



Diplomarbeit

von

Fabian P.W. Holzmüller

Untersuchungen zur Detektion von Schweißfehlern beim Laserstrahlschweißen von Metallen mit Hilfe einer NIR-Kamera

zur Erlangung des akademischen Grades

des

Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der

TU WIEN

Betreuer:

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Liedl

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften
Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

Wien, September 2018



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am _____

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mir bei der Fertigstellung dieser Arbeit geholfen haben. Vor allem bei Prof. Liedl für seine freundliche und professionelle Art und auch bei Dipl.-Ing. Humenberger, der mir dank seiner un-aufhörlichen Unterstützung viel Kummer und Leid erspart hat. An dieser Stelle darf ich mich auch bei Herrn Boehm bedanken, ohne den ich die Fräse noch öfter malträtiert hätte.

Selbstverständlich gehört der Dank auch meiner Familie, die mich all die Jahre unterstützt und ausgehalten haben.

Mein besonderer Dank gilt Norbert Filep, ohne den ich zu diesem Zeitpunkt wahrscheinlich noch im Bachelorstudium stecken würde. Ich danke ihm für den Beistand und die in Summe guten Jahren.

Zusammenfassung

Das Laserstrahlschweißen nimmt vermehrt einen wichtigen Platz in verschiedenen Herstellungsabläufen ein. Da dieser Prozess meist autonom verläuft, ist eine automatische Kontrolle wünschenswert. Momentan genutzte Überprüfungsverfahren lassen sich jedoch nicht oder nur schwer in einen automatisierten Kontrollprozess integrieren. Daher gibt es neue Ansätze, die darauf abzielen, schon während der Herstellung die Schweißnaht auf Defekte zu überprüfen.

Einer dieser Möglichkeiten ist die Beobachtung des Schweißprozesses mit einer Nah-Infrarot-Kamera (NIR-Kamera). Es gibt bereits Forschungsansätze, die anhand von NIR-Bildanalysen die Qualität der Schweißnaht untersuchen. Diese Ansätze wurden in der vorliegenden Arbeit überprüft und um eine Dynamikanalyse des Schweißprozesses erweitert.

Dafür wurden verschiedene Materialien verschweißt und dabei absichtlich Fehler produziert. Ziel war es, die häufigsten Schweißfehler wie Porosität, Spritzerbildung, kollabierende Keyholes, False Friends und fehlerhafte Fügepartner anhand der Veränderung des Schweißbades zu erkennen. Diese Veränderung sollte über die NIR-Kamera ersichtlich sein.

Die Bilder der NIR-Kamera bildeten jeweils eine Sequenz, welche mit verschiedenen mathematischen Methoden ausgewertet wurde. Dazu gehörte die Mittel-, Maximal-, und Minimalwertanalyse und die Betrachtung der Standardabweichung, beziehungsweise der relativen Standardabweichung.

Die Ergebnisse der Bildauswertung waren im Vergleich zu den existierenden Forschungsarbeiten nicht zufriedenstellend. Es konnten, im Gegensatz zu anderen Arbeiten, keine Spritzer identifiziert werden. Auch der Ansatz „False Friends“ anhand von erhöhter Wärmeemission des Werkstücks zu detektieren, konnte in dieser Arbeit nicht verifiziert werden. Die Hauptursache hierfür liegt vermutlich an der benutzten Kamera. Weder die Bildqualität noch die Aufnahmefrequenz der in dieser Arbeit benutzten Kamera entsprechen der in der Referenzarbeit verwendeten. Auch konnte Porositätenbildung im Schweißprozess nicht anhand von Fotosequenzanalysen nachgewiesen werden.

Allerdings war das Resultat der Dynamikanalyse erstaunlich. Um die Dynamik abzubilden, wurde eine Pixelzeile in der Nähe des Lasereintreffpunktes herausgenommen und mit der gleichen Pixelzeile des nächsten Bildes verglichen. Die Differenz der Pixelwerte wurde dann in einem 3-D Plot wiedergegeben. Der entstehende Plot ist für einen stabilen Prozess eben, für einen instabilen wellig. Damit konnten kollabierende Keyholes eindeutig identifiziert werden. Auch die Einbringung von fehlerhaften Fügepartnern konnte eindeutig mit der Dynamikanalyse erkannt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Einleitung	4
2.1	Allgemeine Einführung in das Themenfeld	4
2.2	Problemstellung	5
2.3	Forschungsfrage	6
2.4	Lösungsansatz	7
2.5	Verwendete Methode	7
2.6	Aufbau und Struktur der Arbeit	7
3	Theoretische Grundlagen	8
3.1	Das Licht und der Laser	8
3.1.1	Licht	8
3.1.2	Hintergründe und verwendete Begriffe	9
3.1.3	Laser	12
3.2	Wechselwirkung zwischen Laser und Materie	15
3.2.1	Reflexion, Absorption und Transmission	15
3.2.2	Thermische Prozesse	17
3.2.3	Plasma und Plasmaabschirmung	18
3.2.4	Laserstrahlschweißen	19
3.2.5	Wärmestrahlung der Wärmeeinflusszone	22
4	Stand des Wissens	24
4.1	Nachträgliche Überprüfungsverfahren	24
4.1.1	Sichtprüfung	24
4.1.2	Durchstrahlungsprüfung	25
4.1.3	Magnetische Prüfungen	26
4.1.4	Wirbelstromprüfung	27
4.1.5	Ultraschall Untersuchung	27
4.1.6	Wärmestromprüfung	28
4.2	Zeitgleiche Überprüfungsverfahren	29
4.2.1	Cellular Neural Network Cameras und Closed Loop Control	29
4.2.2	Fehlerdetektion durch eine Keyholeanalyse	30
4.2.3	Plasmauntersuchung	31
4.2.4	NIR-Kamera	31
5	Versuch	33
5.1	Versuchsaufbau	33
5.2	Versuchskomponenten	34
5.2.1	Hardware	34
5.2.2	Software	37
5.3	Versuchsreihen	37
5.3.1	Versuchsreihe I	38

5.3.2	Versuchsreihe II	38
5.3.3	Versuchsreihe III	38
5.4	Versuchsablauf	39
6	Auswertung	42
6.1	Einzelbilder	42
6.1.1	Versuchsreihe I	42
6.1.2	Versuchsreihe II	42
6.1.3	Versuchsreihe III	43
6.2	Fehleranalyse	44
6.3	Dynamikanalyse	45
6.4	Analyse des Erwartungswertes	46
7	Resultate	47
7.1	Bildaufstellung	47
7.2	Bildanalyse	47
7.2.1	Porosität	48
7.2.2	False Friend	50
7.2.3	Kollabierendes Keyhole	54
7.2.4	Löcher	56
7.2.5	Spritzer	57
7.2.6	Steigende Spaltweite	58
7.2.7	Verzug	58
7.3	Dynamikanalyse	59
7.4	Erwartungswertanalyse	62
8	Diskussion	64
9	Ausblick	66
9.1	Weitere Ansätze zur Fehlervermeidung und Optimierung	66
9.2	Online NIR-Kamera Überwachung	66
10	Abbildungsverzeichnis	68
11	Tabellenverzeichnis	70
12	Abkürzungsverzeichnis	71
13	Verwendete Literatur	72
14	Anhang	75

1 Motivation

Der Beginn der Lasertechnologie liegt im Jahre 1916, als Albert Einstein die Idee der stimulierten Emission auf Basis der Quantenmechanik erstmals beschrieb.¹ Erst vierzig Jahre später wurden die ersten Laser gebaut, da die technischen Voraussetzungen noch nicht gegeben waren. In dieser Zeit wusste noch niemand, wozu der Laser gebraucht werden würde. T.H. Maiman, einer der ersten Entwickler eines funktionstüchtigen Lasers, beantwortete die Frage nach dem Nutzen eines Lasers mit: „(it is) a solution in search of a problem“².

Heutzutage ist der Laser aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Egal ob beim Scannen unserer Einkäufe oder in der Kommunikation, überall wird die Lasertechnologie eingesetzt. Insbesondere bei Fertigungsverfahren ist der Laser eine gewinnbringende Ergänzung zu herkömmlichen Verfahren. In diesem Sinn wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf ein Teilgebiet der Fertigung, das Laserstrahlschweißen, näher eingegangen.

Der Nutzen dieser Technologie kann besonders gut an dem Wachstum des Marktes beobachtet werden. Die Branche der Laserverarbeitungsprozesse, speziell im Bereich der Materialverarbeitung, hatte in den letzten Jahren ein starkes Wachstum zu verzeichnen. Dies geht aus der Abbildung 1.1 hervor. Global gesehen ist die Branche in den letzten 10 Jahren von 6,1 Milliarden EUR auf 11,4 Milliarden EUR weltweit gewachsen. Dies entspricht einem Wachstum von ca. 53%.

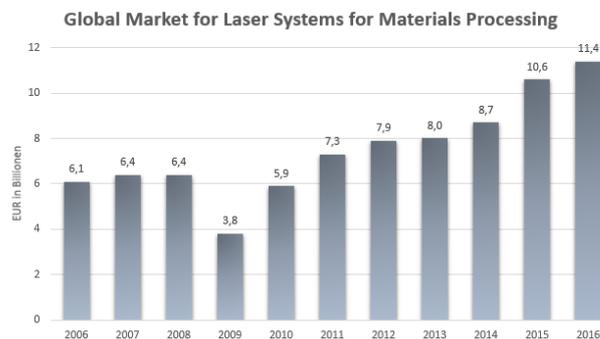


Abbildung 1.1: Global Market for Laser Systems for Materials Processing³

Der Einbruch im Jahre 2009 lässt sich auf die Weltwirtschaftskrise zurückführen. Hier ist anzumerken, dass sich der Lasermarkt schnell erholen konnte, während andere Märkte wesentlich länger gebraucht haben, um sich zu stabilisieren. Die Werte vor dem Jahr 2006 waren nicht in der gezeigten Größenordnung. Im Jahre 2003 lag das Volumen des Marktes bei nur 3,65 Milliarden Euro⁴. Obwohl die damali-

¹Einstein, „Strahlungs-emission und -absorption nach der Quantentheorie“.

²Porter, *Army Research and Development*.

³Optech, *Market Data*.

⁴Mayer, „Laser in der Materialbearbeitung – Eine Marktübersicht“.

gen Prognosen für die folgenden Jahre negativ waren, wuchs der Markt, wie oben gezeigt, ab 2006 deutlich.

Es gibt verschiedene Einsatzmöglichkeiten für einen Laser. Schneiden, Schweißen, Laserstrahlverfahren zur Oberflächenmodifikation und Bohren beziehungsweise Abtragen gehören zu den Haupteinsatzgebieten im Rahmen der Materialbearbeitung⁵. Wie eingangs erwähnt, beschäftigt sich diese Arbeit mit dem Teilgebiet des Schweißens. Grob skizziert ist das Laserstrahlschweißen die Energieeinbringung in ein Werkstück mittels Photonenenergie. Dies wird genauer im Kapitel 3 beschrieben.

Um die Wirtschaftlichkeit des Produktionsbetriebes zu gewährleisten, lautet eine der zentralen Prämissen: Fehlervermeidung oder die frühzeitige Fehlererkennung. Im Falle des Laserstrahlschweißens gibt es verschiedene Möglichkeiten, Fehler in einer Schweißnaht zu detektieren. Die meisten davon werden erst nach der Bearbeitung in der Qualitätskontrolle durchgeführt. Hierzu gehören zum Beispiel Ultraschall- und Röntgenuntersuchungen. Eine Auswahl solcher Kontrollmaßnahmen wird im Kapitel 4 vorgestellt. Alternativ zu diesen Methoden gibt es Forschungsansätze, welche die Qualität der Schweißnaht noch während der Produktion messen. Dieser Ansatz hat große Vorteile. Die Nachbearbeitungszeit wird stark reduziert und auch der Aufwand für die Qualitätskontrolle wird minimiert. Des Weiteren muss das Werkstück nicht mehr aus dem Produktionsablauf heraus genommen werden. Vereinfacht gesagt, wird der wertschöpfende Anteil der Durchlaufzeit erhöht oder anders formuliert, der Anteil der Verschwendung reduziert. Es ist also eine Maßnahme, um Kostenreduktionen zu erreichen.

Einer dieser Forschungsansätze, um sich mit der Qualitätskontrolle während der Bearbeitung auseinander zu setzen, wird in dieser Arbeit ausführlich behandelt. Hierbei wird versucht, auf die Qualität der Schweißnaht zurück zu schließen, indem die thermische Strahlungsemission der Wärmeeinflusszone gemessen wird. Sollte kein Kontakt zwischen den beiden zu verschweißenden Werkstücken bestehen oder die Leistung für eine ordnungsgemäße Schweißnaht zu gering sein, so könnte dies durch eine NIR-Kamera gemessen werden. Dadurch wäre eine Fehlerdetektion noch während der Bearbeitung möglich. Diese Untersuchung wurde in vergleichbarer Weise schon durchgeführt. Dies ist im Kapitel 4.2.4 genauer beschrieben. Aus der Sequenz der aufgenommenen Bilder lassen sich Rückschlüsse auf die Qualität der Schweißnaht und sogar auf die vollständige Penetration beider Werkstücke ziehen. Aus der Analyse dieser Sequenz könnte ein Algorithmus entwickelt werden, um Fehler mit Hilfe eines automatisierten Programms zu detektieren. Solch ein Code wäre für die Wirtschaftlichkeit von Produktionsprozessen ein großer Vorteil, da es zu Minimierung von Verschwendung und damit zu Kostenreduktionen kommt.

Potentielle Probleme für einen solchen Code sind neben technischen Hindernissen auch die Abhängigkeit der Fotoergebnisse von den Schweißparametern. Diese Interdependenz zwischen Aufnahmen und Schweißparametern bezieht sich vor allem auf die Wahl der Leistung und Vorschubgeschwindigkeit des Lasers. Neben diesen Parametern muss auch die Art der Schweißnaht bedacht werden. Eine grundsätzliche

⁵Hügel und Graf, *Laser in der Fertigung*.

Unterscheidung findet zwischen Tiefschweißung und Wärmeübergangsschweißung statt. Diese wird näher im Kapitel 2.1 erläutert. Technische Hindernisse gilt es vor allem im Bezug auf die Kamera zu erwarten. Neben Gain, Framerates und Belichtungszeiten, welche alle korrekt gewählt werden müssen, bedarf es auch einer Kamera, deren Aufnahmen von hoher Qualität sind. Diese Arbeit wird versuchen, sich mit diesen beiden Herausforderungen zu befassen.

2 Einleitung

2.1 Allgemeine Einführung in das Themenfeld

Die Anforderungen in der modernen verarbeitenden Industrie wachsen stetig. Vor allem die Automobilherstellung setzt auf hohe Standards. Um diese zu befriedigen, werden neue Methoden erforscht und benützt. Eine davon ist das Laserstrahlschweißen, da diese Technologie viele Vorteile mit sich bringt. Zu diesen gehört vor allem die hohe Intensität, welche auf einen kleinen Raum wirkt¹. Dadurch kommt es zu geringen lokalen Verformungen und zu kleinen Gefügestrukturveränderungen. Ein weiterer Vorteil des Laserstrahlschweißens ist die hohe Geschwindigkeit und die gute Automatisierbarkeit des Prozesses². Diese erhöhen die Wirtschaftlichkeit deutlich. Zusätzlich muss beim Laserstrahlschweißen das Werkstück nur von einer Seite zugänglich sein. Dies ermöglicht neue und komplexe Designmöglichkeiten. In Abbildung 2.1 sind Skizzen von möglichen Stoßformen zu sehen. Beim Schweißen mit einem Laserstrahl, vor allem in der Automobilindustrie, werden überwiegend Überlappungsstöße genutzt.

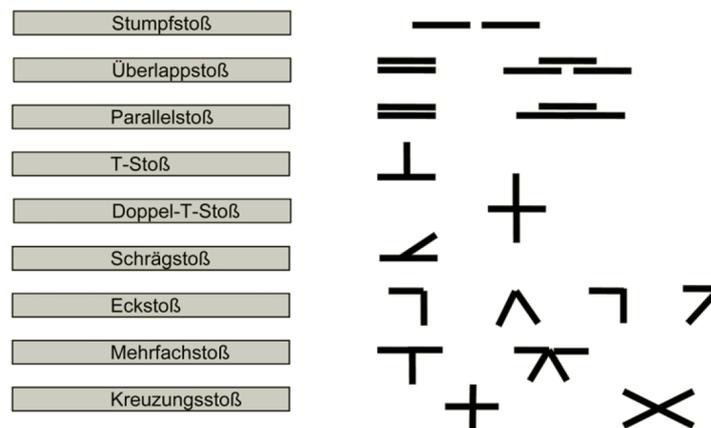


Abbildung 2.1: Verschiedene Stoßformen³

Der Überlappungsstoß ist für das Schweißen die einfachste Variante, bei der nur grobe Toleranzen eingehalten werden müssen. Eine weitere qualitätsverbessernde Maßnahme im Autobau ist der Einsatz von sogenannten Tailored-Blanks. Diese sind Werkstücke mit unterschiedlicher Dicke oder aus verschiedener Materialien und abgestimmten Geometrien, die miteinander verschweißt werden.

Diese Tailored-Blanks ermöglichen neben futuristischen Designmöglichkeiten auch eine deutliche Gewichtsreduktion, da das Bauteil lokal an die Beanspruchung an-

¹Ai u. a., „An optimization method for defects reduction in fiber laser keyhole welding“.

²Ahmed, *New developments in advanced welding*.

³Schiebold, *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Durchstrahlungsprüfung*, S. 239.

gepasst werden kann. Somit muss nicht das ganze Bauteil stabil und schwer gebaut werden, sondern es kann örtlich verstärkt werden. Durch diese lokalen Anpassungen in einem Werkstück können Sollbruchstellen und Knautschzonen integriert werden, die zu einem verbesserten Unfallverhalten führen. Mit der Gewichtsreduktion gehen auch geringere Abgasemissionen Hand in Hand⁴.

2.2 Problemstellung

Während des Schweißvorganges kann es insbesondere beim Laserstrahlschweißen zu Fehlern kommen. Dies wird ausführlich dargestellt in EN ISO 13919 für unterschiedliche Werkstoffe bzw. EN ISO 6520 für Schmelzschweißverfahren. Die Ursachen für Fehler beim Laserstahlschweißen sind für Katayama et al. das Zusammenspiel von verschiedenen Eingangsparameter, nämlich vor allem: Wellenlänge und Leistung des Lasers, Strahldurchmesser, Strahlqualität, fokussierte Leistungsdichte, Fokusabstand, Vorschubgeschwindigkeit, Materialeigenschaften, verwendetes Schutzgas, Wärmeübergangskoeffizienten und so weiter⁵.

Es gibt vier grobe Schweißfehler, die unterschieden werden: Buckelbildung, Spritzbildung, Porosität und eine unvollständige Verbindung. Die Buckelbildung und die Spritzbildung treten laut Katayama et al. erst bei hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten auf. Ersteres bei hoher, zweiteres bei niedriger Leistungsdichte. Porosität in der Schweißverbindung tritt bei tiefen Materialpenetrationen auf. Bei hohen Schweißgeschwindigkeiten entstehen sie als „eingefrorene“ Einschlüsse während des Erstarrens des Materials. Bei niedrigen Geschwindigkeiten als Bläschen, wenn das Keyhole zusammenfällt⁶. Dabei fällt etwas flüssiges Material in das Keyhole und verursacht einen Lufteinschluss. Der Laserstrahl wiederum trifft das verdeckende Material und verdampft Teile davon. Durch den Verdampfungsrückstoß wird die Porosität weiter in das Material gedrückt. Ebenfalls kann es zu Porenbildung kommen, indem Wasserstoff in das Material eingebracht wird. Dies geschieht vor allem bei Aluminiumlegierungen. Die genannten Fehler sind auch mit herkömmlichen Detektionsverfahren gut zu erkennen. Die größten Problem sind die Identifizierung von sogenannten „False Friends“.

Bei diesen handelt es sich um ein Problem, welches beim Überlappungsstoß auftritt. Ein False Friend kommt dadurch zustande, dass es keine schlüssige Verbindung zwischen den beiden Werkstücken gibt. Der Report „Robust “false friend” detection via thermographic imaging”⁷ befasst sich gezielt mit diesem Fehler. In Abbildung 2.2 ist der Querschnitt eines solchen im Vergleich mit einer vollständigen Schweißnaht abgebildet.

⁴Saludes Rodil u. a., „Laser welding defects detection in automotive industry based on radiation and spectroscopical measurements“.

⁵Katayama, Kawahito und Mizutani, „Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects“.

⁶Katayama, Kawahito und Mizutani, „Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects“.

⁷Heller u. a., „Robust “false friend”detection via thermographic imaging“.

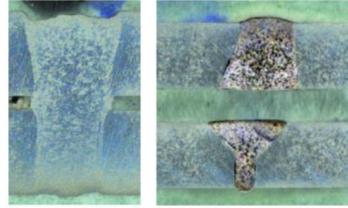


Abbildung 2.2: Querschnitt einer vollständigen Schweißnaht und eines False Friends⁸

Wie in der Abbildung zu erkennen, handelt es sich um einen Fehler, welcher von außen nicht sichtbar ist. Es kann bei einer Sichtprüfung von beiden Seiten eine Veränderung des Gefüges beobachtet werden, obwohl keine Verbindung besteht. Solche Fehler treten vor allem auf, wenn ein zu großer Abstand zwischen den beiden Werkstücken vorhanden ist. Dabei schmilzt der Laser sowohl das obere als auch das untere Werkstück auf, ohne eine Durchmischung der Schmelzbäder zu erreichen.

Da in der Autobranche verzinkte Bleche für die Tailored-Blanks verarbeitet werden, ist ein Zehntel-Millimeter Spalt zwischen den beiden Werkstücken vorgesehen⁹. Dieser gibt dem verdampfenden Zink die Möglichkeit zu entweichen, sobald die Zinkschicht durch die Lasereinwirkung verdampft wird. Der durch das „Keyhole“ entweichende Zinkdampf schirmt das Keyhole vor dem Laserstrahl ab. Dadurch kann die Penetration des Laserstrahls nicht mehr gewährleistet werden. Dieses Szenario ist schwer zu detektieren und daher ist der „False Friend“ einer der größten Probleme der Laserschweißtechnologie in der Automobilindustrie.

2.3 Forschungsfrage

Da das Laserstrahlschweißen ein automatisierter Prozess ist, muss auch die Fehlerdetektion angepasst werden. Um die Wirtschaftlichkeit zu garantieren, ist ein zeitgleicher und zerstörungsfreier Überprüfungsprozess erstrebenswert. Daher lautet die Forschungsfrage: Kann durch die Beobachtung des Schmelzbades, bei einer Schweißung, mit Hilfe einer NIR-Kamera ein Unterschied zwischen vollständiger und einer fehlerhaften Durchschweißung erkannt werden? Ist es damit möglich, die Detektion von Schweißfehlern beim Laserstrahlschweißen in Echtzeit und zerstörungsfrei zu gestalten?

⁸Heller u. a., „Robust ”false friend” detection via thermographic imaging“.

⁹Dorsch u. a., „Online NIR diagnostic of laser welding processes and its potential for quality assuring sensor systems“.

2.4 Lösungsansatz

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die Untersuchung des Schmelzbades der Schweißverbindungen mit Hilfe einer NIR-Kamera. Diese Kamera sollte ungefähr den Bereich von $< 2\mu\text{m}$ abdecken, da laut des Wienschen Verschiebungsgesetz (vgl. 3.2.5) das Emissionsmaximum von geschmolzenem Stahl in diesem Bereich liegt. Dieses Konzept wurde bereits erfolversprechend erprobt¹⁰ und die Ergebnisse zeigen das Potential, viele Schweißfehler schnell und kostengünstig zu detektieren. Im Kapitel 4.2.4 wird näher auf den Aufbau des erprobten Konzeptes eingegangen.

2.5 Verwendete Methode

Um den Lösungsansatz zu prüfen, werden in dieser Arbeit Versuche durchgeführt. Dafür wurde eine einfache Schweißgeometrie angelegt, die sowohl vollständige als auch unvollständige Penetration realisieren konnte. Diese Schweißungen wurden mit Hilfe eines Faserlasers, welcher an einem Roboter befestigt ist, durchgeführt. Die NIR-Kamera, welche auf das Schmelzbad gerichtet war, hat diesen Prozess aufgenommen. Anschließend wurden die aufgezeichneten Bilder ausgewertet und mit fehlerfreien Probeschweißungen verglichen. Somit konnte ein Muster für die Fehlererkennung generiert werden.

2.6 Aufbau und Struktur der Arbeit

Die Struktur dieser Arbeit orientiert sich an den Standards für wissenschaftliche Arbeiten an der TU Wien. Nach diesem einleitenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen behandelt, die zum besseren Verständnis der Inhalte führen. Hierzu gehört vor allem eine kurze Einleitungen in die Photonik und Lasermaterialbearbeitung.

Darauf folgt Kapitel 4.1, welches sich mit momentan genutzten Methoden zur Fehlerdetektion auseinandersetzt. Des Weiteren werden Forschungsarbeiten vorgestellt, welche sich mit denkbaren Alternativen beschäftigen (vgl. Kapitel 4.2). Diese alternativen Methoden finden zeitgleich zur Bearbeitung statt und nicht wie die gebräuchlichen Überprüfungsverfahren danach.

Das Kapitel 5 beschäftigt sich mit den Versuchen selbst. Dazu gehören sowohl Aufbau, Durchführung, Auswertung der Untersuchung als auch die Diskussion der Ergebnisse. Auch werden die Resultate mit der bereits existenten Arbeit zur Fehlererkennung mittels NIR-Kamera verglichen (vgl. Kapitel 8).

Das letzte Kapitel umfasst den Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen in dem Bereich der Fehlerdetektion bei Laserschweißverfahren mit besonderer Betrachtung der Entwicklungsmöglichkeiten der Überprüfung mithilfe einer NIR-Kamera.

¹⁰Dorsch u. a., „Online NIR diagnostic of laser welding processes and its potential for quality assuring sensor systems“.

3 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erläutert, auf den der Prozess des Laserstrahlschweißen beruht. Da diese Arbeit sich nicht mit der Grundlagenforschung auseinandersetzt, werden die Themengebiete nur grundsätzlich erklärt. Für detaillierte Erläuterungen werden die Bücher „Optik, Licht und Laser“¹ und „Laser Grundlagen und Anwendungen“² empfohlen. Aus den übereinstimmenden Grundlagenkapiteln dieser beiden Werke sind auch die folgenden Ausführungen, wenn nicht anders beschrieben, entnommen.

3.1 Das Licht und der Laser

Um das Schweißen mit einem Laser verstehen zu können, sind gewisse Grundlagenkenntnisse bezüglich eines Lasers nötig. Deshalb werden im folgenden Licht und Laserlicht beschrieben und darüber hinaus die Unterschiede zwischen beiden erklärt. Auch werden einige Begriffe erörtert, welche für das Verständnis eines Lasers wichtig sind. Wie eingangs erwähnt, handelt es sich hierbei nur um grobe Erklärungen der wissenschaftlichen Zusammenhänge, da eine fundierte Auseinandersetzung den Rahmen dieser Arbeit übersteigen und keine notwendigen Erkenntnisgewinne bringen würden.

3.1.1 Licht

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, was Licht eigentlich ist. Licht wird von einer Lichtquelle ausgestrahlt und bewegt sich daraufhin durch den Raum mit einer endlichen Geschwindigkeit. Ein allgemein bekanntes Beispiel hierfür ist das Sonnenlicht. Die Sonne dient als Licht- oder Energiequelle und das Licht bewegt sich von dieser aus durch das Weltall. Dieses ausgestrahlte Licht kann in zwei verschiedenen Formen betrachtet werden, entweder als Welle oder als Teilchen. Historisch wurde das Licht zuerst als Teilchen und später als Welle gesehen. Die moderne Quantenmechanik vereint beide Darstellungen. Die Welle ist eine elektromagnetische Welle, die den Maxwell-Gleichungen unterliegt und das Lichtteilchen wird als Photon bezeichnet. Da sich Licht, wie oben erwähnt, als Welle auffassen lässt, sind zwei Phänomene erwähnenswert: Lichtbeugung und Interferenz. Lichtbeugung bedeutet, dass Licht sich nicht nur in Strahlrichtung ausbreitet, sondern nach einem Hindernis abgelenkt wird. Somit kann ein ganzer Raum beleuchtet werden, auch wenn das Sonnenlicht nur durch ein Loch in diesen Raum eindringen kann. Interferenz ist die Überlagerung von zwei oder mehr Wellen nach dem Superpositionsprinzip. Im Fall der Welle werden die Amplitudenausschläge summiert und ergeben somit eine neu geformte Welle. Im Folgenden werden wir das Licht als Welle betrachten.

¹Meschede, *Optik, Licht und Laser*.

²Bäuerle, *Laser Grundlagen und Anwendungen in Photonik, Technik, Medizin und Kunst*.

