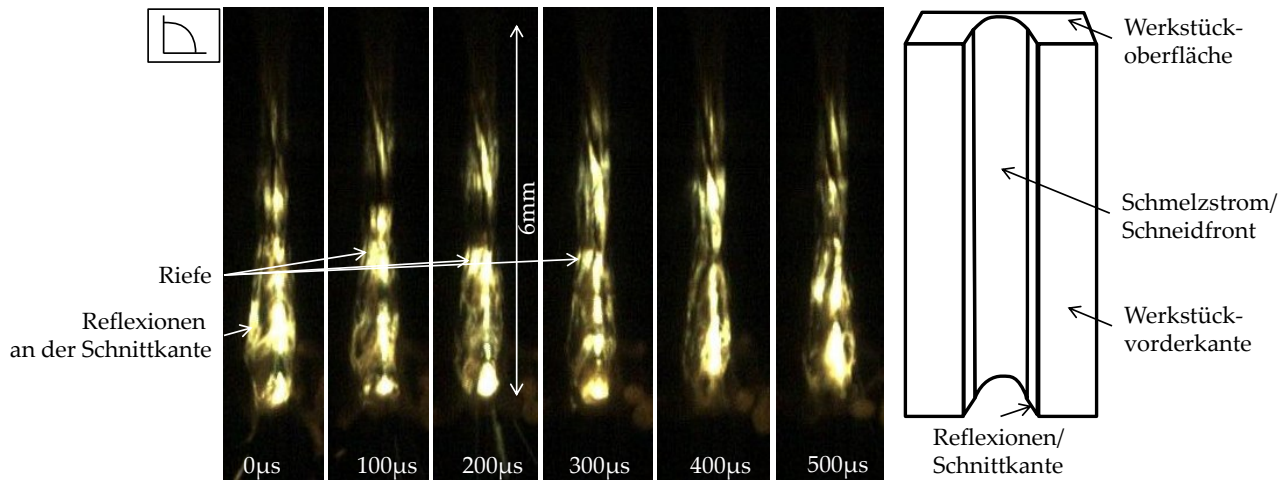


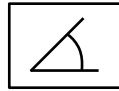
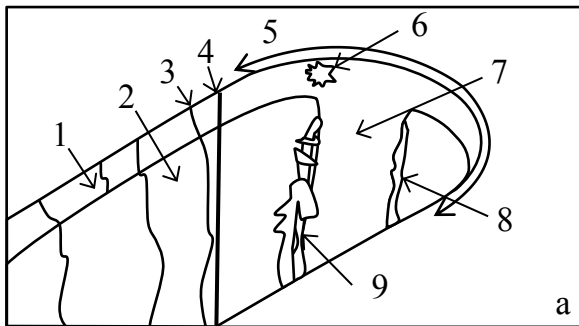
Abbildung 4.1: Links: Einzelbilder der Außeraxialen Prozessbeobachtung. Rechts: Skizze des Schmelzstroms und deren Reflexionen an den Schnittkanten

4.2 Außeraxiale Beobachtung – 45° zur Schneidfront

Durch die Änderung der Beobachtungsperspektive um einen Winkel von 45° kann sowohl die Schmelze als auch die Erstarrung beobachtet werden. Insbesondere die Riefenbildung an der Erstarrungslinie ist hier relevant. Für diese Perspektive wird eine Fokuslage gewählt, die zu einer verbreiterten Fuge von 1,8mm und damit zu einer besseren Beobachtbarkeit führt. Aufgrund der Reflexionsfläche, die sich durch die schmelzflüssige Schneidfront ergibt, wird zunächst in Abbildung 4.2 eine Modellfuge betrachtet.

Hierzu wurde ein Blech halbkreisförmig gebogen und die Innenseite des Bleches mit Linien unterschiedlicher Farbe versehen. Ein auf der Front fixierter Stift dient als Marker, der in einer Reflexion wiederzuerkennen ist. Die auftretenden Reflexionen können unabhängig von weiteren Größen wie Prozessemission oder Schmelze untersucht werden. Die aufgezeichneten Linien auf der rechten Schnittkante sind auf der linken Hälfte des Halbkreises wiederzufinden. Ebenso verhält es sich mit der Reflexion des Stiftes. Durch die Biegung des Bleches und

bar. Die dunkle Fläche (7) entsteht durch die spiegelnde Oberfläche der Schneidfront. Man erhält an dieser Stelle einen Blick aus der Fuge hinaus, sodass nur wenig Prozess-emission die Schneidfront beleuchtet. Im Vergleich zu Abbildung 4.2 spiegelt sich hier nicht die helle Tischoberfläche sondern die dunkle Umgebung.



- 1: Linke Schnittkante
- 2: Reflexion der rechten Schnittkante
- 3: Riefen
- 4: Erstarrungslinie
- 5: Schneidfront
- 6: Reflexion der Fremdbeleuchtung
- 7: Sicht aus der Fuge hinaus
- 8: Reflexion anhaftender Schmelztropfen an der Blechunterkante (von linker Schnittkante)
- 9: Reflexion anhaftender Schmelztropfen an der Blechunterkante (von rechter Schnittkante)

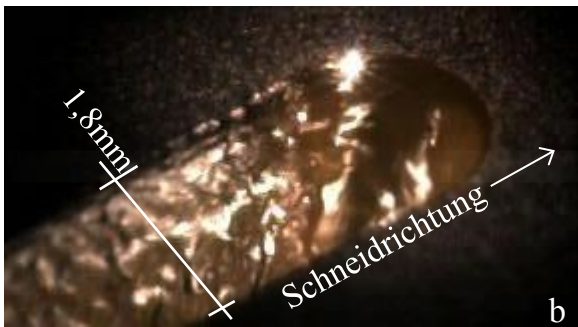


Abbildung 4.3: (a) Skizze einer Schnittfuge (b) Einzelbild des Schneidprozesses

4.3 Koaxiale Beobachtung

Bei der koaxialen Prozessbeobachtung wird durch die Schneidoptik hindurch beobachtet. Abbildung 4.4 zeigt zwei Einzelbilder und die dazugehörigen Skizzen, jeweils darunter angeordnet. Linke und rechte Seite unterscheiden sich in den Prozessparametern. Im linken Bild ist der Bildausschnitt etwas größer gewählt, sodass auch die Innenfläche der Schneiddüse zu erkennen ist. In beiden Fällen ist keine Fremdbeleuchtung zugeschaltet.

Etwas unterhalb der Bildmitte (Bild links) ist die Blechoberfläche durch ein Vorheizen zu erkennen. Sichtbar ist eine inhomogene halbmondförmige, leuchtende Fläche vor der Schneidfront. In diesem Gebiet ist die Walzstruktur des Werkstoffes mit mehreren 10µm Rautiefe

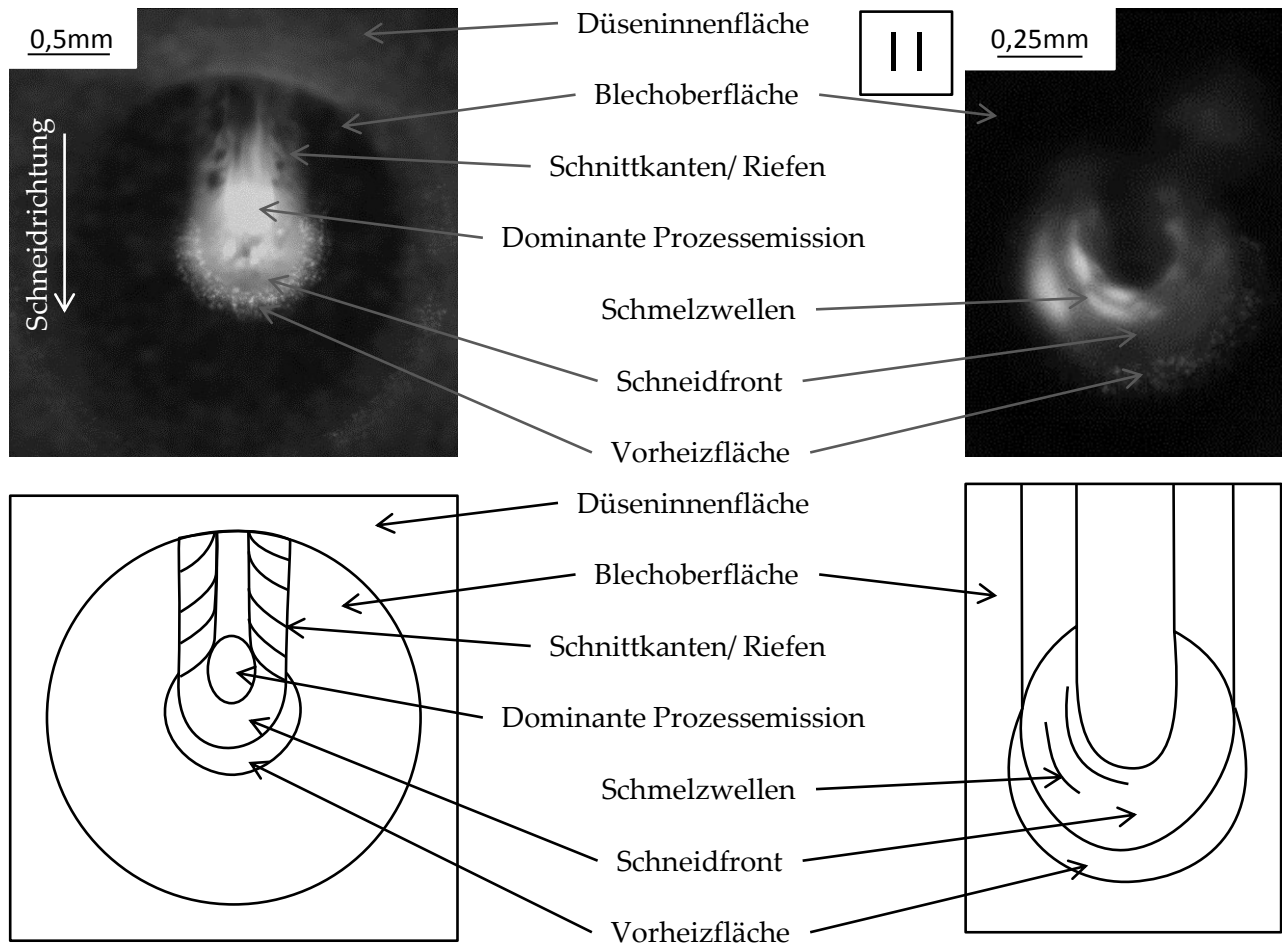


Abbildung 4.4: Obere Bildhälfte: Einzelbilder der koaxialen Prozessbeobachtung bei unterschiedlichen Verfahrensparametern und unterschiedlichen Bildausschnitten. Untere Bildhälfte Skizzen der Einzelbilder

erkennbar. Eine schmelzflüssige Phase liegt in diesem Gebiet noch nicht vor. Da die Laserwellenlänge vor der Kamera gefiltert wird, ist sicher gestellt, dass keine Laserstrahlung von der Kamera detektiert wird. Die Emission muss daher thermisch bedingt sein und führt aufgrund der Temperatur aber auch aufgrund des Abstrahlwinkels zu einer hellen Leuchterscheinung. Der Bearbeitungslaserstrahl besitzt hier bereits eine ausreichende Energie um das Material deutlich zu erhitzen. Diese Energie reicht allerdings nicht aus, um das Material zu schmelzen. Da die Oberfläche nicht vollständig eben ist, werden erhabene Gebiete der Oberfläche aufgrund geringerer Wärmeleitung heißer als niedriger gelegene Gebiete.

Im linken Bild ist eine nahezu kreisförmige besonders helle Prozessemission zu erkennen

(dominante Prozessemission). Diese Emission überlappt mit der Schneidfront und verläuft bis deutlich in die Schneidfuge hinein. Es ist daher davon auszugehen, dass diese Emission nicht ausschließlich von der thermischen Emission der Schneidfront stammt. Eine mögliche Ursache ist ein Metaldampf, der in der Fuge vom Laser erhitzt wird und dort abstrahlt. Eine weitere Möglichkeit sind Schmelztropfen die aus der Fuge getrieben werden und dabei in den direkten Kontakt mit der Laserstrahlung kommen. Fehlende Wärmeleitung zum umgebenden Material, wie an der Schneidfront der Fall, erhitzt den einzelnen Tropfen stark. Die Emission des einzelnen Tropfens wird mit der Emission der Schneidfront überlagert.

Im Gegensatz dazu zeigt das rechte Bild keine dominante Prozessemission. Durch deutlich veränderte Parameterwahl ermöglicht die verminderte Strahlungsintensität eine bessere Sicht auf die Schneidfront. Zu erkennen sind parallel zur Blechoberfläche verlaufende Schmelzwellen, die die Schneidfront entlang laufen. Dies zeigt dass trotz der nicht optimalen Beobachtungsperspektive Schmelzwellen und Instabilitäten auf der Front betrachtet werden können.

5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante

Bei der Investition in eine Laserschneidanlage müssen sich die heutigen Maschinenhersteller auf diversen Gebieten vergleichen lassen. Relevante Auswahlkriterien für den Kauf einer Werkzeugmaschine sind bspw. die Energieeffizienz, der Wartungsaufwand und die erzielbare Qualität der Laserschnitte bei unterschiedlichsten Materialarten und Dicken. Diese Kriterien sind somit wichtiges Werbemittel für Anbieter solcher Maschinen.

DIN EN ISO 9013 beschreibt die Qualität einer Schnittfläche mit den Kriterien Rechtwinkligkeit oder Neigungstoleranz, gemittelte Rautiefe R_{z5} , Rillennachlauf, Anschmelzung der Oberkante und Bartbildung. Beispielhaft ist in Abbildung 5.1 eine solche Schnittkante dargestellt. Das folgende Kapitel bietet einen erweiterten Einblick in die Bildung von Bart und Riefen.

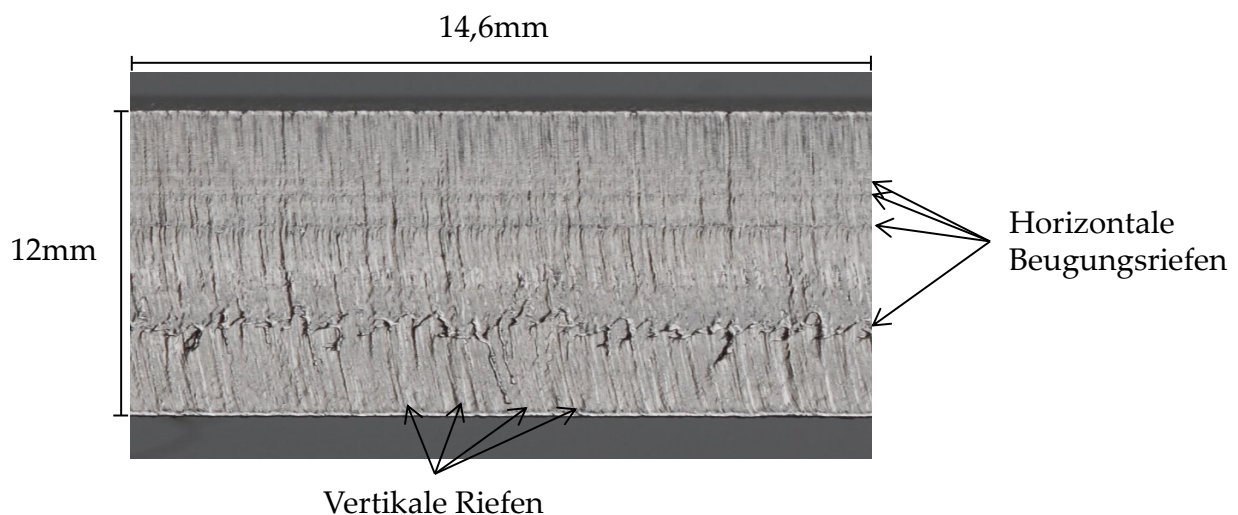


Abbildung 5.1: Qualität einer Schnittkante bei der Bearbeitung mit einem CO₂-Laser und eine Einteilung der Schnittkante in horizontale und vertikale Riefen

5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante

Dabei werden neben vertikalen Riefen auch die bisher nicht in der Literatur beschriebenen horizontalen Riefen beim Schneiden mit CO₂-Laserstrahlung erläutert.

5.1 Vertikale Riefen

Bei der Analyse des Schmelzfilmes auf der Schneidfront eines Faserlaserschnittes, können drei Gebiete in unterschiedlichen horizontalen Positionen mit spezifischen Formen des Schmelzflusses unterschieden werden. Abbildung 5.2 links zeigt eine Prozessaufnahme der Schneidfront eines 6mm Schnittes, wie bereits in Abbildung 4.1 zu sehen war. In der Mitte ist ein in der Breite gestrecktes Bild einer Schnittkante zu sehen. Rechts ist im Vergleich das ungestreckte Bild der Schnittkante dargestellt. Das Bild der Front (links) kann in drei Gebiete

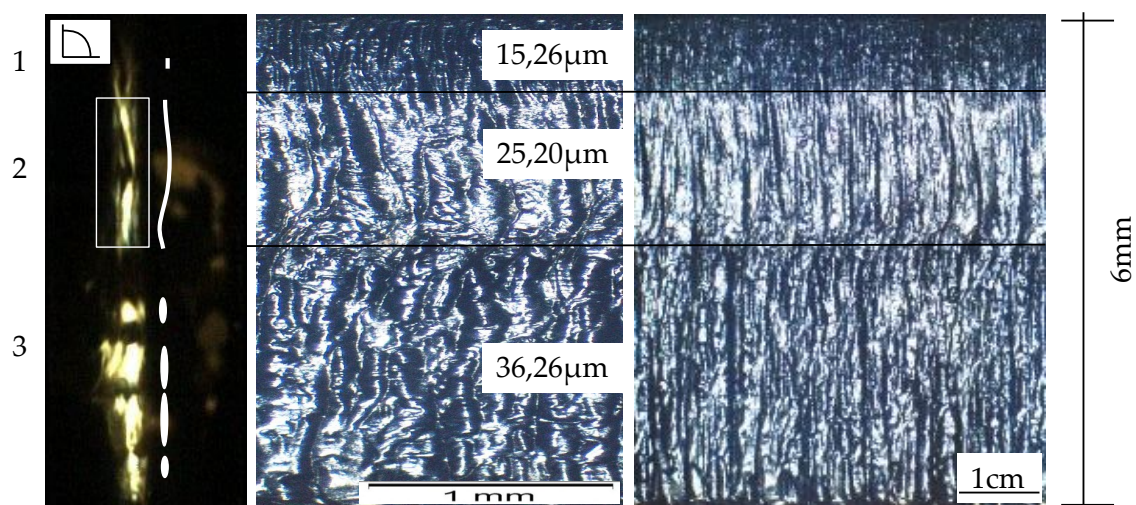


Abbildung 5.2: Links: High-Speed Bild eines 1µm-Schnittes, inkl. skizzierter geometrischen Formen der Schmelzformation. Mitte: Fotos der rechten Schnittkante gestreckt in horizontaler Richtung inkl. der Rautiefe. Rechts: Ungestrecktes Bild der Schnittkante

mit unterschiedlichen Schmelzfilmformationen eingeteilt werden. Neben dem Schmelzfluss auf der Schneidfront ist die geometrische Form der Schmelze skizziert. Die Schmelze in Gebiet 1 zeigt einzelne dünne Schmelzfäden, die entlang der Schneidfront verlaufen. Mehrere dieser Fäden vereinen sich zu einem dickeren einzelnen Schmelzstrom in Gebiet 2.

Eine vergrößerte Darstellung einer Prozessaufnahme in Gebiet 1 ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Für eine optimale Betrachtung dieses Gebietes wurde eine Belichtungszeit gewählt, die dieses Areal ausreichend hell darstellt. Die ersten drei Bilder auf der linken Seite sind aufeinander folgende Prozessaufnahmen mit einem zeitlichen Abstand von $500\mu\text{s}$. Besonders dominant sind drei helle Linien, die nahezu senkrecht die Front entlang laufen. Davon liegt

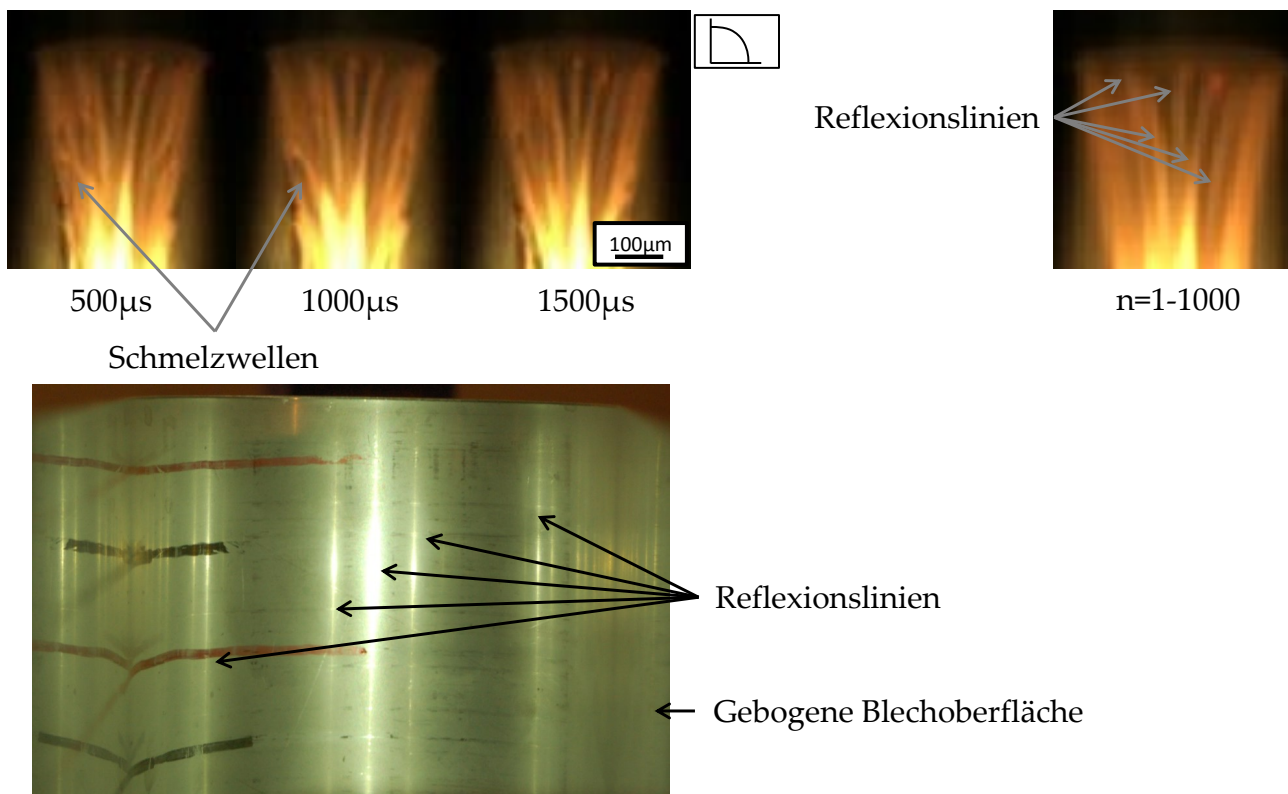


Abbildung 5.3: Oben links: Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsbeobachtung ($\Delta t = 500\mu\text{s}$), oben rechts: Mitteilung über 1000 Einzelbilder; unten Foto einer gebogenen Blechoberfläche inkl. der Reflexionslinien

eine Linie auf dem Schneidfrontscheitel und jeweils links und rechts davon eine weitere Linie. Durch Mitteilung von 1000 Einzelbildern resultiert das rechte Bild. Hier ist ebenso eine zentrale Linie und je eine weitere Linie links und rechts davon zu erkennen.

Abbildung 5.3 unten zeigt eine gebogene Blechoberfläche in senkrechter Beobachtungsperspektive. Durch eine Beleuchtung der Fläche sind erneut drei senkrechte Linien zu erkennen. Es stellt sich heraus, dass ausschließlich Reflexionen für diese hellen Streifen verantwortlich sind. Da in den einzelnen Prozessaufnahmen diese Linien ungestört sichtbar sind, im

5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante

unteren Bereich allerdings deutliche Störungen durch Schmelzwellen entstehen, muss im oberen Bereich eine sehr glatte Schmelzoberfläche vorherrschen, vergleichbar mit der glatten Blechoberfläche. Durch die geringen Störungen des Schmelzfilmes ergibt sich im Gebiet 1 meist die niedrigste Rautiefe der gesamte Schnittkante.

Der Übergang zu Gebiet 2 zeichnet sich durch eine deutlich höhere Rauheit und einen veränderten Riefenverlauf aus. Im Gegensatz zu Gebiet 1 sind die Riefen chaotisch angeordnet und besitzen eine höhere mittlere Rautiefe als Gebiet 1. Hochgeschwindigkeits-Aufnahmen dieses Gebiets zeigen einen geschwungenen Schmelzfaden, der auf der Front entlang läuft (vgl. auch Abbildung 5.4). Startpunkt, Länge und Richtung sind variabel und verlaufen häufig von einer Schnittkante zur gegenüberliegenden Schnittkante. Durch diesen Prozess wird das geschmolzene Material von einer auf die andere Schnittkante umverteilt und erzeugt dadurch größere chaotische Riefenformationen (vgl. Abb. 5.2).

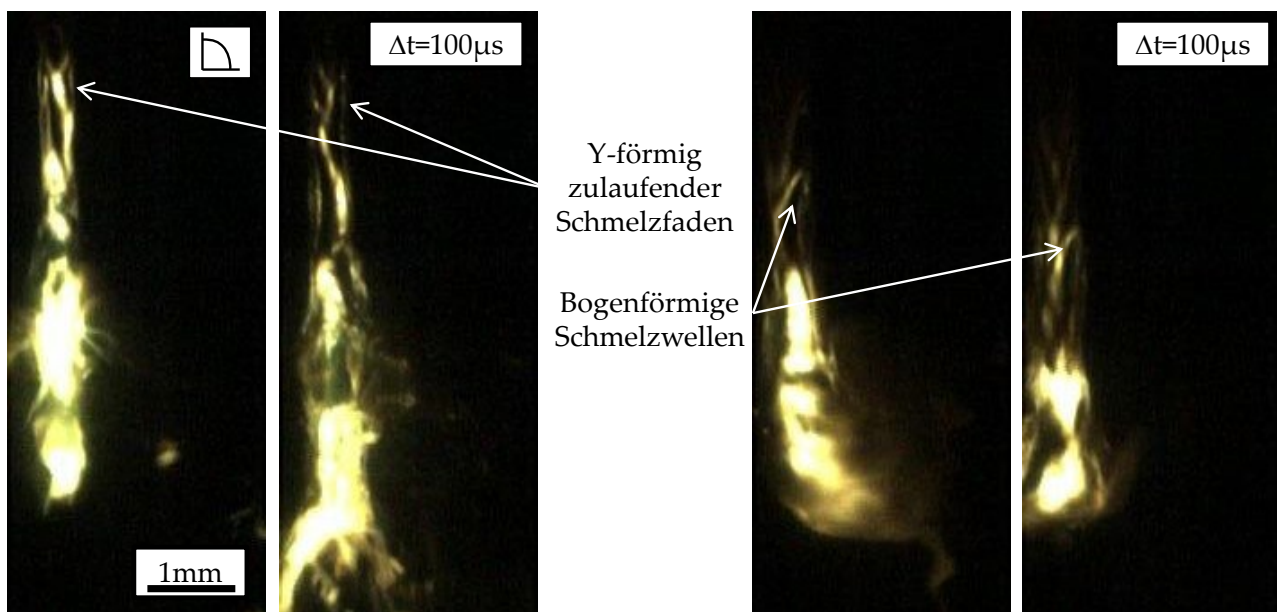


Abbildung 5.4: Prozessaufnahmen links: „Y“-förmig zulaufender Schmelzfaden, rechts: Bogenförmige Schmelzwellen

Die Qualität der Riefen ändert sich erneut in Gebiet 3. Der Schmelzfaden aus Gebiet 2 formt sich zu einzelnen Tropfen oder einem Faden, der nun senkrecht die Schneidfront entlang läuft. Die hieraus entstehenden Riefen weisen die höchste gemittelte Rautiefe auf. Gleichzeitig ergibt sich hier die niedrigste Riefenfrequenz aller drei Gebiete.

Im Vergleich zu Schnitten mit einem Faser- oder Scheibenlaser ($\lambda = 1,07\mu\text{m}$) sind die erzielbaren Schnittqualitäten bei einem CO₂-Laser ($\lambda = 10,6\mu\text{m}$) deutlich besser. Auch Prozessaufnahmen belegen diese deutlichen Unterschiede. Abbildung 5.5 zeigt eine Prozessaufnahme und ein Bild der zugehörigen 12mm dicken, mit dem CO₂-Laser geschnittenen, Edelstahl-Schnittkante. Die bisher gezeigten Turbulenzen der Schmelzströmung sind in den CO₂-Laserschnitten nicht zu erkennen. Einsetzende Störungen des Schmelzflusses beginnen in einer größeren Tiefe und besitzen eine niedrigere Amplitude.

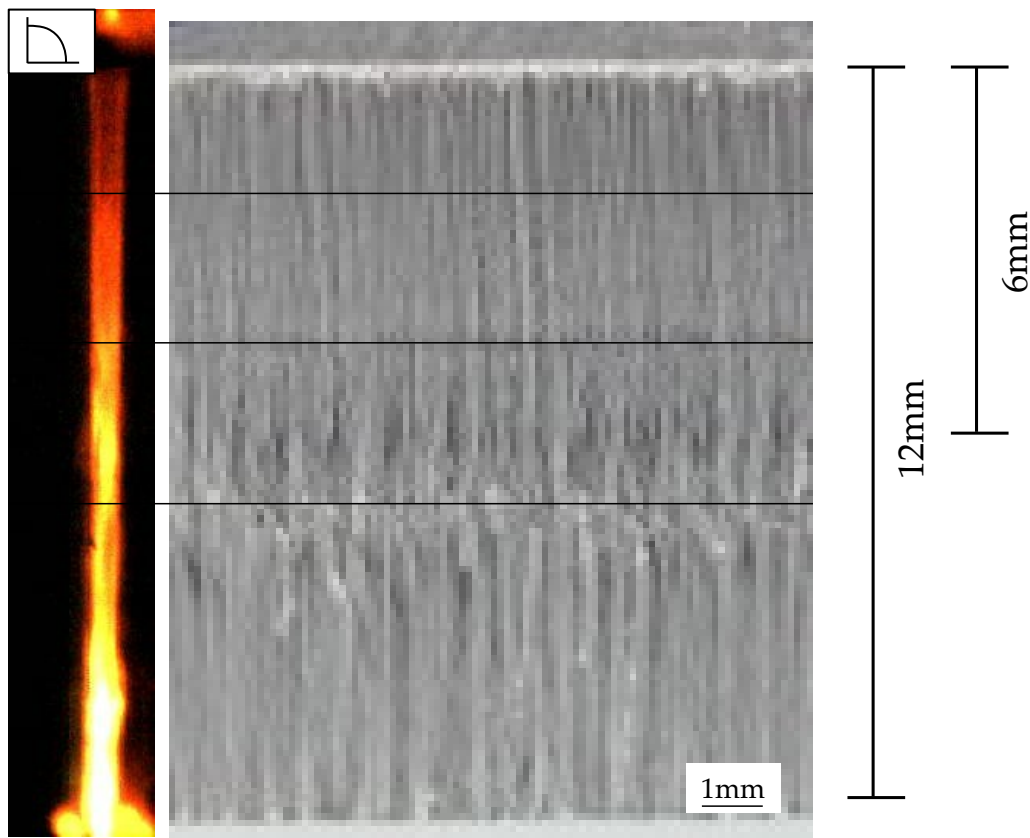


Abbildung 5.5: Einzelbild einer High-Speed Aufnahme und ein Foto der zugehörigen 12mm CO₂-Schnittkante

Da sich beide Strahlquellen deutlich in der Schmelzdynamik unterscheiden muss davon ausgegangen werden, dass die Dynamik auf der Front einen Einfluss auf die Rautiefe der Schnittkanten hat. Schmelzstrominstabilitäten (axial als auch in transversaler Richtung) sind bereits durch Hirano et al. dokumentiert worden [16]. Allerdings sind insbesondere bogenför-

5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante

mige Schmelzwellen aus Gebiet 2 auf der Front im Zusammenhang mit dem Laserschneiden bisher nicht beschrieben. Die typische Finger- oder Bogenbildung konnten allerdings von Chen [24] oder Takagi [25] bei der Untersuchung von Flüssigkeiten beschrieben werden. In Analogie hierzu dient ein Experiment mit einem Wasserfilm auf einer Blechoberfläche, welches die Relevanz der Oberflächenspannung bei der Bildung von Riefen nachweist. Abbildung 5.6 zeigt links eine Schneidprozessaufnahme mit einer Fuge von ca. 1,8mm Breite und rechts einen Wasserfilm auf einer Blechoberfläche.

