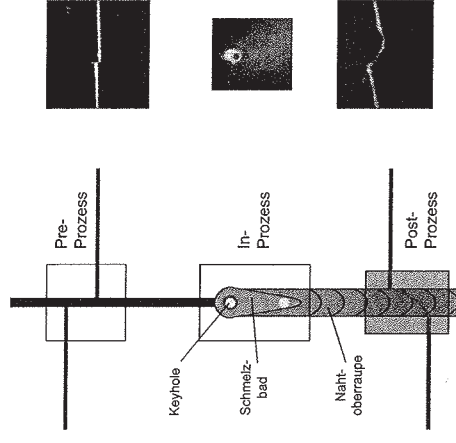


Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlverschweißen

herausgegeben von Jürgen Müller-Borhonian



Verbundprojekt im Rahmenkonzept
„Forschung für die Produktion von morgen“ des
Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)

„Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen“ (INESS)

Autorenkollektiv

Verantwortlicher Autor: Jürgen Müller-Borhanian (Hrsg.)

Förderkennzeichen der Verbundprojektpartner:

02PD2520 Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge - FGSW – mbH, Stuttgart

02PD2521 TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, Ditzingen

02PD2522 Precitec Opttronik GmbH, Rodgau

02PD2523 Universität Stuttgart, Institut für Technische Optik, Stuttgart

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die
der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von
Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechani-
schem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in
Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur
auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2005

ISBN 3-8316-0531-9

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundes-
ministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkon-
zeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Pro-
jektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Bereich Produktion und
Fertigungstechnologien (PFT), betreut.

ISBN 3-8316-0531-9

Mehr Informationen unter: <http://www.iness-projekt.de/>

Verbundprojekt „Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen“ (INESS)

Gelcitwort

Der zunehmende Einsatz des Laserstrahlschweißens in zahlreichen Bereichen der industriellen Produktion ist zum einen in einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit gegenüber konkurrierenden Verfahren, zum anderen in den Eigenschaften des Laserstrahls als Werkzeug zu sehen. So ist eine kräftefreie Bearbeitung und eine lokal stark begrenzte Energieeinbringung in das Werkstück möglich. Dadurch sind Prozesse, die mit anderen Verfahren z.B. aufgrund zu hoher thermischer Belastung des Bauteils scheitern würden, oftmals überhaupt erst zu realisieren. Der Laserschweißprozess bietet im Vergleich mit konventionellen Verfahren zahlreiche neuartige Perspektiven. Erschwerend wirkt sich jedoch die Komplexität des Prozesses, d.h. die Abhängigkeit des Bearbeitungsergebnisses von zahlreichen Prozessparametern aus. Um das geforderte Qualitätsziel sicher zu erreichen, wurde ein umfassendes Online-Prozessüberwachungssystem erarbeitet.

Das Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) will mit Forschungsbeiträgen zur industriellen Produktion den Unternehmen am Standort Deutschland eine aktive Hilfe bieten, Veränderungsprozesse sicher zu bewältigen. Hierzu hat das BMBF seit Herbst 1999 bereits Ideenwettbewerbe in rund 40 unterschiedlichen Themenfeldern angestoßen. Die dabei beteiligten, rund 200 Verbundprojekte und 1100 Partner bezeugen das lebhafte Interesse an der Forschung für die Produktion. Dieses Thema gehörte zum Wettbewerbsfeld „Anwendung optischer Technologien in der Produktion“ und war die 5. Bekanntmachung im Rahmenkonzept vom 15. Dezember 2000.

Eines der zentralen Probleme für die Anwender von Laserstrahlschweißanlagen ist es, eine qualitativere Schweißnaht herzustellen.

Gegenstand dieses Verbundprojektes war es, sowohl eine Pre- und Postprozessmessung der Schweißnaht zu realisieren und diese mit einer In-Prozessüberwachung zu kombinieren. Aus diesem Grunde wurde im März 2002 das Verbundprojekt „Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen“ (INESS) gestartet.

Im Rahmen dieses Verbundprojektes wurde ein Gesamtsystem zur Überwachung des Schweißprozesses realisiert und an Bauteilen der Industrie getestet. Die beteiligten Industriepartner werden nach Projektende dem Markt ein Prozessüberwachungssystem zur Verfügung stellen, das dazu beitragen wird, den Laserstrahlschweißprozess sicherer und flexibler gestalten zu können. Um die Akzeptanz der verarbeitenden Industrie sicherzustellen

len, haben die Verbundprojektpartner von vornherein Entwickler, Hersteller und Nutzer aus den betroffenen Bereichen einbezogen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Projektergebnisse hinsichtlich Funktionalität (nützlich, vollständig) und Benutzungsoberfläche (einfach, selbsterklärend) die Bedürfnisse der Anwender erfüllen.

Das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Prozessüberwachungskonzept wird die beim Laserstrahlschweißen erzeugte Naht überwachen und somit zu einer höheren Bauteilqualität führen.

In dem hier vorliegenden Abschlussbericht sind durch die Verbundpartner, u.a. anhand der neu konzipierten Produkte, die vielfältigen Aspekte des Laserstrahlschweißens mit Prozesskontrolle dargestellt.

Diese Dokumentation will einen aktiven Beitrag zum Ergebnistransfer leisten und auch jene Unternehmen ansprechen, die sich mit dem Gedanken tragen, eine Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen einzuführen.

Bedanken möchten wir uns an dieser Stelle bei allen Partnern für das Engagement im Verbundprojekt und die zügige Planung und Realisierung des Vorhabens.

Besondere Anerkennung gebührt den Koordinatoren der FGSW, Stuttgart, die durch ihre geschickte Anleitung maßgeblich zum Verbundprojekterfolg beigetragen haben.

Projekträger Forschungszentrum Karlsruhe PTKA

Produktion und Fertigungstechnologien PFT

Peter Redelstap

1	EINLEITUNG	9
2	GESAMTZIEL DES VORHABENS	11
3	UNTERSUCHUNG VON TEILLÖSUNGEN	12
3.1	Pre-Prozessmethoden	12
3.1.1	Lichtschnittverfahren	14
3.1.2	Graubildauswertung	16
3.1.3	Anforderungen an Pre-Prozessmethoden	17
3.2	In-Prozessmethoden	18
3.2.1	Einzeldetektoren	18
3.2.2	Keyholesensor	34
3.2.3	Kapillar- und Schmelzbadüberwachung	63
3.2.4	Kamerabasierte Auswertung der reflektierten Laserstrahlung	78
3.3	Post-Prozessmethoden	84
3.3.1	Entwicklung eines axial messenden Topometers	84
3.3.2	Lichtschnittverfahren	109
4	MODULARE INTEGRATION	111
4.1	Bearbeitungskopf	111
4.2	Prozessadapter	114
4.3	Schweißkopffintegration	117
4.4	Positionierachsen	120
4.5	Rechnerarchitektur	121
4.6	Softwarearchitektur	125
4.6.1	Softwarearchitektur des TRUMPF Prozessrechners	125
4.6.2	Softwarearchitektur für die In-Prozessüberwachung	125
4.7	Datenreduktion Lichtschnitt	126
4.8	Softwareentwicklung	127
4.8.1	Softwareentwicklung Pre- und Post-Prozess	127

4.8.2	Softwareentwicklung In-Prozess	130
5	ERPROBUNG DES GESAMTSYSTEMS	132
5.1	Erprobung an Bauteilen von DaimlerChrysler	132
5.1.1	Erprobung an einem Testbauteil	132
5.1.2	Erprobung am Realbauteil <i>Dachrahmen</i>	135
5.1.3	Erprobung am Werkstoff Aluminium	139
5.2	Erprobung an Realbauteilen von Bosch	140
5.2.1	Auswertung Pre- und Post-Prozess	140
5.2.2	Auswertung In-Prozess	141
5.3	Erprobung an Realbauteilen von Audi	142
5.3.1	Auswertung Pre- und Post-Prozess	143
5.3.2	Auswertung In-Prozess	144
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	147
7	LITERATUR	148
	ANHANG: LISTE DER AUTOREN	151
	DANKSAGUNG	152

1 Einleitung

Die Umsetzung der hohen Wirtschaftlichkeit eines Laserbearbeitungsprozesses in der industriellen Fertigung geht einher mit der Forderung nach einer hochautomatisierten Qualitätsüberwachungs- und Regelstrategie. Im Vergleich zu konventionellen Fügeverfahren bietet der Laserschweißprozess hier zahlreiche Ansätze, wobei sich jedoch die Komplexität des Prozesses erschwerend auswirkt. Das Bearbeitungsergebnis ist von zahlreichen Prozessparametern abhängig. Um das geforderte Qualitätsziel sicher zu stellen, ist deshalb eine umfassende Online-Prozesskontrolle notwendig [1].

Der Prozess des Laserstrahlschweißens wird durch viele physikalische, interagierende Phänomene bestimmt. Theoretische und experimentelle Methoden erbrachten bisher ein grundlegendes Prozessverständnis, aus dem verschiedene inselartige Ansätze zur Prozessüberwachung und -regelung resultieren und den heutigen Stand der Technik bilden. Die Einführung verfügbarer Systeme für die Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen in die industrielle Fertigung vollzieht sich jedoch sehr schleppend. Implementierte Systeme werden oftmals, aufgrund unzureichender Zuverlässigkeit und Aussagekraft, als störend außer Betrieb genommen.

Für die Aufgaben Nahtverfolgung und Nahtberräumeninspektion beim Laserschweißen sind einige hinreichende Lösungen bekannt. Diese müssen aber derzeit als diskrete Einzelsysteme extern an den Schweißkopf angebaut werden. Der hierfür notwendige Platzbedarf steht in der Regel nicht zur Verfügung.

Kommerzielle Geräte für die In-Prozessüberwachung basieren meist auf Sensoren zur integralen Ermittlung der Prozessemissionen in verschiedenen spektralen Bereichen und anschließender softwaretechnischer Aufbereitung. Es werden die optischen Emissionen des Metaldampfes und der Schmelze im sichtbaren, im UV- und nahen IR-Bereich erfasst.

Darüber hinaus stellt die Überwachung der Schmelzbad- und Kapillargeometrie mit Hilfe bildgebender Sensoren Zugang zu primären Prozessparametern her. Allerdings reicht die Bildfolgefrequenz der kommerziell verfügbaren Systeme in der Regel nicht aus, um den hochdynamischen Schweißprozess mit ausreichender Zeitauflösung zu erfassen.

Ein Hemmnis für den Einsatz von Systemen aus Kombination von Einzeldektoren und kamerabasierten Systemen ist der aus Anwendersicht zu geringe Integrationsgrad in Kombination mit den verfügbaren Laseroptiken. Die Systeme weisen eine erhebliche Störkontur auf, wodurch die Zugänglichkeit zum Werkstück in vielen Fällen nicht möglich ist.

Ein die wesentlichen industriellen Anforderungen gänzlich erfüllendes System zur Überwachung des Laserstrahlischweißens, d.h. ein System, das bei geringer Störkontur eine Nähtverfolgung und Nahtoberraupeninspektion mit der In-Prozessüberwachung, die auf mehreren Indikatoren basiert, verbindet, existiert bisher noch nicht.

Der Projektablauf gliederte sich in drei Bereiche. Auf Basis eines Anforderungskatalogs wurden zunächst für die während des Laserschweißprozesses zu detektierenden Parameter Teillösungen untersucht und eine Bewertungsmatrix erstellt. Insbesondere für die Messung der Einschweißtiefe mussten dabei neue Verfahren untersucht werden. Im nachfolgenden Schritt wurden die geeigneten Sensoren in den Bearbeitungskopf integriert und anschließend als Funktionsmuster für Nd:YAG-Laser an Realbauteilen der Anwender evaluiert und optimiert.

Die Untersuchung von Teillösungen wird in Kapitel 3 beschrieben. Die Integration der Sensorik in den Bearbeitungskopf ist das Thema von Kapitel 4, und Inhalt von Kapitel 5 ist die Erprobung des Gesamtsystems an Realbauteilen der Industriepartner.

2 Gesamtziel des Vorhabens

Die Lasertechnik zählt heute zur Spitzentechnologie unseres Landes. Die Realisierung eines modularen Prozesskontrollsystems für das Laserstrahlischweißen trägt zum nachhaltigen und weit tragenden Ausbau und zur Sicherung einer Weltspitzenposition bei.

Um in der Produktion Einsatz zu finden, werden dabei neben den geforderten Zuverlässigkeit der Qualitätsaussage besondere Anforderungen an den Integrationsgrad und die Robustheit des Systems gestellt. Zur Realisierung werden in das System sowohl integral messende optische, als auch bildgebende kamerabasierte Sensoren integriert. Die Kombination mehrerer Detektoren erhöht dabei die Zuverlässigkeit und die Flexibilität des Systems. Bildfolgefrequenzen von mehr als 1 kHz werden dabei durch den Einsatz von Beschleunigerhardware (FPGA, DSP) erreicht. Die Integrationsfähigkeit fordert zudem die Realisierung neuer optischer Sensoren, Messtechniken und die Definition von Schnittstellen.

Im Mittelpunkt des Vorhabens steht der Aufbau eines fertigungssicheren Prozessüberwachungskonzeptes für das Schweißen mit Festkörperlasern. Ein hoher Grad an Integration und Miniaturisierung umfasst dabei eine Lasersensoren- und Aktorik zur Bahnführung, eine zeitlich und örtlich hochauflösende Beobachtung der Schmelzbadgeometrie und die Überwachung der Nahtoberraupen.

Die Entwicklung eines integrierten und damit industrierelevanten Überwachungssystems soll durch eine Fusionierung mehrerer Messprinzipien unter Zuhilfenahme von Bildsensoren ermöglicht werden. Es wird eine Pre-, In- und Post-Lichtschnittmessung mittels eines neuartigen ortsauflösenden Detektors in den Schweißkopf integriert. Dadurch kann während des Laserschweißprozesses im Vorlauf die Stoßgeometrie überprüft und die Strahlänge zum Werkstück angepasst werden. Im Prozess selbst kann die Schmelzbadgeometrie mittels ortsauflösender Messtechniken ausgewertet werden. Im Nachlauf erfolgt eine Nahtoberraupeninspektion [2].

Da die direkte Messung der Einschweißtiefe während der Bearbeitung derzeit noch nicht möglich ist, werden axial messende Methoden untersucht, mit denen ein Keyholesensor realisiert werden kann. Das Ziel ist es, die Kapillartiefe während des Schweißprozesses zu messen. Flankierend werden verschiedene Einzeldetektoren in den Bearbeitungskopf integriert, um die Prozessstrahlung spektral aufgelöst zu erfassen und die Aussagekraft und Zuverlässigkeit zu unterstützen.

Eine optional integrierbare Linearachse ermöglicht eine Lateralregelung des Laserfokus. Für die verknüpfte Auswertung ist ein durchgängiges Hard- und Softwarekonzept für Steuerung, Prozessregelung und Bildverarbeitung mit definierten Schnittstellen vorgesehen.

3 Untersuchung von Teillösungen

Im folgenden werden die Teillösungen entsprechend ihrer Position zum eigentlichen Schweißprozess, d.h. zum Auftreffpunkt des Lasers auf der Materialoberfläche, in Pre-, In- und Post-Prozessverfahren untergliedert. Diese Bereiche sind in der schematischen Darstellung des Schweißprozesses in Bild 3-1 eingezeichnet.

So erfolgt vorlaufend (Pre-Prozess) bezüglich des Schweißprozesses die Nahtverfolgung. Im Prozess werden die Prozessemissionen mit Hilfe von Einzeldetektoren erfasst und es erfolgt eine Analyse der Schmelzbad- und Kapillargeometrie. Nachlaufend (Post-Prozess) wird die Nahtberaupengeometrie vermessen.

Die gestrichelten Rechtecke in der Skizze in Bild 3-1 stellen Bereiche dar, die mit einem ortsaufweisenden Detektor aufgenommen werden.

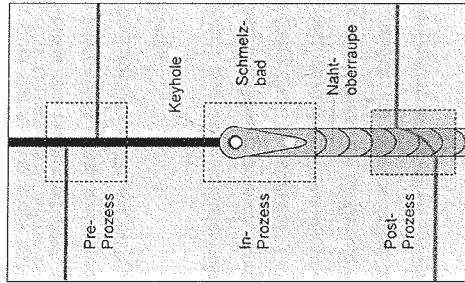


Bild 3-1: Schematische Darstellung des Schweißprozesses mit zu überwachendem Pre-, In- und Post-Prozessbereich.

3.1 Pre-Prozessmethoden

Aufgabe der Pre-Sensorik beim Laserstrahlschweißen ist die exakte Nahtverfolgung der Schweißfuge aufgrund lateraler Abweichungen zwischen der idealen und der tatsächlichen, realen Spaltlage z.B. beim Stumpfstoß, um damit den Bearbeitungskopf relativ zum Werkstück optimal auszurichten. Ursache für Abweichungen können Materialtoleranzen, Lage-
toleranzen, Wärmeverzug während des Schweißens und auch Bahnfehler z.B. des Roboters

sein. Bedingt durch diese Abweichungen und durch die meist schlanke Naht beim Laserstrahlschweißen ist eine exakte seitliche Positionierung des Schweißfokus auf die Stoßstelle äußerst qualitätsentscheidend. Die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit liegen in der Regel bei weniger als 0,1 mm, teilweise bei 0,02 mm.

Wird von der Pre-Sensorik neben der Spaltlage zusätzlich auch die Spaltbreite gemessen, kann z.B. die Zuführrate von Zusatzmaterial (Schweißdraht) bestimmt werden oder zusätzliche Überwachungsaufgaben wie z.B. das Erkennen schadhafter Stoßkanten umgesetzt werden.

Eine weitere Aufgabe der Pre-Sensorik kann die Messung des Abstandes zum Werkstück für die Online-Regelung der Fokusslage sein. In Abstandsrichtung sind die Genauigkeitsanforderungen aufgrund eines durch die Tiefenschärfe des Laserfokus (große Rayleigh-Länge) bedingten günstigeren Prozessfensters jedoch im Vergleich zur seitlichen Positionierung unkritischer und liegen je nach Anwendung bei 0,1 bis 0,3 mm.

In bisher bekannten Systemen läuft die Pre-Sensorik als separater Nahsensor der Bearbeitung üblicherweise einige Zentimeter voraus, siehe Bild 3-2. Insbesondere bei einem Bahnverlauf mit engen Radien sind daher derzeit zusätzliche Achsen erforderlich, welche eine zum Laserfokus unabhängige Positionierung des Nahsensors über dem Nahtverlauf ermöglichen.

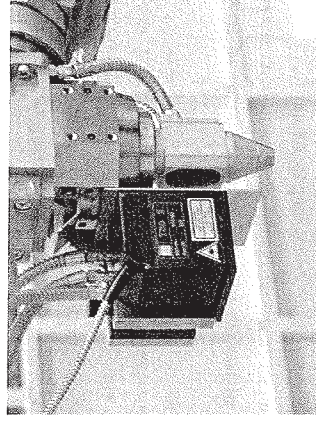


Bild 3-2: Vorlaufende TRUMPF-Nahsensorik TSD [3].

Je nach Schweißaufgabe müssen Nahtfassung und Bahnkorrektur online, d. h. während des Schweißens erfolgen. Dabei sind zusätzlich eine entsprechend den auftretenden Bahnfehlern ausreichend hohe Messrate und der Einfluss von Bewegungsunschärfe zu beachten. Wird eine eigene Positionierachse für die gemessene laterale Abweichung eingesetzt, kann die Korrektur direkt vom Prozessrechner des Sensorsystems erfolgen. Die Regelung dieser

Korrekturachse erfolgt unter Berücksichtigung des Sensorverlaufs. Von entscheidendem Vorteil ist dabei, dass keine Eingriffe in die übergeordnete Steuerungseinheit, z.B. der eines Roboters, nötig sind und Standard E/A-Schnittstellen verwendet werden können.

Für eine automatisierte Überwachung von Schweißprozessen haben sich in der industriellen Produktion vor allem optoelektronische Systeme durchgesetzt, deren wichtigste Prinzipien nachfolgend genauer im Hinblick auf einen Einsatz als Pre-Sensorik untersucht werden.

3.1.1 Lichtschnittverfahren

Das Lichtschnittverfahren basiert auf dem Prinzip der Triangulation. Das Triangulationsprinzip ist das wichtigste Verfahren zur optischen Abstandsbestimmung. In Bild 3-3 ist das Funktionsprinzip dargestellt. Es beruht darauf, dass mit einem Laser ein Lichtpunkt auf das zu vermessende Objekt projiziert wird und der Lichtpunkt mit einem Sensor unter dem Winkel α zum Laserstrahl beobachtet wird. Die Position s der Abbildung des Lichtflecks auf dem Sensor ist bei dieser Anordnung eine Funktion des Abstandes d zwischen Objekt und Sensor. Für eine vorgegebene Detektoranordnung kann d aus s berechnet werden.

Da das Lichtschnittverfahren auf der diffusen Reflexion beruht, sind im industriellen Einsatz vor allem metallische Oberflächen mit einem hohem Anteil direkt reflektierter Strahlung kritisch. Die laterale Auflösung liegt hier im Bereich von $\geq 0,01$ mm. Sie ist durch die Ortsauflösung des Detektors begrenzt. Ein großer Messbereich d ergibt eine geringere Ortsauflösung. Auch der Triangulationswinkel α geht in die Auflösung ein: Ein großer Winkel ergibt eine hohe Auflösung, bei kleinem Höhenmessbereich, ein kleiner Winkel bedeutet geringe Auflösung, aber einen großen Höhenmessbereich.

Das Lichtschnittverfahren ist schematisch in Bild 3-4 dargestellt. Es werden eine oder mehrere Lichtlinien auf das zu vermessende Objekt projiziert und das Abbild unter einem Triangulationswinkel mit einem bildgebenden Sensor erfasst. Man erhält durch die seitliche Betrachtung ein Höhenprofil im Kamerabild.

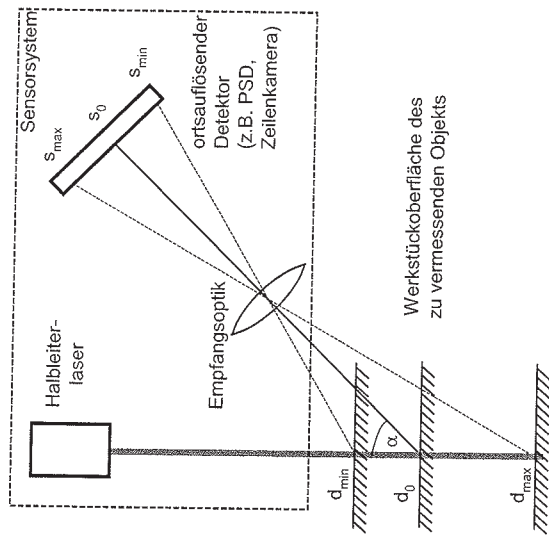


Bild 3-3: Das Messprinzip der Triangulation.

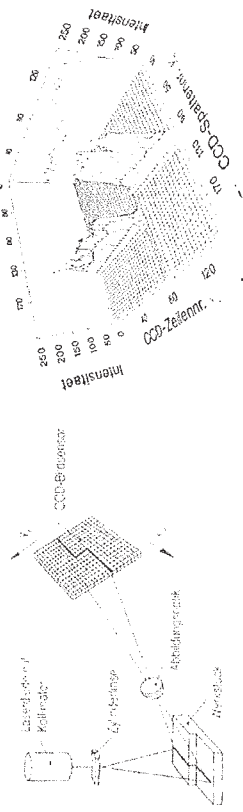


Bild 3-4: Prinzip des Lichtschnittverfahrens [4].

Durch Auswertung der vom Sensor aufgezeichneten Bilder wird die Kontur des Werkstücks entlang der projizierten Linie ermittelt und daraus die Nahposition bestimmt. Dieser Lichtschnitt erfolgt meist durch Strahlaufweitung eines Laserstrahls mittels einer Zylinderlinse. Zu beachten ist, dass der Lichtschnitt bei diesem Verfahren quer zum Stossverlauf orientiert werden muss.

3.1.2 Graubildauswertung

Dieses Messverfahren nutzt die Tatsache, dass verschiedene Bereiche des Werkstücks einfallendes (Auf-)Licht in unterschiedlicher Weise reflektieren. Die Anordnung von Strahlungsquelle und Bilderfassungseinheit bestimmt die Bezeichnung des Beleuchtungsverfahrens, weshalb in der Literatur dieses Verfahren auch als Auflichtreflexionsverfahren bezeichnet wird. Mit Hilfe einer geeigneten Beleuchtung und Beobachtung mit einer Zeilen- oder Flächenkamera mit anschließender Bildauswertung können geometrische Eigenschaften der Werkstückoberfläche erkannt und daraus die für die Pre-Sensorik notwendige, genaue Position der Schweißnaht ermittelt werden. Ausgewertet wird dabei der Helligkeitsverlauf mit Gradientenauswertung (vgl. Bild 3-5).

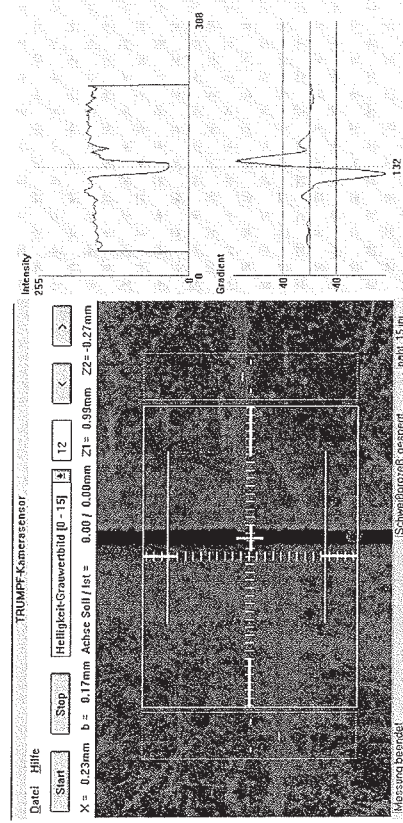


Bild 3-5: Online-Anzeige von Mess- und Bilddaten: Bildauswertung eines Stumpfstoßes [3].

Gerade der Beleuchtung fällt hier eine entscheidende Rolle zu. Eine diffuse Ausleuchtung mit entsprechend angepasster Intensität führt zu kontrastreichen Bildern, die entsprechend gut ausgewertet werden können. Besonders eine diffuse, richtungsspezifische Beleuchtung von verschiedenen, definierbaren Seiten ist von Vorteil, was im Folgenden am Beispiel der Messung eines Stoßes mit Höhenversatz (Überlapp- bzw. *tailored-blank*-Schweißung) erläutert wird.

Für diese Aufgabe ist es sinnvoll, die Beleuchtung gemäß Bild 3-6 zu wählen. Dies führt zu einer optimalen Abbildung (ein hoher Kontrast) der Stoßlage. Durch das schräg einfallende Licht entsteht im Kamerabild an der Stoßkante ein deutlicher Schatten, dessen Kante leicht und sicher ausgewertet werden kann. Durch ungerichteteres oder gar aus der gegenüberliegenden Richtung einfallendes Auflicht ist der Kontrast an einer Kante erheblich

weniger ausgeprägt. Dieser durch ungeeignete Beleuchtung verursachte Informationsverlust kann durch eine nachgeschaltete Signalverarbeitung meist nicht mehr kompensiert werden.

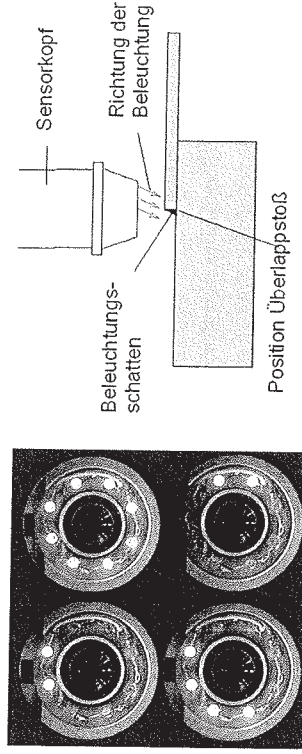


Bild 3-6: Programmierbares Auflicht an der TRUMPF-Nahsensorik, Merkmals hervorhebung durch Anpassung der Beleuchtungsrichtung.

Unterschiedliche Beleuchtungsrichtungen erweitern den Einsatzbereich des Systems daher erheblich, erfordern allerdings auch entsprechend konfigurierbare Auswertelgorithmen. Beispielsweise muss in der Grauwertauswertung definierbar sein, ob die linke oder rechte Kante bzw. die Mitte eines markanten Helligkeitsverlaufs als Fügeposition zu verwenden ist.

3.1.3 Anforderungen an Pre-Prozessmethoden

Im Vergleich zum Lichtschnittverfahren ergibt die Auflichtbeleuchtung in der Regel bessere Resultate, da die Lageinformation nicht nur innerhalb der wenigen, die Laserlinie darstellenden Kamerazeilen, sondern über das ganze Kamerabild hinweg erfolgt und dadurch weniger störanfällig wird. Dies gilt insbesondere bei Stumpfstoßmessungen, bei welchen mittels Lichtschnittmessung kein ausgeprägtes, sicheres Merkmal erfassbar ist, da die Stoßstelle keine messbare Höhendifferenz aufweist. Versuche haben gezeigt, dass mit Auflicht ein Stumpfstoß bis zum Nullspalt mit hoher Genauigkeit gemessen werden kann. Die Signalqualität hängt allerdings stark von der Mikrogeometrie an der Stoßstelle ab. Günstig sind scharfe Kanten ohne Einzugsradius. Wenn sich die Kanten innerhalb des Bahnverlaufs nicht dramatisch ändern, können auch Stumpfstoßkanten mit einseitigem oder beidseitigem Einzugsradius problemlos gemessen werden.

Ein weiterer Vorteil der Schweißfugenerkennung mit programmierbarem Auflicht bildet die Richtungsunabhängigkeit des Stoßverlaufs in Bezug zur Sensorausrichtung. Auch eine Spaltbreitenmessung ist durch Auswertung des Helligkeitsverlaufs an der Stoßstelle

möglich. Die aus diesem Verlauf abgeleitete Messgröße korreliert sehr gut mit dem geometrischen Maß der Spaltbreite und kann somit zur Vorschubregelung bzw. zur Regelung des Zusatzwerkstoffes oder zur Spaltüberwachung verwendet werden.

Die Praxis hat gezeigt, dass die Seitenlagenmessung meist im auflichtbeleuchteten Grauwertbild (2D) gelingt, während Abstandsmessungen per Lasertriangulation im Lichtschnittbild (3D) erfolgen müssen. Bei einem Überlappstoß mit ausgeprägtem Kanten-sprung kann die Seitenlage sowohl im Lichtschnitt- als auch im Auflichtbild ermittelt werden. Für die Pre-Sensorik im Rahmen des Forschungsvorhabens sind daher Lichtschnitt und Auflicht gefordert.

3.2 In-Prozessmethoden

3.2.1 Einzeldetektoren

Die Einzeldetektoren stellen im Gegensatz zu anderen Verfahren eine grundlegend untersuchte und bereits kommerziell erhältliche Lösung zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen dar. Demzufolge haben sich hier in den letzten Jahren bereits bestimmte Indikatoren als aussagekräftig herausgestellt, und manche Qualitätsmerkmale als besonders geeignet erwiesen. Diese Aussagen konnten allerdings häufig nur für Stahlwerkstoffe getroffen werden. Eine Verifizierung der bekanntesten Zusammenhänge für Aluminiumwerkstoffe ist neben der Entwicklung neuer Indikatoren deshalb ein wichtiger Punkt bei der Analyse der Messverfahren. Auch im Anforderungskatalog kann dies abgelesen werden. Bekannte Indikatoren erscheinen hier nochmals, um für Aluminiumwerkstoffe neu evaluiert zu werden. Alle Indikatoren sollen für das Schweißen mit Festkörper-Lasern evaluiert werden. Zunächst vorgesehen war auch eine spätere Übertragung auf den Diodenlaser. Der während des Prozesses zur Verfügung stehende Diodenlaser konnte aufgrund der zu geringen Strahlqualität nicht zum Tiefschweißen genutzt werden und somit war eine Übertragung nicht durchführbar.

Anforderungskatalog:

Im Bereich der Einzeldetektoren sollten folgende Qualitätsmerkmale detektierbar sein:

1. Korrekte relative Fokusslage
2. Schweißaussetzer
3. Einschweißtiefe
4. Auswürfe
5. Anbindung beim Stumpstoß (Stahl und Aluminium)
6. Anbindung beim Überlappstoß (Stahl)

Weitere denkbare und teilweise geforderte Qualitätsmerkmale sind:

7. Poren
8. Risse
9. Anbindung beim Überlappstoß (Aluminium)

Als Indikatoren dafür stehen im Wesentlichen der Rückreflex der Laserstrahlung und die emittierte Wärmestrahlung zur Verfügung. Ein bekannter, aber beim Schweißen mit Nd:YAG-Festkörperlaser wenig aussagekräftiger Indikator ist das Metaldampfleuchten.

Der seitliche Rückreflex (vgl. Bild 3-7) hat sich zwar in vorangegangenen Untersuchungen bei der Detektion prozessrelevanter Indikatoren bewährt, wurde hier aber nicht berücksichtigt, um dem allgemeinen Wunsch nach einem koaxialen Messsystem Rechnung zu tragen.

Bei der Analyse der Einzeldetektoren bezüglich der Eignung als Messwertgeber in einem integrierten System wurden Versuchsreihen mit dem in Bild 3-7 gezeigten Versuchsaufbau ausgeführt. Der seitliche Rückreflexsensor wurde versuchsweise in das Gehäuse des Messaufbaus integriert, um zu prüfen, ob er in einem koaxial messenden System zusätzliche Informationen liefert. Dabei konnte allerdings prinzipbedingt kein großer Winkel realisiert werden.

Um Störgrößen weitgehend zu eliminieren, wurden vor die Sensoren Filter angebracht. Im Falle der Rückreflexsensoren (Si-Basis, empfindlich von ca. 380 nm bis 1100 nm) wurde jeweils ein Interferenzfilter für die Wellenlänge 1064 nm und vor den Temperatursensoren (InGaAs, empfindlich von ca. 900 nm bis 1600 nm) wurde ein Hochpassfilter mit einer Kante bei 1090 nm eingesetzt. Somit konnte gewährleistet werden, dass die Rückreflexsensoren keiner oder zumindest wenig Metaldampf- oder Temperaturstrahlung ausgesetzt sind. Bei den Temperatursensoren ist vor allem die Ausblendung von Nd:YAG-Strahlung wichtig.

Die Signale der Sensoren werden an eine Auswertereinheit (Laser Welding Monitor (LWM), der Fa. Precitec Optronik) weitergegeben und mit Referenzsignalen, gebildet aus bereits aufzeichneten Signalen von Gut-Schweißungen, verglichen. Um die Referenzkurve wird ein Toleranzband gelegt, innerhalb dessen sich die Signalkurven befinden müssen.

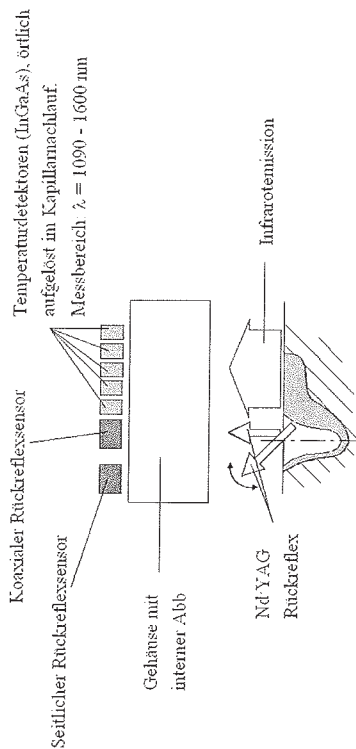


Bild 3-7: Prinzipieller Versuchsaufbau. Im unteren Bereich die Indikatoren als Prozessmissionen. Darüber die verwendeten Sensoren.