Um eine Welle zu charakterisieren, benötigen wir mehrere Informationen. Als erstes wird die Geschwindigkeit definiert, mit der sich eine Welle fortbewegt. Diese Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lichtwelle im Vakuum ist die Lichtgeschwindigkeit c . Diese Lichtgeschwindigkeit wiederum ist das Produkt aus der Wellenlänge λ und der jeweiligen Frequenz f .

Die Wellenlänge λ ist eine der wichtigsten Größen, um Licht zu beschreiben. Das menschliche Auge ist in der Lage Wellenlängen zwischen 380 nm und 750 nm wahrzunehmen. Innerhalb dieses Gebietes erkennt das Auge je nach Wellenlänge verschiedene Farben. Diese werden auch Spektralfarben genannt. Außerhalb dieses Bereiches werden die Wellen nach Abbildung 3.1 charakterisiert. Für diese Arbeit besonders interessant ist die Wellenlänge von 1500 nm bis 2000 nm. Diese wird der thermischen Strahlung von Stahl bei seiner Schmelztemperatur zugeschrieben. Weiteres dazu wird im Kapitel 3.2.5 erläutert.

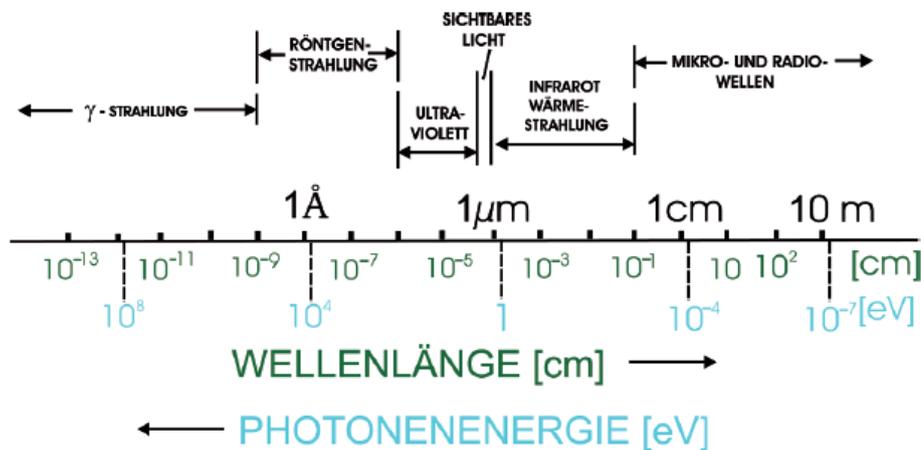


Abbildung 3.1: Wellenlänge und Photonenergie³

Zusammenfassend kann man feststellen, dass das sichtbare Licht, genau wie jede andere Welle, von einer Energiequelle emittiert. Diese Strahlung hat ein gewisses Frequenzspektrum und über die Lichtgeschwindigkeit kann die Wellenlänge ermittelt werden. Konventionelle Quellen emittieren elektromagnetische Strahlung in unterschiedliche Raumrichtungen, mit unterschiedlichen Wellenlängen und Phasen.

3.1.2 Hintergründe und verwendete Begriffe

Damit die jeweiligen Unterschiede zwischen Licht und Laser verstanden werden können, werden in diesem Kapitel einige Grundbegriffe erörtert.

³Bäuerle, *Laser Grundlagen und Anwendungen in Photonik, Technik, Medizin und Kunst*.

Bohrsches Atommodell

Das Bohrsche Atommodell ist ein weit verbreitetes und einfaches Modell über den Aufbau eines Atoms. Obwohl es diesen nicht in Gänze widerspiegeln kann, ist es für die Klärung der Funktionsart eines Lasers sehr aufschlussreich. In diesem Modell kreisen die Elektronen um einen Atomkern, welcher aus Protonen und Neutronen besteht. Diese Bewegung erfolgt auf Bahnen mit unterschiedlichen Bahnradien.

Das einfachste Atom, das H-Atom, besteht lediglich aus einem Proton im Kern und einem Elektron. Im Grundzustand nimmt das Elektron den Zustand niedrigster Energie ein, es befindet sich auf der Bahn mit dem geringsten Bahnradius ($n=1$). Damit ein Elektron auf die nächst höher Schale „angehoben“ ($n=2$) wird, benötigt es Energie. Diese benötigte Energie entspricht genau der Energiedifferenz zwischen den Zuständen $n=1$ und $n=2$. Diese Energie kann dem System über Absorption elektromagnetischer Strahlung zugefügt werden.

Die Energie einer elektromagnetischen Welle hängt von ihrer Frequenz, entsprechend $E = h \cdot \nu$, ab. Der Zusammenhang wird in Abbildung 3.1 gezeigt. Diese Photonenenergie muss der Differenz der Energiezustände $E_2 - E_1$ entsprechen, damit ein Photon ein Elektron aus dem Zustand 1 in den Zustand 2 anheben (anregen) kann. Übersteigt die zugeführte Photonenenergie die Bindungsenergie, so verlässt das Elektron das Atom und ein positiv geladener Atomrumpf bleibt zurück. Im Falle des H-Atoms besteht dieser nur aus einem Proton.

Der Vorgang der Anregung von einem Zustand niedriger Energie in eine Zustand höherer Energie durch eine elektromagnetische Welle wird als (stimulierte) Absorption bezeichnet.

Es existiert das Bestreben, stets den Zustand geringster Energie einzunehmen. Das Elektron springt wieder auf die unteren Bahnradien zurück. Durch dieses Zurückfallen auf ein niedrigeres Niveau wird die Differenz der Energiezustände in Form von elektromagnetischer Strahlung frei, wobei die Frequenz der Strahlung durch $h \cdot \nu = E_2 - E_1$ bestimmt wird. Zeitlich gesehen, geschieht dies zufällig. Es handelt sich dabei um die sogenannte spontane Emission.

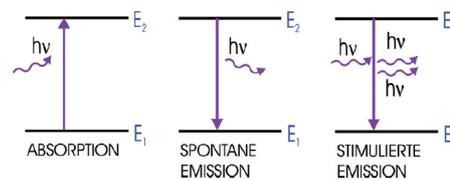
Es ist noch festzuhalten, dass nach diesem Verständnis des Emittierens und Absorbierens von Energie das Atommodell an seine Grenzen stößt. Weitere Modelle, wie zum Beispiel die Unschärferelation, werden hier nicht mehr angeführt, da sie keine wesentlichen Erkenntnisgewinne für das grundlegende Verständnis für das Laserstrahlschweißen mit sich bringen.

Spontane und stimulierte Emission

Im vorangestellten Kapitel ist bereits die spontane Emission qualitativ beschrieben worden. Durch den Sprung eines Elektrons auf ein niedrigeres Energieniveau wird eine elektromagnetische Welle emittiert. Die Lebensdauer des angeregten Zustands hängt vom betrachteten Material ab, in jedem Fall aber erfolgt der Übergang vom angeregten Zustand in einen Zustand niedrigerer Energie spontan, das heißt ohne äußere Einwirkung. Dieser Prozess wird als spontane Emission bezeichnet.

Sollte der Übergang von einem Energieniveau zum anderen erzwungen werden, so ist dies die stimulierte Emission. Dies geschieht durch ein einzelnes Lichtquantum,

welches in das System einstrahlt. Bei der Wechselwirkung eines Photons mit einem angeregten Atom wird das angeregte Atom dazu stimuliert, die gespeicherte Energie in Form eines Photons abzugeben. Das stimulierende Photon und das abgegebene Photon weisen exakt dieselbe Wellenlänge, Phase und Ausbreitungsrichtung auf. In Abbildung 3.2 sind die Zusammenhänge noch einmal zusammengefasst. Im linken Teilbild ist das Einstrahlen, beziehungsweise die Absorption eines Photons zu sehen. Diese bewirkt eine Anhebung des Energieniveaus von E_1 nach E_2 . Das Photon oder seine Energie ist hier als $h\nu$ bezeichnet. Diese Analogie bezieht sich auf die Formel $E = h\nu$, wobei E die Energie des Photons, h eine Naturkonstante namens Planck-Konstante und ν die Frequenz der Lichtwelle ist. Wie bereits erwähnt, ist die Energie des Photons gleich der Differenz der Energieniveaus der Elektronen.

Abbildung 3.2: Absorption und Emission⁴

Im mittleren Teilbild ist die spontane Emission skizziert. Hier ist der emittierte Lichtquant zu sehen, welcher auf den Energieniveausprung von E_2 nach E_1 zurückzuführen ist. Im rechten Teilbild ist die stimulierte Emission schematisch dargestellt. In der Skizze erkennt man die Anregung des Systems durch einen Lichtquant und die gleichzeitige Emission von vielen gleichen Lichtquanten.

Kohärenz

Ein weiterer wichtiger Begriff ist die kohärente beziehungsweise inkohärente Strahlung. Dabei wird weiter in räumlicher und zeitlicher Kohärenz unterschieden⁵. Eine Welle breitet sich kohärent aus, wenn es eine feste Phasenbeziehung zwischen zwei Teilwellen gibt. Einfacher erklärt dies die Analogie zu der Wasserwelle an einem Ufer. Wenn diese sich dem Ufer gleichmäßig nähert, das heißt überall gleich groß ist und den gleichen Abstand zum Ufer hat, ist die Welle kohärent. In diesem Falle räumlich. Zeitlich Kohärent wäre sie, wenn auf diese Welle eine weitere folgen würde, die wieder räumlich kohärent wäre und überall den gleichen Abstand zu der vorherigen Welle hätte.

Monochromasie

Monochromasie bedeutet Einfarbigkeit. Im Falle einer stimulierten Emission ist dies eine logische Folge. Da die Photonenenergie gleich groß zur Differenz der Energieniveaus ist, haben bei der stimulierten Emission alle emittierten Photonen fast

⁴Bäuerle, *Laser Grundlagen und Anwendungen in Photonik, Technik, Medizin und Kunst*.

⁵Eichler und Eichler, *Laser*, Kapitel 20.4 Kohärenz.

dieselbe Energie. Des Weiteren hängt die Wellenlänge, wie oben erwähnt, direkt mit der Energie der Photonen zusammen. Das bedeutet, durch die stimulierte Emission entstehen monochromatische Wellen. Technisch und physikalisch ist dies nicht ideal umsetzbar, bei kurzen und ultrakurzen Pulsen wird die Strahlung breitbandig im Bereich von 100 nm, bei nicht gepulsten Lasern kommt es ebenso zu geringen Abweichungen.

Zeitliche Lokalisierung

Zeitliche Lokalisierung bezieht sich darauf, wie lange eine Lichtquelle auf ein System einwirkt. Es gibt zwei grundsätzliche Modi: kontinuierliche und gepulste Laser. Während „continuous wave laser“ einen kontinuierlichen Laserstrahl erzeugen, haben gepulste Laser sehr geringe Bestrahlungszeiten. Moderne Laser erreichen hier Zeiten im Femtosekundenbereich. „Continuous wave laser“ sind 4-Niveau-Laser, während 3-Niveau-Laser nur im gepulsten Modus arbeiten können. Der Unterschied zwischen den beiden wird im Kapitel 3.1.3 behandelt.

3.1.3 Laser

Im Kapitel 3.1.1 wurde das Sonnenlicht genauer betrachtet. Ähnlich wie das von der Sonne emittierte Licht ist das einer Glühlampe. Dieses wird in verschiedene Richtungen ausgestrahlt und hat unterschiedliche Wellenlängen. Es handelt sich also um spontane Emissionen. Im Vergleich dazu besitzt ein Laserstrahl folgende Merkmale: er ist in eine Richtung gebündelt, monochrom, kohärent und kann gepulst oder kontinuierlich sein. Dies wird sowohl durch die stimulierte Emission als auch durch den Aufbau eines Lasers erreicht. Der Unterschied zwischen dem Licht einer Glühlampe und dem eines Laserstrahls ist in Abbildung 3.3 skizziert. In dieser erkennen wir, in der oberen Teilabbildung, das von einer Glühlampe ausgestrahlte Licht. Dies ist charakterisiert durch die unterschiedlichen Farben und Richtungsvektoren der Wellen. Im unteren Teil der Abbildung ist ein Laser zu sehen, der gebündelt in eine Richtung Wellen emittiert, welche wie oben gesagt kohärent und monochrom sind.

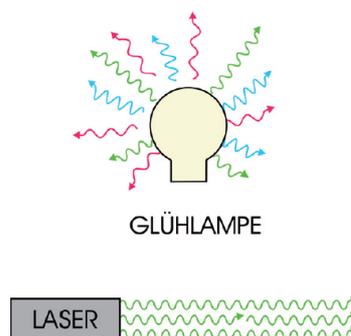


Abbildung 3.3: Licht und Laser⁶

Interferenz

Das Phänomen der Interferenz wurde bereits erwähnt. Die Interferenz ist eine logische Folge der Lichtbeugung nach einem Hindernis. Durch das auf Wellen anwendbare Superpositionsprinzip überlagern sich die Amplituden von zwei oder mehr Wellen. Wenn zwei Lichtstrahlen auf den selben Projektionspunkt gerichtet werden, summieren sich die Intensitäten und ein augenscheinlich heller scheinender Projektionspunkt ist sichtbar (vgl. Formel 3.1).

$$I_{\text{gesamt}} = I_1 + I_2 \quad (3.1)$$

Sollten zwei Laserstrahlen auf einen Punkt gerichtet sein, summieren sich die Feldstärken. Dies wird in 3.2 deutlich, wobei I die Intensität und E die Feldstärken der einzelnen Laserstrahlen sind.

$$I_{\text{gesamt}} \propto (E_1 + E_2)^2 \quad (3.2)$$

Durch die Kohärenz überlagern sich an manchen Stellen die Wellenhöhen und Wellentiefen, sodass es Bereiche gibt, in dem die Intensität des Lichtes höher, und andere, in denen sie tiefer ist. Dies wird in Formel 3.3 deutlich.

$$(E_1 + E_2)^2 = E_1^2 + E_2^2 + \underbrace{2 \cdot E_1 \cdot E_2}_{\text{Interferenz}} \quad (3.3)$$

Diese Ausschläge können größer beziehungsweise kleiner sein, als die des einzelnen Strahles, indem die Extremstellen zusammenfallen oder sie können sich zur Gänze ausgleichen. Dieser Unterschied hängt von der Phasenverschiebung der einzelnen Wellen ab. Daher entsteht ein Interferenzmuster nur, wenn die Strahlen kohärent sind.

Prinzipieller Aufbau eines Lasers

Um einen Laserstrahl mit den oben genannten Eigenschaften zu erhalten, wird ein spezieller Aufbau benötigt. Dieser Aufbau besteht prinzipiell aus einem laseraktiven Medium, einer Energiepumpe und einem optischen Resonator.

Die Energiepumpe führt dem laseraktiven Medium Energie zu, um eine Besetzungsinversion zu erzeugen. Dies kann in unterschiedlichen Formen geschehen, zum Beispiel in Form von elektromagnetischer Strahlung, elektrischer Energie oder die Energie kann auch chemisch zugeführt werden. Das Medium wiederum, welches in allen Aggregatzuständen vorliegen kann, nimmt diese Energie auf. Der optische Resonator besteht aus zwei Spiegeln, welche sich gegenüberstehen und das laseraktive Medium befindet sich dazwischen. Einer der beiden Spiegel reflektiert die auf ihn gerichtete Strahlung, während der andere für die gewünschte Wellenlänge teildurchlässig ist. Beide Spiegel haben einen Reflexionsgrad $r < 1$ (vgl. Kapitel 3.2.1).

⁶Bäuerle, *Laser Grundlagen und Anwendungen in Photonik, Technik, Medizin und Kunst*.

Die Differenz, also die Verluste, müssen durch die Verstärkung im System kompensiert werden. Dies wird in der Gleichung 3.4 deutlich, welche auch als die Lasergrundgleichung bezeichnet wird und eine der Grundvoraussetzungen für einen funktionierenden Laser darstellt.

$$R_1 \cdot R_2 \cdot \underbrace{e^{(\alpha-\beta) \cdot z}}_{>1} > 1 \quad (3.4)$$

In dieser Gleichung sind R die Reflexionsgrade der Spiegel, α der Absorptionskoeffizient, β der Verstärkungsfaktor und z die Länge des laseraktiven Mediums, wenn die Spiegel in geringer Entfernung zu diesem stehen. Als Grundvoraussetzung muss sowohl die gesamte Gleichung größer eins sein, als auch der Verstärkungsanteil $e^{(\alpha-\beta) \cdot z}$.

Die Wahl der jeweiligen Medien, die Art des Energietransfers und die Möglichkeiten den optischen Resonator zu gestalten, ergeben eine Vielzahl an Möglichkeiten für diverse Lasersysteme. Alle besitzen unterschiedliche Eigenschaften, wie zum Beispiel verschiedene Intensität, Wellenlängen, bessere oder schlechtere Kohärenz und so weiter. Die genauen Unterschiede werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt, da dieses Kapitel nur einen kleinen Einblick geben sollte, wie ein Laserstrahl generiert werden kann. Trotzdem wird ein Lasersystem im nächsten Abschnitt erklärt, da es sich um einen der geläufigsten Ansätze handelt.

Welcher Laser und welche Komponenten für diese wissenschaftliche Arbeit und den Versuch benutzt wurden, wird in dem Kapitel 5 beschrieben.

3-Niveau-Laser

Wie bereits in Kapitel 3.1.2 Zeitliche Lokalisierung erwähnt, können 3-Niveau-Laser nur zeitlich gepulst, 4-Niveau-Laser auch im kontinuierlichen Modus arbeiten. Da aber das Prinzip von den Systemen mit mehreren Energieniveaus zu dem 3-Niveau-Lasern nur eine logische Erweiterung ist, wird an dieser Stelle ausschließlich der 3-Niveau-Laser beschrieben.

Ähnlich wie im Kapitel 3.1.2 dargestellt, wird das System vom Grundzustand 1 auf den Zustand 2 gehoben. Dies geschieht mit Hilfe der Energiepumpe. Von diesem Energiezustand aus relaxiert das System spontan auf den niedrigeren Zustand 3, dessen Energiegehalt größer ist als der Zustand 1. Zwischen dem oberen und unteren Laserniveau ist nun eine Besetzungsinversion hergestellt. Das bedeutet, im höheren Zustand befinden sich mehr Teilchen als im energetisch niedrigeren Zustand 1.

Mit dieser Besetzungsinversion ist eine Grundbedingung für die Lasertätigkeit hergestellt. Die andere Bedingung war die oben erwähnte nötige Verstärkung, um die Verluste auszugleichen (vgl. Formel 3.4).

Durch stimulierte Emission erfolgt der Übergang zum niedrigsten Energieniveau und damit die Erzeugung von Strahlung.

Anzumerken ist, dass die Emission zu diesem Zeitpunkt noch nicht in eine einzige Richtung strahlt. Dies erfolgt über den Resonator, welcher damit auch für die Strahlqualität verantwortlich ist. Die Strahlqualität K ist, wie die Formel 3.5 zeigt, der Kehrwert der Beugungsmaßzahl M^2 und damit auch das Verhältnis der Diver-

genzwinkel vom idealen Gaußstrahl zu einem realen Strahl.

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\varphi_{Gauss}}{\varphi_{real}} \quad (3.5)$$

3.2 Wechselwirkung zwischen Laser und Materie

Die Einwirkung eines Laserstrahls auf Materie kann verschiedene Wechselwirkungen hervorrufen. Diese hängen wiederum von verschiedenen Faktoren wie Intensität, Bestrahlungsdauer und so weiter ab. Da sich diese Arbeit mit dem Themenfeld des Laserstrahlschweißens auseinandersetzt, werden ausschließlich die für diesen Vorgang genutzten Wechselwirkungen erläutert.

3.2.1 Reflexion, Absorption und Transmission

Folgendes Kapitel beruht auf dem Grundlagenwerk „Laser in der Fertigung“⁷. Wenn ein Laserstrahl auf Materie trifft, kann dieser entweder seine Leistung in die Materie einbringen, diese reflektieren oder transmittieren. Diese Anteile werden im Absorptionsgrad a , im Reflexionsgrad r und im Transmissionsgrad τ beschrieben. Der Zusammenhang zwischen den Verhältnissen wird in Formel 3.6 gezeigt.

$$a + r + \tau = 1 \quad (3.6)$$

Die Gleichung 3.6 gilt für alle Materialien. Die Verhältnissgrößen sind jedoch keine reinen Materialeigenschaften. Sie hängen von der Art des einstrahlenden Lasers, seiner Wellenlänge, der Polarisation, dem Einfallswinkel aber auch von den Stoffwerten des Materials, seiner Temperatur und der Oberflächenbeschaffenheit ab. Bei Festkörpern wird in der theoretischen Analyse der Transmissionsgrad $\tau = 0$ gesetzt. Warum dies geschieht, wird am Ende dieses Kapitels ersichtlich.

Interessant ist auch die Betrachtung der Leistung P . Aus der Energieerhaltung folgt 3.7.

$$P_a + P_r + P_\tau = P \quad (3.7)$$

In dieser Gleichung steht P für die Gesamtleistung des eintreffenden Laserstrahls, P_a für den absorbierten, P_r für den reflektierten und P_τ für den transmittierten Anteil. Teilen wir diese nun durch die Leistung P , folgt daraus die Gleichung 3.8.

$$\frac{P_a}{P} + \frac{P_r}{P} + \frac{P_\tau}{P} = 1 \quad (3.8)$$

Diese erinnert stark an Gleichung 3.6. Wird nun nur die absorbierte Leistung betrachtet, da diese für das Schweißen von besonderem Interesse ist, ergibt sich die Definition des Einkoppelgrades η_A .

$$\frac{P_a}{P} = \eta_A \quad (3.9)$$

⁷Hügel und Graf, *Laser in der Fertigung*.

Es ist wichtig zu erkennen, dass nur im Fall eines einmalig auftreffenden Laserstrahls der Einkoppelgrad und der Absorptionsgrad gleich sind. Bei einer kontinuierlichen Bearbeitung eines Werkstückes tritt eine Verlustleistung P_V auf. Diese ist ein Resultat aus der über die Grenzflächen der Bearbeitung in das Werkstück fließende Wärmemenge pro Zeiteinheit. Sie hängt also von der Temperaturdifferenz zwischen bearbeitetem und nicht bearbeitetem Werkstück, von thermophysikalischen Stoffwerten und der Geometrie ab. Weitere Verluste sind auf die thermische Strahlung und die konvektive Wärmeabfuhr der Wärmeeinflusszone (WEZ) zurück zu führen (vgl. Kapitel Wärmestrahlung der Wärmeeinflusszone 3.2.5).

Um die Energie zu berechnen, die durch P_a eingeführt wird, ist das Beersche Gesetz⁸ Formel 3.10 wichtig. Hier wird der Absorptionskoeffizient α angeführt, welcher bereits in der Formel 3.4 benötigt wurde. Wobei I die Laserstrahlenintensität ist und z die Eindringtiefe.

$$\frac{dI(z)}{dz} = -\alpha * I(z) \quad (3.10)$$

Der Absorptionskoeffizient α hängt wiederum von dem Absorptionsindex und der Materialeigenschaft des Brechungsindex ab. Die rechte Seite von 3.10 stellt den als Wärme freigesetzte Energiebetrag je Volumeneinheit dar. Da in das Werkstück selber die Energie $(1 - r) * I$ eindringt, lässt sich so auch die Strahlenintensität berechnen.

$$I(z) = (1 - r) * I * e^{-\alpha * z} \quad (3.11)$$

Die Abbildung 3.4 zeigt den Verlauf von 3.10.

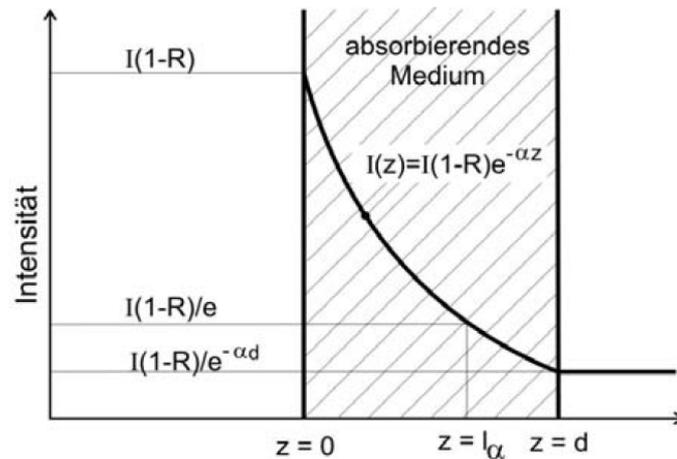


Abbildung 3.4: Beersches Gesetz⁹: Absorbierte Intensität nach Eindringtiefe z

⁸Hügel und Graf, *Laser in der Fertigung*, S.119.

In diesem Diagramm ist die absorbierte Intensität über der Eindringtiefe aufgetragen. Wie zu erwarten war, ist bei $z = 0$ (Oberfläche des Werkstückes) die absorbierte Intensität am höchsten und entspricht $I * (1 - r)$, wobei I die Intensität des Laserstrahles ist. Der niedrigste absorbierte Wert liegt bei $z = d$, wobei d die Dicke des Werkstückes und damit das Ende dieses gemeint ist. Der dritte eingezeichnete Punkt beschreibt den, an dem die Intensität auf den Bruchteil von $\frac{1}{e}$ abgesunken ist. Dieser wird mit $z = l_a$, der Absorptionslänge oder optische Eindringtiefe, charakterisiert, wobei (3.12) gilt.

$$l_a = \frac{1}{\alpha} \quad (3.12)$$

Sollte nun $l_a \ll d$ sein so folgt daraus, dass der Transmissionsgrad τ so gering ist, dass die Transmission als 0 angenommen werden kann. Da dies für metallische Werkstücke immer erfüllt ist, können wir den Transmissionsgrad $\tau = 0$ setzen und bestätigen damit die Aussage, welche eingangs des Kapitels postuliert wurde.

3.2.2 Thermische Prozesse

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass der Laserstrahl bei metallischen Werkstoffen entweder absorbiert oder reflektiert wird. Die Absorptionsenergie führt zu einer schnellen Erwärmung des Werkstücks. Die folgenden Aussagen sind Auszüge aus dem Buch Bauerle Laser 2008.

Die schnelle Erwärmung liegt im Bereich von 10^{-13} bis 10^{-12} Sekunden. Hinzu kommt die langsame und diffuse Ausbreitung der Wärme im festen Material. Das bedeutet, ähnlich zu der im vorigen Kapitel beschriebenen Einwirkung des Lasers in z -Richtung, gibt es auch ein bestimmte „Tiefe“, welche die Wärme in einer gewissen Einwirkzeit des Lasers τ_l erreicht. In der vereinfachten eindimensionalen Darstellung kann so die thermische Diffusionslänge l_T eingeführt werden. Die Formel 3.13 beschreibt den mathematischen Zusammenhang zwischen der Wärmediffusivität D und der Zeit τ_l . Die Wärmediffusivität D ist eine Materialgröße, die sich aus der Wärmeleitfähigkeit λ , der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c entsprechend Formel 3.14 ergibt. Die Wärmediffusivität wird in $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ gegeben und beträgt beispielsweise für Aluminium 98,8; für X12CrNi18,8 (Stahl 1.4300) 3,8 und für Porzellan 0,4.

$$l_T = \sqrt{D * \tau_l} \quad (3.13)$$

$$D = \frac{\lambda}{\rho * c} \quad (3.14)$$

Für feste Stoffe kann hier die Eindringtiefe der Wärme $h \approx l_T$ gesetzt werden. Diese hängt nun entsprechend 3.13 sowohl von der Zeit als auch vom Material ab.

⁹Hügel und Graf, *Laser in der Fertigung*, S.119.

Da Eindringtiefe und Temperatur mit Laserleistung und Einwirkzeit korrelieren, können verschiedene Bearbeitungsverfahren mit einem Laser realisiert werden. Es kann bei kurzem τ_l nur die Oberfläche bearbeitet werden und die übrige Materie unbeeinflusst bleiben oder bei langem τ_l und hoher Leistung das gesamte Material bis zur Verdampfung erwärmt werden. Einwirkzeit und Laserleistung sind nicht die einzigen Parameter, welche einen Einfluss auf das Laserbearbeitungsergebnis haben. Es ist viel mehr ein komplexes Zusammenspiel von verschiedenen Faktoren und Funktionsmechanismen.

3.2.3 Plasma und Plasmaabschirmung

Ein weiterer wichtiger Funktionsmechanismus der Laserstrahlbearbeitung ist die Plasmabildung. Folgende Beschreibung des Plasmas entstammt aus: „Laser Grundlagen und Anwendungen in der Photonik, Technik, Medizin und Kunst“¹⁰.