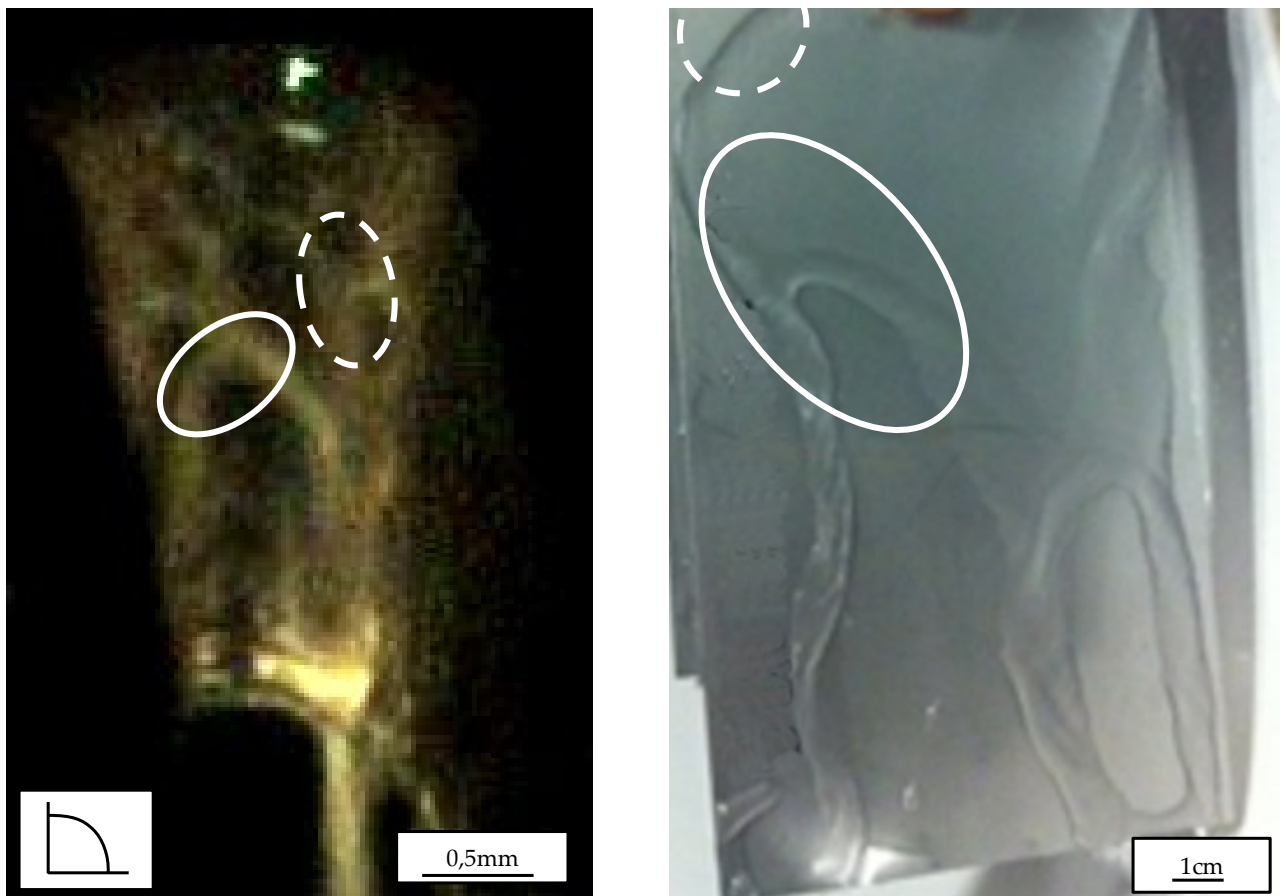


Abbildung 5.6: Links: Schmelzfluss auf einer Schneidfront. Rechts: Aufgeweiteter Wasserfilm auf einer Blechoberfläche

Im linken Bild sind einzelne Schmelzfäden und bogenförmige Schmelzüberhöhungen zu erkennen. Trotz der unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften von Schmelze und Wasser besitzen beide eine Oberflächenspannung, die versucht, eine möglichst geringe Oberfläche zu erzeugen. Die Oberflächenspannung führt im Randbereich zu einer Überhöhung (gestrichelte

Ellipse im rechten Bild) und im weiteren Verlauf zu einzelnen Schmelzfäden (durchgezogene Ellipse im rechten Bild).

Die einzelnen Fäden und die im rechten Bild sichtbare trockene Blechoberfläche können in Prozessaufnahmen nachgewiesen werden. Das linke Bild in Abbildung 5.7 zeigt wiederum eine Prozessaufnahme mit einer sehr breiten Schnittfuge. Skizziert auf der rechten Seite ist der Schmelzfluss an der Flanke. In der Nähe des Erstarrungsbereiches reißt der Schmelzfilm auf, sodass sich links davon ein einzelner Schmelzfaden zu einer Riefe entwickeln kann. Neben diesem Schmelzfaden ist zeitweise keine Benetzung durch Schmelze vorhanden, sodass der feste Werkstoff zwischen dem Schmelzfilm zu erkennen ist.



Abbildung 5.7: Entstehung von Riefen durch Fingerbildung der Schmelze

Bei der Betrachtung der Riefenbildung wurden Schnitte verwendet, die für optimale Beobachtungszwecke eine besonders breite Fuge aufweisen. Es ist daher davon auszugehen, dass sich bei typischeren Schnittfugen kleiner 1mm Fugenbreite die Prozesse leicht ändern. Jedoch konnten auch unter produktionstypischen Bedingungen (vgl. Abb. 5.3) Fingerbildung und bogenförmige Schmelzfilmüberhöhungen festgestellt werden. Dies zeigt den Einfluss der Oberflächenspannung und unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen der Instabilitäten auf die Ausprägung von Riefen auf der Schnittkante.

Zeitliche Analyse des Schmelzfilmes

Es konnte bereits gezeigt werden, dass Instabilitäten der Schmelze auf der Schneidfront, insbesondere der transversalen Bewegung der Schmelze, einen Beitrag zur Riefenbildung leisten. Eine weitergehende Analyse der Schmelzbewegung auf der Front bietet eine Bildverarbeitungsmöglichkeit namens Streak-Methode. Erikson et al. [26][27] zeigten das Analyseverfahren der „Streak Bildverarbeitung“ bereits 2010. Die Autoren verwendeten dieses Verfahren für die Untersuchung der in einem Schweißprozess vorliegenden Objektgeschwindigkeiten in der Schweißschmelze. Abbildung 5.8 zeigt die Verarbeitungsschritte zur Herstellung eines Streak Bildes.

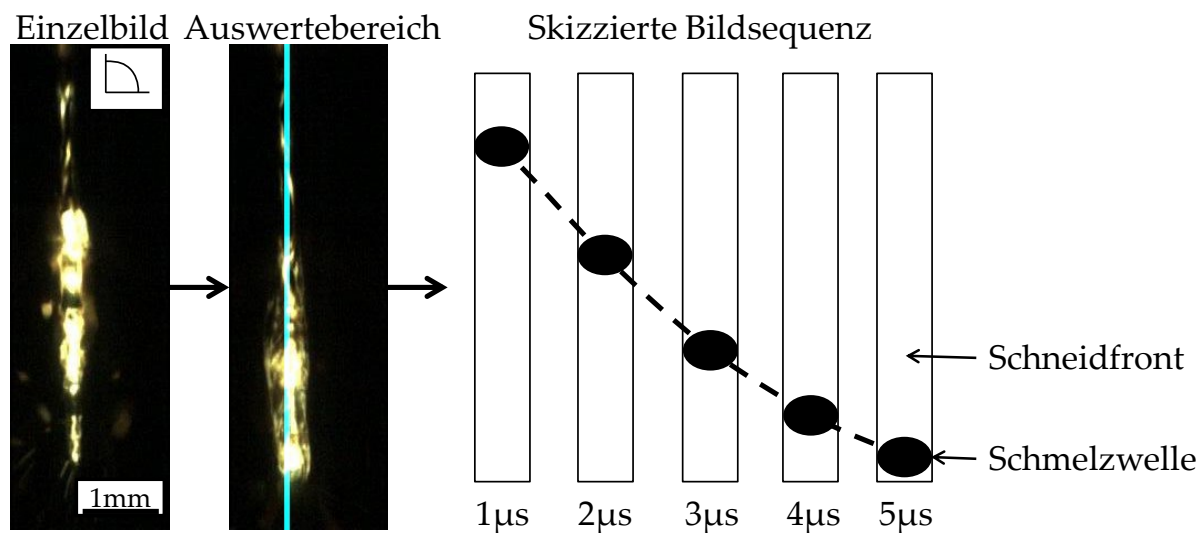


Abbildung 5.8: Bildverarbeitungsmethode zur Erzeugung von Streakbildern

Links ist ein Einzelbild der außeraxialen Prozessaufnahme zu sehen. Die Auswertung der Einzelbilder erfolgt, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, ausschließlich im Bereich der Schneidfront. Der Auswertebereich ist im mittleren Bild der Abbildung 5.8 als vertikale Linie eingezeichnet. Die Breite dieser Linie kann durch den Bildverarbeitungsalgorithmus variabel eingestellt werden. Nach der Auswahl des relevanten Bildbereiches wird über eine Auswertezeile gemittelt und zu einem Pixel zusammen gefasst. Dieses Verfahren wird für die gesamte Spalte ausgeführt, so dass schlussendlich eine Spalte mit einer Breite von einem Pixel entsteht. Durch Aneinanderreihen der Spalten entsteht ein so genanntes Streak Bild (rechts in Abbildung 5.8).

Eine gestreckte Version eines Streak Bildes eines Faserlaserschnittes mit einer Fokuslage von -2mm zeigt Abbildung 5.9. Die Zeitachse zeigt dabei von links nach rechts. Die alternierende

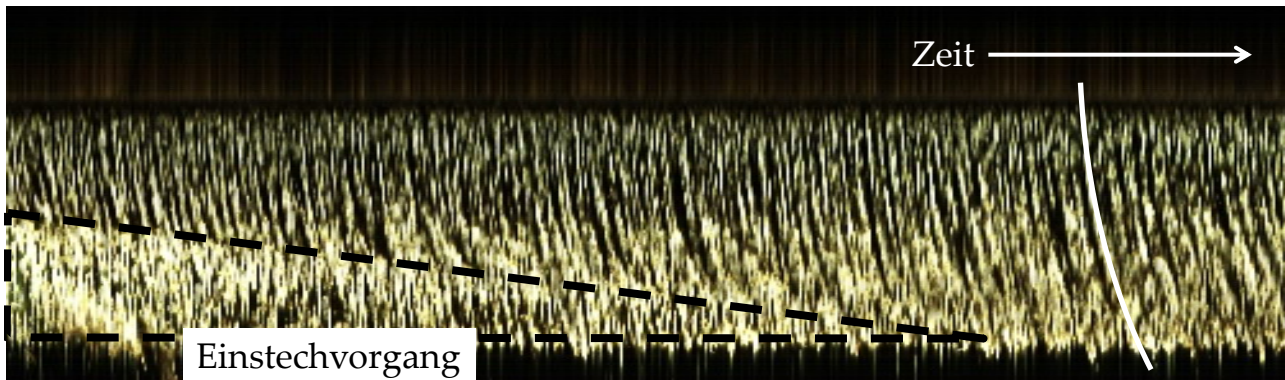


Abbildung 5.9: Horizontal gestrecktes Streakbild, Zeitachse von links nach rechts

Änderung von hellen und dunklen Linien bildet die Erzeugung von Tropfen oder Schmelzfäden auf der Schneidfront ab. Der Winkel dieser Linien zeigt die Ausbreitungsgeschwindigkeit in vertikaler Richtung an.

Da bei einer außeraxialen Beobachtung eine geringe Tiefenschärfe durch die Apertur der Fuge entsteht, wird die Schärfenebene kurz hinter die Blechvorderkante gelegt. Der Einstechvorgang zu Beginn wird daher meist mit in die Aufnahme einbezogen. Die reduzierten antreibenden Kräfte beim Einstechvorgang in das Material führen zu heißen Einzeltropfen auf der Blechvorderkante. Die erhöhte Emission eines solchen Tropfens ist durch ein Dreieck in der unteren Hälfte des Streak Bildes zu erkennen. Mit zunehmender Ausbildung einer Schnittfuge wandern die Tropfen weiter abwärts, solange bis der Einstechvorgang vollständig abgeschlossen ist.

Die weiße nachgezeichnete Linie zeigt beispielhaft die Bewegung einer einzelnen Welle. Die gebogene Form dieser Linie zeigt die Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schmelzwellen mit zunehmender Entfernung von der Blechoberkante.

Tani [28] beschrieb bereits die Veränderung der Schmelzwellengeschwindigkeit entlang der Schneidfront mit Hilfe einer Simulation. Bisher wurden allerdings keine Messungen der Wellengeschwindigkeit oder der Propagation einzelner Tropfen entlang der Schneidfront gezeigt. Zur Berechnung der tatsächlichen Geschwindigkeit dient Abbildung 5.10, in der Streakbilder einer Fokuslagenvariation dargestellt sind. Zu erkennen ist bereits die bogenförmige Verdunk-

5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante

lung im oberen Bereich des Bildes (horizontal gestrichelte Linie).

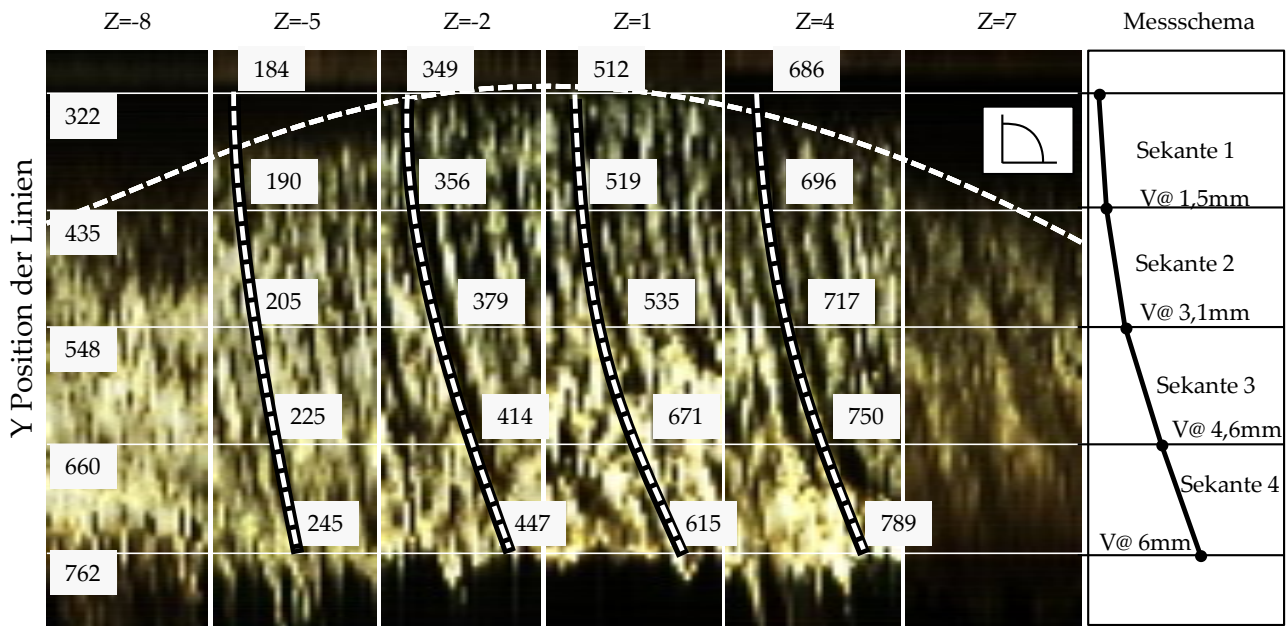


Abbildung 5.10: Pixelposition der Kreuzungspunkte zur Berechnung der Wellengeschwindigkeit

Das Bild zeigt fünf durchgezogene horizontale Linien, die zur Berechnung der Wellengeschwindigkeit heran gezogen werden. Die Y-Pixelkoordinate jeder Linie ist links markiert. Die von oben nach unten verlaufende gestrichelte Linie für jede Fokusslage kreuzt die horizontalen Linien fünfmal. An diesen Kreuzungspunkten ist die X-Pixelposition eingetragen. An den jeweils zwei untereinander liegenden Punkten wird eine Sekante gebildet, mit deren Hilfe die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle bestimmt wird. Jede Pixelspalte entspricht einer Zeit von 100µs. Der Abstand zwischen der obersten und der untersten Linie ist die Dicke des Materials. Daraus folgt, dass 440 Pixel 6mm Materialdicke entsprechen. Aus Materialdicke und Bewegung in X-Richtung kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit berechnet werden.

Die resultierende Geschwindigkeit in diesen Gebieten ist in Abbildung 5.11 dargestellt, dabei wurden Fokusslage -8 und +7 zur Berechnung nicht heran gezogen, da die Form der Wellenausbreitung nicht eindeutig bestimmt werden kann. Der Graph bestätigt, dass die Propagationsgeschwindigkeit kein konstanter Wert ist, vielmehr verringert sich die Geschwindigkeit mit zunehmender Messtiefe. Bei Fokusslage -5mm stellt sich die höchste Geschwindigkeit über

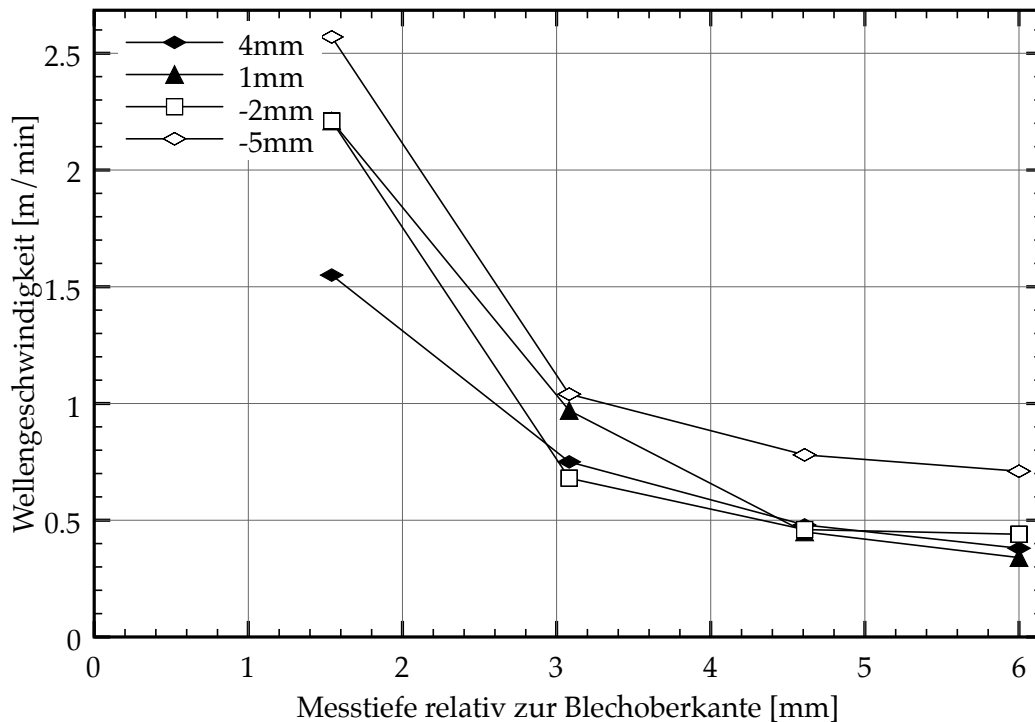


Abbildung 5.11: Berechnete Wellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Messtiefe relativ zur Blechoberfläche bei unterschiedlichen Fokuslagen

die gesamte Materialdicke ein. Ursache für dieses Phänomen ist die Geometrie der Schnittfuge bei dieser Fokuslage, die sich folgendermaßen erklären lässt: Vergleicht man die Prozessemission bei einer Fokuslage von -5 und +4mm (Abbildung 5.12), so zeigt die Fugengeometrie von

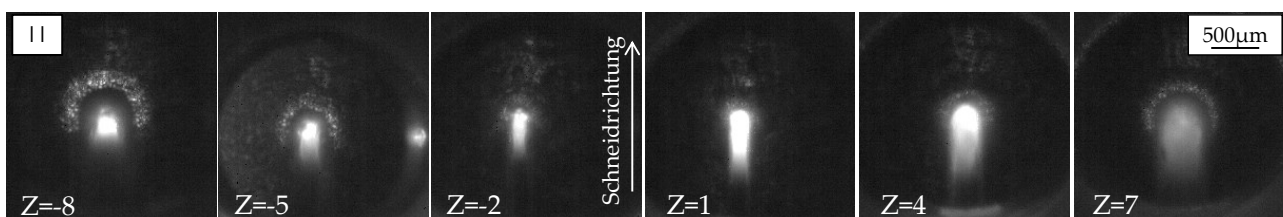


Abbildung 5.12: Koaxiale Prozessaufnahmen der Fokuslagenvariation

-5mm eine Trichterform, wohingegen bei +4mm parallele Schnittkanten entstehen. Bei -5mm Fokuslage kann aufgrund der Fugengeometrie ein höherer Anteil Gas eingekoppelt werden, sodass höhere antreibende Kräfte innerhalb der Fuge wirken und höhere Schmelzwellengeschwindigkeiten über die gesamte Länge der Fuge resultieren.

5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante

Abbildung 5.13 zeigt ein gestrecktes Bild einer Schnittkante und rechts daneben das zugehörige Streak Bild, wobei die räumliche Koordinate in Vorschubrichtung auf die Zeitachse des Streakbildes skaliert ist. Für den Prozess des Brennschneidens verwendeten Rao et al. [29] die Wellenlänge der Riefenabstände als Ersatzgröße für die Schmelzfilmdicke. Ebenso beschrieben Chen et al. [30] die Riefenbildung beim Laserbrennschneiden als "deutlich beeinflusst durch den oszillierenden Charakter des dünnen Schmelzfilmes auf der Schneidfront während des Schmelzaustriebs". Vergleicht man diesen Ansatz mit Abbildung 5.13, so kann gezeigt

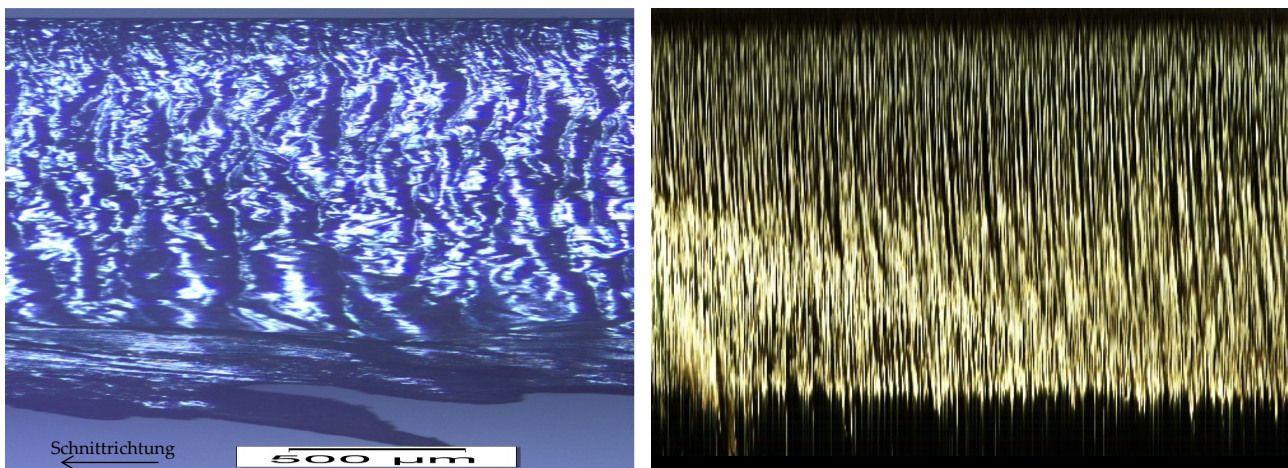


Abbildung 5.13: Vergleich von Riefenbild mit gestreckter Streak-Aufnahme

werden, dass für das Schmelzschnneiden die Riefenfrequenz niedriger ist als die Frequenz der Schmelzwellen auf der Front. Nicht jede einzelne Schmelzwelle führt nachweislich zu einer Riefe, vielmehr führt das Zusammenfassen vieler Einzelwellen im Verlauf des Schnittes zu einem einzelnen Riefenberg. Die Beobachtung der chaotischen Riefenformation aus den Gebieten (2) und (3) haben dies bereits nahe gelegt.

Die Auswertemöglichkeit durch Streakaufnahmen macht den Vergleich von rauen und glatten Schnittkanten besonders interessant. Dazu ist der Vergleich, der glatten CO₂-Laserschnitte mit den raueren Faserlaserschnitten ideal. Abbildung 5.14 zeigt zwei Serien einer Fokuslagenvariation mit Faserlaser (links) und CO₂-Laser (rechts). Beide Seiten sind zur direkten Vergleichbarkeit identisch skaliert. Besonders für die linke Serie ist ebenso wie für das Brennschneiden eine Oszillation von Schmelzen und Austreiben zu erkennen. Die CO₂-Laserschnitte hingegen bilden feinere Wellen, die nicht über die gesamte Länge der Schneidfront verlaufen. Die Störung der Schneidfront scheint in diesem Fall gedämpft, sodass der

Wellenberg selbstständig wieder abflacht. Die höhere Frequenz der Schmelzwellen auf der Front beim CO₂-Laser führt zu einer feineren Verteilung der Schmelze auf der Schnittkante und damit zu einer reduzierten Rautiefe.

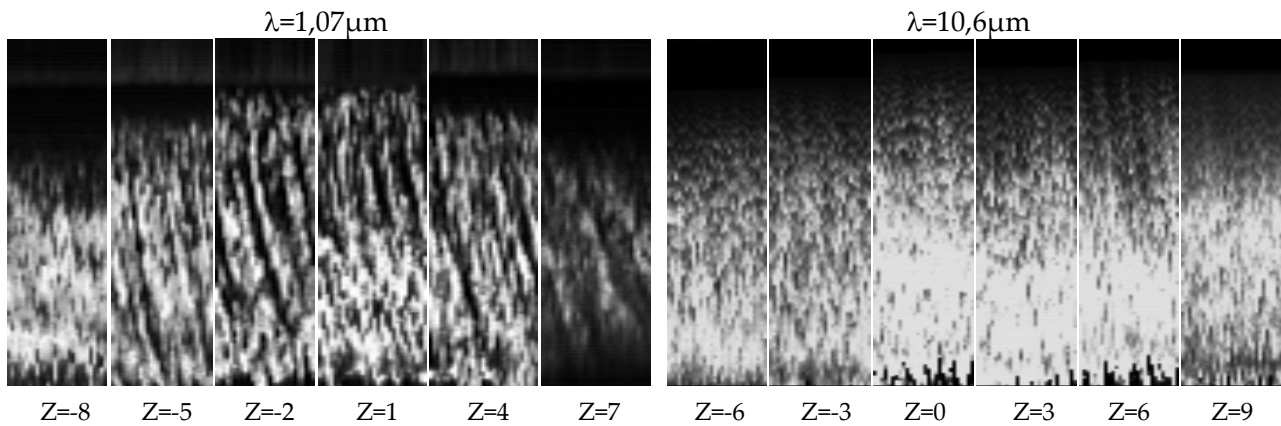


Abbildung 5.14: Vergleich Streakaufnahmen von Faser- (links) und CO₂-Laser (rechts)

Im zurückliegenden Abschnitt konnte gezeigt werden, dass der Schmelzfluss von Faserlaser Schnitten eine oszillierende Abfolge von gebildeter Schmelzwelle und Austreiben der Schmelzwelle ist. Der wesentliche Unterschied zum Brennschneiden ist, dass nicht jede einzelne Welle auch eine einzelne Riefe bildet. Vielmehr konnten unterschiedlichste Instabilitäten im Schmelzstrom beobachtet werden, die durch ihre laterale Bewegung und über die Summierung mehreren Wellen zu einem chaotischen Riefenbild führen.

Der Vergleich der Wellenbewegungen von Faserlaser- und CO₂-Laserschnitten zeigt die deutlich höhere Wellenfrequenz und niedrigere Wellenamplituden der CO₂-Laserschnittkanten. Es kann somit geschlussfolgert werden, dass eine ideal glatte Schneidfront ohne Instabilität trotzdem eine minimale Rautiefe aufweist.

5.2 Horizontale Beugungsriefen

CO₂-Laser geschnittene Edelstahlbleche hoher Qualität haben nach dem heutigen Stand der Technik eine niedrige Rauheit von wenigen 10µm. Charakteristisch für einen CO₂-Laserschnitt sind neben der geringen Rautiefe auch die von oben nach unten in ihren Abständen zunehmenden horizontalen Linien auf den Schnittkanten (vgl. Abbildung 5.15). Bereits

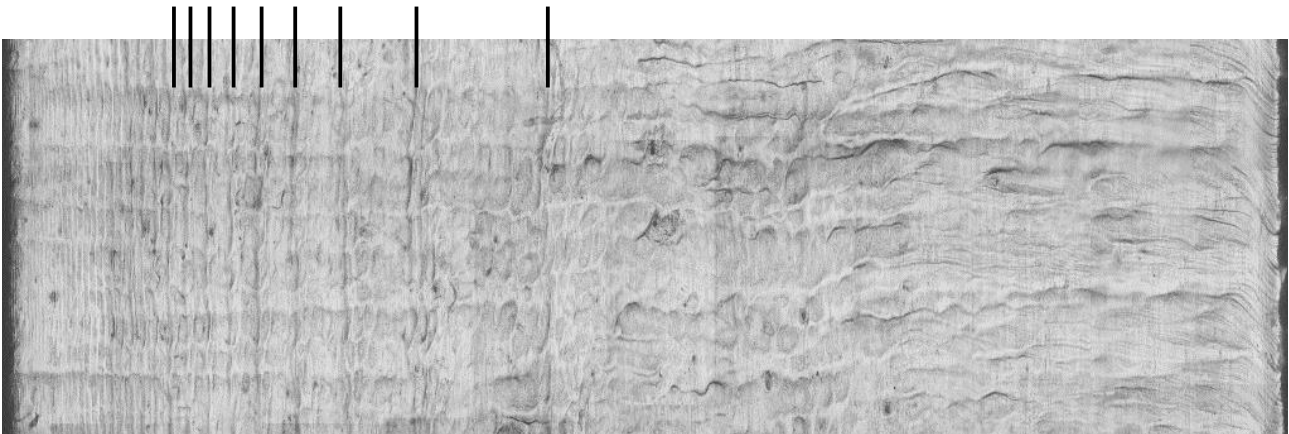


Abbildung 5.15: CO₂-Laserschnittkante eines 12mm dicken Edelstahlbleches. Links Oberkante, rechts Unterkante; eingezeichnet sind die 9 unteren horizontalen Linien

1983 hatten Thomassen et. al [4] eine horizontale Linie auf der Schnittkante beobachtet. Diese gingen einher mit einer Änderung der Riefenrichtung, häufig in einer Bogenform. Schmelzschnittkanten mit einer niedrigen Rautiefe zeigen an den horizontalen Linien keine Richtungsänderung der Riefen.

Petring et. al [31] beschrieben 1988 die horizontalen Linien als eine Konsequenz der Überschallgasströmung, die durch Druck-, Dichte- und Geschwindigkeitsgradienten den Schmelzfilm stören.

Zefferer [32] beschrieb 1998 bei der Klassifizierung der Riefenmorphologie die horizontalen Linien als ein charakteristisches Merkmal für Riefen 1. Ordnung. Weiterhin stellte er fest, dass die Wellenlänge der horizontalen Linien mit zunehmendem Abstand von der Oberkante aus zunimmt. Dieses Phänomen ist entgegen früherer Beobachtungen auf Interferenz der Laserstrahlung zurückzuführen. Diese Hypothese wurde erstmals 1995 von Herrn Dipl.-Phys. Wolf-Dieter Scharfe während einer Projektbesprechung geäußert [33].

Beim Einsatz von Laserstrahlung ist Beugung bzw. Interferenz ein Effekt, der an verschiedensten Strukturen auftreten kann. Ein klassisches Beispiel ist die Beugung am Einfachspalt und die hierbei resultierenden Beugungsmuster vom Nah- bis zum Fernfeld. Die beugende Struktur eines Schnittspaltes vereint zur Hälfte die Beugung am Spalt und die an einer Ringblende. Abbildung 5.16 zeigt schematisch die Ausbreitung der Beugungsmaxima in einer Schnittfuge.

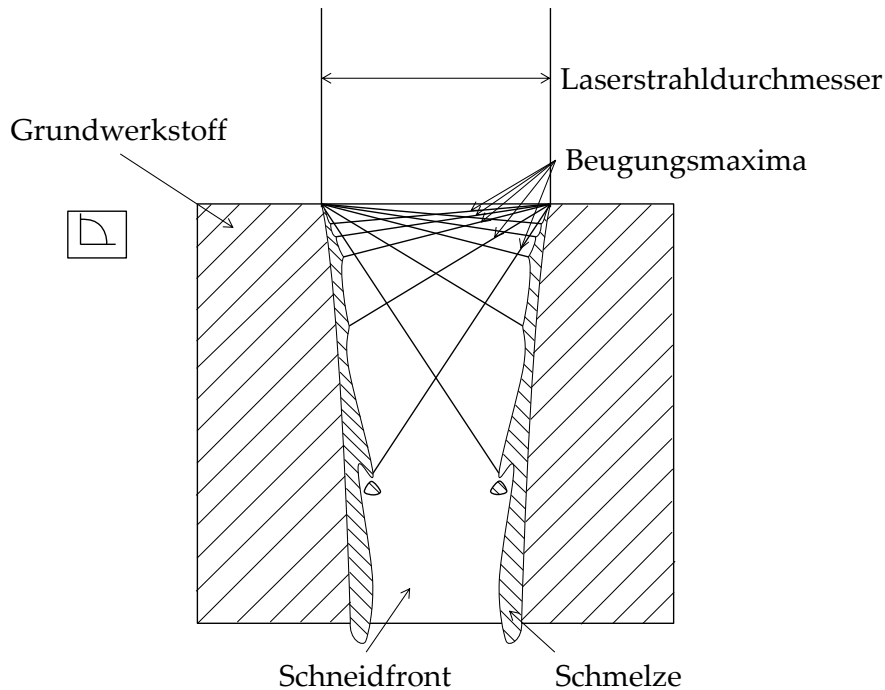


Abbildung 5.16: Ausbreitung der Beugungsmaxima in einer Schnittfuge

Mit Hilfe der Formel 5.1 kann für eine ebene Welle die Ausbreitungsrichtung der Beugungsmaxima an einem nicht ausgedehnten Einfach-Spalt berechnet werden [34]:

$$\sin(\alpha)_{\max} = \pm \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{b} \quad (5.1)$$

Dabei ist $\alpha_{\max}$ der Beugungswinkel für die Richtung der Maxima, k die Ordnung des Maximums, λ die Wellenlänge der einfallenden Strahlung und b die Spaltbreite.