Vorversuche zu den Qualitätsmerkmalen:

1. Korrekte relative Fokusslage

Wenn die relative Fokusslage aus ihrem Optimum wandert, so verändert sich je nach Kaustik des Laserstrahles der Strahldurchmesser auf der Werkstückoberfläche. Eine Abnahme der Intensität ist die Folge. Das Schachtverhältnis ändert sich entsprechend (geringere Einschweißtiefe und größere Kapillaröffnung). Dadurch kommt es zu einer geringeren Gesamtabsorption in der Kapillare und zu einem erhöhten Rückreflexsignal, welches gemessen werden kann. Allerdings kann dasselbe Phänomen auch durch eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit oder durch einen Abfall der Laserleistung auftreten. Es gilt also noch zu klären, wie die Erhöhung des Rückreflexsignals eindeutig der Defokussierung zuzuordnen ist.

2. Schweißaussetzer

Schweißaussetzer im Sinne eines plötzlichen Ausfalls der Laserleistung sind relativ einfach durch völliges Fehlen des Rückreflexsignals zu detektieren. Schweißaussetzer bei vorhandener Leistung, aber nicht vorhandener Einkopplung sind als extrem hohe Rückreflexsignale abzulesen. In beiden Fällen würden diese extremen Signalverläufe außerhalb der Referenzhüllkurve liegen, und so für ein Fehlersignal sorgen.

3. Einschweißtiefe

Bei der Messung der Einschweißtiefe konnten erstmals auch für Aluminium gute Ergebnisse an verschiedenen Stoßgeometrien erzielt werden, wobei die Änderung der Einschweißtiefe auf verschiedene Weise herbeigeführt wurde (vgl. Tabelle 3-1).

	Einschweißtiefe durch Variation von Vorschub, Leistung und Fokusslage	Auswürfe und Poren	Spalt
6082 EF	X	X	
5182 EF	X	X	
6082 DF	X	X	X
5182 DF	X	X	

Tabelle 3-1: Übersicht über alle Schweißversuche für I-Naht und Kehlnaht am Überlappstoß (DF für Doppel-EF für Einzelfokusversuche).

Als Beispiel für den guten Zusammenhang zwischen Einschweißtiefe und gemessenem Rückreflex soll hier Bild 3-8 dienen.

Es zeigt sich, dass bis zu einer Einschweißtiefe von ca. 3,5 mm ein hervorragender Zusammenhang zwischen Einschweißtiefe und Rückreflex besteht. Der Unterschied in der Signalinformation ist bei gehäuseinterner Anordnung des seitlichen im Vergleich zum koaxialen Rückreflexsensor marginal.

Da sich ein externer Anbau des seitlichen Rückreflexsensors aber prinzipiell verbietet, wird diese Option nicht mehr weiter verfolgt. Die Einschweißtiefenänderung konnte für Aluminium und Stahlwerkstoffe bis 3,5 mm nachgewiesen werden. Bei unterschiedlichen Parameteränderungen (Vorschubgeschwindigkeit, Laserleistung und relative Fokusslage) werden mit dem System für gleiche Einschweißtiefen unterschiedliche Absolutwerte des Rückreflexsignals gemessen. Dies bedeutet, dass für jede zu überwachende Applikation ein Parametersatz für das Messsystem ermittelt werden muss und entsprechende Eingriffsgrenzen bei der Fehlermittlung festgelegt werden müssen. Durch externe Zusatzinformationen (Laserleistungsmessung, Vorschubmessung an der Anlage...) ist jedoch, im Hinblick auf eine Regelung des Systems, eine eindeutige Zuordnung von Einschweißtiefenänderung zum variierten Parameter möglich.

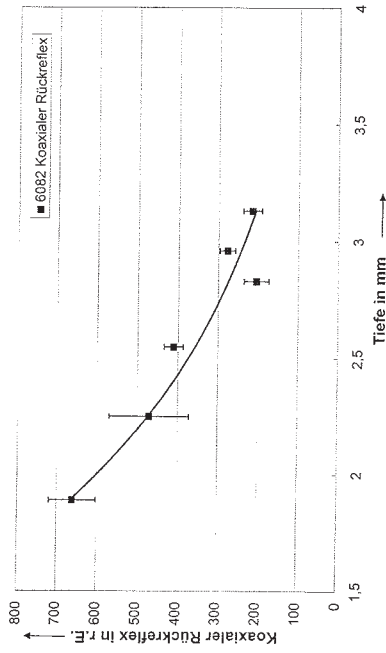


Bild 3-8: Koaxialer Rückreflex über der Einschweißtiefe. Aluminium AA6082, Variation der relativen Fokustage bei einer Kehlnahschweißung am Überlappstoß, Einzelfokus.

4. Auswürfe

Bei Auswürfen konnten sowohl mit dem Rückreflexsensor, als besonders auch mit den Temperatursensoren eindeutige Resultate erzielt werden (Bild 3-9 und Bild 3-10, beide Aluminium). Schmelzauswürfe lassen sich mit beiden Detektoren als deutliche Peaks im Signalverlauf nachweisen und werden so innerhalb einer Hüllkurve zur Fehlerbestimmung signifikant als Fehler ausgewiesen.

5. Anbindung beim Stumpfstoß (Stahl und Aluminium)

Bei der Detektion der Anbindung beim Stumpfstoß korreliert das Rückreflexsignal mit der Größe des Spaltes. Während im Beispiel aus Bild 3-11 bei kleinen Spalten bis 0,2 mm und einer damit verbundenen Anbindung von mind. 70% der Bleichdicke das Rückreflexsignal etwa konstant bleibt, steigt es bei einem Spalt von 0,4 mm an, was mit Streuungen an den abschmelzenden aber nicht mehr angebondenen Blechkanten erklärt werden kann. Wird der Spalt so groß, dass gar keine Wechselwirkung mehr stattfindet wird das Rückreflexsignal beinahe Null.

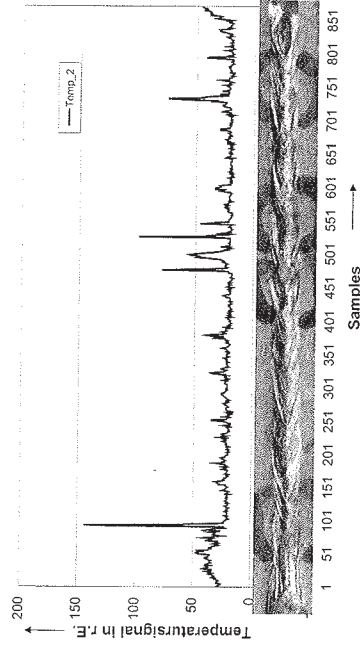


Bild 3-9: Auswürfe in Aluminium, gemessen mit dem Temperatursensor.

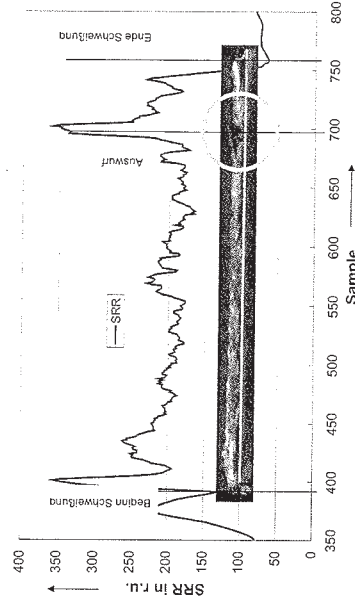


Bild 3-10: Auswürfe in Aluminium, gemessen mit dem Rückreflexsensor.

6. Anbindung beim Überlappstoß (Stahl)

Die Anbindung im Überlappstoß bei Stahl konnte als Anstieg des Temperatursignals durch einen Wärmestau im Oberblech bei nicht angebondenem Unterblech detektiert werden (vgl. Bild 3-12). Dies ist unabhängig davon, ob das Unterblech gänzlich fehlt oder lediglich ein Spalt vorhanden ist, der die Anbindung verhindert. Schwierig wird es im Fall des so genannten *falschen Freundes*. Hierbei handelt es sich um eine Durchschweißung, bei der trotz Spalt sowohl Ober- als auch Unterblech völlig durchgeschweißte, und vermutlich auch verbunden waren, aber dann wieder voneinander abgerissen sind. Hier gibt es auch eine Wärmeabfuhr ins Unterblech, und somit keinen Anstieg des Temperatursignals.

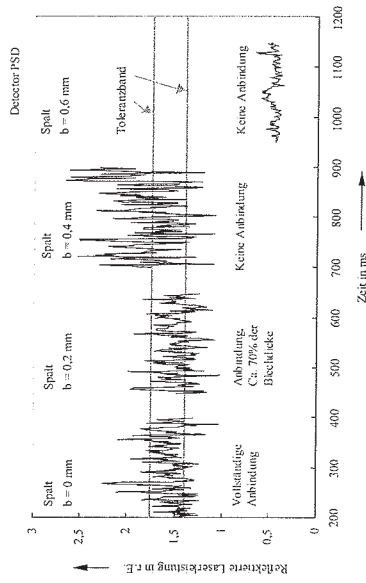


Bild 3-11: Koaxialer Rückreflex beim Stumpstoß in Abhängigkeit der Spaltbreite.

7. Poren

Bislang konnte weder mit dem Rückreflexsignal noch mit den Temperaturdetektoren eine eindeutige Zuordnung von Pore zu Signalpeak herausgearbeitet werden. Dies liegt offensichtlich daran, dass ein signifikanter Peak durch eine Einschnürung der Kapillaröffnung zustande kommt, allerdings führt nicht jede Einschnürung der Kapillare zwangsweise zu einem Poreneinschluss. Öffnet sie sich ohne Einschluss einer Pore wieder, ist ebenfalls ein Signalpeak zu verzeichnen. Allerdings kann gesagt werden, dass sich das Signaleveau des Rückreflexes erhöht und die Signalschwankungen zunehmen, wenn sich die Gesamtzahl der Poren je Nähtabschnitt erhöht (vgl. Bild 3-13). Hier ist man wieder mit dem Problem konfrontiert, dass eine Erhöhung des Signaleveaus auf vielen Effekten beruhen kann (Porenanzahl, Leistungsabfall, Defokussierung...), und man eine Zusatzinformation benötigt, welche die Ursache der Erhöhung eindeutig zu definieren hilft.

8. Risse

Risse können nach den bisherigen Versuchen mit optischen Einzeldektoren nicht detektiert werden.

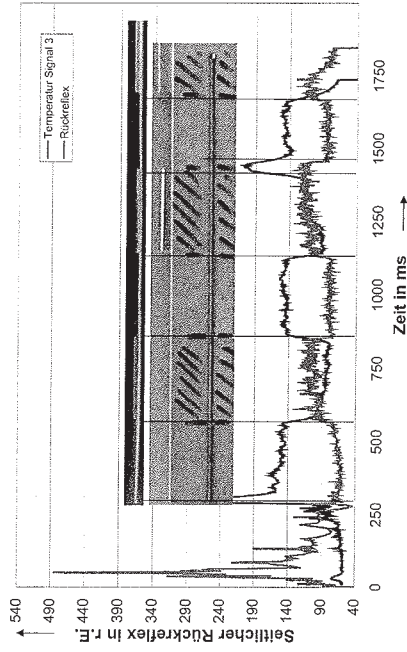


Bild 3-12: Temperatur und Rückreflexsignal bei der Anbindung im Überlappstoß.

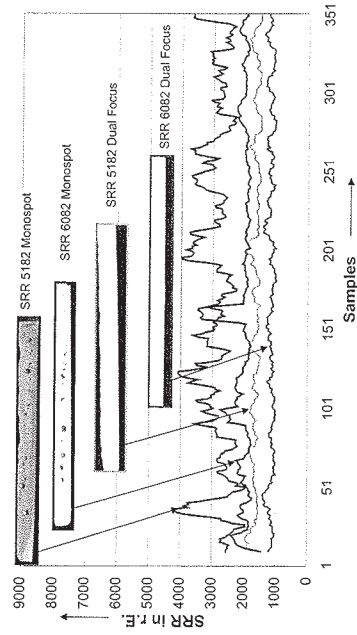


Bild 3-13: Anstieg des Signaleveaus und der Signalschwankung bei erhöhter Porenanzahl.

9. Anbindung beim Überlappstoß (Aluminium)

Die Anbindung beim Überlappstoß bei Aluminium konnte im Vergleich zu Stahl (vgl. Punkt 6) mit den Temperaturdetektoren nicht eindeutig erfasst werden. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium ist im Nachlauf der Schweißnaht von ca. 3 mm, wie im aktuellen Versuchsaufbau realisiert kein Unterschied zwischen angebondenen und nicht angebondenen Blechen zu detektieren. Mit den Rückreflexsensoren konnten die in Bild 3-14 gezeigten Ergebnisse erzielt werden. Hierzu muss allerdings gesagt werden, dass

diese Ergebnisse mit extremen Parametern ermittelt wurden und einer Verifizierung für allgemeinere Schweißparameter bedürfen. Zu sehen ist eine Variation der Vorschubgeschwindigkeit von 4 bis 6 m/min. Beim Optimum von 5 m/min ist eine Einschweißung gegeben. Bei 6 m/min wird das Unterblech nicht mehr angebonden, was zu einer deutlichen Erhöhung des Rückreflexes führt.

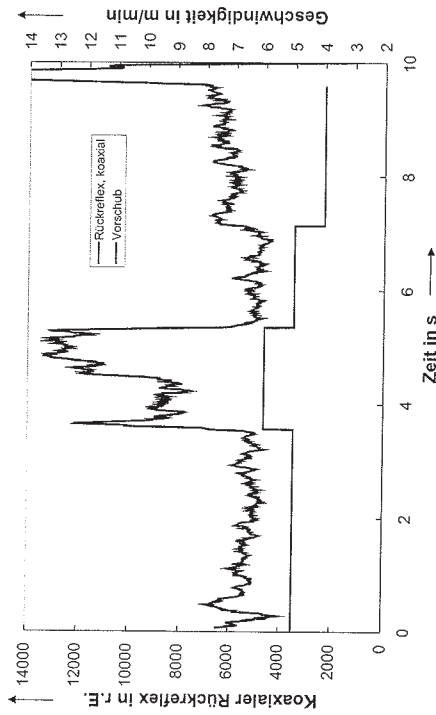


Bild 3-14: Erhöhtes Rückreflexsignal bei mangelnder Anbindung des Unterbleches.

Anhand der oben aufgeführten Grundlagenversuche wurde der folgende Anforderungskatalog definiert. Die darin enthaltenen Qualitätsmerkmale wurden für verschiedene Fügegeometrien untersucht (vgl. Tabelle 3-2).

Anforderungskatalog:

1. Korrekte relative Fokusslage
2. Schweißbausetzer
3. Einschweißtiefe
4. Auswürfe
5. Anbindung beim Stumpfstoß (Stahl und Aluminium)
6. Anbindung beim Überlappstoß (Stahl und Aluminium)

Die Detektion von Poren und Rissen ist mit dem Stand der Technik mit Einzeldetektoren bis heute nicht möglich.

Qualitätsmerkmale	I-Naht Überlapp	2 Kehlnaht Überlapp *	3 I-Naht Stumpfstoß
1 Einschweißtiefe	1.1a Leistungsvariation 1.1b Vorschubvariation 1.1c Fokusslagenvariation 1.2 aus 1.1c 1.3 Spaltvariation / Spaltsprung 1.4 Spaltvariation	2.1a Leistungsvariation 2.1b Vorschubvariation 2.1c Fokusslagenvariation 2.2 aus 3.1c 2.3 Spaltvariation 2.4 Spaltvariation 2.5 Lateralversatzvariation	3.1a Leistungsvariation 3.1b Vorschubvariation 3.1c Fokusslagenvariation 3.2 aus 3.1c 3.3 Spaltvariation 3.4 Spaltvariation 3.5 Lateralversatzvariation
2 Relative Fokusslage			
3 Anbindung			
4 Spalt			
5 Lateralversatz			
6 Auswürfe/Splitzer	1.6 (AA 5XXX verzinktes Blech)		
7 Poren	1.7 Bei Proben mit Auswurf		
8 Aussetzer	1.8 mit Pulsprogramm		

Zu 1.1 (2.1, 3.1)	a) Leistungsrampen	steigend von 2 auf 4 kW fallend von 2 auf 4 kW Stufen 3 -> 4 -> 2 -> 4 Stufen 8 -> 6 -> 4 -> 8 kW
	b) Geschwindigkeitsrampe	steigend von -1,5 auf +1,5 mm fallend von +1,5 auf -1,5 mm
	c) Fokusslagenrampe	Leistungsüberhöhung 3 -> 4 kW (200 ms lang)
Zu 1.2 (2.2, 3.2)	Fokusslagenrampe aus 1.1c)	
Zu 1.3/1.4 (2.3/2.4)	a) Spaltvariation	Öffrend von 0 bis 0,5 mm Schließend von 0,5 bis 0 mm
Zu 1.6	Spaltsprung	Durch teilweise fehlendes Unterblech
Zu 1.7	Schweißen mit "auswurfanfälliger" Material (AA 5XXX) / verzinktes Stahlblech	Wenn bei Probenauswertung auffällig
Zu 1.8	Pulsprogramm	Leistungsloch 4 -> 0 kW (100 ms)
Zu 2.5 (3.5)	Lateralversatzrampe	
Zu 3.3/3.4	Vornehmlich Spaltvariation	

* mit T-Stoß-Spannvorrichtung

Tabelle 3-2: Versuchsplan INESS – Einzeldetektoren.

In Bild 3-15 sind die drei untersuchten Fügegeometrien dargestellt. Die Untersuchungen wurden für Aluminium an Proben aus AA6082 und für Stahl an Proben aus St14 durchgeführt. Die Blechstärken waren dabei im Fall von Aluminium 2 mm auf 2 mm und bei den Stahlproben 1,5 mm auf 2,5 mm. Als Auswurfproben wurden bei Aluminium AA5182 und bei Stahl verzinktes Stahlblech verwendet. Im Falle der Kehlnaht war die Laserstrahlachse um 45° geneigt. Beim Lateralversatz (nur Kehlnaht und I-Naht Stumpfstoß) wurde schräg über den Spalt geschweißt und zwar mit einem Gesamtversatz von 2 mm.

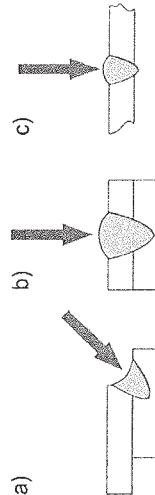


Bild 3-15: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Stoßgeometrien: Kehlnaht am Überlappstoß (a), I-Naht am Überlappstoß (b), I-Naht am Stumpfstoß (c).

Im Folgenden sind exemplarisch einige Messergebnisse dargestellt. Die Messfrequenz betrug hierbei 1000 Hz. Diese hohe zeitliche Auflösung erlaubt es, die hohe Dynamik des Prozesses zu erfassen. Der Parameterbereich wurde so gewählt, dass möglichst alle Schweißungen vergleichbar sind. Ziel war, unabhängig von der Fügegeometrie und dem verwendeten Material, eine sichere Einschweißung, aber nie eine Durchschweißung zu erreichen, Ausnahme: kurzfristige Leistungserhöhung, um eine Durchschweißung zu detektieren. Um alle Schweißungen miteinander vergleichen zu können, wurden sie jeweils auf die instantane Leistung normiert.

Wie in Bild 3-16 deutlich zu sehen ist, steigt das Temperatursignal im kapillarnahen Bereich relativ konstant und linear mit der Leistung an. Die ansteigende Leistung sorgt für eine höhere Leistungseinbringung in das Werkstück, was mit dem Temperaturdetektor nachgewiesen werden kann. In diesem Fall sogar mit ca. 2,5-facher Signalüberhöhung zwischen niedrigster und höchster Leistung.

In Bild 3-17 ist ein kapillarfernes Temperatursignal zu sehen. Der o.g. Zusammenhang gilt hier genauso. Allerdings ist das Signal hier wesentlich ruhiger. Dies hängt mit der Wärmeleitung ins Material zusammen. Durch die Wärmeleitung entsteht eine „Glättung“ von Temperaturspitzen, die stärkeren Temperaturschwankungen im kapillarnahen Bereich werden dadurch ausgeglichen, das Signal wird ruhiger. Eine optimale Entfernung der Temperaturmessung von der Kapillare muss allerdings für die jeweilige Anwendung gefunden werden, da sich diese mit dem verwendeten Material und der damit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit verschiebt. Auch die verschiedenen Fügegeometrien sorgen für einen mehr oder weniger großen Wärmestau in der Bearbeitungszone und in deren Nachlauf.

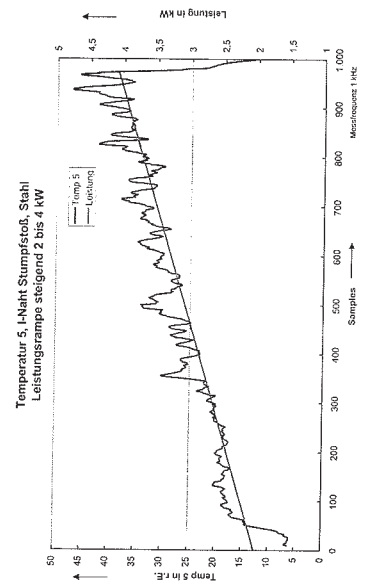


Bild 3-16: Kapillarnahes Temperatursignal bei einer Stumpfstoß-Schweißung von Stahl, steigende Leistung.

Bild 3-18 zeigt das Rückreflexsignal beim Schweißen einer Kehlnaht am Überlappstoß. Beim geschweißten Material handelt es sich um Aluminium. Es wurde die Fokusslage variiert. Auffällig sind die deutlich erkennbaren Signalschwankungen, die hier der Darstellungsqualität halber mit einem gleitenden Mittelwert von zehn Perioden geglättet wurden. Das Signal zeigt die typische zu erwartende schüsselförmige Ausprägung. Im Bereich der optimalen Einkopplung (hier bei ca. 450 Samples), also dort wo die größte Einschweißtiefe erreicht wird, ist auch erwartungsgemäß der Rückreflex am geringsten. In den Bereichen der Defokussierung zu Beginn und zum Ende der Schweißung zeigt sich, korrespondierend zur geringeren Einschweißtiefe ein deutlich höheres Rückreflexsignal.

In Bild 3-19 ist als letztes Einzelbeispiel noch die Schweißung einer Probe mit teilweise fehlendem Unterblech zu sehen. Hier handelt es sich also um den Wechsel von Einschweißung und Durchschweißung. Wie zu erwarten war zeigt sich im Bereich von zwei Blechen, also bei der Einschweißung, ein höheres Rückreflexsignal. Fehlt das Unterblech, so wird durch die Durchschweißung ein Teil der ansonsten rückreflektierten Laserleistung nach unten abgestrahlt und steht somit nicht für die Messung des Rückreflexes zur Verfügung.

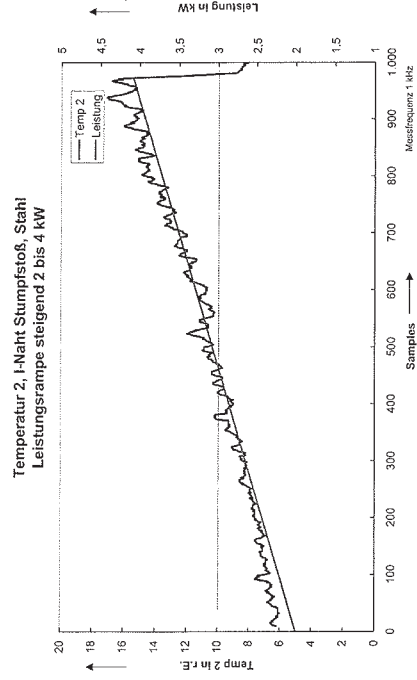


Bild 3-17: Kapillarfernes Temperatursignal bei der gleichen Schweißung (vgl. Bild 3-16).

Die einzelnen Untersuchungen wurden im Folgenden zusammengefasst und bezüglich ihrer Eignung als Detektor für die jeweilige Anforderung bewertet.

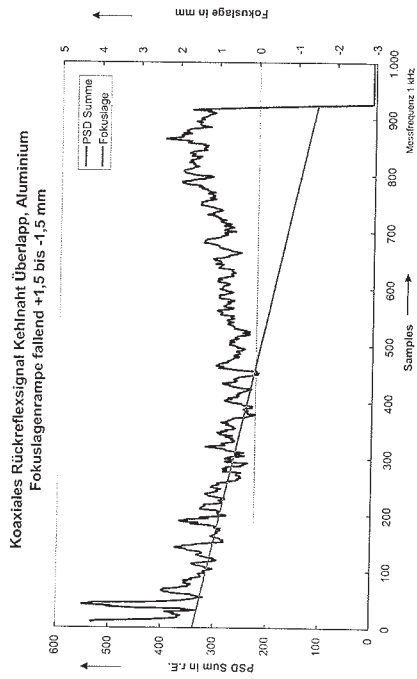


Bild 3-18: Koaxiales Rückreflexsignal bei der Fokusslagenänderung, Kehnaht Überlappstoß, Aluminium.

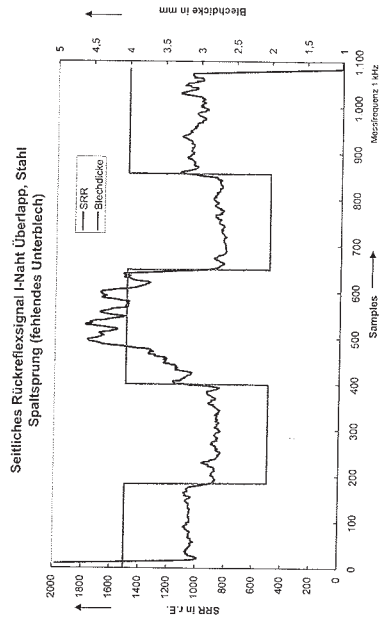


Bild 3-19: Spaltsprung durch fehlendes Unterblech bei der I-Naht-Schweißung von Stahl im Überlappstoß.

1. I-Naht Stumpfstoß, Aluminium

Parameter	Sensor									
	PSD Sum	PSD Dif	Position	SRR	Temp. 1	Temp. 2	Temp. 3	Temp. 4	Temp. 5	Gesamt
Leistung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe steigend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe fallend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Variation	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ausselzer	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Peak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Fokusslage	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe steigend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe fallend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Vershub	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Variation	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe öffnend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe schließend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spaltung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Lateralsatz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Datete	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Auswürfe	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
					Nicht durchgeführt					n.d.
					Nicht nachweisbar					n.d.

2. I-Naht Stumpfstoß, Stahl

Parameter	Sensor									
	PSD Sum	PSD Dif	Position	SRR	Temp. 1	Temp. 2	Temp. 3	Temp. 4	Temp. 5	Gesamt
Leistung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe steigend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe fallend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Variation	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ausselzer	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Peak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Fokusslage	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe steigend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe fallend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Vershub	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Variation	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe öffnend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe schließend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spaltung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Lateralsatz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Datete	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Auswürfe	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
					Nicht durchgeführt					n.d.
					Nicht nachweisbar					n.d.

3. I-Naht Überlappstoß, Aluminium

Parameter	Sensor									
	PSD Sum	PSD Dif	Position	SRR	Temp. 1	Temp. 2	Temp. 3	Temp. 4	Temp. 5	Gesamt
Leistung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe steigend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe fallend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Variation	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ausselzer	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Peak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Fokusslage	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe steigend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe fallend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Vershub	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Variation	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe öffnend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe schließend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spaltung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Lateralsatz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Datete	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Auswürfe	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
					Nicht durchgeführt					n.d.
					Nicht nachweisbar					n.d.

4. I-Naht Überlappstoß, Stahl

Parameter	Sensor									
	PSD Sum	PSD Dif	Position	SRR	Temp. 1	Temp. 2	Temp. 3	Temp. 4	Temp. 5	Gesamt
Leistung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe steigend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe fallend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Variation	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ausselzer	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Peak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Fokusslage	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe steigend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe fallend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Vershub	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Variation	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spaltung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe öffnend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe schließend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spaltung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Lateralsatz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Datete	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Auswürfe	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
					Nicht durchgeführt					n.d.
					Nicht nachweisbar					n.d.

5. Kehlnaht Überlappstoß, Aluminium

Parameter Leistung	Sensor									
	PSD Sum	PSD Dif	Position	SRR	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Gesamt
Rampe steigend	++	++	++	++	+	+	+	+	+	++
Rampe fallend	++	++	-	++	+	+	+	+	+	++
Variation	+	++	++	+	+	+	+	+	+	++
Aussatzer	++	++	++	++	+	+	+	+	+	++
Peak	++	++	++	++	+	+	+	+	+	++
Rampe steigend	+	+	-	++	+	+	+	+	+	++
Rampe fallend	+	+	++	++	+	+	+	+	+	++
Variation	+	+	++	++	+	+	+	+	+	++
Überschub	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe öffnend	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+
Rampe schließend	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+
Spalt	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+
Spaltung	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+
Lateralkreislauf	+	+	Nicht durchgeführt	+	+	+	+	+	+	n.d.
Defekte	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++
Auswurf	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++

6. Kehlnaht Überlappstoß, Stahl

Parameter Leistung	Sensor									
	PSD Sum	PSD Dif	Position	SRR	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Gesamt
Rampe steigend	++	++	+	++	+	+	+	+	+	++
Rampe fallend	++	++	+	++	+	+	+	+	+	++
Variation	++	++	++	++	+	+	+	+	+	++
Aussatzer	++	++	++	++	+	+	+	+	+	++
Peak	++	++	++	++	+	+	+	+	+	++
Rampe steigend	+	+	-	++	+	+	+	+	+	++
Rampe fallend	+	+	++	++	+	+	+	+	+	++
Variation	+	+	++	++	+	+	+	+	+	++
Vorschub	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe öffnend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rampe schließend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spalt	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spaltung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Lateralkreislauf	+	+	Nicht durchgeführt	+	+	+	+	+	+	n.d.
Defekte	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++
Auswurf	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++

3.2.1.1 Zusammenfassende Bewertung

Die Einzeldetektoren können prinzipiell als eine einfache und günstige Variante der Prozessüberwachung betrachtet werden [5]. In der koaxialen Anordnung stellen sie ein sehr robustes Messsystem dar. Der seitliche Rückreflexsensor, der hier trotz des geringen Anstellwinkels zur Kapillare im Gehäuse integriert wurde, um dem Gedanken eines koaxialen Messsystems Rechnung zu tragen, kann in externer Anordnung (größerer Anstellwinkel) noch größere Aussagekraft bezüglich einiger Qualitätsmerkmale liefern [6]. Die von der PSD erhaltene Aussage zur Position des zurückreflektierten Laserstrahles liefert zwar in Ansätzen gute Resultate, scheint aber kaum weiter entwicklungsfähig.

Prinzipiell ist zu bemerken, dass es keine absolut besten Detektoren bzw. Detektorpositionen gibt. Hier muss im Einzelfall eine Anpassung an die jeweilige Schweißaufgabe erfolgen. So kann beispielsweise die Fügegeometrie oder das gewählte Material einen großen Einfluss auf die Aussagekraft der Detektoren haben.

Ein weiteres prinzipielles Problem ist die schlechte Aussagekraft der Einzeldetektorsignale bezüglich der Einschweißtiefenänderung durch Vorschubänderung und die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Parameter untereinander. Auch muss erwähnt werden, dass

ein gutes Messergebnis von einer optimalen Anpassung der Einzeldetektoren an die bestehende Schweißaufgabe abhängt. Ein „plug-and-play“-System basierend auf Einzeldetektoren, welches einfach für eine beliebige Aufgabe eingesetzt werden kann und ohne Anpassungen eindeutige Messergebnisse liefert, ist zum momentanen Zeitpunkt nicht denkbar.

3.2.1.2 Sensoreinheit

Die Untersuchungen der Einzeldetektoren im Projekt INESS haben gezeigt, dass sowohl der Rückreflexsensor, als auch der Infrarotsensor ein Potenzial für die Verwendung in einem integrierten System zur Prozessüberwachung haben. Um beide in einer kompakten Einheit unterzubringen, ohne dabei zwei optische Schnittstellen in Anspruch zu nehmen wurde eine Sensoreinheit aufgebaut, die beide Sensoren vereint. Die Sensoreinheit ist in Bild 3-20 dargestellt und wird im Folgenden erklärt:

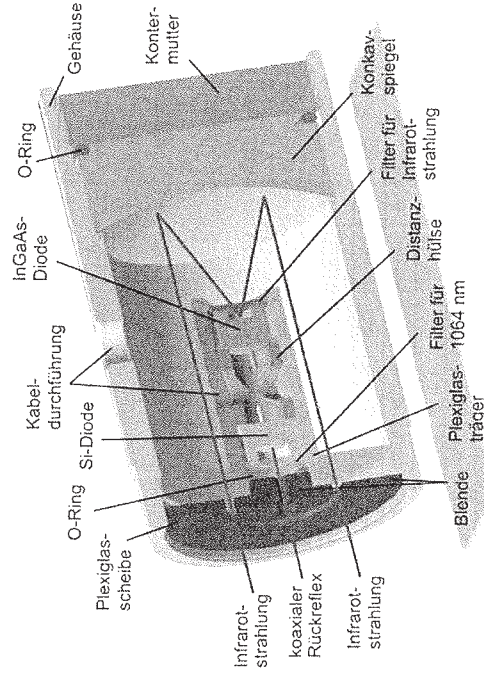


Bild 3-20: Kompakte Sensoreinheit für die Aufnahme zweier Sensoren (Rückreflex und Infrarot) auf derselben optischen Achse.

Die Prozessemissionen werden durch die konfokale Abbildung aus Fokussierlinse und interner Abbildungslinse auf die Blendenebene fokussiert. Hier findet eine räumliche Trennung der Signale statt. Das Rückreflexsignal gelangt durch die zentrale Blendenöffnung über einen Interferenzfilter für Nd:YAG-Strahlung auf eine Photodiode. Die Infrarotemission aus dem Nachlauf der Naht passiert zunächst eine Ringblende und trifft anschließend auf einen sphärischen Spiegel, der die Infrarotstrahlung auf eine zweite, infrarotemp-

findliche Photodiode reflektiert. Um sicherzustellen, dass keine Laserstrahlung auf diese Fotodiode gelangt, befindet sich noch ein Kantenfilter mit der Kante bei 1090 nm im Strahlengang. Durch die Ringblende ist eine Richtungsunabhängigkeit des Systems gewährleistet. Der Abstand der zu detektierenden Stelle der Infrarotemission vom Keyhole ist durch das Abbildungsverhältnis der konfokalen Abbildung und den Durchmesser des Ringspalts in weiten Grenzen frei wählbar.

3.2.2 Keyholesensor

Ein wesentlicher Parameter beim Laserschweißprozess ist die Einschweißtiefe, die durch die Tiefe des Keyholes charakterisiert wird [2]. Die Aufgabe des Keyholesensors ist die Bestimmung der Einschweißtiefe während des laufenden Schweißprozesses. Im Gegensatz zu allen weiteren bekannten Messverfahren soll mit dem Keyholesensor eine direkte Messung der Einschweißtiefe erfolgen. Die sehr komplexen Rahmenbedingungen, insbesondere die im Bereich der Wechselwirkungszone auftretende Metaldampfstrahlung und die Geometrie des Keyholes, stellen in Verbindung mit dem geforderten hohen Messbereich und der Messfrequenz eine außerordentlich große Herausforderung dar.