Bei Plasma handelt es sich um ein Gas, welches aus freien Elektronen, positiv geladenen Ionen und neutralen Atomen beziehungsweise Molekülen in unterschiedlich angeregten Zuständen besteht. Das Leuchten dieses Gases ist ein Indikator für die Emission von elektromagnetischer Strahlung. Diese wiederum wird durch die Übergänge von Atomen in niedrigere Zustände und durch die Rekombination von freien Elektronen mit den positiv geladenen Ionen erzeugt. Der Ionisierungsgrad des Plasmas ist das Verhältnis von freien Elektronen zu freien Elektronen und neutralen Teilchen.

Ein Laser erzeugt solche Plasmen mit zwei verschiedenen Mechanismen. Der erste ist die direkte Ablation, beziehungsweise Verdampfung von fester oder flüssiger Materie. Dies geschieht nur bei hohen Intensitäten des Laserstrahles. Während der Verdampfung der Materie werden die Elektronen aufgrund des starken elektrischen Feldes direkt aus den Atomen beschleunigt und es entstehen freie Elektronen und positiv geladene Ionen. Ein zusätzlicher Effekt des elektrischen Feldes ist die Anregung der Atome und Moleküle auf ein höheres Energieniveau in dem Gas. Der zweite Funktionsmechanismus zur laserinduzierten Erzeugung von Plasma, kann mit einem lawinenartigen Effekt verglichen werden¹¹. Bei diesem werden bereits vorhandene freie Elektronen beschleunigt, bis diese mit einem Atom kollidieren. Bei dieser Kollision werden mehrere Elektronen aus dem Atom „gestoßen“. Dadurch entsteht ein exponentielles Wachstum an neuen freien Elektronen und ionisierten Atomen. Dieses exponentielle Wachstum führt zu dem Vergleich mit dem oben beschriebenen lawinenartigen Effekt.

Laserinduzierte Plasmen sind in der Materialverarbeitung von großer Bedeutung. Wegen des hohen Reflexionsgrades r von Metallen findet eine effiziente Kopplung der Laserstrahlung an den Werkstoff durch zwei Mechanismen statt. Der erste ist die sogenannte Mehrfachreflexion, in der der Laserstrahl im Keyhole (siehe Kapitel

¹⁰Bäuerle, *Laser Grundlagen und Anwendungen in Photonik, Technik, Medizin und Kunst*, Kapitel 5: Plasmen.

¹¹Breitling, *Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung*, S.36.

3.2.4) mehrfach reflektiert und somit fast gänzlich vom Material aufgenommen werden kann. Die zweite Möglichkeit ist durch die Bildung eines Plasmas, dies ist erst bei höheren Energiedichten der Fall. Dieses Plasma absorbiert die Laserstrahlung fast komplett und erst durch die Erhitzung des Plasmas wird auch das Material erwärmt.

Sollte allerdings die Intensität des Lasers steigen und damit der oben beschriebene lawinenartige Anstieg von freien Elektronen einen kritischen Wert übertreffen, so steigt der Reflexionsgrad r auf eins. Dieser Schwellwert wird als kritische Elektrodendichte N_c beschrieben. Dabei würde die gesamte Leistung des Lasers reflektiert und keine Energie in den zu bearbeitenden Körper gelangen. Dies wird als Plasmaabschirmung bezeichnet.

3.2.4 Laserstrahlschweißen

Die wichtigsten Begriffe und Zusammenhänge bezüglich des Laserstrahlschweißens werden von Hügel und Graf 2009 im Kapitel 4.2 behandelt.

Die Stelle, an dem der Laserstrahl auf das Werkstück trifft, wird lokal erwärmt. Durch die Erwärmung wird das Werkstück an diesen Stellen ein anderes Gefüge und andere Eigenschaften als der Rest des Werkstückes aufweisen. Diese Zone heißt Wärmeeinflusszone (WEZ). Die Größe dieser Zone hängt von der eingebrachten Streckenenergie und einiger Materialeigenschaften, wie Wärmediffusivität, Geometrie und so weiter, ab. Durch die Fokussierung des Laserstrahles ist die Wärmeeinflusszone im Vergleich zu anderen Schweißverfahren sehr klein. Dies ist einer der großen Vorteile des Laserstrahlschweißens. Weitere Vorteile sind die hohen Schweißgeschwindigkeiten, die lokale Erwärmung, welche zu geringeren Materialbelastungen und Verformungen führen, und die Möglichkeit den gesamten Laser-schweißprozess zu automatisieren.

Grundsätzlich lassen sich beim Laserstrahlschweißen zwei verschiedene Modi realisieren, das Wärmeleitungs- und das Tiefschweißen. Das Wärmeleitungsschweißen findet unter oder nahe dem Siedepunkt des zu bearbeitenden Materials statt. Es wird verwendet, um dünne Bleche miteinander zu verschweißen. Durch die niedrigen Temperaturen kommt es nicht zur Verdampfung des Materials und die Schweißung ist quantitativ breiter als tief.

Im Gegensatz dazu steht das Tiefschweißen. Dieses findet bei höheren Temperaturen als das Wärmeleitungsschweißen statt. Diese Temperaturen übersteigen den Siedepunkt und es kommt zu Verdampfungen des Materials. Das verdampfte Material tritt über eine Dampfkapillare aus dem Werkstück.

Der Unterschied zwischen den beiden Modi ist in Abbildung 3.5 zu erkennen.

In dieser Abbildung wird nicht nur der oberflächliche Unterschied deutlich, sondern es wird auch der veränderte Querschnitt gezeigt. Dieser ist beim Wärmeleitungsschweißen verhältnismäßig breiter als tief. Beim Tiefschweißen ist der Querschnitt

¹²Hügel und Graf, *Laser in der Fertigung*, S.215.

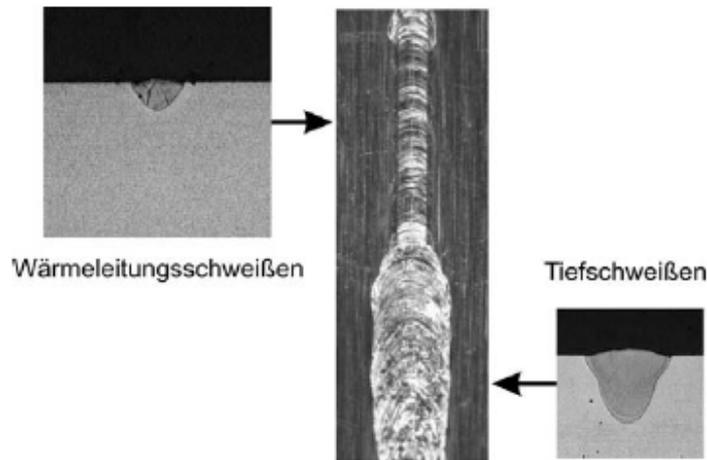


Abbildung 3.5: Unterschiedlich zwischen Tief- und Wärmeleitungsschweißen¹²

untertrieben dargestellt. Es können Breiten zu Tiefen-Verhältnisse um die 1:10 auftreten. Um dies zu verdeutlichen ist in Abbildung 3.6 eine solche Tiefschweißung zu sehen. Dieses Schlibbild zeigt eine Schweißung des Institutes für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik der TU Wien. Sie wurde mit 10 kW Leistung von einem CO₂-Laser bei einer Probendicke von 10 mm gefertigt.



Abbildung 3.6: Schlibbild einer Tiefschweißung

Um genauer auf die Geometrie einzugehen, ist in Abbildung 3.7 der Querschnitt einer Tiefschweißung zu sehen. Das Verfahrensprinzip des Tiefschweißens beruht auf dem Keyhole. Durch dieses gelangt der Laserstrahl in das Werkstück und wird durch mehrfache Reflexion absorbiert. Das bedeutet, wie im Kapitel 3.2.3 erwähnt, dass große Teile der Leistung des Laserstrahls vom Material reflektiert werden. Da diese aber im Keyhole wieder an die gegenüberliegende Wand reflektiert wird, absorbiert diese Stelle wiederum Teile des Laserstrahls. Dies wiederholt sich so oft, bis der Laserstrahl fast gänzlich absorbiert wurde. Die nicht absorbierte Leistung wird, sollte der Fall einer vollständigen Penetration vorliegen, unten wieder ausgestrahlt. Die vom Material absorbierte Leistung wird in Wärme umgewandelt und durch konvektiven und konduktiven Wärmetransport in das Material geführt. An-

ders als die Tiefschweißung ist die Wärmeleitungsschweißung. Diese ist einfacher, da sich keine Dampfkapillare bildet und somit kein Keyhole vorhanden ist. Die beiden Materialien verbinden sich nur aufgrund der Wärmeausbreitung innerhalb des Materials. Damit ist das Verfahren vergleichbar mit dem Schweißprozess mit einer Oberflächenwärmequelle. Der Wärmetransport erfolgt nur durch Wärmeleitung. Das Tiefschweißen ist vergleichbar mit einer 3-D-Wärmequelle - im Dampfkanal wird über die gesamte Länge hinweg Laserleistung absorbiert und damit Wärme an das Werkstück abgegeben. Damit kann dann wesentlich schneller geschweißt werden.

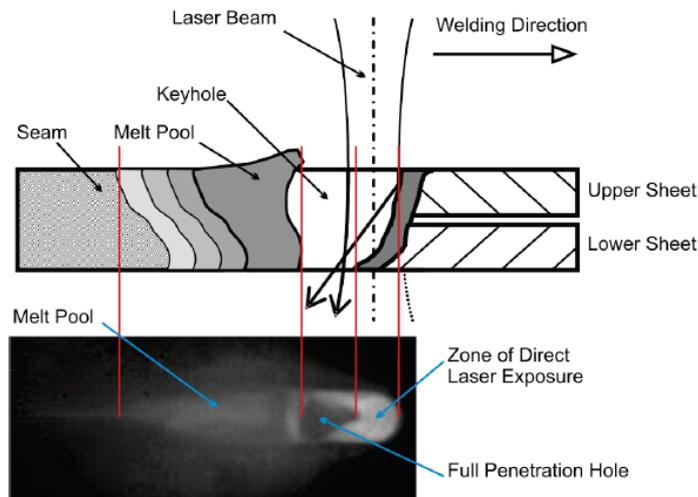


Abbildung 3.7: Schweißumgebung beim Tiefschweißen¹³

Die Abbildung 3.7 zeigt zwei Bilder. Das obere ist eine Querschnittsskizze der Wärmeeinflusszone und das untere die Aufnahme aus der Vogelperspektive. Das Schmelzbad (eng. Melt Pool) ist sowohl vor dem eintreffenden Laserstrahl (eng. Laser Beam) als auch danach zu erkennen. Die verschiedenen Schattierungen in der Querschnittsaufnahme symbolisieren das Abkühlen der Schmelze. Das Keyhole, welches in und nach dem Laserstrahlbereich zu sehen ist, lässt sich in beiden Bildern gut erkennen. Diese Abbildung zeigt gut, wie beim Tiefschweißen eine fehlerfreie Schweißung mit voller Penetration erreicht werden sollte. Auf mögliche Fehlerquellen bei diesem Verfahren, vor allem im Bezug auf False Friends, wurde bereits im Kapitel 2.2 näher eingegangen.

In der Industrie wird vor allem das Verfahren der Tiefschweißung angewandt. Bei diesem lassen sich alle Vorteile des Laserstrahlschweißens umsetzen. Diese Arbeit setzt sich trotzdem mit beiden Modi auseinander.

¹³Abt, „Real Time Closed Loop Control of Full Penetration Keyhole Welding with Cellular Neural Network Cameras“.

3.2.5 Wärmestrahlung der Wärmeeinflusszone

Die Stelle, welche vom Laser erhitzt wird, emittiert Strahlung (siehe Kapitel 2.1). Diese wiederum ist charakterisiert durch ihre Wellenlänge. Die Wellenlänge dieser Wärmestrahlung kann durch das Plancksche Strahlungsgesetz 3.15 beschrieben werden¹⁴.

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (3.15)$$

Hierbei ist $L_{\lambda}(\lambda, T)$ die Ausstrahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Temperatur, c_1 und c_2 sind Naturkonstanten, λ die Wellenlänge und T die Temperatur. Dieser Zusammenhang ist auch in Abbildung 3.8 skizziert.

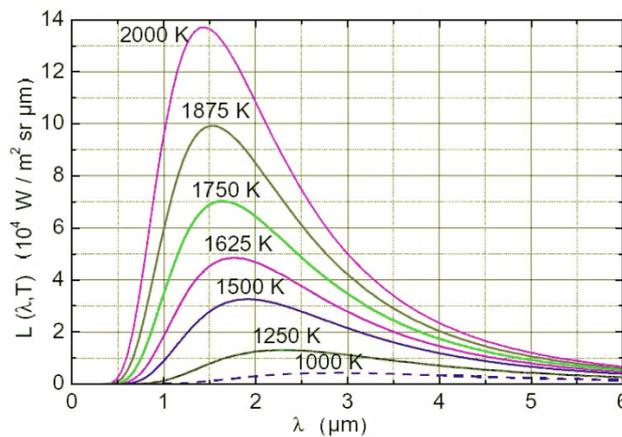


Abbildung 3.8: Wellenlänge der emittierten Strahlung eines schwarzen Körpers¹⁵

In Abbildung 3.8 sind die einzelnen Lösungen des Planckschen Strahlungsgesetzes für bestimmte Temperaturen über der Wellenlänge aufgetragen. Diese Lösungen beziehen sich auf den sogenannten schwarzen Körper. Dieser ist ein Referenzobjekt, der sämtliche Strahlung jeglicher Wellenlänge vollständig absorbiert und auch ideal emittiert. Das heißt, er weist die maximale Emissivität auf und die Strahlung ist isotrop. Die dargestellten Lösungen besitzen bei kleinem λ eine starke Steigung bis sie das Maximum erreichen. Nach diesem fallen die Kurven langsam aber stetig ab bis sie bei $\lambda \rightarrow \infty$ gegen den Grenzwert 0 tendieren. Je höher die Temperaturen desto größer wird der Maximalwert und desto mehr verschiebt sich dieser in Richtung des kleineren λ . Diese Verschiebung wird in dem Wienschen Verschiebungsgesetz ausgedrückt, welches nach Wilhelm Wien benannt wurde.

Mit diesen Zusammenhängen lässt sich also auf die Wellenlänge der thermischen Ausstrahlung der Wärmeeinflusszone rückschließen. Da Stahl eine Schmelztempe-

¹⁴Baehr und Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, Kapitel 5 Wärmestrahlung.

¹⁵Wien, *Plancksches Strahlungsgesetz*.

ratur von circa 1500 -1700 K hat, liegt das Maximum der Ausstrahlung bei ungefähr 1,5 - 2 μm . Diese Wellenlänge wird dem Nahe-Infrarot Spektrum zugeordnet, wie auch in Abbildung 3.1 zu sehen war und die Wahl der NIR-Kamera erklärt.

4 Stand des Wissens

Im Folgenden werden die bekanntesten Möglichkeiten zur Detektion von Schweißfehlern diskutiert. Grundsätzlich wird zwischen zwei verschiedene Arten der Detektion von Schweißfehlern unterschieden, die destruktiven und die zerstörungsfreien Verfahren. Da destruktive Verfahren, wie zum Beispiel der Kerbschlagbiegeversuch, nach DIN EN ISO 148-1, DIN EN 875 und DIN EN ISO 9016, das Werkstück zerstören und dadurch unbrauchbar machen, wird im Folgenden nur ein Überblick dieser Maßnahmen gegeben.

Zu den wichtigsten zerstörenden Prüfungen gehören der oben erwähnte Kerbschlagbiegeversuch, der Querszugversuch (DIN EN ISO 4136), der Längszugversuch (DIN EN ISO 5178), die Kreuzzugprüfung (DIN EN ISO 9018), die Biegeprüfung (DIN EN ISO 5173), die Bruchprüfung (DIN EN ISO 9017), die Härteprüfung (DIN EN ISO 9015-1,-2) und die der Ätzungen für mikro- und makroskopische Untersuchung nach DIN CEN ISO/TR 16060 und DIN SPEC 8548.

Idealerweise entstehen Fehler gar nicht oder werden unmittelbar detektiert. Daher sind die gebräuchlichen Testvarianten jene, die zerstörungsfrei und direkt nach dem Schweißen durchgeführt werden können. Im ersten Teil dieses Kapitels werden diese näher erläutert. Im zweiten Teil handelt es sich um bis dato theoretische Ansätze, die aber schon während der Bearbeitung eine Analyse ermöglichen würden.

Weiters wichtig für die Erkennung von Schweißfehlern vor allem in der Autoindustrie ist, dass der Test auf einer Seite des Werkstückes durchgeführt werden kann, er berührungslos und im Idealfall bildgebend ist. Auf diese Verfahren wird deshalb ein besonderes Augenmerk gelegt.

Außerdem werden die verschiedenen Methoden primär auf die Möglichkeit False Friends zu detektieren getestet.

Welches Prüfverfahren angewandt werden muss, hängt von dem Werkstoff und Art der Schweißverbindung ab. Dieser Zusammenhang ist in der DIN EN ISO 17635 abgebildet. Die Normen, welche das Prüfverfahren selbst beschreiben, werden in den einzelnen Unterkapiteln genannt.

4.1 Nachträgliche Überprüfungsverfahren

4.1.1 Sichtprüfung

Die Sichtprüfung ist die einfachste und kostengünstigste Möglichkeit, Schweißfehler zu erkennen. Die Verfahrensnorm für Sichtprüfungen ist die DIN EN ISO 17637.

Bei dieser Methode testet eine Person nach der Bearbeitung das Werkstück mit Hilfe seiner Augen. Als Hilfsmittel gelten im Allgemeinen vordefinierte Maße, Lupen, Lichtquellen (Lampen oder Leuchten), Kontrollspiegel und Lehren. Für Spezialfälle gibt es weitere Möglichkeiten, wie zum Beispiel die Mikroskoptechnik oder die Endoskopie. Beide sind nicht geeignet für die Untersuchung von Schweißnähten und werden daher vernachlässigt.

Sichtprüfungen unterliegen einem strengen Protokoll. Die Prüfproblemstellung muss

genau definiert werden, genauso wie die Prüfplanung und Durchführung festgelegt werden muss. Alle Ergebnisse müssen dokumentiert werden. Bevor die Sichtprüfung stattfindet, muss die Schweißnaht von Schlacke gesäubert werden.

Für Schweißnähte relevante Größen, im Bezug auf die Sichtprüfung, sind äußere sichtbare Risse und Volumenfehler. Zu Letzterem gehören Gestaltsabweichungen auf beiden Seiten, Decklagenunterwölbung, Wurzelrückfall und -durchhang, Versatz und Kerben zwischen Schweißwerkstoff und Grundmaterial.

Weitere Unterschiede vom gewünschten Zustand sind verfahrensbezogene Abweichungen. Hierzu zählen Schweißspritzer, Endkrater und Nahtschuppung.

Die Grenzen der Sichtprüfung liegen, wie oben erwähnt, bei äußeren Rissen und Volumenfehlern. Dementsprechend können innere Defekte nicht erkannt werden. Dies bedeutet, mit einer Sichtprüfung ist das Erkennen von False Friends nicht möglich. Daher eignet sich die Sichtprüfung nur bedingt zur Untersuchung von Laserschweißnähten, da das Detektieren von False Friends entscheidend ist. Äußere Fehler, wie Schlackespritzer, lassen sich jedoch gut und leicht erkennen. Eine weitere Fehlerquelle der Sichtprüfung ist das Prüfpersonal selber. Bei dieser Prüfungsart müssen neben der Belastung der Mitarbeiter auch Krankheiten wie Diabetes und Farbfehlsichtigkeit bedacht werden, da sie das Ergebnis der Prüfung verfälschen können.¹

4.1.2 Durchstrahlungsprüfung

Eine weitere Möglichkeit die Schweißnaht zu kontrollieren, ist eine Durchstrahlungsprüfung. Diese ist in der DIN EN ISO 17636-1 u. -2 und DIN EN ISO 10893-6 u. -7 festgelegt. Für nähere Informationen ist das Werk von Schiebold 2015 empfehlenswert.

Die Durchstrahlungsprüfung entspricht vielen eingangs erwähnten Voraussetzungen für eine Laserschweißprüfung. Sie ist zerstörungsfrei und bildgebend. Vor allem in der Radioskopie werden zunehmend Bildverarbeitungssysteme eingesetzt. Diese dienen nicht nur zur Verarbeitung der Bilder, sondern auch zur Verstärkung der Signale, wodurch der Anwendungsbereich auf dickere Materialien erheblich erweitert wurde.

Die schematische Darstellung des Funktionsprinzip (Abbildung 4.1) zeigt zwei Funktionsblöcke, die Bildentstehung und Bildübertragung.

Für die Entstehung des Bildes ist eine Strahlenquelle, wie zum Beispiel ein Röntgen- oder Gammastrahler, nötig. Dieser emittiert entweder Röntgen- oder Gammastrahlung. Beim Durchgang durch den Prüfling wird diese Strahlung, wie bereits erwähnt (vgl. Beersches Gesetz Kapitel 3.2.1), je nach Dicke und Dichte des Materials abgeschwächt. Aus diesen Hell- und Dunkelwerten kann auf die Zusammensetzung geschlossen werden. Die ermittelten Werte beinhalten noch einen Fehler, welcher

¹Schiebold, *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Sichtprüfung*, Kapitel 4.3.

²Schiebold, *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Durchstrahlungsprüfung*, S.62.

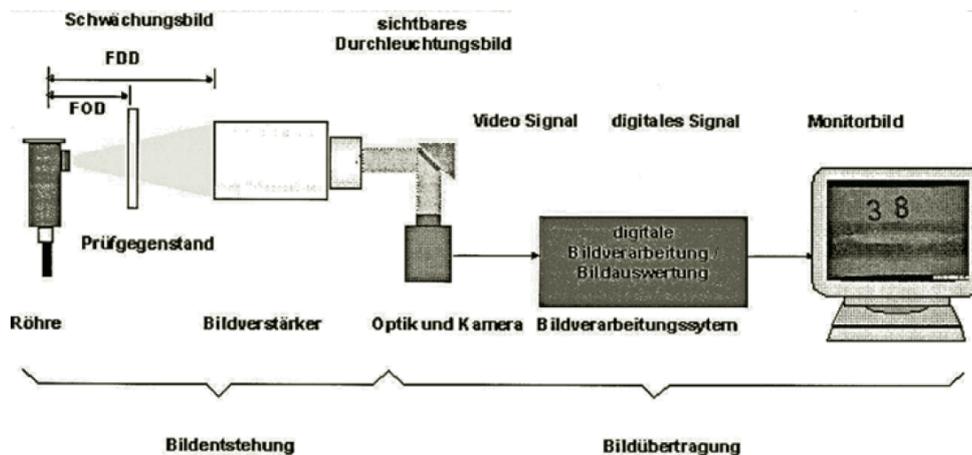


Abbildung 4.1: Prinzip der Durchstrahlungsprüfung²

das entstehende Bild unscharf macht. Diese Fehler hängen vor allem von den jeweiligen Distanzen der Objekte zueinander ab. Um auch schwache Unterschiede zu detektieren, ist ein Bildverstärker, wie zum Beispiel ein Röntgenbildverstärker, in den Prüfaufbau integriert. Um mit diesen verstärkten Hell- und Dunkelwerten ein Bild zu generieren, ist der zweite Funktionsblock, die Bildübertragung, notwendig. Diese besteht aus einer Kamera mit entsprechender Optik, dem Bildverarbeitungssystem und einem Monitor.

Dieses Prinzip lässt sich auf die Kontrolle von Schweißnähten anwenden. Hierfür werden die jeweiligen Parameter auf den Prüffall angepasst. Dazu gehören vor allem die Einstellung der Strahlenquelle, Erhöhung des Objektumfanges, die Einstellung der Filmschwärzung und dergleichen. Eine genaue Erläuterung der Möglichkeiten ist in Schiebold 2015 Kapitel 13 nach zu schlagen.

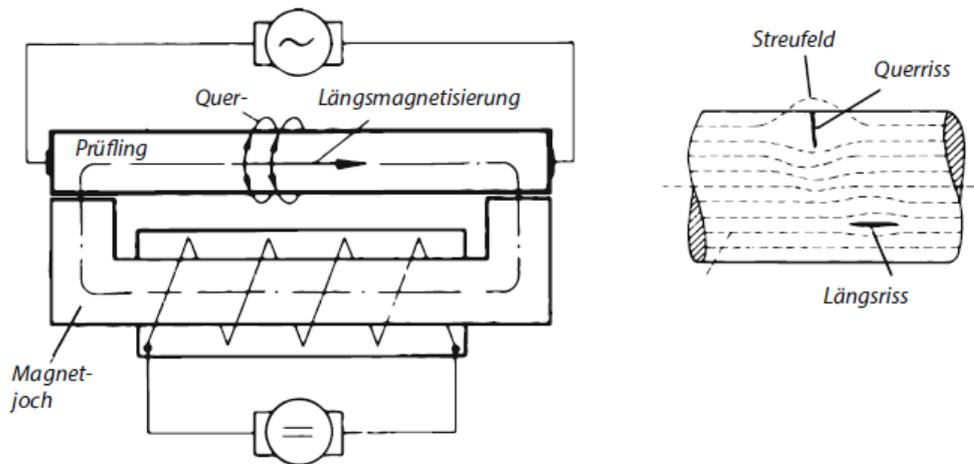
Die Computertomographie ist eine Zusammensetzung von vielen Röntgenbildern aus verschiedenen Perspektiven. Das erlaubt eine räumliche Darstellung von Hohlräumen und Rissen im Material, anders als bei einem einfachen Bild, welches nur eine Projektion auf die Detektorebene darstellen würde.

4.1.3 Magnetische Prüfungen

Für ferromagnetische Werkstoffe lässt sich ein magnetisches Prüfverfahren anwenden. Dieses Verfahren wird in der DIN EN ISO 17638 beschrieben.

Für diese Prüfung wird das Werkstück auf zwei verschiedene Arten magnetisiert. Einerseits wird ein Magnetjoch angelegt, welcher mit Gleichstrom gespeist wird, und andererseits wird Wechselstrom durch den Prüfling selbst geschickt.

³Weißbach, Dahms und Jaroschek, *Werkstoffkunde*, S.555.

Abbildung 4.2: Prinzip der magnetischen Prüfung³

Das Magnetjoch erzeugt ein längs gerichtetes Magnetfeld im Material, während die Wechselspannung ein schraubenförmiges Wechselfeld erzeugt. Ersteres kann Querrisse, aber keine Längsrisse im Material detektieren. Vice versa verhält sich das schraubenförmige Wechselfeld. Durch Auftragen von Magnetpulver auf das Werkstück können diese Risse sichtbar gemacht werden. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 4.2 skizziert.⁴

4.1.4 Wirbelstromprüfung

Die Wirbelstromprüfung ist ein zerstörungsfreies Werkstoffprüfverfahren. Dieses wird in der DIN EN ISO 17643 genauer erläutert.

Bei diesem Verfahren wird ein Prüfling in eine von Wechselstrom durchflossene Spule gelegt, die Wirbelströme in das Werkstück induziert. Diese sind nicht eindeutig gerichtet und erzeugen wiederum ein magnetisches Feld. Diese Wirbelströme im Prüfling lassen unter Berücksichtigung des Ohmschen Gesetzes Rückschlüsse auf Gefügeabweichungen zu. Als Messverfahren hat sich bei diesem Prüfverfahren der Vergleich zu einem fehlerfreien Referenzteil durchgesetzt.

Für den Fall der Überprüfung von Schweißnähten wird der Prüfling nicht in eine Spule gelegt, sondern es wird eine Tastspule verwendet.⁵

4.1.5 Ultraschall Untersuchung

Eine sehr gebräuchliche Prüfung ist die Ultraschall-Untersuchung (DIN EN ISO 17640).

⁴Weißbach, Dahms und Jaroschek, *Werkstoffkunde*, Kapitel 4.2.1.

⁵Weißbach, Dahms und Jaroschek, *Werkstoffkunde*, Kapitel 14.10.1.

Das Prüfprinzip beruht auf der Ausbreitung von Schallwellen innerhalb von Metallen als mechanische Schwingungen. Diese breiten sich mit hoher Geschwindigkeit aus und werden an Grenzflächen oder Ansammlungen höherer Dichte reflektiert, sodass der weiterlaufende Schall abgeschwächt wird. Je kleiner der zu detektierende Fehler ist, desto höher ist die notwendige Prüffrequenz. Die Untersuchung vergleicht nun entweder die weitergelaufenen oder reflektierten Schallwellen mit den Daten eines fehlerfreien Werkstückes.

Im Falle einer Schweißnahtüberprüfung wird das Impuls-Echo-Verfahren bevorzugt. Bei diesem Verfahren ist der Prüfkopf sowohl Sender als auch Empfänger der Ultraschallstöße. Um die Fehler zu detektieren, wird die Zeit gemessen, welche die Schallwelle benötigt, um wieder am Prüfkopf anzukommen. Sollte diese im Vergleich zu der fehlerfreien Probe schneller wieder ankommen, so wurde sie nicht am Ende des Prüflings reflektiert sondern schon davor an einem Fehler im Material. Da sich die Schallwelle mit der Schallgeschwindigkeit ausbreitet, kann sogar auf die Lage des Defekts rückgeschlossen werden. Im Fall eines kleinen Fehlers im Material wird nicht die gesamte Welle von der Fehlerstelle reflektiert sondern nur ein Teil. Bei der Auswertung der Messergebnisse ist somit sowohl die Reflexion des Fehlers, als auch die Reflexion des Materialendes zu sehen. Dies kann auf die Größe und Art des Fehlers hinweisen.