Die Spaltbreite beeinflusst also als wesentlichen Faktor den Auftreffpunkt der Beugungsmaxima auf den Schnittkanten. Dabei wird die Fugenbreite deutlich durch die Fokuslage beein-

5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante

flusst. Eine Änderung der Fokuslage muss daher auch durch eine Änderung der Interferenzlinien auf den Schnittkanten experimentell nachgewiesen werden können.

Abbildung 5.17 zeigt sechs Schnittkanten bei zunehmender Fugenbreite. Jeweils zugehörig zu einer Schnittkante wurden die Fugenbreiten im Bild oben eingetragen. Markiert als schwarze Linien wurden die beiden unteren Beugungsriefen. Mit steigender Fugenbreite wandern die sichtbaren Linien weiter in Richtung der Blechunterkante. Der Einfluss der Spaltbreite ist deutlich nachweisbar.

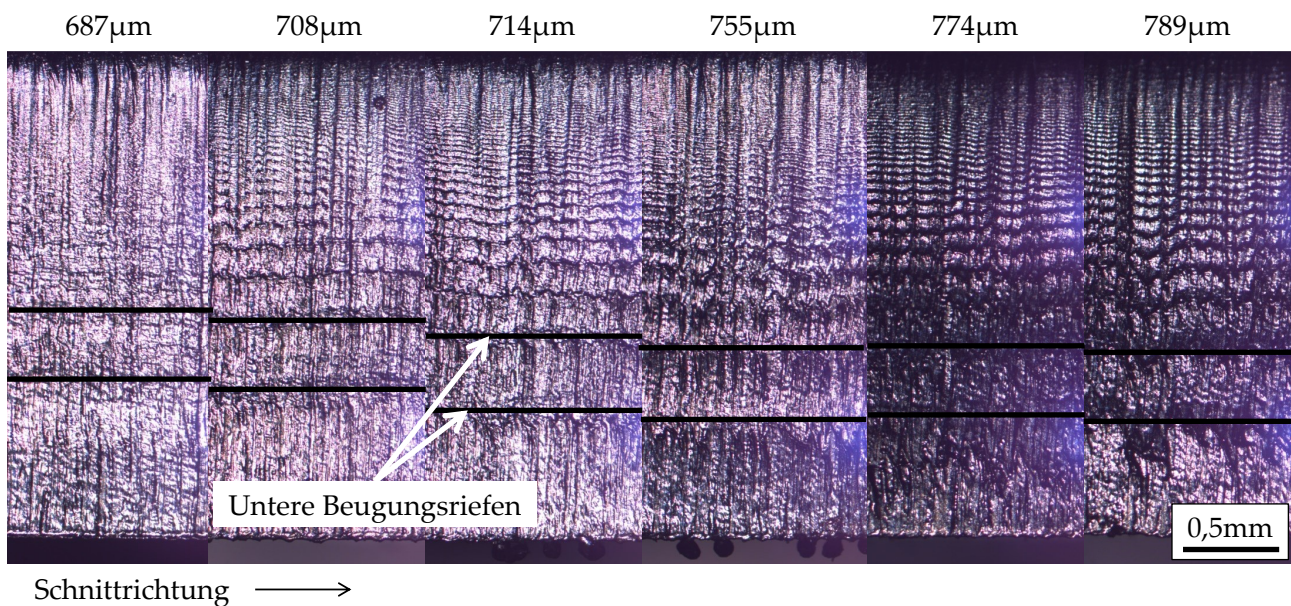


Abbildung 5.17: Fotos von sechs Schnittkanten bei unterschiedlichen Fugenbreiten. Die beiden letzten sichtbaren Interferenzlinien sind mit schwarzen Linien markiert

Auf Basis des Formalismus (5.1) sind in Abbildung 5.18 die projizierten Intensitätsmaxima auf der Schnittkante bei unterschiedlichen Fugenbreiten abgebildet. Eingebildet ist weiterhin ein Foto einer in der Höhe skalierten 12mm Edelstahlschnittkante. Die beste Übereinstimmung der berechneten Interferenzlinien mit den Linien auf der Schnittkante besteht bei einer Fugenbreite von ca. 425 µm. Die gemittelte Fugenbreite dieses Schnittes lag ebenfalls bei 425 µm.

Jeweils auf der Höhe eines Interferenzmaximums kommt es auf der Schnittkante zu einer horizontalen Schmelzansammlung. Im oberen Bereich der Schnittkante bilden sich durch die

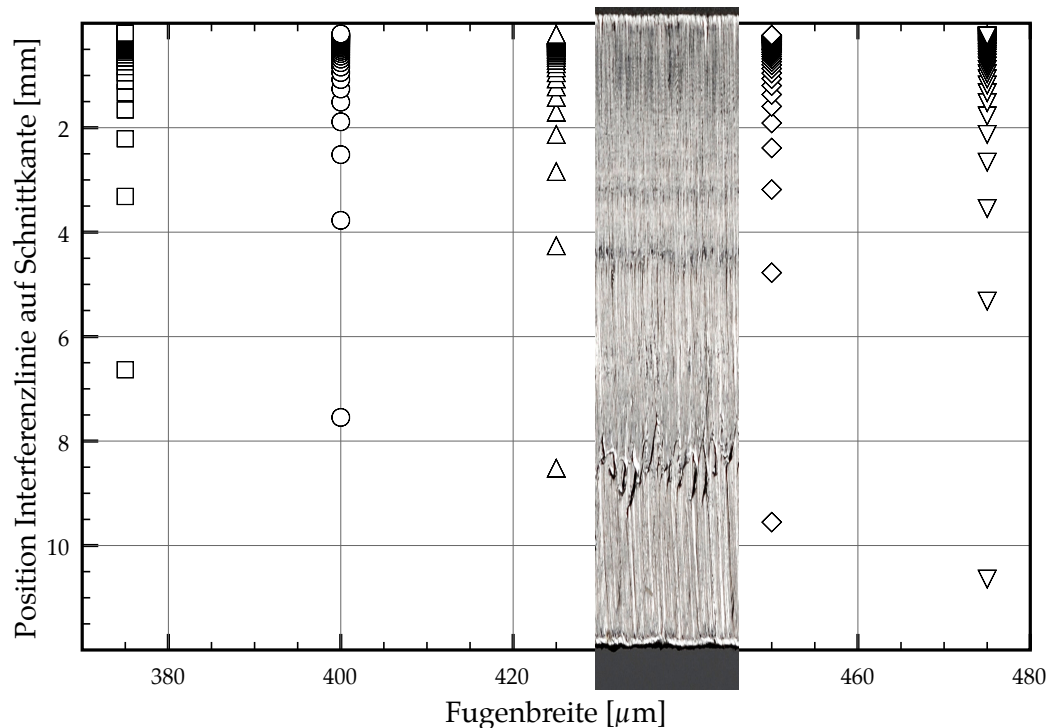


Abbildung 5.18: Rechnerische Position der Interferenzlinien auf der Schnittkante nach Formel 5.1. Mitte: Interferenzlinien auf einer Schnittkante. Rechts: Skalierte Fugenform des mittleren Schnittes, mittlere Fugenbreite ca. 425 μm

vertikalen Riefen und die horizontalen Schmelzansammlungen wabenartige Strukturen (vgl. Abb. 5.15).

Der Verlauf der vertikalen Riefen wird nicht durch die horizontale Schmelzüberhöhung gestört. Durch Interferenz ändert sich relativ zur nullten Beugungsordnung der Einfallswinkel der Interferenzmaxima und somit auch die Absorption auf den Schnittkanten. Entlang einer horizontalen Interferenzlinie kann die Schmelze der Schneidfront länger auf Schmelztemperatur gehalten werden. Dies führt zu einer Schmelzansammlung auf Höhe des Interferenzmaximums und ist gespeist durch den Schmelzstrom der Schneidfront (vgl. 5.19).

Wie bereits beschrieben sind die gezeigten Schnittkanten geprägt von zwei Phänomenen: den vertikalen Riefen und den horizontalen Interferenzlinien. Der vertikale Riefenverlauf wird überlagert durch die senkrecht dazu verlaufenden Interferenzstrukturen. Die Linie der ersten Beugungsordnung ist im Gegensatz zu den höheren Beugungsordnungen häufig stark zerfasert (vgl. Abb. 5.20) und besteht aus einzelnen Schmelztränen (fortwährend wird diese Linie daher

5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante

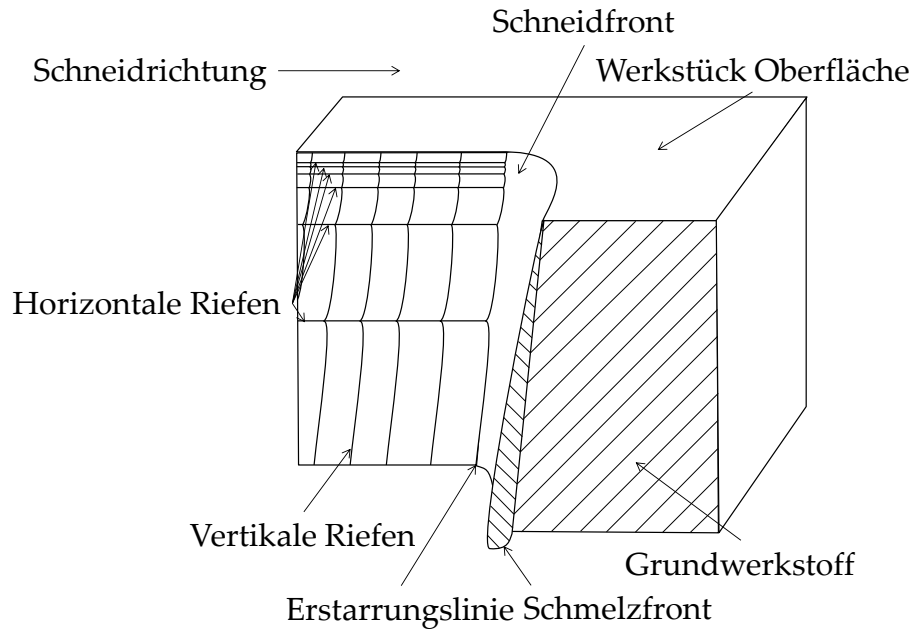


Abbildung 5.19: Skizze einer Schnittkante mit halber Schneidfront und Schmelzüberhöhung an der Erstarrungslinie

Tränenlinie genannt). Tropfen werden aus der Metallschmelze auf dem Wellenberg der Interferenzlinie herausgelöst und legen sich unterhalb des Wellenberges auf die bereits erstarrte Schnittkante. Dies verschlechtert die Rautiefe im unteren Schnittkantenbereich und reduziert das optische Erscheinungsbild einer Schnittkante.

Ursache für die dominante Ausprägung der Tränenlinie an dieser Position ist der höchste Intensitätsanteil der ersten Beugungsordnung. Die Schmelzansammlung kann hier am stärksten ausgedehnt werden. Weiterhin beschreiben Vossen et. al die Schmelze als einen mit zunehmender Werkstückdicke wachsenden Film [35]. Somit ist auf Höhe der ersten Beugungsordnung der dickste Schmelzfilm. Dies bedeutet, dass eine ausreichend dicke Überhöhung zur Verfügung steht, um einzelne Tropfen aus dem Schmelzfilm herauszulösen (vgl. 5.16). Bei genauer Betrachtung der Beugungslinien höherer Ordnung unter dem Mikroskop lassen sich auch hier die typischen Tropfen unterhalb der Beugungslinie erkennen. In Abbildung 5.20 weist die Tränenlinie eine ausgefranzte Struktur auf und gleicht einer Sägezahnform. Diese Sägezahn förmigen Strukturen entstehen durch einen Wechsel der Schmelzausbreitungsrichtung. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Schmelzüberhöhung der Tränenlinie sowohl in Schnittrichtung als auch ihr entgegen verläuft. Das bedeutet, dass sich die Schmelzüberhöhung in einem wiederkehrenden Prozess in Richtung der Schneidfront ausbreitet und sich, bei zu hoher Schmelzfilmdicke, einzelne Tropfen aus der Schmelze her-

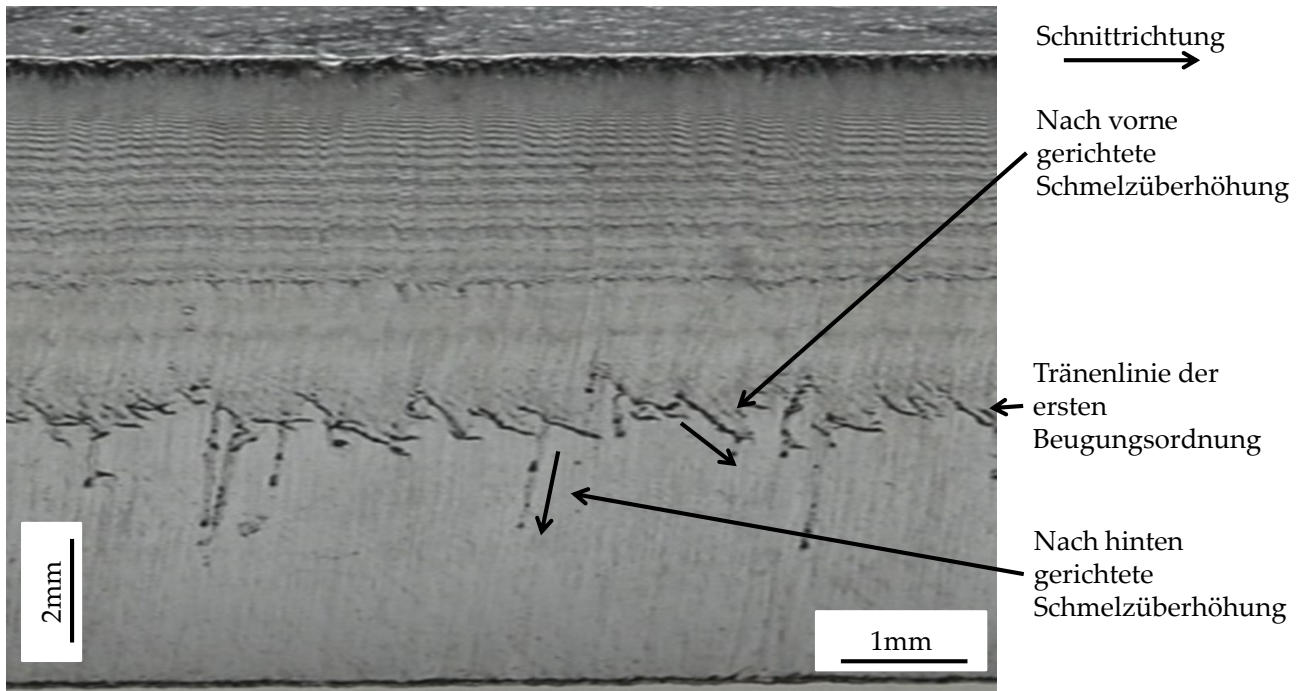


Abbildung 5.20: Gestrecktes Foto einer Schnittkante mit deutlich ausgeprägter Tränenlinie

auslösen. Diese Schmelztropfen legen sich auf der bereits erstarrten Schnittkante ab. Diese Schmelzansammlung führt schließlich zu einer erhöhten Rautiefe auf und unterhalb einer Tränenlinie. Ein wichtiges Ziel für eine niedrige Rautiefe einer Schnittkante ist daher die Vermeidung einer Tränenlinie. Abbildung 5.21 zeigt sechs Edelstahlschnitte mit einer Variation des Schneidgasdruckes in einer Dicke von 12mm. Beginnend bei 12bar Gasdruck bis hin zu einem Druck von 18bar ist keine eindeutige Tränenlinie zu erkennen. Ab 20bar beginnt die Ausbildung einer Tränenlinie bei einem Drittel der Blechdicke. Eine Druckstufe weiter ist die Tränenlinie mit Höhenverschiebung von ca. 1mm erneut zu erkennen. Bei niedrigen Drücken (12 und 14bar) ist keine Tränenlinie festzustellen, allerdings tritt bei 14bar die Bildung von Bart ein. Gesteigert wird dieser negative Effekt durch abknickende Riefen bei einem Gasdruck von 12bar. Für die Vermeidung einer Tränenlinie und Bart ist ein optimaler Parameterbereich bei einem Gasdruck zwischen 16 und 18bar zu wählen. Zusammengefasst gilt, dass die Wechselwirkung von lokaler Schmelzfilmüberhöhung durch Interferenzlinien und zunehmenden antreibenden Kräften eine Tränenlinie durch ein Auslösen einzelner Schmelztropfen aus dem Schmelzfilm positiv beeinflussen und so die Qualität der Schnittkante verschlechtern.

Neben der Optimierung der Schneidgasströmung stehen die Parameter Wellenlänge, Spalt-

5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante

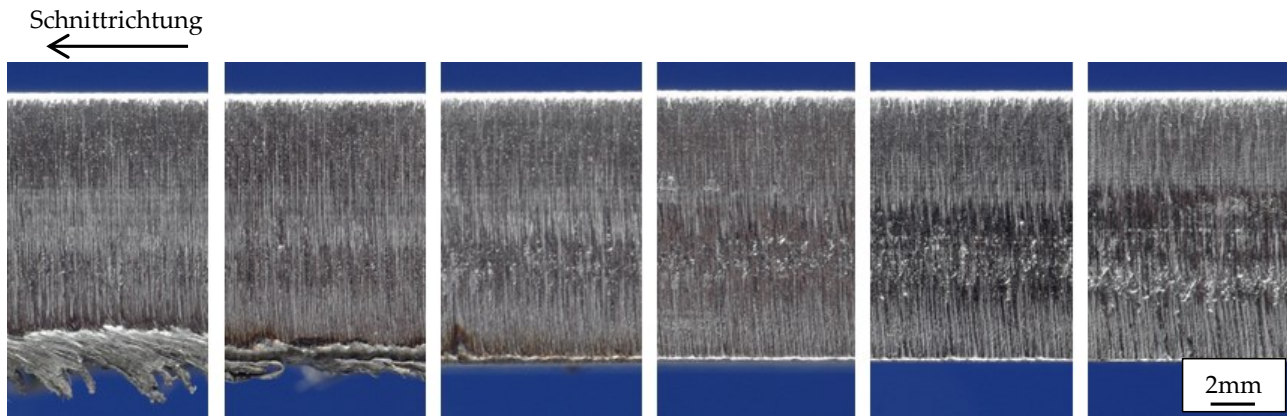


Abbildung 5.21: CO₂-Laserschnittkanten mit zunehmendem Druck von links nach rechts. Beginn bei 12bar in 2bar Schritten bis 22bar

breite, longitudinale und transversale Moden zur Verfügung. Im wesentlichen muss dabei zur Reduzierung der horizontalen Beugungsriefen der Kontrast der Interferenzlinien auf der Schnittkante verringert werden (siehe Patent [36]). Hierdurch erhält die einzelne Beugungsordnung einen geringeren Leistungsanteil und kann somit nur eine geringere Schmelzüberhöhung auf der Schnittkante hinterlassen. Insbesondere Tränenlinien werden hiermit deutlich reduziert.

5.3 Bart

Neben Riefen auf den Schnittkanten stellt die Bartbildung einen weiteren wichtigen Parameter zur Qualitätsbeurteilung dar. Bei der Bartbildung handelt es sich um einzelne Schmelztropfen, die durch mangelnde antreibende Kräfte nicht von den Schnittkanten abgelöst werden können (Riviera et al. [37]).

Abbildung 5.22 zeigt erstmals einen anhaftenden Tropfen auf der Schneidfront, der zunächst in der Nähe des Scheitels startet und Schritt für Schritt in Richtung Schnittkante wandert. Die Sichtbarkeit dieses Prozesses ist nur möglich bei besonders breiten Fugen, in diesem Fall ca. 1,8mm. Durch die Kenntnis dieses Phänomens ist eine nähere Analyse von Prozessaufnahmen bei Industrieüblichen Schneidparametern möglich.

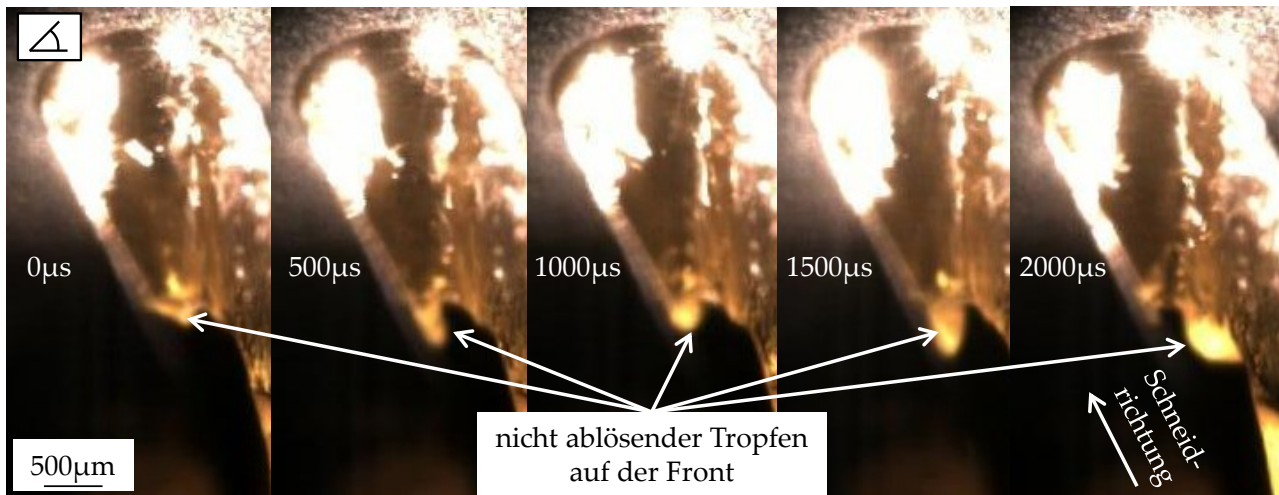


Abbildung 5.22: Bildserie eines 2mm dicken Edelstahlschnittes bei einer Fugenbreite von ca. 2mm

Abbildung 5.23 zeigt eine Bildserie eines Schnittes mit anhaftenden Schmelztropfen an der Blechunterkante in außeraxialer Beobachtungsrichtung senkrecht zur Schneidfront. In der ers-

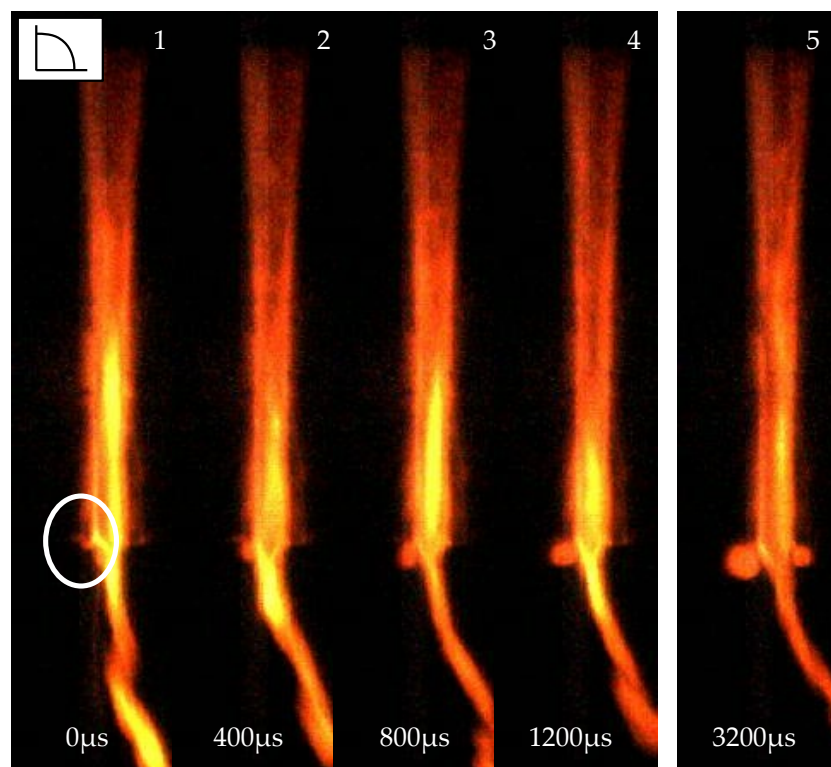


Abbildung 5.23: Bildserie mit dem Ursprung der Bartbildung auf der Blechunterkante

5 Charakteristische Merkmale einer Schnittkante

ten Abbildung haftet links ein Tropfen, der in den folgenden Abbildungen vom links anliegenden Schmelzstrom gespeist wird. Durch einen Wechsel der Schmelzströmung von der linken zur rechten Seite bildet sich in Bild fünf ein anhaftender Tropfen auf der rechten Schnittkante. Diese oszillierende Bewegung der Schmelze ist bereits in Gebiet 2 und 3 der Schmelzströmung nachgewiesen. Durch diese pendelnde Bewegung wird abwechselnd Schmelze auf der linken und wiederum auf der rechten Seite ausgetrieben. Da die Schmelze bei zu niedrigen antreibenden Kräften zu einem Teil an der Blechunterkante anhaftet, ergibt sich eine gleichmäßige Bartbildung an beiden Schnittkanten.

Betrachtet man dieses Phänomen im Zusammenhang mit dem Vergleich von Laserschnitten mit $1\mu\text{m}$ und $10\mu\text{m}$ Wellenlänge, so wird ersichtlich, warum gerade Schnitte mit $1\mu\text{m}$ Wellenlänge häufig Bart aufweisen. Die in Kapitel 5.1 beschriebenen lateralen Bewegungen der Schmelze konnten für Schnitte mit einem Faserlaser deutlich stärker nachgewiesen werden. Die Störungen der Schmelzströmung auf der Schneidfront führen auch zu stärkeren Störungen des antreibenden Gasstroms. Hierdurch werden die antreibenden Kräfte auf die Schmelze reduziert, sodass eine höhere Wahrscheinlichkeit für eine Bartbildung entsteht.

Optimale Schneidparameter müssen daher eine möglichst geringe Störung der Schmelze erzeugen. Eine geringe Rautiefe auf der Schnittkante und die reduzierte Entwicklung von Bart kann hierdurch erreicht werden.

6 Prozessantwort der Verfahrensparameter

Kapitel 5 zeigte mit Hilfe der Prozessbeobachtung, welche Vorgänge zur Riefen- und Bartbildung beitragen. Auf dem Weg, qualitätsrelevante Parameter zu regeln, muss neben dem Verständnis zur Riefen- und Bartbildung auch verstanden werden, welche Verfahrensparameter die Qualität beeinflussen und wie diese während des Prozesses detektiert werden können. Im folgenden Kapitel wird mit Hilfe koaxialer Prozessaufnahmen die Prozessantwort bei Veränderung mehrerer Verfahrensparameter studiert und in Bezug auf die Einstellbarkeit ausgewertet. Abbildung 6.1 zeigt Faktoren, die sowohl die Stabilität eines Prozesses als auch die

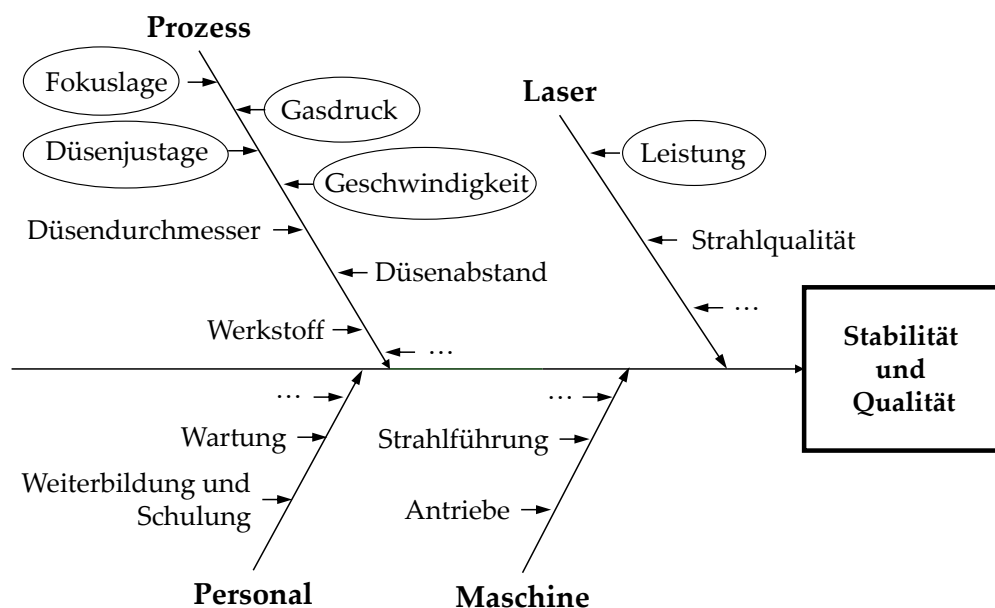


Abbildung 6.1: Übersicht zur Auswahl der Verfahrensparameter

6 Prozessantwort der Verfahrensparameter

Qualität einer Schnittkante beeinflussen. Diese sind in vier Gruppen unterteilt (Prozess, Laser, Personal, Maschine). Da sowohl das Personal als auch die Maschine meist als feste Parameter vorgegeben sind, werden nur Größen untersucht, die variabel an einer Maschine eingestellt werden können.

Dazu zählen die Fokuslage, die Schneidgeschwindigkeit, die Laserleistung, der Schneidgasdruck und die Düsenposition. Analysiert werden die Prozessantworten Intensität und Standardabweichung der Prozessemission, Fugenbreite, Position der Schneidfront und Intensitätsverteilung der Prozessemission. Tabelle 6.1 zeigt die als Forschungshypothese aufgestellten Zusammenhänge zwischen Prozessantworten und dem jeweiligen Einstellparameter. Grau hinterlegt ist die Prozessantwort, die besonders sensitiv auf den Einstellparameter reagiert und nach der Hypothese genügt um die tatsächlich im Prozess vorliegende Parametergröße zu bestimmen. In dieser Übersicht wird bereits sichtbar, dass voraussichtlich mehrere Einstellparameter mehrere Prozessantworten beeinflussen. Durch die grau hinterlegte spezifische Prozessantwort eines Verfahrensparameters, sollten Veränderungen am Prozess den Parametern spezifisch zugeordnet werden können.

Parameter \ Antwort	Intensität	Stdabw. der Intensität	Fugenbreite	Pos. Schneidfront	Intensitätsverteilung
Fokuslage	X	X	X	X	X
Düsenjustage				X	
Laserleistung	X		X	X	
Gasdruck	X	X		X	
Schneidgeschw.	X	X	X	X	

Tabelle 6.1: Hypothesen-Übersicht zur Wirkbeziehung zwischen Einstellparameter und Prozessantwort

6.1 Fokusslage

Der Begriff der Fokusslage beschreibt die Position der Strahltaille bzw. die Position des schmalsten Strahldurchmessers relativ zur Blechoberfläche. Bei negativer Fokusslage befindet sich das Intensitätsmaximum im oder unter dem Werkstück, bei positiver Fokusslage oberhalb der Werkstückoberfläche (siehe Abbildung 6.2 oben).