3.2.2.1 Anforderungskatalog für den Keyholesensor

Zu Projektbeginn wurde zunächst ein Anforderungskatalog für den Keyholesensor in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der Firma Robert Bosch GmbH als Anwender der neu zu entwickelnden Messtechnik festgelegt. Das Ergebnis ist in Tabelle 3-3 zusammengefasst:

Tiefenmessbereich	$\pm 0,5$ mm
Minimale Messfrequenz	1 kHz
Mess-Strahlbündel	Soll koaxial zum Laserbearbeitungsstrahl geführt werden
Mess-Wellenlänge	532 nm
Lasertyp	Diodengepumpter Festkörperlaser mit ca. 100mW
Strahlführung durch den Laserkopf	Geradlinig, also in Transmission durch den Laserbearbeitungskopf

Tabelle 3-3: Anforderungskatalog für den Keyholesensor.

Der Tiefenmessbereich und die Messrichtung werden dabei durch die Geometrie des Keyholes festgelegt. Die minimale Messfrequenz basiert auf a priori Kenntnissen über die Prozessdynamik. Es wurde von einer Wellenlänge des Schweißlasers von 1064 nm ausgegangen. Um die Strahlung des Schweißlasers effektiv durch ein Filter blockieren zu können wurde die Messwellenlänge zu 532 nm festgelegt.

3.2.2.2 Voruntersuchungen

3.2.2.2.1 Messprinzip und prinzipieller Aufbau

Aufgrund der sehr starken Störeinflüsse durch den Schweißprozess wurde als berührungsloses optisches Messprinzip das monochromatische konfokale Prinzip favorisiert, da es sich hierbei um ein gegenüber störenden Fremdlichteinflüssen sehr robustes Verfahren handelt [9]. Die numerische Apertur (NA) des Sensors muss an die Geometrie des Keyholes angepasst sein und somit vergleichsweise klein (etwa $NA = 0,1$) gewählt werden.

Zur Messung mit einem konfokalen Punktsensor mit monochromatischer Lichtquelle ist ein axialer Scan zur Erzeugung eines Messsignals notwendig. Hierzu muss die optische Weglänge zwischen Objekt und Punktdetektor axial variiert werden. In herkömmlichen Systemen werden der Sensor, bzw. dessen Objektiv, und der Prüfling relativ zueinander axial oszillierend bewegt. Aufgrund der unter den gegebenen Anforderungen auftretenden hohen Beschleunigungskräfte wurde nach einem neuen Verfahren gesucht, um die optische Weglänge zu modulieren, wobei die bewegte Masse im Sensor minimiert werden sollte. Die im Rahmen dieses Projektes verfolgte Lösung beruht auf einem kleinen, auf einer schwingenden Stimmgabel montierten Pentaprisma, dessen Kantenlänge 5 mm beträgt. Das Pentaprisma ermöglicht die hochdynamische Modulation der optischen Weglänge innerhalb des Sensors, siehe Bild 3-21. Ein diodengepumpter Festkörperlaser der Wellenlänge 532 nm wird aufgeweitet und kollimiert. Mittels eines Achromaten mit einer Brennweite von 160 mm wird der Strahl auf das konfokale Pinhole mit dem Durchmesser 200 μm fokussiert, und anschließend wieder durch eine baugleiche Linse kollimiert. Eine weitere Linse fokussiert den Strahl innerhalb des Pentaprismas. Der Strahl wird wiederum kollimiert und dem Laserkopf zugeführt, der einen Strahlteiler zur Einkopplung des Leistungstrahls, sowie eine Fokussierlinse ($f=100$ mm) enthält, die den Leistungsstrahl und den Messstrahl fokussiert.

Befindet sich ein reflektierendes Objekt in der Brennebene der Fokussierlinse, so wird der Strahl reflektiert und passiert den Strahlengang in umgekehrter Richtung zurück bis zum ersten Strahlteiler, der einen Teil des Lichts auf die Empfängerdiode auskoppelt. Primäre Reflexe des Leistungsstrahls sowie Prozessleuchten werden durch ein schmalbandiges Interferenzfilter gesperrt. Bei axialer Verschiebung des Messobjekts relativ zum Fokus nimmt die detektierte Intensität sehr schnell ab, da einerseits bei der Beleuchtung des Objekts kein Fokusspot mehr entsteht und die Abbildung des beleuchteten Objekts auf das konfokale Pinhole defokussiert ist.

Bedingt durch eine kleine Drehkomponente des Prismas ist ein lateraler Versatz des Messflecks unvermeidbar. Trotz intensiver Marktrecherche konnte jedoch unter den Rahmenbedingungen des Anforderungskatalogs kein Akteur gefunden werden, mit dem sich

dieser Effekt hätte vermeiden lassen können. Im weiteren Projektverlauf stellte sich dieser Versatz als zu groß heraus, so dass die Anforderungen hinsichtlich Messfrequenz in Abstimmung mit der Firma Robert Bosch GmbH auf 200 Hz reduziert wurden und somit ein Piezo-Aktor anstelle der Stimmgabel eingesetzt werden konnte.

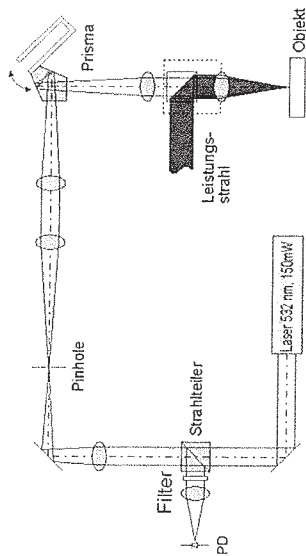


Bild 3-21: Prinzip des Keyholesensors.

3.2.2.2.2 Einfluss streuender Medien im Objektraum

Zur Verifizierung der Auswahl des konfokalen Prinzips wurde zunächst der Einfluss streuender Medien zwischen Objekt und Messsystem mit einem konfokalen Punktsensor untersucht, siehe Bild 3-22.

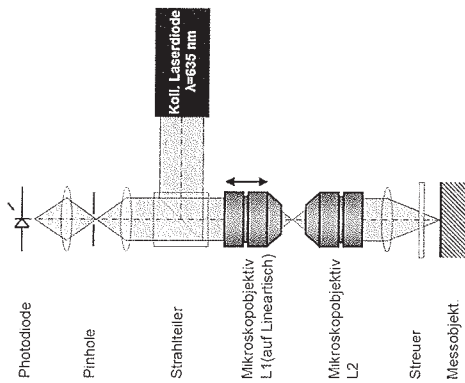


Bild 3-22: Prinzipskizze des konfokalen Testaufbaus zur Verifizierung des Messprinzips.

In diesem ersten Versuchsaufbau wurde das axiale Scannen durch Verschieben zweier Mikroskopobjektive (L1 und L2) realisiert. Als Lichtquelle dient eine Laserdiode der Wellenlänge 635 nm. Der Tiefenmessbereich des Systems beträgt 2,5 mm, der RMS-Fehler liegt bei 37,0 µm bei Messung eines Spiegels. Das entspricht 1,5 % des Messbereichs. Bei einer streuenden Folie vor dem Messobjekt steigt der Fehler auf 111,5 µm; das entspricht 4,5 % des Messbereichs, vgl. Bild 3-23 und Bild 3-24. Mit steigendem Abstand zwischen Messobjekt und Streuer steigt das Rauschen ebenfalls wie erwartet an, vgl. Bild 3-24.

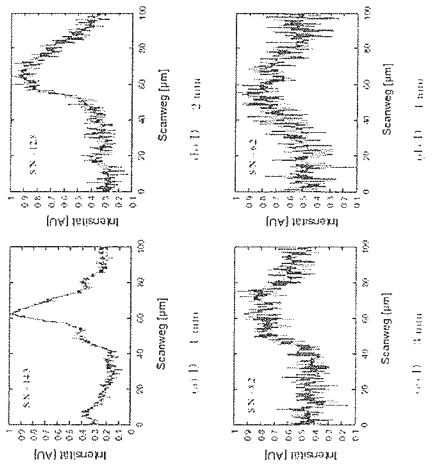


Bild 3-23: Axiale Systemantwort bei versch. Abständen zwischen Spiegel und streuender Folie.

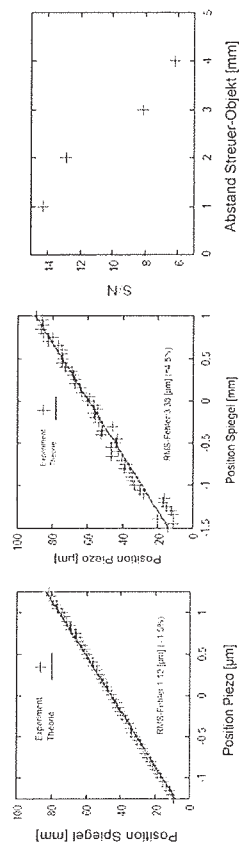


Bild 3-24: Einfluss des Abstandes zwischen Streuer und Objekt auf das Messergebnis (links: ohne, Mitte: mit Streuer, rechts: Signal-Rausch-Verhältnis).

3.2.2.2.3 Labormuster

Zur Demonstration der Funktion des schwingenden Pentaprismas wurde ein Laboraufbau erstellt. Bild 3-25 zeigt den realisierten Aufbau mit Prinzipskizze. Als Lichtquelle wurde hier zunächst eine Laserdiode mit Kollimationsoptik verwendet ($\lambda = 635 \text{ nm}$, $P = 5 \text{ mW}$). In Bild 3-26 ist links die Stimmgabel mit darauf montiertem Pentaprisma dargestellt, rechts ist die Auslenkung des Fokusspots in Abhängigkeit von der Treiberspannungsamplitude dargestellt.

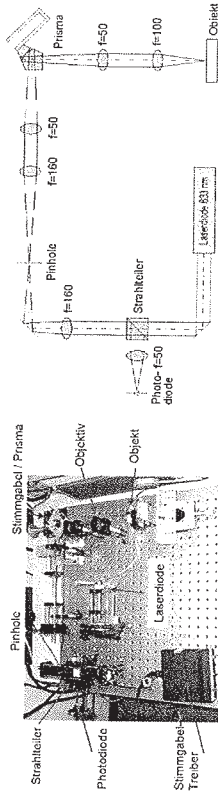


Bild 3-25: Aufbau mit Pentaprisma (rechts: Prinzipskizze).

Am Stimmgabel-Treiber kann die Treiberspannung abgegriffen werden, aus deren Amplitude die Auslenkung des Prismas bestimmt wird. Die Phasenverschiebung zwischen Anregungsspannung und Auslenkung muss hierzu jedoch vor der Messung bestimmt werden. Hierzu wird eine Messung einer statischen Oberfläche verwendet. Mit dem Laboraufbau wurden Messungen sowohl an einem Spiegel als auch an einer rauen Metalloberfläche durchgeführt. Bild 3-27 zeigt den Verlauf der Anregungsspannung für den Stimmgabelschwinger sowie die Ausgangsspannung der Photodiode für eine Messung an einem Spiegel (links) bzw. für eine raue Metalloberfläche (rechts). Bei letzterer wurde die Oberfläche durch den Fokus nur angetastet. Die Signalfrequenz bei einer derartigen Messung am Rande des messbaren Bereichs ist somit gleich der Anregungsfrequenz. Durch manuelles Verschieben des Spiegels konnte der nutzbare Messbereich auf ca. 1,5 mm abgeschätzt werden. In diesem Bereich sind die Maxima der Photodiodenspannung noch trennbar. Mit dem Laboraufbau (Parameter des Aufbaus siehe Tabelle 3-4) konnte das Messprinzip verifiziert werden. Die Stimmgabel schwingt mit einer Frequenz von 768 Hz, die sich hieraus ergebende Messfrequenz liegt somit bei der doppelten Frequenz von 1536 Hz. Die Auslenkung der Stimmgabel erlaubt einen Messbereich bis mindestens 1,5 mm. In einem weiteren Laboraufbau wurde der Laserkopf in die Optik integriert und weitere Testmessungen vorgenommen.

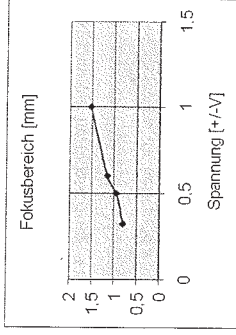
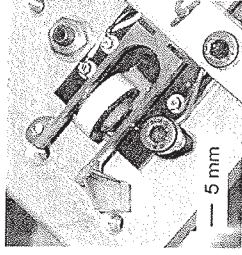


Bild 3-26: Pentaprisma auf Stimmgabel (links), Auslenkung des Fokus im Objektraum (rechts).

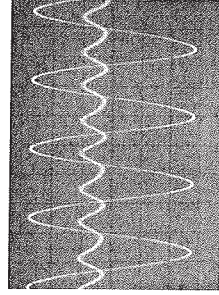


Bild 3-27: Verlauf der Anregungsspannung der Stimmgabel und Messsignal für Messung an Spiegel (links) bzw. Metalloberfläche (rechts).

Scanweg des Prismas	$\pm 75 \mu\text{m}$ (Messbereich im Keyhole $\pm 0,5 \text{ mm}$ ergibt sich aus den Parametern der Abbildung des Zwischenbildes des konfokalen Pinholes)
f_{Pin}	768 Hz
f_{Laser}	100 mm
NA	0,1
f_{90}	50 mm
NA	0,2
Kantenlänge Pentaprisma	5 mm

Tabelle 3-4: Parameter für den Laboraufbau.

3.2.2.2.4 Datenerfassung und Signalauswertung

Die Datenerfassung des Photodiodesignals und der Monitorsspannung erfolgt mittels einer A/D-Wandler-Karte. Es werden zwei Signale mit einer Abtastrate von jeweils 100 kHz aufgezeichnet: Zum einen das Signal der Photodiode, zum anderen die Monitorsspannung, die (phasenverzögert) die Auslenkung des Pentaprismas, bzw. des Fokus repräsentiert. Bild 3-28 zeigt die Signalauswertung am Beispiel des Labormusteraufbaus. Das Signal wird zunächst tiefpassgefiltert. Anschließend werden die Positionen der Maxima mittels einer Schwerpunktauswertung detektiert [10]. Der Wert der Anregungsspannung zum Zeitpunkt

der jeweiligen Signalmaxima wird als Maß für die gemessene Höhe herangezogen. Dabei muss die Phasenverschiebung zwischen tatsächlicher Auslenkung des Prismas und der Monitorspannung berücksichtigt werden. In Bild 3-28 rechts unten ist der Effekt einer nicht korrigierten Phase der Monitorspannung am Beispiel der Messung eines statischen Oberflächenpunktes zu sehen: Es werden in diesem Fall fälschlicherweise abwechselnd zwei sich jeweils unterscheidende Höhen (Tiefen) ermittelt. Eine alternative Methode zur Auswertung ohne Verwendung der Monitorspannung beruht auf der Bestimmung der Zeitdifferenz $\Delta t_{(p-1),n}$ zwischen zwei aufeinander folgenden Maxima der Intensität am Detektor sowie der Annahme einer sinusförmigen Schwingung des Fokus mit konstanter Frequenz f_{Eigen} und Amplitude \hat{Z} (siehe Gleichung 1).

$$z_n = (-1)^n \hat{Z} \cos(\pi \cdot \Delta t_{(p-1),n} \cdot f_{\text{Eigen}}) \quad (1)$$

Der Vorteil dieser Auswertemethode besteht darin, dass hier keine Monitorspannung benötigt wird. Ein Nachteil ist, dass nur der Betrag der Auslenkung aus der Ruhelage des Fokus bestimmt werden kann. Des Weiteren ergeben sich Auswertefehler, wenn einzelne Maxima nicht detektiert werden. In Bild 3-29 sind Auswertungen einer Fokuslagenvariation auf einer Spiegeloberfläche mit den beiden dargestellten Auswertemethoden dargestellt. Im direkten Vergleich der beiden Auswertemethoden ist bei der Auswertung der Zeitdifferenzen ein geringeres Rauschen zu erkennen, wobei der Messbereich gegenüber der Auswertung der Anregungsspannung halbiert ist [38].

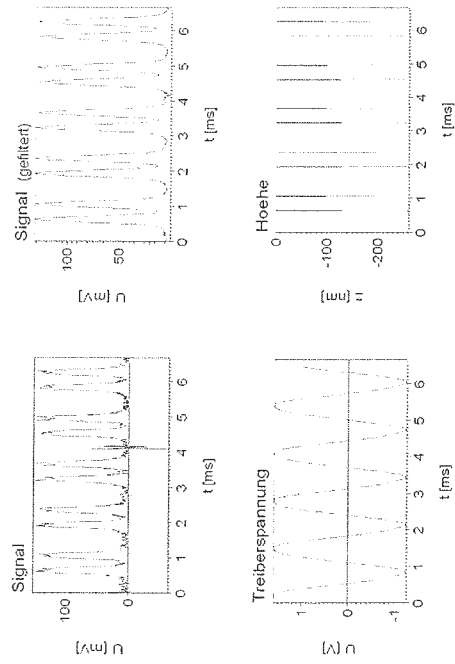


Bild 3-28: Signalauswertung.

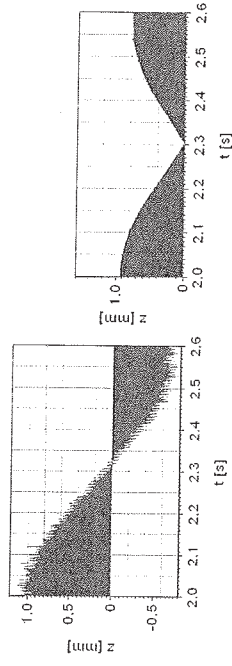


Bild 3-29: Messergebnis bei Fokuslagenvariation auf Spiegel nach Auswertung des Treibersignals (links) und Zeitdifferenzen (rechts).

3.2.2.3 Aufbau für In-Prozess-Messungen

3.2.2.3.1 Erste In-Prozess-Messungen

Für In-Prozess-Messungen an einer Laser-Schweißanlage des Projektpartners FGSW wurde der experimentelle Aufbau weiter modifiziert [11]. Vor allem stand die Reduzierung des Gewichts auf maximal 10 kg nach Vorgabe der FGSW im Vordergrund.

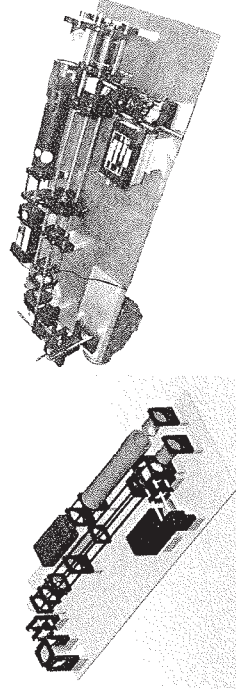


Bild 3-30: Konstruktion und Fertigung der In-Prozess-Version des Keyhole-Sensors.

Auch eine Verkleinerung des Aufbaus durch eine mehrfache Faltung des Strahlengangs wurde angestrebt, um den Wünschen der Industriepartner gerecht werden zu können. Um die Vorgaben einzuhalten, war eine aufwendige Neukonstruktion des Aufbaus notwendig. Es musste eine Grundplatte mit Halterungen für die Optiken konstruiert und gefertigt werden. Weiterhin wurde der im Rahmen des Projekts beschaffte 150 mW Laser sowie eine Avalanche-Photodiode in den Aufbau integriert. Der Sensor ist in Bild 3-30 dargestellt. Die Eckdaten des Keyhole-Sensors in der In-Prozess-Version sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst.

Länge	630 mm
Breite	250 mm
Höhe	160 mm
Masse	9,8 kg (ohne Gehäuse, ohne Schweißkopf)
Laser	$\lambda=532\text{nm}$ $P=150\text{mW}$
Strahlendrehmesser	15 mm
Durchmesser des Detektions-	200 μm
Pinholes	

Tabelle 3-5: Eckdaten des Keyhole-Sensors (In-Prozess-Version).

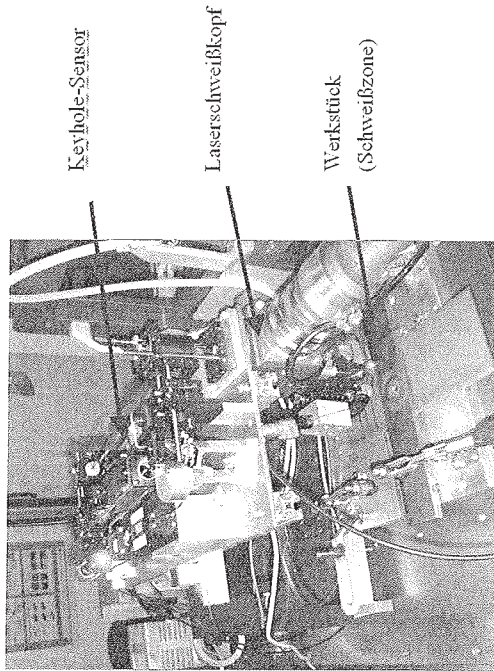


Bild 3-31: Keyhole-Sensor am Bearbeitungskopf einer Laserschweißanlage.

Im Rahmen erster Testmessungen zeigte die geplante hochsensitive Avalanche-Photodiode ein stark ausgeprägtes Hochpass-Verhalten und musste deshalb für das Vorhaben als ungeeignet eingestuft werden, da die Signalverzerrungen zu stark waren. Als Detektor wurde stattdessen eine Silizium-Photodiode (Siemens BPX65) eingesetzt. Darüber hinaus waren zunächst starke Leistungseinbußen an der Kollimationsoptik sowie interne Reflexe im Strahlengang des Aufbaus zu beobachten. Eine Überprüfung der Leistungsverluste im Aufbau ergab die Notwendigkeit, die Kollimationsoptik auszutauschen, da diese nicht auf die Messwellenlänge 532 nm sondern auf die Wellenlänge 633 nm optimiert ist. Die Integration des Keyhole-Sensors erfolgte in eine Laserschweißanlage des Projektpartners FGSW (vgl. Bild 3-31). Es wurden zunächst Messungen ohne Schweißlaser durchgeführt. Aufgrund der reduzierten mechanischen Stabilität der Grundplatte zeigte sich ein problematisches Anschwingverhalten der Stimmgabel. Die Dicke der Grundplatte betrug nur

5 mm, um die vorgegebene maximale Gesamtmasse des Sensors (10 kg) nicht zu überschreiten. Die Treiberspannung musste gegenüber den Messungen am Laboraufbau stark erhöht werden, um ein Anschwingen der Stimmgabel zu erreichen. Erste Testmessungen zeigten darüber hinaus eine schlechte Reproduzierbarkeit der Signale. Vor jeder Messung war eine erneute Justage des Aufbaus notwendig. Eine Verstärkung der Grundplatte ergab eine bessere Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, das Anschwingverhalten blieb weiterhin problematisch.

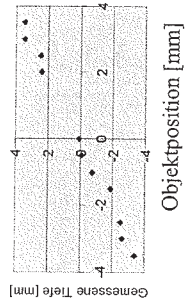


Bild 3-32: Ergebnis der Auswertung der Fokusbildvariation.

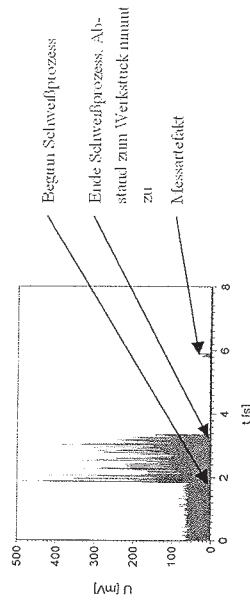
Bild 3-33: Gestörtes Messsignal bei $P = 500\text{ W}$ (Schweißlaser setzt etwa bei $t = 2\text{ s}$ für ca. 1,7 s ein).

Bild 3-32 zeigt die Auswertung einer Messreihe, bei der das Werkstück ohne Schweißlaser statisch bei verschiedener Entfernung zum Schweißkopf gemessen wurde. Der sehr große Messbereich von etwa 7 mm ist eine Folge der notwendigen erhöhten Treiberspannung der Stimmgabel. Der vergleichsweise große Messfehler (290 μm , RMS) ist ebenfalls auf die erhöhte Treiberspannung sowie auf die mangelnde mechanische Stabilität der mechanischen Anbindung an den Laserkopf zurückzuführen. Erste Messungen bei verschiedenen Schweißleistungen und abgedecktem Detektor ergaben elektrische Störungen des Signals durch den Prozesslaser (vgl. Bild 3-33). Durch Einsatz eines abgeschirmten Detektors konnten diese Störungen behoben werden.

Der Vergleich zwischen einer Messung ohne Schweißlaser (Bild 3-34) und einer Messung bei einer Laserleistung von 500 W (Bild 3-35) zeigt, von einzelnen Störungen abgesehen, noch keinen wesentlichen Einfluss des Prozesses auf das Messsignal. Bei höheren Leistungen des Prozesslasers wird das Signal jedoch stark beeinträchtigt. Bild 3-36 zeigt den Signalverlauf beim Einsetzen des Prozesslasers mit 1,5 kW. Nach einem starken Peak beim Einkoppeln sinkt die Höhe des Messsignals stark ab. Bild 3-37 zeigt den Signalverlauf während des Prozesses. Die größte untersuchte Schweißleistung betrug 2 kW. Der Signalverlauf beim Einkoppeln, bzw. während des Prozesses ist in Bild 3-38 dargestellt. Die In-Prozess-Signale sind mit beiden Auswertverfahren auswertbar.

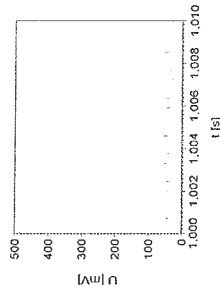


Bild 3-34: Messsignal bei $P = 0$ W.

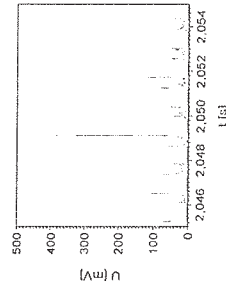


Bild 3-35: Messsignal bei $P = 500$ W.

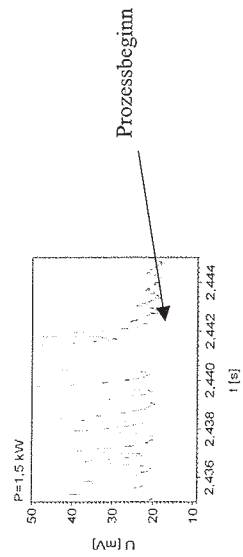


Bild 3-36: Messsignal zu Prozessbeginn ($P = 1,5$ kW).

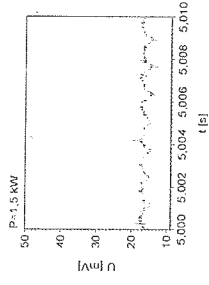


Bild 3-37: Messsignal bei $P=1,5$ kW.

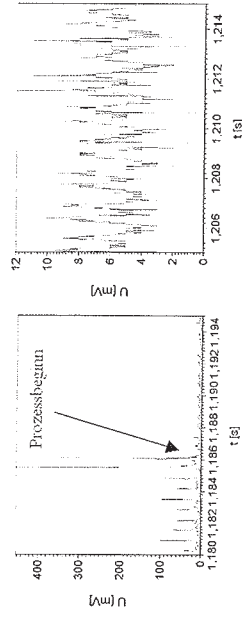


Bild 3-38: Messsignal bei Einsetzen des Prozesses mit $P=2$ kW (rechts) und Messsignal während des Prozesses (links).

3.2.2.4 Optimierung und Redesign

Die bei den ersten In-Prozess-Messungen aufgetretenen Probleme zeigten die Notwendigkeit eines Redesigns des Sensors. Es konnte kein reproduzierbares Messsignal mit ausreichendem Kontrast während des Schweißprozesses erzielt werden. Die Arbeiten konzentrierten sich daher auf die Erhöhung der Leistung des Messlasers, den Einsatz eines Piezotransformators zur Vermeidung des lateralen Versatzes des Messflecks, sowie die Reduktion interner Reflexe durch Einsatz eines für die Messwellenlänge entgegelen Laserkopfes zur Erhöhung des Signalkontrasts. Darüber hinaus hat es sich im Verlauf der Messungen als vorteilhaft erwiesen, einen Kamerastrahlengang koaxial zum Messstrahlengang einzufügen, um anhand der Abbildung des Objektraums den Messort genauer bestimmen zu können. Hierzu musste ein speziell ausgelegter Strahlteiler am ITO angefertigt werden. Der VIS-entpiegelte Laserkopf wurde durch den Projektpartner TRUMPF GmbH + Co. KG zur Verfügung gestellt.

3.2.2.4.1 Einsatz eines leistungsstärkeren Messlasers

Zur Verbesserung der Signalqualität wurde ein leistungsstärkerer Messlaser eingesetzt. Der neue Jenoptik-D2-Laser mit einer optischen Leistung von 3 W und einer Wellenlänge von

532 nm musste jedoch zunächst im Hinblick auf die Gewährleistung einer stabilen Strahlqualität mit einer geregelten Kühlung und Stromversorgung versehen werden, da es sich bei dem Laser um eine stand-alone-Komponente der Firma Jenoptik ohne Stromversorgung, Kühlung und Kühlregelung handelte.

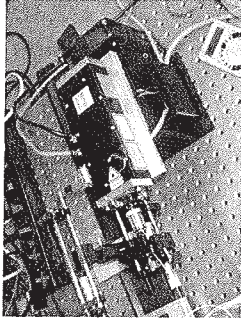


Bild 3-39: D-2 Scheibenlaser mit Kühlung und Fasereinkopplung.

Das große Bauvolumen und die große Masse des Lasers mit Kühlkörper (vgl. Bild 3-39) erforderten die Verwendung einer Faser zur Zuführung der Laserstrahlung zum Sensor. Die Zuführung der Messlaserstrahlung über eine Quarzfaser ermöglichte eine weitere Miniaturisierung des Sensors (Bild 3-40, Bild 3-41). Am Markt waren keine Hochleistungsfasern mit dem notwendigen Kerndurchmesser von maximal 50 μm zu erhalten. Tests mit Standardquarzfaseren zeigten jedoch, dass diese die sehr hohe Leistungsdichte über mehrere Minuten beschädigungsfrei gewährleisten. Die maximale, am Faserende austretende optische Leistung beträgt 1,9 W bei einer Faser mit Kerndurchmesser 50 μm bzw. maximal etwa 1 W bei einer Faser mit Kerndurchmesser 9 μm .

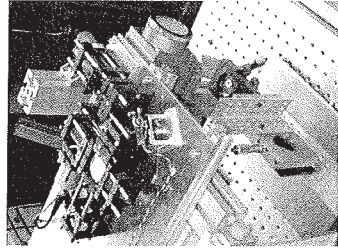


Bild 3-40: Verkleinerter Aufbau des Keyhole-Sensors.

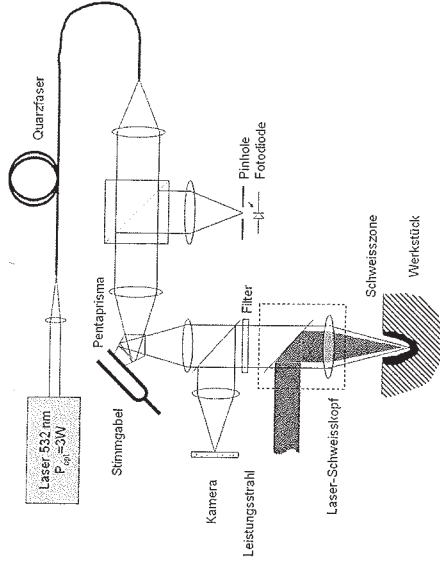


Bild 3-41: Keyhole-Sensor-Aufbau mit D2-Laser, Kamerastrahlengang und Faserzuführung.

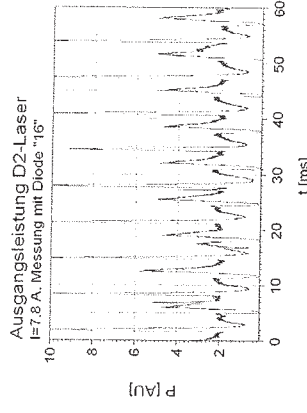


Bild 3-42: Störungen in der Ausgangsleistung des D2-Lasers.

Es traten zunächst mehrere Probleme bei der Funktion des neuen Lasers auf. Die optische Ausgangsleistung war von starken Störungen in Form von Spikes überlagert (siehe Bild 3-42). Als Ursache der Störungen des Lasers konnte die fehlerhafte Ansteuerung des Lasers identifiziert werden, so dass mit einem Austausch derselben die Probleme behoben werden konnten.

3.2.2.4.2 Modifikation des Schwingensystems

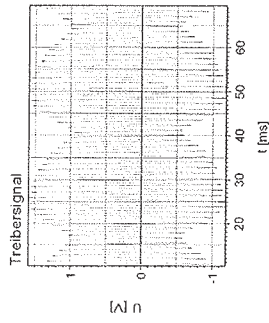


Bild 3-43: Störungen im Treibersignal der Stimmgabel.

Das auf einer Stimmgabel basierende Schwingensystem für das Pentaprisma zeigte im Projektverlauf einige Nachteile. Neben dem schlechten Anschwingverhalten und Störungen in der Treiberspannung (Bild 3-43) ist hier vor allem die große seitliche Amplitude des Messflecks im Schwingvorgang zu nennen, die sich als Folge der durch das problematische Anschwingverhalten notwendigen starken Erhöhung der Anregungsspannung des Schwingensystems ergab.

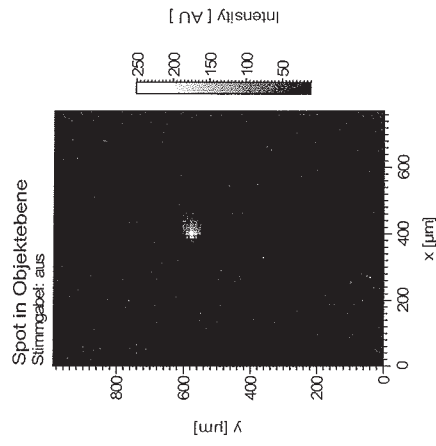


Bild 3-44: Spot in der Objektebene (Stillstand der Stimmgabel).

Zur Untersuchung des lateralen Versatzes des Messflecks wurde eine Kamera in der Objektebene platziert. Bild 3-44 zeigt die zum Schutz der Kamera stark reduzierte Intensität in der Objektebene im Stillstand. Der Spotdurchmesser beträgt hier etwa $10\ \mu\text{m}$. In Bild

3-45 ist die Intensität in der Objektebene bei maximaler Treiberspannung dargestellt; die laterale Verschmierung des Spots beträgt bei einer Überdimensionierung des Messbereichs um den Faktor 10 mehr als $400\ \mu\text{m}$.

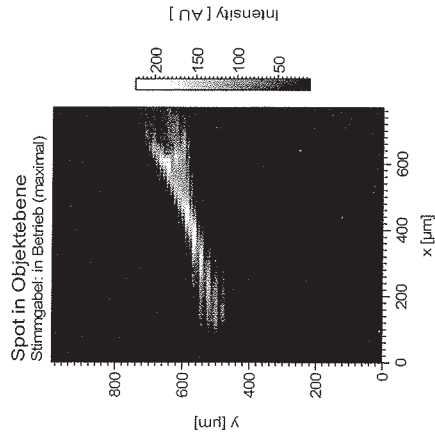


Bild 3-45: Spot in der Objektebene (Treiberspannung maximal).

Auch Testmessungen an Keyholeproben ergaben, dass die seitliche Verschmierung des Messflecks, die durch die Bewegung der Stimmgabel hervorgerufen wird, zu groß ist. Bild 3-46 zeigt die seitliche Verschmierung des Messflecks auf einer Keyholeprobe. Diese Verschmierung wird durch eine die Auslenkung des Pentaprismas begleitende Drehbewegung hervorgerufen und verhindert störungsfreie Messungen innerhalb der Kavität.