Diese Art der Materialprüfung eignet sich besonders gut für die Detektion von Schweißnahtfehlern in der Automobilbranche, da das Verfahren günstig ist und allen eingangs erwähnten Kriterien entspricht. Es kann ferner auch benutzt werden um False Friends aufzuspüren.⁶

4.1.6 Wärmestromprüfung

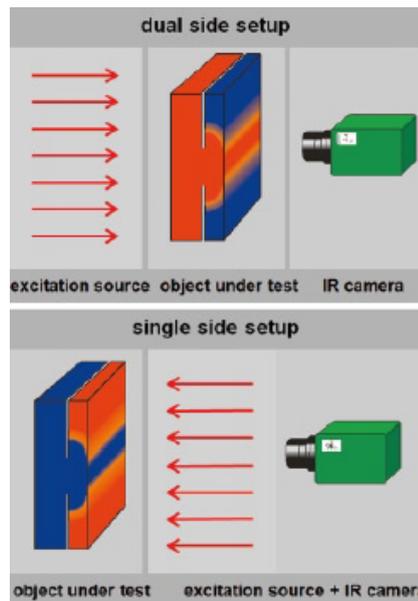
Eine weitere Möglichkeit Schweißnähte zu überprüfen, ist die Wärmestromprüfung. Dieses Verfahren wurde speziell für die Autobaubranche entworfen. Es handelt sich um ein nicht-zerstörendes, berührungsloses, einseitig einsetzbares und bildgebendes Verfahren. Weiter ist es in einen automatisierten Prozess integrierbar. Die benötigten Ressourcen sind eine Infrarotkamera und die Software, um die gewonnenen Bilder zu verarbeiten.

Prinzipiell wird der Kraftschluss des Materials, beziehungsweise die vollständige Durchdringung beider Werkstücke, mit Hilfe der Wärmeleitung überprüft. Dies geschieht, indem die Schweißnaht auf einer Seite erwärmt und diese Erwärmung mit Hilfe einer Infrarotkamera gemessen wird. Die Erhitzung geschieht inhomogen durch eine kurz gepulste, hoch energetische Flash-Lampe. Die aufgenommenen Bilder werden verarbeitet und es wird der Temperaturgradient ermittelt. Dabei ist es für das Ergebnis uninteressant, auf welche der beiden Seiten die Kamera gerichtet ist. Der prinzipielle Aufbau des Verfahrens ist in Abbildung 4.3 gezeigt.

Diese Art der Überprüfung hat verschiedene Vorteile gegenüber anderen Verfah-

⁶Weißbach, Dahms und Jaroschek, *Werkstoffkunde*, Kapitel 14.10.4.

⁷Hierl, „Laser welding & heat flux thermography“.

Abbildung 4.3: Setup für die Wärmestromprüfung⁷

ren. Thomas Hierl 2011 beschreibt den Vorteil der Wärmestromprüfung gegenüber vergleichbaren Technologien, als die Abwesenheit von starken Einschränkungen denen andere technologische Entwicklungen unterliegen. Beispielhaft hierfür sei die Ultraschallüberprüfung genannt. *„Even ultrasound testing of weld seams has its limitations: It allows neither high testing rates nor an exact determination of the binding length or binding cross-section, and also requires highly-qualified, trained testing personnel.“*⁸

4.2 Zeitgleiche Überprüfungsverfahren

4.2.1 Cellular Neural Network Cameras und Closed Loop Control

Viele der folgenden Überprüfungsverfahren benötigen Hochgeschwindigkeitskameras und ein System, welches in Sekundenbruchteilen die gewaltige Datenmenge analysieren kann. Die Arbeit von Abt 2011 befasst sich mit solch einem System. Die folgenden Ausführungen sind aus dieser Arbeit entnommen.

Damit ein System viele Informationen schnell verarbeiten kann, werden sogenannte „Cellular Neural Networks“ (CNN) benutzt. Die kleinste Baueinheit in CNN's wird Zelle genannt und ist in der Lage, Informationen zu verarbeiten. Die eingehenden Daten gelangen über die Eingabeschicht in das System und werden an die darunterliegenden Schichten zur Bearbeitung weitergegeben. Die letzte Schicht ist die Ausgabeschicht, an dem das System die verarbeiteten Daten ausgibt. Die Zellen in einer Schicht sind direkt mit ihren jeweiligen Nachbarzellen verschaltet und

⁸Hierl, „Laser welding & heat flux thermography“.

können so mit diesen kommunizieren. Sollte nun solch ein CNN als Bildverarbeitungssystem benutzt werden, ist jede einzelne Zelle der Eingabeschicht als Pixel zu verstehen. Diese können nun die Eingangsparameter gleichzeitig, also sehr schnell, verarbeiten. Solche Systeme ermöglichen Überprüfungsverfahren, die gleichzeitig zu der Laserbearbeitung erfolgen.

Closed Loop Control bedeutet, dass die gemessenen Kontrollparameter vom Kontrollsystem erkannt und in den Regelkreis eingegeben werden. Dieser verändert die Eingabeparameter, um die Kontrollparameter den gewünschten Werten anzunähern. Im Beispiel des Laserstrahlschweißens könnte das System durch optische Sensoren die Größe des Keyholes messen und mit dieser Information die Laserleistung variieren. Alle zeitgleichen Überprüfungsverfahren zielen auf diese Art des Kontroll- und Regelalgorithmuses ab.

4.2.2 Fehlerdetektion durch eine Keyholeanalyse

Bei Tiefschweißungen ist das Keyhole maßgeblich für die Qualität der Schweißnaht und für die möglichen Fehler verantwortlich. Deshalb konzentrieren sich Luo und Shin 2015 auf die Geometrie des Keyholes.

Um von dem Keyhole auf die Qualität der Schweißnaht zurück zu schließen, sind drei geometrische Faktoren ausschlaggebend: Tiefe des Keyholes, dessen Größe und Neigungswinkel. Um diese Parameter festzustellen und zu untersuchen, gibt es verschiedene Ansätze. Neben Aufnahmen mit Hochgeschwindigkeitskameras⁹ gibt es zum Beispiel die Möglichkeit akustische Signale¹⁰ aufzunehmen und zu verarbeiten. Rein numerisch ist das Problem nicht zu lösen, da die notwendigen Rechenkapazitäten für eine zeitgleiche Analyse zu hoch sind. Auch die Verbindung von verschiedenen Aufnahmemethoden haben sich aus Kostengründen nicht durchgesetzt. Neue Ansätze versuchen teure Messstationen durch einfache und kostengünstigere zu ersetzen¹¹.

Die oben erwähnte Arbeit verfolgt den Lösungsansatz aus den Parametern der Laserbearbeitung einen Zusammenhang zu erstellen. Dieser wird mit Prozessaufnahmen verglichen und daraus wird numerisch ein Modell des Keyholes generiert. Auf diese Art lassen sich vor allem Fehler der nicht vollständigen Penetration und der Porosität vorhersagen. Die Möglichkeit zur Detektion von False Friends wurde in diesem Zusammenhang nicht untersucht.

Um False Friends zu detektieren, ist vor allem die Tiefe des Keyholes interessant. Sollte das Keyhole bis ans Ende des Werkstückes reichen, ist ein False Friend automatisch ausgeschlossen. Die Kontrolle kann optisch aus der Vogelperspektive erfolgen. Bei Überlappungsschweißnähten kann dieses Verfahren aber zu Fehlern führen. Sollte die Tiefe des Keyholes auf Höhe des Spalts zwischen den Werkstücken sein, so ist das Bild identisch mit dem der fehlerfreien Schweißnaht. Um diesen Fehler auszu-

⁹Fabbro, „Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding“.

¹⁰Li, „A comparative study of ultrasound emission characteristics in laser processing“.

¹¹You, Gao und Katayama, „WPD-PCA-Based Laser Welding Process Monitoring and Defects Diagnosis by Using FNN and SVM“.

schließen, kann diese Überprüfung stochastisch gestützt werden¹². Ein zusätzlicher Vorteil dieses Ansatzes ist, dass durch Hochgeschwindigkeitskameras die Laserleistung optimal an die erforderliche Keyholetiefe angepasst werden kann. Dies verhindert auch andere Fehlerarten, wie zum Beispiel Schweißspritzer.¹³

4.2.3 Plasmauntersuchung

Im Falle einer Schweißung mit einem CO₂-Laser wurde die Fehlerdetektion anhand von Plasmauntersuchungen erforscht. In der Arbeit Saludes 2010 sind zwei verschiedene Analyseansätze untersucht worden.

Ersterer war die Analyse des Plasmas anhand von zwei Photodioden im Bereich von 800 nm und 1100 nm. Die Annahme hinter dieser Time-Domain-Method ist, dass bei konstanter Laserleistung und konstantem Keyhole auch die Strahlenemission des Schmelzbades konstant sein muss. Diese konnte mit den Dioden gemessen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Frequenz-Domain-Method. Bei dieser messen die Photodioden die Verdampfungsfahne der Wärmeeinflusszone. Diese Fahne schwankt und diese Schwankung erlaubt Rückschlüsse auf die Qualität der Schweißnaht. Diese Analysemöglichkeit hat eine 97,1%-ige Wahrscheinlichkeit, fehlerhafte Nähte aufzuspüren. Allerdings beträgt die Fehlerrate 6.1%.

Die eingangs erwähnte, zweite grundsätzliche Möglichkeit, ist die Analyse der „electronic temperature“. Diese ist eine Messgröße aus der Quantenmechanik, welche die Geschwindigkeits- und Energieverteilung der Elektronen charakterisiert und damit den Maxwell-Boltzmann Verteilungen genügen. Dieser theoretische Hintergrund ist zu komplex, um diesen in diese Arbeit einfließen zu lassen. Diese „electronic temperature“ korreliert mit der Energie der Elektronen und lässt somit auch Rückschlüsse auf die Qualität der Schweißnaht zu. Die Ergebnisse der Studie lassen noch keine Aufschlüsse über den Erfolg der Fehlerdetektion zu.

4.2.4 NIR-Kamera

Die Arbeit Dorsch et al. 2014 zeigt den Konzeptbeweis für diese Diplomarbeit. Es wird gezeigt, dass mit Hilfe einer NIR Kamera alle Defekte während des Schweißprozesses erkennbar sind und sich zusätzlich aus den gewonnenen Bildern die Keyholegeometrie ableiten lässt. Da sich diese Arbeit damit als Vergleichsarbeit zu dieser Diplomarbeit heranziehen lässt, wird in diesem Absatz nur der Aufbau erklärt. Die Ergebnisse werden im weiteren Verlauf der Arbeit zitiert und mit den hier erarbeiteten Versuchsergebnissen verglichen.

Während der Schweißung nimmt eine Hochgeschwindigkeitskamera Bilder auf. Das aufgenommene Wellenspektrum liegt bei 900 nm bis 1700 nm. Diese Kamera ist eine InGaAs-Kamera, welche koaxial zu dem Laserstrahl montiert ist. Die maximale Framerate beläuft sich auf 100 Hz.

¹²Blug u. a., „The full penetration hole as a stochastic process“.

¹³Luo und Shin, „Estimation of keyhole geometry and prediction of welding defects during laser welding based on a vision system and a radial basis function neural network“.

Genau wie in dieser Diplomarbeit ist die Kamera auf die Wärmeinflusszone fokussiert. Die Aufnahmen werden in der Auswertung analysiert. Dies kann entweder zeitgleich oder im Nachhinein geschehen. Es gibt fünf verschiedene Möglichkeiten die Bilder auszuwerten: Durchschnittsbild, Standardabweichung, relative Standardabweichung und Minimal- und Maximalwerte. Diese beziehen sich jeweils auf eine Bilderfolge.

Bei Ersterer wird der Durchschnittswert jedes Pixels ermittelt. Dadurch lässt sich die gesamte Bildersequenz gut darstellen. Da dabei der Mittelwert über alle zu verarbeitenden Bilder gebildet wird, werden Veränderungen, die nur in einzelnen Aufnahmen sichtbar sind, verschleiert. Allerdings kann so vor allem die Länge des Schmelzbades ermittelt werden, welche wiederum Aufschlüsse über die vollständige Penetration zulässt. Dass die Länge ein Indikator für eine Durchschweißung ist, wird in Dorsch et al. dargestellt und im Kapitel 8 näher erläutert.

Für die Alternative der Standardabweichung wird die empirische Standardabweichung berechnet. Diese ist ein Maß der Streuung um das arithmetische Mittel. Hierbei wird vor allem der Unterschied einzelner Bilder im Vergleich zum Durchschnittsprozess gezeigt. Fehler, die kurzzeitig auftreten, wie zum Beispiel Spritzerbildung, werden erkennbar gemacht.

Die relative Standardabweichung ist die vorher genannte Streuung, welche nun um den Mittelwert normalisiert wird. Mit dieser Erweiterung wird der Gleichgewichtszustand verdeckt und die Abweichungen werden noch klarer hervorgehoben.

Die Minimal- und Maximalwerte zeigen vor allem einzelne Bilder. Dies ermöglicht die Detektion von kurzzeitigen Fehlern. Es lassen sich so Löcher im Material und Spritzerbildungen einfach erkennen.

In Abbildung 4.4 sind die unterschiedlichen Analysemöglichkeiten dargestellt. Die Farbdarstellung ist eine Falschfarbendarstellung der Autoren.

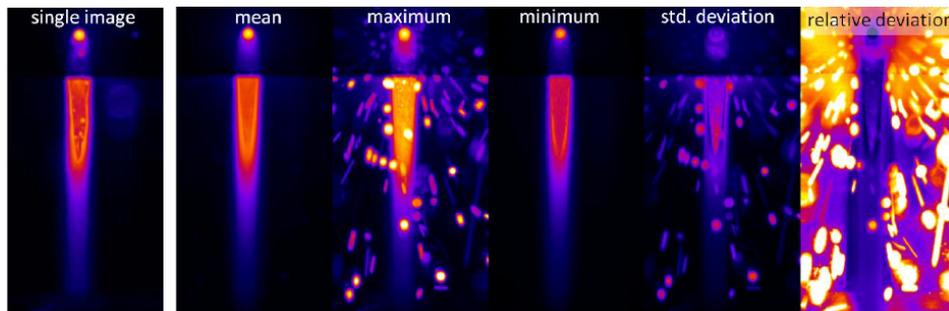


Abbildung 4.4: Möglichkeiten zu Analyse von NIR Aufnahmen¹⁴

Was diese einzelnen Aufnahmen bedeuten und wie sie zur Analyse beitragen, wird in dieser Arbeit noch konkretisiert.

¹⁴Dorsch u. a., „Online NIR diagnostic of laser welding processes and its potential for quality assuring sensor systems“.

5 Versuch

Um zu überprüfen, ob Schweißfehler wie False Friends mit einer NIR-Kamera detektiert werden können, muss das Schweißbad sich verändern, wenn ein Fehler bei der Schweißung auftritt. Weiteres muss diese Veränderung von der Kamera beobachtet werden können. Dafür ist es notwendig, absichtlich Fehler in die Schweißung einzubauen und die Aufnahmen dieser Schweißung mit fehlerfreien Aufnahmen zu vergleichen.

Der Aufbau und Ablauf der verschiedenen Versuchsreihen werden in diesem Kapitel beschrieben. Die Auswertung und Diskussion folgen in den Kapiteln 6 und 8.

Es wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Prinzipiell hatten diese einen ähnlichen Aufbau, nur gewisse Komponenten wurden variiert (siehe Unterkapitel 5.1). Die unterschiedlichen Bestandteile des Versuches werden im Unterkapitel 5.2 genauer beschrieben. Der Ablauf selbst wird am Ende dieses Kapitels erörtert.

5.1 Versuchsaufbau

Im Folgenden wird der Versuchsaufbau beschrieben. In Abbildung 5.1 ist der Bearbeitungskopf des Faser-Lasers zu sehen. An diesen wird, von einem in diesem Foto nicht sichtbaren Kabelstrang, die Energie des Lasers weitergeleitet. In dem Bearbeitungskopf wird der Strahl über eine Optik fokussiert. Die eingespannte Probe lag im Brennpunkt der Optik. Die Kamera war ebenfalls am Bearbeitungskopf montiert und über eine Beobachtungsoptik auf den Eintreffpunkt des Lasers gerichtet.

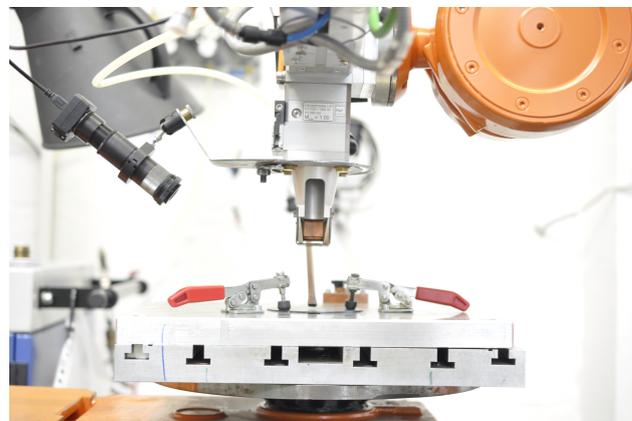


Abbildung 5.1: Versuchsaufbau Normalperspektive

Die gezeigte Einspannvorrichtung war nicht symmetrisch, damit die Kamera den Eintreffpunkt des Lasers aufzeichnen kann. Dies ist besser anhand einer schrägen Vogelperspektive auf den Versuchsaufbau zu erkennen (vgl. Abbildung 5.2). In dieser ist auch die Zuleitung des Schutzgases besser zu sehen.

Der Bearbeitungskopf bewegte sich geradlinig, bei gleichbleibendem Abstand, über die Probe hinweg. Da die Kamera an diesem montiert war, führte sie die gleiche

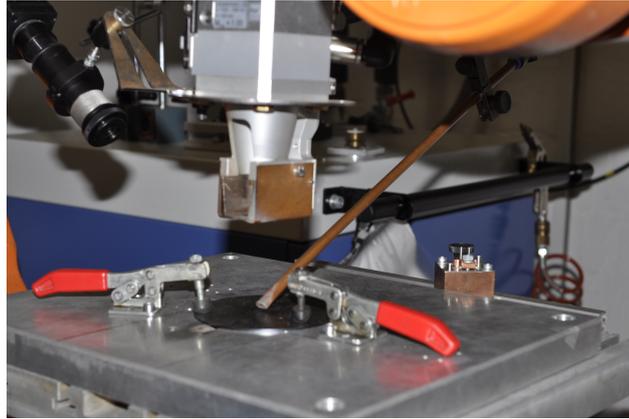


Abbildung 5.2: Versuchsaufbau Vogelperspektive

Bewegung aus und hielt ebenfalls den Abstand zwischen der Optik und dem Probekörper konstant. Die Kamera war ferner mit einem Computer verbunden, welcher mit einer geeigneten Software ausgestattet war.

5.2 Versuchskomponenten

Im folgenden werden die benötigten Komponenten für den Versuchsaufbau beschrieben. Dies umfasst sowohl die Hardware als auch die dazugehörige Software. Da die Softwarepakete des Lasers in dessen Lieferumfang beinhaltet waren, werden diese hier nicht näher beschrieben.

5.2.1 Hardware

CO₂-Laser

Der verwendete CO₂-Laser wurde von der Firma OERLIKON PRECISION LASER SA hergestellt. Die Bezeichnung des Lasers ist OPL-2000 Laser. Die Wellenlänge dieses Lasers beträgt 10,6 μm und die garantierte Leistung 2000 W cw. Der Gütefaktor ist mit $M2 = 2,2$ und $K = 0,45$ gegeben. Der Durchmesser am Laser-Austritt beläuft sich auf 15 mm. Die Brennweite der Fokussierlinse beträgt 127 mm und des Brennflecks 250 μm .

Faser-Laser

Der benützte Faser-Laser war der Ytterbium Faser Laser mit der Typennummer SN 7071850, hergestellt von der Firma IPG Laser GmbH. Die nominale Leistung beträgt 1,5 kW. Die Wellenlänge der Emission beläuft sich auf 1070 - 1080 nm. Der Faserdurchmesser beträgt 100 μm und die Brennweite der Fokussierlinse 200 mm.

Probeneinspannung, Einspannvorrichtung

Die Probeneinspannung erfolgte über die in Abbildung 5.3 gezeigte Einspannvorrichtung. Diese fixierte die Probe, indem sie punktuell zusammengedrückt wurde. Somit war die Probe lokal fixiert und es wurde genügend Anpressdruck aufgebaut, um eine fehlerfreie Schweißverbindung zu begünstigen.

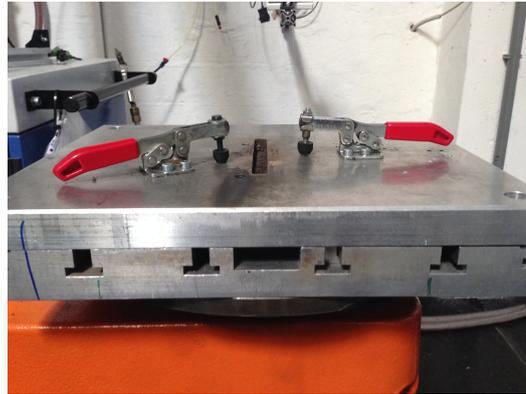


Abbildung 5.3: Einspannvorrichtung

Verfahren-Anlage

Der Schweißprozess wurde von einem Roboter der Firma ABB durchgeführt. Dieser ermöglichte die Regulierung der Verfahrensgeschwindigkeit und der Geometrie. Die Steuerung dieses Roboters wurde durch das Programm Robot Studio initialisiert. In diesem Programm konnten auch die Laserleistung und der Fokusabstand vorgegeben werden. Die Schweißgeometrie wird in Kapitel 5.4 näher erläutert. Die gewählten Verfahrensgeschwindigkeiten und Laserleistungen werden bei den einzelnen Auswertungen genannt. Der Fokusabstand wurde immer auf den optimalen Abstand eingestellt.

Kamera

Die Aufnahmen wurden mit der Kamera FLIR Chameleon CMLN-13S2M-CS aufgezeichnet. Diese konnte einen Wellenlängenbereich von 1500-1580 nm abbilden. Die maximale Framerate liegt bei 15 FPS und die Pixelanzahl beträgt 1296x964.

Optik I

Die Optik wurde aus dem THORLABS-System zusammengebaut. Die technische Zeichnung des Aufbaus ist dem Anhang beigelegt (vgl. Anhang 14). Die Linse wird näher im Kapitel 5.2.1 beschrieben.

Die grobe Erstausslegung wurde mit dem Programm WinLens PreDesigner (Version 1.29) berechnet. Da in die Kamera ein 1/3 Zoll Chip verbaut wurde, fokussiert die Optik auf diesen Bereich. Der Abstand zwischen Kamerasensor und Linse betrug 35 mm und zwischen Linse und Werkstück 180 mm.

Optik II

Diese Optik unterscheidet sich im Aufbau von der oben beschriebenen Optik I. Die Abmessungen wurden geändert und eine Blende eingebaut. Die technische Zeichnung der Optik ist ebenfalls im Anhang 14 zu finden. Die grobe Auslegung ergab einen Abstand zwischen Sensor und Linse von 82 mm und zwischen Linse und Werkstück von 227 mm.

Optische Linse

Die Linsen, sowohl für die erste Optik als auch für die Zweite, sind plan-konvexe THORLABS-Labs Linsen mit einem Durchmesser von einem Zoll. Die Erste hatte eine Brennweite von 35 mm, die Zweite von 60 mm. Die genauen Produktbezeichnungen sind in Tabelle 5.1 abgebildet.

Brennweite	Produktbezeichnung
35 mm	LA1027-C
60 mm	LA1134-C

Tabelle 5.1: Linsen

Beide Linsen besitzen eine Antireflexbeschichtung mit einer Breite von 1050 - 1700 nm. In diesem Bereich beträgt die Reflexion weniger als 0,50 %. Der genaue Reflexionsgrad wird in Abbildung 5.4 gezeigt.

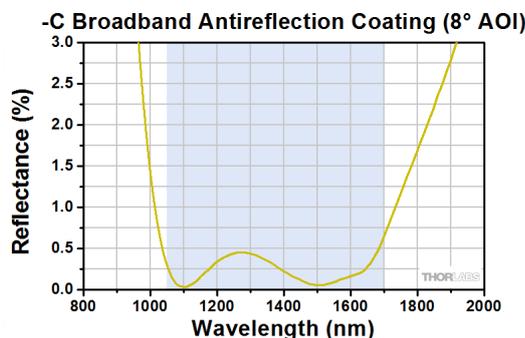


Abbildung 5.4: Reflexionsgrad der Linse

Bandpass-Filter

In beiden Optiken war ein Bandpass-Filter verbaut. Dieser filterte die Strahlung in einem Wellenlängenbereich von $1500 \text{ nm} \pm 15 \text{ nm}$ heraus. Das Datenblatt ist dem Anhang beigelegt (vgl. Anhang 14).

Montagevorrichtung

Die technische Zeichnung der Montagevorrichtung, welche die Kamera an den Bearbeitungskopf befestigt, ist dem Anhang beigelegt (vgl. Anhang 14). Sie richtet die Kamera mit einem 35° Winkel zu der Probe aus.

5.2.2 Software

Kamera

Um die Kamera mit einem Computer verbinden zu können, ist die SDK FlyCapture2 2.11.3.164 nötig. Diese ermöglicht es Kameraparameter festzulegen. Die folgende Tabelle 5.2 zeigt die gewählten Kameraeinstellungen.

Parameter	Einstellung
Exposure	-4,585 EV
Gamma	1
Shutter	66,641 ms
Gain	23,191 dB
FPS	15

Tabelle 5.2: Kameraeinstellungen

Die Kameraeinstellungen wurden gewählt, um die bestmöglichen Bilder aufzunehmen. Die gewählte Exposure Zeit ermöglichte in der Kombination mit der Shutterzeit die schärfsten Bilder, welche nicht durch die Gamma Einstellung verstärkt werden mussten. Die FPS entsprechen der maximalen Aufnahmegeschwindigkeit der Kamera.

Bildverarbeitung

Die aufgenommenen Bilder wurden in Sequenzen im Format jpg abgespeichert. Um die Bilder auszuwerten, wurden Python-Programme verwendet. Die folgende Tabelle zeigt die benötigten Packages.

Modul	Version
Python	3.5.4
PyCharm	2017.2.4
matplotlib	2.1.0
numpy	1.13.3
Pillow	5.0.0
PyCapture2	2.11.425

Tabelle 5.3: Installationen

Wie die einzelnen Programme funktionieren, wird im nächsten Kapitel 6 beschrieben.

5.3 Versuchsreihen

Es wurden insgesamt drei Versuchsreihen durchgeführt. Für die Versuchsreihe I wurde ein CO₂-Laser, für die Folgenden ein Faser-Laser benützt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind Fotosequenzen, welche in den folgenden Kapiteln ausgewertet

werden. Da sich zeigen wird, dass die Versuchsreihe III am besten zur Analyse geeignet ist, wird das Hauptaugenmerk auf diesen gelegt.

5.3.1 Versuchsreihe I

Die erste Versuchsreihe wurde mit Hilfe eines CO₂-Lasers ausgeführt. Die Beobachtungsoptik bei diesem Versuch war die Optik I (Beschreibung siehe Kapitel 5.2.1). In Abbildung 5.5 ist eine einzelne Aufnahme aus dieser Versuchsreihe abgebildet. Es handelt sich hierbei um eine Schweißung in Wannenlage, mit 1,4 kW Leistung und einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,58 m/min.



Abbildung 5.5: Einzelne Aufnahme beim CO₂-Laser schweißen

5.3.2 Versuchsreihe II

In der zweiten Versuchsreihe wurde statt des CO₂-Lasers der Faser-Laser benutzt. Diese Änderung bewirkte deutliche Veränderungen der Aufnahmen der Kamera. Eine solche Einzelaufnahme ist in der folgenden Abbildung 5.6 zu sehen. Für diese wurde die Leistung von 1 kW und eine Geschwindigkeit von 50 mm/s vorgegeben. Die Schweißung erfolgte in Wannenlage (PA) und als Überlappungsstoß.