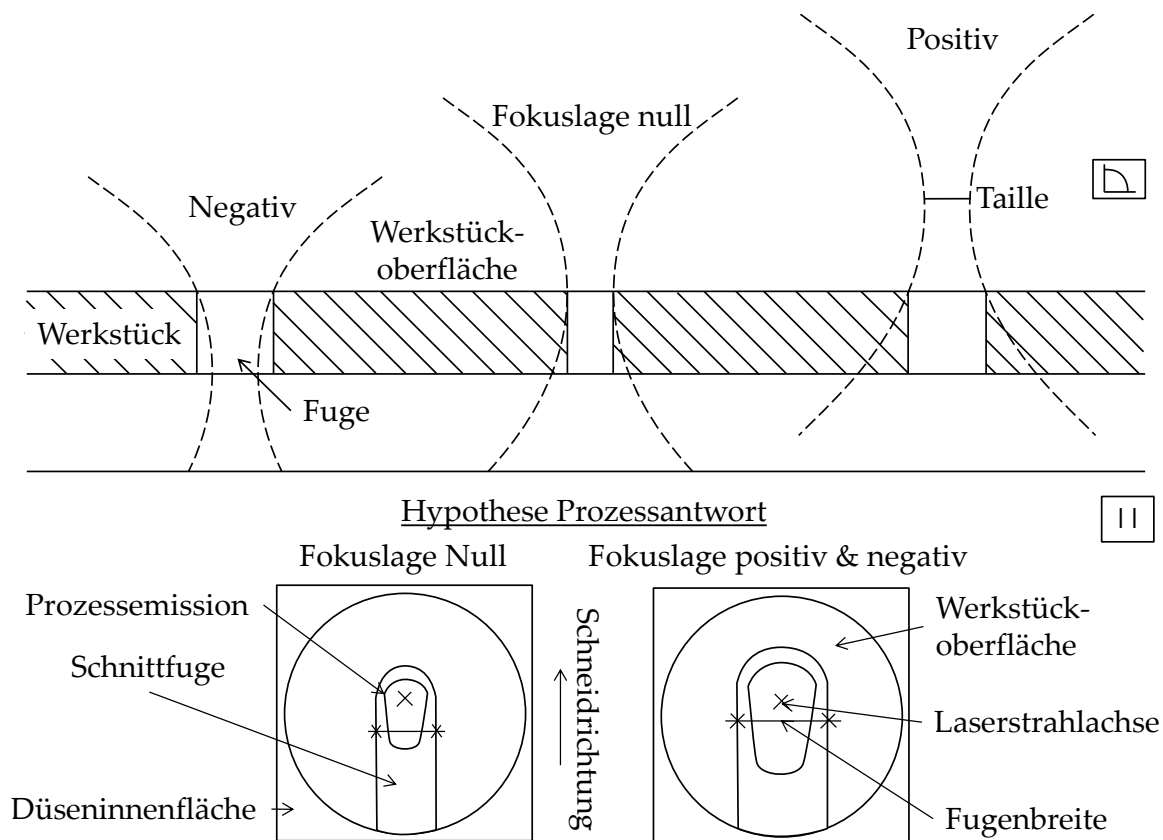


Abbildung 6.2: Oben: Position der Fokusslage relativ zur Blechoberfläche. Unten: Skizze zur Hypothese der Prozessantwort bei Variation der Fokusslage

Weiterhin zeigt die Grafik in der unteren Bildhälfte zwei Skizzen einer koaxialen Prozessaufnahme. Diese Darstellung stellt die zu erwartende Prozessantwort bei Variation der Fokusslage dar. Hieraus ergeben sich die folgenden Hypothesen:

- *Intensität der Prozessemission:* Höchste Prozessemission um die Fokusslage 0, da sich hier die höchste Intensität auf der Werkstückoberfläche befindet.

6 Prozessantwort der Verfahrensparameter

- *Stdabw. Emission:* Höchste Standardabweichung um die Fokusslage 0, da durch die höchste Intensität bspw. Schmelze verdampfen kann und somit Störungen im Schmelzfluss stark angefacht werden.
- *Fugenbreite:* Änderung der Fugenbreite in Abhängigkeit des Strahldurchmessers auf der Werkstückoberfläche, hyperbolischer Verlauf der Fugenbreite ähnlich der Kaustik.
- *Frontposition:* Durch Änderung der Fugenbreite wird sich ebenso die Frontposition in Schnittrichtung verändern, positive und negative Fokusslagen ergeben Frontpositionen weiter entfernt von der Laserstrahlachse.
- *Intensitätsverteilung der Prozessemission:* Länge und Breite der Prozessemission wird bei steigend positiver und abnehmend negativer Fokusslage zunehmen.

Abbildung 6.3 zeigt die kleinsten und größten Strahlradien in Abhängigkeit der Fokusslage (gemessen nach [38]). Im Vergleich hierzu zeigt die obere Kurve die halbe Fugenbreite bei

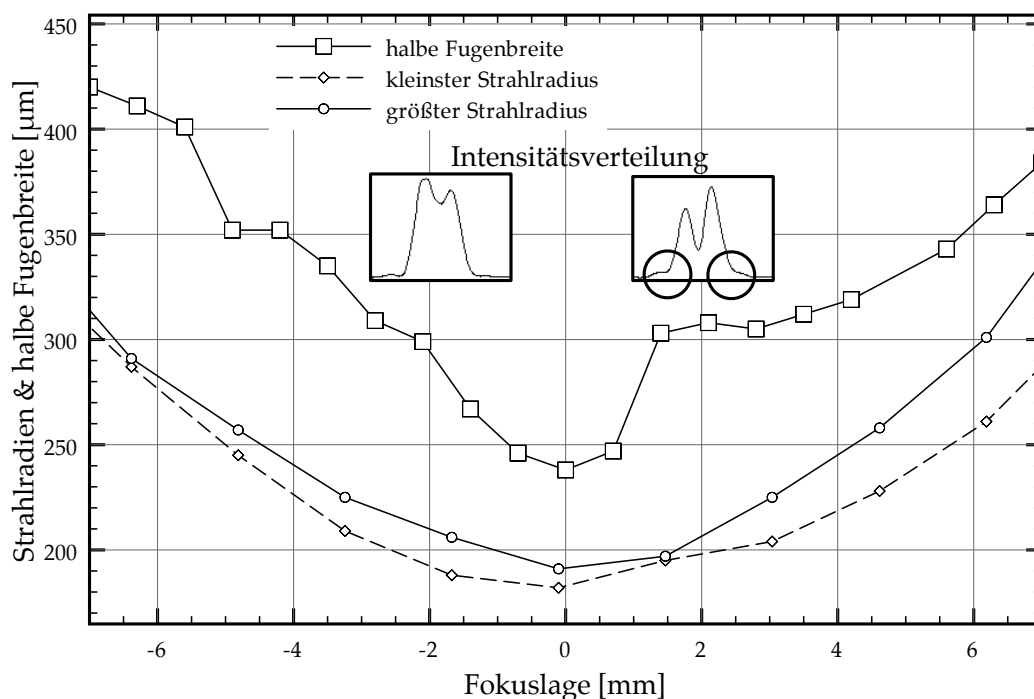


Abbildung 6.3: Strahlradien und Fugenbreiten auf der Blechoberkante an einem 1mm dicken Edelstahlblech

Einschnitten in ein 1mm dickes Edelstahlblech. Sowohl Fugenbreite als auch die Strahlradien

verlaufen annähernd hyperbolisch, sodass die Fugenbreite einen direkten Hinweis auf die Position der Fokusslage geben kann. Obwohl die gemessenen Strahlradien sowohl auf positiver als auch auf negativer Fokusslagenseite nahezu identisch sind, zeigen die beiden Schnitte durch die Intensitätsverteilung der Laserstrahlung einen Unterschied im äußeren Bereich des Strahlradius. Bei Fokusslage +2mm ist ein etwas weiter auslaufender unterer Bereich zu erkennen, der zu der vergrößerten Fugenbreite auf der Werkstückoberfläche führt (vgl. Intensitätsprofile in Abbildung 6.3).

Bereits die Vermessung der Fugenbreite genügt, um zumindest einseitig (pos./neg.), eine eindeutige Bestimmung der Fokusslage während des Schneidbetriebs zu gewährleisten. Erweitert man die Prozessbeobachtung um die thermischen Signalanteile, ergibt sich eine optimierte Vorhersage des Verfahrensparameters. Die Beobachtung einer Fokusslagenvariation zeigt die einfache Möglichkeit zur Eingrenzung auf die Gebiete negativ, null und positiv (vgl. Abbildung 6.4). Zunächst ist zwischen den unterschiedlichen Fokusslagen eine unterschiedlich helle

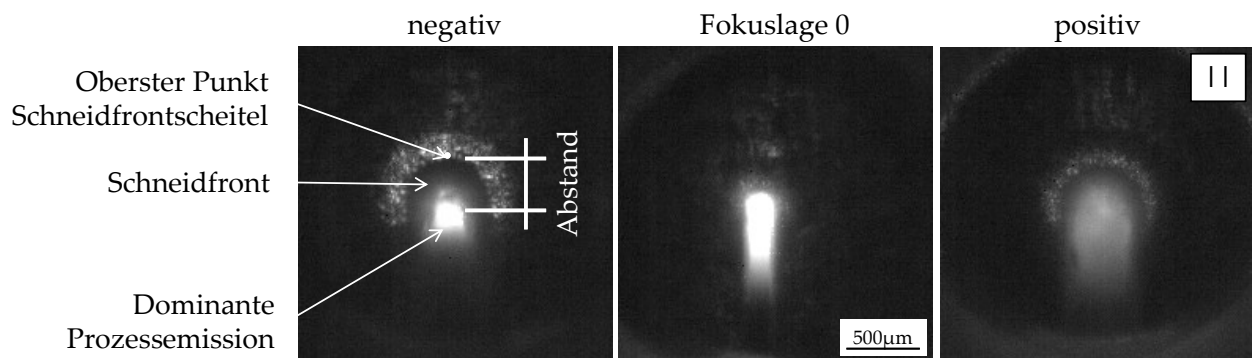


Abbildung 6.4: Prozessmission bei negativer, null und positiver Fokusslage und coaxialer Prozessbeobachtung

Prozessmission zu erkennen. Bei negativer Fokusslage stellt sich aufgrund der höchsten Intensität unterhalb der Blechoberkante und eines größeren Strahldurchmessers an der Blechoberkante die dominante Prozessmission hinter der Schneidfront ein.

Bei Fokusslage null ist die obere Fugenbreite schmal. Die Schneidfront ist von der dominanten Prozessmission überlagert.

Ebenso verhält es sich bei positiver Fokusslage. Schneidfront und dominante Prozessmission sind überlagert. Im Unterschied zu Fokusslage Null ist die Prozessmission aufgrund des breiteren Strahls deutlich ausgedehnter.

6 Prozessantwort der Verfahrensparameter

Durch Bestimmung der Größe der dominanten Prozessemission und dem Abstand zwischen der dominanten Prozessemission und dem obersten Punkt des Schneidfrontscheitels kann die Fokuslage eindeutig bestimmt werden (siehe auch Patent [39]). Ebenfalls kann durch die Beobachtung der Prozessemission in Größe und Position relativ zur Schneidfront die laserleistungsabhängige zeitliche Änderung der Fokuslage (Fokusshift) bestimmt werden.

Zur Auswertung der Prozessemissionsintensität und der Standardabweichung wird die Emission innerhalb der Fuge mit Hilfe einer Bildverarbeitung untersucht. Hierzu wird ein Rechteck um die Prozessemission in die Fuge gelegt und der Mittelwert der Graustufen im Rechteck berechnet.

Abbildung 6.5 zeigt hierzu das Gebiet, welches für die Auswertung beider Kriterien genutzt wird. Die Mitteilung über 100 Einzelbilder ergibt den mittleren Grauwert der Prozessemission.

Bildausschnitt zur
Bestimmung der
Prozessintensität
und der Standard-
abweichung

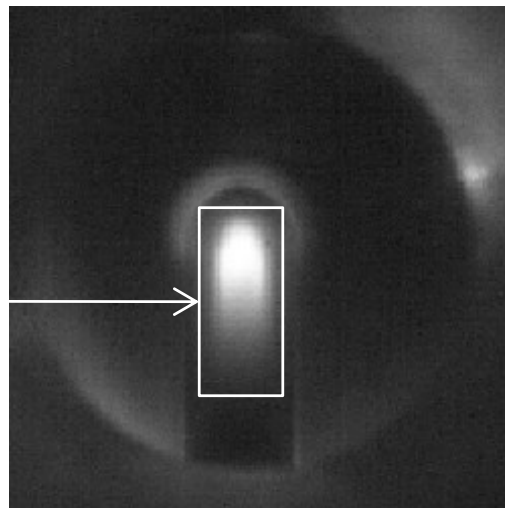


Abbildung 6.5: Koaxiale Prozessaufnahme inkl. weiß umrandetem Bildsegment zur Bildverarbeitung

Abbildung 6.6 zeigt, dass sowohl mit positiver als auch mit negativer Fokuslage der mittlere Grauwert in der Fuge abnimmt. Tendenziell zeigt ebenso die Standardabweichung dieses Verhalten, allerdings ist bei Fokuslage Null nicht die höchste Standardabweichung zu finden. Da bei dieser Fokuslage auch die niedrigste Rautiefe gemessen wird, ist bei dieser Fokuslage die geringste Instabilität auf der Front messbar.

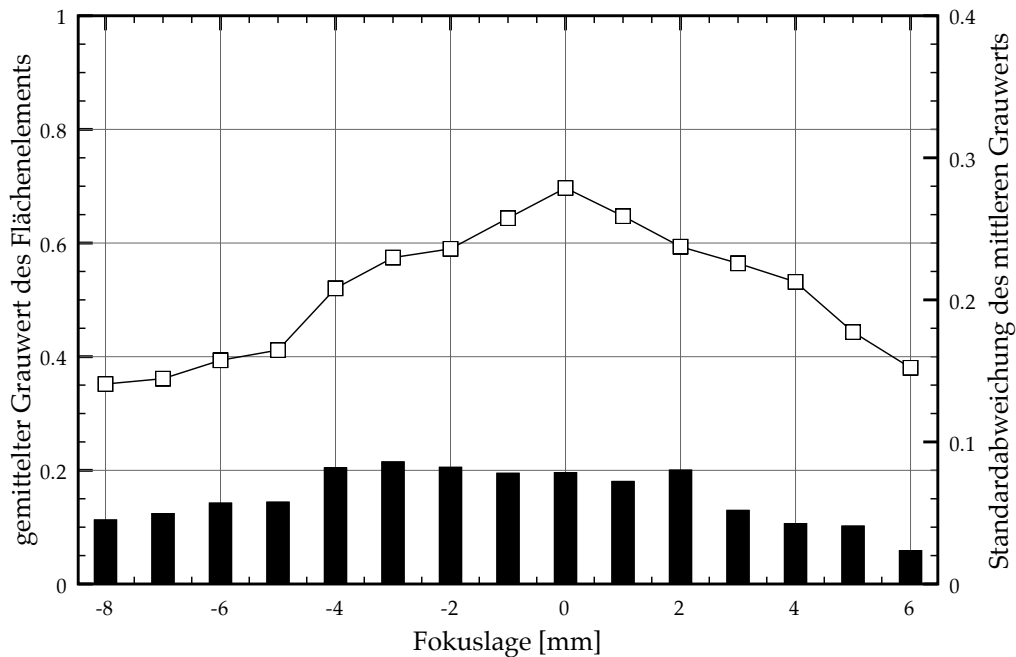


Abbildung 6.6: Mittlerer Grauwert der Prozessemission in der Fuge bei Variation der Fokuslage inkl. Standardabweichung auf der zweiten Y-Achse

Die Fokuslage verändert weiterhin die Position der Schneidfront und die Intensitätsverteilung der Prozessemission. Zu erkennen ist sowohl für positive als auch für negative Fokuslagen eine weiter vom Laserstrahl entfernte Schneidfrontposition. Negative Fokuslagen sind gekennzeichnet durch einen kurzen Bereich heller Prozessemission. Bei Fokuslage Null ergibt sich eine helle lange Emission, wobei positive Fokuslagen insgesamt dunkler sind und eine ähnliche Länge wie bei Fokuslage Null aufweisen. Die Fokuslage hat somit, wie in der Hypothese vermutet, einen deutlichen Einfluss auf alle fünf Prozessantworten.

6.2 Geschwindigkeit

Zur Untersuchung der Prozessantworten bei einer Variation der Geschwindigkeit wurde 6mm dicker Edelstahl mit einer Laserleistung von 3kW, einer Fokuslage von -5mm und einem Stickstoff-Schneidgasdruck von 18bar geschnitten. Die Geschwindigkeit umfasst einen Bereich von 0,7m/min bis zu 2,7m/min in einer Schrittweite von 0,5m/min. Abbildung 6.7 zeigt das Schema zu den nachfolgend aufgelisteten Prozessantworten, die bei Variation der Ge-

schwindigkeit erwartet werden. Bei niedrigen Geschwindigkeiten wird der Laserstrahl nur zu

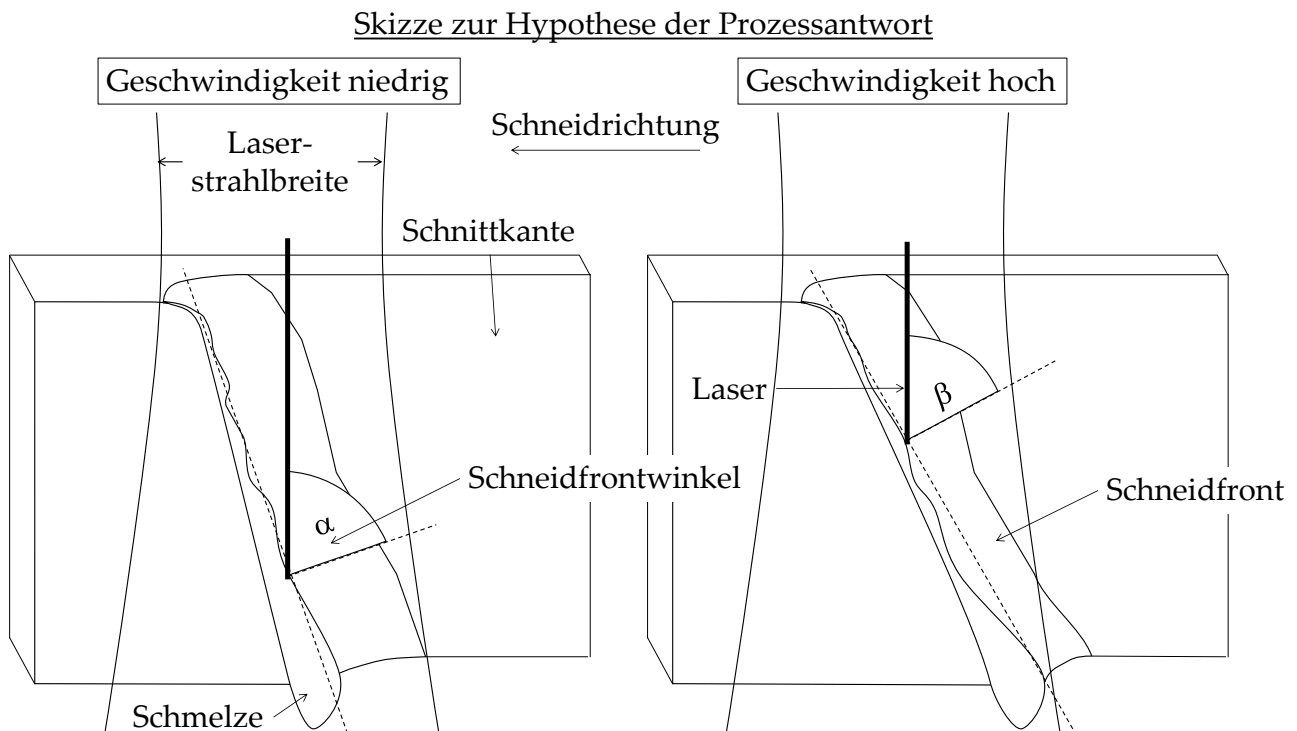


Abbildung 6.7: Schema zur Änderung der Schneidfront bei Variation der Geschwindigkeit

einem geringen Teil ausgenutzt (Grafik links). Die Schneidfront wird einen großen Winkel einnehmen und der Abstand zwischen Schneidfrontoberkante und dem Laserstrahlrand wird gering. Im hohen Geschwindigkeitsregime benötigt der Prozess mehr Energie, um im gleichen Zeitintervall mehr Material zu schmelzen. Die Schneidfront wird sich somit ausdehnen um einem größeren Anteil Laserstrahlung ausgesetzt zu sein. Der gestiegene absorbierte Energieanteil führt zu einer gestiegenen Oberflächentemperatur der Schmelze. Weiterhin ist der Anschmelzpunkt näher an der Laserstrahlachse zu erwarten, da die vom Laser bereit gestellte Energie an einer weiter innen liegenden Leistungs-Isophote vorzufinden ist. Nachfolgend ergeben sich hieraus die zu erwartenden Prozessantworten:

- *Intensität:* Bei zunehmender Geschwindigkeit ist eine steigende Intensität aufgrund zunehmender Temperaturen auf der Schmelzoberfläche zu erwarten.
- *Stdabw. Intensität:* Insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten nahe der Prozessgrenze wird die Standardabweichung steigen, da der Prozess dort instabil wird.

- *Fugenbreite*: Aufgrund einer geringeren Zeit pro Materialvolumen wird sich mit steigender Geschwindigkeit eine schmalere Fugenbreite ausbilden.
- *Frontposition*: Ebenso wie bei der Fugenbreite wird sich die Frontposition mit steigender Geschwindigkeit in Richtung des Laserstrahlachse verschieben.

Abbildung 6.8 zeigt die Intensität der Prozessemission, inkl. deren Standardabweichung (Bal-

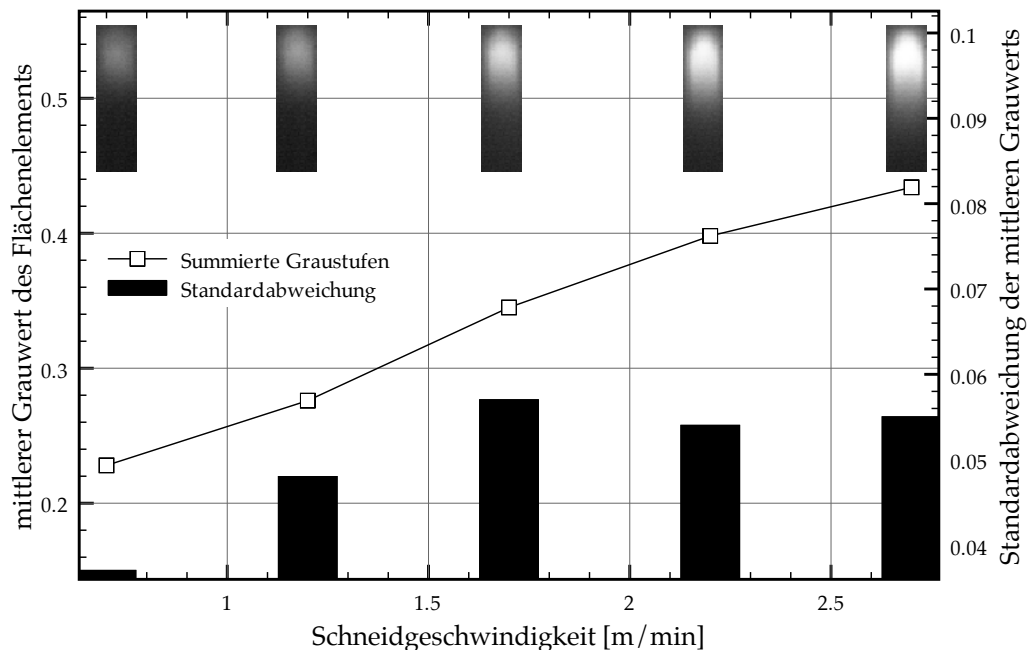


Abbildung 6.8: Mitteilung der Intensität der Prozessemission bei Variation der Schneidgeschwindigkeit inkl. Standardabweichung auf der zweiten Y-Achse

ken unten) und die zugehörigen gemittelten Bildausschnitte im oberen Bereich des Graphen. Mit Zunahme der Schneidgeschwindigkeit ist ein deutlicher Anstieg der Prozessemission um circa den Faktor zwei zu verzeichnen. Die Standardabweichung steigt bis zu einer Geschwindigkeit von 1,7m/min und sinkt dann wieder ab.

Für die Änderung der Prozessemission bei Variation der Geschwindigkeit ist der Abstrahlwinkel und die Änderung der Temperatur der Schneidfront verantwortlich. Abbildung 6.9 zeigt beispielhaft die abnehmende Schneidfrontneigung für ein 10mm dickes Edelstahlblech, geschnitten mit einem CO₂-Laser. Das Maß für die Neigung der Front wurde zwischen den

Punkten Schneidfront Oberkante bis Unterkante gemessen (vgl. Abbildung 6.7). Durch Abnahme der Frontneigung verbessert sich wiederum der Emmissionswinkel relativ zur Perspektive der Beobachtungskamera [34]. Aufgrund des eintretenden Prozessabbruchs kann bei den

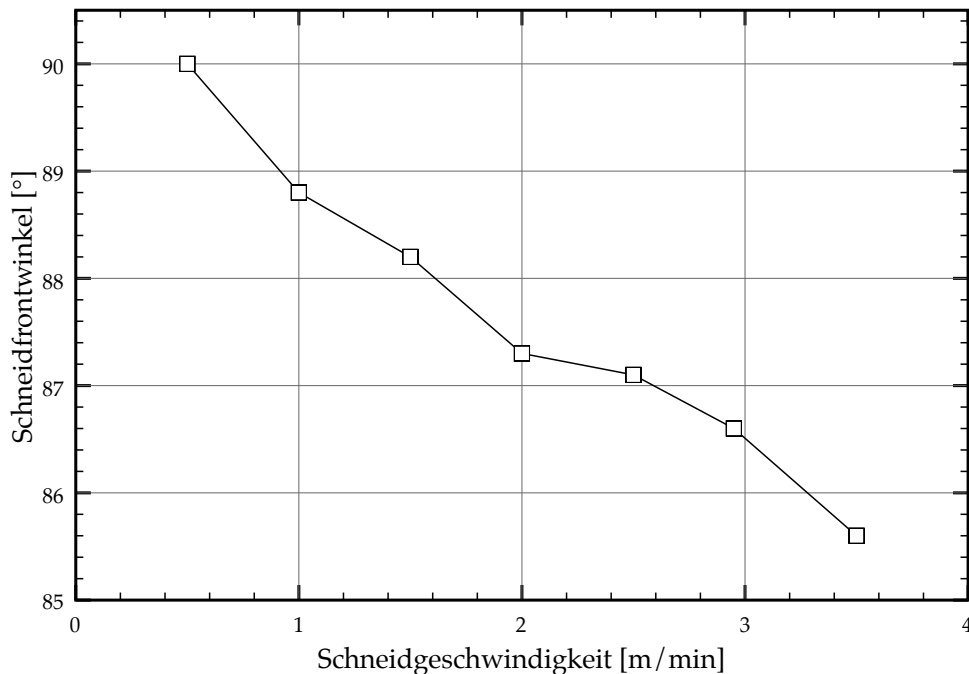


Abbildung 6.9: Schneidfrontneigung in Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit

gewählten Prozessparametern ein Winkel von 85° nicht unterschritten werden. Nach einem vereinfachten Prozessmodell von Mahrle überschreitet ab diesem Punkt die projizierte Länge der Schneidfront den Durchmesser des einwirkenden Laserstrahls [40][41].

Neben der Änderung des Abstrahlwinkels steigt weiterhin die Temperatur der Schmelzoberfläche. Studien zeigen eine mit zunehmender Schneidgeschwindigkeit steigende Temperatur der Schmelzfilmoberfläche [42][20], und da nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz die abgestrahlte Leistung mit der vierten Potenz der Temperatur zunimmt [43][44], ist diese Änderung auch in den Prozessaufnahmen sichtbar. Beide Prozesse, Winkel- und Temperaturänderung, beeinflussen also die Emission relativ zur Beobachtungsebene.

Abbildung 6.10 zeigt gemittelte Aufnahmebilder, die die Untersuchung der Frontposition der Fugenbreite und der Intensitätsverteilung der Prozessemission gestatten. Die übereinander angeordneten Bilder sind identisch jedoch um 90° zueinander gedreht dargestellt. In der oberen

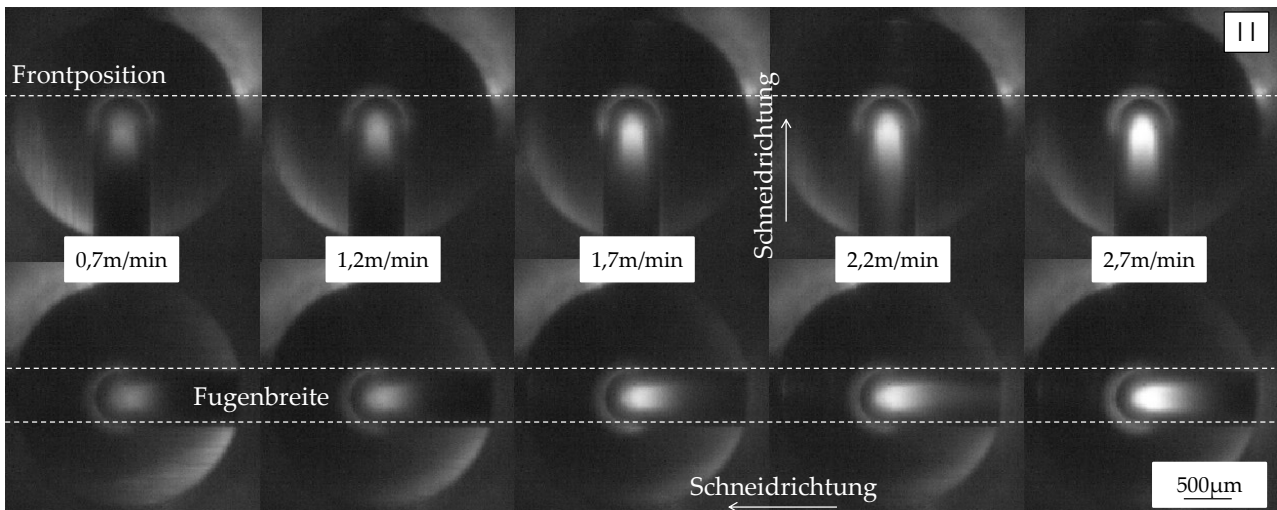


Abbildung 6.10: Geschwindigkeitsvariation, identische Bilder übereinander angeordnet

Zeile ist die Position der Schneidfront durch eine gestrichelte Linie dargestellt. In der unteren Zeile ist die Fugenbreite durch zwei gestrichelte Linien eingezeichnet. Nach der Hypothese sollte es zu einer Verringerung der Fugenbreite und zur Annäherung der Front zur Laserstrahlachse kommen. Bei niedrigen Geschwindigkeiten sollten Randbereiche des Laserstrahls in gleicher Zeit mehr Energie in das Material einkoppeln. Hierdurch ist zu erwarten, dass das Material früher geschmolzen wird und sich somit die Schneidfront weiter vorne befindet und die Fugenbreite zunimmt. Entgegen der Erwartungen stellt sich keine Änderung der Frontposition oder der Fugenbreite ein. Hierbei ist davon auszugehen, dass die Änderungen nicht sichtbar unterhalb der Auflösungsgrenze der Kameraabbildung liegen. Die Geschwindigkeit ist damit lediglich durch die Änderung der Intensität der Prozessemission zu bestimmen.

6.3 Leistung

Durch das Anheben der Laserleistung können bereits weiter außen gelegene Bereiche des Laserstrahldurchmessers ausreichend viel Energie aufweisen um Material zu schmelzen. Als Hypothese resultieren daraus die folgenden drei Prozessantworten und Skizze 6.11:

- *Intensität:* Anstieg der Prozessemission durch höheren Leistungseintrag und damit Steigerung der Temperatur der Schmelzoberfläche.

6 Prozessantwort der Verfahrensparameter

- *Fugenbreite*: Anstieg der Fugenbreite durch ein relativ zum Laserstrahlradius weiter außen liegendes Schmelzen des Werkstoffes.
- *Frontposition*: Anstieg des Abstandes zwischen Laserstrahlachse und Schneidfront.

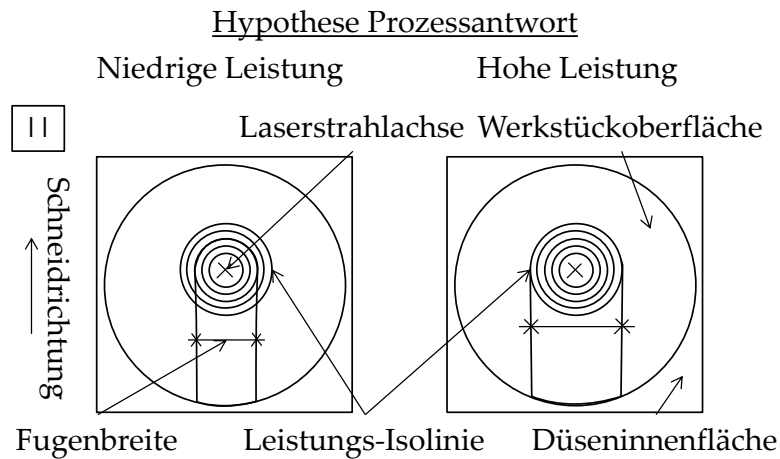


Abbildung 6.11: Schema zur Hypothese der Prozessantwort bei Änderung der Laserleistung

Abbildung 6.12 zeigt zu jeweils einer Leistungsstufe ein Einzelbild der koaxialen Prozessaufnahme. Aufgenommen wurden die Bilder bei Laserleistungen zwischen 2,5kW und 4kW in 500W Schritten. Die jeweils übereinander angeordneten Bilder sind um 90° gedreht. Für die

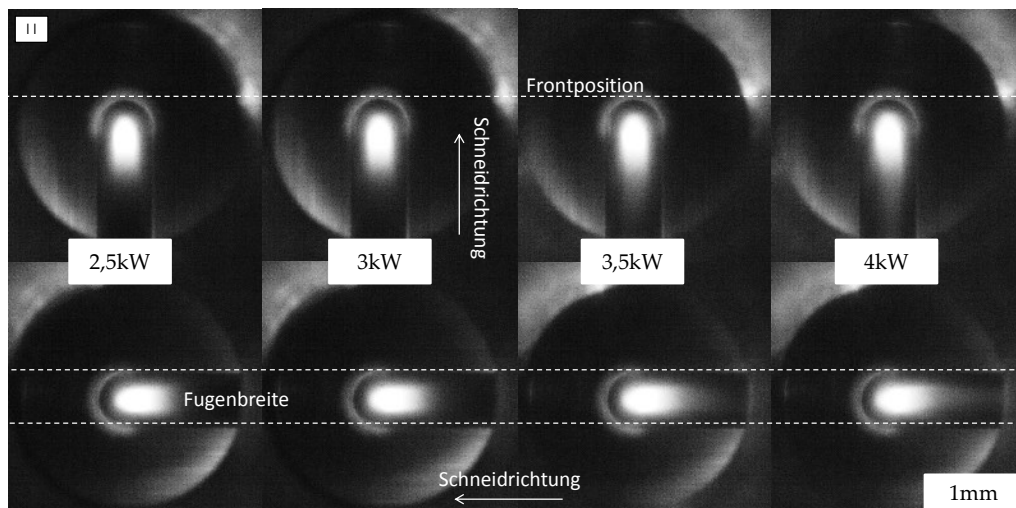


Abbildung 6.12: Koaxiale Aufnahmen einer Leistungsvariation, identische Bilder über einander, Frontposition (obere Zeile) und Fugenbreite (untere Zeile)

Prozessantworten Fugenbreite und Frontposition ist entgegen der Erwartungen keine Änderung zu erkennen. Durch die Nachbearbeitung aller Bilder mit einem erhöhten Kontrast wird sichtbar, dass sich die Prozess-emission mit steigender Laserleistung verlängert.