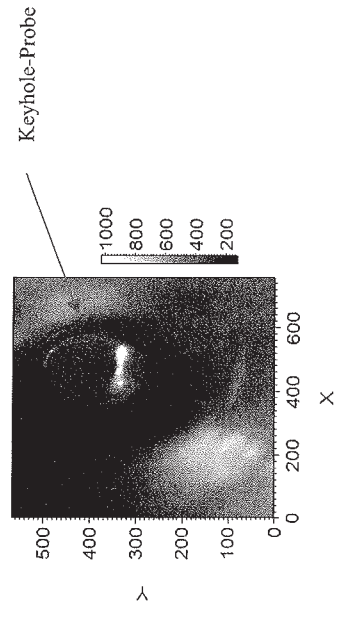


Bild 3-46: Seitliche Verschmierung des Messflecks auf einer Bohrprobe.

Zur Vermeidung der lateralen Verschmierung musste die Stimmgabel durch einen rein translatorisch arbeitenden Piezoversteller ersetzt werden. Hierzu wurden zunächst in Frage kommende Systeme ermittelt. Ziel war die Realisierung des Scans ohne störenden lateralen Versatz. Dabei musste mangels leistungsfähiger Piezo-Systeme am Markt eine Reduktion der Messfrequenz auf etwa 200 Hz in Kauf genommen werden. Das System ist mit einem Wegmesssystem ausgestattet, um die zeitliche Auslenkung des Pentaprismas, und damit auch indirekt die Fokussposition im Objektraum zu bestimmen. Bild 3-47 zeigt den Piezoversteller mit darauf montiertem Pentaprisma. Des Weiteren wurde eine Halterung angefertigt, um den Piezoversteller mit dem montierten Pentaprisma auf der Grundplatte des Keyholesensors zu befestigen.

3.2.2.4.3 Einsatz eines VIS-entspiegelten Laserkopfes

Zur Klärung der Ursache der starken internen Reflexe wurden diese zunächst durch leichte Verkippung des Pentaprismas minimiert. Eine in der Detektor- bzw. Pinholeebene platzierte Kamera zeigte jedoch auch ohne Messobjekt starke Restreflexe des Aufbaus (vgl. Bild 3-48 links). Eine Abdeckung der metallischen Wände des Schweißkopfes mittels einer schwarzen Blende brachte nur eine leichte Verringerung der Reflexe (Bild 3-48 rechts). Bei einer Abdeckung des gesamten Schweißkopfes mit einer schwarzen Blende waren diese Reflexe nicht mehr messbar. Die Untersuchungen zeigten, dass die durch den Schweißkopf verursachten Reflexe nicht auf einfache Weise zu beheben sind, und eine Optimierung des Schweißkopfes (Entspiegelung für die Messwellenlänge) notwendig erscheint.

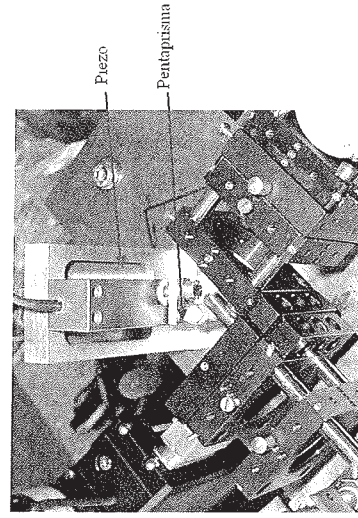


Bild 3-47: Translatorischer Piezoaktor für das Pentaprisma.

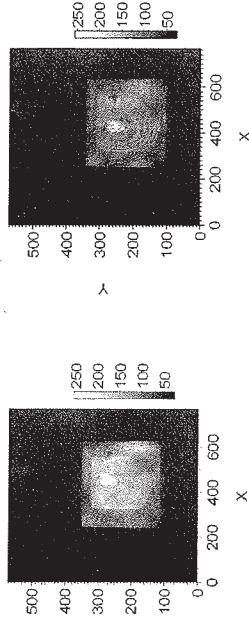


Bild 3-48: Reflexe in Pinholeebene, verursacht durch den Schweißkopf. Rechts: Schweißkopfwand mit schwarzer Blende abgedeckt.

In Bild 3-49 ist der optimierte Sensor zu Projektende in einer Prinzipskizze dargestellt: Die Einkopplung des Laserlichts in die Faser (Durchmesser: 9 μm) wird mit einem Mikroskopobjektiv (40x, NA = 0,4) durchgeführt. Ein Achromat ($f = 70 \text{ mm}$) dient zur Kollimation. Ein weiterer Achromat ($f = 50 \text{ mm}$) fokussiert in das Prisma, das auf dem Piezo-Aktor montiert ist. Dieser ermöglicht bei einer Messfrequenz von 200 Hz einen axialen Messbereich von etwa 1 mm. Ein weiterer Achromat ($f = 50 \text{ mm}$) rekollimiert das Licht. Dieses tritt durch den Strahlteiler für den Abbildungsstrahlengang mit Kamera und wellenlängen-selektivem Filter, das die Leistungsstrahlung und das Prozessleuchten blockiert, in den VIS-entspiegelten Laserschweißkopf ein. Dort wird das Licht durch die Fokussierlinse des Laserkopfes ($f = 100 \text{ mm}$) in den Objektraum fokussiert. Das im Objektraum reflektierte Licht durchläuft den Laserkopf und das Filter. Am Strahlteiler für den Abbildungsstrahlengang wird 10% des Lichts für die Abbildung der Messzone auf die CCD-Kamera ausgekoppelt. Der Durchlichtanteil durchläuft die Prismenbaugruppe und wird am 50:50-Strahlteiler in den Detektionsarm geleitet. Dort fokussiert ein Achromat ($f = 50 \text{ mm}$) das Licht auf das Pinhole mit dem Durchmesser 10 μm . Die Photodiode (Siemens BPX-65) kann direkt hinter das Pinhole platziert werden. Aus Gründen der einfacheren Justage und der besseren Zugänglichkeit wurde hier jedoch noch eine weitere Abbildungsstufe eingeführt, die in der Skizze nicht aufgeführt ist.

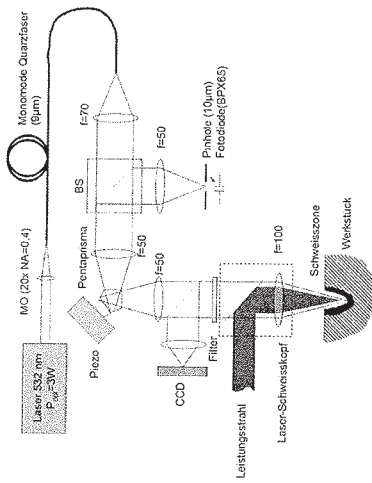


Bild 3-49: Aufbau des Keyholesensors mit Piezo-Aktor.

3.2.2.4.4 Labormessungen mit dem optimierten Sensor

Zur Durchführung von Labormessungen unter möglichst realistischen Bedingungen wurden durch die Firma Robert Bosch GmbH ein Satz Keyholeproben bereitgestellt. Dabei handelt es sich um kleine Metallzylinder mit verschiedenen mechanisch und lasergebohrten Bohrungen. Diese Proben eignen sich für Referenzmessungen mittels Durchstrahlungsprüfung.

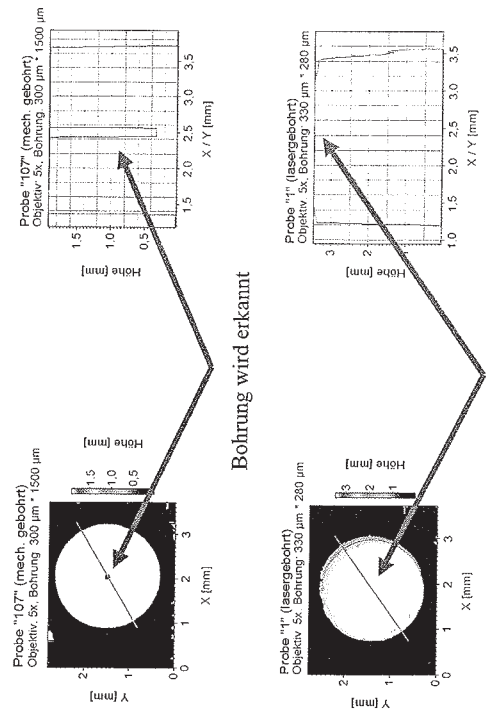


Bild 3-50: Messungen an Keyholeproben mit dem konfokalen Mikroskop. Bohrung wird erkannt

Topografiemessungen an Keyholeproben, durchgeführt mit einem konfokalen Mikroskop ergaben, dass bei mechanisch gebohrten Proben die gemessenen Tiefen sehr gut mit den Sollwerten übereinstimmte. Lediglich bei der Bestimmung der Bohrungsdurchmesser ergab sich eine vom Aspektverhältnis abhängige Abweichung.

Die Bohrungstiefe der mechanisch gebohrten Keyholeproben ist mit einem konfokalen Mikroskop jedoch gut messbar. Bei den lasergebohrten Proben stellten sich jedoch größere Probleme ein: Bedingt durch die sehr geringe Reflektivität des Bohrungsgrundes sowie durch die dort vorliegenden großen Gradienten findet eine Überstrahlung durch Reflexe aus der (stark defokussierten) Stirnfläche der Probe statt. Das sich hierdurch ergebende Nebenmaximum im konfokalen Signal überstrahlt das vom Bohrungsgrund stammende Signal. Ein Vergleich der Messergebnisse von mechanisch gebohrten Keyholeprobe und einer lasergebohrten Probe ist in Bild 3-50 dargestellt. Im Gegensatz zur mechanisch gebohrten Probe (Bild 3-50 oben) wird die Bohrung der lasergebohrten Probe (Bild 3-50 unten) nicht als solche erkannt.

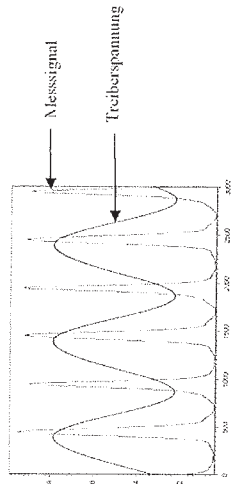


Bild 3-51: Konfokales Messsignal und Monitorspannung.

In Bild 3-51 ist das konfokale Messsignal des optimierten Keyholesensors sowie die Monitorspannung des Piezos dargestellt. Auffallend ist die stark verbesserte Signalqualität gegenüber den bisherigen Signalen des Keyholesensors. Bild 3-52 zeigt den Messfleck des Sensors auf einer Keyholeprobe statisch (links) und im Messbetrieb (rechts). Es wird deutlich, dass nun keine seitliche Verschmierung des Messflecks mehr feststellbar ist. In Bild 3-53 und Bild 3-54 sind jeweils Auswertungen von Fokuslagenvariationen auf einem Spiegel mit beiden Auswertverfahren dargestellt. Auffällig ist hier das teilweise auftretende Doppelsignal. Mögliche Ursachen für das Doppelsignal können eine Hysterese des Piezo oder eine durch Aberrationen bedingte Symmetrieabweichung des konfokalen Signals sein. Bild 3-55 zeigt das Signal bei Messung auf der metallischen Oberfläche einer Keyholeprobe. Die zugehörigen Auswertungen sind in Bild 3-56 festgehalten. In Bild 3-57 sind die Auswertungen einer Fokuslagenvariation auf der Probenoberfläche zu sehen. Bild

3-58 zeigt das Messsignal in der lasergebohrten Kavität. Die Messung fand ohne Bearbeitungslaser im Labor statt.

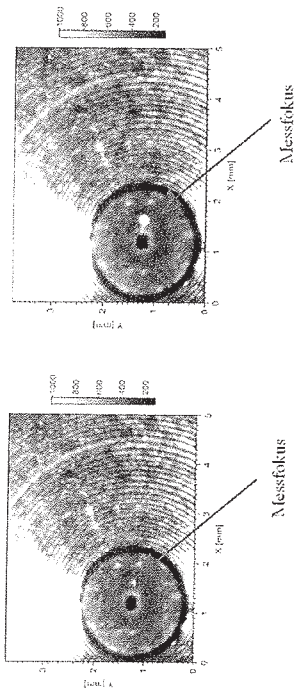


Bild 3-52: Fokussfleck auf einer Keyholeprobe (links: statisch rechts: Im Betrieb).

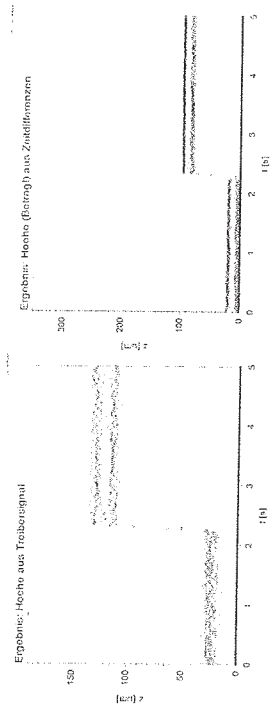


Bild 3-53: Auswertung: Fokusslagenvariation auf Spiegel (100 μm).

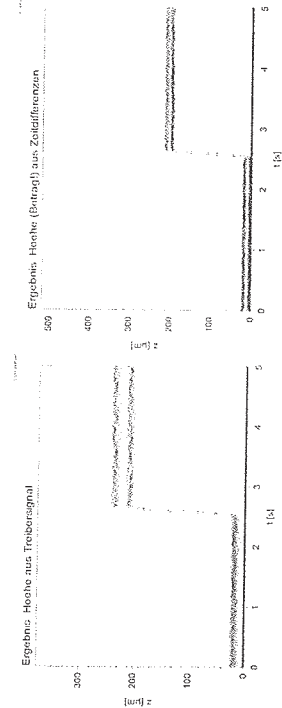


Bild 3-54: Fokusslagenvariation auf Spiegel (200 μm).

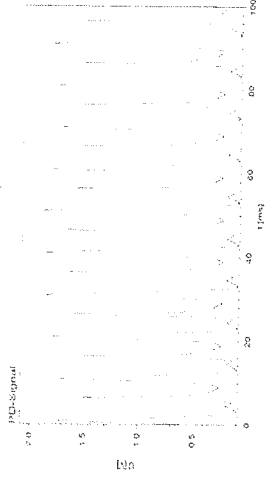


Bild 3-55: Statisches Messsignal auf Keyholeprobe (Oberfläche).

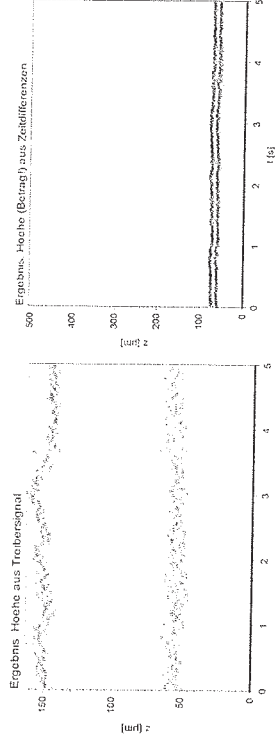


Bild 3-56: Auswertung mit Treibersignal (links) und Zeitdifferenzen (rechts).

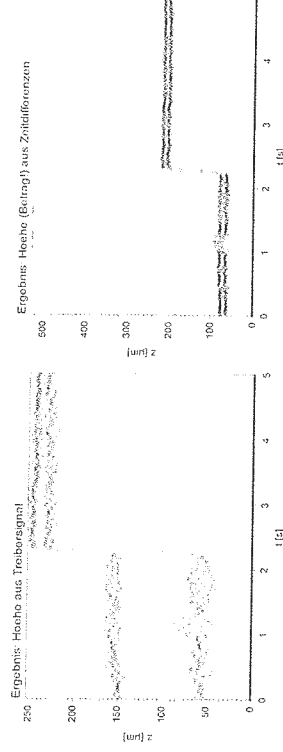


Bild 3-57: Fokusslagenvariation (100 μm) auf Keyholeprobe.

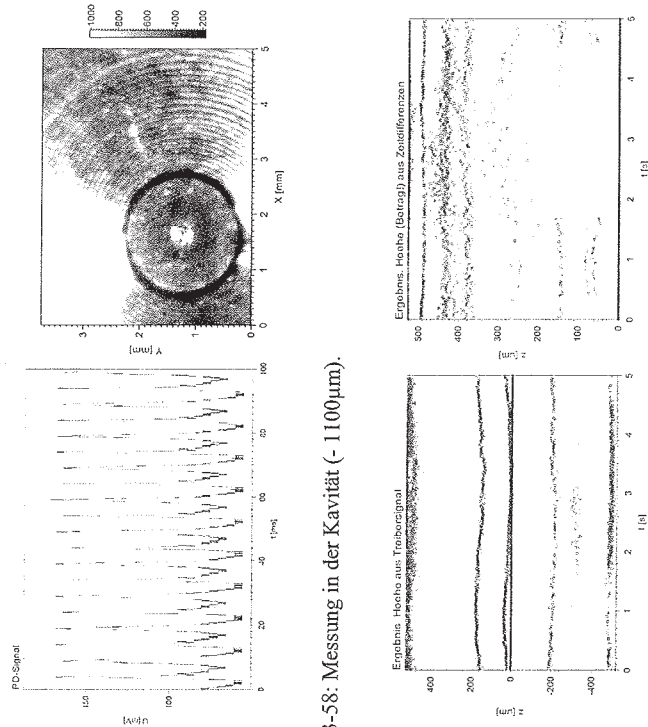


Bild 3-58: Messung in der Kavität (-1100µm).

Bild 3-59: Auswertung (in Kavität, -1100 µm).

Die Auswertung dieses Signals (Bild 3-59) weist Mehrdeutigkeiten auf, deren Ursache nicht ermittelt werden konnte. Eine mögliche Ursache hierfür sind Mehrfachreflexionen am stark zerklüfteten Grund der Kavität. Bild 3-60 zeigt die Auswertung einer Fokulagenvariation (100 µm) im Grund der Kavität. Neben fehlerhaften Messwerten, die nicht direkt mit der Probenoberfläche korrelieren, existiert hier ein Signal (siehe Pfeil), das die mechanisch gefahrene Fokulagenvariation wiedergibt.

Zur Kalibrierung und Bestimmung der Phasenverschiebung zwischen Treibersignal und Auslenkung des Pentaprismas bzw. des Messfokus wurde eine Messung mit einem Referenzspiegel als Messobjekt durchgeführt. Der an der Schweißanlage montierte Keyhole-Sensor wurde mittels der Aktorik der Anlage in 8 Schritten von jeweils 100 µm auf den Spiegel zu bewegt. Bild 3-61 links zeigt die Auswertung dieser Messung unter Verwendung des Treibersignals. Die Phasenverschiebung zwischen Treibersignal und Auslenkung wurde zu 1,69 ms bzw. $0,338 \pi$ bestimmt und in den Auswertungen entsprechend korrigiert. An den Rändern des Messbereichs sind Doppelsignale zu erkennen. Eine mögliche Ursache für die Doppelsignale ist eine Unsymmetrie in der konfokalen axialen Systemantwort. Eine solche Unsymmetrie wiederum kann beispielsweise durch Aberrationen hervor-

gerufen werden. In Bild 3-61 rechts ist das Messergebnis bei Auswertung der Zeitdifferenzen dargestellt. Wie bereits erwähnt ist hier nur eine Detektion des Betrages der Auslenkung möglich. Bild 3-62 zeigt das Ergebnis der Auswertung mit einer Lock-In-Detektion des Messsignals. Diese Auswertung ist besonders für In-Prozess-Messungen mit starken Störungen geeignet.

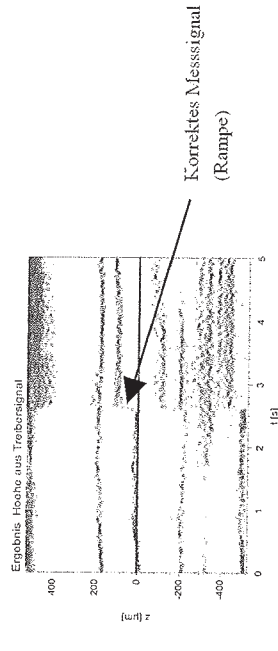


Bild 3-60: Fokulagenvariation in Kavität (-1100 µm + 100 µm).

3.2.2.5 In-Prozess Messungen mit dem optimierten Aufbau

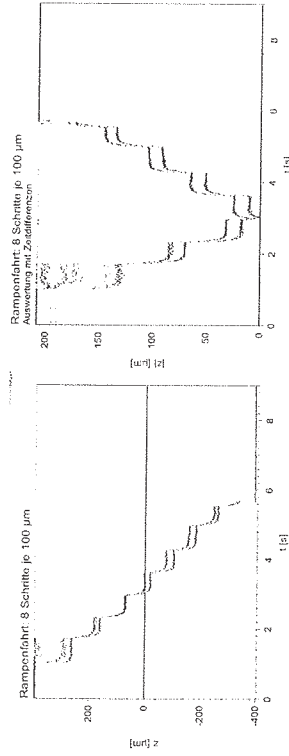


Bild 3-61: Fokulagenvariation mit der Schweißanlage (links: Auswertung mit Treibersignal, rechts: Auswertung mit Zeitdifferenzen).

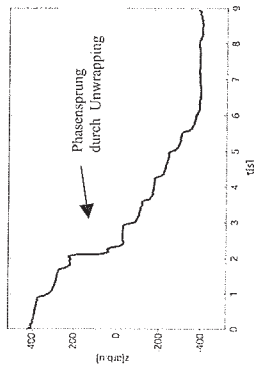


Bild 3-62: Fokuslagenvariation mit der Schweißanlage (Auswertung durch Lock-In-Detektion).

Während des Schweißprozesses wurden starke Störungen und eine Übersteuerung der Detektordiode beobachtet (siehe Bild 3-63 links). Da elektrische Störungen durch eine Vergleichsmessung bei vollständig abgedeckter Diode (siehe Bild 3-63 rechts) und eine Messung bei abgedecktem Detektionspinhole ausgeschlossen wurden, kann es sich bei den Störungen nur um starkes Streulicht aus dem Schweißprozess handeln, das seitlich am Pinhole vorbei direkt auf die Detektordiode trifft. Nach der Montage der Detektordiode direkt hinter dem Detektionspinhole kann ein solcher Einfluss von Streulicht ausgeschlossen werden. Bild 3-64 zeigt den Verlauf des Messsignals während der Schweißung mit einer Leistungsrampe von 0 bis 500 W auf einer Stahlprobe (St-14). Das Messsignal nimmt zu Beginn der Schweißung stark zu, hat einen kurzen Einbruch und setzt sich dann bis zu einer Schweißleistung von 500 W fort. Die Störungen nach der Schweißung sind auf den Einfluss der durch das Schutzgas (Helium) und dem Querjet hervorgerufenen Dichteschwankungen zurückzuführen. Eine Ursache für die Zunahme des Signals bei geringeren Schweißleistungen könnte die Freilegung nicht oxidierten Metalls durch den Schweißprozess sein.

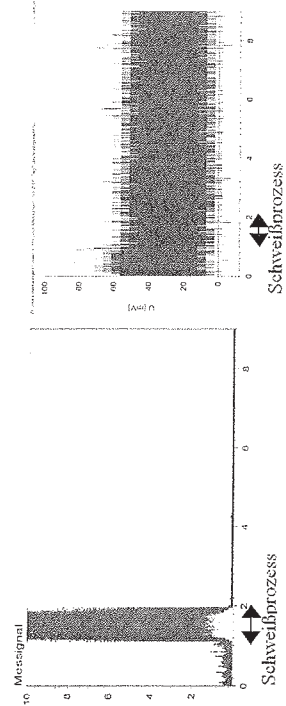


Bild 3-63: Störungen durch Streulicht des Schweißlasers (links) und Signal der abgedeckten Diode während einer Schweißung (rechts).

Auswertungen dieses Messsignals mit der Treiberspannung (Bild 3-65 links), den Zeitdifferenzen (Bild 3-65 rechts) sowie mittels Lock-In-Detektion (Bild 3-66) zeigen, dass zur Ermittlung der In-Prozess-Messsignale die Auswertung der Treiberspannung und die Auswertung der Zeitdifferenzen nicht geeignet sind. Die Lock-In-Detektion hingegen liefert in diesem Fall bessere Ergebnisse, hier sind jedoch weitere Optimierungen notwendig.

In Bild 3-67 sind die Messsignale bei einer Schweißung von Aluminium (links) und Stahl St-14 (rechts) mit einer abfallenden Schweißleistungsrampe von 2 kW bis 0 kW dargestellt. Der direkte Vergleich zwischen den beiden Werkstoffen zeigt, dass ein Messsignal bei Schweißungen von Aluminium bis ca. 1 kW erhalten wird, während das Signal bei Stahl bereits bei etwa 500 W deutlich schwächer wird.

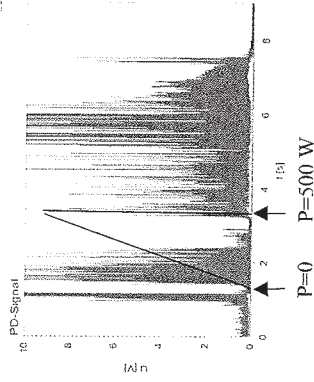


Bild 3-64: Messsignal bei Leistungsrampe 0 – 500 W auf St14.

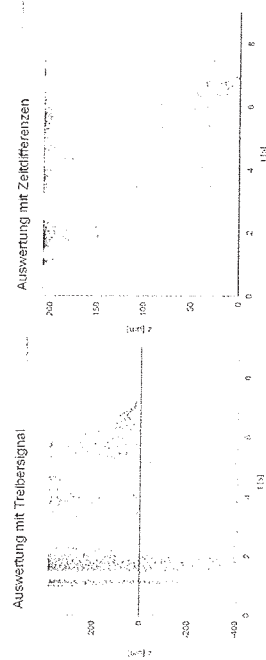


Bild 3-65: Auswertung der Leistungsrampe mit Treibersignal und Zeitdifferenzen.

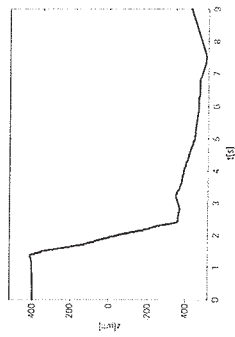


Bild 3-66: Auswertung der Leistungsrampe mittels Lock-In-Detektion.

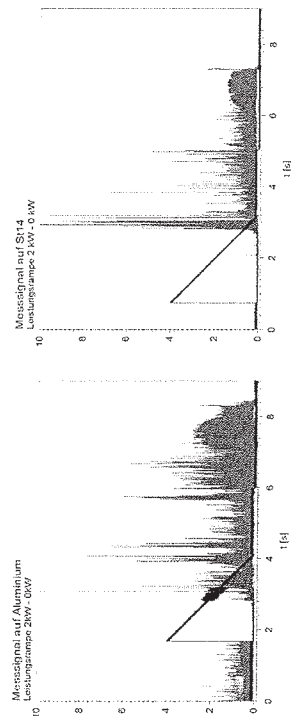


Bild 3-67: Leistungsrampe: Messsignal auf Aluminium(links) und Stahl St.-14 (rechts).

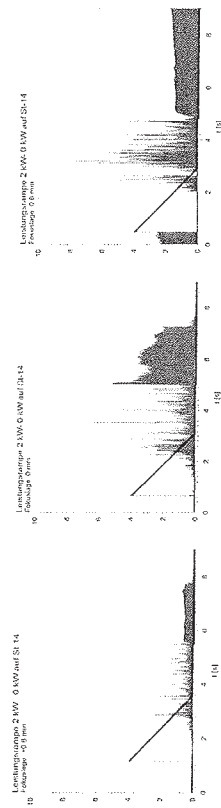


Bild 3-68: Messsignal bei Variation der Fokusslage: +0,6 mm (links), 0 mm (Mitte), -0,6 mm (rechts).

Die Fokusslage des Keyholesensors kann relativ zur Fokusslage des Schweißlasers bzw. zur Werkstückoberfläche frei eingestellt werden. Bei einer Variation der Fokusslage zeigt sich, dass der Einfluss relativ gering ist. In Bild 3-68 sind die Messsignalverläufe für die Fokusslage +0,6 mm (links), 0 mm (Mitte) und -0,6 mm (rechts) dargestellt. In allen drei Fällen nimmt das Signal oberhalb einer Schweißleistung von etwa 700 bis 800 W stark ab.

3.2.2.6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde ein konfokaler Keyholesensor zur In-Prozess-Messung der Einschweißtiefe beim Laserschweißen konzipiert, implementiert und im Schweißprozess getestet. Die durchgeführten In-Prozess-Messungen zeigen, dass mittels des konfokalen Keyholesensors die Gewinnung stabiler Messsignale und Keyholemessungen während des Laserschweißens grundsätzlich möglich ist. Bedingt durch die hohe Komplexität des Schweißprozesses und die industrielle Umgebung ist die Anzahl der Einflussfaktoren jedoch sehr hoch, so dass quantitative Aussagen über die Grenzen des Verfahrens zum Zeitpunkt dieses Berichts noch nicht abschließend möglich sind. Weitere In-Prozess-Messungen bis zum Projektende und im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte sind hierzu notwendig und geplant. Beispiele für detaillierter zu untersuchende Einflussfaktoren sind insbesondere:

- die Leistung des Schweißlasers
- der Querjet
- das Schutzgas
- die Vorschubgeschwindigkeit
- der Werkstoff
- die laterale Position des Messflecks
- mechanische Schwingungen des Laserschweißkopfes relativ zum Werkstück

Gleichzeitig ist die Kenntnis der optischen Eigenschaften im Bereich des Keyholes noch nicht ausreichend.

Die Schweiß-Laserleistung, bei welcher die Amplitude der aus dem Keyhole mit dem konfokalen Keyholesensor gemessenen Signale stark abnimmt, schwankt zwischen ca. 300 W und ca. 700 W, wobei die experimentell während einer Versuchsreihe ermittelte Grenzschweißleistung dann im Messvorgang über mehrere Stunden erstaunlich konstant ist. Die Ursachen für die starken Schwankungen sind zurzeit noch nicht ausreichend geklärt. Mögliche Ursachen sind die exakte laterale Position des Messspots im Keyhole im Bereich einiger Mikrometer oder das Auftreten von Speckle. Bei Einsatz einer Lock-In-Detektion ist auch die Auswertung sehr schwacher Messsignale im Bereich oberhalb der Grenzschweißleistung möglich.

Als eine Ursache für die schwankende Grenzschweißleistung für die Keyhole-Tiefendetektion kommt in Betracht, dass die Selbstabbildungseffekte des Messlichtes im Keyhole nicht konstant sind und durch den aktuellen Zustand der Schweißanlage beein-

flusst werden können, wobei diese Änderungen eine geringe Dynamik aufweisen. Auch der beim Schweißen entstehende Keyholedurchmesser kann sich zeitlich verändern, sowie auch dessen Achsneigung zur Werkstückoberfläche und auch die Krümmung der Oberfläche des Werkstücks.

Es ist beispielsweise weiterhin nicht auszuschließen, dass schon sehr kleine laterale Verschiebungen im Mikrometerbereich zwischen Schweißlaser-Strahlachse und Messlaser-Strahlachse die Rückabbildung des Messlichtes stark beeinflussen, obwohl vor jedem Messvorgang die Koinzidenz von Schweißbereich und Messbereich sorgfältig kontrolliert und einjustiert wurde. Dazu wurde mit der Schweißanlage ein Schweißfleck auf dem Schweißblech erzeugt und der Fokusfleck des konfokalen Keyholesensors kameragestützt auf diesen Schweißfleck fokussiert.

Auch im oder oberhalb des Keyholes thermisch induzierte Selbstabbildung stellt eine Möglichkeit für eine variable Grenzschweißleistung dar. Unklar ist, warum diese Effekte über mehrere Stunden nahezu konstant erscheinen. Zur Aufklärung des Effektes des abrupten Verschwindens des Messlichtes und der starken Schwankung der Grenzschweißleistung für die Keyhole-Tiefendetektion sind weitere Forschungsarbeiten notwendig.

3.2.2.7 Ausblick

Im Verlauf des Projektes stellte sich heraus, dass die Kenntnisse der optischen Wirkung des Keyholes auf das Messlicht nicht hinreichend bekannt sind. Es wird deshalb vorgeschlagen, bei weiteren Forschungsarbeiten eine zeitlich und lateral aufgelöste Detektion des aus dem Keyhole kommenden Messlichtes mit einer Hochgeschwindigkeitskamera in einer zum Keyhole optisch konjugierten Ebene durchzuführen. Weiterhin ist notwendig, um den Einfluss der lateralen Position des Messfokus zum Schweißfokus zu analysieren, eine rechnergesteuerte Aktorik in die Sensorik einzubringen. Um die laterale Position des Messflecks auf der Schweißprobe auch bei im industriellen Umfeld typischerweise auftretenden mechanischen Schwingungen hinreichend konstant zu halten ist eine mechanisch stabile Halterung des Sensors am Laserkopfes zwingend notwendig.

Die Charakteristik der Messsignale während des hochdynamischen Schweißprozesses unterscheidet sich grundlegend von den Messsignalen, die üblicherweise bei technischen Oberflächen angetroffen werden. Durch weitere In-Prozess-Messungen muss geklärt werden, ob die In-Prozess-Signale durch das Auftreten von Speckle beeinflusst werden. Hier sind Untersuchungen zur Signalauswertung, beispielsweise mit einer Lock-in-Detektion, notwendig, um die bereits gezeigten vorläufigen Ergebnisse sicher zu bestätigen.

Die laterale Einstellung des Messflecks mit Hilfe einer Kamera im Strahlengang hat sich als vorteilhaft erwiesen. Die manuelle Verstellung des Strahlteilers ist jedoch für eine systematische Untersuchung des Einflusses der lateralen Position des Messflecks innerhalb des Keyhole nur bedingt geeignet. Hier wird eine Verstellaktorik mit Messsystem benötigt.

Die mechanische Stabilität der Ankopplung des Laserschweißkopfes an die Anlage muss stark verbessert werden. Hierbei ist die Aktorik und Mechanik der Schweißanlage einzubeziehen.

Die Lock-In-Detektion zur Auswertung der stark gestörten In-Prozess-Signale hat sich als sehr viel versprechend erwiesen. Es sind weitere Optimierungen dieses Auswerteverfahrens notwendig.

3.2.3 Kapillar- und Schmelzbadüberwachung

In Vielzahligen Veröffentlichungen, welche sich mit der Überwachung von Laserschweißapplikationen beschäftigen, wird deutlich, dass bei der Verwendung von Photodetektoren die Signalauswertung der Prozessüberwachungssysteme auf eine Analyse der gemessenen Signalamplituden und/oder -frequenzen beschränkt ist. Das Defizit dieser Systemtechnologie ist jedoch, dass in den meisten Fällen ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Intensität und auftretenden Prozessstörungen nicht gegeben ist, bzw. der eindeutige Rückschluss von detektierter Intensität und aufgetretener Naturregelmäßigkeit auf den zugehörigen Prozessfehler fehlt oder äußerst schwierig ist. Diese Problemstellung kann mit bildgebenden Sensoren, bzw. mit Kamertechnologie angegangen werden. Mit den kamerabasierten Detektoren kann eine orts aufgelöste Erfassung der Wechselwirkungszone und der angrenzenden Bereiche erfolgen und Informationen über den Bearbeitungsprozess erfasst werden, die den integral messenden Sensoren prinzipbedingt verborgen bleiben. Die Arbeiten der Firma Precitec Optromik GmbH im INESS-Projekt haben genau diesen Anspruch, für typische Applikationen aus dem Bereich Automobilbau verwendbare Algorithmen zu entwickeln, mit denen der eindeutige Rückschluss auf den Bearbeitungsfehler möglich ist.