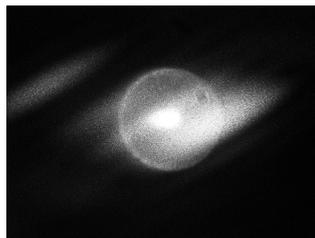


Abbildung 5.6: Einzelne Aufnahme beim Faser-Laser schweißen

5.3.3 Versuchsreihe III

Die letzte Versuchsreihe wurde wieder der Faser-Laser eingesetzt. Einzig die Beobachtungsoptik der Kamera wurde am Versuchsaufbau geändert. Anstatt der Optik I wurde die Optik II verwendet (Beschreibung siehe Kapitel 5.2.1). Eine einzelne

Aufnahme dieser Konstellation ist in Abbildung 5.7 zu sehen. Die Leistung wurde auf 0,5 kW und die Geschwindigkeit auf 20 mm/s geregelt.



Abbildung 5.7: Einzelne Aufnahme beim Faser-Laser schweißen

5.4 Versuchsablauf

Um zu überprüfen, ob Veränderungen im Schmelzbad bei Schweißfehlern auftreten und diese von einer NIR-Kamera erkannt werden, wurde folgender Versuchsablauf gewählt:

Ein Laser schweißt zwei Metallproben in Wannenlage (PA) mit einer gerade verlaufenden Naht zusammen. Um Rückschlüsse auf die Qualität und Fehlerfreiheit der Schweißung zu erhalten, wird die dabei entstehende Wärmeinflusszone optisch analysiert. Dafür nimmt die Kamera, welche auf die Zone gerichtet ist, eine Bildersequenz auf. Da die gewählte Kamera einen Wellenlängenbereich von $\lambda = 1500$ nm abdeckt und der eingebaute Filter nur den Bereich um 1500 nm transmittiert, zeigen die einzelnen Aufnahmen nur die thermische Abstrahlung der Wärmeinflusszone.

Chronologisch begann ein Versuch mit der Versuchsvorbereitung. Dazu gehörte die Präparation der Probe, bei der eine Fehlerquelle integriert wurde. Auf dies wird später näher eingegangen. Danach wurde die Probe in der dafür vorgesehenen Einspannung befestigt. Der letzte Schritt der Vorbereitung war die Inbetriebnahme der Kamera.

Das Laserstrahlschweißen selbst wurde durch die Aktivierung des Programms Robot Studio gestartet. Dieses Programm enthielt alle Anweisungen, sowohl für den Laser als auch für den Roboter. Es startete die Schutzgaszulieferung (9 L/min Argon) und den Laser. Danach folgte der Bearbeitungskopf der vorgegebenen Geometrie. Nach dem Abfahren dieser Geometrie nahm der Bearbeitungskopf wieder die Parkposition ein und die Kamera wurde deaktiviert. Die gewonnene Bildersequenz wurde zur weiteren Auswertung abgespeichert.

Eine Probe bestand aus zwei übereinander gelegten Probekörpern. Diese waren Metallscheiben aus unterschiedlichem Material und mit verschiedenen Dicken. Es wurden drei Konstellationen für die Versuche benutzt:

Probenkonstellation I

Für die erste Konstellation wurde Edelstahl 1.4301 (X5CrNi18-10) mit einer Probendicke von 0,8 mm benutzt. Der Durchmesser dieser Proben betrug circa 9 cm. Damit hatte die gesamte Probe eine Dicke, ohne eingelegtes Zwischenblech, von 1,6 mm.

Probenkonstellation II

Für die Zweite wurde das Material variiert. Anstelle von Edelstahl wurde gewöhnlicher Baustahl S235JR benutzt. Die Abmessungen waren dieselben.

Probenkonstellation III

Die Probenkonstellation III bestanden wieder aus dem Edelstahl 1.4301. Diese hatten jedoch eine Dicke von 1,8 mm, bei gleichbleibendem Durchmesser. Die Dicke der gesamten Probe, ohne Distanzblech betrug somit 3,6 mm.

Da die Proben übereinander gelegt wurden, war die Schweißart die des Überlappungsstoßes.

Damit die spätere Analyse Fehler detektieren kann, wurden einige Proben manipuliert. Dies führte zu Fehlern, die sich in der Auswertung der Ergebnisse zeigt. Folgende Fehlerquellen wurden in die Proben integriert:

Distanzbleche

Zwischen den Probekörpern wurden Distanzbleche gelegt, um einen Spalt zwischen den Werkstücken zu simulieren. Die Länge dieser Bleche entsprach der Probenlänge, damit die gesamte Schweißnaht einen konstanten Spalt aufwies. Die gewählten Blechdicken waren: 0,1 mm; 0,15 mm; 0,25 mm; 0,3 mm und 0,35 mm.

Lochmuster

Um das Schmelzbad zu verändern, wurde der zweite Fügepartner lokal entfernt. Dafür wurde der untere Probekörper penetriert. Diese Bohrungen waren entlang der späteren Schweißnaht angeordnet. Das Bohrmuster ist im Anhang 14 skizziert. Die Bohrungen besaßen Durchmesser von 5 mm und 10 mm.

Porosität und Spritzer

Porosität- und Spritzerbildung in einem Schweißprozess hängen von den Schweißparametern ab. Daher wurden hauptsächlich die Leistung und Geschwindigkeit angepasst, um diese Fehler herbeizuführen. Allerdings zeigte sich, dass die normale Probendicke von 1,6 mm nicht ausreichte, um Spritzer zu produzieren und Porositäten deutlich im Schliff zu erkennen. Daher wurden dickere Proben mit 1,8 mm (Probekonstellation III) verwendet.

False Friend

Um False Friends zu simulieren, wurde ein Distanzblech, wie oben beschrieben, mit verschiedenen Dicken verwendet. Zusätzlich wurde bei einigen Versuchen Öl in den Spalt eingebracht. Dieses Öl verdampfte beim Erwärmen der Probe durch den Laserstrahl und verhindert eine fehlerfreie Schweißverbindung. Vielmehr entsteht eine Verbindung, die bei einer Sichtprüfung als fehlerfrei bewertet wird, aber keinen Belastungen standhält. Dieses Verhalten ist ähnlich zu dem eines False Friends, der bei mit Zink legierten Stählen entsteht.

6 Auswertung

Die Messergebnisse der Versuchsreihen (vgl. Kapitel 5) sind Bilderfolgen der thermischen Abstrahlung der Schweißung. Diese Bildersequenzen können auf verschiedene Arten analysiert werden, um auf die Qualität der Schweißung rückzuschließen. Das folgende Kapitel befasst sich mit dieser Analyse und das Kapitel 7 mit den Resultaten der Auswertung.

6.1 Einzelbilder

Die Einzelbildanalyse lässt nur unzureichende Schlüsse auf die Qualität der Schweißnaht zu. Im Folgenden werden die Einzelbilder der Versuchsreihen analysiert. Hierbei werden Aufnahmen mit eingebautem Fehler zu Referenzaufnahmen verglichen. Diese Referenzaufnahmen sind Bilder, welche an einer fehlerfrei geschweißten Probe mit denselben Schweißparametern aufgezeichnet wurden.

6.1.1 Versuchsreihe I

In Abbildung 6.1 ist ein Referenzbild für eine Schweißnaht ohne Fehler abgebildet. Es handelt sich hierbei um eine Schweißung mit 1,4 kW Leistung und einer Geschwindigkeit von 0,58 m/min.

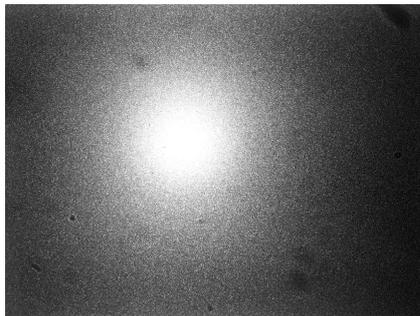


Abbildung 6.1: Einzelne Aufnahme beim CO₂-Laser schweißen

Diese Abbildung zeigt keine Einzelheiten und die Sequenz dieser Bilder zeigt keine Veränderung. Die dunklen Flecken auf dem Bild weisen auf Verunreinigungen an der Linse hin. Das Schweißbad ist nicht zu erkennen. Deshalb wurde die Versuchsreihe II mit einem Faser-Laser durchgeführt.

6.1.2 Versuchsreihe II

In dieser Versuchsreihe können, durch die Analyse von Einzelbilder, erste Erkenntnisse über die Qualität der Schweißnaht gewonnen werden. Wird eine Aufnahme mit eingebautem Fehler, zum Beispiel das Lochmuster, mit dessen Referenzbild verglichen (siehe Abbildung 6.2), so ist eine Abschwächung der Bildhelligkeit zu

erkennen. Das Bild wurde bei einer Leistung von 1 kW und eine Geschwindigkeit von 50 mm/s aufgezeichnet.

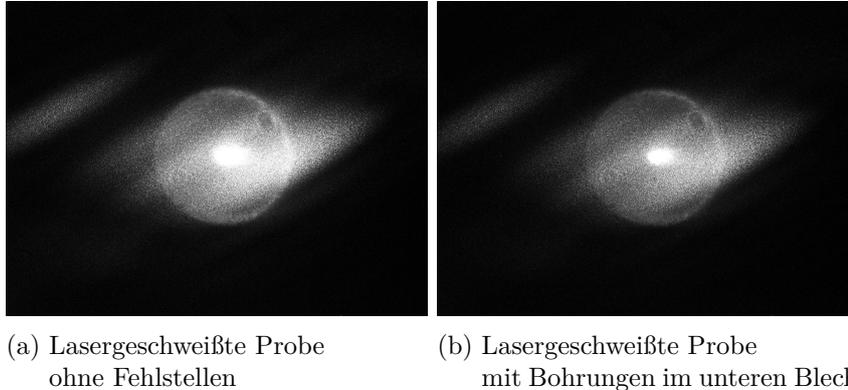


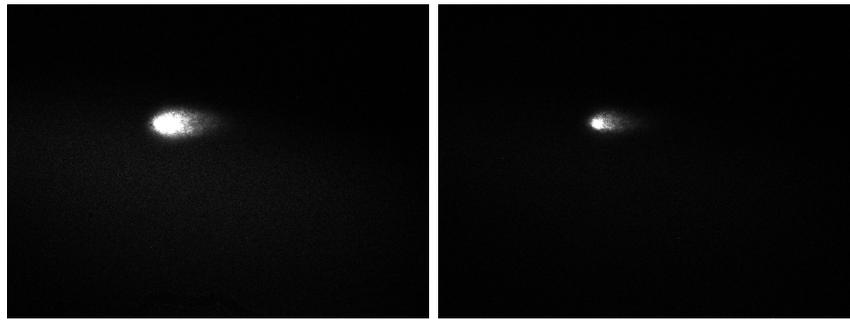
Abbildung 6.2: Einzelbild Versuchsreihe II

Die Bildqualität und die Möglichkeit der Bildanalyse ist in dieser Versuchsreihe im Vergleich zu der Vorherigen stark gestiegen. Allerdings beinhalten die Aufnahmen noch Fehler. Das generelle Schimmern deutet auf eine Reflexion, die kreisrunden Fehler auf Verunreinigungen der Linse hin und der helle Kranz, welcher die Laserauftreffzone umgibt, scheinen optische Artefakte der Kamera oder der Linse zu sein. Deshalb wurde die Versuchsreihe III mit einer veränderten Beobachtungsoptik durchgeführt, die genauer fokussierte und eine Blende enthielt.

6.1.3 Versuchsreihe III

Die Einzelbilder dieser Versuchsreihe zeigten eine wesentliche Verbesserung der Bildqualität im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchsreihen. In diesen Aufnahmen (vgl. Abbildung 6.3) ist sowohl der lokale Auftreffpunkt des Lasers gut sichtbar als auch der Schweiß aus Schmelze, welcher diesem Punkt folgt. Zudem sind keine Reflexionen oder Verunreinigungen sichtbar.

Die Einbringung von den oben bereits erwähnten Fehlern, bei diesem Beispiel das Lochmuster, ist in dieser Versuchsreihe ebenso gut sichtbar (vgl. Abbildung 6.3). Für den abgebildeten Versuch wurde die Leistung auf 0,5 kW und die Geschwindigkeit auf 20 mm/s geregelt.



(a) Lasergeschweißte Probe ohne Fehlstellen

(b) Lasergeschweißte Probe mit Bohrungen im unteren Blech

Abbildung 6.3: Einzelbild Versuchsreihe III

Wie bereits beschrieben ist hier der Unterschied zwischen einem voll ausgebildetem Schweißbad (a) und einer fehlerhaften Probe (b) zu erkennen. Andere Fehlerarten lassen sich durch die Betrachtung der einzelnen Bilder nicht ermitteln.

6.2 Fehleranalyse

Wie gegen Ende des Kapitels 6.1 beschrieben, lässt die Betrachtung der einzelnen Bilder nur wenig Schlüsse auf die Qualität der Schweißnaht zu. Daher ist eine Betrachtung der Sequenz aller Bilder notwendig. Um gesamte Sequenzen zu analysieren, werden Auswertelgorithmen in Python initialisiert.

Für die Manipulation der Bilder ist der prinzipielle Aufbau einer Schwarz-Weiß-Aufnahme wichtig. Jedes Bild besteht aus Pixeln, denen ein Wert zwischen 0 und 255 zugeordnet ist. Diese Werte entsprechen in der sichtbaren Abbildung Dunkel (Schwarz = 0) und Hell (Weiß = 255) und werden, von dem Python-Programm in Matrizen gespeichert. Diese wiederum werden mit 5 verschiedenen Methoden verglichen:

Mittelwert

Für die Mittelwertanalyse wurde der Mittelwert für jeden Pixel über alle Bilder gebildet.

Maxima

Das Maxima vergleicht jeden geographisch identen Pixel mit dem äquivalenten Pixel der anderen Bilder und speichert den höchsten Wert ab.

Minima

Das Minima berechnet sich wie das Maxima, nur dass der niedrigste Wert gespeichert wird.

Standardabweichung

Die Standardabweichung vergleicht alle Pixelwerte mit dem äquivalenten Pixel der anderen Bilder, unter Zuhilfenahme der Formel 6.1:

$$st.Ab. = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (6.1)$$

Wobei x_i der Pixelwert des Bildes i , μ der Erwartungswert (in diesem Fall der Mittelwert) und n die Anzahl der Bilder ist. Die Summe wird für jede Pixelposition neu berechnet und umfasst sämtliche Bilder.

relative Standardabweichung

Die relative Standardabweichung setzt die vorher errechnete Standardabweichung in Relation, indem der errechnete Wert durch den Erwartungswert (in diesem Fall wieder der Mittelwert) dividiert wird.

Nach dieser statistischen Analyse wurden die Ergebnisse in einer neuen Matrix gespeichert und diese wieder als Bild dargestellt. Das Programm ist im Anhang abgebildet und näher beschrieben (vgl. Anhang 14).

Da in der Versuchsreihe III die deutlichsten Bilder aufgenommen wurden, dient dieses Setup für die weitere Analyse.

6.3 Dynamikanalyse

Neben der Analyse der Fehler, ist auch die Betrachtung der Dynamik während des Schweißprozesses interessant. Die Stabilität während des Prozesses lässt auf die Qualität Rückschlüsse zu. Hierfür wurde ein Python-Programm verwendet, welches eine Pixelzeile kurz nach der Eintreffpunkt des Lasers herausnimmt und mit den gleichen Zeilen der nächsten Bilder vergleicht. Das nur eine Zeile ausgewählt wurde, liegt an der Begrenzung der Rechenkapazität. Um trotzdem eine repräsentative Analyse zu gestalten, wurde eine Pixelzeile gewählt, welche ungefähr den Übergang zwischen Laserauftreffpunkt und Schweiß bildete.

Die Werte der jeweiligen Pixel werden verglichen, die Differenz gespeichert und als 3D-Plot ausgegeben. Dadurch lassen sich Schwankungen zwischen Hell und Dunkel und damit Temperaturdifferenzen zeigen. Das Python-Programm ist im Anhang 14 abgebildet und beschrieben.

6.4 Analyse des Erwartungswertes

Wie Dorsch et al. in ihrer Arbeit beschreiben, kann aus der Helligkeit der Aufnahmen im Bereich der Lasereinwirkung auf die Detektion von False Friends rückgeschlossen werden. Dies ist physikalisch nachvollziehbar, da im Gegensatz zu einer fehlerfreien Schweißung nicht genügend Energie über die Schweißnaht in das untere Werkstück gelangen kann. Damit ist die Erwärmung des oberen Werkstückes im Vergleich höher und somit auch die thermische Abstrahlung größer. Dies sollte mit einer NIR-Kamera messbar sein.

Um dies zu testen, wertet ein Python-Programm (vgl. Anhang 14) zwei verschiedene Testgebiete aus. Diese sind in folgender Abbildung dargestellt.

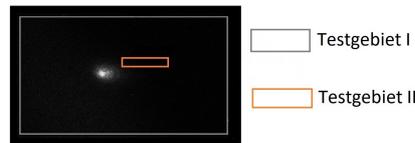


Abbildung 6.4: Testgebiete für die Erwartungswertanalyse

Innerhalb dieser Bereiche berechnet das Programm den Erwartungswert für jeden Pixel des Testgebietes mit der Formel 6.2, wobei E der Erwartungswert, x_i der einzelne Pixelwert und n_{ges} die gesamte Anzahl der Pixel in dem Testgebiet sind. In der bereits erwähnten Arbeit von Dorsch et al. wurde der Vergleich der Helligkeit für das Mittelwertsbild vorgeschlagen. Zusätzlich zu dieser Auswertung wurde auch die gesamte Sequenz ausgewertet und der Erwartungswert für jedes Bild in einem Graphen mit einer Referenzaufnahme verglichen.

$$E = \frac{\sum x_i}{n_{ges}} \quad (6.2)$$

7 Resultate

Dieses Kapitel dokumentiert die Resultate der Versuchsauswertung. Wie im weiteren Verlauf ersichtlich wird, haben die wenigsten Bildsequenzanalysen das Potential, Fehler in einer Schweißnaht aufzuzeigen. Dennoch ist der grundlegende Ansatz erfolgversprechend, daher sind viele Gegenüberstellungen im Anhang aufgezeigt und werden im Abschnitt 7.1 genauer erläutert.

Um in weiterer Folge einen Fehler in einer Schweißnaht detektieren zu können, ist die Betrachtung der Aufnahmen bei verschiedenen eingebauten Fehlern wichtig. Diese Betrachtung und eine genaue Analyse der jeweiligen Fehler ist im Abschnitt 7.2 zu finden.

Auf die Resultate der Untersuchung des Dynamikverhaltens wird im Abschnitt 7.3 näher eingegangen.

Wie eingangs in der Arbeit erwähnt (vgl. Kapitel 4.2.4), gibt es den Ansatz mithilfe einer NIR-Kamera auf False Friends zu schließen. Die benötigten Informationen für diesen Ansatz werden in Abschnitt 7.4 dargestellt. Die Auswertung dieser Informationen und der Vergleich mit den zu erwartenden Ergebnissen wird im Kapitel 8 beschrieben.

7.1 Bildaufstellung

In der Bildaufstellung werden alle ausgewerteten Aufnahmen gezeigt, die ein Potential zur Fehlererkennung haben. Da die einzelnen Bilder genauer im nachfolgenden Abschnitt 7.2 ausgewertet werden, wird hier nur auf den Aufbau der Aufstellung eingegangen. Die Tabellen selbst sind im Anhang 14 zu finden.

In diesen Tabellen zeigen die Spalten die jeweilige Versuchsreihe, wobei oben die Art des eingebauten Fehlers angegeben ist. Die Zeilen repräsentieren die jeweilige Art der Auswertung, wie im Kapitel 6.2 beschrieben wurde. Da die erste Spalte das Referenzbild zeigt, sollten alle Bilder der jeweiligen Fehler, mit dem ersten Bild der betreffenden Zeile verglichen werden.

Hierbei ist festzustellen, dass die wenigsten Bilder Aufschlüsse über die Qualität der Schweißnaht zulassen, da die Abweichungen zum Referenzbild zu gering sind. Die Fälle, in denen die Diskrepanz ausreicht, werden im Folgenden gezeigt.

7.2 Bildanalyse

Wie eingangs erwähnt, lassen nicht alle Sequenzanalysen direkte Rückschlüsse auf Fehler in einer Schweißnaht zu. Um nun die Fehlerdetektion zu untersuchen, wurden verschiedene Fehler in die Versuchsreihen integriert. Die jeweiligen Aufnahmen zu diesen Fehlern werden im Folgenden mit Referenzaufnahmen verglichen. Diese Referenzaufnahmen sind die aufgenommenen Bilder von fehlerfreien Schweißungen, die mit ähnlichen Schweißparametern durchgeführt wurden, wie die der fehlerhaften Schweißung.

7.2.1 Porosität

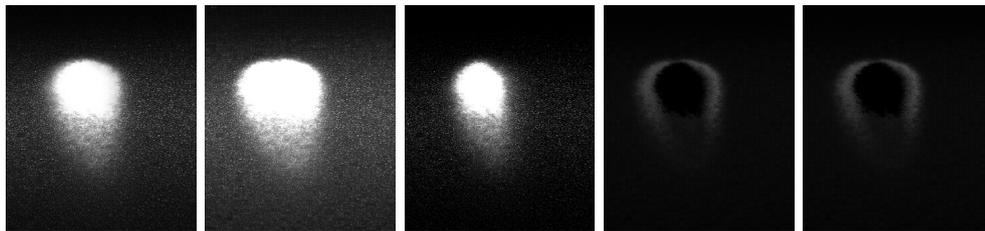
Porosität kann bei verschiedenen Schweißparametern auftreten. Die Aufnahmen in Abbildung 7.2 zeigen eine Gegenüberstellung von einer Referenzaufnahme zu einem Versuch, der Porosität zur Folge hatte. Diese Porosität konnte durch Schliffbilder nach der Bearbeitung bewiesen werden. Die Abbildung 7.1 zeigt ein solches Schliffbild eines Versuches mit den unten genannten Parametern.



Abbildung 7.1: Schliffbild der Porosität

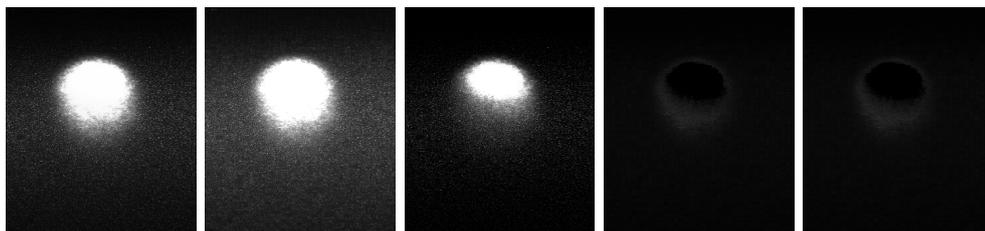
Der Referenzversuch wurde mit der Leistung von 700 W, einer Geschwindigkeit von 20 mm/s und damit mit 35 J/mm durchgeführt, der fehlerbehaftete Versuch mit 450 W, 10 mm/s und damit mit 45 J/mm. Beide Schweißnähte wurden auf der im Kapitel 5.4 beschriebenen Probenkonstellation I gezogen.

Referenzaufnahmen:



(a) Mittelwert (b) Maximum (c) Minimum (d) std. Ab. (e) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit Porosität:



(f) Mittelwert (g) Maximum (h) Minimum (i) std. Ab. (j) rel. std. Ab.

Abbildung 7.2: Vergleichsaufnahmen für Porositäten

Der Vergleich der Mittelwerte (a) zu (f) zeigt, dass die Aufnahme (f) breiter ist. Diese Beobachtung ist nicht ungewöhnlich, da die Breite, laut Dorsch et al., vor

allem von der eingebrachten Energie und der Geschwindigkeit abhängt. Das bedeutet, dass mehr Energie bei geringerer Geschwindigkeit breitere Schmelzbecken verursacht. Dies ist auch bei der Ausprägung des Schweißes zu erkennen. Ein langer ausgeprägter Schweiß eines Schmelzbeckens deutet auf hohe Schweißgeschwindigkeiten hin. Diese Indikatoren, vor allem die Breite des Schmelzbeckens, sind auch beim Vergleich der Aufnahmen (b) zu (g) und (c) zu (h) wieder zu erkennen. Auch die geringer erscheinende Standardabweichung (i) und (j) lassen sich auf die langsame Geschwindigkeit zurückführen. Denn durch den verringerten Vorschub konnten, bei dieser Probe, mehr Bilder aufgenommen werden. Diese waren gleichmäßiger als die der Referenzaufnahme und weisen somit weniger Streuung um den Mittelwert auf. Daher ist sowohl die Standardabweichung als auch die relative Standardabweichung klein.

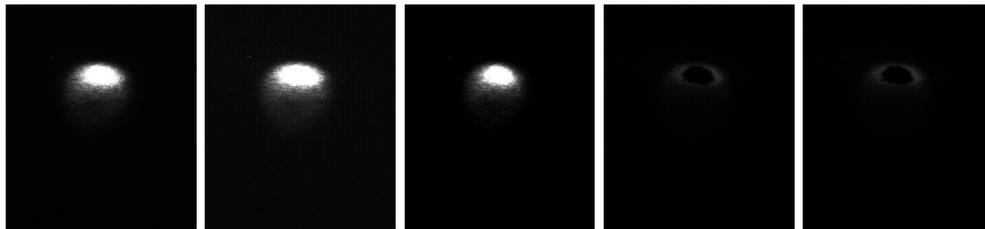
Die Gegenüberstellung deutet darauf hin, dass die Entstehung von Porosität mit einer NIR-Kamera nicht belegbar ist.

7.2.2 False Friend

Die Entstehung von False Friends kann verschiedene Ursachen haben. In der Automobilindustrie werden für die Tailored-Blanks meist verzinkte Werkstücke verwendet. Diese sind besonders anfällig für False Friends. Um deren Entstehung zu simulieren, wurden verschiedene Versuche mit unterschiedlichen Werkstoffen durchgeführt. Die betrachteten Werkstoffe waren Edelstahl- (1.4301) und Baustahlbleche (S235JR).

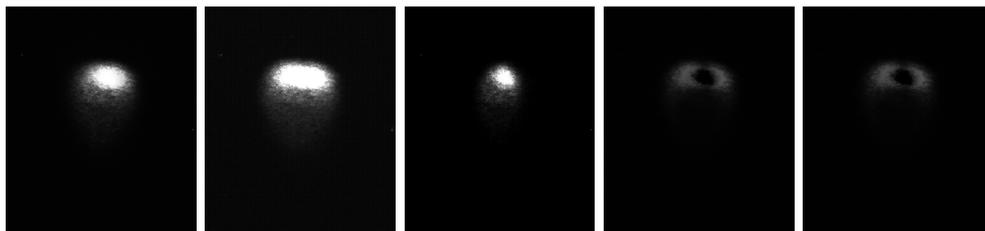
Die Ergebnisse der Edelstahlblech-Versuche sind in Abbildung 7.3 und 7.4 gezeigt. Im Referenzversuch I wurde die Leistung auf 650 W und die Geschwindigkeit auf 20 mm/s, im Fehlerbehafteten auf 700 W und auf 20 mm/s eingestellt. Bei beiden Versuchen hatte der obere Probenkörper eine Dicke von 1,6 mm und der Untere von 0,8 mm. Zwischen die beiden Fügepartner wurde ein Distanzblech mit der Dicke von 0,1 mm eingeklemmt. Der entstehende Spalt wurde, beim fehlerbehafteten Versuch, mit einem dünnen Ölfilm überzogen. Somit verbanden sich die beiden Fügepartner im Schweißprozess, aber bei einem Sturztst aus einem Meter Höhe zerbrach die Verbindung.

Referenzaufnahmen:



(a) Mittelwert (b) Maximum (c) Minimum (d) std. Ab. (e) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit False Friend:



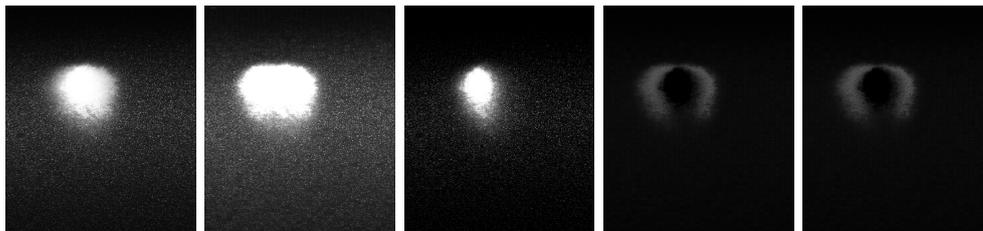
(f) Mittelwert (g) Maximum (h) Minimum (i) std. Ab. (j) rel. std. Ab.