Die berechnete Intensität zeigt Abbildung 6.13. Genau wie in der Geschwindigkeitsvariation steigt auch die Intensität der Prozessemission mit steigender Leistung. Insgesamt beträgt die Zunahme der Prozessemission lediglich 13%. Die Intensität ist daher ein nicht signifikanter Wert zur Messung der eingebrachten Laserleistung. Gleiches gilt für die Standardabweichung, da sie im Bereich zwischen 0,04 und 0,08 liegt.

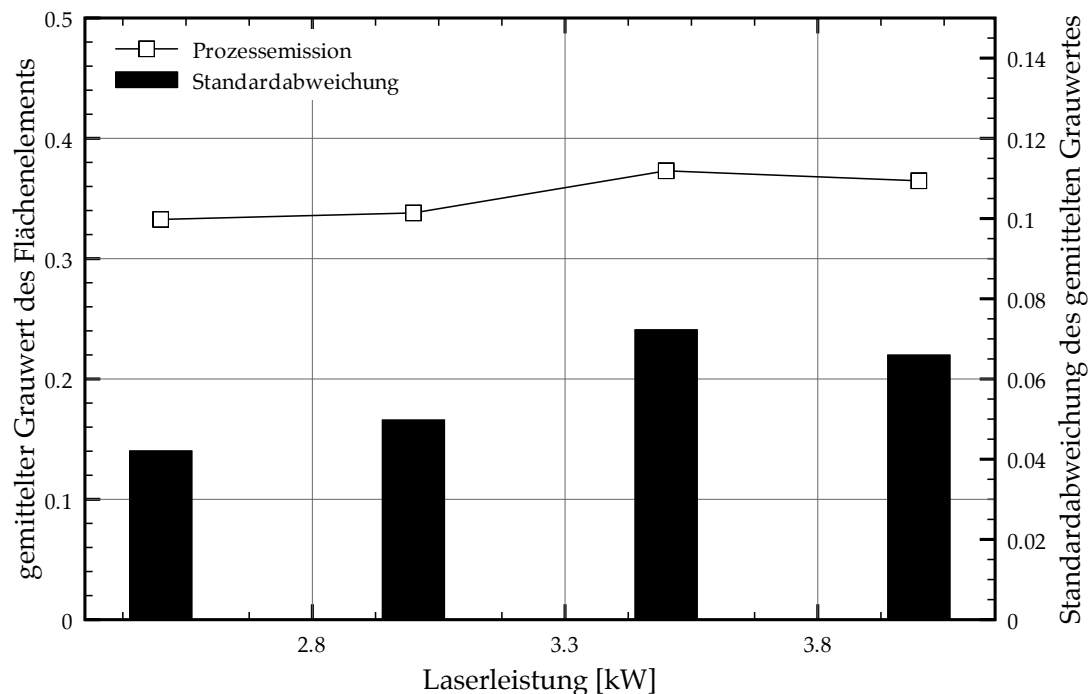


Abbildung 6.13: Mitteilung der Prozessemissionshelligkeit bei Variation der Laserleistung inkl. Standardabweichung auf der zweiten Y-Achse

Entgegen der ursprünglichen Erwartungen ändert die Laserleistung nur minimal die Intensität der Prozessemission und der Standardabweichung. Ebenso ändert sich die Länge der Prozessemission minimal.

Für diese Untersuchung wurde die Schneidgeschwindigkeit so gewählt, dass eine sichere Leistungsvariation mit einem ausreichenden Variationsbereich ermöglicht wird. Es ist davon auszugehen, dass die beschriebenen Hypothesen sichtbar werden, wenn der Prozess nahe an die Trenngrenze gesetzt wird. Durch den Abstand zur Trenngrenze ist der Leistungsüberschuss so deutlich, dass Änderungen an der Laserleistung nicht detektiert werden können. Die Untersuchung mit Schneidgeschwindigkeiten nahe der Trenngrenze durchzuführen, ist jedoch nicht sinnvoll, da auch Produktionsparameter einen ausreichenden Abstand zur Trenngrenze besitzen müssen. Nur dann ist eine ausreichende Prozesssicherheit gewährleistet. Abweichungen von der Laserleistung sind somit nicht sicher detektierbar.

6.4 Schneidgasdruck

Der Gasverbrauch einer Schneidanlage ist im täglichen Betrieb ein wichtiger Teil des Ressourceneinsatzes. Ein geringer Verbrauch und eine hohe Schnittkantenqualität sind wichtige Kriterien für ein gutes Produktionsergebnis. Dies zeigt, dass bereits unabhängig vom Qualitätseinfluss der Schneidgasdruck ein relevanter Prozessparameter in der industriellen Produktion ist. Durch die Änderung des Gasdrucks ist eine Verringerung der Schmelzfilmdicke (Schema 6.14) durch höhere antreibende Kräfte zu erwarten. Weiterhin kann durch stärkere

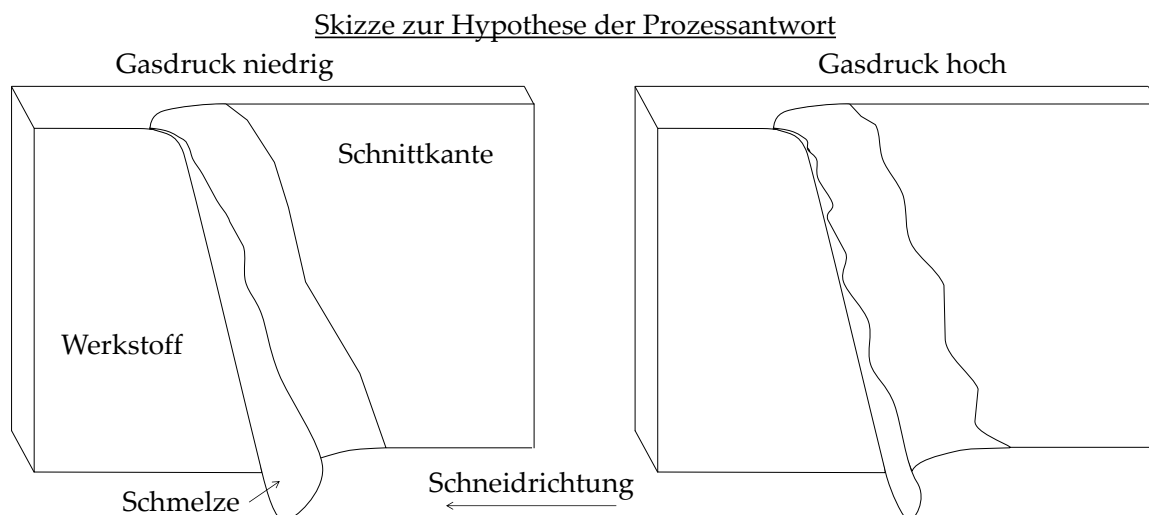


Abbildung 6.14: Schema zur Hypothese der Prozessantwort bei Variation des Gasdrucks

Turbulenzen im Gasstrom eine höhere Instabilität des Schmelzfilms erwartet werden.

Somit ist als Hypothese folgende Prozessantwort zu erwarten:

- *Intensität:* Steigende Prozessemission mit sinkendem Gasdruck durch schlechten Austrieb der Schmelze und stärkeres Heizen der Schmelze.
- *Stdabw. Emission:* Zunehmende Standardabweichung der Prozessemission mit steigendem Gasdruck durch stärkere Turbulenzen des Gasstroms.

Abbildung 6.15 bestätigt, dass keine Änderung der Fugenbreite, der Position der Schneidfront oder der Intensitätsverteilung der Prozessemission eintritt. Jedoch zeigt sich bereits ein qualitativer Anstieg der Prozessemission mit Reduzierung des Schneidgasdrucks.

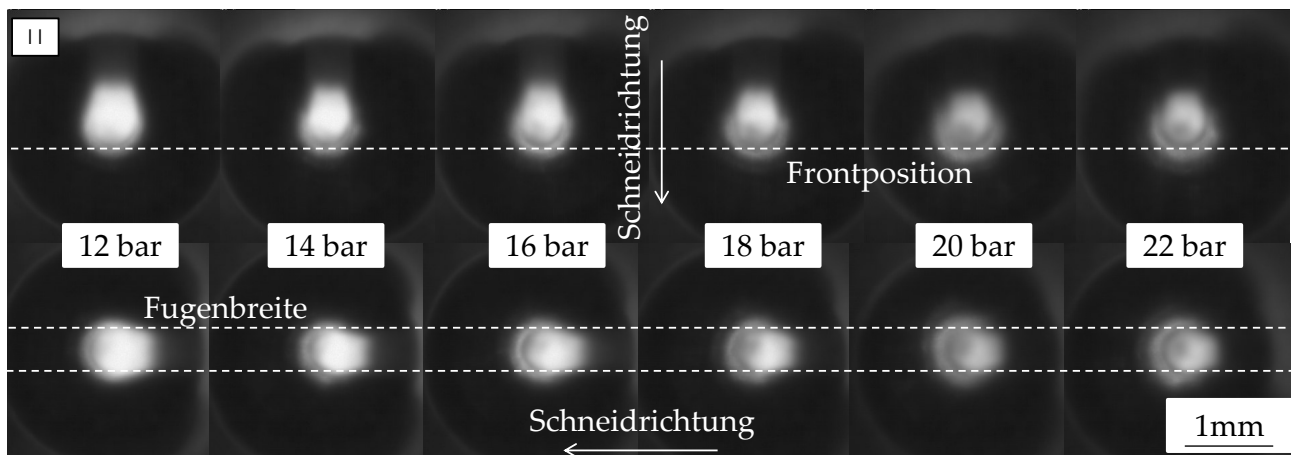


Abbildung 6.15: Gemittelte Einzelbilder der Prozessemission über 1000 Frames bei Variation des Gasdrucks, zwischen 12 und 22 bar

Die Berechnung der mittleren Grauwerte belegt diesen Eindruck (vgl. Abb. 6.16). Die Änderung des Gasdrucks hat somit ebenso wie die Schneidgeschwindigkeit eine deutliche Änderung der Intensität zur Folge.

Besonders interessant ist der fehlende Anstieg der Standardabweichung mit verringertem Gasdruck. Vor der Aufnahme der Daten war davon auszugehen, dass die Prozessemission mit vermindertem Gasdruck zunimmt. Ein geringerer Gasdruck führt zu geringeren antreibenden Kräften, die Schmelzfilmdicke steigt an und erzeugt eine höhere Schmelzfilmoberflächentemperatur. Somit müsste auch die Intensität der Standardabweichung ansteigen. Die Grafik zeigt

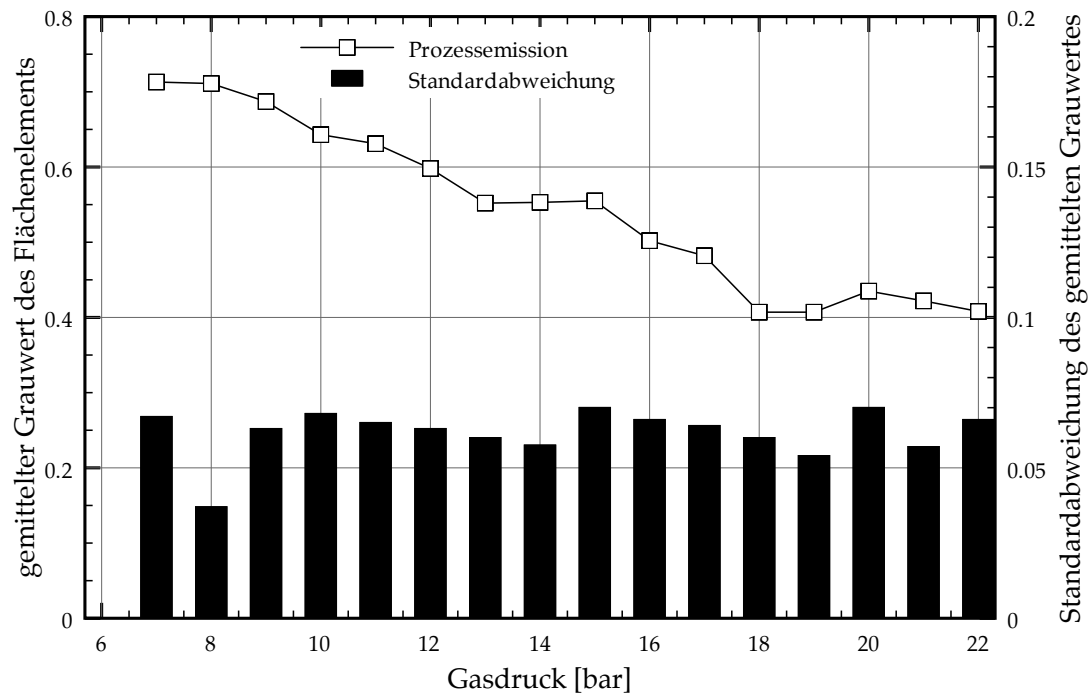


Abbildung 6.16: Mitteilung der Intensität der Prozessemission bei Variation des Gasdruckes inkl. Standardabweichung auf der zweiten Y-Achse

allerdings einen nahezu konstanten Verlauf der Standardabweichung. Die Zunahme der Rautiefe mit steigendem Gasdruck zeigt den Anstieg der Turbulenzen im Schmelzfilm. Niedrige Temperaturen aufgrund eines dünneren Schmelzfilms und steigende Turbulenzen kompensieren sich, sodass die Standardabweichung auf einem Niveau bleibt.

6.5 Düsenposition

Bei der Justierung der Düse können zwei Hauptrichtungen eingestellt werden. Eine senkrecht zur Schneidrichtung und eine parallel dazu. Aufgrund der meist zweidimensionalen Bearbeitung von Blechen in einer Schneidanlage ist die Düse zentriert zum Laserstrahl justiert (vgl. Abbildung 6.17). Wird dies nicht erreicht, sind richtungsabhängige Schnittqualitäten bis hin zum Prozessabbruch möglich. In Abbildung 6.17 ist eine dejustierte Düse zu erkennen (Skizze Mitte und rechts). Da sich die Düse bei einer Dejustage vom Zentrum der Kameraperspektive entfernt, wandert die Düseninnenfläche aus dem Beobachtungsgebiet der Kamera heraus.

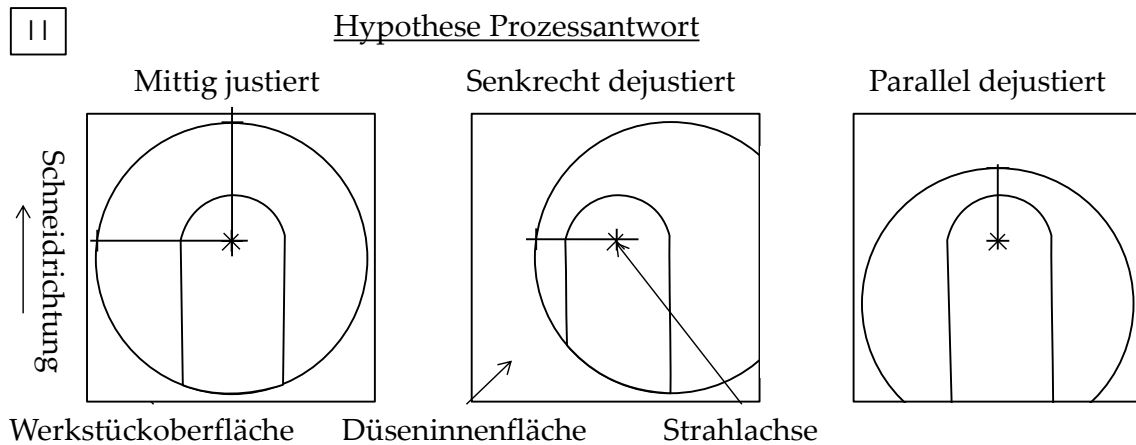


Abbildung 6.17: Schema zur Hypothese der Prozessantwort bei Variation der Düsenposition relativ zum Laserstrahl

Gleichzeitig verändert sich der Abstand der Laserstrahlachse zum Rand der Düse. Es sind daher folgende Prozessantworten zu erwarten:

- *Frontposition:* Verschiebung der Düse relativ zur Laserstrahlachse/Frontposition.

Die hier gezeigten Experimente analysieren lineare Schnitte, wobei die Düse entweder parallel oder senkrecht zur Schnittrichtung und relativ zur Laserstrahlachse dejustiert wird. Abbildung 6.18 zeigt die Methode zur Bestimmung der Laserstrahlposition relativ zur Düse. Abgebildet sind vier Einzelbilder der coaxialen Beobachtung nach einem Schuss von 5ms

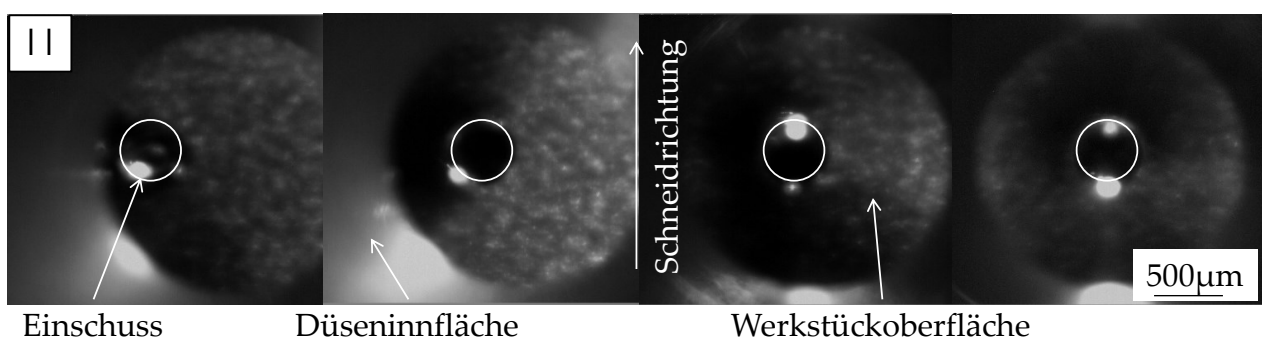


Abbildung 6.18: Einzelschüsse bei senkrecht zur Schnittrichtung dejustierter Düse

und 500W auf eine Blechoberfläche. Der Laserstrahl wurde senkrecht zur Schnittrichtung justiert bzw. dejustiert. Die Bilder ermöglichen die Messung des Abstandes zwischen Düsen-

zentrum und Einschusszentrum bzw. Laserstrahlachse. Die ausgewerteten Prozessemissionen für eine senkrecht und parallel zur Schnittrichtung dejustierte Düse zeigt Abbildung 6.19.

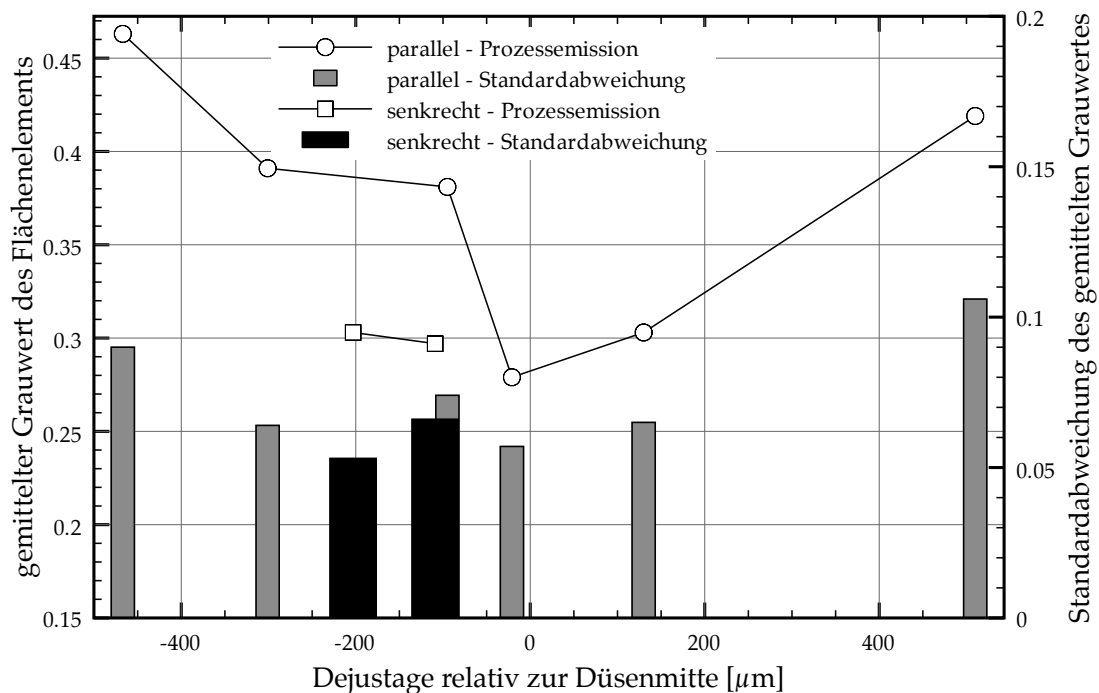


Abbildung 6.19: Mittlerer Grauwert der Intensität der Prozessemission bei Variation der Düsenposition senkrecht und parallel zur Schnittrichtung inkl. Standardabweichung auf der zweiten Y-Achse

Durch die Dejustage der Düse senkrecht zur Schnittrichtung steigt die Prozessemission an, während die Standardabweichung zunächst ansteigt und dann wiederum abfällt.

Parallel zur Schneidrichtung sind die Änderungen der Prozessemission deutlicher. Sowohl mit vor- als auch mit nachlaufendem Laserstrahl steigt die Prozessemission als auch die Standardabweichung relativ zur zentralen Justage der Düse.

Neben der Intensität ändert sich auch die Intensitätsverteilung der Emission. Abbildung 6.20 zeigt gemittelte Einzelbilder der Prozessemission für senkrecht und parallel zur Schneidrichtung dejustierte Düsen. Bei den senkrecht zur Schneidrichtung dejustierten Düsen bekommt die Schneidfront einen Schwerpunkt zu einer Seite, so dass die Front nicht mehr halbkreisförmig ist. Bei den parallel zur Schneidrichtung dejustierten Düsen ist insbesondere bei starker

Dejustage eine deutliche Vergrößerung der Prozessemission zu erkennen.

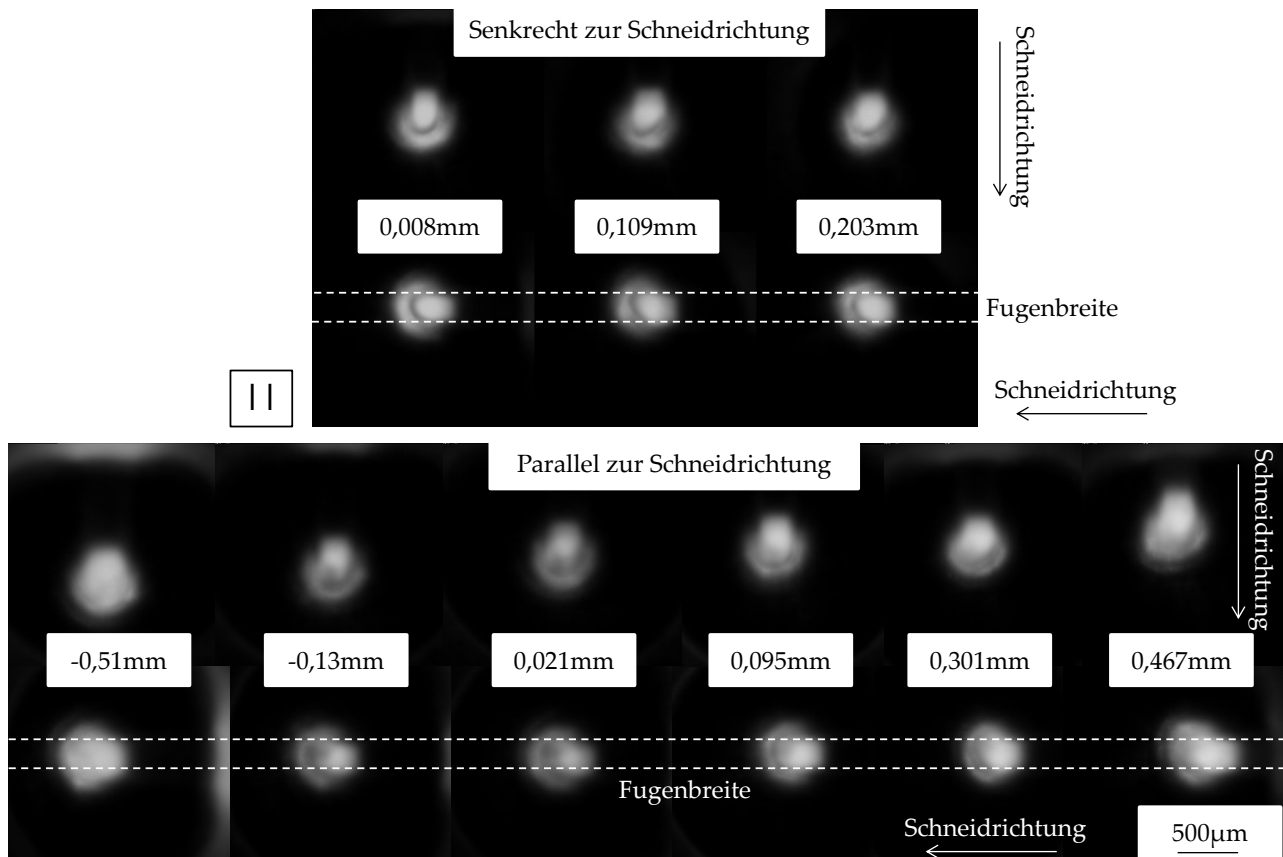


Abbildung 6.20: Gemittelte Einzelbilder der Prozessemission

Erwartet wurde eine Veränderung des Abstandes zwischen Schneidfrontposition und Düsenrand. Bei der Analyse der Prozessemission fällt auf, dass die Düsenjustage auch einen dominanten Einfluss auf die Intensität der Prozessemission und deren Standardabweichung besitzt. Die Intensitätsverteilung der Prozessemission ändert sich im Vergleich zur Fokuslagenvariation nur leicht. Die Abweichung der Schneidfrontposition relativ zum Düsenzentrum ist so deutlich zu detektieren, dass keine weitere Prozessantwort neben der Schneidfrontposition genutzt werden muss.

6.6 Zusammenfassung

Eine Übersicht der laut Hypothesen zu erwartenden Prozessantworten wurde in Tabelle 6.1 dargestellt. Die tatsächlich gemessenen Prozessantworten sind nun in Tabelle 6.2 abgebildet.

Mit einem (X) markiert sind experimentell messbare Prozessantworten des jeweiligen Prozessparameters. Einen Strich (-) haben die Zellen erhalten, die laut Hypothese eine messbare Prozessantwort hätten erzeugen sollen, jedoch in den Untersuchungen nicht detektiert werden konnten. Grau hinterlegt sind die Zellen deren Prozessantworten spezifisch für den jeweiligen Parameter sind.

Parameter \ Antwort	Intensität	Stdabw. Intensität	Fugenbreite	Pos. Schneidfront	Intensitätsverteilung
Fokuslage	X	X	X	X	X
Düsenjustage	X	X		X	X
Gasdruck	X	-		-	
Schneidgeschw.	X	X	-	-	X
Laserleistung	-	X	-	-	X

Tabelle 6.2: Experimentell bestimmte Übersicht zur Wirkbeziehung zwischen Prozessparametern und Prozessantworten

Für den Parameter Fokuslage hat sich die Fugenbreite als eindeutig herausgestellt. Für die Düsenjustage kann die Position der Front genutzt werden. Diese ist auch durch die Fokuslage beeinflusst, jedoch kann bei gleichzeitiger Überwachung der Fugenbreite bestimmt werden, ob die Änderung der Frontposition durch die Fokuslage oder durch die Düsendejustage verursacht wird.

Hingegen für Gasdruck, Vorschub und Laserleistung ergibt sich ein anderes Bild. Sowohl der Gasdruck als auch die Schneidgeschwindigkeit können durch die Intensität der Prozessemission detektiert werden. Gleichzeitig wird diese auch von der Fokusslage und der Düsenjustage beeinflusst. Bei Veränderung der Intensität müssen für eine Prozessregelung daher zunächst die Fokusslage und die Düsenjustage kontrolliert werden. Sind diese unverändert, kann überprüft werden, ob eine Änderung der Ausdehnung der Prozessemission eingetreten ist. Bei einer Änderung dieser Größe ist die Schneidgeschwindigkeit Ursache, andernfalls kann auf den Gasdruck zurückgeschlossen werden. Die Prozessantwort der Laserleistung ist insgesamt sehr gering. Es tritt eine leichte Änderung der Intensität, der Standardabweichung und der Intensitätsverteilung ein. Kritisch betrachtet ist eine Leistungsvariation aufgrund der geringen Prozessantwort im Schneidbetrieb nur schwer bis gar nicht messbar.

7 Prozessführung und -regelung

7.1 Prioritäre Prozessparameter

Beim Aufbau einer Prozessregelung stehen eine Vielzahl von Prozessparametern zur Verfügung. Dies bedeutet eine hohe Komplexität, die durch eine Reduzierung auf die wesentlichen Parameter deutlich vereinfacht werden kann. Daher werden im folgenden Abschnitt die im Kapitel 6 beschriebenen Verfahrensparameter hinsichtlich der folgenden vier Kriterien bewertet:

- *Einfluss Qualität:* Einfluss der Stellgröße auf die Schnittkantenqualität, hierbei wird insbesondere die Rautiefe R_{Z5} betrachtet.
- *Detektierbar:* Dieses Kriterium bezieht sich auf Kapitel 6 und beantwortet die Frage: Wie gut ist die Prozessantwort des Parameters detektierbar?
- *Einstellbar:* Bewertet die Verfügbarkeit einer technischen Einrichtung (dem Stellglied), die eine Regelung ermöglicht (bspw. ein Antrieb für eine Z-Achse).
- *Instationär:* Dabei wird untersucht, ob durch äußere Einflussgrößen eine zeitliche Änderung des voreingestellten Stellparameters eintreten kann.

Bewertung der Fokuslage

Der direkte Einfluss der Fokuslage auf die Schnittkantenqualität eines Laserschnittes wurde bereits mehrfach für Aluminium [45][46], Stahl [47][48] und Edelstahl [45] beschrieben. Beispielfhaft zeigt Abbildung 7.1 die Rautiefe R_{Z5} der Schnittkante in Abhängigkeit der Fokuslage bei einem 4mm dicken Edelstahlblech.

Die niedrigsten Rautiefen in der Messtiefe 4,5mm entstehen bei einer Fokuslage von -4mm, die höchsten bei einer Fokuslage von +7mm.

Für die Bewertung des Einflusses eines Stellparameters auf die Schnittqualität wird der prozentuale Unterschied zwischen maximaler und minimaler Rautiefe bei einer Messtiefe von 4,5mm wie folgt bestimmt.

$$\Delta Q = \frac{R_{z5max}}{R_{z5min}} - 1 \quad (7.1)$$

Da die Versuche bis zur Prozessgrenze durchgeführt werden, kann mit dieser Größe das ma-

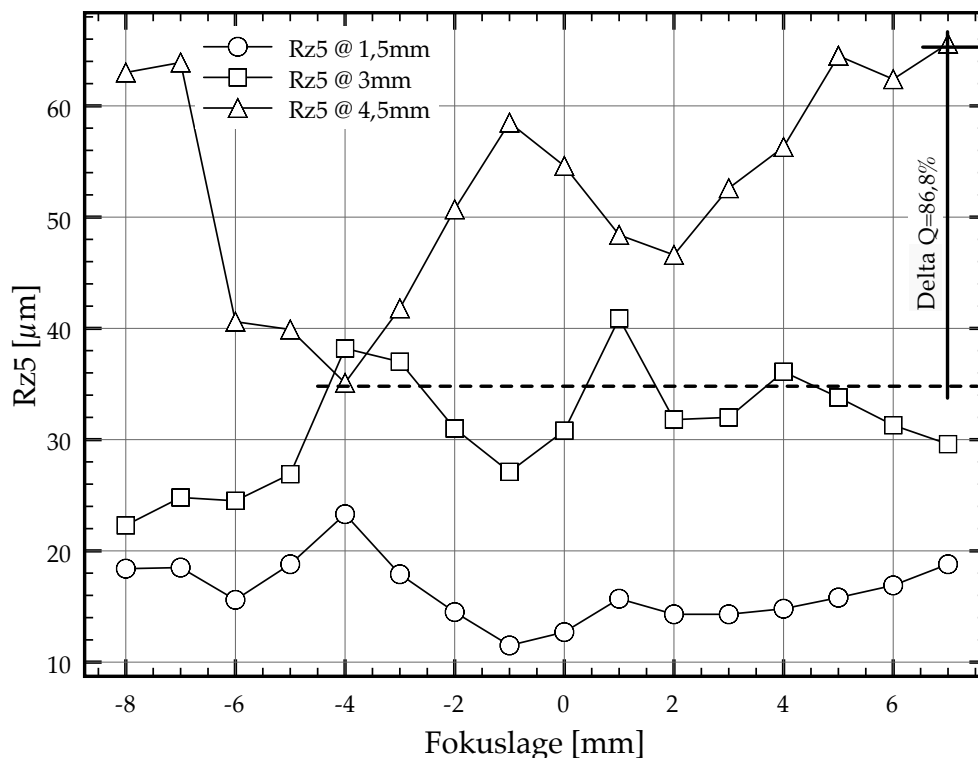


Abbildung 7.1: Schnittkantenqualität R_{z5} in Abhängigkeit der Fokusslage für 4mm dicken Edelstahl, geschnitten mit einem CO_2 -Laser

ximale Qualitätsspektrum für den jeweiligen Stellparameter ausgewertet werden.