Aus den Arbeiten verschiedenster Gruppen hat sich herauskristallisiert, dass es zielführend sein kann, eine Beschränkung bei der Detektionswellenlänge vorzunehmen. Als Beispiel kann hier die Überwachung von CO₂-Schweißprozessen herangeführt werden. Beim Einsatz von Kamertechnik zur Qualitätssicherung ist es sinnvoll, einen Wellenlängenbereich im NIR-Spektrum (nahes Infrarotspektrum) zu wählen um den Einfluss des Plasmas zu eliminieren. Die Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und abströmendem Metall-dampf führt zu einer Plasmabildung und Strahlungsemissionen im ultravioletten Wellenlängenbereich. Für Nd:YAG-Prozesse mit typischen Laserleistungen (bis 4kW) gilt das

jedoch nicht. Aufgrund der fehlenden Wechselwirkung zwischen Metalldampf und Strahlung des Bearbeitungslasers kann das Prozessleuchten, bzw. der heiße Metalldampf hier als grauer Strahler angesehen werden, der im gleichen Wellenlängenspektrum leuchtet, wie die das Keyhole umgebende Schmelze.

Im INESS-Projekt wurde eine Analyse durchgeführt, inwieweit verschiedene Detektionswellenlängen einen Einfluss auf die Bilddatenerfassung haben und die algorithmisch erfassten Informationen mit dem Bearbeitungsergebnis korrelieren. Einige der Ergebnisse sind im folgenden Kapitel dargestellt.

3.2.3.1 Untersuchung der Wellenlängenabhängigkeit

Für die kamerabasierte Überwachung des Wechselwirkungsbereichs beim Laserstrahlschweißen müssen Keyhole und Schmelzbad zunächst relativ störungsfrei in den Kamerabildern sichtbar sein. Für die Wahl der geeigneten Detektionswellenlängen sind insbesondere zwei Aspekte von Bedeutung. Einerseits kann das Leuchten des angeregten Metalldampfes über dem bearbeiteten Werkstück das Kamerabild dominieren und eine Beobachtung des Keyholes und des Schmelzbad verhindern. Andererseits ist für die Visualisierung der relativ kleinen Temperaturen, wie beispielsweise der Schmelztemperatur von Aluminiumwerkstoffen eine Detektionswellenlänge im infraroten Spektralbereich von Vorteil [7].

Im folgenden soll der Einfluss der Detektionswellenlänge auf die Bildqualität untersucht werden. Eine Skizze des Versuchsaufbaus für die Grundlagenversuche zur kamerabasierten Prozessüberwachung ist in Bild 3-69 dargestellt. Demnach wird die Prozessstrahlung über den Strahlteiler einer Festkörperlaseroptik ausgekoppelt und auf einen bildgebenden Detektor abgebildet. Die Detektionswellenlänge wird über optische Filter im Strahlengang festgelegt.

3.2.3.1.1 Einfluss des angeregten Metalldampfes

Wie wichtig die Wahl der Detektionswellenlänge bzw. des genutzten Wellenlängenbereichs ist, soll mit Hilfe der Beispiele in Bild 3-70 gezeigt werden. In Bild 3-70a wurde der Schweißprozess mit Hilfe einer CCD-Kamera visualisiert. Im Strahlengang wurde kein weiterer Filter zur Einschränkung des Spektralbereichs ($0,4 - 1,1 \mu\text{m}$) verwendet. Die Metallampfstrahlung über der Werkstückoberfläche dominiert das Bild. Eine Visualisierung des Schmelzbad bzw. der Kapillare ist nicht möglich. Bei Verwendung einer CMOS-Kamera (Bild 3-70b) in Kombination mit einem Interferenzfilter mit einer Zentralwellenlänge von 633 nm und einer Halbwertsbreite von 10 nm spielt die Metallampfstrahlung über dem Werkstück eine untergeordnete Rolle. Keyhole und kapillarmahes Schmelzbad sind relativ störungsfrei erkennbar.

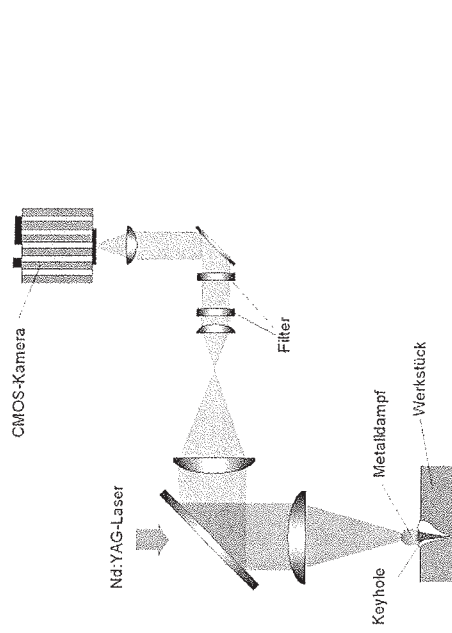


Bild 3-69: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Grundlagenversuche zur kamerabasierten Prozessüberwachung [7].

Zur Klärung des störenden Einflusses des Metallampfleuchtens auf die Bildqualität wurden spektroskopische Untersuchungen beim Schweißen unterschiedlicher Metalle durchgeführt. Demnach emittiert der Metalldampf hauptsächlich im UV- und im sichtbaren Spektralbereich. Bei Verwendung von Thermokameras im infraroten Spektralbereich ist deshalb nur eine geringe Beeinflussung zu erwarten. Kameras mit Chips auf Siliziumbasis hingegen weisen eine spektrale Empfindlichkeit vom UV- bis hin zum nahen IR-Bereich auf. Deshalb ist es bei der Verwendung von CCD- und CMOS-Kameras notwendig, den Wellenlängenbereich durch den Einsatz von optischen Filtern einzuschränken.

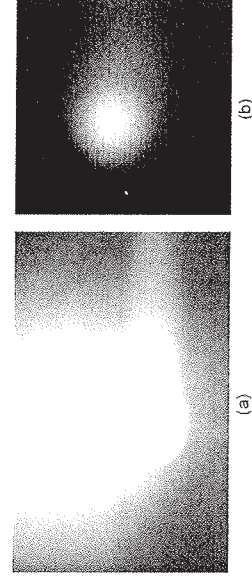


Bild 3-70: Kamerabilder beim Schweißen von Stahl, (a) Verwendung einer CCD-Kamera, Spektralbereich zwischen 400 nm und 1100 nm nicht eingeschränkt, (b) Verwendung einer CMOS-Kamera mit optischem Filter ($\text{cw}1 \text{ } 633 \text{ nm}$, $\text{FWHM } 10 \text{ nm}$) [7].

Bild 3-71 zeigt ein Emissionsspektrum beim Schweißen von Aluminium mit dem Nd:YAG-Laser. Die Spektrometerrauflösung liegt bei 2,4 nm, weshalb nur eine geringe Anzahl an Emissionslinien sichtbar ist. Auch ist die spektrale Empfindlichkeit des Spektrometers bei dieser Darstellung nicht berücksichtigt. Es sind zwei Spektralbereiche mit einer Zentralwellenlänge von 450 nm und 750 nm eingezeichnet. Die verwendeten Interferenzfilter weisen im eingezeichneten Spektralbereich eine Transmission größer 20% auf. Im Bereich des Filters um 450 nm liegt eine Emissionslinie.

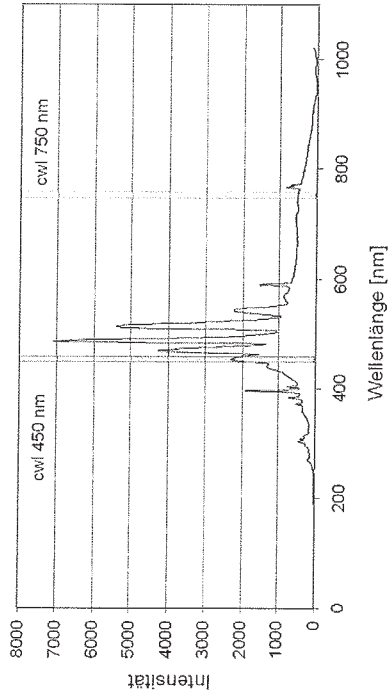


Bild 3-71: Emissionsspektrum beim Schweißen von Aluminium mit dem Nd:YAG-Laser. Eingezeichnet sind die Zentralwellenlängen 450 nm und 750 nm, jeweils mit einer Halbwertsbreite von 10 nm [8].

Bild 3-72a zeigt einige Kamerabilder, die mit einer Detektionswellenlänge von 450 nm, und einer Zeitdifferenz von jeweils einer Millisekunde aufgenommen wurden. Hier dominiert die Metalldampfstrahlung über dem Werkstück das Bild. Es treten große Schwankungen in der Intensitätsverteilung auf, die die Dynamik des Metalldampfes über dem Werkstück widerspiegeln. Eine Auswertung der Geometrie der Kapillaröffnung ist nicht möglich.

Bild 3-72b zeigt das Ergebnis bei einer Detektionswellenlänge von 750 nm, also im kontinuierlichen Bereich des Spektrums (vgl. Bild 3-71). In diesem Fall ist der Keyholebereich als relativ konstante Leuchterscheinung erkennbar. Das Leuchten des Metalldampfes über der Werkstückoberfläche stellt nur eine geringe Beeinflussung dieser Leuchterscheinung dar. Dieses Beispiel zeigt, wie wichtig es ist, bei der kamerabasierten Prozessüberwachung spektrale Bereiche mit starken Emissionslinien zu vermeiden.

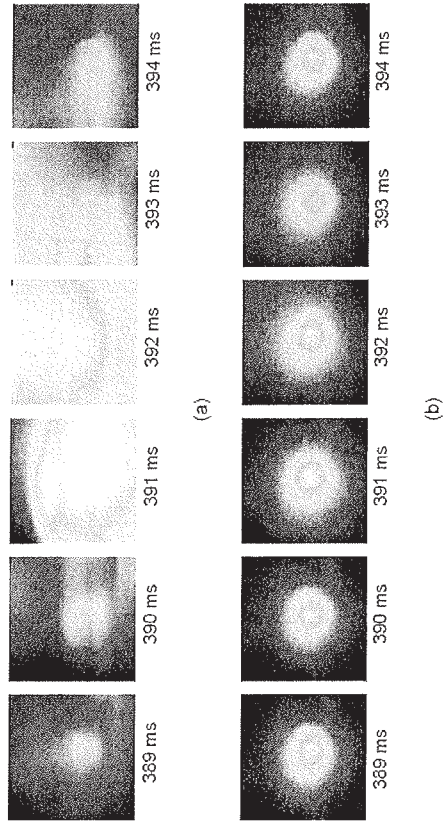


Bild 3-72: Kamerabilder beim Schweißen von Stahl mit dem Nd:YAG-Laser, (a) Detektionswellenlänge 450 nm, (b) 750 nm [7].

3.2.3.1.2 Schmelzbaddarstellung

Soll außer dem Keyhole auch das Schmelzbad visualisiert werden, ist eine Kamera mit hoher optischer Dynamik notwendig, da der gesamte Temperaturbereich von der Schmelzbis zur Verdampfungstemperatur gleichzeitig aufgelöst werden muss. Insbesondere beim Werkstoff Aluminium ist der Temperaturbereich aufgrund der geringeren Schmelztemperatur größer als bei Stahlwerkstoffen. Der Unterschied der Schmelztemperaturen von Stahl und Aluminium von einigen hundert Grad hat einen großen Einfluss auf die Strahlungsdichte.

Im Diagramm in Bild 3-73 ist die Strahlungsenergieichte der Planckschen Strahlung bei der Schmelztemperatur von Eisen zu der bei der Schmelztemperatur von Aluminium ins Verhältnis gesetzt. Der Emissionsgrad wurde bei dieser Betrachtung vernachlässigt. Beispielsweise ist bei einer Wellenlänge von 633 nm das Strahlungsdichteverhältnis größer 10^5 . Das bedeutet, dass im Bereich der Schmelzbaderstarung die emittierte Strahlungsdichte des Schmelzbads beim Schweißen von Aluminium 10^5 mal kleiner ist als beim Schweißen von Eisen. Das Strahlungsdichteverhältnis wird jedoch für große Detektionswellenlängen günstiger. So liegt das Strahlungsdichteverhältnis bei 1030 nm bei 10^3 und bei einer Wellenlänge von 3 – 5 μm bereits bei ca. 10. Anzumerken ist allerdings, dass die genannten Werte nur dort gelten, wo das Schmelzbad tatsächlich Schmelztemperatur besitzt. Hin zur Verdampfungstemperatur, also beispielsweise für die kapillarnahe Schmelzzone, werden die Verhältnisse günstiger.

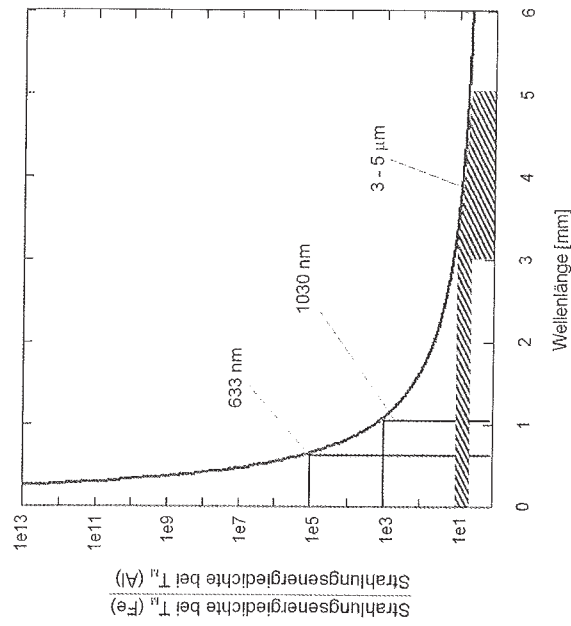


Bild 3-73: Verhältnis der Strahlungsenergiedichte der Planckschen Strahlung bei der Schmelztemperatur von Eisen und der bei der Schmelztemperatur von Aluminium in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Eingezeichnet sind drei verschiedene Detektionswellenlängen [8].

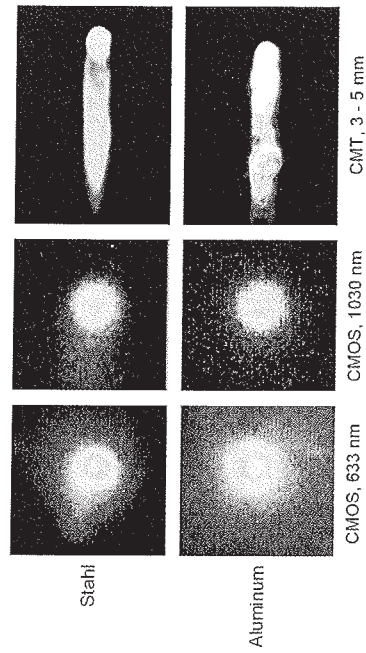


Bild 3-74: Kamerabilder beim Schweißen von Stahl und Aluminium für verschiedene Detektionswellenlängen. Bei den Detektionswellenlängen 633 nm und 1030 nm beträgt die Halbwertsbreite der Interferenzfilter 10 nm [8].

Die Kamerabilder in Bild 3-74 belegen diesen Aspekt. Bei einer Detektionswellenlänge von 633 nm ist die Strahlungsenergiedichte bei der Schmelztemperatur von Stahl und Aluminium jedoch sehr gering. Daher ist in diesem Fall für keines der Materialien ein Schmelzbad sichtbar. Bei einer Detektionswellenlänge von 1030 nm ist im Falle des Stahlschweißens das Schmelzbad gerade sichtbar, beim Schweißen von Aluminium jedoch nicht. Bei einer Wellenlänge von 3 - 5 µm ist das Schmelzbad sowohl beim Schweißen von Stahl, als auch beim Schweißen von Aluminium sichtbar.

Sollten Keyhole und Schmelzbad gleichzeitig mit einer Kamera visualisiert werden, sind also große Detektionswellenlängen vorteilhaft. Dies gilt insbesondere beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen. Doch sind schnelle Thermokameras aufgrund der hohen Kosten und der Baugröße nicht für die industrielle Prozessüberwachung geeignet.

Soll mit Hilfe einer CMOS-Kamera Schmelzbad und Kapillaröffnung gleichzeitig visualisiert werden, ist der nutzbare Spektralbereich also sehr eingeschränkt. Der UV- und sichtbare Spektralbereich ist wegen der hohen Dichte an Emissionslinien und der damit verbundenen Beeinflussung der Intensitätsverteilung ohnehin nicht geeignet. Um nun das Schmelzbad sichtbar zu machen ist es von Vorteil bei größeren Wellenlängen zu detektieren. Der Spektralbereich von CMOS-Kameras reicht jedoch nur bis ca. 1100 nm. Und an dieser oberen Grenze des Spektralbereichs ist die spektrale Empfindlichkeit der Kamera relativ gering. In Bild 3-75 sind einige Kamerabilder dargestellt, die beim Schweißen von Stahl bzw. beim Schweißen von Aluminium mit jeweils den gleichen Schweißparametern, jedoch bei unterschiedlichen Detektionswellenlängen aufgenommen wurden. Jedes der dargestellten Bilder wurde über 600 Aufnahmen gemittelt und auf den gleichen Kontrast umgerechnet. Der Schweißprozess wurde koaxial zum Laserstrahl beobachtet. Schweißrichtung ist jeweils von links nach rechts.

Beim Schweißen von Stahl (Bild 3-75a) ist erkennbar, dass ein kapillarnahes Schmelzbad erst bei Wellenlängen ab 700 nm sichtbar wird. Das sichtbare Schmelzbad vergrößert sich soweit beim gewählten Bildausschnitt zu erkennen, mit der Detektionswellenlänge. Bei einer Detektionswellenlänge von 1030 nm ist allerdings ein starkes Bildrauschen beobachtbar, da in diesem Wellenlängenbereich die spektrale Empfindlichkeit der Kamera bereits sehr gering ist.

Beim Schweißen von Aluminium (Bild 3-75b) ist wegen der geringeren Schmelztemperatur bei keiner der verwendeten Detektionswellenlängen ein Schmelzbad zu beobachten. Auch hier tritt bei einer Detektionswellenlänge von 1030 nm ein starkes Bildrauschen auf.

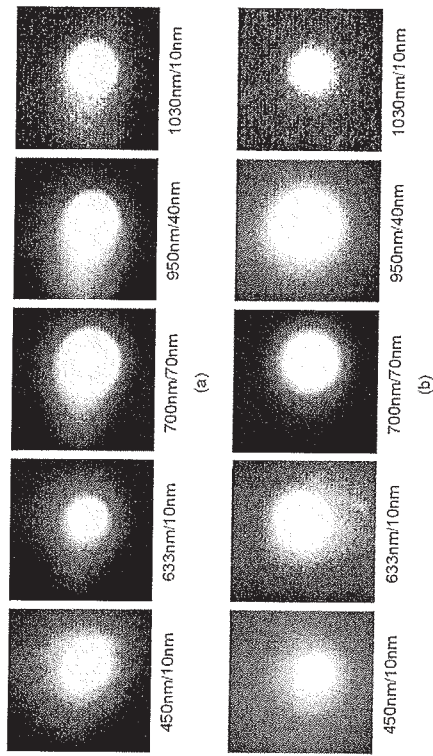


Bild 3-75: Mit unterschiedlichen Detektionswellenlängen generierte und gemittelte Kamerabilder, (a) aufgenommen beim Laserstrahlschweißen von Stahl, (b) von Aluminium [7].

3.2.3.1.3 Ergebnisse

Als beispielhaftes Ergebnis dafür, wie wichtig die Wahl der Detektionswellenlänge ist, soll eine Messung bei Variation der Laserleistung zwischen 2 kW und 4 kW gezeigt werden. Die Leistung wurde während des Schweißprozesses in vier Stufen verändert.

Der Verlauf der Laserleistung ist in Bild 3-76a dargestellt. Während des Schweißens wurde der Prozess mit dem Versuchsaufbau in Bild 3-69 koaxial zum Laserstrahl mit einer CMOS-Kamera aufgezeichnet. Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Detektionswellenlängen zwischen 450 nm und 1030 nm durchgeführt. Aus den Kamerabildern wurde ein Geometriefaktor berechnet, der das Vorhandensein von kapillarmaher Schmelze berücksichtigt. In Bild 3-76b ist der zeitliche Verlauf des Indikators für die verschiedenen Detektionswellenlängen dargestellt. Während bei Detektionswellenlängen von 450 nm und 633 nm keine Korrelation zwischen Indikator und Variation festzustellen ist, ist eine Korrelation bei größeren Detektionswellenlängen, insbesondere bei 1030 nm deutlich zu erkennen.

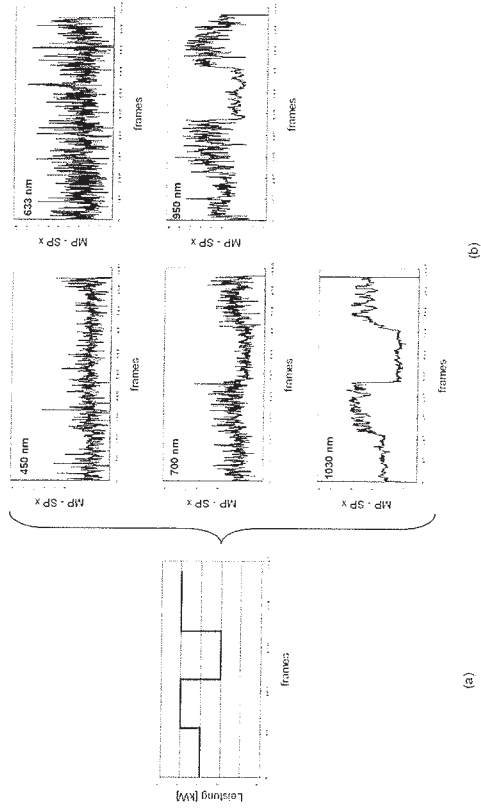


Bild 3-76: Wellenlängenabhängigkeit eines Indikators bei einer Laserleistungsvariation, (a) Verlauf der Laserleistung, (b) aus den Kamerabildern berechneter Geometriefaktor für verschiedene Detektionswellenlängen [7]

3.2.3.2 Realisierung der kamerabasierten Prozessüberwachung im Gesamtsystem

Um den vorausgehenden Untersuchungen zur Wellenlängenabhängigkeit Rechnung zu tragen wurde ein spezieller Filter entwickelt, der es erlaubt, die verschiedenen ROIs mit unterschiedlichen Wellenlängen zu beobachten. Für die Pre- und Postbereiche wurde der Filter als Interferenzfilter für 660 nm ausgelegt, für den In-Prozess Bereich als Interferenzfilter mit einer zentralen Wellenlänge von 950nm. Für Einrichtzwecke kann der Filter auch verschoben werden, so dass eine Beobachtung der Werkstückoberfläche auch ausschließlich bei 660 nm möglich ist. Das Resultat ist in Bild 3-77 dargestellt.

Ein Screenshot einer Aufnahme mit diesem Filter ist in Bild 3-78 dargestellt. In diesem Screenshot wird der Aufbau des optischen Filters mit den Grenzflächen zwischen den einzelnen Transmissionsbereichen deutlich.

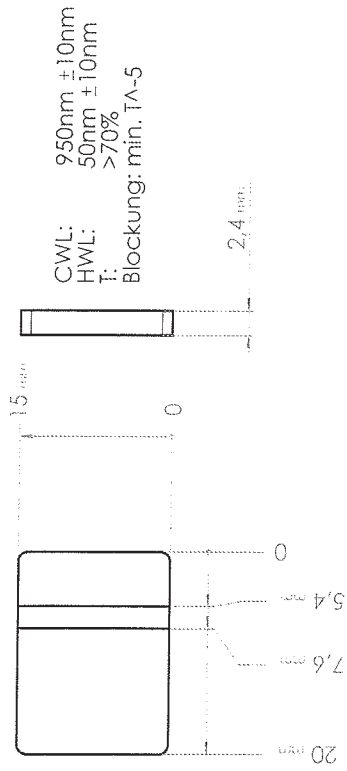


Bild 3-77: Optischer Filter für das INESS Projekt zur Wellenlängenselektion.

Während der Projektlaufzeit wurde zusätzlich evaluiert, ob sich eine Veränderung der Ergebnisse aus der Bildverarbeitung ergibt, wenn auch der In-Prozess Bereich bei der Wellenlänge 660 nm beobachtet wird. Die Verwendung dieser Wellenlänge und damit die Verwendung eines einzigen Filters vor der CMOS-Kamera hat einige systembedingte Vorteile. Wichtig ist hier die Beschichtung auf den optischen Komponenten des Bearbeitungskopfes. Eine Optimierung der strahlführenden Komponenten für zwei Wellenlängenbereiche ist nur sehr aufwendig zu realisieren. Ein Vergleich der Emissionen aus dem Schmelzbad und aus der Metalldampfackel ist in Bild 3-78 schematisch dargestellt.

Aus der schematischen Darstellung in Bild 3-78 folgt, dass der Einfluss des Metalldampfes im Verhältnis zu der Emittivität der Schmelzbadstrahlung zunimmt. Bei einer Änderung der Detektionswellenlänge von 950 nm auf 660 nm könnte somit das Metalldampfleuchten die Detektion der Schmelzbadgeometrien massiv beeinflussen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass der zusätzlich störende Einfluss des Metalldampfes durch die Optimierung der Bildverarbeitung weitgehend eliminerbar ist.

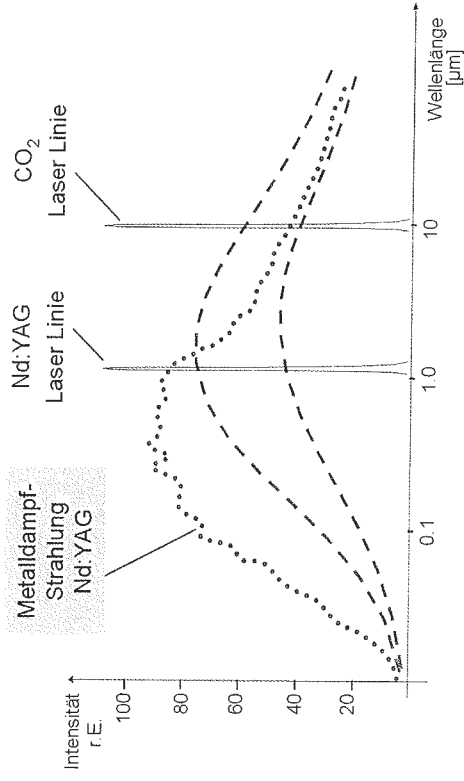


Bild 3-78: Schematische Darstellung der Prozessmissionen beim Schweißen mit Nd:YAG-Laser; gestrichelte Linien repräsentieren Schmelzbasemissionen bei unterschiedlichen Temperaturen, gepunktete Linie repräsentiert die Metalldampfstrahlung.

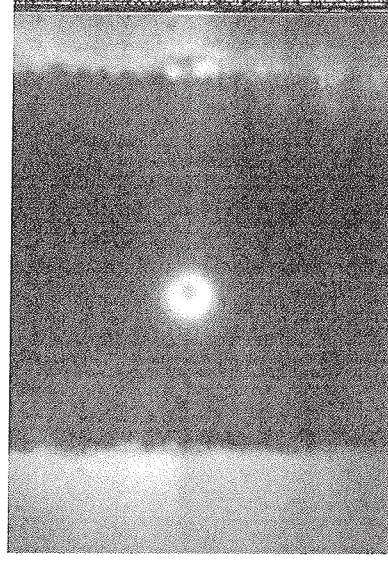


Bild 3-79: Screenshot der Kamera durch den INESS-Filter während einer Blindschweißung.

3.2.3.3 Kehlnaht am Überlappstoß

Die Nahtgeometrie Kehlnaht am Überlappstoß mit Blechstärken zwischen 0.6 mm und 1.5 mm ist weit verbreitet im Karosserierohbau. Beispielhaft ist diese Nahtgeometrie in Bild 3-80 dargestellt.

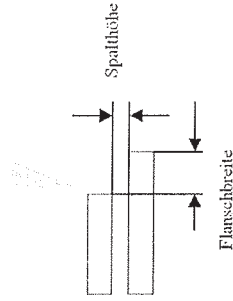


Bild 3-80: Schematische Darstellung einer Kehlnaht am Überlappstoß.

Ziel der Auswertung der Strahlungsintensität ist es, eine auf die Nahtgeometrie und nicht auf das Material bezogene Strategie zu entwickeln. Für die Beschreibung der Herangehensweise an diese Nahtgeometrie und die Erarbeitung der Algorithmen für die Bildverarbeitung findet jedoch eine Beschränkung auf Stahlbleche statt. Auf weitere Materialkombinationen im Bereiche der Stahlbleche wird nicht weiter Bezug genommen, da für die Algorithmen damit kein weiterer Informationsgewinn verbunden ist.

Bei der Bearbeitung dieser Nahtgeometrie können eine ganze Reihe von potenziellen Nahtunregelmäßigkeiten auftauchen, die durch Analyse der Informationen aus dem Sensorsystem erkannt werden sollen.

Die zu detektierenden Bearbeitungsfehler in diesem Anwendungsfall lauten im Einzelnen:

- Fehlende Nahtlänge
- Bundefehler
- Nahtunterwölbung
- Ungenügende Durchschweißung
- Riss

Beispiel zu den genannten Fehlern sind anhand von Screenshots in Bild 3-81 dargestellt.

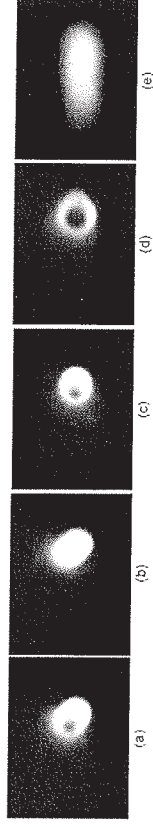


Bild 3-81: Momentaufnahmen der keyholenahen Schmelze beim Schweißen einer Kehlnaht am Überlappstoß. näher erläuterten im Text.

Der Screenshot (a) aus Bild 3-81 repräsentiert einen IO-Prozess, bei (b) ist die Durchschweißung ungenügend, (c) zeigt einen Bundefehler aufgrund einer Fehlpositionierung auf das Oberblech und (d) entspricht einer Fehlpositionierung auf das Unterblech. Der Screenshot aus (e) zeigt die Situation Riss oder Schneidfall.

Neben der elliptischen Deformierung der keyholenahen Schmelze taucht ein weiterer Effekt auf, der sich für die kamerabasierte Überwachung als wichtiges Kriterium erweisen hat. In den Abbildungen (a), (c) und (d) erscheint ein Intensitätsminimum. Diese lokale Erscheinung symbolisiert, dass eine vollständige Durchschweißung stattgefunden hat. Unglücklicherweise ist der Umkehrschluss nicht immer zulässig, das heißt, ein fehlendes Minimum bedeutet nicht zwangsläufig eine fehlerhafte Durchschweißung.

Die Auswertung dieser Applikation kann schematisch durch die Darstellung in Bild 3-82 beschrieben werden.

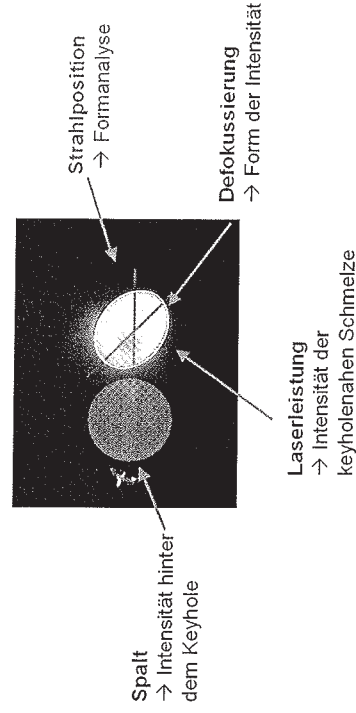


Bild 3-82: Auswertestrategie bei der Applikation Kehlnaht am Überlappstoß.

Es wird deutlich, dass hier eine Auswertung relativ zu der Schweißrichtung stattfinden muss, damit entsprechend Abweichungen der Form evaluiert werden können. Der Vorteil des Ansatzes im INESS-Projekt liegt auch darin, dass durch die Beobachtungen aus der

vorgelagerten Nahtverfolgung eine eindeutige Information über die Schweißrichtung vorliegt und damit eine Verkippung der Schmelzbadform in Relation zu der Schweißrichtung einfach erfolgen kann. Ausgehend von einer optimal funktionierenden Nahtverfolgung kann gesagt werden, dass die Fehlpositionierung des Laserstrahles und damit die Fehlerbilder (c) und (d) aus Bild 3-81 nicht mehr auftauchen.

3.2.3.4 I-Naht am Überlappstoß

Für die Bewertung der Nahtqualität beim Schweißen einer I-Naht am Überlappstoß gelten in Bezug auf die Emissionen aus der Wechselwirkungszone grundsätzlich die gleichen Voraussetzungen, wie bei der Kehlnaht (siehe Bild 3-80). Natürlich kann auch hier die Unterscheidung zwischen Stahl- und Aluminiumblechen vorgenommen werden, bei der Beschreibung der Ansätze für die Bildverarbeitung findet hier jedoch eine Beschränkung auf beschichtete Stahlbleche statt.

Im Gegensatz zur Kehlnaht am Überlappstoß ist eine elliptische Deformierung der keyhole-nahen Schmelze nicht zu erwarten, da diese aus den unterschiedlichen Blechstärken bei der Kehlnaht resultiert. Der Ansatz für die Bildverarbeitung ist somit die Beobachtung der Effekte im Nachlauf zur Wechselwirkungszone und natürlich die Wechselwirkungszone selbst.

Wenn verzinkte Bleche im sogenannten Überlappstoß verschweißt werden sollen, müssen in jedem Fall Vorkehrungen zur Sicherung der Qualität der Schweißnaht getroffen werden. Die Verdampfungstemperatur von Zink ist geringer als die Schmelztemperatur von Stahl. Der expandierende Zinkdampf kann somit auch Auswürfe und Krater verursachen. Deshalb müssen verzinkte Bleche in dieser Nahtgeometrie mit einem Fügspalt verschweißt werden, was in der Praxis einen hohen Fertigungsaufwand hervorruft. Eine Variation dieses Fügspaltes hin zu großen Spaltmaßen führt zwangsläufig zu einem Nahtemfall in der resultierenden Schweißnaht.

Eingehende Untersuchungen haben gezeigt, dass sich im Nachlauf zum Keyhole Effekte zeigen, die zum einen auf die Qualität der Anbindung zwischen den Blechen schließen lassen, zum anderen auch Defekte in der Naht, wie z.B. Nahtemfall zeigen.

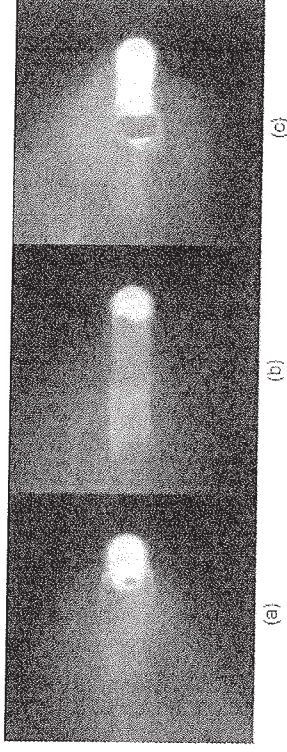


Bild 3-83: Beispielhafte Screenshots von typischen Schweißsituationen, (a) IO-Prozess, (b) Schnittspalt, (c) Nahtemfall.