Abbildung 7.3: Vergleichsaufnahmen für False Friends, Versuch: NiRo I

Zu erkennen ist, dass die Maximalaufnahmen des fehlerbehafteten Versuches breiter, das Minimum schmaler und sowohl die relative als auch die absolute Standardabweichung heller erscheint. Diese Ergebnisse sind mit Resultaten anderer Versuche nicht einheitlich. In Abbildung 7.4 ist das Ergebnis eines solchen Versuches gezeigt. Die Referenzaufnahmen zeigen einen Versuch mit einer Leistung von 460 W und

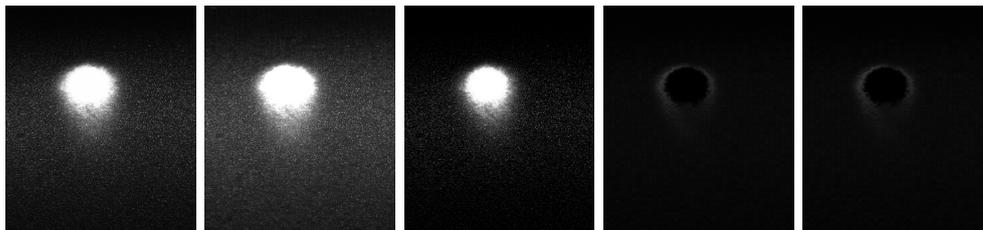
einer Geschwindigkeit von 20 mm/s und die der fehlerbehafteten Aufnahmen einen mit 450 W Leistung und derselben Geschwindigkeit. Bei beiden Versuchen wurde wieder ein Distanzblech mit einer Dicke von 0,1 mm eingespannt und der Spalt von einem Ölfilm durchzogen. Die Schweißverbindung war, wie bei dem Versuch I, augenscheinlich fest, zerbrach aber bei dem Sturzttest.

Referenzaufnahmen:



(a) Mittelwert (b) Maximum (c) Minimum (d) std. Ab. (e) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit False Friend:



(f) Mittelwert (g) Maximum (h) Minimum (i) std. Ab. (j) rel. std. Ab.

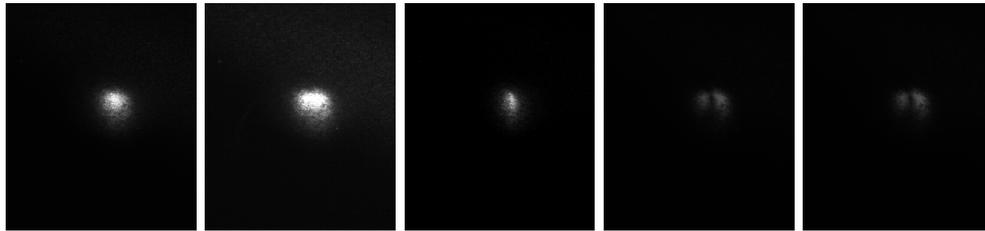
Abbildung 7.4: Vergleichsaufnahmen für False Friends, Versuch: NiRo II

Die vorher getroffenen Behauptungen wurden mit diesem Versuch widerlegt. Weder wirkte in Abbildung 7.4 (g) breiter als (b) noch (h) schmäler als (c), in diesem Fall ist Gegenteiliges zu beobachten. Die Standardabweichung, beziehungsweise auch die relative Standardabweichung, scheint in beiden Fällen im fehlerbehafteten Versuch weniger stark ausgeprägt zu sein als die der Referenzaufnahmen.

Die Ergebnisse der Versuche mit Baustahl werden in Abbildung 7.5 und 7.6 gezeigt. Im Versuch I wurden sowohl für den Referenzversuch als auch für den Fehlerbehafteten die Leistung auf 500 W und die Geschwindigkeit auf 20 mm/s eingestellt. Der Unterschied war, dass, um den Fehler einzubauen, ein Distanzblech mit einer Dicke von 0,25 mm zwischen gelegt wurde. Die Verbindung war, wie die Oberen, fest, bis sie dem Sturzttest unterzogen wurde.

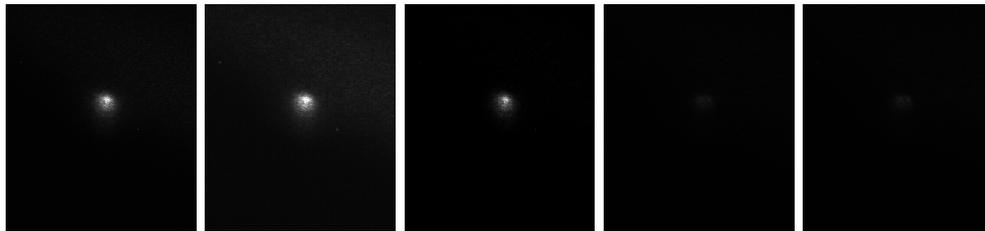
Die Beobachtungen sind sowohl für die Mittel-, Maximal- als auch für die Minimalwertbilder gleich. Sie weisen, für die Referenzaufnahmen, auf größere Schmelzbäder hin. Auch die Standardabweichung und die relative Standardabweichung sind in den Referenzaufnahmen ausgeprägter. Auch diese Resultate konnten durch einen ähnlichen Versuch nicht belegt werden. In Abbildung 7.6 sind die Resultate eines

Referenzaufnahmen:



(a) Mittelwert (b) Maximum (c) Minimum (d) std. Ab. (e) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit False Friend:



(f) Mittelwert (g) Maximum (h) Minimum (i) std. Ab. (j) rel. std. Ab.

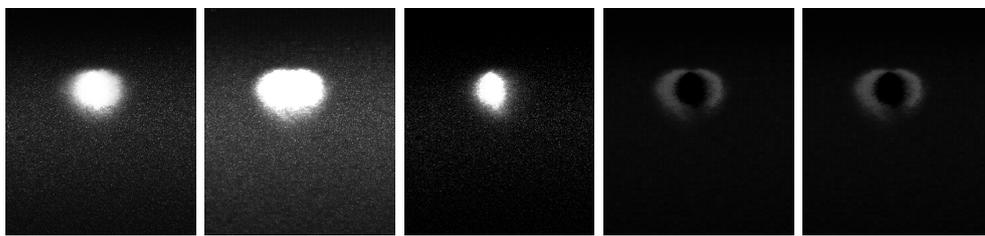
Abbildung 7.5: Vergleichsaufnahmen für False Friends, Versuch: Baustahl I

Versuches gezeigt, bei dem die Leistung des Referenzversuches 423 W und die Geschwindigkeit 20 mm/s betrug. Beim fehlerbehafteten Versuch wurde die Leistung um 1 W gesenkt. Zwischen den Probekörpern wurde wieder ein Distanzblech mit einer Dicke von 0,1 mm eingebracht.

Dieser Versuch zeigte, dass die Beobachtungen des Versuches Baustahl I nicht wiederholt werden konnten. Die Abmessungen der fehlerbehafteten Schweißung scheinen größer zu sein als die der vollen Penetration.

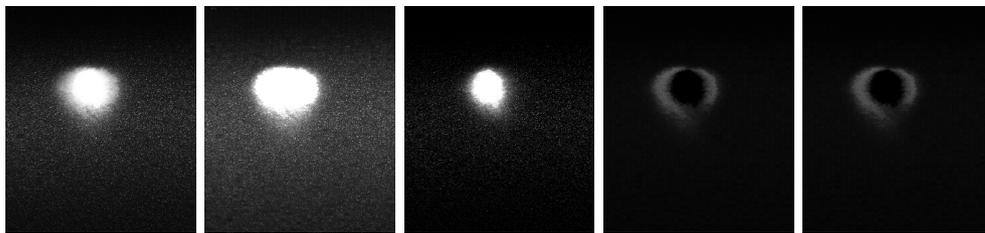
Das Resultat der Untersuchung zeigt, dass die Ergebnisse uneinheitlich sind. Weder können für Edelstahl noch für Baustahlbleche Gesetzmäßigkeiten, welche auf False Friends hinweisen sollten, erkannt werden.

Referenzaufnahmen:



(a) Mittelwert (b) Maximum (c) Minimum (d) std. Ab. (e) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit False Friend:



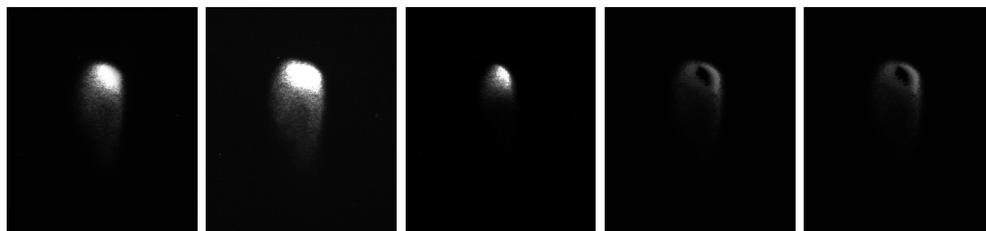
(f) Mittelwert (g) Maximum (h) Minimum (i) std. Ab. (j) rel. std. Ab.

Abbildung 7.6: Vergleichsaufnahmen für False Friends, Versuch Baustahl II

7.2.3 Kollabierendes Keyhole

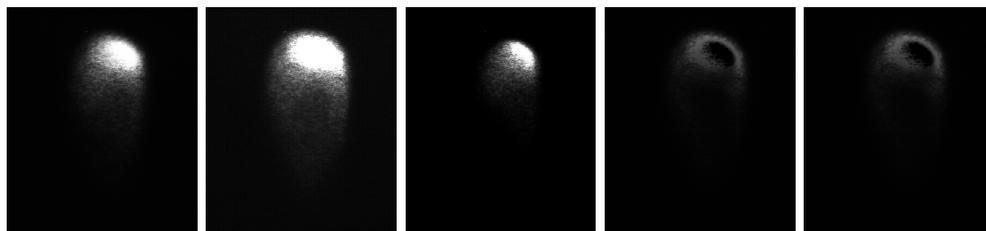
Wie in den vorangegangenen Kapiteln erwähnt, ist die Geometrie des Keyholes entscheidend für die Qualität der Schweißnaht. Sollte das Keyhole kollabieren, so ist die Schweißung fehlerhaft. Daher ist es wichtig, dieses Verhalten frühzeitig zu erkennen. In Abbildung 7.7 sind Aufnahmen von diesem Vorgang zu sehen. Die fehlerhafte und die fehlerfreie Probe wurden beide mit einer Leistung von 1500 W und einer Geschwindigkeit von 20 mm/s hergestellt. Um ein kollabierendes Keyhole zu erzeugen, wurde ein Distanzblech der Dicke 0,25 mm zwischen die Probekörper gelegt. Die Blendenöffnung wurde auf 8 mm eingestellt.

Referenzaufnahmen:



(a) Mittelwert (b) Maximum (c) Minimum (d) std. Ab. (e) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit Fehler:



(f) Mittelwert (g) Maximum (h) Minimum (i) std. Ab. (j) rel. std. Ab.

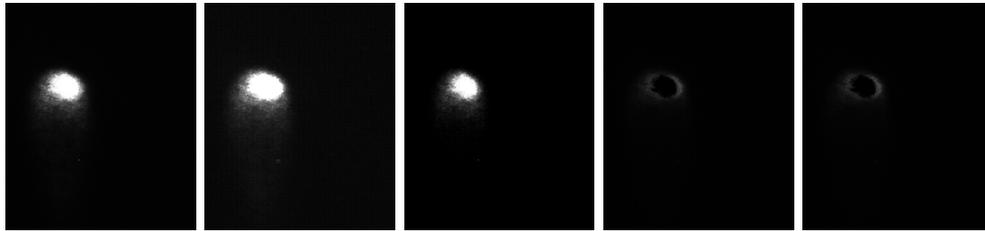
Abbildung 7.7: Vergleichsaufnahmen für ein kollabierendes Keyhole Beispiel I

Ähnlich zu den vorherigen Ergebnissen, scheinen die Mittelwertaufnahme und die Maxima- bzw. Minimalaufnahmen größer und heller. Die direkten Vergleiche von (a) zu (f), (g) zu (b) und (h) zu (c) weisen darauf hin, dass die thermische Emission des fehlerbehafteten Versuches größer war als die des Referenzversuchs.

Um diese These zu verifizieren, wurde der Versuch in ähnlicher Form wiederholt. Dieses Beispiel II wurde ebenfalls mit Edelstahl-Proben derselben Dicke und den gleichen Schweißparametern durchgeführt. Im Unterschied zu dem Beispiel I wurde sowohl für die Referenzaufnahme als auch für die fehlerbehaftete Aufnahme ein Distanzblech benützt. Da sich das Keyhole ab einer Spalthöhe von 0,4 mm wieder stabilisierte, wurden diese Aufnahmen als Referenz für die Spalthöhe von 0,3 mm genutzt. Durch die Verwendung von Distanzblechen für die Referenzaufnahme sind die Ergebnisse dieses Versuches mit Vorsicht zu genießen. Obwohl das Keyhole stabil

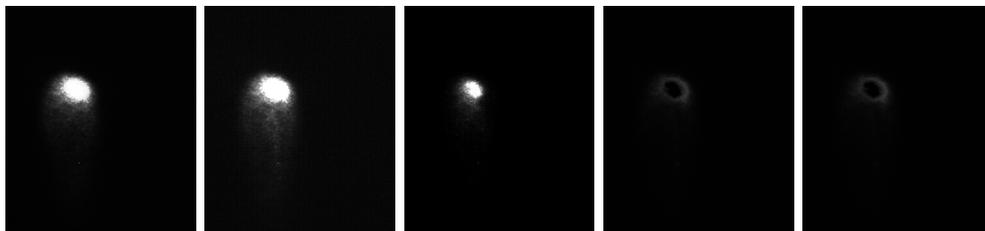
und die Penetration für die Referenzprobe vollständig war, ist der Spalt zwischen den Proben mit 0,4 mm im Vergleich groß.

Referenzaufnahmen:



(a) Mittelwert (b) Maximum (c) Minimum (d) std. Ab. (e) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit Fehler:



(f) Mittelwert (g) Maximum (h) Minimum (i) std. Ab. (j) rel. std. Ab.

Abbildung 7.8: Vergleichsaufnahmen für ein kollabierendes Keyhole Beispiel II

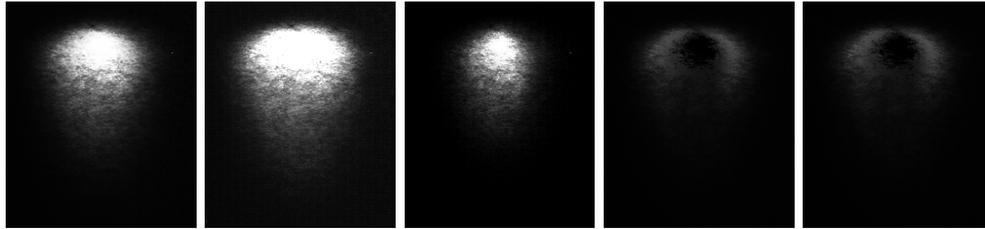
Die Gegenüberstellung in Abbildung 7.8 zeigt, dass ein kollabierendes Keyhole nicht notwendiger Weise eine höhere thermische Abstrahlung verursacht. Die Bilder (f), (g) und (h) zeigen nicht die gleiche und regelmäßige Vergrößerung zu ihren äquivalenten Referenzaufnahmen (a), (b) und (c). Somit ist keine Gesetzmäßigkeit gegeben.

Dementsprechend kann ein kollabierendes Keyhole nicht mit diesem Analyseansatz und dieser NIR-Kamera beobachtet werden.

7.2.4 Löcher

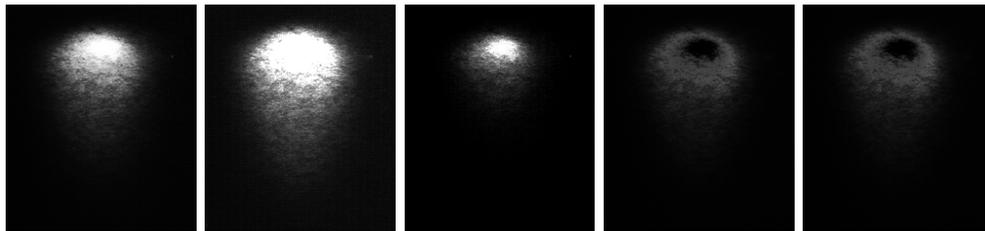
Die Löcher in dem unteren Probenkörper simulieren ein fehlerhaftes Werkstück. Die in Abbildung 7.9 gezeigte Auswertung beruht auf Schweißungen mit der Probenkonstellation I, bei einer Leistung von 1500 W und einer Geschwindigkeit von 20 mm/s.

Referenzaufnahmen:



(a) Mittelwert (b) Maximum (c) Minimum (d) std. Ab. (e) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit Löchern:



(f) Mittelwert (g) Maximum (h) Minimum (i) std. Ab. (j) rel. std. Ab.

Abbildung 7.9: Vergleichsaufnahmen für Löcher

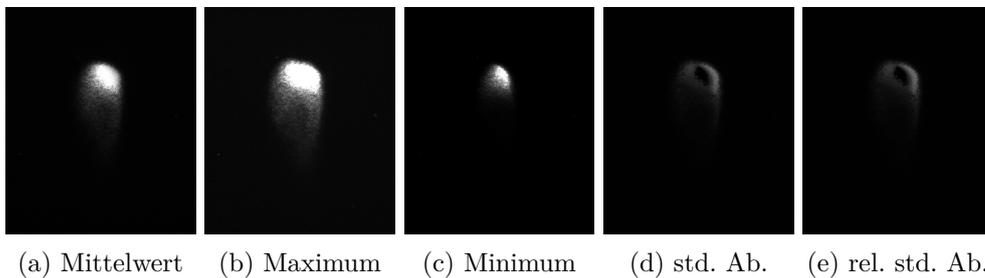
Es ist eindeutig ein Unterschied in der Minimal-Aufnahmen zu erkennen. Die der fehlerbehafteten Aufnahme (h) erscheint um einiges kleiner und schwächer als die des Referenzbildes (c). Diese Beobachtung kann auch objektiv gestützt werden. Der durchschnittliche Pixelwert der Minimalaufnahme entspricht für die Referenzaufnahme 5,2 und für die Fehlerbehaftete 1,5. Auch die Mittelwertaufnahmen (a) und (f) spiegeln dieses Ergebnis wider. Damit sind Löcher und schadhafte Werkstücke gut zu erkennen. Diese Beobachtung ist bei allen Proben mit Bohrungen konsistent. Die Standardabweichung und die relative Standardabweichung lassen diese eindeutigen Schlüsse nicht zu.

7.2.5 Spritzer

Zu Spritzerbildung kommt es beim Schweißen mit hohen Geschwindigkeiten und niedrigen Leistungen. Bei dieser Gegenüberstellung wurde eine Geschwindigkeit von 60 mm/s und eine Leistung von 1500 W, ohne Schutzgas, genutzt, um Spritzer zu erzeugen. Die Aufnahmen dieses Versuches werden in Abbildung 7.10 mit Bildern verglichen, die bei 1500 W und 20 mm/s aufgenommen wurden. Die Referenzaufnahmen wiesen keine Spritzer und die fehlerbehaftete Probe 8 Markierungen in einem Gebiet von ca. 1 cm² auf.

Auch für diese Gegenüberstellung wurden Edelstahl-Proben mit einer Dicke von 1,8 mm benützt.

Referenzaufnahmen:



Aufnahmen mit Spritzer:

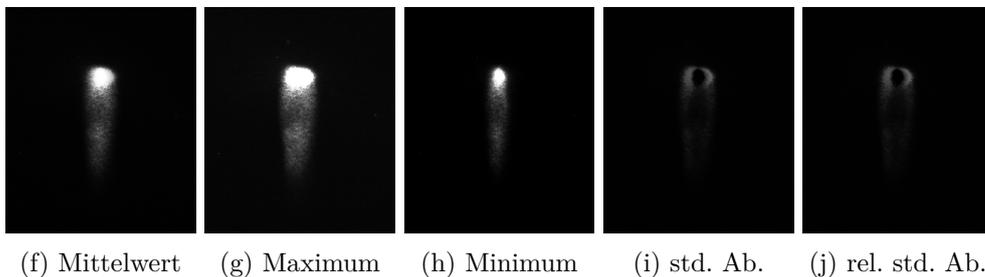


Abbildung 7.10: Vergleichsaufnahmen für Spritzer

Keine dieser Aufnahmen lassen auf Spritzer schließen. Einzig der Schweiß des Schmelzbades ist charakteristisch in den Abbildungen der fehlerbehafteten Aufnahme zu erkennen. Dies lässt sich auf die hohe Geschwindigkeit zurückführen, da die längliche Ausprägung der Schmelze ein direktes Resultat der hohen Energieeinwirkung und der hohen Geschwindigkeit ist.

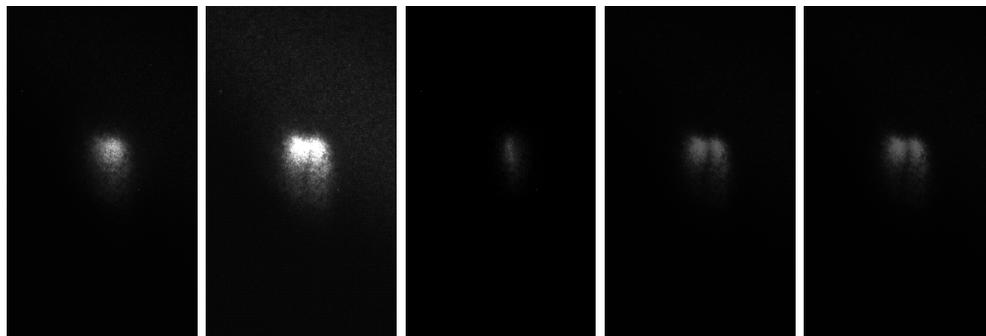
7.2.6 Steigende Spaltweite

Die Spaltgröße hat einen gravierenden Einfluss auf die Fehlerfreiheit der Schweißung. Daher wurde untersucht, ob sich die Spaltgröße mithilfe der verwendeten NIR-Kamera nachweisen lässt.

Im Anhang 14 sind die Resultate der Analyse einer steigenden Spaltweite gezeigt. Es lassen sich allerdings keine Veränderungen oder Regelmäßigkeiten mit steigender Spaltweite erkennen.

7.2.7 Verzug

Bei der Einwirkung von hohen Laserintensitäten treten Verformungen des Materials auf. Da die Proben in diesem Versuch eingespannt waren, zeigt sich dies am Ende der Probe deutlich. Die Verformung äußerte sich in einer sich nach oben wölbender Probe. Diese Wölbung konnte auf den Bildern verfolgt werden, denn die WEZ „wanderte“ auf den Bildern in eine Richtung. Dieses Phänomen lässt sich auf den Versuchsaufbau zurückführen. Wenn die Probe sich nach oben verformt, trifft der Laser die Probe an einer höheren Stelle. Bei weiterer Lasereinwirkung prägt sich die Verformung weiter aus. Da die Kamera seitlich montiert ist, führt dies zu einer Veränderung der Wahrnehmung der Lage des Laserauftreffpunktes. Damit stellt die Sequenz der Bilder ein „Wandern“ des Eintreffpunktes dar.



(a) Mittelwert (b) Maximum (c) Minimum (d) std. Ab. (e) rel. std. Ab.

Abbildung 7.11: Vergleichsaufnahmen für Verformung des Werkstückes

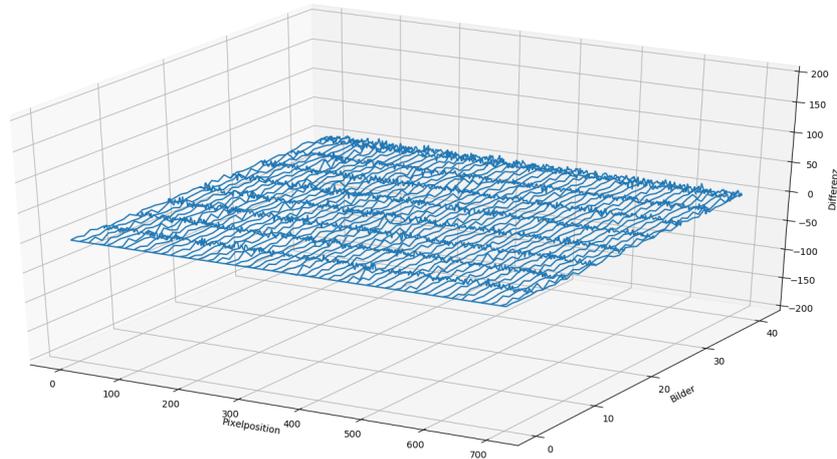
In Abbildung 7.11 ist dieses Verhalten dargestellt. Da sich der Laserauftreffpunkt verschiebt, zeigt das Maximum diese Verschiebung deutlich. Im Bild (b) scheint es zwei WEZ zu geben. Dies ist ein eindeutiger Hinweis auf die Verformung des Werkstückes. Auch der Mittelwert (a) erscheint verschwommener. Neben der eindeutigen Darstellung von zwei Wärmeinflusszonen in der Maximalansicht (b), zeigen auch die Standardabweichung (d) und die relative Standardabweichung (e) diese Unterschiede auffallend.

7.3 Dynamikanalyse

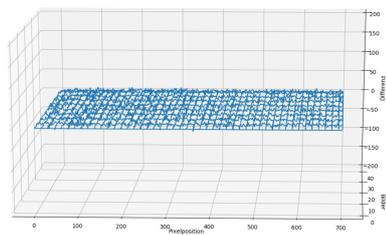
Ein wesentliches Qualitätskriterium der Schweißung ist die Dynamik des Prozesses selbst. Daher ist das Abbilden dieser Dynamik ein wichtiger Schritt der Fehlerdetektion.

Im Kapitel Auswertung (vgl. 6.3) wurde bereits beschrieben, welcher Ansatz in dieser Arbeit gewählt wurde. Obwohl nur gewisse Schweißfehler detektiert werden können, sind die restlichen Ergebnisse vielversprechend. Während Porosität, Spritzer, False Friends und steigende Spaltweiten nicht erkannt werden können, sind kollabierende Keyholes und mit Löchern behaftete Werkstücke sehr gut zu erkennen.

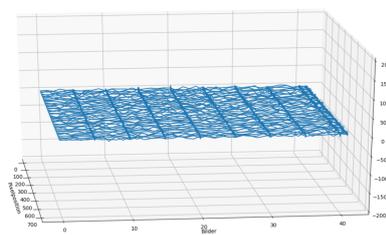
In Abbildung 7.12 ist eine fehlerfreie Schweißung abgebildet. Der Versuch wurde mit einer Leistung von 0,7 kW und einer Geschwindigkeit von 20 mm/s durchgeführt. Der Probe entsprach der Probenkonstellation III.



(a) Gesamt



(b) Ortsverlauf



(c) Zeitverlauf

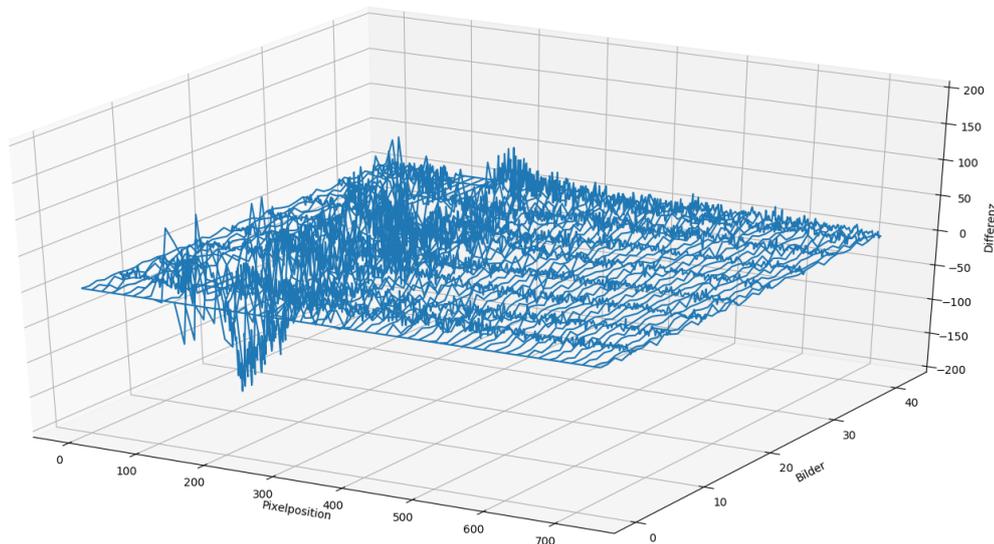
Abbildung 7.12: Dynamikanalyse eines fehlerfreien Versuches

Das Bild (a) zeigt den gesamten 3D-Plot, wobei die x-Achse die Pixelposition des

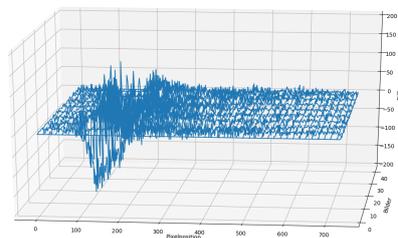
jeweiligen Bildes, die y-Achse die Bilder und damit den Zeitverlauf und die z-Achse die Differenz der Pixelwerte abbildet. Die Abbildung (b) zeigt den Ortsverlauf, da hier die Hauptachse die Pixelpositionen wider gibt. Das letzte Bild (c) zeigt den Zeitverlauf der Differenzen, da hier der 3-D Plot hauptsächlich für die einzelnen Aufnahmen aufgenommen wurde.