Für die Bewertung der Fokusslage beträgt der Wert $\Delta Q = 86,6\%$.

Für das Kriterium Detektierbar konnte in Kapitel 6 gezeigt werden, dass bereits die Bestimmung der Fugenbreite genügt, um bei bekannter Seite (pos./neg.) die absolute Fokusslage zu bestimmen. Erweitert man dies um den thermischen Signalanteil, kann durch die Größe der Prozessemission und deren Abstand zum obersten Schneidfrontscheitelpunkt die absolute Fokusslage bestimmt werden.

Für die Regelung unabdingbar ist die automatisierte Änderung der Fokusslage während des Prozesses. Hierfür können dynamische Antriebe als Z-Achse eingesetzt werden [49] oder ein adaptiver Spiegel [50], der den Divergenzwinkel des Laserstrahls vor der Linse beeinflusst, genutzt werden. Somit ist auch die Einstellbarkeit gegeben.

Die letzte Bedingung stellt die Instabilität der Fokusslage dar. Trotz effizienter Beschichtung von transmissiven optischen Komponenten ist eine statische Fokusslage insbesondere bei Laserleistungen von mehreren Kilowatt nicht zu gewährleisten [51][52][53]. In der Literatur finden sich bereits Fokussshiftmessungen, die eine Fokusslagenänderung von einer und mehr Rayleighlängen¹, innerhalb mehrerer Sekunden bis Minuten absolvieren [55]. Durch Verschmutzungen oder nicht optimale Beschichtungen können diese Werte weiter steigen. Abbildung 7.2 zeigt beispielhaft den gemessenen Fokussshift einer transmissiven Schneidoptik

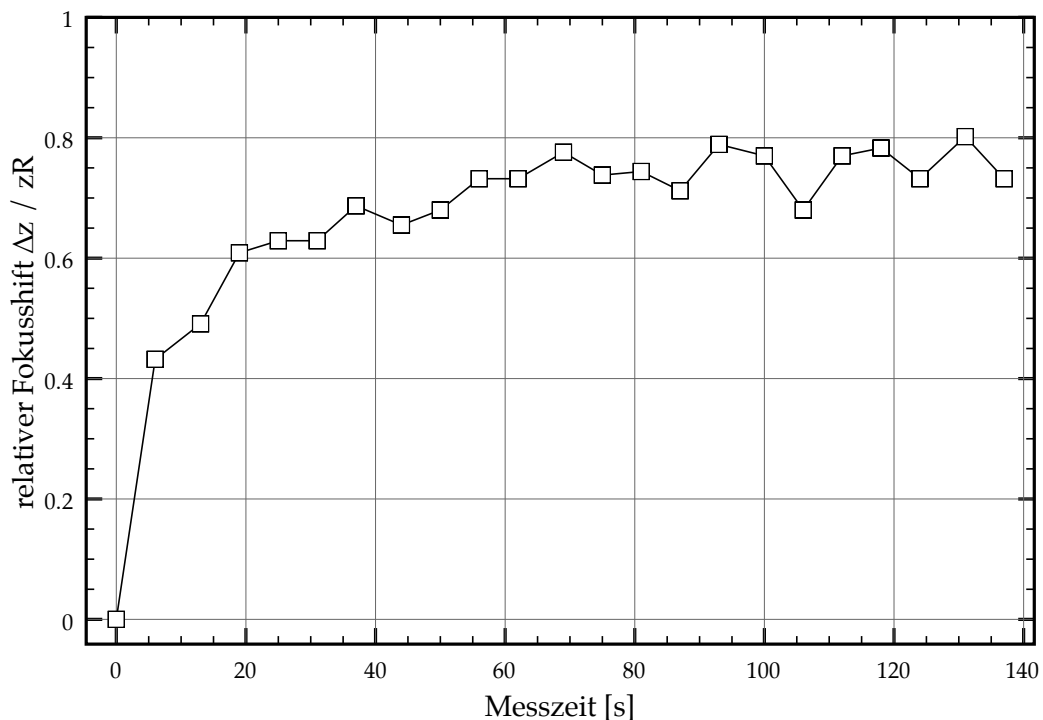


Abbildung 7.2: Relativer Fokussshift einer transmissiven Schneidoptik eines 6kW CO₂-Lasers

eines 6kW CO₂-Lasers. Ein thermisches Gleichgewicht stellt sich bei dieser Messung erst nach ca. 60s ein.

Zusammengefasst hat die Fokusslage einen deutlichen Einfluss auf die Qualität und besitzt ein

¹ Abstand von der Strahltaile, bei dem sich die Strahlquerschnittsfläche verdoppelt hat [54]

instationäres thermisches Verhalten. Die Detektierbarkeit ist ebenso gegeben wie die Einstellbarkeit.

Bewertung des Gasdruckes

Bereits in Kapitel 5.2 konnte gezeigt werden, dass der Schneidgasdruck einen signifikanten Einfluss auf die Riefen der Schnittkante besitzt. Eine Variation des Gasdruckes zeigt Abbildung 7.3 bei einem 10mm Edelstahlblech in drei verschiedenen Messtiefen. Aufgrund der hohen Messdauer wurde je Messstelle nur eine Messung durchgeführt. Durch die Vielzahl der Messungen ist jedoch auch ohne statistische Auswertung die Tendenz der Ergebnisse ablesbar. Der Einsatz von niedrigen Gasdrücken führt im oberen Bereich der Schnittkante zu

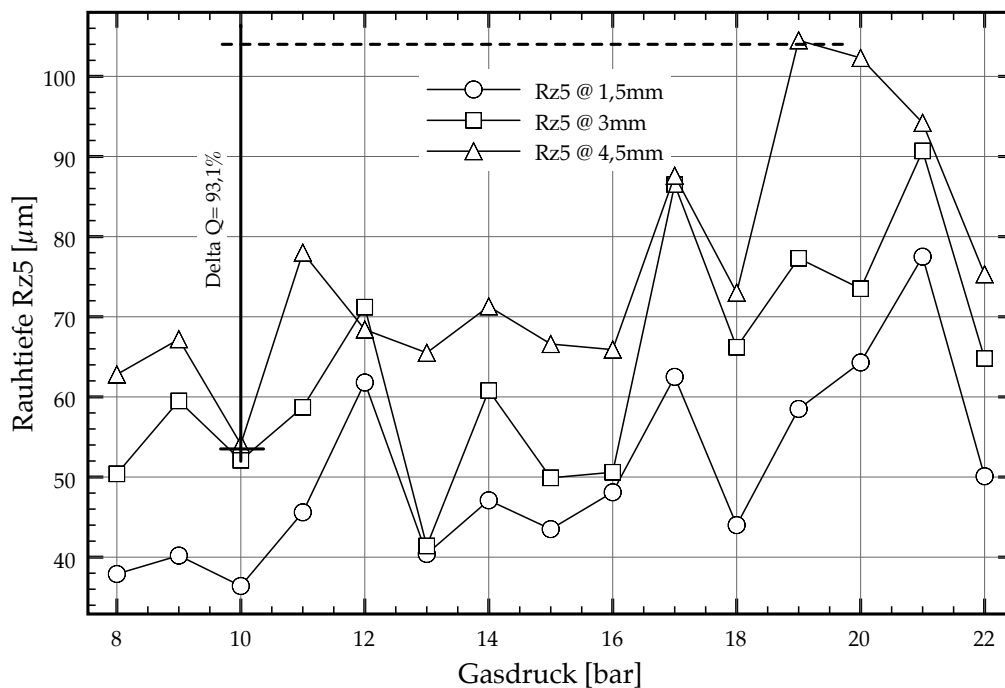


Abbildung 7.3: Rauhtiefe in Abhängigkeit des Gasdruckes

einer reduzierten Rautiefe. Bei zu geringem Gasdruck kann allerdings die Schmelze nicht vollständig ausgetrieben werden, und es entsteht im unteren Blechdickenbereich eine erhöhte Rautiefe und eine einsetzende Bartbildung (vergleiche auch Abbildung 5.21). Insgesamt findet eine Änderung der Qualität von $\Delta Q = 93,1\%$ statt.

Bereits im vorigen Kapitel konnte gezeigt werden, dass der Gasdruck im Wesentlichen ei-

ne Änderung der Intensität der Prozessemission erzeugt und gleichzeitig die Standardabweichung konstant bleibt. Die Intensität der Prozessemission wird auch von der Düsenjustage und der Fokuslage beeinflusst. Für eine Detektion einer Gasdruckänderung müssen daher gleichzeitig alle drei Parameter analysiert werden. Der Gasdruck ist somit erst dann ursächlich für die Änderung der Intensität, wenn die beiden anderen Parameter keine Änderung zeigen.

Zur Regelung des Gasdrucks in Schneidköpfen werden bereits heute schnelle Hochdruckventile eingesetzt [56]. Die Änderung der Stellgröße kann mit Hilfe eines analogen Signals oder bspw. mit Hilfe eines Profibusnetzwerkes umgesetzt werden, sodass die Einstellbarkeit dieser Größe sehr gut gewährleistet ist.

Durch einen internen Regelkreis kann eine Linearität von $<1\%$ gewährleistet werden. Das Kriterium „Instationär“ ist für diesen Parameter sehr gut kontrolliert [56].

Bewertung der Düsenjustage

Zur manuellen Justage der Düse wird ein Klebestreifen auf der Unterkante der Düse angebracht. Diese Fläche wird mit einem Laserpuls von 5ms Dauer und 500W Laserleistung beaufschlagt. Das entstehende Loch und der Abdruck der Düsenumrandung ermöglicht mit Hilfe eines Verschiebemechanismus im Schneidkopf die Justage der Düse relativ zum Laserstrahlzentrum. Aufgrund der kleinen Maßstäbe der Düsen spitze und des erzeugten Einschusses ist eine manuelle Justage mit einer Genauigkeit von ca. 0,1 bis 0,2mm möglich. Eine höhere Genauigkeit bei der Justage der Düsenposition bietet die koaxiale Kamera-Beobachtung eines Einschusses. Auch hierbei wird ein einzelner Schuss genutzt, der auf eine unter dem Schneidkopf positionierte Blechoberfläche gerichtet wird. Der zurückbleibende Krater dient zur Justage der Düse. Durch die Vergrößerungsmöglichkeit der Kameraaufnahme gelingt eine präzisere Justage der Düse.

Abbildung 7.4 zeigt den Qualitätseinfluss der Düsejustage bei einer senkrecht und parallel zur Schnittrichtung dejustierten Düse. Bei der Untersuchung der senkrecht dejustierten Düsen ergibt sich bei zentraler Justage die niedrigste Rautiefe. In der Messtiefe von 4,5mm konnte keine Messung bei einer senkrechten Dejustage bei $-203\mu\text{m}$ erstellt werden. Die Rautiefe bei dieser Position ist außerhalb des Messbereiches des Messgeräts angesiedelt. Da der Messbereich bei $100\mu\text{m}$ überschritten wird, wird für diese Rechnung ein R_{z5max} von $100\mu\text{m}$ angesetzt. Somit ist eine Qualitätsbeeinflussung von $\Delta Q > 47,47\%$ erzielt worden.

Bei der parallel zur Schneidrichtung dejustierten Düse kann ein leicht vorlaufender Laserstrahl die Schnittqualität optimieren. Durch den vorlaufenden Laserstrahl kann ein höherer

Anteil der Gasströmung in die Schnittfuge eindringen und einen besseren Schmelzaustrieb erzeugen. Der Schmelzfilm auf der Front wird dünner und die Riefenamplitude nimmt ab. Bei einer fest justierten Düsenposition kann bei zweidimensionaler Bearbeitung die Düsenposition hinsichtlich der Rauhtiefe nicht optimal positioniert werden. Die optimale Schnittqualität ist hierbei ein Kompromiss der durch eine zentrale Justage realisiert wird. Durch eine geregelte Düsenposition ist es jedoch möglich die Düseposition in Abhängigkeit der Schneidrichtung anzupassen und einen kontinuierlich vorlaufenden Laserstrahl zu erzielen.

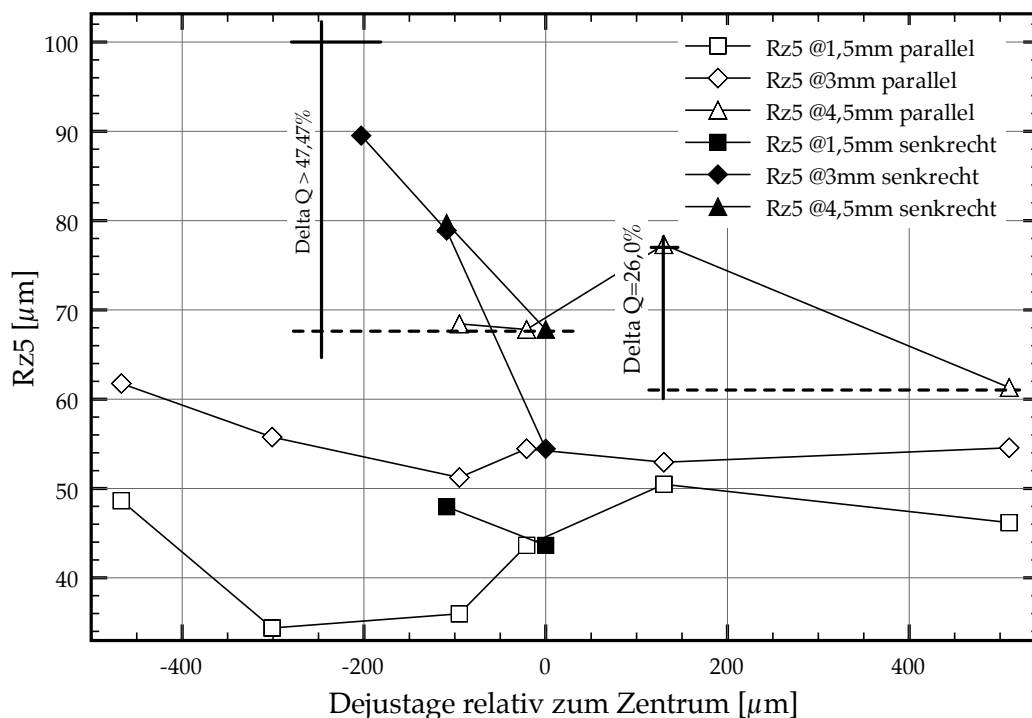


Abbildung 7.4: Rauigkeit einer parallel und senkrecht zur Schnitttrichtung dejustierten Düse

In Kapitel 6 konnte bereits gezeigt werden, dass Änderungen der Frontposition als Kriterium zur Bestimmung der Düsenposition relativ zum Laserstrahlzentrum genutzt werden können. Durch die zweidimensionale Bearbeitung von Blechen eröffnet sich ein weiterer Vorteil zur exakten Einstellung der Düsenposition während des Prozesses. Die beiden ersten Bilder in Abbildung 7.5 zeigen koaxiale Prozessaufnahmen mit einer senkrecht zueinander gelegenen Schneidrichtung. Durch die Bestimmung der Fugenbreite für beide Aufnahmen und die Überlagerung der Markierungslinien entsteht ein Quadrat, in dessen Mitte sich das Zentrum des Laserstrahls befindet. Das rechte Bild zeigt zum Vergleich den Schuss auf eine Blecho-

berfläche, der mit identischer Perspektive durchgeführt wurde. Die bestimmten Mittelpunkte liegen auf der identischen Position.

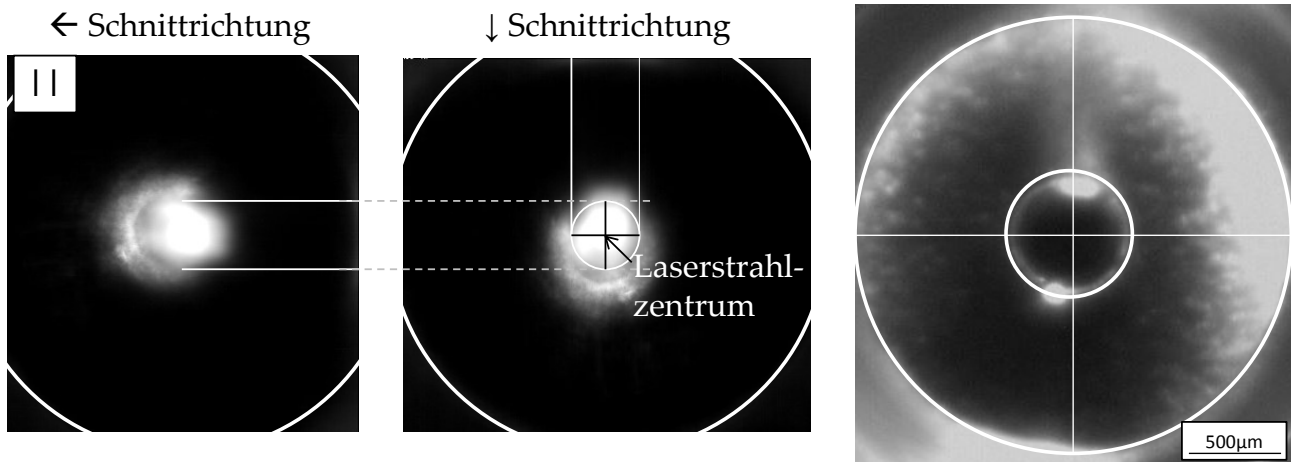


Abbildung 7.5: Messmethode zur Bestimmung der Laserstrahlposition relativ zur Düsenmitte im Prozess, Links und Mitte: koaxiale Prozessaufnahme mit eingezeichneten Fugenbreiten, Rechts: Einschuss auf Blechoberfläche

Der Verschiebemeschanismus zur Justage der Laserstrahlposition relativ zur Schneiddüse wird manuell durch eine Schraubpositionierung der Linse realisiert. Statt einer manuellen Justage kann ebenso ein Antrieb verwendet werden der eine Düsenjustage automatisiert ermöglicht. Die Einstellbarkeit der Düsenjustage während des Schneidbetriebs ist somit gewährleistet.

Eine Instabilität der Düsenposition ist nicht zu erwarten, Abweichungen können lediglich durch Kollisionen entstehen, die durch die koaxiale Beobachtung detektiert werden und durch den Regelmechanismus beseitigt werden.

Bewertung der Schneidgeschwindigkeit

Für die Untersuchung des Einflusses der Geschwindigkeit auf die Qualität wurde ein 5mm dickes Edelstahlblech geschnitten. Abbildung 7.6 zeigt einen Abfall der Rautiefe mit zunehmender Schneidgeschwindigkeit. Insgesamt kann eine Qualitätsänderung von $\Delta Q = 46,8\%$ gemessen werden.

Wie bereits in Kapitel 6.2 beschrieben, ist die Bestimmung der Geschwindigkeit mit Hilfe der

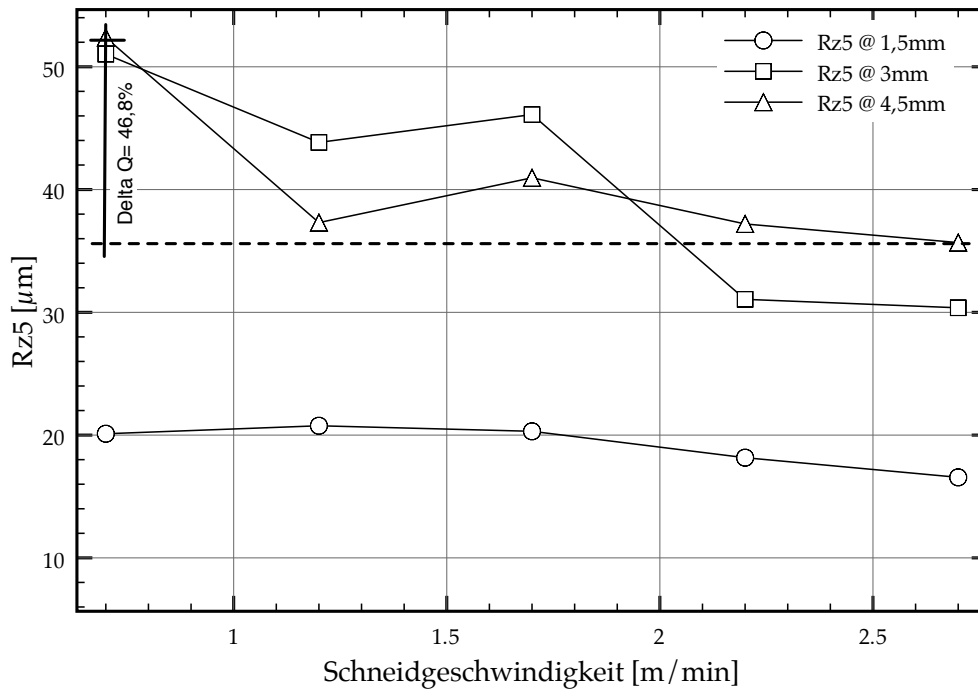


Abbildung 7.6: Rauigkeit in Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit

Intensität der Prozessemission und als Unterscheidung zum Gasdruck auch durch die Verlängerung der Intensitätsverteilung zu detektieren. Bezüglich der Einstellbarkeit und der Instabilität des Vorschubs eines Achsenantriebes sind insbesondere hohe Beschleunigungswerte als auch konstante Istgeschwindigkeiten zu betrachten. Heutige hochdynamischen Achsenantriebe sind in der Lage, hohe Beschleunigungswerte von 4g und Geschwindigkeiten von bis 300m/min zu realisieren und dabei auch einen Gleichlauf von $<\pm 2\%$ gemessen bei 2m/min einzuhalten [57]. Das System ist damit auch über einen langen Zeitraum in einem stabilen Zustand.

Bewertung der Laserleistung

Die Laserleistung hat nur einen geringen Einfluss auf die Qualität einer Schnittkante. Abbildung 7.7 zeigt die Rautiefe in Abhängigkeit der Laserleistung. Bei steigender Laserleistung steigt die Rauheit minimal an, wobei die Qualitätsänderung bei maximal $\Delta Q = 8,9\%$ liegt.

Die Laserleistung hat somit nur einen geringen Einfluss auf die Qualität einer Schnittkante, selbst nahe der Trenngrenze tritt nur eine geringe Verschlechterung der Rautiefe auf.

Gleiches gilt für die Detektierbarkeit der Leistungsänderung. Die Auswirkungen der Leistungsänderung sind so gering, dass sie zwar messbar, aber aufgrund der Überlagerung mit

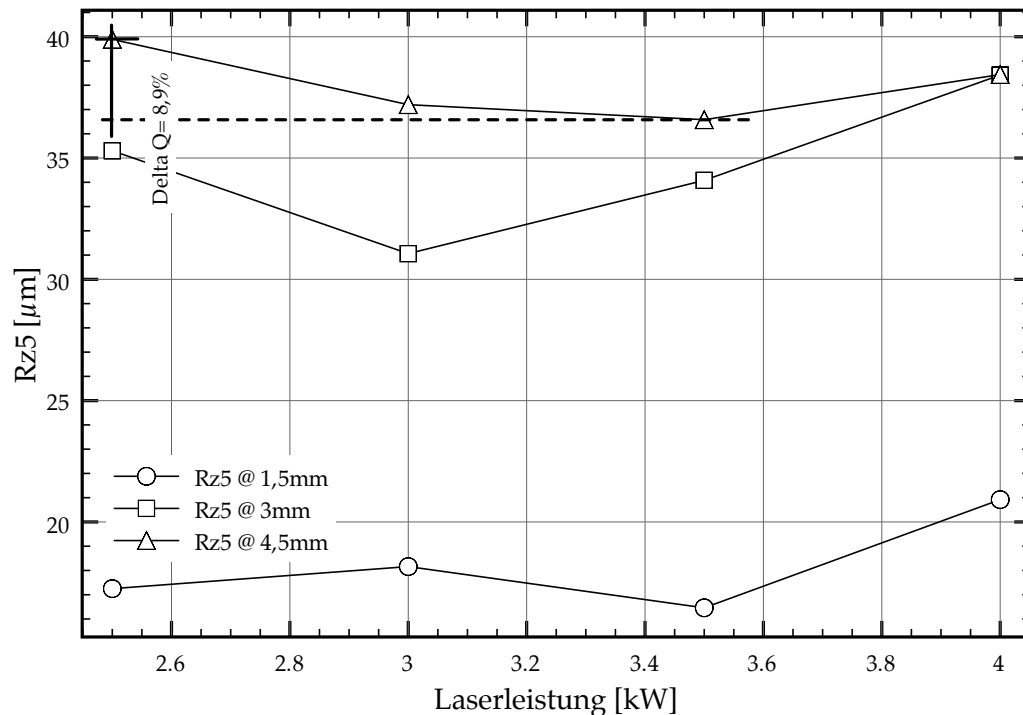


Abbildung 7.7: Rauigkeit in Abhängigkeit der Laserleistung

anderen Prozessparametern im industriellen Umfeld nicht auflösbar sein werden. Die Instabilität der Laserleistung ist eine bereits vom Hersteller gut spezifizierte Größe. Typische Werte liegen hier bei $\pm 2\%$ [58] für einen CO₂- oder Faserlaser [59] und sind somit als stabil zu bewerten.

Zusammenfassung

Tabelle 7.1 zeigt die Bewertung der Prozessparameter bezüglich der beschriebenen Kriterien. Hierzu gehört zunächst das Kriterium Qualität, welches in diesem Fall mit dem Wert der maximalen Differenz zwischen niedrigster und höchster Rautiefe ΔQ beschrieben wird. Weiterhin gehören die „Detektierbarkeit“ und „Einstellbarkeit“ zu den Kriterien, die unter der Überschrift „Umsetzbarkeit“ zusammengefasst werden. Diese beiden Kriterien beschreiben die Komplexität zur Umsetzung einer Regelung des jeweiligen Stellparameters nach aktuellem Stand der Technik. Als letztes Kriterium wird die „Instationarität“ bewertet, die während des Schneidbetriebs zu einer Abweichung vom Sollwert führen kann.

Neben der Auswahl der Kriterien zur Bewertung der Verfahrensparameter erfolgt weiterhin eine Gewichtung der Kriterien. Der maximale Wert erhält dabei das Kriterium „Einfluss Qua-

lität“ mit dem Faktor fünf. Er erhält somit die dominante und überstimmende Gewichtung aller Kriterien. Für die „Umsetzbarkeit“ einer Prozessregelung sind sowohl „Detektierbarkeit“ als auch die „Einstellbarkeit“ gleich wichtig und erhalten daher einen Gewichtungsfaktor von 2. Letzter Wert in dieser Folge ist der Faktor „Instationär“ der zwar durch eine hohe Dynamik eine Regelung erschwert, allerdings hierdurch erst handhabbar bzw. kontrollierbar wird. Dieser Faktor erhält daher nur einen Gewichtungsfaktor von 1. Diese Gewichtung wird mit den jeweiligen Ergebnissen der einzelnen Einstellparameter multipliziert.

Die Bewertungszahl jedes Einstellparameters ergibt sich aus dem folgenden Schema:

- ++ (2 Pkt.): besonders sensitiv/unproblematisch, $\Delta Q > 75\%$
- + (1 Pkt.): vorhanden/zutreffend, $\Delta Q \geq 25\%$ und $\leq 75\%$
- o (0 Pkt.): nicht gegeben, $\Delta Q < 25\%$

Die maximal erzielbare Punktezahl der Priorität liegt bei 20 Punkten und spiegelt damit den relevantesten Parameter für eine Prozessregelung wider. Formell setzt sich Tabelle 7.1 wie folgt zusammen:

$$\text{Priorität} = \sum \text{Bewertungszahl} * \text{Gewichtungsfaktor} \quad (7.2)$$

		Priorität	Einfluss Qualität ΔQ	Umsetzbarkeit		Instationär
Gewichtungsfaktor			5	2	2	1
Einstellparameter	Fokuslage	20	++	++	++	++
	Gasdruck	18	++	++	++	o
	Düsenjustage	13	+	++	++	o
	Schneidgeschw.	13	+	++	++	o
	Laserleistung	4	o	o	++	o

Tabelle 7.1: Priorisierte Stellparameter

Durch diese konzentrierte Darstellung erweist sich die Fokuslage als der prioritäre Stellparameter für die Prozessregelung des Laserschneidens. Aufgrund der Instationärität im Prozess ist sie dem Gasdruck voraus. Die Laserleistung tritt den Schlussplatz an, da der Qualitätseinfluss, die Detektion und die Instationärität minimal bis nicht vorhanden ist.

7.2 Prozessregelung am Beispiel der Fokusslage

Da sich die Fokusslage als relevantester Parameter für eine Prozessregelung herausgestellt hat, wird im Folgenden der iterative Aufbau einer Prozessregelung der Fokusslage beschrieben. Grundlage für diesen Regelungsaufbau stellt die direkte Korrelation zwischen Fokusslage und Fugenbreite dar. Diese wird als Regelgröße genutzt. Abbildung 7.8 zeigt das hier zu Grunde liegende Konzept, welches wie folgt in vier Schritte unterteilt ist:

- Referenzierung: Evaluation der Startbedingungen
- Kompensation: Ausgleich des thermisch induzierten Fokussshift
- Regelung: Regelung von positiver und negativer Fokusslagenseite
- Prüfung: Überwachung der aktuell vorliegenden Fokusslagenseite

Schritt Eins ist die Referenzierung des Systems. Es ermöglicht die Zuordnung der Aktoren-Stellgröße zur absoluten Fokusslage. Diese Referenzierung wird im weiteren Verlauf unter dem Begriff Einrichtungssistent geführt.

Im zweiten Schritt wird die zeitliche Veränderung der Fokusslage kompensiert. Hierzu wird der absolute Hub der Fokusslage in Abhängigkeit der Laserleistung und des Rohstrahls bestimmt. Weiterhin wird der zeitliche Verlauf des Fokussshift detektiert. Diese beiden Informationen werden für den Aufbau einer Steuerung zur Fokussshiftkompensation genutzt.

Befindet sich die Fokusslage in einem thermischen Gleichgewicht, ist eine besonders hohe zeitliche Auflösung des Prozesses nicht mehr notwendig. Ein Regler mit einer ausreichend schnellen Bildverarbeitung kann die Fokusslage konstant halten. Hierzu ist es notwendig, zwei Regler, für positive und negative Fokusslage, sowie ein Hystereband für Fokusslage Null zu implementieren. Abweichungen von einer gewünschten Fokusslage Null bedeuten unabhängig von der Richtung eine Zunahme der Fugenbreite. Dies bedeutet, dass bei jeder geringsten Abweichung geprüft werden muss, in welche Richtung (pos./neg.) sich das System gerade bewegt. Da diese Abfrage im Vergleich von Kosten und Nutzen einen zu hohen Aufwand darstellt, wird das Hystereband eingesetzt, das leichte Schwankungen um die Fokusslage Null zulässt.