Das lokale Minimum in den Momentaufnahmen in Bild 3-83 repräsentiert den Zustand der vollen Durchschweißung, womit ein eindeutiger Anhaltspunkt für die Bildverarbeitung gegeben ist. Einschränkung muss hier erwähnt werden, dass ein fehlendes, lokales Minimum auch gleichzeitig den Verlust der vollen Durchschweißung repräsentiert. Weiterhin wird hier klar, dass auch bei der I-Naht am Überlappstoß eine Auswertung nur in Schweißrichtung erfolgen kann. Die in diesem Projekt erarbeiteten Algorithmen führen, ähnlich wie bei anderen Nahtgeometrien, zu einer Liste von Bearbeitungsfehlern, die durch kamerabasierte Technik sensorisch erfassbar sind:

- Überwachung der Schweißposition (Nähe zur Bauteilkante)
- Spaltdetektion (0 – 50% der oberen Blechstärke)
- Locherkennung durch Spaltvariation
- Überwachung der Fokusslage (Fokus Laser, Fokus Kamera, Schmauch, Verschmutzung)

Speziell bei dieser Nahtgeometrie existiert ein Bearbeitungsfehler, der *Falscher Freund* genannt wird und der für die Fertigung ein großes Problem darstellt. Dieser Fehler tritt dann auf, wenn das Spaltmaß zwischen den Blechen einen für einen bestehenden Prozess festen Wert überschreitet. Dieser Wert des Fügspaltes hängt unter anderem von der Blechstärke, Bearbeitungsgeschwindigkeit und der Qualität der Strahlquelle ab. Das Resultat des zu großen Spaltes ist eine fehlende Verbindung zwischen den Fügpartnern, trotz einer vollständigen Durchschweißung. Dieses Fehlerbild ist durch eine kamerabasierte Sensorik nur schwer zu detektieren, da auch hier während der Bearbeitung ein nahezu optimaler Schweißvorgang vorliegt.

Im INESS-Projekt hat sich hier die Verwendung von Kamera- und Photiodioden-Sensorik als optimale Kombination herausgestellt. Gerade beim *Falschen Freund* sind die Informa-

tionen aus den photodiodenbasierten Sensoren die Grundlage für die Detektion dieses Fehlerbildes.

3.2.4 Kamerabasierte Auswertung der reflektierten Laserstrahlung

In vorangegangenen Versuchen zur Detektion der rückreflektierten Laserstrahlung mit Einzeldetektoren beim Schweißen von Stahlwerkstoffen konnte durch Versuche mit unterschiedlichen Detektorpositionen eine von den Nahtdefekten abhängige Richtungsverteilung der reflektierten Laserstrahlung nachgewiesen werden [6]. Darüber hinaus konnte als Ergebnis von Simulationsrechnungen allgemein die Abhängigkeit der Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung von der Kapillargeometrie beim Schweißen gezeigt werden.

Im Projekt sollte diese Richtungsabhängigkeit der reflektierten Laserstrahlung ortsauflöst gemessen werden, um über die Verteilung der Leistungsdichte der reflektierten Laserstrahlung Anschluss über Nahtdefekte und die Einschweißtiefe zu erhalten. Im wesentlichen sollen die folgenden aus der Simulationsrechnung resultierenden Zusammenhänge experimentell nachgewiesen werden:

- Mit zunehmendem Schachtverhältnis der Kapillare findet eine Bündelung der reflektierten Laserstrahlung statt. In Bild 3-84 ist dieser Zusammenhang als Ergebnis der Simulationsrechnung dargestellt.
- Da bei einem Schmelzauswurf der Durchmesser der Kapillare zunimmt, verringert sich das Schachtverhältnis der Kapillare. Dadurch vermindert sich die bündelnde Wirkung der Kapillare und die gesamte reflektierte Laserstrahlung nimmt zu.
- Mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit erhöht sich die Kapillarméigung. Dadurch verlagert sich der Schwerpunkt der reflektierten Laserstrahlung in Schweißrichtung.

Beim Schweißen von Stahl und Aluminium werden verschiedene Versuche durchgeführt, um die Kapillargeometrie zu beeinflussen. D.h. zur Beeinflussung der Kapillartiefe wird mit unterschiedlichen Laserleistungen geschweißt. Dabei wird die Vorschubgeschwindigkeit gering gehalten, um den Effekt der Kapillarméigung zu minimieren, der bei höheren Schweißgeschwindigkeiten auftritt. Die Richtungsabhängigkeit der reflektierten Laserleistung in Abhängigkeit von der Kapillarméigung wird bei Schweißungen mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten untersucht. Schließlich werden noch Versuche durchgeführt, um die reflektierte Laserleistung beim Auftreten von Auswürfen zu untersuchen.

Hierzu wird auswurfanfälliges Material geschweißt, wie verzinktes Stahlblech oder magnesiumreiche Aluminiumlegierungen.

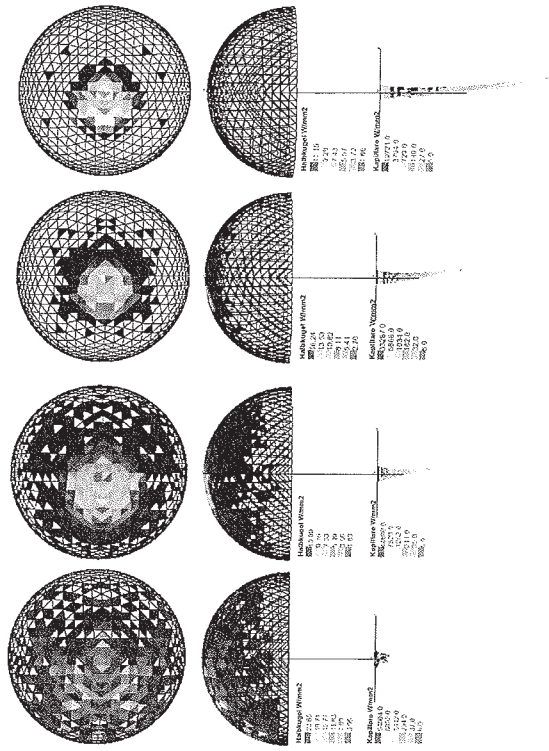


Bild 3-84: Ergebnisse der Simulationsrechnung: Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung in Abhängigkeit vom Schachtverhältnis der Kapillare [6].

3.2.4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau zur Messung der Richtungsabhängigkeit der reflektierten Laserstrahlung ist in Bild 3-85 dargestellt. Hierbei wird die von der Kapillare ausgehende reflektierte Laserstrahlung von der Laseroptik kollimiert. Dieser kollimierte Strahl wird durch zwei aufeinander folgende Teleskope verkleinert und auf die Kamera projiziert. Im Parallelstrahl zwischen den beiden Teleskopen sind ein schmalbandiger Interferenzfilter für die Laserwellenlänge und ein Dichtefilter zur Intensitätsabschwächung angeordnet.

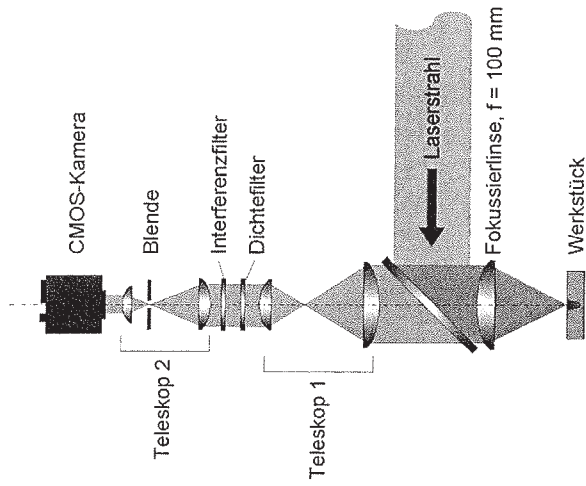


Bild 3-85: Versuchsaufbau für die Messung der Richtungsabhängigkeit der reflektierten Laserstrahlung.

Der Abbildungsmaßstab ist so gewählt, dass die Kamerabilder eine Auflösung von 160×160 Pixel aufweisen und eine Bildfolgefrequenz von 1000 Hz möglich ist. Bei Verwendung einer Fokussieroptik mit der Brennweite $f = 100$ mm kann die aus der Kapillare reflektierte Laserstrahlung bis zu einem Abstrahlwinkel von $28,3^\circ$ detektiert werden. Begrenzt wird der Detektionswinkel durch die Apertur der Fokussieroptik.

3.2.4.2 Auswertung

Da die detektierte Leistungsdichteverteilung eine hohe Dynamik aufweist, werden zunächst zeitliche Mittelwerte der Kamerabilder betrachtet. In Bild 3-86 ist beispielhaft solch ein gemitteltes Kamerabild dargestellt. Zudem ist das über den Auswertebereich gemittelte Intensitätsprofil dargestellt. Hier ist die Maximalintensität der reflektierten Laserstrahlung zu kleineren Pixelwerten, also entgegen der Schweibrichtung verschoben.

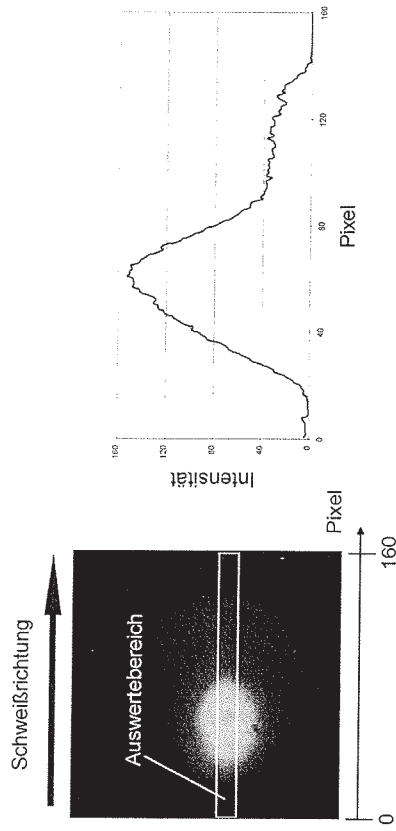


Bild 3-86: Gemitteltes Kamerabild mit Darstellung des Intensitätsprofils.

3.2.4.3 Ergebnisse

3.2.4.3.1 Beeinflussung der Kapillareigung

In Bild 3-87 sind die Linienprofile der reflektierten Laserstrahlung für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten beim Schweißen von Aluminium mit der Laserleistung $P = 2$ kW dargestellt. Da sich mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit das Schachtverhältnis der Dampfkapillare verkleinert, erhöht sich die Intensität der reflektierten Laserstrahlung. Dementsprechend vergrößert sich in den Intensitätsprofilen in Bild 3-87 mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit der Wert des Intensitätsmaximums.

Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit nimmt die Neigung der Dampfkapillare beim Laserstrahlschweißen zu. Entsprechend den Ergebnissen der Simulationsrechnung führt dies zu einer Verlagerung des Schwerpunkts der reflektierten Laserleistung in Vorschubrichtung. Wie in Bild 3-87 zu sehen ist kann dieses Ergebnis experimentell nicht bestätigt werden. Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ist eine Verlagerung des Intensitätsmaximums entgegen der Vorschubrichtung zu erkennen.

82

3 Untersuchung von Teillösungen

83

Line graph showing intensity profiles for different cutting speeds at $P = 2 \text{ kW}$. The x-axis is labeled 'Pixel' with values 1, 80, and 159. The y-axis is labeled 'Intensität' with values 0, 40, 80, 120, and 160. Four curves are shown for different cutting speeds v :

- $v = 13 \text{ m/min}$ (solid line)
- $v = 9 \text{ m/min}$ (dashed line)
- $v = 5 \text{ m/min}$ (dotted line)
- $v = 1 \text{ m/min}$ (dash-dot line)

Bild 3-87: Intensitätsprofile der reflektierten Laserleistung bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit (Material AA6082, $P = 2 \text{ kW}$).

3.2.4.3.2 Beeinflussung des Schachtverhältniss

Bild 3-88 zeigt beispielhaft die Intensitätsprofile der reflektierten Laserleistung beim Schweißen von Stahl mit unterschiedlichen Laserleistungen und der Vorschubgeschwindigkeit $v = 2 \text{ m/min}$. Es ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Intensitätsmaximum und der Laserleistung zu erkennen. Entsprechend der Simulationsrechnung kommt es infolge des größeren Schachtverhältnisses bei höheren Laserleistungen zu einer Bündelung der reflektierten Laserstrahlung (vgl. Bild 3-84). Dieser Zusammenhang lässt sich experimentell nicht nachweisen.

Line graph showing intensity profiles for different laser powers at $v = 2 \text{ m/min}$. The x-axis is labeled 'Pixel' with values 1, 80, and 159. The y-axis is labeled 'Intensität' with values 0, 20, 40, and 60. Four curves are shown for different laser powers P :

- $P = 1.0 \text{ kW}$ (solid line)
- $P = 1.5 \text{ kW}$ (dashed line)
- $P = 2.0 \text{ kW}$ (dotted line)
- $P = 2.5 \text{ kW}$ (dash-dot line)

Bild 3-88: Intensitätsprofile der reflektierten Laserleistung bei Variation der Laserleistung (SIS2, $v = 2 \text{ m/min}$).

3.2.4.3.3 Auswürfe

Aufgrund der großen Fluktuationen der Intensitätsverteilung in den Kamerabildern ist keine eindeutige Zuordnung zwischen den Intensitätswerten der reflektierten Laserleistung und Auswurffänomenen möglich.

3.2.4.4 Zusammenfassung

Mit Hilfe der CMOS-Kamera PhotonFocus MV-D1024-80CL wurden Experimente zur Untersuchung der Richtungsabhängigkeit der reflektierten Laserstrahlung durchgeführt. Die aus Simulationsrechnungen bekannten Zusammenhänge zwischen der Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung und der Geometrie der Dampfkapillare konnten mit diesen Experimenten nicht nachgewiesen werden.

Da die Messung der reflektierten Laserstrahlung durch die Fokussieroptik erfolgt (vgl. Bild 3-85), ist der maximale Detektionswinkel durch die Apertur dieser Optik begrenzt. Bei großen Winkeln treten Reflexionserscheinungen auf, wie sie das Kamerabild in Bild 3-89 zeigt. Diese Reflexionserscheinungen erschweren die Interpretation der Bilder.

Camera image showing two bright spots with surrounding reflections, illustrating the effect of a large emission angle on the reflected laser radiation.

Bild 3-89: Gemitteltetes Kamerabild bei großem Abstrahlwinkel der reflektierten Laserstrahlung.

Um die Richtungsabhängigkeit der reflektierten Laserstrahlung in einem größeren Winkelbereich untersuchen zu können, wurde eine spezielle Fokussierlinse für die Nd:YAG-Laserstrahlung mit einer Brennweite von $f = 42 \text{ mm}$ berechnet. Damit lässt sich die reflektierte Laserstrahlung bis zu einem Abstrahlwinkel von ca. 50° detektieren. Mit der neu ausgelegten Fokussieroptik konnte jedoch einerseits aufgrund von Abbildungsfehlern der theoretisch mögliche Fokussierdurchmesser nicht erreicht werden, andererseits zeigten sich in den Kamerabildern starke zeitliche Fluktuationen der Leistungsdichteverteilung, wodurch eine Interpretation der Bilder nicht möglich war. Die aus Simulationsrechnungen bekannten Zusammenhänge zwischen der Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung

lung und der Geometrie der Dampfkapillare konnten auch mit der neu ausgelegten Optik nicht nachgewiesen werden.

Das untersuchte Verfahren, die Untersuchung der Richtungsabhängigkeit der reflektierten Laserstrahlung, ist für die industrielle Prozessüberwachung zumindest in der ursprünglich geplanten Ausführung nicht einsetzbar. Einerseits zeigt sich der Versuchsaufbau aufgrund der langen optischen Wege extrem empfindlich gegen Dejustage. Andererseits macht die große Dynamik in der Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung eine Auswertung insofern sie keine Mittelung vornimmt, unmöglich.

3.3 Post-Prozessmethoden

3.3.1 Entwicklung eines axial messenden Topometers

Das Ziel des Teilprojektes war die Entwicklung eines optischen Sensors zur Topografievermessung bei der Verschweißung von Werkstücken. Die 3D-Topografie von Schweißnähten soll unmittelbar nach dem Schweißvorgang gemessen werden, um mehr Informationen für eine sichere Erkennung der Defekte zu bekommen. So können Veränderungen im Schweißprozess rechtzeitig erkannt und weitere Defekte vermieden werden.

3.3.1.1 Auswahl eines geeigneten Messverfahrens

Für die Untersuchung der Fehler an Laserschweißnähten wurden drei Verfahren für ein axial messendes Topometer ausgewählt, die näher untersucht wurden. Es sind dies die mikroskopische Streifenprojektion, die konfokale Mikroskopie und die Weißlichtinterferometrie. Im folgenden werden die Verfahren und die verwendeten Versuchsaufbauten kurz vorgestellt, bevor die Ergebnisse bewertet und das am besten geeignete Verfahren hieraus abgeleitet wird.

3.3.1.1.1 Klassische Streifenprojektion

Bei der klassischen Streifenprojektion werden ein oder mehrere Gitter mit einer festen Frequenz auf die zu untersuchende Probe projiziert. Hierbei wird ein Triangulationswinkel zwischen der Beleuchtungsrichtung und der Beobachtungsrichtung eingestellt. Auf diese Weise sind die Streifen in der Beobachtungsrichtung durch die Topografie "deformiert" und werden mit Bildverarbeitungsmethoden ausgewertet [12]. Die Auflösung der Streifenauswertung erreicht $\lambda/100$, wobei λ als Wellenlänge die effektive Wellenlänge benutzt wird.

Bei der Streifenprojektion finden vorwiegend die Phasenschiebemethoden Anwendung. Das Gitter wird zwischen zwei Aufnahmen lateral um $1/4$ seiner Periode verschoben. Die Bewegung kann schrittweise zwischen den Aufnahmen erfolgen. Im letzten Fall wird die

Geschwindigkeit durch die Kamera festgelegt. Da sich die Schweißproben in der Größenordnung von 20 mm/s bewegen, muss die Bildaufnahmefrequenz der Kamera entsprechend der lateralen Auflösung, die hierbei mindestens 10 μ m betragen soll, angepasst werden.

Die aufgenommenen Streifenbilder besitzen unterschiedliche Phasenlagen. Mit Hilfe von optimierten Algorithmen zur Phasenbestimmung wird daraus die Topografie ermittelt. Wird nur eine einzige Gitterperiode verwendet, so sind die Messungen mehrdeutig. Die Topografie wird mit Hilfe so genannter Phase-unwrapping-Algorithmen rekonstruiert. Hierbei werden 2π -Sprünge sukzessive eliminiert. Dieser Prozess birgt einige Risiken, da aufgrund fehlerhafter Phasenwerte Sprünge nicht erkannt oder fehlerhafter Weise errechnet werden. Abhilfe schaffen hier die Verfahren mit Gray-Code [13,14] oder die Multiwellenlängenverfahren [15].

3.3.1.1.2 Die mikroskopische Streifenprojektion

Die mikroskopische Streifenprojektion ist ein triangulationsbasiertes Messverfahren. Verschiedene Realisierungsvarianten sind hierbei möglich. Es wurde ein Aufbau, basierend auf einem Zoom-Stereomikroskop [16], für diese Messaufgabe, s.a. Bild 3-90, ausgewählt, angepasst und mit Schweißproben getestet.

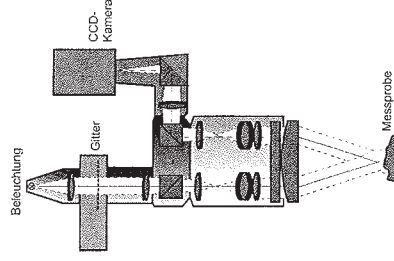


Bild 3-90: Schema des verwendeten Streifenprojektion-Versuchsaufbaus.

Als Lichtquelle wurde eine 100 W-Halogen-Lampe verwendet, deren Licht über ein Glasfaserbündel mit 4 mm Durchmesser zum Sensor geleitet wurde. Das Licht wird zunächst kollimiert und passiert anschließend ein Transmissionsgitter, das auf einem rechnergesteuerten x-Positioniertisch befestigt ist.

Das Gitter wird durch einen Strahlengang des MZ-12 Zoom-Stereomikroskops auf die Prüflingsfläche abgebildet. Über den zweiten Strahlengang wird die Szene mit einer CCD-Kamera beobachtet. Sowohl das Beleuchtungs- als auch das Beobachtungsstrahlenbündel passieren das gleiche Zoom-Objektiv. Die Kamera detektiert so immer die gleiche Gitterperiode. Allerdings ändert sich die Tiefen-Empfindlichkeit mit der Zoomstellung. Die Bilder der CCD-Kamera werden mit einer Bildspeicherkarte digitalisiert und im PC ausgewertet.

3.3.1.1.3 Konfokale Mikroskopie

Die konfokale Topografie-messung hat sich besonders in der Mikroskopie als robustes und zuverlässiges Messverfahren bewährt [17-19].

Bei der konfokalen Detektion wird zur Beleuchtung eine Punktlichtquelle in eine bestimmte Entfernung in den Messraum abgebildet. Mit diesem Fokus wird der gesamte Messraum in allen drei Dimensionen abgetastet. Zur Detektion wird der Fokus wiederum auf eine Blende abgebildet, hinter der ein Detektor angeordnet ist (siehe Bild 3-91).

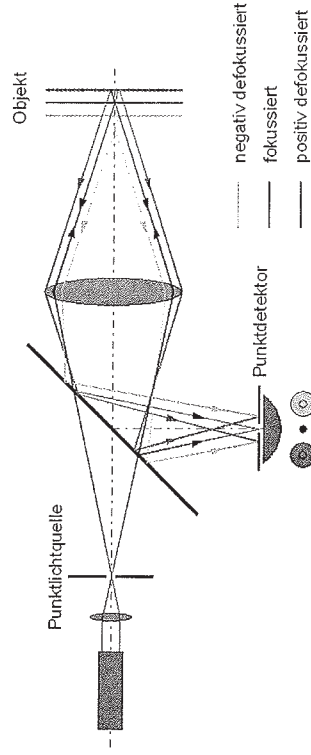


Bild 3-91: Funktionsweise des konfokalen Punktsensors.

Befindet sich eine reflektierende Objektfläche an der Position des Fokus, wird dieser scharf auf die Blende abgebildet und der Detektor registriert eine hohe Intensität. Befindet sich die Objektfläche etwas zu nah oder etwas zu weit entfernt, wird zum einen ein größerer Bereich beleuchtet und zum anderen ist auch die Abbildung dieser Fläche auf die Blende defokussiert. In diesen Fällen gelangt nur wenig Licht durch die Blende auf den Detektor und es wird entsprechend wenig Intensität registriert. In Bild 3-91 ist der defokussierte Lichtfleck in der Blendenebene durch die Flächen unterhalb des Detektors dargestellt. Der kleinere Kreis in der Mitte dieser Flächen stellt die Größe des Lochs der Blende dar.

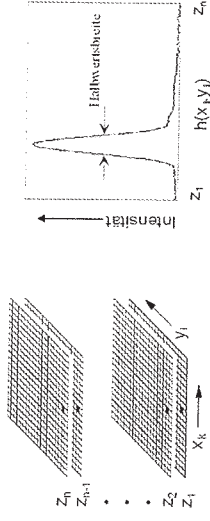


Bild 3-92: Konfokale Signalgewinnung und typisches konfokales Signal.

Das Signal setzt sich aus mehreren Messungen Z_n in verschiedenen Höhen zusammen. In Bild 3-92 ist links ein derartiger Stapel aus Höhenschnitten schematisch dargestellt. Reduziert man für kürzere Messzeiten die Anzahl der gemessenen Höhen, erhält man entsprechend nur wenige Werte auf der in Bild 3-92 rechts dargestellten Kurve. Der Wert der Halbwertsbreite hängt von mehreren Faktoren ab: der Wellenlänge des verwendeten Lichtes, dem Durchmesser der Detektionsblende und dem Winkel, den die Randstrahlen des fokussierten Lichtes zur optischen Achse besitzen [20,21]. Für eine unendlich kleine Detektionsblende lautet die Formel der Halbwertsbreite:

$$HWB = \frac{0,90 \cdot \lambda}{NA \cdot f} \quad (3)$$

Die Anwendungen konfokaler Flächensensoren reichen vom mikroskopischen Bereich mit Messfeldern im Millimeterbereich bis zu Messaufgaben mit Messfeldern im Zentimeterbereich. Eine lichteffiziente Umsetzung kann durch die Verwendung von Mikrolinsen realisiert werden [22-24]. Dabei haben sich zwei verschiedene Ansätze bewährt.

Die erste Variante verwendet eine rotierende Scheibe mit auf Spiralbahnen angeordneten Mikrolinsen [25]. Ein exemplarischer Aufbau ist in Bild 3-93 dargestellt.

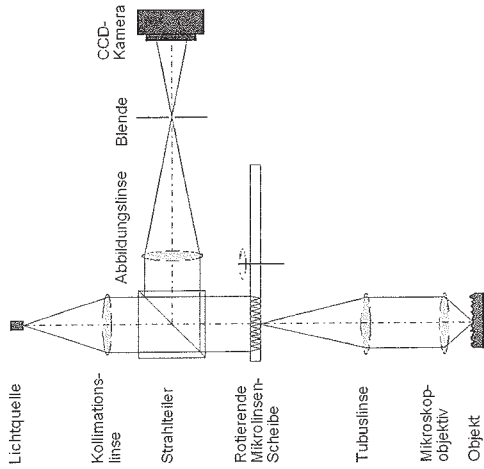


Bild 3-93: Konfokales Mikroskop mit rotierender Mikrolinsenscheibe.

Auf der Mikrolinsenscheibe werden gleichzeitig mehrere hundert Mikrolinsen zur Detektion verwendet, die zur optimalen Ausnutzung der Beleuchtung lückenlos die gesamte betrachtete Fläche abdecken. Durch die Rotation der Mikrolinsenscheibe wird das gesamte Bildfeld sehr gleichmäßig und schnell abgetastet. Jedes Teilsystem aus Beleuchtung, einzelner Mikrolinse, Detektionsblende und Kamerapixel bildet für sich einen konfokalen Punktsensor.

Die zweite Variante verwendet in einem regelmäßigen Gitter angeordnete statische Mikrolinsen [22] (siehe Bild 3-94). In diesem Fall ist die laterale Auflösung zunächst gleich dem Abstand der Mikrolinsenzentren. Die Bezeichnung „statisches Mikrolinsen-Array“ bezieht sich darauf, dass keine laterale Bewegung während der Messung durchgeführt wird. Eine Verbesserung der lateralen Auflösung kann man dadurch erreichen, dass mehrere Messungszentren lateral verschoben sind, wobei die Messfelder um einen Bruchteil des Abstandes der Mikrolinsenzentren lateral verschoben sind. Aus den einzelnen Messungen geringer lateraler Auflösung kann man damit eine hochaufgelöste Messung zusammensetzen.

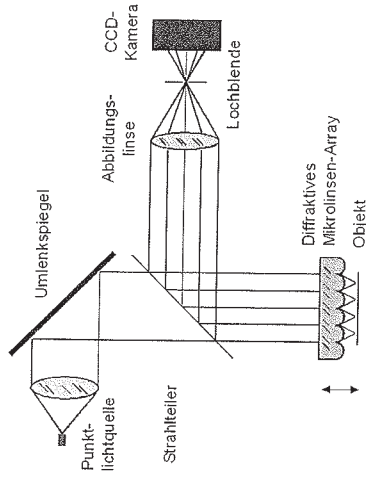


Bild 3-94: Konfokaler Sensor mit statischem Mikrolinsen-Array.

3.3.1.1.4 Weißlichtinterferometrie

Die Weißlichtinterferometrie (WLI) stellt wie die konfokale Mikroskopie ein tiefendiskriminierendes Verfahren dar [26-28]. Jedoch wird die Tiefendiskriminierung nicht durch die numerische Apertur, sondern durch die spektrale Bandbreite der Lichtquelle bestimmt. Je größer die Halbwertsbreite desto geringer wird die Kohärenzlänge und desto besser wird die Tiefendiskriminierung.

Die Kohärenzlänge berechnet sich aus

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \quad (4)$$

wobei λ die mittlere Wellenlänge ist und $\Delta\lambda$ die spektrale Bandbreite beschreibt.

Ein experimentell gewonnenes WLI-Korrelogramm ist in Bild 3-95 dargestellt. Wird eine Messung mit hoher Bildwiederholrate durchgeführt, so kann eine spektral breitbandige Lichtquelle verwendet werden (z.B. eine Xe-Hochdrucklampe). Wird dagegen eine größere Kohärenzlänge benötigt, so sind entweder zusätzliche Interferenzfilter einzusetzen, was die Lichtmenge erheblich reduziert, oder es ist eine entsprechend weniger breitbandige Laserlichtquelle zu verwenden (z.B. ein Kurzpuls-Laser). Die Kosten für Kurzpuls-Laser sind sehr hoch.

Für die ersten Untersuchungen wurde ein Linnik-Interferenz-Aufbau mit konventionellen Mikroskop-Objektiven gemäß Bild 3-96 verwendet, in dem eine Halogenlampe mit 100 W elektrischer Leistung eingesetzt wurde. Die Probe wurde mit Hilfe eines Piezo-Verstellers verschoben, der mit Hilfe kapazitiver Sensoren geregelt wurde. Der Scanbereich des

Piezos reichte für die meisten Proben nicht aus. Trotzdem lässt sich die Signalbildung mittels Handverstellung über den gesamten Tiefenbereich kontrollieren.

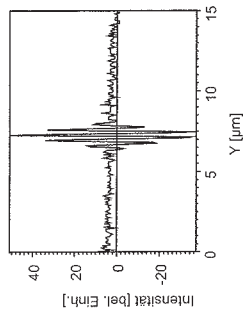


Bild 3-95: Korrelogramm eines WLI-Signals einer Halogenlampe.

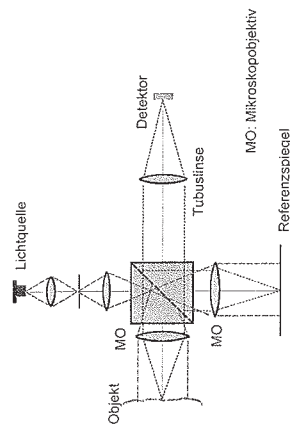


Bild 3-96: Schematischer Aufbau des verwendeten Weißlichtinterferometers.

3.3.1.2 Bewertung der Messergebnisse

Als Probensatz stand eine größere Anzahl unterschiedlicher Schweißnähte der Fa. Robert Bosch GmbH in Schweißbedingungen zur Verfügung. Diese wurden soweit möglich mit verschiedenen Sensoren erfasst.

3.3.1.2.1 Mikroskopische Streifenprojektion

Die Ergebnisse der mikroskopischen Streifenprojektion sind aussagefähig. Die Technik ist dem Laser-Lichtschnittverfahren sehr ähnlich, aber es wird in diesem Fall mit inkohärenter Beleuchtung gearbeitet. Durch die Phasenschiebung können genauere Ergebnisse erzielt werden. Es konnten bei allen Proben die auffälligen Stellen erkannt werden. Aufgrund des eingeschränkten Eindeutigkeitsbereiches können Vertiefungen mitunter auch als Erhöhungen falsch interpretiert werden. Teilweise reicht die Dynamik der Kamera nicht aus, um an allen Bereichen der Oberfläche einen genügenden Streifenkontrast zu bekommen. Daher sind die Defekte oft bereits als weiße Flecken in der Topografie sichtbar. D.h. der Kontrast

3 Untersuchung von Teillösungen

kann als zusätzlicher Indikator herangezogen werden. Es zeigte sich, dass in den Bereichen, die keine Defekte aufweisen i.A. keine Fehlbereiche auftreten.

Eine Realisierung eines Sensors auf dieser Basis erfordert im wesentlichen folgenden Entwicklungsaufwand: Für einen robusten Industrieinsatz ist zum einen ein schnelles Autofokus-System zu entwickeln, das ermöglicht, dass der Sensor in seiner optimalen Fokusebene arbeitet. Ferner ist das Konzept auf bewegte Oberflächen zu erweitern und die Auswerterroutinen sind bezüglich der Geschwindigkeit noch zu erhöhen.

3.3.1.2.2 Konfokale Mikroskopie

Mit dem konfokalen Mikroskop mit rotierender Mikrolinsenscheibe konnten ebenfalls alle vorliegenden Proben gut gemessen werden. Es zeigte sich eine hohe Übereinstimmung zu den Ergebnissen der Streifenprojektion. Grundsätzlich sind die Messungen mit der konfokalen Mikroskopie weniger verrauscht. Allerdings zeigten sich auch größere Bereiche, bei denen die Lichtmenge unterhalb der eingestellten Schwelle lag. Diese Problematik verschärft sich noch, wenn mit einer geringeren Apertur als 0,4 gemessen wird. Bei Objekten, die in der konfokalen Mikroskopie angewendet werden, sind die Arbeitsabstände i.A. geringer als bei der Streifenprojektion mit Stereomikroskop. Einige der Schweißnähte wurden bei der konfokalen Mikroskopie durch Zusammensetzen zweier einzelner Messungen erfasst, um die gesamte Breite der Schweißnaht auswerten zu können. Das Hauptproblem bei einer konfokalen Lösung besteht darin, dass die Geschwindigkeit bei der Datenaufnahme stark erhöht werden muss. Ein Sensor mit Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kamera und Durchfokussierung ohne in z-Richtung bewegte Komponenten erscheint als die beste Alternative.

3.3.1.2.3 Die Weißlichtinterferometrie

Die Weißlichtinterferometrie ist ebenfalls grundsätzlich für die Messung an Schweißnähten geeignet. Allerdings verschärft sich das Geschwindigkeitsproblem, das bei der konfokalen Mikroskopie gegeben ist, hier noch einmal, da i.A. eine noch wesentlich größere Anzahl an Bildern für die Messung notwendig wird. Außerdem handelt es sich bei dem Verfahren um ein interferometrisches Verfahren, d.h. Erschütterungen aus dem Fertigungsumfeld wirken sich stärker aus als bei der konfokalen Mikroskopie. Insgesamt bietet die WLI gegenüber der konfokalen Mikroskopie keine entscheidenden Vorteile bei der hier diskutierten Aufgabe. Der technologische Aufwand, ein schnelles und robustes Messverfahren aufzubauen, übersteigt nach dem derzeitigen Kenntnisstand die Möglichkeiten der verfügbaren Hardware im Rahmen des INESS-Projektes bei weitem.

3.3.1.3 Zusammenfassende Analyse der axial messenden Verfahren

Die Topografie der Naht soll unmittelbar nach dem Schweißvorgang gemessen werden, um mehr Informationen für eine sichere Erkennung der Defekte zu bekommen. So können Veränderungen im Schweißprozess rechtzeitig erkannt und Defekte vermieden werden. Da die Möglichkeiten für die Umsetzung der Weißlichtinterferometrie die technischen Möglichkeiten bei weitem übersteigen, wurden lediglich die konfokale Mikroskopie und die mikroskopische Streifenprojektion bezüglich der Eignung weiter analysiert. Tabelle 3-6 zeigt das Potenzial der beiden Methoden für die Anwendung beim Laserschweißen.

Die beiden betrachteten Methoden sind in mehreren Punkten gleichwertig. Die Entscheidung zugunsten der konfokalen Mikroskopie fiel aufgrund der vergleichsweise einfachen Signalform und der damit auch verbundenen Robustheit der Signalauswertung beim Stand der Technik. Der Effekt der Selbstabbildung kann an spiegelnden oder teilweise spiegelnden Schweißnähten mit geringen Krümmungsradien auftreten. Bei der Streifenprojektion kann dies aufgrund der vergleichsweise großen Streifenabstände zu einem erheblichen Messfehler führen. Die konfokale Mikroskopie hat den Vorteil, dass wegen der sehr kleinen lateralen Ausdehnung der Foki die Beeinflussung durch Selbstabbildung sehr gering ist.