Das Resultat der Dynamikanalyse für eine fehlerfreie Schweißung ist ein ruhiges, glattes Band im 3-D Plot. Die kleinen Schwankungen lassen sich auf das Rauschen der verwendeten Kamera zurückführen.

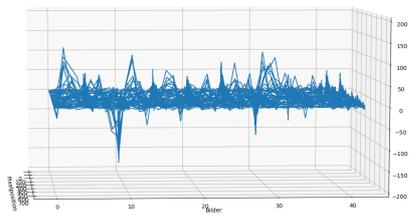
Dieses Band verliert die Glätte bei einem kollabierenden Keyhole. Dies ist in Abbildung 7.13 zu sehen. Diese Abbildung ist gleich aufgebaut und hat die gleichen Achsenabschnitte wie die der fehlerfreien Schweißung. Die Schweißnaht wurde auf einer Probe der Konstellation III mit einer Leistung von 1,5 kW und einer Geschwindigkeit von 20 mm/s gezogen. Zwischen den Probekörpern wurde ein Distanzblech mit einer Dicke von 0,25 mm befestigt.



(a) Gesamt



(b) Ortsverlauf



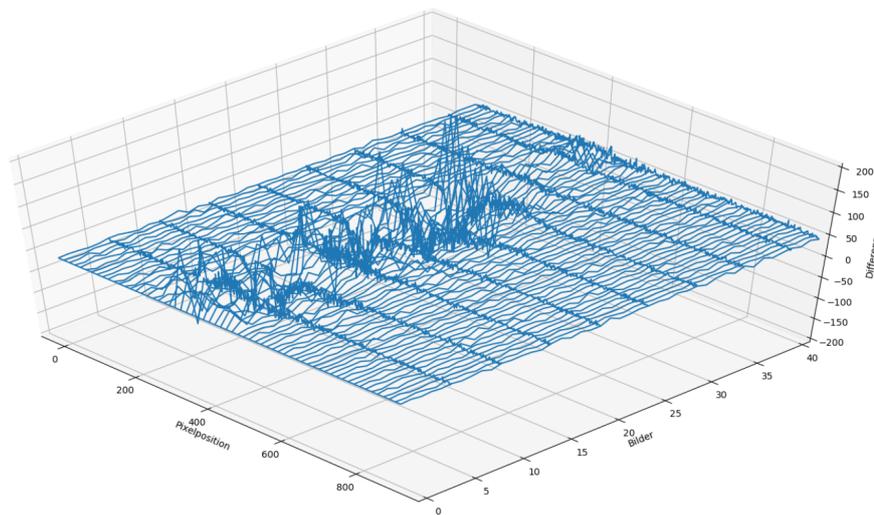
(c) Zeitverlauf

Abbildung 7.13: Dynamikanalyse eines kollabierenden Keyholes

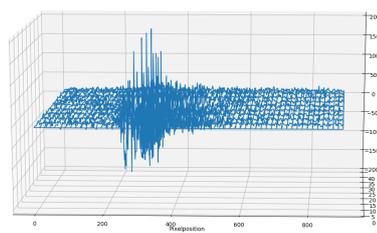
Der gesamte 3-D Plot weist nun große Schwankungen auf. Diese Fluktuationen

können in den Teilbildern (b) und (c) genauer analysiert werden. Während der Ortsverlauf (b) genaue Aufschlüsse über die Lage der Problemstellung gibt, zeigt der Zeitverlauf (c), wann das Keyhole kollabiert ist. Der ruhige Bereich von Pixelposition 400-800 weist daraufhin, dass die Schweißung nicht in diesem Bereich des Bildes stattgefunden hat.

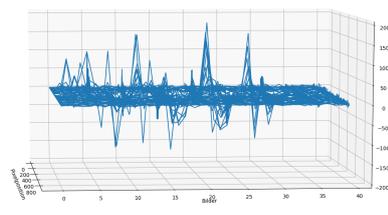
Neben den kollabierenden Keyholes, lässt sich auch defektes Werkmaterial darstellen. Im Falle der Versuche mit eingebauten Löchern, im unteren Probestück, sind die Ausschläge der Dynamikanalyse ebenfalls signifikant. Die Ausschläge sind bis zu 30-mal höher als das durchschnittliche Rauschen. In Abbildung 7.14 ist das Ergebnis eines solchen Versuches abgebildet. Auch in diesem Fall ist die Konstruktion des 3-D Plots identisch zu den vorherigen. Der Versuch selbst wurde mit einer Leistung von 1,5 kW und einer Geschwindigkeit von 20 mm/s vollführt.



(a) Gesamt



(b) Ortsverlauf



(c) Zeitverlauf

Abbildung 7.14: Dynamikanalyse bei fehlerhaften Werkstücken

In dieser Abbildung ist die Differenz im Band sogar höher als bei einem kollabierenden Keyhole. Vor allem im Teilbild (c) ist das Eintreten der Fehlerstellen im unteren Werkstück gut zu beobachten. Sollte die thermische Abstrahlung geringer werden

und damit das resultierend Bild dunkler, so ist die Differenz negativ. Vice versa führt eine höhere thermische Emission zu positiven Differenzen. Anhand dieser Betrachtung lässt sich das eingebrachte Lochmuster gut erkennen. Die anfänglichen Schwankungen lassen sich auf die Einspannungsvorrichtung zurückführen. Diese befinden sich in den ersten aufgenommenen Bildern zwischen WEZ und Kamera. Dies führt zu einer Verfälschung, da sowohl Abschirmung als auch Reflexion vorliegen.

7.4 Erwartungswertanalyse

Die Resultate der Erwartungswertanalyse spiegeln nicht die erwarteten Ergebnisse wider. In der Tabelle 7.1 sind die Auswertungen des Erwartungswertes für beide Testgebiete, wie im Kapitel 6.4 beschrieben, abgebildet. Die Werte beziehen sich auf einen Versuch mit der Probenkonstellation III und wurden mit einer Leistung von 0,5 kW und einer Geschwindigkeit von 20 mm/s ermittelt, wobei der Unterschied zwischen der Referenzprobe und fehlerhaften Probe ein Distanzblech mit einer Dicke von 0,25 mm war.

Der Vergleich zwischen einem Referenz-Mittelwertbild mit einem mit False Friend zeigt, dass der Erwartungswert in beiden Testgebieten für die Referenz höher ist. Die Vermutung im Referenzpaper wiesen in Richtung eines höheren Erwartungswertes für den Fehler des False Friend.

	Referenz	False Friend
Testgebiet I	8,3	6,8
Testgebiet II	5,9	4,4

Tabelle 7.1: Erwartungswertauswertung des Einzelbildes

Das gleiche Resultat liefert die Betrachtung der Mittelwerte der einzelnen Bilder, die in Abbildung 7.15 gezeigt werden. Hier wurde der Erwartungswert für die einzelnen Bilder einer Sequenz aufgetragen, wobei die x-Achse die einzelnen Bilder und die y-Achse den Erwartungswert wiedergibt. Die blaue Linie zeigt den Referenzwert und die Rote den Erwartungswert der fehlerbehaftete Probe.

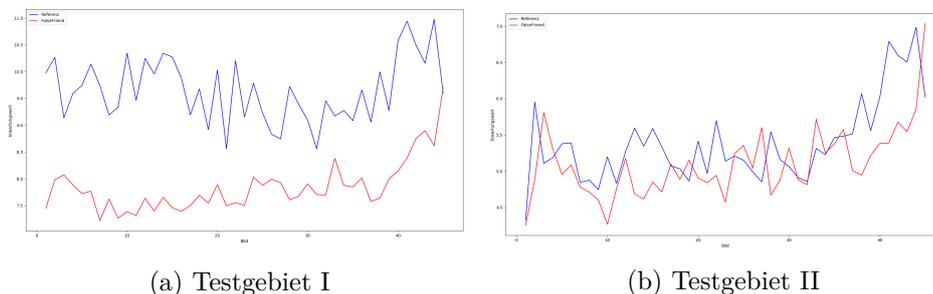


Abbildung 7.15: Erwartungswerte

Im Teilbild (a), welches das Testgebiet I darstellt, ist der Erwartungswert des False

Friends wesentlich niedriger als seine Referenz. Erst beim letzten Bild nähern sich die beiden Kurven sprungartig an. Im verfeinerten Testgebiet (b) sind die Erwartungswerte für alle Aufnahmen ähnlich. Auch dies widerspricht den Erwartungen aus dem Referenzpaper.

8 Diskussion

Die Versuchsreihen I und II haben keine Fehlerdetektion zugelassen. Daher wurde die Versuchsreihe III in den Fokus gerückt. Das Fazit dieser Versuche lässt zwei Schlüsse zu. Erstens, die Analyse der Bildsequenzen unter Zuhilfenahme von statistischen Methoden auf der Basis der verwendeten Versuchsaufbauten, ist nicht zielführend. Zweitens, die Dynamikanalyse ist wesentlich aussagekräftiger als ursprünglich erwartet.

Die verwendete Bildanalyse war in dem benutzten Setup nicht in der Lage, Fehler zu erkennen. Weder Porosität, Spritzer, False Friends, noch fehlerhafte Werkstücke konnten detektiert werden. Allerdings wurde in dem Paper „Online NIR diagnostic of laser welding processes and its potential for quality assuring sensor systems“¹, in welchem mit einem ähnlichen Versuchsaufbau Fehlerdetektionen untersucht wurden, andere Ergebnisse erzielt.

Spritzer konnten, in der angesprochenen Arbeit, eindeutig identifiziert werden. Der dafür verantwortliche Unterschied liegt an der Aufnahmefrequenz der Kamera, welche benutzt wurde. Während die in dieser Arbeit verwendeten Kamera 15 Bilder pro Sekunde aufnahm, konnte die andere Kamera 100 Bilder pro Sekunde aufzeichnen. Auch gab es einen erfolgreich geprobten Ansatz, False Friends zu detektieren. Dieses Konzept verglich die Mittelwertaufnahme einer fehlerfreien Schweißung mit der eines False Friends. Das Ergebnis war eine erhöhte Helligkeit des Bildes um die WEZ bei der Mittelwertaufnahme des False Friends. Daher wurde in dieser Arbeit die Untersuchung des Erwartungswertes eingehend betrachtet. Je heller ein Bereich in einer Aufnahme erscheint, desto höher ist der Erwartungswert jedes einzelnen Pixels. Daher wurde ein höherer Erwartungswert für die Bereiche um einen False Friend vermutet als bei seinem Referenzbild. Die Resultate zeigten aber Gegenteiliges. Die Erklärung hierfür ist wieder bei der Kamera zu suchen. Eine Vermutung betrifft den Aufbau der Kamera. Die Emission des Wellenlängenbereiches von 1500 - 1580 nm regt eine Phosphor-Schicht auf der Kamera an. Diese Anregung kann detektiert werden und ermöglicht so das Aufzeichnen des Bildes. Es könnte sein, dass dadurch keine genaue Korrelation zwischen aufgenommener Strahlung und dem wiedergegebenen Bild bestand. Weiteres ist die für Dorsch et al. die Länge des Schmelzbades ein Indikator für eine vollständige Penetration. Es ist ein deutlicher Sprung zwischen langen und kurzen Schweißbädern zu erkennen, wobei die Kurzen ein Anzeichen für eine vollständige Durchdringung sind. Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass bei vollständiger Penetration mehr Energie in den unteren Fügepartner transferiert wird und weniger in die Ausbildung eines große Schmelzbades. Dies konnte mit dem verwendeten Versuchsaufbau nicht beobachtet werden. Eine Möglichkeit diese Längenänderung zu erkennen, wäre die Benützung einer Kamera, die sich koaxial am Laserbearbeitungskopf anbringen lässt.

Der Vergleich der Aufnahmen von Porosität ließ ebenfalls keine Gesetzmäßigkeit erkennen.

¹Dorsch u. a., „Online NIR diagnostic of laser welding processes and its potential for quality assuring sensor systems“.

Die Einbindung von fehlerbehafteten Proben, in diesem Fall der Löcher, ließ sich eindeutig mit dem Vergleich der Mittelwertbilder erkennen. Noch besser war die Fehlererkennung anhand der Dynamikanalyse. Diese ermöglichte eine relativ gute Analyse des Schweißprozesses.

Anhand der Dynamik konnten sogar kollabierende Keyholes erkannt werden. Es ist also mit der vorgeschlagenen Dynamikanalyse möglich, die Stabilität des Schweißprozesses zu bewerten.

9 Ausblick

9.1 Weitere Ansätze zur Fehlervermeidung und Optimierung

Alternativ zu der in dieser Arbeit untersuchten Fehlerdetektion, führt die Fehlervermeidung auch zu wirtschaftlicher Optimierung. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Arbeit „An optimization method for defects reduction in fiber laser keyhole welding“¹ erwähnenswert. Diese Arbeit konzentriert sich auf die zu wählenden Parameter für eine Tiefschweißung mit einem Faser-Laser.

Eine weitere Möglichkeit Schweißparameter besser zu wählen, ist die Simulation des Keyholes durch die Betrachtung der Oberflächenspannung und der Rückstoßkraft des verdampfenden Materials².

Erfolgversprechend ist auch die Kombination aus Simulation und Beobachtung. In dem Artikel „Theoretical analysis of photodiode monitoring of laser welding defects by imaging combined with modeling“³ wurde die Emission der Wärmeeinflusszone durch ein Modell prognostiziert und mit den tatsächlichen Ausstrahlungen verglichen. Diese Analyse birgt wegen der Kombination aus Simulation und Beobachtung ein großes Potential zur Fehlervermeidung.

Eine etwas ältere Methode zur Fehlerreduktion wurde in dem Bericht „Prevention of welding defect by side gas flow and its monitoring method in continuous wave Nd:YAG laser welding“⁴ vorgestellt. Hierbei wird das Schweißergebnis durch einen seitlich eintreffenden Gasstrom aus ungefähr 1mm Entfernung wesentlich verbessert. Dies betrifft nicht False Friends, aber zum Beispiel die Spritzerbildung und Porosität.

9.2 Online NIR-Kamera Überwachung

Da der Laserschweißprozess ein automatisierter Prozess ist, muss auch die Überwachung dieses Prozesse autonom verlaufen. Daher ist die Entwicklung einer voll-automatischen Prozessüberwachung mit eingebauter Fehlerdetektion eine der angestrebten Zukunftsmodelle in diesem Einsatzbereich. Eine Möglichkeit dafür bietet die Kombination aus Überwachung mit einer hochauflösenden, high-speed NIR-Kamera, Informationsverarbeitung mit einem Cellular-Network und selbstlernenden kybernetischen Regelkreisen. Um künftig solche intelligenten Systeme zu entwickeln, sind Arbeiten wie diese, die sich mit der empirischen Prüfung von Teilspekten der Thematik beschäftigen, hilfreich.

Weitere Forschungen sollten mit einer Kamera durchgeführt werden, welche mehr Bilder pro Sekunde aufnehmen kann. Damit lassen sich bessere Dynamikanalysen realisieren und Spritzerbildung detektieren.

¹Ai u. a., „An optimization method for defects reduction in fiber laser keyhole welding“.

²Ronda und Siwek, „Modelling of laser welding process in the phase of keyhole formation“.

³Norman, Engström und Kaplan, „Theoretical analysis of photodiode monitoring of laser welding defects by imaging combined with modelling“.

⁴Kamimuki u. a., „Prevention of welding defect by side gas flow and its monitoring method in continuous wave Nd“.

Um False Friends anhand der Veränderung des Schmelzbades zu erkennen, wird eine sensiblere Kamera benötigt. Diese Kamera sollte außerdem einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Pixelwert und der Intensität der Emission des Schmelzbades herstellen. Bei der benützten Kamera ist es nicht ersichtlich, ob ein hoher Pixelwert auch einer höheren Temperatur des Schmelzbades entspricht.

Die Beobachtungsposition der Kamera hatte in dieser Arbeit keine Auswirkung auf die Ergebnisse. Allerdings kann eine koaxiale Anordnung bei leistungsstärkeren Kameras diese unterstützen und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sicherstellen.

Um die Dynamikanalyse auf ein ganzes Bild anzuwenden, werden höhere Rechenleistungen benötigt. Eine Möglichkeit diese zu erreichen, ist die Benützung von CNNs.

10 Abbildungsverzeichnis

1.1	Global Market for Laser Systems for Materials Processing	1
2.1	Verschiedene Stoßformen	4
2.2	Querschnitt einer vollständigen Schweißnaht und eines False Friends	6
3.1	Wellenlänge und Photonenenergie	9
3.2	Absorbtion und Emission	11
3.3	Licht und Laser	12
3.4	Beersches Gesetz: Absorbierte Intensität nach Eindringtiefe z	16
3.5	Unterschiedlich zwischen Tief- und Wärmeleitungsschweißen	20
3.6	Schliffbild einer Tiefschweißung	20
3.7	Schweißumgebung beim Tiefschweißen	21
3.8	Wellenlänge der emittierten Strahlung eines schwarzen Körpers . . .	22
4.1	Prinzip der Durchstrahlungsprüfung	26
4.2	Prinzip der magnetischen Prüfung	27
4.3	Setup für die Wärmestromprüfung	29
4.4	Möglichkeiten zu Analyse von NIR Aufnahmen	32
5.1	Versuchsaufbau Normalperspektive	33
5.2	Versuchsaufbau Vogelperspektive	34
5.3	Einspannvorrichtung	35
5.4	Reflexionsgrad der Linse	36
5.5	Einzelaufnahme beim CO ₂ -Laser schweißen	38
5.6	Einzelaufnahme beim Faser-Laser schweißen	38
5.7	Einzelaufnahme beim Faser-Laser schweißen	39
6.1	Einzelne Aufnahme beim CO ₂ -Laser schweißen	42
6.2	Einzelbild Versuchsreihe II	43
6.3	Einzelbild Versuchsreihe III	44
6.4	Testgebiete für die Erwartungswertanalyse	46
7.1	Schliffbild der Porosität	48
7.2	Vergleichsaufnahmen für Porositäten	48
7.3	Vergleichsaufnahmen für False Friends, Versuch: NiRo I	50
7.4	Vergleichsaufnahmen für False Friends, Versuch: NiRo II	51
7.5	Vergleichsaufnahmen für False Friends, Versuch: Baustahl I	52
7.6	Vergleichsaufnahmen für False Friends, Versuch Baustahl II	53
7.7	Vergleichsaufnahmen für ein kollabierendes Keyhole Beispiel I	54
7.8	Vergleichsaufnahmen für ein kollabierendes Keyhole Beispiel II . . .	55
7.9	Vergleichsaufnahmen für Löcher	56
7.10	Vergleichsaufnahmen für Spritzer	57
7.11	Vergleichsaufnahmen für Verformung des Werkstückes	58

7.12	Dynamikanalyse eines fehlerfreien Versuches	59
7.13	Dynamikanalyse eines kollabierenden Keyholes	60
7.14	Dynamikanalyse bei fehlerhaften Werkstücken	61
7.15	Erwartungswerte	62
14.1	Vergleichsaufnahmen für Spalt	91

11 Tabellenverzeichnis

5.1	Linsen	36
5.2	Kameraeinstellungen	37
5.3	Installationen	37
7.1	Erwartungswertauswertung des Einzelbildes	62
12.1	Abkürzungsverzeichnis	71
14.1	Tiefschweißen mit NiRo-Blechen	87
14.2	Tiefschweißen mit NiRo36-Blechen	88
14.3	Wärmeschweißen mit Baustahl-Blechen	89
14.4	Tiefschweißen mit Baustahl-Blechen	90

12 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
bzw	beziehungsweise
CNN	Cellular Neural Network
eng	Englisch
FPS	Frames per secounde (Bilder pro Sekunde)
NIR	Nahe Infrarot
NiRo Stahl	Nicht rostender Stahl (in dieser Arbeit 1.4301 (X5CrNi18-10))
TU Wien	Technische Universität Wien
u	und
vgl	Vergleiche
WEZ	Wärmeeinflusszone

Tabelle 12.1: Abkürzungsverzeichnis

13 Verwendete Literatur

- Abt, F. „Real Time Closed Loop Control of Full Penetration Keyhole Welding with Cellular Neural Network Cameras“. In: *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* 6.2 (Sep. 2011), S. 131–137. ISSN: 18800688. DOI: 10.2961/jlmn.2011.02.0007. URL: http://www.jlps.gr.jp/jlmn/index.php?action=laser_volno&volno=602.
- Ahmed, Nasir. *New developments in advanced welding*. Woodhead Publishing Limited, 2005. ISBN: 978-1-85573-970-3. DOI: 10.1533/9781845690892. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781855739703>.
- Ai, Yuewei u. a. „An optimization method for defects reduction in fiber laser keyhole welding“. In: *Applied Physics A* 122.1 (Jän. 2016). ISSN: 0947-8396, 1432-0630. DOI: 10.1007/s00339-015-9555-8. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00339-015-9555-8>.
- Baehr, Hans Dieter und Karl Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. 6., neu bearb. Aufl. OCLC: 300459877. Berlin: Springer, 2008. 789 S. ISBN: 978-3-540-87688-5 978-3-540-87689-2.
- Blug, A. u. a. „The full penetration hole as a stochastic process: controlling penetration depth in keyhole laser-welding processes“. In: *Applied Physics B* 108.1 (Juli 2012), S. 97–107. ISSN: 0946-2171, 1432-0649. DOI: 10.1007/s00340-012-5104-8. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00340-012-5104-8>.
- Breitling, Detlef. *Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung*. Laser in der Materialbearbeitung - Forschungsberichte des IFSW. OCLC: 845686329. München: Utz, Wissenschaft, 2010. 187 S. ISBN: 978-3-8316-0960-4.
- Bäuerle, Dieter. *Laser Grundlagen und Anwendungen in Photonik, Technik, Medizin und Kunst*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 12. Nov. 2008. ISBN: 978-3-527-66161-9 978-3-527-40803-0. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/9783527661619>.
- Dorsch, Friedhelm u. a. „Online NIR diagnostic of laser welding processes and its potential for quality assuring sensor systems“. In: Hrsg. von Friedhelm Dorsch. 20. Feb. 2014, 89630R. DOI: 10.1117/12.2041268. URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2041268>.
- Eichler, Jürgen und Hans-Joachim Eichler. *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen ; mit 57 Tabellen, 164 Aufgaben und vollständigen Lösungswegen*. 6., aktualisierte Aufl. OCLC: 179977567. Berlin: Springer, 2006. 476 S. ISBN: 978-3-540-30149-3.
- Einstein, Albert. „Strahlungs-emission und -absorption nach der Quantentheorie“. In: *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 18 (1916), S. 318–323.
- Fabbro, R. „Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 43.44 (10. Nov. 2010), S. 445501. ISSN: 0022-3727, 1361-6463. DOI: 10.1088/0022-3727/43/44/445501.

- URL: <http://stacks.iop.org/0022-3727/43/i=44/a=445501?key=crossref.73b8ab6c026fb1a1ec91b5ea81979e9a>.
- Heller, Karin u. a. „Robust ”false friend”detection via thermographic imaging“. In: *Lasers in Manufacturing Conference 2015* (2015).
- Hügel, Helmut und Thomas Graf. *Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren*. 2., neu bearb. Aufl. Studium. OCLC: 255440364. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009. 404 S. ISBN: 978-3-8351-0005-3.
- Hierl, Thomas. „Laser welding & heat flux thermography: High-performance methods complementing each other“. In: *Laser Technik Journal* 8.3 (Mai 2011), S. 54–57. ISSN: 16137728. DOI: 10.1002/latj.201190028. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/latj.201190028>.
- Kamimuki, Kenichi u. a. „Prevention of welding defect by side gas flow and its monitoring method in continuous wave Nd:YAG laser welding“. In: *Journal of Laser Applications* 14.3 (Aug. 2002), S. 136–145. ISSN: 1042-346X, 1938-1387. DOI: 10.2351/1.1493766. URL: <http://lia.scitation.org/doi/10.2351/1.1493766>.
- Katayama, Seiji, Yousuke Kawahito und Masami Mizutani. „Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects“. In: *Physics Procedia* 5 (2010), S. 9–17. ISSN: 18753892. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.024. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389210004505>.
- Li, Lin. „A comparative study of ultrasound emission characteristics in laser processing“. In: *Applied Surface Science* 186.1 (Jän. 2002), S. 604–610. ISSN: 01694332. DOI: 10.1016/S0169-4332(01)00695-X. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016943320100695X>.
- Luo, Masiyang und Yung C. Shin. „Estimation of keyhole geometry and prediction of welding defects during laser welding based on a vision system and a radial basis function neural network“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81.1 (Okt. 2015), S. 263–276. ISSN: 0268-3768, 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-015-7079-1. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-7079-1>.
- Mayer, Arnold. „Laser in der Materialbearbeitung – Eine Marktübersicht“. In: *Laser Technik Journal* 1.1 (Apr. 2004), S. 9–12. ISSN: 16137728, 18639119. DOI: 10.1002/latj.200790008. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/latj.200790008>.
- Meschede, Dieter. *Optik, Licht und Laser*. 3., durchges. Aufl. Studium. OCLC: 254422596. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008. 568 S. ISBN: 978-3-8351-0143-2.
- Norman, P, H Engström und A F H Kaplan. „Theoretical analysis of photodiode monitoring of laser welding defects by imaging combined with modelling“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 41.19 (7. Okt. 2008), S. 195502. ISSN: 0022-3727, 1361-6463. DOI: 10.1088/0022-3727/41/19/195502. URL: <http://stacks.iop.org/0022-3727/41/i=19/a=195502?key=crossref.807dc3264111caf541be11556abc4c69>.

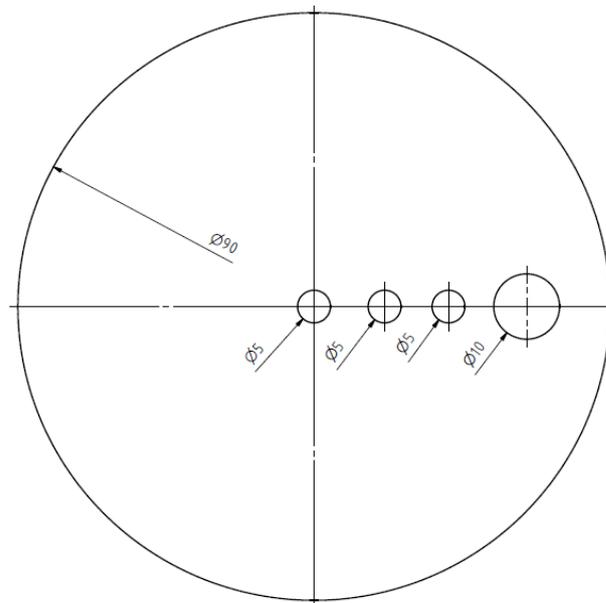
- Optech, Consulting. *Laser Market Data*. Consulting, 2016. URL: http://www.optech-consulting.com/html/laser_market_data1.html (besucht am 17.10.2017).
- Porter, Charles S. *Army Research and Development*. Bd. 5. 1964.
- Ronda, J und A Siwek. „Modelling of laser welding process in the phase of keyhole formation“. In: *Arch. Civ. Mech. Eng.* 11 (2011), S. 739–752.
- Saludes Rodil, Sergio u. a. „Laser welding defects detection in automotive industry based on radiation and spectroscopical measurements“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 49.1 (Juli 2010), S. 133–145. ISSN: 0268-3768, 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-009-2395-y. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-009-2395-y>.
- Schiebold, Karlheinz. *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Durchstrahlungsprüfung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN: 978-3-662-44668-3 978-3-662-44669-0. DOI: 10.1007/978-3-662-44669-0. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-44669-0>.
- *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Sichtprüfung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN: 978-3-662-44666-9 978-3-662-44667-6. DOI: 10.1007/978-3-662-44667-6. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-44667-6>.
- Weißbach, Wolfgang, Michael Dahms und Christoph Jaroschek. *Werkstoffkunde*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN: 978-3-658-03918-9 978-3-658-03919-6. DOI: 10.1007/978-3-658-03919-6. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-03919-6>.
- Wien, Universität. *Plancksches Strahlungsgesetz*. Lehrstuhl für Physik, 2018. URL: <https://www.univie.ac.at/anfpra/neu1/lw/lw2/LW2.pdf> (besucht am 13.08.2018).
- You, Deyong, Xiangdong Gao und Seiji Katayama. „WPD-PCA-Based Laser Welding Process Monitoring and Defects Diagnosis by Using FNN and SVM“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62.1 (Jän. 2015), S. 628–636. ISSN: 0278-0046, 1557-9948. DOI: 10.1109/TIE.2014.2319216. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6803929>.