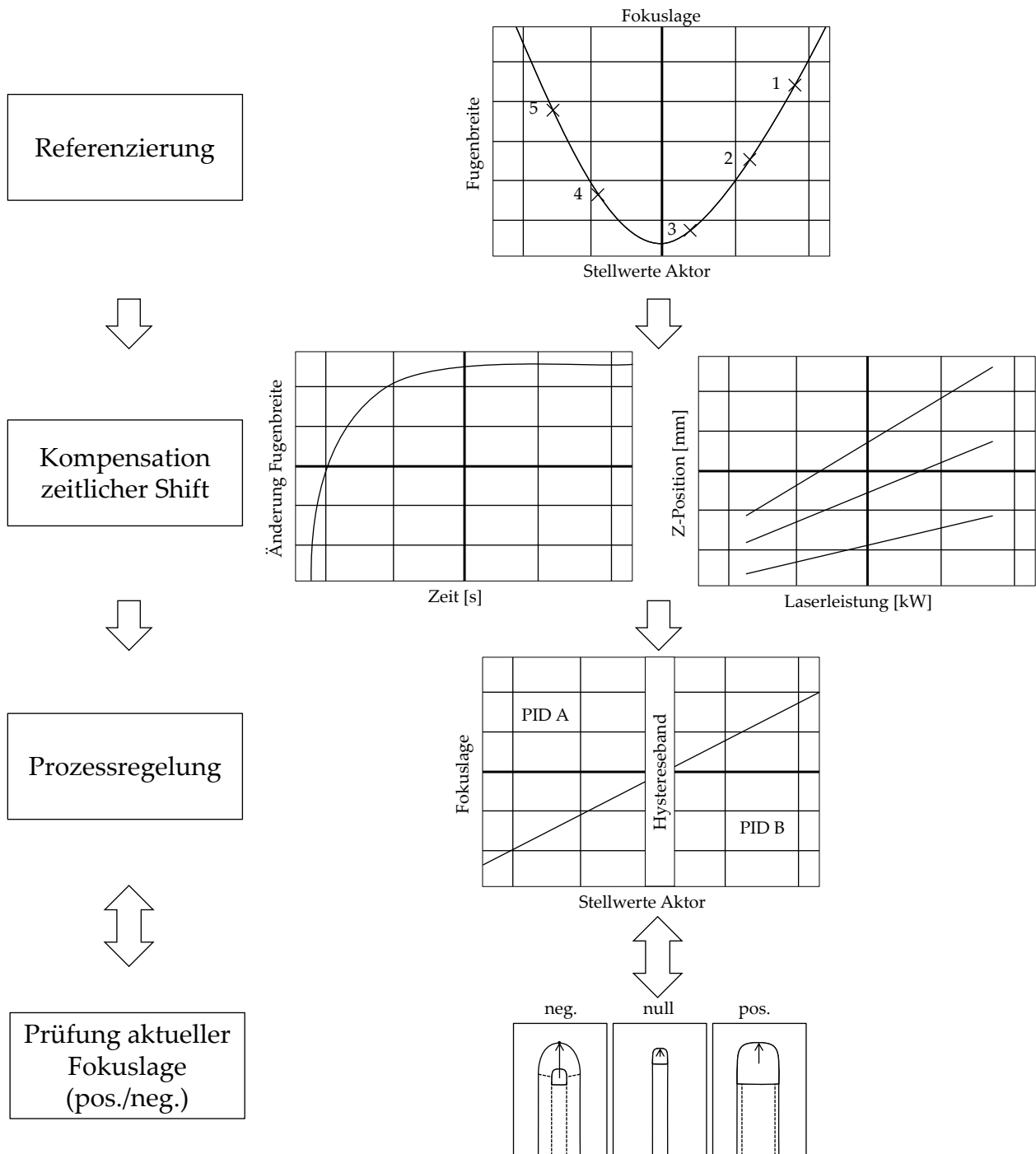


Abbildung 7.8: Konzept zur Regelung der Fokuslage

Im letzten und damit vierten Schritt wird das Verlassen des Hysteresebandes behandelt. Wird das Hystereseband durch Störungen verlassen oder herrscht ein unbekannter Prozesszustand

vor, muss die Fokusslage mit Hilfe der thermischen Prozess-emission untersucht werden. Anhand der Fugenbreite, des Abstandes der thermischen Prozessemission zur Schneidfrontoberkante und der Größe der Prozess-emission kann die aktuell vorliegende Fokusslage bestimmt werden (vergleiche Abbildung 6.4). Durch Auswahl des richtigen Reglers ist es dann möglich, die Fokusslage in die gewünschte Position zurückzuführen.

7.2.1 Einrichtassistent

Die Sollgröße einer Prozessregelung wird mit Hilfe eines Aktors meist über eine Hilfsgröße (z.B. Z-Position einer Achse oder Spiegeldruck eines adaptiven Spiegels) eingestellt. Für eine eindeutige Zuordnung der Stellgröße zur absoluten Position der Fokusslage muss eine Referenzierung vorgenommen werden. Eine gut zu realisierende Methode stellen parallel zueinander ausgeführte Einschnitte in ein dünnes Blech dar. Jeder Einschnitt wird um einige Millimeter zum vorherigen Einschnitt versetzt und die Fokusslage jeweils erhöht (in Anlehnung an DE 102 55 628 A1). Als Resultat entsteht eine hyperbolischer Verlauf der Fugenbreite. Zunächst wird bei einer negativen Fokusslagenseite begonnen, die Null überschritten und auf der positiven Seite die Fokusslagenvariation beendet. An der Stelle der schmalsten Fugenbreite befindet sich folglich die Fokusslage Null. Für eine automatisierte Vermessung dieses Referenzverlaufes werden vier Komponenten benötigt. Dazu zählt ein koaxiales Kamerasystem, eine Bildverarbeitung, die die Fugenbreite vermisst, ein Aktor, der die Fokusslage beeinflusst und ein Steuerungssystem, dass den Aktor antreibt. Abbildung 7.9 zeigt das Konzept schematisch inkl. der Datenübertragungstechniken.

Die Aufnahme des Prozesses erfolgt mit einer koaxial integrierten Kamera. Eine anschließende Bildverarbeitung ermöglicht durch einen Kantendetektionsfilter die Ermittlung der Fugenbreite. Diese Auswertung entsteht in einem eigenen Rechensystem und überträgt die Daten mit Hilfe einer TCP/IP Schnittstelle zu einem LabVIEW Rechensystem. Dieser Rechner ist mit einer Profibusschnittstelle ausgestattet und dient zur Einstellung eines adaptiven Fokussierspiegels. Dessen Krümmung wird mit Hilfe eines internen Wasserdrucks gesteuert. Durch die Änderung des auf die Fokussierlinse fallenden Divergenzwinkels des Laserstrahls wird die Fokusslage relativ zur Werkstückoberfläche geändert. Diese Schnittstellenreihenfolge ermöglicht nicht nur die Referenzierung des Komponenten, sondern ist Basis für den weiteren Aufbau der Prozessregelung.

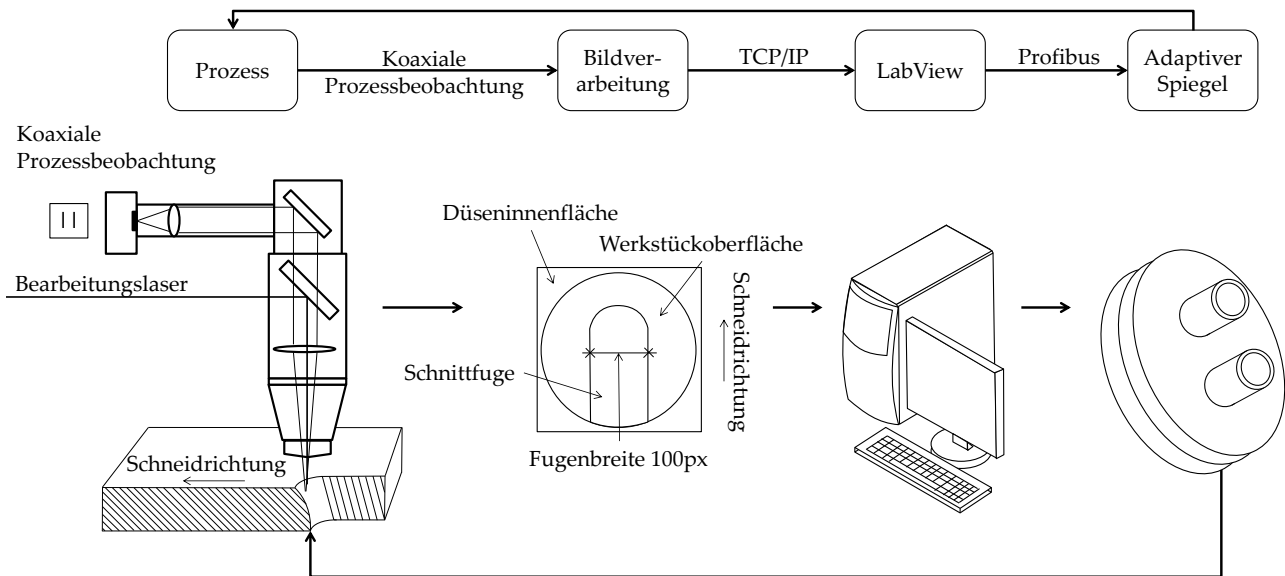


Abbildung 7.9: Kommunikationsaufbau zwischen koaxialer Kamera und adaptivem Spiegel

Das Ergebnis der automatisierten Vermessung zeigt Abbildung 7.10. Zu erkennen ist ein Minimum der Fugenbreite bei Schritt 10 und eine Fugenbreite von 43 Pixeln bei einem Spiegeldruck von 1250mbar. An dieser Stelle ist Fokusslage Null erreicht, sodass dieser Messpunkt als Referenz für die Fokusslagenbestimmung dient. Für den weiteren Schneidbetrieb kann mit dieser Referenzkurve die gewünschte Fokusslage anhand der zugehörigen Spiegeldrucks eingestellt werden.

Neben der Referenzierung der Maschinenkomponenten ermöglicht bereits diese Methode eine verbesserte Justageeinrichtung im Vergleich zu bereits bestehenden Systemen. Ein Verfahren, bei dem einzelnen Einschnitte mit unterschiedlichen Fokusslagen vermessen werden, wird bereits heute in der industriellen Praxis eingesetzt. Diese Justage ist notwendig, da beispielsweise Fertigungstoleranzen von Linsen Veränderungen der Fokusslage erzeugen können und Verfahrensparameter somit nicht mehr dem Soll entsprechen. Verschlechterungen der Schnittqualität oder der Prozesssicherheit sind die Folge.

Für die manuellen Justagearbeiten kommt bisher keine koaxiale Kameraeinheit zum Einsatz, vielmehr wird die manuelle Vermessung der Fugenbreite mit Hilfe einer Fühlerlehre ausge-

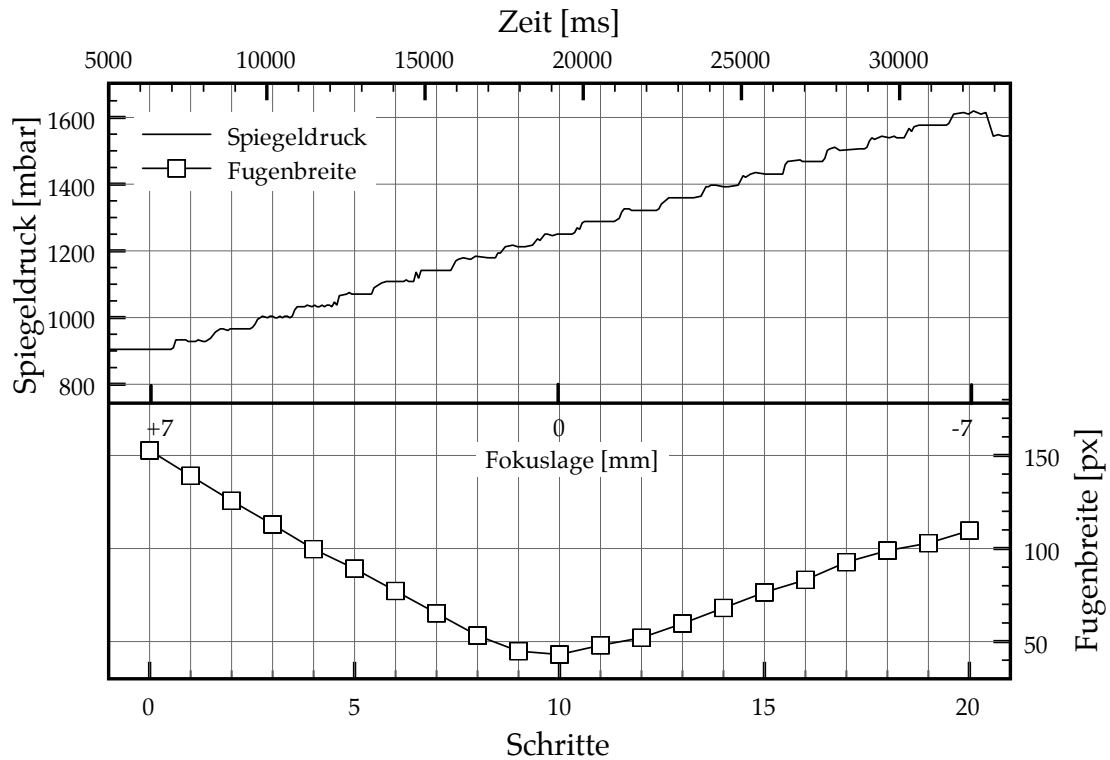


Abbildung 7.10: Ergebnis der automatisierten Vermessung der Fugenbreite korreliert zum Spiegeldruck

führt. Die hierbei auftretenden Schwankungen und Abweichungen vom Istwert können durch die automatisierte Vermessung vermieden werden. Eine unterlassene oder mangelhafte Justage kann im Produktionsalltag durch die automatische Vermessung vermieden werden. Das automatische System kann daher bereits ohne eine Prozessregelung als Einrichtassistent für die Fokusslage industriell genutzt werden und verbessert somit die Produktionssicherheit von Laserschneidanlagen.

7.2.2 Kompensation einer instationären Fokusslage

Die zuvor dargestellte Referenzkurve kann ausschließlich für ein Strahlführungssystem genutzt werden, dessen Komponenten einige Zeit mit Laserleistung beaufschlagt wurden. Dies muss so lange erfolgt sein, dass sich die Komponenten in einem thermischen Gleichgewicht zwischen absorbierter Energie und abgeführter Energie befinden. Aufgrund des instationären

Anteils der Fokusslage [60] kann die Fokusslage nicht alleine mit der Referenzkurve auf eine jederzeit feste Position fixiert werden.

Im Folgenden wird beschrieben, wie stark der Fokussshift für ein CO₂-Lasersystem sein kann und mit Hilfe welcher Methode er kompensiert werden kann. Zunächst soll der absolute Fokussshift zwischen kaltem, also nicht vorgeheiztem Strahlführungssystem und einem aufgeheizten, im thermischen Gleichgewicht befindlichen System, untersucht werden. Eine Methode zur Bestimmung der absoluten Fokusslage ist die Vermessung der Strahlkaustik mit einem Messgerät wie z.B. einem Primes FocusMonitor [61]. Mit diesem Messgerät ist sowohl die Vermessung der Fokusslage im thermischen Gleichgewicht als auch die zeitliche Änderung der Fokusslage möglich. Hierzu müssen lediglich zwei verschiedene Messmethoden angewendet werden.

Grundlegend ist die Messung der Kaustik und die hieraus resultierende Bestimmung der Fokusslage Null im thermischen Gleichgewicht. Links in Abbildung 7.11 ist die Kaustik bei einer klassischen Vermessung des Strahls dargestellt.

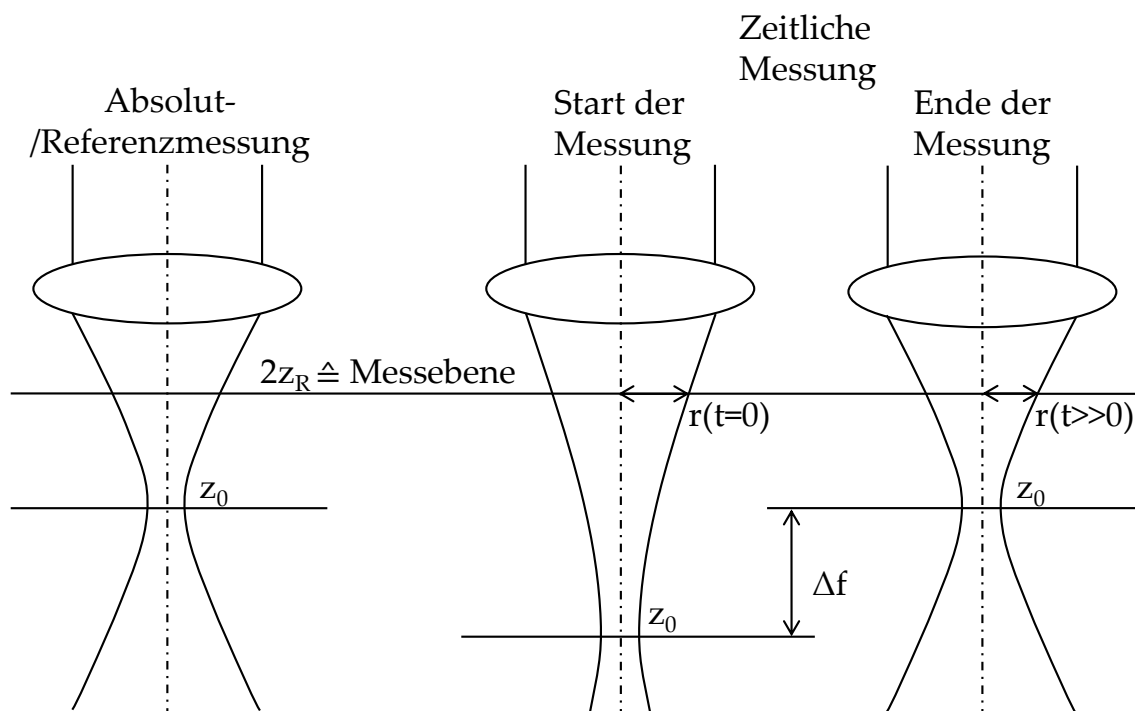


Abbildung 7.11: Messmethode zur Bestimmung der absoluten Fokusslage und ihrer zeitlichen Veränderung

Zur Bestimmung einer Positionsänderung der Fokusslage in Abhängigkeit von beispielsweise der Laserleistung muss lediglich für jede gewünschte Laserleistung die Kaustik gemessen werden und die Z-Position der Fokusslage Null aufgetragen werden. Um das zeitliche Verhalten beim Einschalten der Laserstrahlung zu vermeiden, sollten die Messungen mit einem über mehrere Minuten vorgeheiztem Strahlführungssystem durchgeführt werden.

In Abbildung 7.12 ist die Leistungs- und Rohstrahldurchmesser abhängige Fokusslage eines CO₂-Lasers bei einer Brennweite von 250mm zu sehen. Als Nullposition wurde der Messwert bei 2kW Laserleistung und einem Rohstrahldurchmesser von 25mm gewählt.

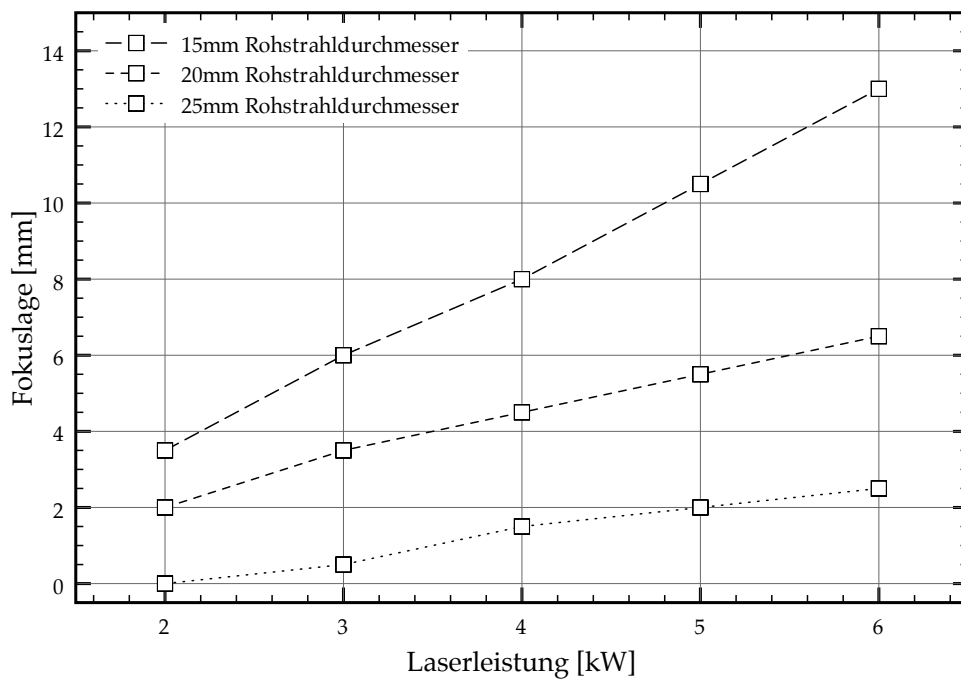


Abbildung 7.12: Fokusslage eines CO₂-Lasers in Abhängigkeit der Leistung und des Strahldurchmessers

Insgesamt zeigt sich ein nahezu lineares Verhalten in Abhängigkeit der Leistung für einen Rohstrahldurchmesser auf der Linse. Diese Beobachtung kann durch verschiedene Autoren bestätigt werden [55][62][63][64]. Bisson et al. [63] und Märten et al. [55] beschreiben den Fokussshift durch die Änderung des Brechungsindex (dominanter Einfluss auf den Fokussshift) wie folgt:

$$\Delta \left(\frac{1}{f} \right)_{dn/dT} = \frac{P\eta}{2\pi k r_0^2} \frac{dn}{dT} \quad (7.3)$$

7 Prozessführung und -regelung

Die folgenden Materialparameter gelten für ZnSe-Optiken bzw. beziehen sich auf den zuvor definierten Messbereich.

Symbol	Name	Wert	Einheit	Quelle
f	Brennweite	250	mm	
P	Laserleistung	2000-6000	W	
η	Anteil der Laserleistung die in Wärme konvertiert wird	0,00299		[65]
k	Wärmeleitfähigkeit @ 283K	17,8	W/(m·K)	[66]
r_0	Strahlradius auf der Linse	7,5-12,5	mm	
$\frac{dn}{dT}$	Temperaturkoeffizient der Brechungsindex	$61 \cdot 10^{-6}$	1/°C	[67]

Abbildung 7.13 zeigt den direkten Vergleich zwischen analytischem Modell und den Messwerten. Die berechneten Werte des analytischen Modells übersteigen insgesamt die Mess-

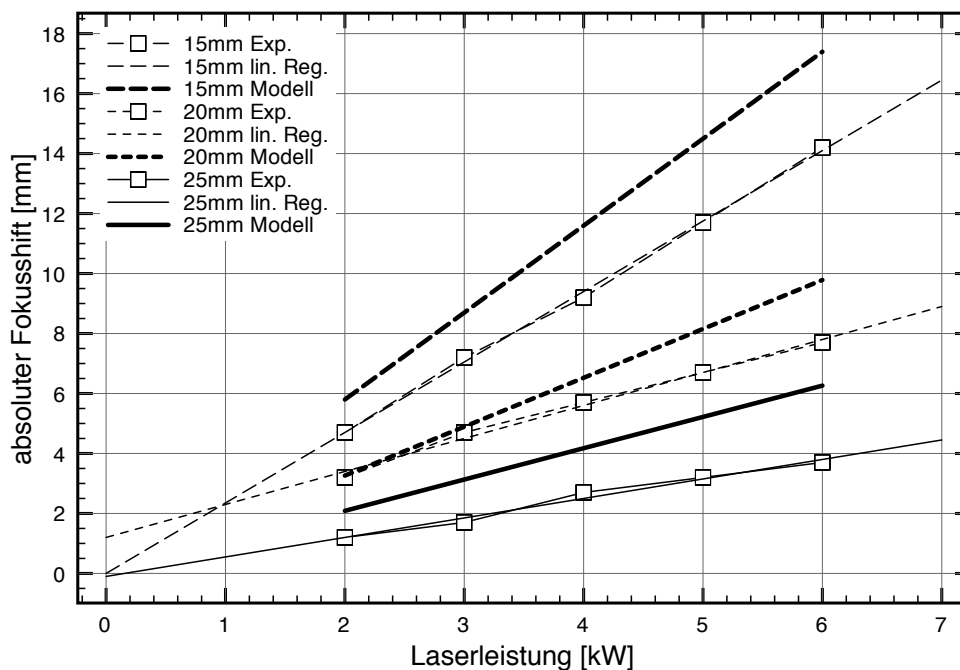


Abbildung 7.13: Absoluter Fokusschift inkl. linearer Regression und Modelldaten

werte, nichts desto trotz zeigen sie den linearen Verlauf des Fokusschiffs in Abhängigkeit der

Laserleistung und des Rohstrahls. Die absolute Abweichung ist unter anderem daher resultierend, dass die Formel für einen paraboloidischen Verlauf des Brechungsindex angenommen wird. Tatsächlich ist die Intensitätsverteilung des Rohstrahls keine exakte Parabel, sodass die Brechungsindexgradienten etwas flacher verlaufen und der Fokusshift geringer ausfällt. Die meist zu vernachlässigenden Faktoren [55] Spannungen und Deformationen der Linse können ebenso einen negativen Beitrag zum Fokusshift leisten. Wesentlich für diese Darstellung ist, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Fokusshift und Laserleistung besteht. Eine lineare Interpolation zwischen den experimentell bestimmten Messwerten wird somit möglich.

Soll die zeitliche Änderung der Strahlposition bestimmt werden (vgl. Abbildung 7.14), muss zunächst wieder eine Kaustik mit vorgeheiztem Strahlführungssystem gemessen werden. Ausgehend von dieser Messung wird eine feste Messebene ausgewählt, die sich im Bereich

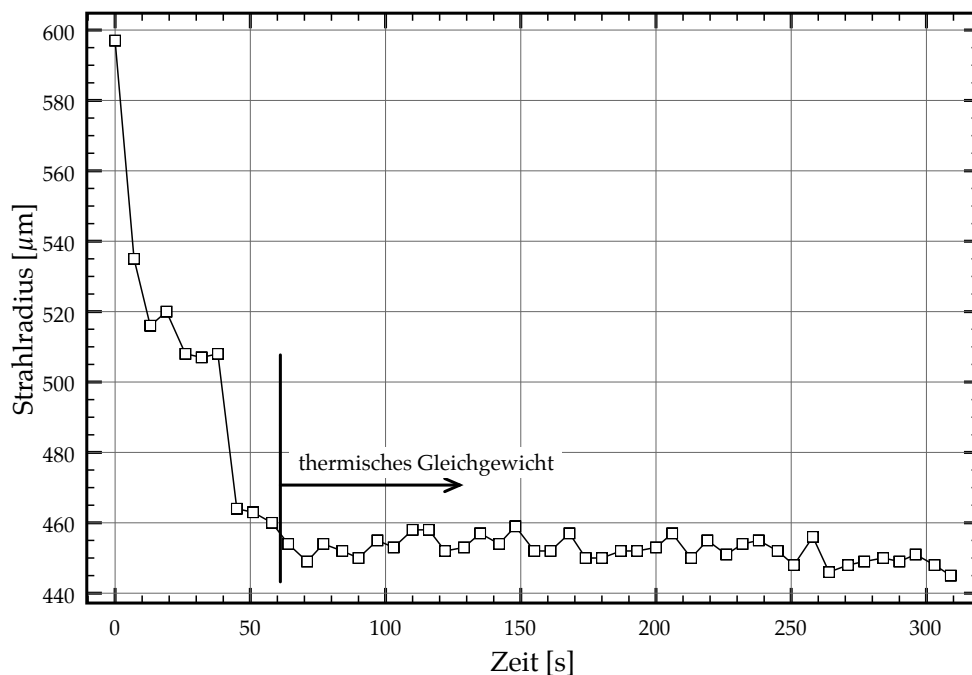


Abbildung 7.14: Zeitliche Änderung des Strahlradius eines CO₂-Laser bei 6kW Laserleistung, 250mm Brennweite und 15mm Strahldurchmesser

der nahezu linearen Steigung der Kaustik befindet. Zwei Rayleighlängen oberhalb der Fokusslage Null ist diese Position erreicht. Ist die Ebene eingestellt, wird eine Messung mit kalten optischen Komponenten und bei fester Z-Position des Messgerätes gestartet. Abbildung 7.14

zeigt beispielhaft die zeitliche Veränderung des Strahlradius bei 6kW Laserleistung und einem 15mm Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse. Durch die zeitlich diskrete Abtastung des Laserstrahls ist der Startzeitpunkt nicht exakt bestimmbar, eine zeitliche Ungenauigkeit von bis zu einem Abtastabstand ist hier zu erwarten. Das zeitliche Verhalten des Strahldurchmessers erscheint dabei annähernd logarithmisch. Die Änderung des Strahldurchmessers hat auf den zeitlichen Verlauf des Fokusshifts bei einer Variationsbreite zwischen 15 und 25mm nur einen geringen Einfluss (siehe auch Gatej [68]).

Die Kombination von absolutem Fokusshift und zeitlichem Verhalten des Shifts ermöglicht die Kompensation des Shifts durch den adaptiven Spiegel. Dazu muss lediglich das zeitliche Verhalten normiert und mit dem absoluten Shift multipliziert werden. Beim Einschalten der Laserstrahlung wird der Spiegeldruck so zeitlich angepasst, dass der Fokusshift kompensiert wird. Ein Test für die Funktionalität dieser Methode ist ein Schnitt in ein dünnes Blech bei hohen Schneidgeschwindigkeiten. Hierdurch ist die Änderung der Fokusslage durch eine Änderung der Fugenbreite sichtbar (vgl. Abbildung 7.15). Entgegen der ursprünglichen Be-

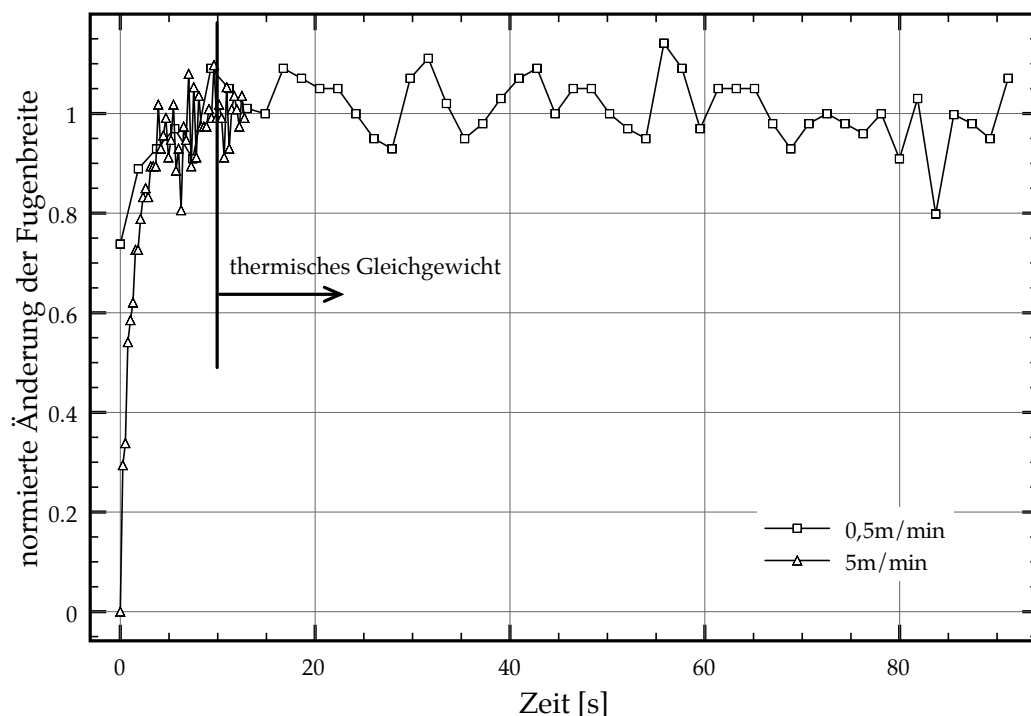


Abbildung 7.15: Normierter zeitlicher Verlauf der Fugenbreite bei unterschiedlicher zeitlicher Auflösung / zwei Geschwindigkeiten (0,5 und 5m/min)

obachtungen mit dem Strahlvermessungsgerät fällt auf, dass der Fokusshift im Schneidbetrieb ein deutlich schnelleres Verhalten aufweist als dies bei der Vermessung durch ein Strahlvermessungssystem detektiert werden kann.

Abbildung 7.15 zeigt hierzu fünfzig je zeitlich aufeinander folgende Einschnitte mit zwei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten, einer normierten Fugenbreite und 6kW Laserleistung. Die Veränderung des Vorschubs ermöglicht die Analyse der zeitlichen Veränderung der Fugenbreite bei unterschiedlicher zeitlicher Ausdehnung. Zu Beginn des langsameren Prozesses fällt der absolute Hub geringer aus, da durch die geringe zeitliche Auflösung bereits bis zum ersten Messpunkt ca. eine Sekunde vergangen ist. Nach ca. 10 Sekunden ergibt sich ein thermisches Gleichgewicht. Es tritt keine weitere Änderung der Fugenbreite ein.

Im Vergleich hierzu konnte bei der Strahlvermessung ein thermisches Gleichgewicht nach ca. 60 Sekunden bestimmt werden. Der gesamte Hub bleibt bei beiden Messungen nahezu identisch. Wesentlicher Unterschied zwischen diesen beiden Verfahren ist der Einsatz von Schneidgas während des Schneidprozesses.

Zunächst führt der Einsatz des Schneidgases zu einer insgesamt verringerten Temperatur der Linse und somit zu einer Verringerung des thermischen Fokusshifts. Gleichzeitig erzeugt das einströmende Gas eine inhomogene Verringerung der Linsentemperatur und erhöht den Gradienten des Brechungsindex. Diese beiden Effekte halten den absoluten Shift nahezu konstant, ein thermisches Gleichgewicht wird jedoch deutlich schneller erreicht.

Der funktionale Zusammenhang der Form $y = 1 - e^{-Ax}$ kann verwendet werden, um das zeitliche Verhalten des Shifts zu beschreiben. Es kann gezeigt werden, dass durch Multiplikation der normierten Fugenbreite mit dem absoluten Hub die Fugenbreite konstant gehalten werden kann.

Abbildung 7.16 zeigt den zeitlichen Verlauf der Fugenbreite und damit auch der Fokusslage bei kompensiertem und nicht kompensiertem Fokusshift inkl. exponentiellem Fit. Die Kompensation erzeugt eine nahezu konstante Fugenbreite, lediglich innerhalb der ersten Sekunde ergibt sich eine Abweichung unterhalb der statistisch mittleren Fugenbreite. Durch eine Optimierung der Fitfunktion ist hier auch die erste Startsekunde kompensierbar.