	Streifen triangulation (ST)	Konfokale Mikroskopie (KM)	Favorisiertes Verfahren
Messgenauigkeit	Hinreichend gut	Hinreichend gut	Gleichwertig
Laterale Auflösung	Hinreichend gut	Hinreichend gut	Gleichwertig, stärkere laterale Filterung bei KM
Messfeldgröße	Vergleichsweise groß	Ausreichend groß	Streifen triangulation
Lichtausnutzung	Hinreichend gut	Hinreichend gut	Keine Aussage möglich
Messgeschwindigkeit	Ausreichend	Ausreichend	Jeweils abhängig v. Tiefenmessbereich
Geschwindigkeit der Auswertung	Bei großem Tiefenmessbereich komplexe Auswertalgorithmen	Kann höher sein als bei ST	Konfokal

Auswertalgorithmen			
FPGA-Einsatz für High-Speed-Auswertung	Schwer zu realisieren (komplexe Algorithmen)	Einfache Realisierung	Konfokal
Erfassung dunkler Details (Lochgrund)	Möglich	Möglich	Gleichwertig bei identischer Lichtquelle und Kamera
Robustheit der Signalverarbeitung	Gut, durch komplexere Auswertung sehr robust, Probleme bei Selbstabbildung	Durch eindeutige Signale höher als bei klass. ST	Konfokal, speziell bei spiegelnden Proben. Bisher keine Selbstabbildung bei Proben der Projektpartner beobachtet

Tabelle 3-6: Potenzial der Messverfahren für die Anwendung beim Laserschweißen.

3.3.1.4 Umsetzung der konfokalen Mikroskopie

Für die Realisierung des axial messenden Topometers zur Messung an bewegten Schweißnähten wird vor allem aus Gründen der Robustheit die konfokale Mikroskopie favorisiert. Da bei bewegten Schweißnähten in der Fertigung die Zeit für eine Durchfokussierung – beispielsweise mit einem mechanisch in z-Richtung bewegten Mikrolinsen-Array – beim Stand der Technik nicht zur Verfügung steht, wird ein Ansatz mit einer gezielten Nutzung der chromatischen Längsaberration einer optischen Komponente verfolgt, was im folgenden Kapitel noch eingehender erläutert wird [29,30]. Dabei bildet sich für jede Lichtwellenlänge im fokussierten Bündel jeweils ein Fokusfleck in einer anderen Tiefe des Objektraumes aus. Der Vorteil besteht darin, dass so völlig auf mechanisch bewegte Komponenten im axial messenden Topometer verzichtet werden kann. Es wird von den folgenden Vorgaben ausgegangen, s. a. Tabelle 3-7:

Laterale Auflösung in Bewegungsrichtung (y-Richtung)	$\leq 10\mu\text{m}$, da noch Löcher bis zu $\varnothing 30\mu\text{m}$ erkannt werden sollen
Tiefenauflösung (z-Richtung)	$\leq 10\mu\text{m}$, da noch Löcher bis zu $30\mu\text{m}$ Tiefe erkannt werden sollen
Tiefenmessbereich	0,5mm bis 1mm (Ziel)

Tabelle 3-7: Laterale Auflösung in Bewegungsrichtung und Tiefenauflösung.

Es wird der folgende Ansatz betrachtet: Im Messvorgang erfolgt eine linienhafte Beleuchtung des Schweißnahtprofils mit einer spektral breitbandigen Lichtquelle [31], wobei sich das Werkstück mit der Schweißnaht zum axial messenden Topometer bewegt. Die Bewegung der Schweißnaht erfolgt also in Naht-Richtung und in der Regel kontinuierlich. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob sich das Werkstück geradlinig oder auf einer Kreisbahn bewegt. Das 3D-Profil der Schweißnaht wird aus einzelnen 2D-Profilen lückenlos zusammengesetzt. Das 2D-Profil soll sich dabei unmittelbar aus der Auswertung des reflektierten Lichtes eines beleuchteten linienhaften Bereiches auf der Schweißnahtoberfläche ergeben. Dabei soll die Messfeldbreite 1,5 mm bis 3 mm betragen.

3.3.1.5 Funktionsweise und Realisierung des Topometers

Die Funktionsweise des favorisierten Ansatzes zur Topographiemessung wird im Folgenden detailliert beschrieben. Das Detektionsverfahren ist als chromatisch-konfokale Detektion bekannt. Dabei wird das Licht einer Weißlichtquelle in der Tiefe entlang der optischen Achse aufgespalten, um dadurch parallel innerhalb eines Höhenbereiches messen zu können [25,29,31,32]. Durch diesen Ansatz wird keine axiale Scanbewegung benötigt, wie es bei der klassischen konfokalen Topographiemessung der Fall ist. Die Intensitätsdetektion erfolgt durch ein Spektrometer, um die Information aus den unterschiedlichen Höhen trennen zu können. Das konfokale Intensitätssignal findet sich nun im Spektrum wieder und kann durch eine einmalig durchzuführende Kalibriermessung in ein Höhenprofil umgewandelt werden [33, 34].

In Bild 3-97 ist im oberen Teil links die chromatische Aufspaltung in einem Höhenmessbereich durch eine diffraktive Linse dargestellt und im rechten Bereich exemplarisch die Intensitätsverteilung eines konfokalen Signals im Spektrum skizziert. Um auch die laterale Abtastung zu parallelisieren, werden mehrere chromatisch-konfokale Punktsensoren nebeneinander angeordnet. Dies wird durch eine Mikrolinsenzeile realisiert, wie sie im unteren linken Teil von Bild 3-97 in einer Seitenansicht skizziert ist. Jede Mikrolinse arbeitet dabei als unabhängiger Punktsensor, um die Topographie der Oberfläche (schwarze Linie in der Skizze) zu vermessen. Die spektrale Information, die jede Mikrolinse liefert, wird entlang einer Pixelzeile einer CCD- oder CMOS-Kamera aufgespalten, wie es in Bild 3-97 rechts unten angedeutet ist. Durch diese räumliche Verteilung auf verschiedene Pixelzeilen ist gewährleistet, dass bei der Detektion eine Trennung der Signale der Mikrolinsen vorhanden ist. Die Messung einer flächigen Topographie erfolgt über eine laterale Bewegung senkrecht zur Mikrolinsenzeile. Durch die Auslegung als Limitensensor ist es dabei möglich, sowohl eine Bewegung innerhalb einer Ebene bei einem planen Objekt durchzuführen, als auch eine Drehung eines zylinderrförmigen Objektes um dessen Symmetrieachse zu verwenden.

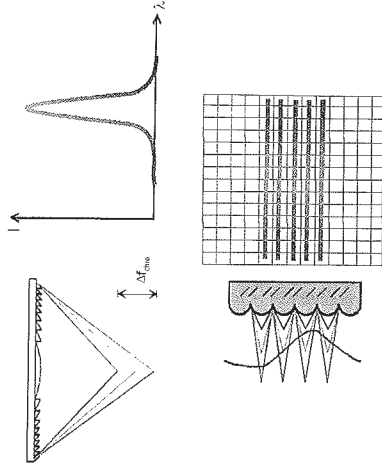


Bild 3-97: Chromatisch-konfokales Detektionsprinzip.

Der komplette Aufbau ist in Bild 3-98 skizziert. Für die Abbildung der Mikrolinsen-Foki wurden nach intensiver Marktrecherche kommerzielle Objektive gefunden, die sich zu einer telezentrischen Abbildungsstufe zusammenfügen lassen, die den Anforderungen entspricht. Der Bildfelddurchmesser (Messfeld) beträgt 2 mm und die numerische Apertur an dieser Stelle 0,48. Durch die hohe numerische Apertur wird sichergestellt, dass auch an steilen Gradienten gemessen werden kann. Als Tubulinse kommt ein Plan-Achromat zum Einsatz, während für das Objektiv ein Plan-Apochromat eingesetzt wird. Die chromatische Aufspaltung auf einen Höhenmessbereich von 0,5 bis 1 mm wird durch Einbringen eines dispersiven Elementes in den Strahlengang erreicht. In diesem Messbereich ist eine Höhengenauflösung von wenigen μm realisierbar.

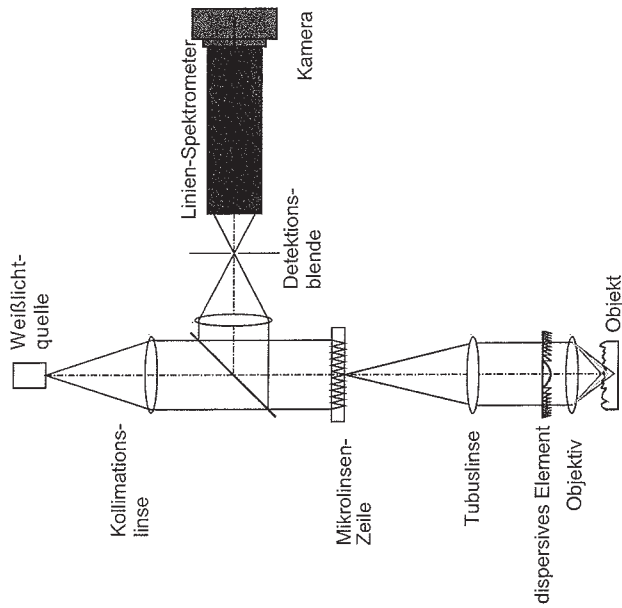


Bild 3-98: Schematischer Aufbau des chromatisch-konfokalen Liniensensors.

Die nötige chromatische Aufspaltung wird zentral durch ein dispersives Element erzeugt. Mit diesem Ansatz ist es möglich, durch Austausch des dispersiven Elements den Grad der chromatischen Aufspaltung einzustellen, ohne die anderen Kenndaten des Aufbaus zu verändern. Die Lage des dispersiven Elementes ist so gewählt, dass die Telezentrie der optischen Abbildung für alle Wellenlängen erhalten bleibt. Dadurch bleibt auch der Abbildungsmaßstab im gesamten Messbereich konstant, obwohl wellenlängenabhängig in unterschiedliche Tiefen abgebildet wird. Das dispersive Element besteht aus zwei Teilen [35]. Um die hohe chromatische Aufspaltung des Sensors realisieren zu können, wurde eine diffraktive Linse eingesetzt [36], die am ITO gefertigt wurde. Der zweite Teil besteht aus einer achromatischen Linse, die für die mittlere Wellenlänge als Kompensationselement fungiert und damit den Eingriff in den Strahlengang bei voller Funktionalität sehr gering hält. Mit diesem Ansatz und der diffraktiven Linse ist eine präzise chromatische Aufspaltung ohne Einbringung störender Aberrationen realisiert worden.

Für die Abbildung der Mikrolinsen auf den Eintrittspalt des Spektrometers wurde ein Optikdesign aus Standardlinsen entwickelt. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf geringe chromatische Fehler und eine kleine Verzeichnung gelegt.

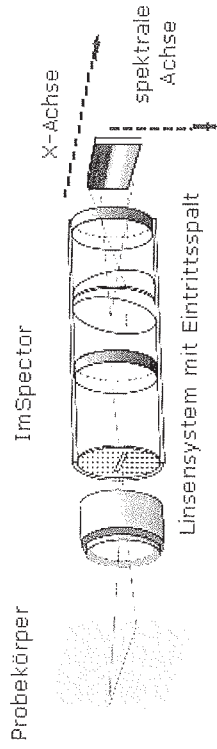


Bild 3-99: Prinzipskizze des verwendeten Linienspektrometers.

Für die Spektrometer-Einheit wurde im Ergebnis einer umfangreichen Recherche ein geeignetes, kommerziell erhältliches, linienhaft messendes Spektrometer von der Firma Zeutec gefunden, dessen Aufbau in Bild 3-99 dargestellt ist (Quelle: Zeutec-Prospekt).

Die für das Topometer relevante spektrale Information wird auf einen Teilbereich des Kamerafeldes hinter dem Spektrometer aufgespalten. Durch die Beschränkung auf einen Kamerabereich wird eine schnelle Aufnahmezeit möglich, was zu kurzen Messzeiten führt. Trotzdem ist die spektrale Abtastung fein genug, um eine Höherauflösung des Topometers von wenigen μm gewährleisten zu können. Durch eine adaptive Wahl des Bildausschnittes der Kamera ist es sogar denkbar, einen Teilmessbereich mit höherer Messrate zu vermes-

sen. Es ist bereits in Bild 3-98 erkennbar, dass durch den Detektor-Arm mit Abbildungsoptik, Spektrometer und Kamera relativ viel Bau-Volumen benötigt wird. Beim Aufbau des Sensors wurde auf eine kompakte Anordnung der einzelnen Komponenten geachtet. Dies wurde durch eine Faltung des Strahlenganges realisiert. Damit verläuft der Detektor-Arm parallel zum Mess-Arm. Es wurde auch darauf geachtet, den Detektor-Arm kürzer als den Mess-Arm auszulagern, damit eine problemlose Integration in eine Prüfstelle möglich ist.

Um eine weitere Reduktion des Gerätevolumens in der Prüfstelle zu erreichen, wurde die Lichtquelle mittels einer Faserzuführung vom Messgerät räumlich getrennt. Die in der Skizze in Bild 3-98 ausgedehnt dargestellte Weißlichtquelle ist im realen Aufbau lediglich ein Faserende. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist, dass durch den geringen Durchmesser der Faser, die Beleuchtung automatisch eine hohe räumliche Kohärenz besitzt. Dies ist notwendig, um eine gute Signalqualität gewährleisten zu können.

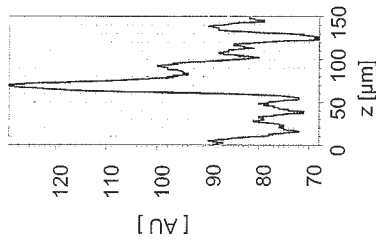


Bild 3-100: Beispiel eines Messsignals des in Bild 3-98 skizzierten Aufbaus.

Ein Beispiel eines mit dem Aufbau erhaltenen Messsignals ist in Bild 3-100 dargestellt. Die Halbwertsbreite des Signals betrug ca. 15 μm . Wie man sieht, ist der Untergrund durch Rauschen im Signal relativ hoch. Dies kommt durch die geringen Intensitäten, die mit der Kamera gemessen werden. Eine Verbesserung lässt sich durch eine effizientere Lichtausnutzung erreichen. In dem bisherigen Konzept wird das Licht der Lichtquelle auf eine Fläche kollimiert, deren Durchmesser der verwendeten Mikrolinsenzelle entspricht. Aus dieser Fläche wird lediglich der sehr kleine Flächenanteil genutzt, der von den Mikrolinsen abgedeckt wird. Das Licht, das nicht auf die Mikrolinsen trifft, kann nicht für die Messung verwendet werden. Die Gesamt-Lichteffizienz des Sensors ist folglich gering.

Um eine Steigerung der Lichteffizienz realisieren zu können, wurde ein alternativer Aufbau des Sensorkopfes entwickelt [37]. Bei diesem werden keine Mikrolinsen mehr eingesetzt, sondern es wird mit einer Zylinderlinse ein Linienfokus erzeugt. Der Aufbau ist in Bild 3-101 skizziert. Der Linienfokus ist in dieser Skizze senkrecht zur Papierebene ausgedehnt. Als Detektions-Blende wird in diesem Aufbau kein Pinhole, sondern eine Schlitzblende verwendet. Dadurch ist eine bessere Lichteffizienz als bei einem Pinhole möglich. Es wird jedoch auch eine Verbreiterung des konfokalen Signals und damit eine schlechtere Höhenauflösung bewirkt. Als Detektions-Schlitzblende wurde die Blende am Eingang des Spektrometers verwendet. Indem der Strahlteiler nah bei der Zylinderlinse positioniert ist, wurde einem möglichst kompakten Aufbau Rechnung getragen.

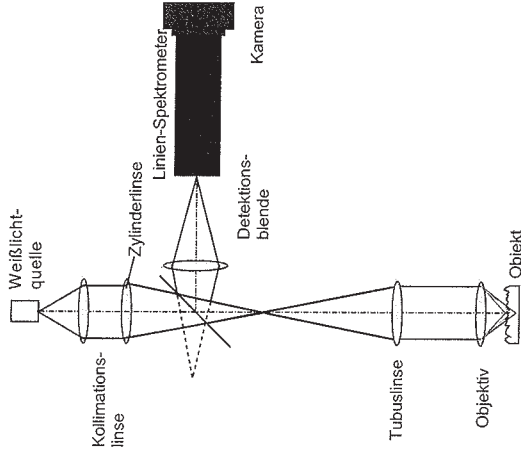


Bild 3-101: Modifizierter Aufbau des Liniensensors mit Zylinderlinse.

Mit diesem Sensor war die nutzbare Lichtmenge groß genug, um erste Messungen vorzunehmen. Im Folgenden wird eine erste Messung an einer rauen, metallischen Oberfläche präsentiert. Das Objekt wies eine Nut auf, wobei die obere Ebene eine größere Oberflächenrauheit besaß als die untere Ebene.

In Bild 3-102a ist das mit dem realisierten Sensor aufgenommene Spektrometerbild zu sehen, wobei die y -Achse die spektrale Achse ist. Die x -Achse entspricht dem Verlauf entlang der gemessenen Linie. Die Lage des konfokalen Signals auf der spektralen Achse hängt von der Höhe des Objektes an dem jeweiligen Punkt ab. Aus diesen Daten lässt sich die Topographie entlang der gemessenen Linie berechnen. An großen Gradienten verringert sich der Signalkontrast, so dass die Signalverteilung in Bild 3-102a durch die Darstellungslückenhaft wirkt. An den meisten Stellen sind die Signale jedoch noch auswertbar. Um zu vermeiden, dass zu schlechte Signale ausgewertet werden, wurde ein Schwellwert für die Signalstärke verwendet. Das Ergebnis ist in Bild 3-102b dargestellt. Die unterschiedlichen Rauigkeiten der beiden Ebenen sind in der Topographie gut zu erkennen. Auch die erwarteten 500 μm Höhenunterschied werden bestätigt. Die senkrechten Kanten der Nut lieferten kein zuverlässiges Signal und wurden dementsprechend nicht ausgewertet, was sich in Lücken in der Topographie bemerkbar macht.

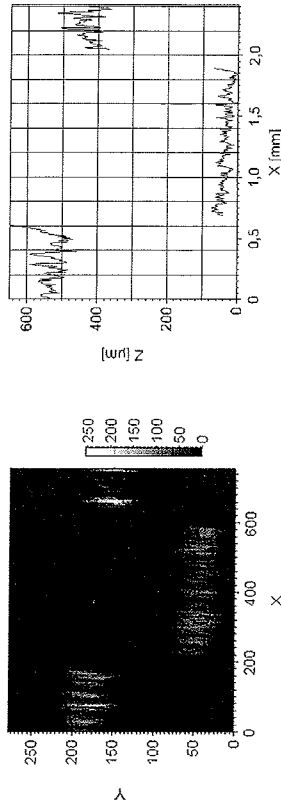


Bild 3-102: Ergebnis der Messung eines Grabens in einer rauen Metalloberfläche, (a) Spektrometerdaten, (b) Ermittelte Topografie.

Die benutzten Algorithmen basieren auf dem Schwerpunkt-Auswerteverfahren, welches sich durch Robustheit und effiziente Implementierbarkeit auszeichnet [10].

3.3.1.6 Ermittlung der realen Kenndaten und Test des Liniensensors

Zur Charakterisierung des Sensors wurden die Kenndaten des Sensors bestimmt. Der Bildfelddurchmesser bzw. die Länge der Messlinie beträgt 2,4 mm bei einer numerischen Apertur von ca. 0,45. Aus der durch das disperse Element eingebrachten chromatischen Aufspaltung resultiert die wellenlängenabhängige Fokussierung in unterschiedliche Höhen. Der Höhenmessbereich ergibt sich daher bei einem vorgegebenen Grad chromatischer Aufspaltung aus dem genutzten Spektralbereich. Mit dem verwendeten Spektralbereich von ca. 500 nm bis 700 nm wurde ein Höhenmessbereich von 0,7 mm realisiert. Mittels des Linienspektrometers in der Detektionseinheit wird das wellenlängen-kodierte konfokale Intensitätssignal ortsaufgelöst erfasst und daraus die Topographie ermittelt. Ein Foto des Sensors ist in Bild 3-103 zu sehen. Die Lampeneinheit ist durch die Faserzuführung vom Sensor abgesetzt und auf dem Foto nicht zu sehen.

Ein typisches konfokales Signal des Liniensensors ist in Bild 3-104 dargestellt. Die Halbwertsbreite des Signals beträgt ca. 55 μm . Durch die glatten Signalfanken ist eine gute Auswertbarkeit gewährleistet. Die Höhenauflösung des Sensors liegt im Mikrometer-Bereich. Im Vergleich zum zuvor beschriebenen Aufbau mit Mikrolinse ist das Signal verbreitert und weist durch die größere Lichtmenge ein deutlich besseres Signal-Rausch-Verhältnis auf (siehe dazu auch Bild 3-100). Dies entspricht den Erwartungen.

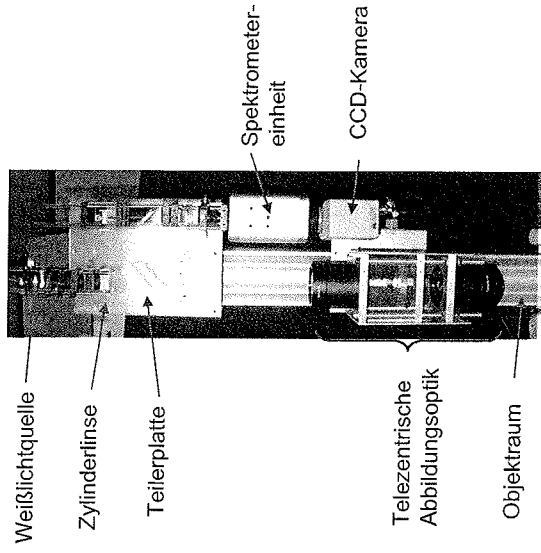


Bild 3-103: Foto des chromatisch-konfokalen Liniensensors.

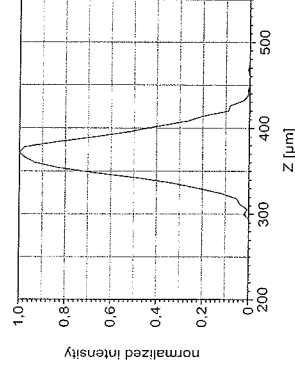


Bild 3-104: Typisches konfokales Signal des Liniensensors.

Der praktische Einsatz des Liniensensors wurde anhand verschiedener Proben untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 3-105 bis Bild 3-107 dargestellt und werden im Folgenden im Detail beschrieben. In jeder der Abbildungen ist links das Spektrometerbild zu sehen, wobei die senkrechte Achse die spektrale Achse ist. Die aus der spektralen Verteilung errechnete Topographie ist jeweils im rechten Teil der Abbildung zu sehen. Durch die Einschränkung der Graustufen in der Darstellung wirkt das Spektrometerbild etwas lückenhaft, wobei allerdings auch schwache, in der Darstellung kaum zu erkennende Signale noch auswertbar sind.

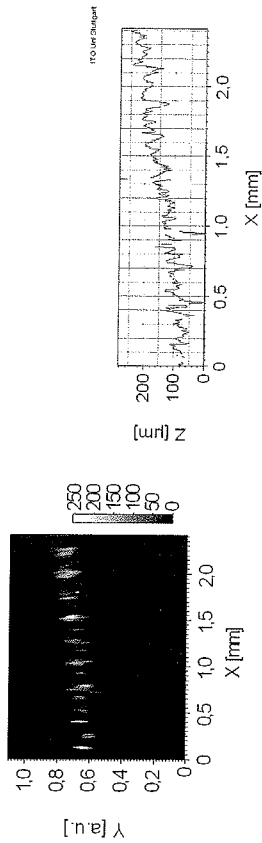


Bild 3-105: Messung einer gedrehten Metalloberfläche.

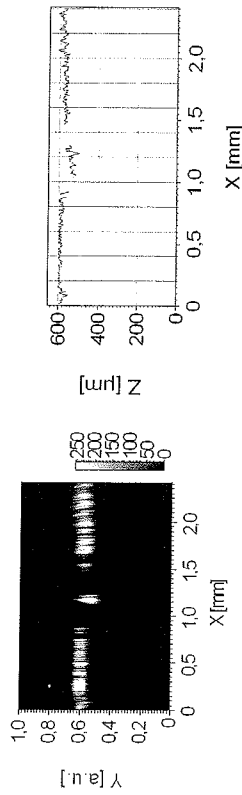


Bild 3-106: Messung einer Laserschweißnaht.

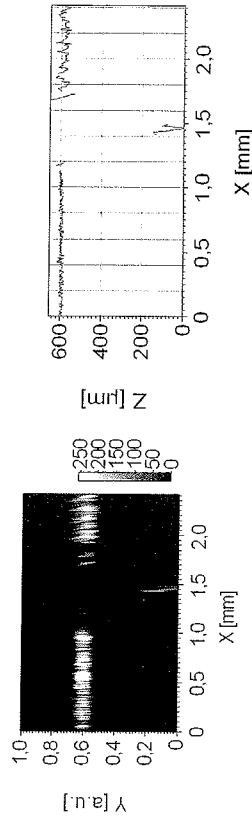


Bild 3-107: Messung einer Laserschweißnaht mit Fehlstelle.

Bild 3-105 zeigt die Messung einer gedrehten Metalloberfläche. Da die Flanken der Drehreifen teilweise sehr steil sind, sinkt in diesen Bereichen die Signalhöhe stark ab. Bei extrem schwachen Signalen kann es in der Auswertung zu Ausreißern kommen, was auch in der Topographie zu sehen ist. Dies kann durch einen höheren Schwellwert bei der Auswertung unterdrückt werden, mit dem zu schwache Signale als ungültig herausgefiltert werden. In Bild 3-106 und Bild 3-107 sind Messungen an einer Laserschweißnaht eines Beispielobjektes der Firma Robert Bosch GmbH zu sehen. Der in Bild 3-106 zu sehende

Bereich der Schweißnaht ist ohne Fehlstellen und weist lediglich eine leicht abgesenkte Schweißnahtoberfläche auf.

Die etwas steileren Flanken im Übergang zwischen Umgebungsmaterial und Schweißnaht lieferten kein auswertbares Signal. Dies hängt damit zusammen, dass die numerische Apertur des Systems nicht gleichmäßig ausgenutzt wird. In Richtung der Messlinie wird lediglich ein kleiner Teil des möglichen NA-Winkels verwendet, wodurch sich Einflüsse von verkippten spiegelnden Flächen stärker bemerkbar machen. Der zentrale Teil der Schweißnaht konnte jedoch zuverlässig gemessen werden.

In Bild 3-107 ist eine Messung in einem Bereich der Schweißnaht zu sehen, in dem eine Fehlstelle eingebracht wurde. Auch die Fehlstelle mit ihrer abweichenden Tiefe konnte detektiert werden, wobei die steilen Flanken an der Fehlstelle zu einer weiteren Reduzierung des messbaren Bereiches der Schweißnaht führte.

Mit den gezeigten Messungen konnte der Funktionsnachweis des Sensors erbracht werden. Die Richtungsabhängigkeit der Messbarkeit von geeigneten Flächen stellt jedoch einen Nachteil des umgesetzten Ansatzes gegenüber dem ursprünglichen Ansatz mit Mikrolinsen dar. Es wurde daher ein weiterführendes Konzept entwickelt, das durch eine Kombination von Makro- und Mikrolinsen zu einer bedeutend gleichmäßigeren Ausnutzung der numerischen Apertur des Sensors ohne wesentliche Lichtverluste führt. Damit kann eine Erweiterung der messbaren Objektbereiche erreicht werden.

3.3.1.7 Optimierung des Sensors

Der Ansatz der Optimierung ist in Bild 3-108 dargestellt. Die makroskopische Zylinderlinse sammelt das Licht aus der gesamten Apertur des kollimierten Lichtes, während das senkrecht dazu angeordnete Mikro-Zylinderlinsenarray eine weitere Strahlformung übernimmt und den genutzten Raumwinkelbereich vergrößert. Bei diesem Ansatz ist es wichtig, dass die Fokusebenen der beiden optischen Komponenten in derselben Entfernung liegen, da sonst ein sehr starker astigmatischer Fehler erzeugt wird.

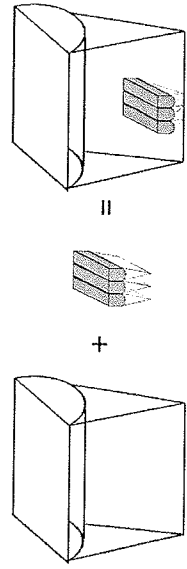


Bild 3-108: Kombination einer makroskopischen Zylinderlinse mit einem mikroskopischen Zylinderlinsenarray.

Eine Berechnung der Fokusqualität für eine typische Zylinderlinse ist in Bild 3-109 zu sehen. Die Berechnung wurde für die Wellenlängen 550 nm, 650 nm und 750 nm durchgeführt.

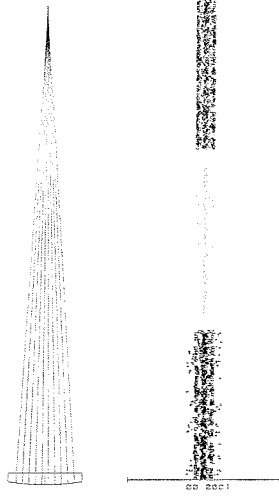


Bild 3-109: Strahlengang für eine refraktive Zylinderlinse (oben) und 1 mm breite Ausschnitte aus den Linienfoki für drei repräsentative Wellenlängen für die jeweils optimale Fokussposition (unten).

Die Dicke der Linienfoki und damit die Fokusqualität liegt um ein Mehrfaches über der theoretischen unteren Grenze. Zusätzlich trägt die axiale chromatische Fokusaufspaltung ca. 680 μm . Es stellte sich heraus, dass durch diese Aufspaltung ein nicht akzeptabler astigmatischer Fehler entsteht. Folglich muss eine achromatische Zylinderlinse eingesetzt werden. Auf dem freien Markt sind jedoch keine passenden achromatischen Zylinderlinsen erhältlich, weshalb die Achromatisierung selbst durchgeführt werden muss.

Ein Ansatz zur Achromatisierung besteht in einer als Hybridlinse bekannten Kombination einer refraktiven mit einer diffraktiven Linse. Da die chromatischen Fehler einer refraktiven und einer diffraktiven Linse invers sind, erhält man mit dem hybriden Ansatz einen Achromaten durch die Kombination zweier positiver bzw. zweier negativer Linsen. Der Vorteil einer diffraktiven Linse besteht darin, dass sich mit praktisch dem gleichen Aufwand sowohl sphärische als auch asphärische Wellenfronten generieren lassen. Dies bedeutet, dass gleichzeitig mit der Achromatisierung mit gewissen Einschränkungen auch Aberrationen ausgeglichen werden können.

Für den Aufbau der hybriden Zylinderlinse stellt sich zunächst die Frage des Abstandes zwischen refraktiver Linse und diffraktiver Linse. Berechnungen ergaben, dass die Ergebnisse am besten sind, wenn der Abstand sehr gering ist. Dies hat auch den Vorteil einer kompakten Bauweise. Die Ergebnisse einer Simulation einer solchen hybriden Zylinderlinse ist in Bild 3-110 zu sehen.

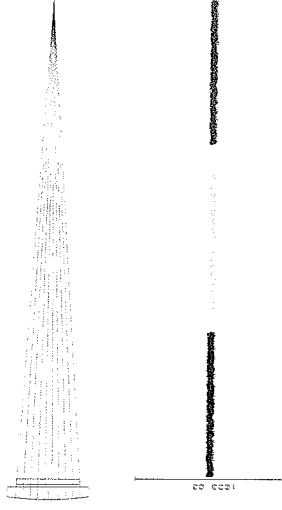


Bild 3-110: Strahlengang für eine optimierte hybride Zylinderlinse (oben) und 1 mm breite Ausschnitte aus den Linienfoki für drei repräsentative Wellenlängen für die jeweils optimale Fokussposition (unten).

Im Vergleich zur rein refraktiven Linse hat sich die Fokusqualität deutlich verbessert und liegt jetzt nur wenig über der theoretischen unteren Grenze. Auch die an diesem Punkt des Sensors nicht erwünschte axiale chromatische Aufspaltung hat sich wesentlich verbessert und beträgt mit ca. 65 μm weniger als ein zehntel des Wertes der rein refraktiven Linse.

Zur Minimierung der Reflexe im Abbildungsstrahlengang wurde der Aufbau so modifiziert, dass der Fokus der Zylinderlinse vor dem Strahlteiler entsteht. Eine Skizze des veränderten Aufbaus ist in Bild 3-111 dargestellt.

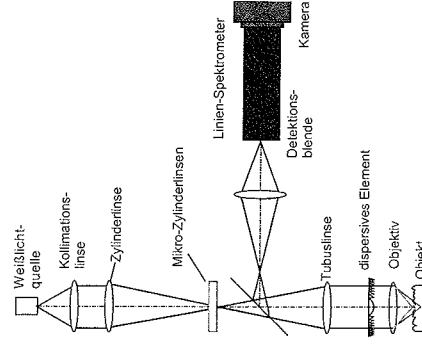


Bild 3-111: Skizze des modifizierten Aufbaus.

Durch die Modifizierung des Aufbaus und die geänderte Nutzung der numerischen Apertur ist eine Anpassung der Abbildungsoptik des Zwischenbildes auf die Detektionsblende notwendig. In diesem Zusammenhang wurde die Abbildungsoptik erneut berechnet und die numerische Apertur der Abbildung um einen Faktor von ca. 1,7 erhöht.

3.3.1.8 Experimentelle Verifizierung

Die Achromatisierung der Zylinderlinse brachte eine leichte Verbesserung des Signals, was sich bei einer Spiegelmessung in einem symmetrischeren Signal und einer leicht verringerten Halbwertsbreite bemerkbar machte (siehe Bild 3-112). Es treten leichte Lichtverluste an der diffraktiven Korrekturlinse auf, die zu einer etwas geringeren Signalintensität führen.

Ein typisches Signal einer Spiegelmessung nach der Integration der Mikrozyklinderlinsen ist in Bild 3-113 zu sehen. Im Vergleich zu den bisherigen Messungen ist die Halbwertsbreite mit ca. 100 μm etwas vergrößert. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der durch die Mikrozyklinderlinsen eingebrachte Anteil der numerischen Apertur an der Detektionsblende nicht diskriminiert wird.

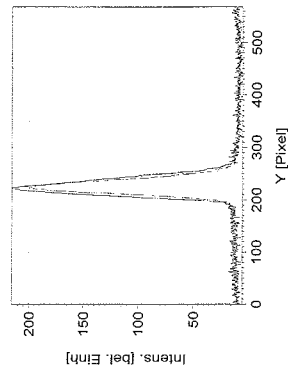


Bild 3-112: Signalvergleich zwischen dem Sensor ohne (dunkle, äußere Linie) und mit (helle, innere Linie) diffraktiver Korrekturlinse.

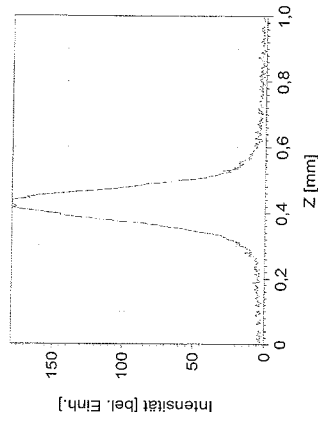


Bild 3-113: Signal des Sensors mit Mikrozyklinderlinsen.

Die deutliche Verbesserung der Kippwinkelunabhängigkeit des Sensors in Richtung der Messlinie ist in Bild 3-114 anhand von Spektrometerbildern von Spiegelmessungen zu sehen. Die senkrechte Achse entspricht der Spektralachse und im linken Drittel der Teilbilder befinden sich keine Mikrolinsen im Strahlengang. Bei starker Verkippung ist im Bereich ohne Mikrolinsen kein Signal mehr messbar (Bild 3-114a und Bild 3-114c). Bei waagrechttem Spiegel ist das Signal in diesem Bereich dagegen so stark, dass die Kamera übersteuert (Bild 3-114b). Der Bereich mit Mikrolinsen (rechte 2/3 des jeweiligen Bildes) weist im Gegensatz dazu bei den verschiedenen Verkippungen des Spiegels keine nennenswerte Schwankung der Signalintensität auf. Die Streifenmodulation im Signalbereich mit Mikrolinsen wird durch ein Darstellungsmoire der Mikrozyklinderlinsen verursacht.