14 Anhang

Versuchsaufbau

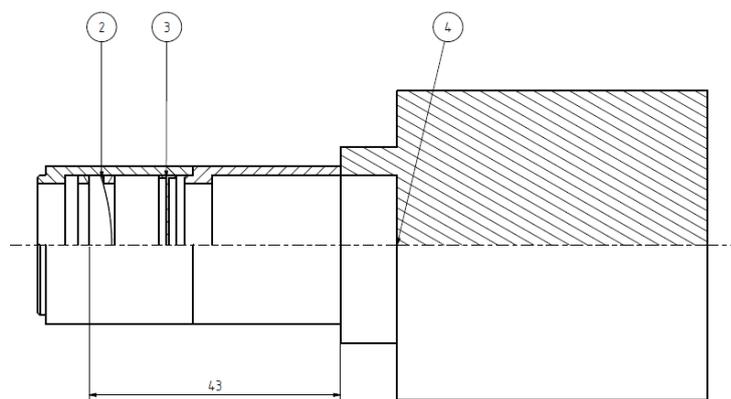
Proben

Lochmuster der Proben für fehlerhaften Fügepartner:



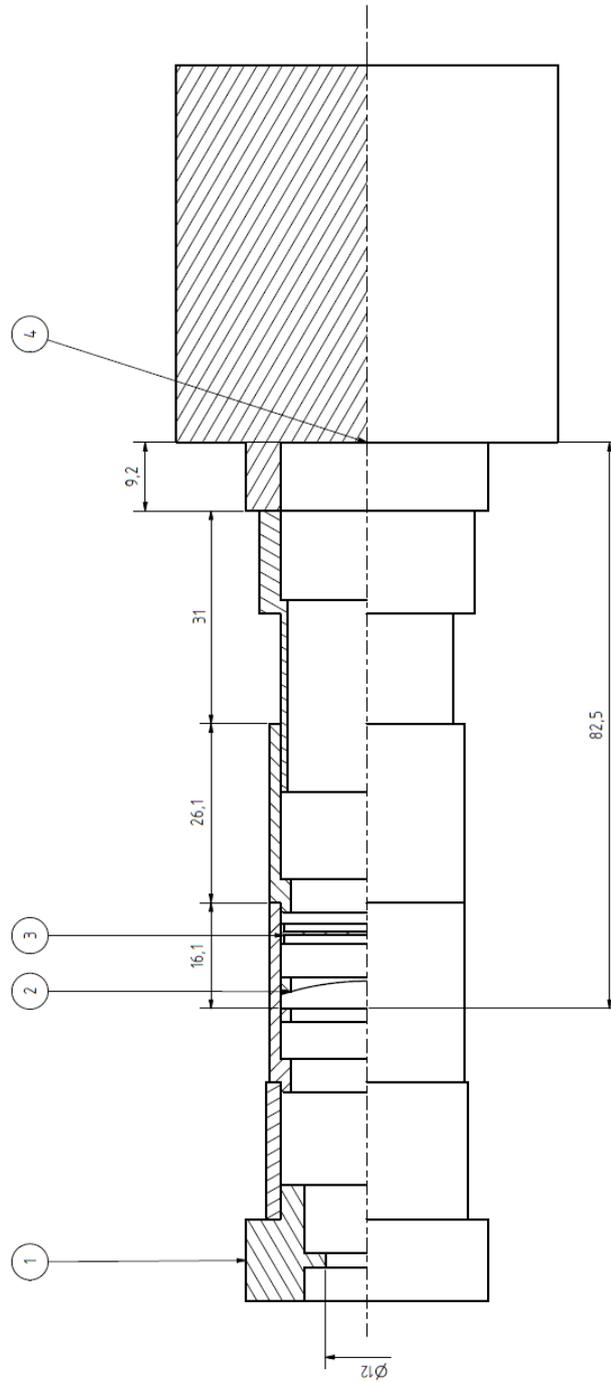
Optik I

Die Nummerierungen sind wie folgt: ②...Optische Linse, ③...Bandpassfilter, ④...NIR-Kamera



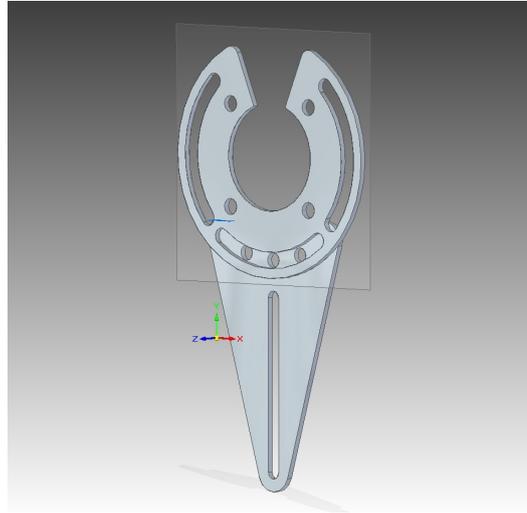
Optik II

Die Nummerierungen sind wie folgt: ①...Blende, ②...Optische Linse, ③...Bandpassfilter, ④...NIR-Kamera

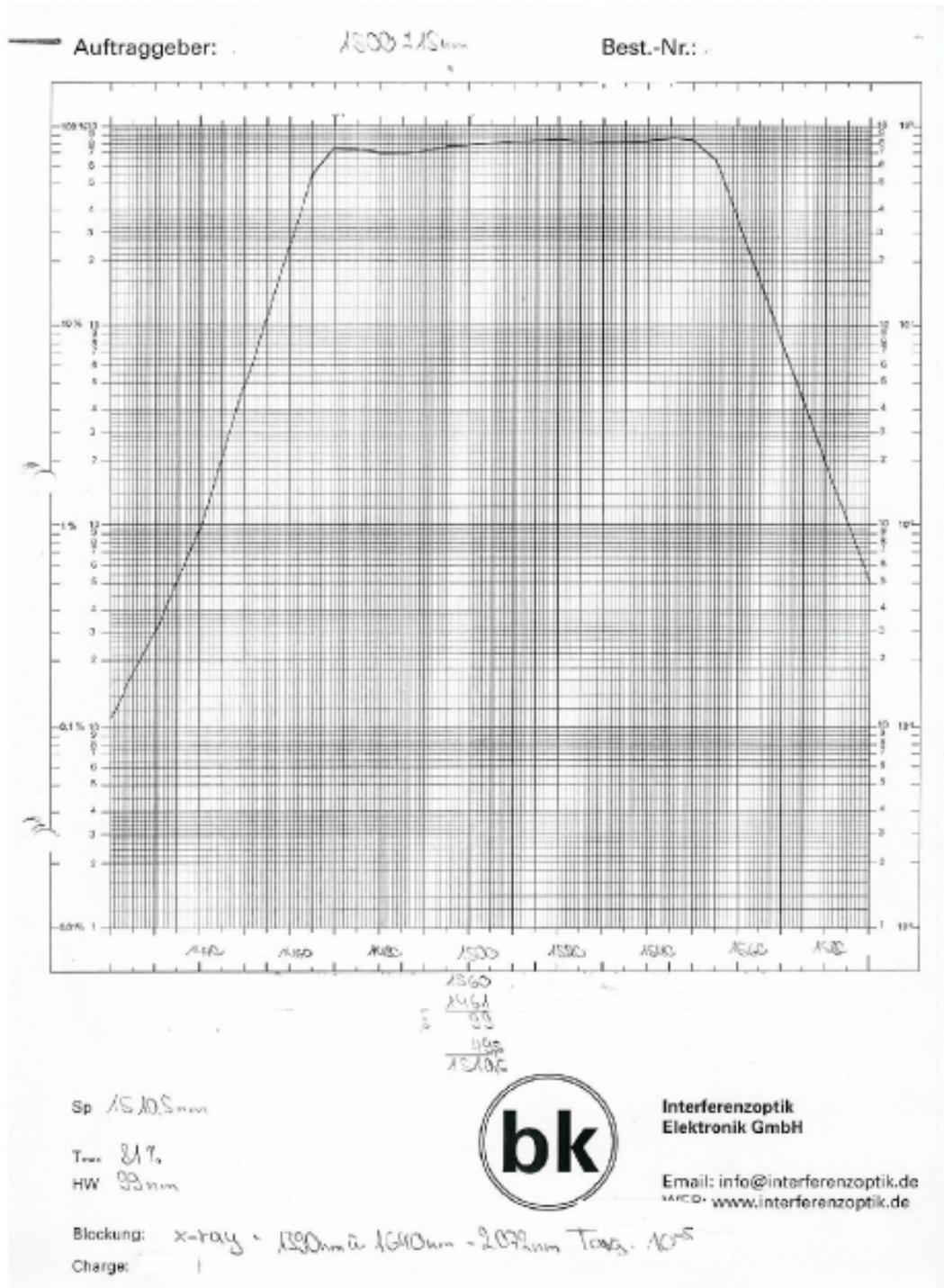


Montagevorrichtung

Die Montagevorrichtung wurde vom Institut Hochleistungslasertechnik der TU Wien selbst entworfen. Alle genauen Herstellungsangaben liegen in diesem auf.



Bandpassfilter



Programm: Fehleranalyse

Im folgenden Pythoncode werden die verschiedenen Bildanalysen kalkuliert. In Zeile 5 wird der zu analysierende Bereich festgelegt. Diese wird über die Position des oberen rechten und des unteren linken Pixels bestimmt. Von diesen beiden Pixeln wird die Position in die Variable *box* in folgender Reihenfolge geschrieben: x-Achse 1. Pixel, y-Achse 1. Pixel, x-Achse 2. Pixel, y-Achse 3. Pixel. In der Nächsten wird der Pfad angegeben. Die Variable *anzahl* gibt die Anzahl der zu verarbeitenden Bilder an. Mit der Variable *bild1* wird das erste Bild gekennzeichnet, wobei die Nummer am Ende der Bildbeschriftung eingegeben wird.

Die Mittelwertanalyse beginnt in Zeile 21, das Maximum wird ab Zeile 41, das Minimum ab 63, die Standardabweichung ab 88 und die relative Standardabweichung ab 112 berechnet und abgespeichert. Die neu errechneten Bilder werden jeweils im gleichen Ordner gespeichert.

```

import numpy as np
from PIL import Image
import math

5 box = ([XX, XX, XX, XX]) # Bildbereich
  pfad = "[PFAD]" # Zielpfad
  anzahl = XX # Anzahl der zu verarbeitenden Bilder
  bild1 = XX # Bildbezeichnung des ersten Bildes

10 for i in range(1, anzahl+1): #Oeffnen und Stutzen der Bilder
    string1 = 'im' + str(i)
    string2 = str(i+bild1-1)
    string3 = ".jpg", "+" "r" "+"
    string = string1+"_"+Image.open('+pfad+string2+string3
15 exec(string)
    crop = 'im'+str(i)+'_'+im'+str(i)'.crop(box)
    exec(crop)

w, h = iml.size # Groesze auslesen
20 ##### MITTELWERT #####

mit = np.zeros(shape=(w, h))
for x in range(w): # alle Pixel auslesen, Mit. berechnen
25 for y in range(h):
    for i in range(1, anzahl+1):
        string = 'mit[(x,y)]=mit[(x,y)]+im'+str(i)'+.getpixel((x,y)
        )/anzahl'
        exec(string)

30 Mittelwert = np.zeros((w, h, 3), dtype=np.uint8)
for x in range(w): # Neue Matrix mit Mit. fuellen
    for y in range(h):
        a = mit[(x, y)]
        Mittelwert[(x, y)] = [a, a, a]
35

```

```

Mittelwert_Bild = Image.fromarray(Mittelwert, 'RGB')
Mittelwert_Bild.save(pfad + "Mittelwert.png")
print('Mittelwert_gespeichert')
40
##### MAXIMUM #####

maxi = np.zeros(shape=(w, h))
for x in range(w):      # alle Pixel auslesen, Max. berechnen
45     for y in range(h):
         for i in range(1, anzahl+1):
             string = 'if_im'+str(i)+' .getpixel((x,y))>maxi[(x,y)]:maxi
[(x,y)]=im'+str(i)+' .getpixel((x,y))'
             exec(string)

50
Maximum = np.zeros((w, h, 3), dtype=np.uint8)
for x in range(w):      # Abspeichern in neuer Matrix
         for y in range(h):
             a = maxi[(x, y)]
55     Maximum[(x, y)] = [a, a, a]

Maximum_Bild = Image.fromarray(Maximum, 'RGB')
Maximum_Bild.save(pfad + "Maximum.png")
60 print('Maximum_gespeichert')

##### MINIMUM #####

mini = np.zeros(shape=(w, h))
65 for x in range(w):
         for y in range(h):
             mini[(x, y)] = 255 # Maximalwert festlegen

for x in range(w):      # Alle Pixel zu Maximalwert vergleichen
70     for y in range(h):
         for i in range(1, anzahl+1):
             string = 'if_im'+str(i)+' .getpixel((x,y))<mini[(x,y)]:mini
[(x,y)]=im'+str(i)+' .getpixel((x,y))'
             exec(string)

75
Minimum = np.zeros((w, h, 3), dtype=np.uint8)
for x in range(w):      # Abspeichern in neuer Matrix
         for y in range(h):
             a = mini[(x, y)]
80     Minimum[(x, y)] = [a, a, a]

Minimum_Bild = Image.fromarray(Minimum, 'RGB')
Minimum_Bild.save(pfad + "Minimum.png")
print('Minimum_gespeichert')
85
##### Standardabweichung #####

staAb = np.zeros(shape=(w, h))
    
```

```

summe = [] # Array implementierung
90 for x in range(w): # ST. AB. berechnen in 2 Schritten
    for y in range(h):
        for i in range(1, anzahl+1):
            string = 'summe.append((im' + str(i) + '.getpixel((x,y))-
mit[(x,y)])**2)'
            exec(string)
95 staAb[(x, y)] = math.sqrt(sum(summe)/(anzahl-1))
summe.clear()

StandardAbweichung = np.zeros((w, h, 3), dtype=np.uint8)
100 for x in range(w): # Abspeichern in neuer Matrix
    for y in range(h):
        a = staAb[(x, y)]
        StandardAbweichung[(x, y)] = [a, a, a]

105 StandardAbweichung_Bild = Image.fromarray(StandardAbweichung, 'RGB')
StandardAbweichung_Bild.save(pfad + "StandardAbweichung.png")
print('Standardabweichung_gespeichert')

110 ##### relative Standardabweichung #####

rstaAb = np.zeros(shape=(w, h))
summe = [] # Array implementierung
for x in range(w): # Wie oben, im 2. Schritt / Mit.
115 for y in range(h):
    for i in range(1, anzahl+1):
        string = 'summe.append((im' + str(i) + '.getpixel((x,y))-
mit[(x,y)])**2)'
        exec(string)
        rstaAb[(x, y)] = math.sqrt(sum(summe)/(anzahl-1))/mit[(x, y)]
120 summe.clear()

relativeStandardAbweichung = np.zeros((w, h, 3), dtype=np.uint8)
for x in range(w): # Abspeichern in neuer Matrix
125 for y in range(h):
    a = staAb[(x, y)]
    relativeStandardAbweichung[(x, y)] = [a, a, a]

130 relativeStandardAbweichung_Bild = Image.fromarray(
    relativeStandardAbweichung, 'RGB')
relativeStandardAbweichung_Bild.save(pfad + "relativeStandardAbweichung
.png")
print('relative_Standardabweichung_gespeichert')

```

Programm: Dynamikanalyse

Das Programm der Dynamikanalyse benötigt die Eingabe des zu analysierenden Bereichs (Zeile 5), des Pfades (Zeile 6) und der Variablen: *anzahl* in Zeile 7, *bild1* in Zeile 8 und *zeile* in Zeile 9. Der Bereich und die Variablen werden, wie vorher beschrieben, festgelegt. Neu hinzu ist die Variable *zeile* gekommen, sie gibt die zu analysierende Zeile an. Die eingetragene Variable ist die ursprüngliche Zeile des Bildes weniger der korrespondierenden Zeile des ausgewählten Bereiches.

Der Plot kann ab Zeile 40 manipuliert werden. *rstride* und *cstride* geben die Anzahl der Verbindungslinien des Ergebnisses an, Zeile 44 den gezeigten Bereich in x-Richtung, die folgende Zeile den in y-Richtung und die darauf Folgende in z-Richtung. Die folgenden Zeilen bestimmen die Achsenbeschriftung.

```

from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

5 box = ([XX, XX, XX, XX])      # Bildbereich
  pfad = "[PFAD]"              # Zielpfad
  anzahl = XX                  # Anzahl der zu verarbeitenden Bilder
  bild1 = XX                   # Bildbezeichnung des ersten Bildes
  zeile = 312                  # Pixelzeile zur Analyse

10

for i in range(1, anzahl+1): #Oeffnen und Stutzen der Bilder
  string1 = 'im' + str(i)
  string2 = str(i+bild1-1)
15  string3 = ".jpg", "+", "r", "+"
  string = string1+'_'+'Image.open('+pfad+string2+string3
  exec(string)
  crop = 'im'+str(i)+'_'+'im'+str(i)+'_crop(box)'
  exec(crop)

20
w, h = im1.size

##### Guertel #####

25 g = np.zeros(shape=(w, anzahl))
for x in range(w): # Berechnung der Abweichung
  for i in range(1, anzahl):
    string = 'g[(x, '+str(i)+')] = im' + str(i+1) + '.getpixel((x, ' +
  str(zeile)+')) - im' + str(i) + \
30     '.getpixel((x, '+str(zeile)+'))'
    exec(string)

fig = plt.figure() # fig. implementieren
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d') # Achsen laden

35
x = np.arange(0, w, 1)          # Achsenskalierung x
y = np.arange(0, anzahl, 1)    # Achsenskalierung y
X, Y = np.meshgrid(x, y)      # Achse fuer 3D

```

```

Z = g[X,Y]
40 # Plot a basic wireframe:
ax.plot_wireframe(X, Y, Z, rstride=5, cstride=15)

# ax.set_xlim(0, 10) # Achsenabschnitt x
45 # ax.set_ylim(0, 40) # Achsenabschnitt y
ax.set_zlim(-200, 200) # Achsenabschnitt z

ax.set_xlabel('Pixelposition') # Achsenlabel
ax.set_ylabel('Bilder') # Achsenlabel
50 ax.set_zlabel('Differenz') # Achsenlabel

plt.show()

```

Programm: Erwartungswertanalyse

Im folgenden Code wird der Erwartungswert für das Mittelwertsbild gebildet. In Zeile 3 wird der zu analysierende Bereich, wie oben beschrieben, festgelegt und in Zeile 4 der Pfad des einzulesenden Bildes.

```

from PIL import Image

box = ([XX, XX, XX, XX]) # Bildbereich
pfad = "[PFAD]" # Zielpfad
5 im = Image.open(pfad, 'r') # Bild laden
im = im.rotate(90) # Bild rotieren
im = im.crop(box) # Bild stutzen

10 w, h = im.size # Groesse bestimmen
ge = w*h # Pixelanzahl
ds = 0 # Implementierung

15 ##### MITTELWERT #####

for x in range(w): # Mittelwert berechnen
    for y in range(h):
20 pixel = im.getpixel((x, y))
    pixel = int(pixel[1])
    ds = ds + pixel

25 print(ds/ge) # Ausgeben

```

Um die zeitliche Entwicklung zu beschreiben wurden die Erwartungswerte, der einzelnen Bilder, mit dem Pickle-Befehl gespeichert. Hierbei werden, wie im vorherigen Abschnitt, der Bildbereich in Zeile 4, der Zielpfad in Zeile 6, die Anzahl der zu analysierenden Bilder in Zeile 7 und die erste zu verarbeitende Aufnahme in Zeile 8 festgelegt.

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pickle

5 box = ([XX, XX, XX, XX])      # Bildbereich
  pfad = "[PFAD]"              # Zielpfad
  anzahl = XX                  # Anzahl der zu verarbeitenden Bilder
  bild1 = XX                   # Bildbezeichnung des ersten Bildes

10 for i in range(0, anzahl): # Bilder lesen und stutzen
    string1 = 'im' + str(i)
    string2 = str(i+bild1)
    string3 = ".jpg", "+", "r", "+"
    string = string1+'_'+'_Image.open('+pfad+string2+string3
15  exec(string)
    crop = 'im'+str(i)+'_'+'_im'+str(i)+'_crop(box)'
    exec(crop)

w, h = im1.size                # Groese bestimmen
20 ge = w*h                    # implementierung absoluter Wert
  ds = 0                       # implementierung relativer Wert
  achse = np.zeros(shape=(anzahl, 1)) # implementierung
  loesung = np.zeros(shape=(anzahl, 1)) # implementierung
  loesung2 = np.zeros(shape=(anzahl, 1)) # implementierung
25 for i in range(0, anzahl): # Achse implementierung
    achse[i] = i+1

#### MITTELWERT ####

30 for i in range(0, anzahl): # alle Pixel Mit. berrechnen
    for x in range(w):
        for y in range(h):
            string = 'ds=ds+im'+str(i)+'_getpixel((x,y))'
            exec(string)
35  loesung2[i] = ds # absoluter Wert
    loesung[i] = ds/ge # relativer Wert
    ds = 0 # wieder 0 setzen

plt.plot(achse, loesung, 'b-') # Plot implementieren
40 plt.axis([1, anzahl, 0, max(loesung)*1.5]) # 1,2 Zahl x-Achse, 3,4 Zahl
    y-Achse

plt.show()

#### Abspeichern ####
45 pickle_out = open(pfad + "Sequenz_1.pickle", "wb")
  pickle.dump(loesung, pickle_out)
  pickle_out.close()

50 print('Mittelwert_gespeichert')
```

Um den Plot zu erstellen, wurden die Pickels wieder eingelesen (Zeile 5f) und ver-

arbeitet.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pickle

5 pfad_Bild_1 = "[PFAD]" # Zielpfad 1
  pfad_Bild_2 = "[PFAD]" # Zielpfad 2

  pickle_in1 = open(pfad_Bild_1, "rb") # Laden loesung1
  pickle_in2 = open(pfad_Bild_2, "rb") # Laden loesung2
10 ref = pickle.load(pickle_in1) #implementieren Referenz
  ff = pickle.load(pickle_in2) #implementieren2 FalseFriend

  anzahl = len(ff) # groesze bestimmen

15 achse = np.zeros(shape=(anzahl, 1)) # Achse implementieren

  for i in range(0, anzahl): # Achse befuellen
    achse[i] = i+1

20 plt.plot(achse, ref, 'b-', label='Referenz') #Plot erstellen
  plt.plot(achse, ff, 'r-', label='FalseFriend')
  plt.ylabel('Erwartungswert')
  plt.xlabel('Bild')
  plt.legend()
25 plt.show()
```

Bildaufstellung

Methode	Referenz	Distanzblech 0,1	Distanzblech 0,15	Distanzblech 0,25	Löcher
Durchschnittswert					
Minimalwert					
Maximalwert					
Standardabweichung					
Relative Standardabweichung					

Tabelle 7.1: Waermeschweißen mit NiRo-Blechen

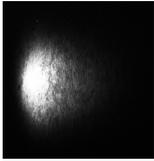
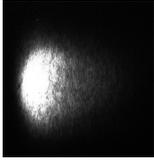
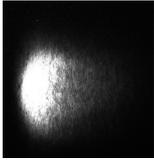
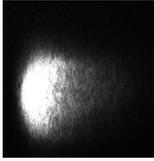
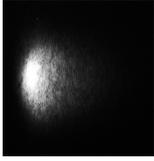
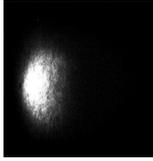
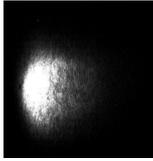
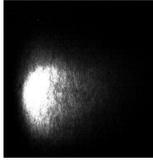
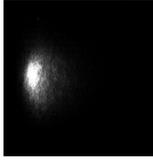
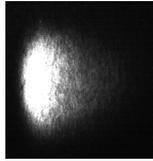
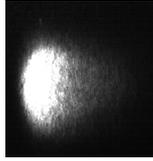
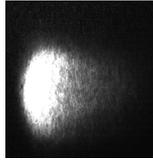
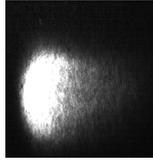
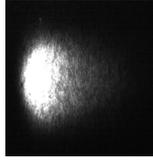
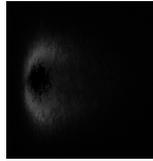
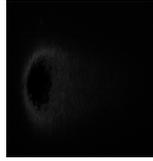
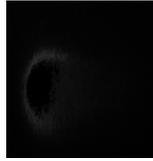
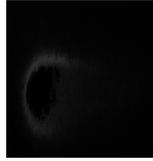
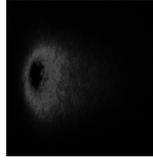
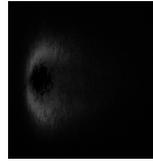
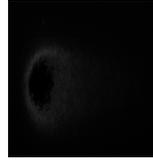
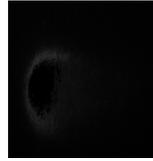
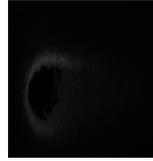
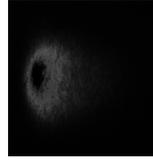
Methode	Referenz	Distanzblech 0,1	Distanzblech 0,15	Distanzblech 0,25	Löcher
Durchschnittswert					
Minimalwert					
Maximalwert					
Standardabweichung					
Relative Standardabweichung					

Tabelle 14.1: Tiefschweißen mit NiRo-Blechen

Methode	Referenz	Distanzblech 0,25	Distanzblech 0,35	Distanzblech 0,5	Löcher
Durchschnittswert					
Minimalwert					
Maximalwert					
Standardabweichung					
Relative Standardabweichung					

Tabelle 14.2: Tiefschweißen mit NiRo36-Blechen

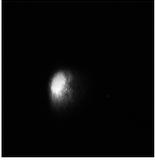
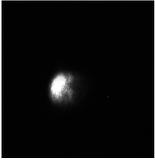
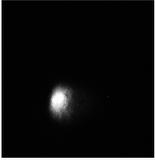
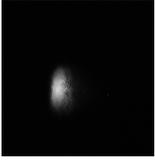
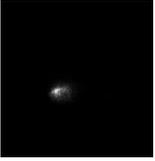
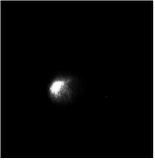
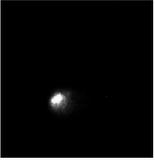
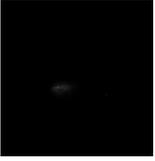
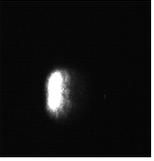
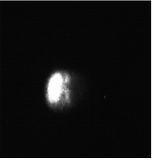
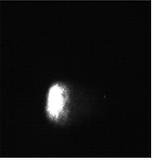
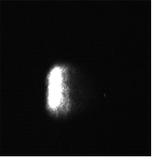
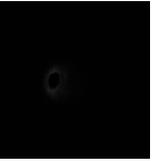
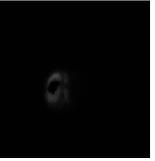
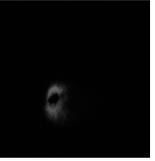
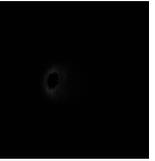
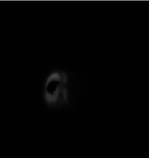
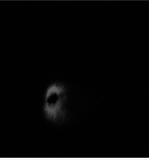
Methode	Referenz	Distanzblech 0,1	Distanzblech 0,15	Distanzblech 0,25	Löcher
Durchschnittswert					
Minimalwert					
Maximalwert					
Standardabweichung					
Relative Standardabweichung					

Tabelle 14.3: Wärmeschweißen mit Baustahl-Blechen

Methode	Referenz	Distanzblech 0,1	Distanzblech 0,15	Distanzblech 0,25	Löcher
Durchschnittswert					
Minimalwert					
Maximalwert					
Standardabweichung					
Relative Standardabweichung					

Tabelle 14.4: Tiefschweißen mit Baustahl-Blechen

Steigende Spaltweite

Referenzaufnahmen:



(a) Mittelwert (b) Maximum (c) Minimum (d) std. Ab. (e) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit 0,1 mm Distanzblech:



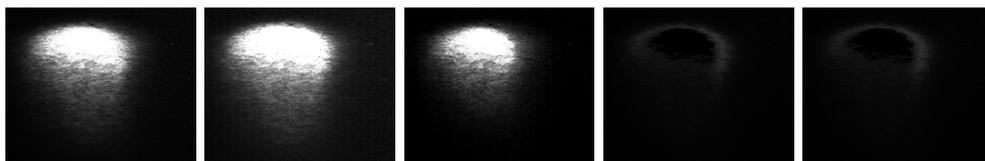
(f) Mittelwert (g) Maximum (h) Minimum (i) std. Ab. (j) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit 0,15 mm Distanzblech:



(k) Mittelwert (l) Maximum (m) Minimum (n) std. Ab. (o) rel. std. Ab.

Aufnahmen mit 0,25 mm Distanzblech:



(p) Mittelwert (q) Maximum (r) Minimum (s) std. Ab. (t) rel. std. Ab.

Abbildung 14.1: Vergleichsaufnahmen für Spalt