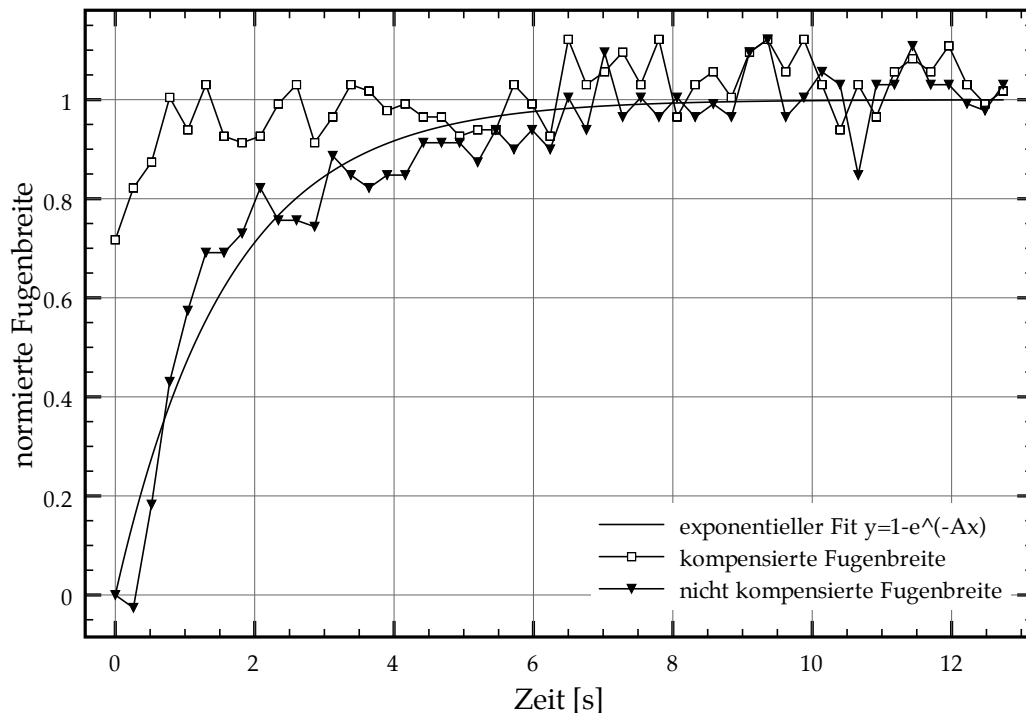


Abbildung 7.16: Normierte Änderung des Strahldurchmessers bei drei verschiedenen Rohstrahldurchmessern und einer Laserleistung von 6kW

7.2.3 Regelung der Fokusslage

Sowohl der zeitliche Verlauf als auch der absolute Shift der Fokusslage ist wie bereits beschrieben von den optischen Systemen einer Anlage abhängig. Neben diesen statischen Eigenschaften der Komponenten können während des Schneidbetriebes Verschmutzungen entstehen, die die Fokusslage beeinflussen. Um diese Abweichung festzustellen und um Störungen während des Schneidbetriebs zu korrigieren, muss eine Regelung die Fugenbreite konstant halten.

Den geregelten Betrieb zeigt Abbildung 7.17. Die Bestimmung der Fugenbreite wird dabei mit Hilfe eines Kantendetektionsalgorithmus und einer starken Fremdbeleuchtung während des Prozesses realisiert [69]. Als Regler wird ein LabVIEW System genutzt, dessen PID-Regler empirisch dimensioniert wird. Zunächst startet der Prozess in einem unregelmäßigen Zustand bei starker Defokussierung und schaltet nach ca. 1 Sekunde in den geregelten Prozess. Zielgröße ist eine Fugenbreite von 90px die nach ca. 8 Sekunden erreicht wird.

Wesentliche Elemente des Konzeptes zur Regelung der Fokusslage konnten damit demonstriert

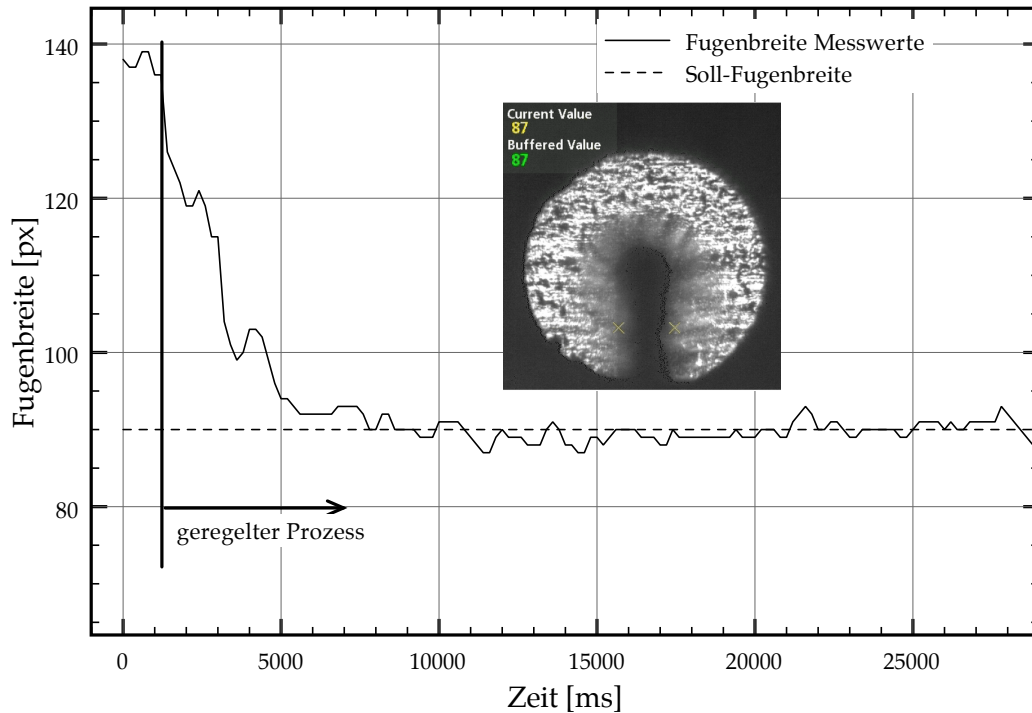


Abbildung 7.17: Fugenbreitenverlauf durch Zuschalten der Regelung inkl. Prozessaufnahme bei geregelter Fugenbreite, Quelle der Prozessaufnahme [69]

werden. Dazu gehört die Referenzierung, die Kompensation des Fokus-shifts und die Regelung der Fokusslage während des Schneidbetriebs. Lediglich die Implementation eines Hysteresebandes bei Fokusslage Null und eine Überprüfung der aktuellen Fokusslage bei starken Störungen stellen offene Arbeitspunkte dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden diese Arbeiten aufgrund ihres Umfangs nicht umgesetzt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Prozessregelung für das Laserstrahlschmelzschnneiden, die Veränderungen von Prozessparametern mit Hilfe spezifischer Prozessantworten erkennt und korrigiert. Besonderen Wert wird hierbei auf die direkte Messung der Prozessantwort im Prozess gelegt. Einstellparameter, die durch externe Messungen fehlerhaft eingestellt werden, können so vermieden werden. Zielgrößen der Regelung sind die verbesserte Prozesssicherheit, eine erhöhte Prozessgeschwindigkeit und eine gesteigerte Qualität.

Grundlage für die Entwicklung der Prozessregelung ist das erweiterte Prozessverständnis zur Bildung von Riefen und Bart an einer Schnittkante. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Prozesses liefern entscheidende Einblicke in die Instabilitäten der Schmelze und visualisieren die Entstehung der Qualitätskriterien. Diese werden im Wesentlichen durch die Rautiefe und die Bartanhaftung definiert. Dabei wird die Rautiefe durch Riefen erzeugt, die in vertikale und horizontale Riefen unterteilt werden. Vertikale Riefen entstehen durch Überlagerung mehrerer Schmelzwellen oder Schmelzstränge (vgl. Abb. 5.4 & 5.6), die auf der Schnittkante einen Riefenberg erzeugen.

Im Gegensatz hierzu treten horizontale Beugungsriefen durch Interferenzmuster in der Schnittfuge auf. Die lokal höhere absorbierte Leistung auf der Schnittkante hält die schmelzflüssige Phase über einen längeren Zeitraum aufrecht und sammelt dort Schmelze. Die resultierende Schnittkante zeichnet sich durch gekreuzte vertikale Riefen und horizontale Beugungsriefen aus.

Bei der Bildung von Bart wird mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen erstmals gezeigt, dass Schmelztropfen bereits am Schneidfrontscheitel anhaften und seitlich bis zur Schnittkante wandern. Dort angelangt werden diese Tropfen von einem Schmelzstrom aus der Schneidfront gespeist und wachsen an. Durch eine pendelnde Bewegung des Schmelzstroms wird Schmelze und somit auch Bart auf beide Schnittkanten verteilt.

Die Analyse der Prozessvideos des Laserschneidprozesses zeigt weiterhin, dass eine Schneidfront von einem instabilen Schmelzfilm sowohl durch longitudinale als auch transversale Schmelzwellen, benetzt ist. Diese Störungen lassen Riefen entstehen und begünstigen die Bildung von Bart. Eine minimale Störung des Schmelzfilms ist somit ein Kriterium für eine niedrige Rautiefe und stellt daher ein Ziel für die Prozessregelung dar.

Dies zeigt die hohe Relevanz einer Prozessregelung, die direkt den aktuellen Prozesszustand analysiert. Realisiert wird dies mit Hilfe von koaxialen Prozessaufnahmen, die eine Korrelation zwischen vorliegender Prozessantwort und tatsächlichem Verfahrensparameter ermöglichen. Abweichungen von der Sollgröße können so detektiert und korrigiert werden.

Qualitätsrelevante Verfahrensparameter sind hierbei die Fokuslage, die Düsenposition, die Laserleistung, der Gasdruck und die Schneidgeschwindigkeit. Diese werden hinsichtlich der Intensität der koaxial detektierten thermischen Strahlung, der Standardabweichung der Intensität, der Fugenbreite, der Position der Schneidfront und der Intensitätsverteilung untersucht. Durch Analyse der Prozessaufnahmen ist es gelungen jedem Verfahrensparameter eine spezifische Prozessantwort zuzuordnen. Beispielsweise ist eine deutliche Änderung der Fugenbreite immer durch die Änderung der Fokuslage verursacht. Weiterhin konnte bei der Variation des Gasdrucks eine Änderung der Emissions-Intensität detektiert werden. Lediglich der Laserleistung konnte keine spezifische Prozessantwort zugeordnet werden.

Da jeder Verfahrensparameter einen unterschiedlich hohen Einfluss auf die Qualität einer Schnittkante besitzt, zeigt diese Arbeit ein Verfahren zur Priorisierung der Verfahrensparameter hinsichtlich der Regelungs-Relevanz. Die Fokuslage ist hierbei die Größe, die einen großen Qualitätseinfluss besitzt, eine gute Einstellbarkeit aufweist, allerdings einer thermischen Instabilität unterliegt. Dieser sogenannte Fokus-shift ist in heutigen Maschinen nicht beseitigt, weshalb die Regelung der Fokuslage die höchste Priorität erhält. Der Aufbau der Prozessregelung wird daher auf den Verfahrensparameter Fokuslage ausgerichtet.

Hierauf aufbauend wird ein Konzept zur Prozessregelung beschrieben, bei dem die Fugenbreite als Regelgröße bzw. als Ersatzgröße für die Fokuslage eingesetzt wird. Komponenten dieses Konzeptes sind eine Referenzierung der Maschinenkomponenten, die schnelle Kompensation des Fokusshifts die Regelung der Fugenbreite im thermisch stabilen Zustand und die Überprüfung der Fokuslage mit Hilfe der thermischen Emission des Prozesses. Die Referenzierung erfolgt mit dem sogenannten Einrichtungsschritt, der eine Korrelation zwischen Fugenbreite, Fokuslage und Stellgröße des Fokuslagenaktors ermöglicht. Die Kompensation des Fokusshifts, zu Beginn des Schneidbetriebs, wird durch eine schnelle Steuerung

erzielt, die die Fugenbreite konstant hält. Ein Regler erweitert diese Maßnahme, um die Fokuslage während des Schneidbetriebs konstant zu halten. Damit ist ein vollständiges Regelungskonzept demonstriert, das lediglich durch die Implementation eines Hysteresebandes bei Fokuslage Null und einer Prüfroutine auf Basis der thermischen Prozessemission, vervollständigt werden muss.

Ein erweitertes Verständnis zur Entstehung der Schnittqualität, die Zuordnung von spezifischen Prozessantworten zu einem Verfahrensparameter und die Entwicklung einer Fokuslagenregelung leisten einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Produktionssicherheit und der Produktqualität (vgl. Abbildung 8.1).

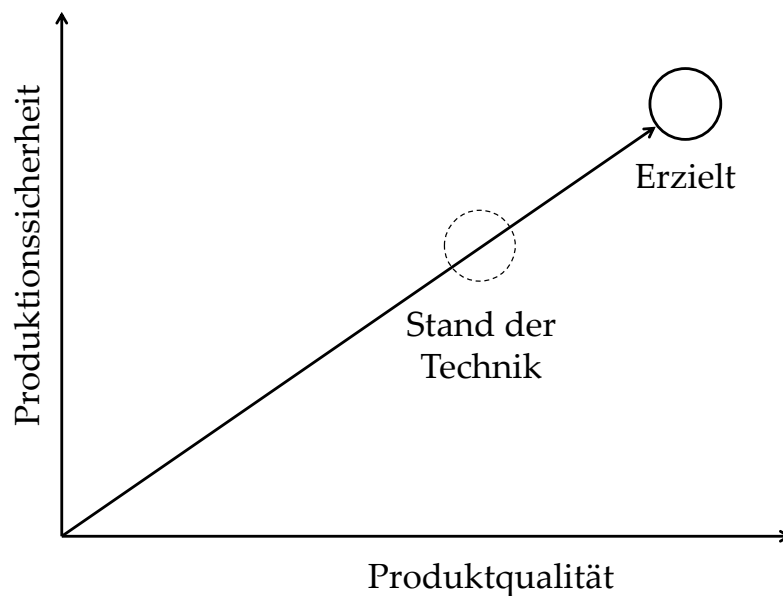


Abbildung 8.1: Erzielter Fortschritt

Über die Regelung der Fokuslage hinaus kann durch den hier gezeigten Erkenntnisfortschritt die Prozessregelung um zusätzliche Verfahrensparameter erweitert werden. Vorausblickend ist für solch eine multikriterielle Regelung Abbildung 8.2 dargestellt. Dieses Flussdiagramm demonstriert die Signalverläufe einer Prozessregelung mit mehreren Regelgrößen. Ausgehend von einer bereits existierenden Schneidanlage können die priorisierten Stellparameter selektiert und iterativ eingebunden werden. Kern dieses Flussdiagramms ist die Erweiterung der eigentlichen Regelung um ein Prozessmodell. Dieses hat den Vorteil, dass optimale Prozess-

8 Zusammenfassung und Ausblick

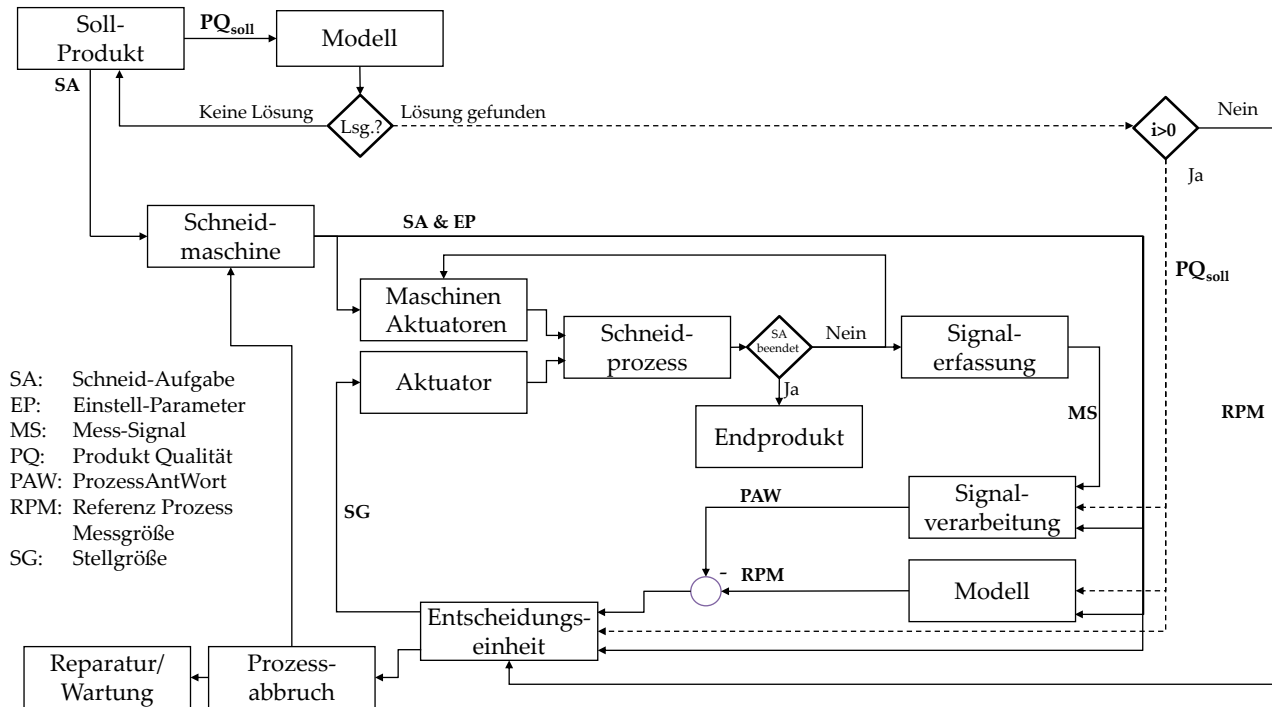


Abbildung 8.2: Flussdiagramm zur Regelung eines Laserschneidprozesses mehrerer Verfahrensparameter

parameter in einem Parameterfeld identifiziert werden können und das Modell durch den Abgleich mit dem laufenden Prozess verbessert wird. Zu Prozessbeginn wird die Schneidaufgabe inklusive der Randbedingungen (schnell/hohe Qualität/niedriger Ressourceneinsatz) an das Prozessmodell übergeben. Für die erste Iterationsschleife stellt das Prozessmodell die optimalen Verfahrensparameter zur Verfügung. Weiterhin gleicht es im fortschreitenden Schneidbetrieb die aktuellen Prozessantworten mit den Sollgrößen ab. Abweichungen von der Sollgröße können so korrigiert werden. Durch iterative Erweiterung des Parameterraums um weitere Verfahrensparameter kann das volle Potential aus den hier erlangten Erkenntnissen gezogen werden.

Zukünftig wird so nicht nur der eigentliche Prozess verbessert werden können. Es wird weiterhin möglich sein, dieses System in eine ganze Fertigungsstraße einzubinden. Durch Auswertung des Produktionsprozesses können Daten des Produktes an die nächste Maschine übergeben werden. Ebenso wird es möglich, durch Verknüpfung der Maschine mit einem Planungssystem optimale Fertigungszyklen zu strukturieren.

Literaturverzeichnis

- [1] OVERTON, Gail ; NOGEE, Allen ; BELFORTE, David ; HOLTON, Conard: Laser markets rise above global headwinds. In: *Laser Focus World* (2013), January
- [2] OLSEN, Flemming O. ; ALTING, L.: Cutting Front Formation in Laser Cutting. In: *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology* 38 (1989), Nr. 1, S. 215 – 218. – ISSN 0007–8506
- [3] SULLIVAN, A.B.J. ; HOULDCRAFT, P.T.: Gas-jet laser cutting. In: *British Welding Journal* (1967)
- [4] THOMASSEN, Flemming ; OLSEN, Flemming: Experimental studies in nozzle design for laser cutting. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Lasers in Manufacturing* 1 (1983), November, S. 169–180
- [5] IPG LASER (Hrsg.): *Specification Ytterbium laser system model YLS-5000-SM*. IPG Laser GmbH, Siemensstrasse 7, 57299 Burbach: IPG Laser, 2011
- [6] AMADA GMBH (Hrsg.): *Produktdatenblatt Faser-Laser FOL-3015 AJ*. Amada Allee 1, 42781 Haan: Amada GmbH, 2011
- [7] POWELL, John ; KAPLAN, Alexander: Ein wirtschaftlicher und technischer Vergleich von Faserlaser- und CO₂ Laserschneidemaschinen. In: *Aachener Laser Kolloquium* (2012)
- [8] YUDIN, Peter ; KOVALEV, Oleg: Visualization of events inside kerfs during laser cutting of fusible metal. In: *Journal of laser applications* (2009)

- [9] RADOVANOVIC, Miroslav ; MADIC, Milos: Experimental investigations of CO₂ laser cut quality: A review. In: *Nonconventional Technologies Review* (2011), Nr. 4
- [10] KAPLAN, Alexander ; SCHUÖCKER, D. ; WANGLER, O.: On-line Qualitätsüberwachung beim Laserstrahlschneiden. In: *Laser und Optoelektronik* (1996)
- [11] DECKER, Ingo ; HEYN, Holger ; MARTINEN, Dirk ; WOHLFAHRT, Helmut: Process monitoring in laser beam cutting on its way to industrial application. In: *SPIE Vol.3097* (1997)
- [12] JORGENSEN, Henning ; OLSEN, F.O.: Process monitoring during CO₂ laser cutting. In: *SPIE - Gas and Metal Vapor Lasers and Applications* 1412 (1991)
- [13] WERSBORG, Ingo S. ; BAUTZE, Thibault ; BORN, Frederik ; DIEPOLD, Klaus: A cognitive approach for a robotic welding system that can learn how to weld from acoustic data. In: *CIRA'09 Proceedings of the 8th IEEE international conference on Computational intelligence in robotics and automation* (2009)
- [14] KEUSTER, J. D. ; DUFLOU, J. R. ; KRUTH, J.P.: Acoustic and optical monitoring of high-power CO₂ laser cutting. In: *Sheet metal* (2007)
- [15] FUSHIMI, Takashi ; HORISAWA, Hideyuki ; YAMAGUCHI, Shigeru: A fundamental study of laser cutting using a high speed photography. In: *High-Power Lasers in Manufacturing* (2002)
- [16] HIRANO, Koji ; FABBRO, Remy: Possible explanations for different surface quality in laser cutting with 1 and 10micrometers beams. In: *Journal of laser applications* (2012)
- [17] HIRANO, Koji: Experimental investigation of hydrodynamics of melt layer during laser cutting of steel. In: *IOP* (2011)
- [18] SCHMALL, Karl-Heinz: Anordnung zur Messung des Abstands zwischen einem metallischen Werkstück und einem Bearbeitungswerkzeug / Precitec Gesellschaft für Präzisionstechnik und Elektronik mbH und Co Entwicklungs- und Vertriebs-KG. 1980. – Forschungsbericht

- [19] BEYER, Eckerhard ; PETRING, Dirk ; ABELS, Peter ; HERZIGER, Gerd: Verfahren und Vorrichtung zum Abtragen insbesondere metallischer Werkstücke mit Laserstrahlung / Fraunhofer ILT. 1989. – Forschungsbericht

- [20] HAFERKAMP, Heinz ; GOEDE, Martin ; BUSSE, Alexander von: Quality monitoring and assurance for laser beam cutting using a thermographic process control. In: *Europto Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection* (1999)

- [21] BAUTZE, Thibault ; KAISER, Tobias: Focal shift monitoring and cognitive closed-loop control of analysis of co-axial video data. In: *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics* (2009)

- [22] MIKROTRON GMBH (Hrsg.): *MotionBLITZ EoSens mini2*. Landshuter Str. 20–22 · 85716 Unterschleißheim: Mikrotron GmbH, 2013

- [23] REDLAKE (Hrsg.): *MotionXtra user's manual*. IS - Imaging Solutions GmbH, Arbachtalstrasse 6, 72800 Eningen unter Achalm: Redlake

- [24] CHEN, Xiaodong ; MA, Dongjun ; YANG, Vigor: Dynamics and stability of impinging Jets. In: *Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* (2012)

- [25] TAKAGI, DAISUKE ; HUPPER, HERBERT E.: Flow and instability of thin films on a cylinder and sphere. In: *Journal of Fluid Mechanics* (2010)

- [26] ERIKSON, I. ; POWELL, J. ; KAPLAN, A.F.: Ultra high speed camera investigations of laser beam welding. In: *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics* (2010)

- [27] ERIKSON, Ingemar ; POWELL, John ; KAPLAN, Alexander: Melt behavior on the key-hole front during high speed laser welding. In: *Optics and Lasers in Engineering* 51 (2013)

- [28] TANIA, Giovanni ; TOMESANIB, Luca ; CAMPANAA, Giampaolo: Predicion of melt geometry in laser cutting. In: *Applied Surface Science* (2003)

- [29] RAO, B T. ; NATH, A K.: Melt flow characteristics in gas-assisted laser cutting. In: *Sadhana* 27 (2002)
- [30] CHEN, Kai ; YAO, Y. L.: Striation formation and melt removal in the laser cutting process. In: *Journal of Manufacturing Process* 1 (1999), Nr. 1, S. 43–53
- [31] PETRING, Dirk ; ABELS, Peter ; HERZIGER, G.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. In: *Feinmechanik Fertigung* (1988)
- [32] ZEFFERER, Hartmut: *Dynamik des Schmelzschneidens mit Laserstrahlung*, RWTH Aachen, Diss., 1998. – 149 S.
- [33] SCHARFE, Wolf-Dieter: Projektpräsentation. In: *Dynamische Vorgänge beim Laserstrahlschmelzschneiden*. Fraunhofer ILT, Sep 1995
- [34] KUCHLING, Horst: *Taschenbuch der Physik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2001/2004
- [35] VOSSEN, Georg ; SCHÜTTLER, Jens ; NIESSEN, Markus: *Recent Advances in Optimization and its Applications in Engineering: Optimization of partial differential equations for minimizing the roughness of laser cutting surfaces*. Springer, 2010
- [36] EPPELT, Urs ; MOLITOR, Thomas ; SCHULZ, Wolfgang: Methode zur Minimierung der Schnittkantenrauheit beim Laserschneiden von Stählen durch die Vermeidung von Beugungsstrukturen in der Absorptionsverteilung / Fraunhofer ILT. 2013. – Patent 10 2013 015 429.4
- [37] RIVEIRO, A ; QUINTERO, F ; LUSQUIÑOS, F ; COMESAÑA, R ; POU, J: Study of melt flow dynamics and influence on quality for CO₂ laser fusion cutting. In: *Journal of Applied Physics* 44 (2011)
- [38] *DIN EN ISO 11146 Laser und Laseranlagen - Prüfverfahren für Laserstrahlabbmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen*. 2005
- [39] MOLITOR, Thomas ; GILLNER, Arnold: Methode zur Erfassung und Regelung der Fo-

kuslage bei Laserbearbeitungsprozessen / Fraunhofer ILT. 2013. – Patent 10 2014 000 330.2

- [40] MAHRLE, A. ; BEYER, E.: Thermodynamic evaluation of inert-gas laser beam fusion cutting with CO₂, disk and fiber lasers. In: *Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (2009)
- [41] SCINTILLA, L. D. ; TRICARICO, L. ; MAHRLE, A. ; WETZIG, A. ; BEYER, E.: Experimental Investigation on the cut front geometry in the inert gas laser fusion cutting with disk and CO₂ lasers. In: *Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (2011)
- [42] PETRING, Dirk ; MOLITOR, Thomas ; SCHNEIDER, Frank ; WOLF, Norbert: Diagnostics, modeling and simulation: Three keys towards mastering the cutting process with fiber, disk and diode lasers. In: *Laser Assisted Net Shape Engineering 7* (2012)
- [43] STEFAN, J.: Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. In: *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften* 79 (1879), S. 391–428
- [44] BOLTZMANN, L.: Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie. In: *Annalen der Physik und Chemie* 22 (1884), S. 291–294
- [45] WANDERA, Catherine: Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminium using a high power fiber laser. In: *Journal of laser applications* (2009)
- [46] HUEHNLEIN, K. ; TSCHIRPKE, K. ; HELLMANN, R.: Optimization of laser cutting processes. In: *Laser Assisted Net Shape Engineering* (2010)
- [47] KARATAS, Cihan ; KELES, Omer ; USLAN, Ibrahim ; USTA, Yusuf: Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation. In: *Journal of Materials Processing Technology* 172 (2006), S. 22–29

- [48] ZAIED, M. ; BAYRAKTAR, E. ; KATUNDI, D. ; BOUJELBENE, M. ; MIRAOU, I.: Effect of laser cutting parameters on surface quality of low carbon steel. In: *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 54 (2012), September
- [49] DICKLER, Harald: *Der koaxiale Kombikopf für CO₂- und Festkörperlaser*. Laserfact GmbH, Steinbachstr. 15, 52074 Aachen: Laserfact, 02 2008
- [50] OKADA, Takeshi ; EBATA, Keiji ; SHIOZAKI, Manabu ; KYOTANI, Tatuya ; TSUBOI, Akihiko ; SAWADA, M. ; FUKUSHIMA, H.: Development of adaptive mirror for CO₂ laser. In: *High-Power Lasers in Manufacturing* (2000)
- [51] MOLITOR, Thomas ; SCHNEIDER, Frank ; BUSSKAMP, Tobias ; THOMBANSEN, Ulrich ; EPELT, Urs ; PETRING, Dirk ; SCHULZ, Wolfgang: Self-optimizing focus technique (SOFT) - a new approach on the way to next generation cognitive laser cutting machines. In: *Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (2010)
- [52] JABCYNSKI, Jan K. ; MINDAK, Marek K.: Focus shift of multimode cw YAG laser beam. In: *Optical Engineering* (1992)
- [53] ABT, F. ; HESS, A. ; DAUSINGER, F.: Temporal behavior of the focal shift of beam forming optics for high power single mode lasers. In: *Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (2008)
- [54] ERHARDT, Karl-Manfred ; HEINE, Adolf ; PROMMERSBERGER, Hans: *Laser in der Materialbearbeitung*. 1993. ISBN 3–8023–0480–2
- [55] MÄRTEN, Otto ; KRAMER, Reinhard ; SCHWEDE, Harald ; WOLF, Stefan ; BRANDL, Volker: Fokusanalyse. In: *Laser+Photonik* (2008)
- [56] MLS LANNY GMBH (Hrsg.): *Regelventil Profibus*. V9. Beermis 12-14, 75323 Bad Wildbad: MLS Lanny GmbH, 2008
- [57] STEFFENS, Oliver: *Protokoll der Endabnahme*. Steinbachstraße 15, 52074 Aachen: S und F Systemtechnik, 2012

- [58] TRUMPF GMBH + Co. KG (Hrsg.): *Betriebsanleitung 5030 L16*. Johann-Maus-Straße 2 71254 Ditzingen: TRUMPF GmbH + Co. KG, 2008
- [59] IPG LASER (Hrsg.): *Benutzerhandbuch - YLR- 4000 SS Ytterbium Faser Laser*. IPG Laser GmbH, Siemensstrasse 7, 57299 Burbach: IPG Laser, 2010
- [60] HENTSCHEL, Konrad: Fokus-Shift bei Hochleistungslasern. In: *Fachgruppe Laser* (2010), November, Nr. 7. Sitzung, S. 1–24
- [61] PRIMES GMBH (Hrsg.): *Datenblatt Primes FocusMonitor*. Max-Planck-Str. 2 GER-MANY 64319 Pfungstadt: PRIMES GmbH, 2013
- [62] KOECHNER, W.: Thermal lensing in a YAG laser rod. In: *Applied optics* 9 (1970), Nr. 11
- [63] BISSON, Jean-Francois ; SAKO, Hiroshi: Suppression of the focal shift of single-mode laser with a miniature laser processing head. In: *Proceedings of laser advanced materials processing* (2009)
- [64] GLUR, Hansjörg ; LAVI, Raphael ; GRAF, Thomas: Reduction of thermally induced lenses in Nd:YAG with low temperatures. In: *Journal of quantum electronics* 40 (2004), May, Nr. 5
- [65] IWAMOTO, H. ; EBATA, K. ; NANBA, H.: Development of a high-pressure ZnSe lens with low absorptivity. In: *SEI Technical review* (2002), January, Nr. 53, S. 92–98
- [66] TANGELDER, R.J. ; BECKMANN, L.H.J.F. ; MEIJER, J.: Influence of temperature gradients on the performance of ZnSe-Lenses. In: *SPIE* 1780 (1992), S. 294–301
- [67] SCAGGSA, M. ; HAAS, G.: Thermal lensing compensation optic for high power lasers. In: *SPIE* 7913 (2011)
- [68] GATEJ, Alexander: *Modeling and compensation of thermally induced optical effects in highly loaded optical systems*, RWTH Aachen, Diss., 2014

Literaturverzeichnis

- [69] BRECHER, Christian ; KARMANN, Oliver ; KOZIELSKI, Stefan u. a.: *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Christian Brecher, 2011

Lebenslauf

Name	Thomas Molitor
Geburtsdatum	28.09.1981
Geburtsort	Mayen/ Rheinland- Pfalz
Werdegang	
seit 2014	Technischer Vertrieb bei der Laserline GmbH
2009 - 2014	Promotion zum Dr.-Ing. „Hochgeschwindigkeitsdiagnose dynamischer Schmelzen zur Regelung von Laserschneidprozessen“ am Fraunhofer ILT
2009	Masterarbeit zum Thema „Einfluss der Prozessparameter auf die Umformbarkeit lasergeschweißter Verpackungsstähle“ bei der ThyssenKrupp AG
2007 - 2009	Betriebsingenieur bei der ThyssenKrupp AG
2007 - 2009	Studium: Applied Physics, M.Sc., Fachhochschule Remagen
2007	Diplomarbeit zum Thema „Qualifizierung von Festkörperlasern höchster Brillanz zum Schweißen von Getriebekomponenten“ bei der DaimlerChrysler AG
2003 - 2007	Studium: Lasertechnik, Dipl.-Ing. (FH), Fachhochschule Remagen
2001 - 2002	Grundwehrdienst
2002 - 2003	Fachhochschulreife Technik
1998 - 2001	Ausbildung zum Schreiner Gesellen
1998	Schulabschluss: Mittlere Reife