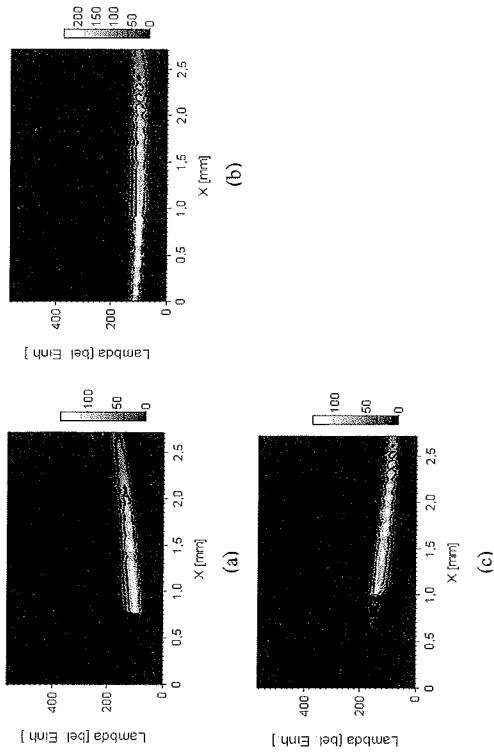


Bild 3-114: Darstellung der Verbesserung der Kippwinkelunabhängigkeit anhand von Spektrometerbildern bei verschiedenen Kippwinkeln des vermessenen Spiegels. Die senkrechte Achse entspricht der Spektralachse, (a) -8 Grad, (b) 0 Grad, (c) 8 Grad

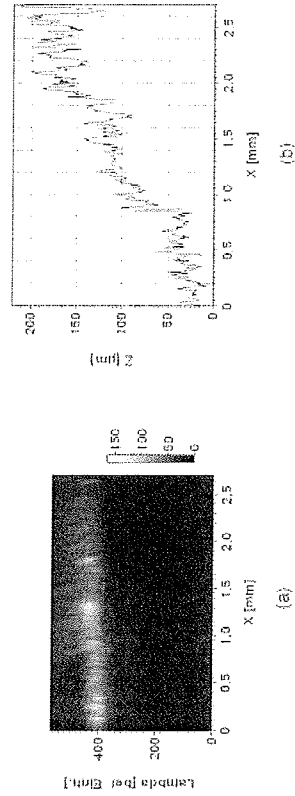


Bild 3-115: Spektrometerbild und Topografie einer Messung auf einer rauen Metalloberfläche.

Das Spektrometerbild einer Messung auf einer sehr rauen, gedrehten Metalloberfläche ist in Bild 3-115a zu sehen. Bei einer Messung auf einer typischen Schweifnaht sind nur noch die blanken Bereiche gut messbar, da auf rauen Oberflächen die Signalintensitäten teilweise sehr gering werden (siehe Bild 3-116a). Die Signalintensität ist bis auf Bereiche mit starken Schmutzspuren noch ausreichend für eine Auswertung, führt aber zu einem

schlechtem Signal-Rausch-Verhältnis, was in einer reduzierten Höhenauflösung resultiert. Für diese Messungen befanden sich im gesamten Bildfeld Mikrolinsen.

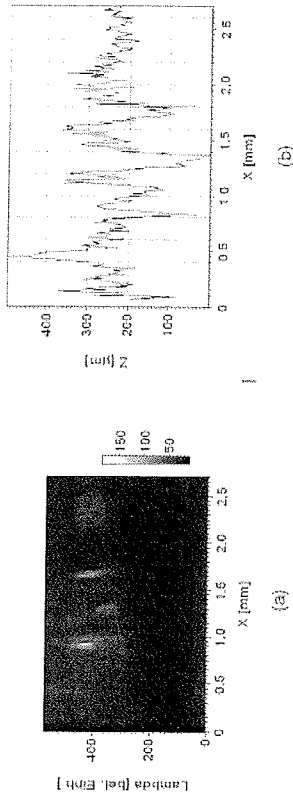


Bild 3-116: Spektrometerbild und Topografie einer Messung auf einer Schweifnaht.

3.3.1.9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen umfangreicher experimenteller Untersuchungen wurde das konfokale Messverfahren aus mehreren Messverfahren als das am Besten geeignete ausgewählt. Um den Anforderungen der Postprozess-Messungen von Schweifnähten möglichst gut gerecht zu werden, wurde ein Aufbau entworfen und aufgebaut, der entlang einer Linie quer zur Schweifnaht das Höhenprofil misst. Durch Ausnutzung chromatischer Effekte wird ohne mechanische Komponenten parallel „one-shot“ ein kompletter Höhenbereich vermessen. Durch eine laterale Verschiebung bzw. Rotation des Objektes kann die gesamte Schweifnaht vermessen werden. Es konnte gezeigt werden, dass der neu entwickelte chromatische konfokale Liniensensor zur Vermessung von Laserschweifnähten geeignet ist. Mit der in den Abschnitten 3.3.1.7 und 3.3.1.9 beschriebenen Optimierung konnte die Funktionalität noch verbessert werden. Die zur Verfügung stehende Lichtmenge reichte nach der Optimierung leider nicht mehr aus, um auf dunklen oder stark streuenden Oberflächen mit guter Höhenauflösung messen zu können. Eine stärkere Lichtquelle, eine empfindlichere Kamera bzw. eine Steigerung der Lichteffizienz ist folglich ein zentraler Punkt bei einer Weiterentwicklung des Sensors. Die volle Funktionsfähigkeit des Sensorprinzips konnte jedoch innerhalb des Projektes gezeigt werden.

3.3.2 Lichtschnittverfahren

Der Einsatz des Lichtschnittverfahrens – Messprinzip siehe Kapitel 3.1.1 – liefert lokale 3D-Daten über das geometrische Profil der Nahtobertraupe. Aufgabe der Postsensorik ist, aus diesen Höhenlinien mit Hilfe der Profilanalyse Geometrie und Homogenität der Nahtobertraupe zu ermitteln und zu beurteilen.

Bei der Nahthomogenität ist die sichere Detektion von offenen Poren im Bereich von 0,1 - 0,3 mm gefordert. Sie können die Naht schwächen, die Dichtheit oder den visuellen Eindruck (glatte, spritzerfreie Naht) beeinträchtigen. Die Nahgeometrie ist hinsichtlich Nahtfeinfall, -überhöhung und Rissen zu überprüfen. Ein Versatz über eine bestimmte Schweißnahtlänge hinweg führt zu einer entscheidenden Qualitätseinbuße.

Entscheidend für die scannende Detektion mit dem Lichtschnittverfahren bei der Postsensoren ist die erreichbare Messgenauigkeit. Diese wird von folgenden Einflussfaktoren bestimmt:

- optische Auflösung des Lichtschnitt-Sensors
- realisierbare Abtastfrequenz
- Verfahrensgeschwindigkeit

Für die optische Auflösung sind eine Reihe von Parametern entscheidend. Der Triangulationswinkel ergibt sich aus dem notwendigen Höhenmessbereich und bestimmt maßgeblich die vertikale Auflösung, er ist aber auch durch das Reflexionsverhalten der Objektoberfläche begrenzt. Sehr geringe Überhöhungen können z.B. Stumpfstoß-Laserschweißnähte ohne Zusatzwerkstoff aufweisen (z.B. 0,05 mm). Diese fordern dann eine entsprechend hohe Auflösung im Vergleich z.B. zu Überlappnähten. Diese longitudinale Auflösung wird durch den Pixelabstand bestimmt. Weitere Parameter, die die optische Auflösung beeinflussen, sind z.B. auch Breite und Schärfentiefe der Laserlinie.

Die realisierbare Abtastfrequenz bezeichnet die max. Anzahl möglicher Bildaufnahmen, die durch die Belichtungszeit und die Datentransferrate begrenzt werden. Zusammen mit der Verfahrensgeschwindigkeit, d.h. der Relativbewegung zwischen Sensorsystem und abzu-scannender Naht, ergibt sich der minimale Abstand zwischen zwei Höhenlinien, der die Auflösung längs der Schweißnaht bestimmt.

An die Post-Sensoren ergeben sich in Summe daher hohe Anforderungen hinsichtlich Messgenauigkeit und realisierbarer Datenrate. Dies ist bei dem im Forschungsvorhaben gewählten Ansatz mit einer Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kamera im Schweißkopf zu berücksichtigen.

4 Modulare Integration

4.1 Bearbeitungskopf

Bild 4-1 zeigt ein grundlegendes Modell für ein modulares Messsystem mit den potentiellen, modular zu integrierenden Messelementen, basierend auf einer Bearbeitungsoptik-Anordnung, wie sie bei der Bearbeitungsoptik (BEO) von TRUMPF Laser Schramberg für die Festkörperlaser verwendet wird.

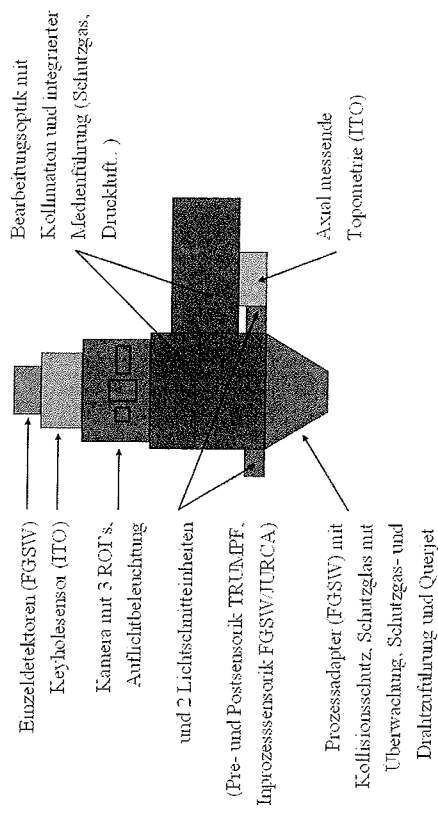


Bild 4-1: Grundlegendes Konzept eines modularen Messsystems und einzelne Komponenten.

Eine detailliertere Auslegung liefert Bild 4-2. Hier sind bereits die wesentlichen Komponenten zur Prozesskontrolle integriert. Die eine oder zwei potenziellen schnellen Achsen zur Lagekorrektur sind dergestalt konzipiert, dass sie bei Bedarf modular zwischen Bearbeitungsoptik und Bearbeitungsanlage eingefügt werden können und sind deshalb hier nicht gezeichnet. Die skizzierte Anordnung basiert auf einem Ansatz, der alle angedachten Messsysteme der Projektpartner über eine in der Kamertechnik verbreitete und standardisierte opto-mechanische Schnittstelle, die sogenannte C-mount Schnittstelle, integriert. Abgesehen von der definierten Lage des Kamerschips bezüglich der Auflagefläche des Objektivs ist das 1" - Feingewinde normiert (1-32 UNF), vgl. Bild 4-3. Bei einem Außendurchmesser von 25,4 mm kann eine freie Apertur von ca. 20 - 22 mm realisiert werden. Diese Schnittstelle ist in gängigen Kameras integriert und auch mit den Einzeldektoren problemlos zu realisieren. Eine freie Apertur von ca. 20 mm wurde zunächst auch vom

ITO für den Keyholesensor als voraussichtlich ausreichend eingeschätzt. Ein weiteres zu lösendes Problem betrifft den durch den Gesamtaufbau zu transmittierenden Wellenlängenbereich. Die optischen Elemente der TRUMPF-Optik weisen eine charakteristische Transmissionskurve auf, die die Verwendung bestimmter Wellenlängen bevorzugt, während andere Wellenlängen weniger geeignet sind. Für das endgültige System nach Bild 4-2 müssten neue Beschichtungen für die transmittierenden optischen Elemente gefunden werden, um sämtliche genutzten Wellenlängenbereiche (532 nm für Keyholesensor, 660 nm für Linienprojektion, nahes Infrarot für die In-Prozessüberwachung mit Einzeldetektoren und Kamera) optimal zu transmittieren. Hier ist nun ein Funktionsprinzip des integrierten Messsystems zu sehen, welches als standardisierte Schnittstelle ein C-mount Gewinde vorsteht. Der modulare Aufbau steht für jedes Einzelmesssystem eine eigene Abbildungslinse vor, mit der jeweils ein anderes Abbildungsverhältnis erzielt werden kann. Dies ermöglicht im Fall der Kamera die Ausnutzung des gesamten Chipbereichs, im Fall der Einzeldetektoren einen hohen Miniaturisierungsgrad.

Eine wesentliche Entscheidung bezüglich der zu realisierenden Bearbeitungskopfvariante wurde einvernehmlich mit den Partnern getroffen. Zum einen wird das zukünftige Konzept keine Möglichkeit bieten, den Keyholesensor (ITO) gemeinsam mit den übrigen zentralen Onlinekomponenten in ein und demselben Sensorik-Layout zu integrieren. Dies ist vertretbar, da die Anwendung des Keyholesensors eher bei Feinschweißungen zu suchen ist, wo die kamerabasierten Verfahren kaum zu einer relevanten Anwendung finden dürften. Umgekehrt ist ein Einsatz des Keyholesensors bei größeren geometrischen Dimensionen der Bearbeitungszone wenig Erfolg versprechend. Dies vereinfacht die weitere Vorgehensweise und lenkt auf das endgültige Bearbeitungskopfkonzept. Alle optischen Messmethoden außer dem Keyholesensor werden in einem Bearbeitungskopf integriert. Die Basis für dieses System stellt der Optikwürfel der Firma Trumpf dar. Sein Design enthält bereits die Photonfocus-Kamera, die Auflichtbeleuchtung und zwei Linienprojektoren für den vorlaufenden und den nachlaufenden Lichtschnitt. Die Integration der Einzeldetektoren wird durch einen halbdurchlässigen Strahlteiler modular ermöglicht.

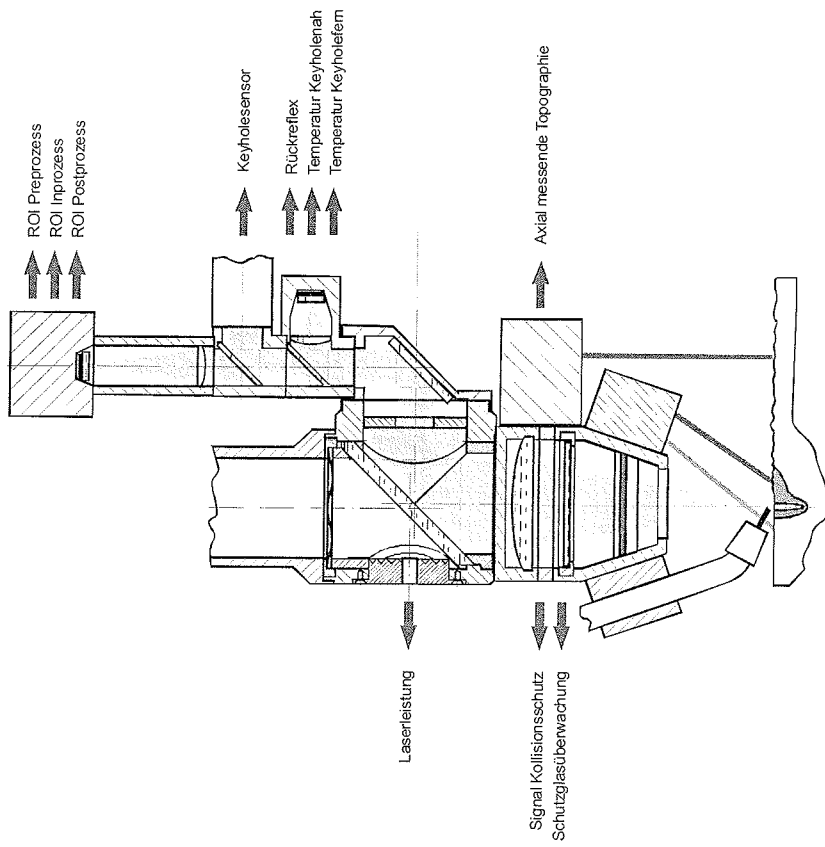


Bild 4-2: Modulares, integriertes Messsystem auf Basis von C-mount Schnittstellen an einer TRUMPF-Optik.

C mount standard

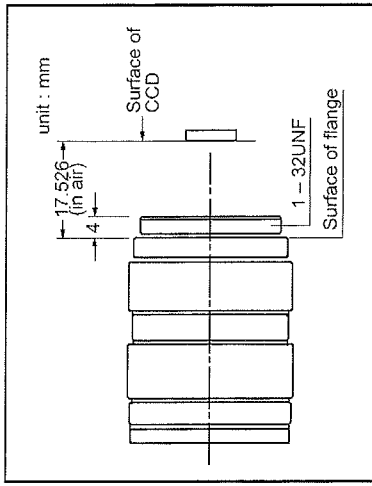


Bild 4-3: Standardisierter C-mount Anschluss als opto-mechanische Schnittstelle für ein modulares, integriertes Messsystem (Quelle: Sony).

4.2 Prozessadapter

In der FGSW wurden bereits mehrfach prototypische Prozessadapter realisiert. Durch die enge Kooperation mit der Forschungsgruppe „Düsenentwicklung“ des IFSW wurden hierbei jeweils sehr gute Ergebnisse bezüglich des Optikschatzes erzielt. Die Funktionsweise dieser Prozessadapter wurde bereits mehrfach von Industriepartnern in Serienprodukte eingeführt. Eine Anpassung der bisherigen Konzepte an die tatsächlich zu berücksichtigende Optikkontur im INESS-Projekt wurde mit den betroffenen Projektpartnern diskutiert. Die festgelegten Änderungen sind in Bild 4-4 angedeutet und wurden im weiteren Projektverlauf in den Prozessadapter integriert. Die Besonderheit des INESS-Systems ist im wesentlichen darin zu sehen, dass in der prozessseitigen Apertur des Prozessadapters die Abbildung der Linien auf das Werkstück und die Beobachtung derselben zu ermöglichen ist. Dies bedeutet, dass die kreisrunde Apertur durch eine quadratisch ausgeformte Apertur ersetzt werden muss. Die Projektion der Triangulationslinie für die nachlaufende Prozessüberwachung, welche zur Erzielung eines großen Triangulationswinkels nicht koaxial durch die Optik, sondern außerhalb der Optik, und somit auch außerhalb des Prozessadapters erfolgen muss, führt zu einer Konturanpassung des Gehäuses des Prozessadapters.

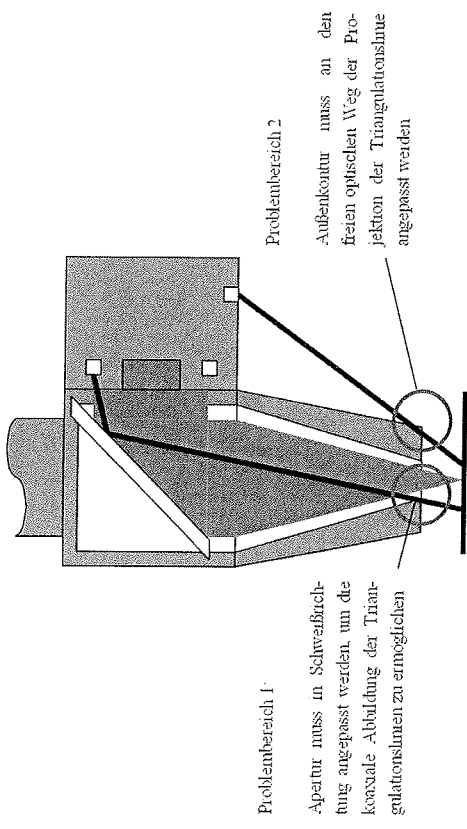


Bild 4-4: Besonderheit des INESS-Systems bezüglich der Gestaltung des Prozessadapters.

Nach Verfügbarkeit des endgültigen Layouts des Bearbeitungskopfkonzpts und der Strahlengänge seitens Trumpf wurde die Außenkontur und die prozessseitige Apertur endgültig angepasst. Der Prozessadapter wurde auf die wesentlichen Funktionen beschränkt, da in der CFO-Optik (controlled focusing optic) von Trumpf bereits eine Schutzglasschubblende und eine Schutzglasüberwachung integriert sind. Der Prozessadapter wurde auf Basis der von Trumpf gelieferten Daten bezüglich des internen und des externen Strahlverlaufs ausgelegt und gefertigt.

Das Bild 4-5 zeigt die Komponenten des Prozessadapters. Das Detektionssystem (1) ist am BEO-Würfel (2) an die Laseroptik angeflanscht. Der Prozessadapter wird an der Schutzglasschubblende (3) befestigt. Das Gehäuse des Prozessadapters (5) wurde so gestaltet, dass einerseits der Strahl des nachlaufenden Lichtschnitts (4) an der Gehäuse-Außenkannte keine Störkontur findet, und andererseits der Leistungsstrahl (6) im oberen Bereich der limitierende Faktor für die Innenkontur) und der Strahlengang der Abbildung (7) im unteren Bereich der limitierende Faktor für die Innenkontur) keiner Störkontur ausgesetzt sind. Der Querjet wird gebildet aus einer Düsenkammer (8) und einer gegenüberliegenden Barriere (9). Die Außenkontur des Gehäuses wurde noch zur Aufnahme von Schutzgas- und Drahtführungseinheiten entsprechend gestaltet. Bei der Realisierung des Prozessadapters wurden Bohrbilder zur Aufnahme von Halterungs- und Verstellteilen zur Zuführung von Schweißzusatzmaterial und Prozessgasen in die Gehäusewandung eingebracht, wie sie in der FGSW seit längerem Verwendung finden. Hier können auf Wunsch des Anwenders auch völlig andere Anflanschen realisiert werden. Die

auch völlig andere Anflanschnungen realisiert werden. Die Umsetzung des Prozessadapters ist in Bild 4-6 zu sehen.

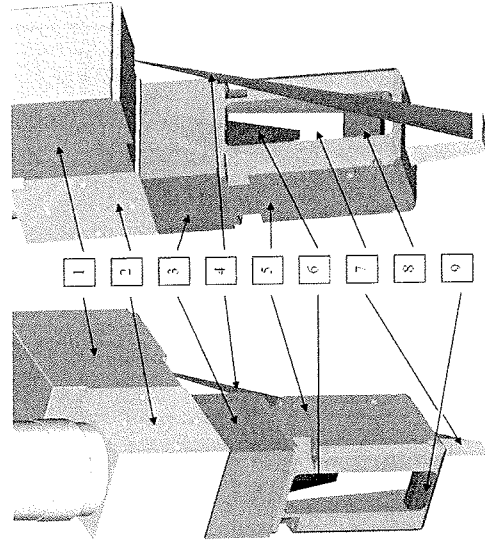


Bild 4-5: Links: Vorderansicht Prozessadapter; rechts: Rückansicht Prozessadapter.

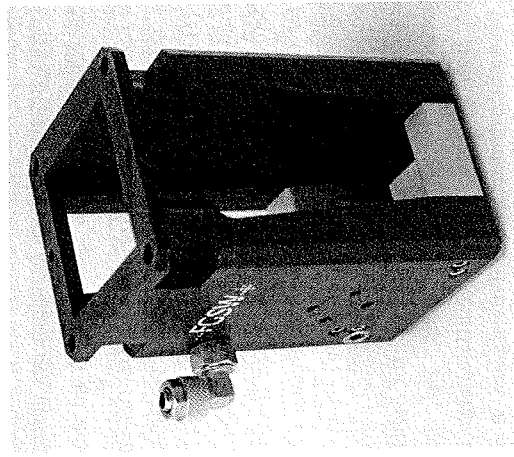


Bild 4-6: FGSW Prozessadapter.

4.3 Schweißkopfintegration

TRUMPF untersuchte aufgrund des gewählten Lösungsansatzes die CMOS-Kamera MV-D1024-80CL von PhotonFocus, eine Sony-CCD und eine weitere Kamera der Fa. Vosskühler auf ihre Eignung für diese Aufgabenstellung hin. Die Kamera von PhotonFocus zeigte das höchste Potential, diese Anforderungen zu erfüllen. Spektralmessungen des Schweißversuches ergaben einen sowohl für Pre- und Post-Sensorik geeigneten, als auch einen von der CMOS-Kamera messbaren Wellenlängenbereich. Hierzu wurde auch das Transmissionspektrum des im Strahlengang einzusetzenden Strahlteilers berücksichtigt.

In Vorversuchen wurde nachgewiesen, dass sowohl das Prozessleuchten, als auch vorlaufend die Nahtlage erkannt werden können. Weitere Schweißversuche ergaben, dass eine Nahtverfolgung auch mit kleinem Vorlauf möglich ist. Das Prozesslicht muss dabei durch einen schmalbandigen Bandpassfilter weiter unterdrückt werden, damit Auflicht und Lichtschnitt nicht überstrahlt werden. Die ursprünglich geforderte Messrate von bis zu 1000 Hz konnte mit den vorgesehenen Fenstergrößen für Pre-, In- und Post-Sensorik und maximal 80 MHz Pixeltakt übertroffen werden.

Ausgehend von der Forderung nach einer hochintegrierten Systemintegration unter Verwendung möglichst vieler Standardkomponenten wurde ein Sensorkopf konzipiert, der an einer eingeführten und im industriellen Einsatz bewährten Fokussieroptik für Festkörperlaser – hier die BEO Fokussieroptik von TRUMPF Laser – adaptiert wird. An dieser Fokussieroptik können neben verfügbaren Komponenten wie z.B. einer Schutzglasüberwachung auch der Prozessadapter der FGSW, siehe Abschnitt 4.2 adaptiert werden.

Die erste, bereits in einer frühen Projektphase vorgestellte Auslegung des neuartigen TRUMPF-Sensorkopfs ist in Bild 4-7 zusammen mit der Fokussieroptik dargestellt. Das optische Design wurde für die ausgewählte Fokussieroptik und zur Integration der Sensorikkomponenten auf Basis der Photonfocus-Kamera entwickelt. Die Optik ist so ausgelegt, dass die gewünschten Messfenster für die Pre-, Post- und In-Processbeobachtung möglich sind. Die Beleuchtungskomponenten ermöglichen koaxial jeweils einen Lichtschnitt für die Pre- und Post-Sensorik, zusätzlich ein Auflicht für die Pre-Sensorik. Ein weiterer externer Lichtschnitt für die Post-Sensorik wurde unter einem hinsichtlich der Auflösung für die Nahtberaupeninspektion günstigeren Triangulationswinkel angeordnet.

Als mechanische Schnittstelle wurde die Flansfläche am Strahlteilerwürfel der YAG-Optik gewählt. Der Kopf kann sowohl an die 0°- als auch die 90°-Bearbeitungsoptik angebaut werden. In der tatsächlichen Ausführung wurde noch ein weiterer Umlenkspiegel integriert. Dieser kann – insbesondere auch im Hinblick auf Aufgabenstellungen der

Projektpartner – gegen einen Strahlteiler ausgetauscht werden und erlaubt dann z.B. die Anbindung von Einzeldetektoren, siehe auch Abschnitt 3.2.1.

Die Ansteuerung der CMOS-Kamera zwecks INESS-spezifischer Konfiguration sowie die Ansteuerung der verschiedenen Beleuchtungskomponenten erfordert eine Zusatzelektronik, siehe Bild 4-8. Als Kommunikationskanal zwischen Prozessrechner und Sensorkopf wurde der CAN-Bus ausgewählt. Die zeitlichen Abschätzungen der Kommunikationsbandbreite konnten in der Praxis erreicht und damit bestätigt werden.

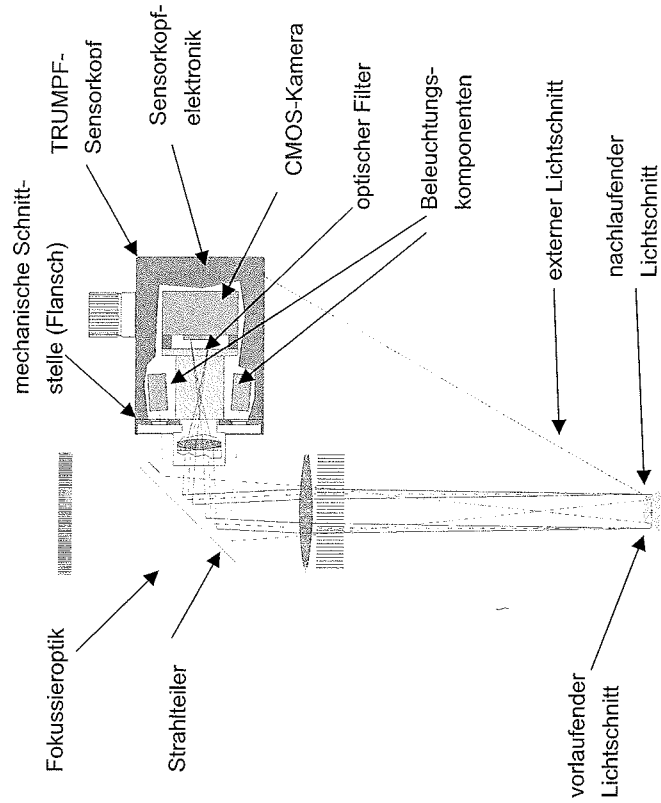


Bild 4-7: Auslegung des TRUMPF-Sensorkopfs mit Fokusoptik.

Das gesamte, im Rahmen des Forschungsvorhabens aufgebaute Sensorsystem von TRUMPF besteht aus folgenden Systemkomponenten:

1. TRUMPF-Sensorkopf mit CMOS-Kamera von PhotonFocus
2. Prozessrechner auf Basis des TRUMPF-Standard Sensorikrechners
3. Framegrabber der Fa. SiliconSoftware
4. Touchscreen für Bedienoberfläche

Einen Überblick dieses Sensorsystem zeigt Bild 4-9.

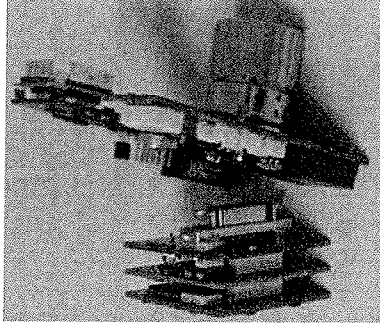


Bild 4-8: Schweißkopfelektronik mit CMOS-OEM-Kamera für den TRUMPF Sensorkopf.

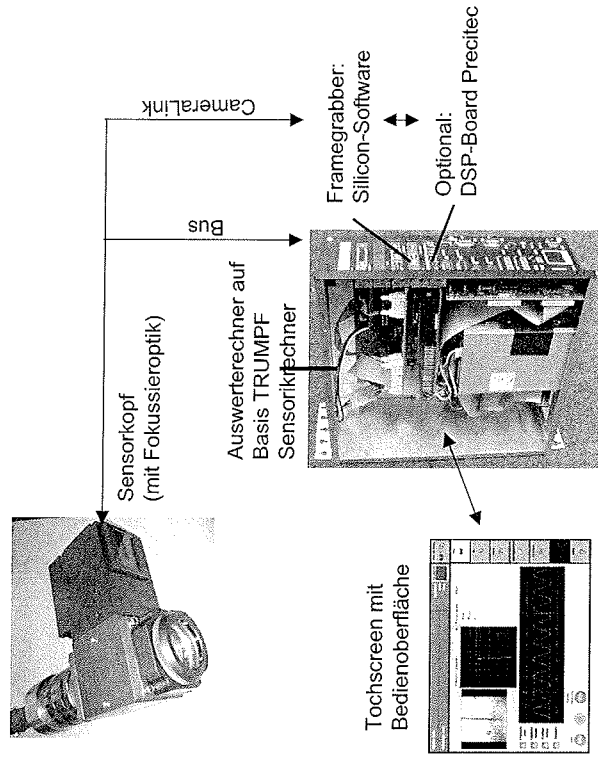


Bild 4-9: Realisiertes INESS-Sensorsystem von TRUMPF.

4.4 Positionierachsen

Besonders vorteilhaft bei der Pre-Sensorik ist die von der übergeordneten Steuerungseinheit, z.B. bei einem Roboter, unabhängige Lateralregelung des Laserfokus mit Hilfe einer separaten Positionierachse. Anwendungen bei Endloschweißanlagen erfordern sogar nur die Messung und Korrektur der Nahtseitenlage, weitere Positionierungen entfallen. Auf das INESS Sensorkonzept von TRUMPF übertragen bedeutet dies die Notwendigkeit einer linearen Positionszachse mit Einsatz im Regelkreis zur Lateralpositionierung des Laserfokus relativ zur Fügestelle. Die Regelalgorithmik läuft dabei auf dem Prozessrechner ab.

TRUMPF wählte bei dieser Zusatzachse den Ansatz, die Leistungselektronik des EC-Motors zu integrieren und damit keine externe Leistungselektronik samt Kabelanbindung und Schaltschrank zu benötigen. Die Sollwerte werden direkt vom Prozessrechner derzeit analog vorgegeben. Bild 4-10 zeigt die Zusatzachse in geöffnetem Zustand, versehen mit einem Winkel zur Montage an einem Roboterflansch.

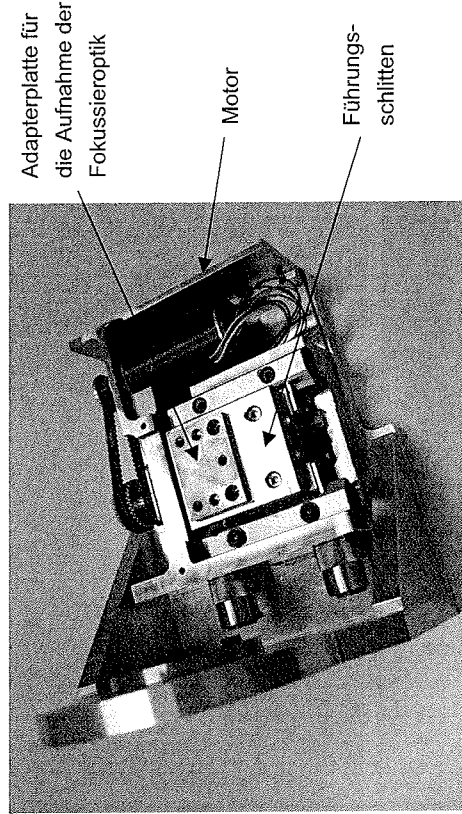


Bild 4-10: TRUMPF-Zusatzachse (ohne Abdeckung).

Die Achse stellt einen Stellweg von insgesamt 20 mm zur Verfügung. Um die Genauigkeit von 0,01 mm zu erreichen, wurde ein direkt messendes Wegmesssystem integriert. Die dynamischen Eigenschaften hinsichtlich Beschleunigung und Geschwindigkeit wurden an die Anforderungen als Positionierachse ausgelegt.

4.5 Rechnerarchitektur

Der hochdynamische Schweißprozess stellt hohe Ansprüche an die zeitliche Auflösung der Messverfahren. Für das Gesamtsystem wurde ein durchgängiges Hard- und Softwarekonzept für Bildverarbeitung, Steuerung, Regelung und Dokumentation umgesetzt. Der Lösungsansatz war, die Daten aller im Rahmen dieses Projekts eingesetzten Sensoren an den Prozessrechner zu übertragen, dort auszuwerten und zu archivieren.

Als Prozessrechner wurde eine Rechnerarchitektur auf Basis eines TRUMPF-Standardprodukts ausgesucht – der Sensoriksteuerung für alle TRUMPF-Werkzeugmaschinen, siehe Bild 4-11. Dieser wurde bzgl. Leistungsfähigkeit erweitert, um den Anforderungen des INESS-Sensorsystems zu genügen. Der PC-basierte Rechner hat einem VIA-Eden-Chipsatz mit einer Leistungsfähigkeit von 1 GHz als Grundlage. Die Besonderheit der Hardware liegt in der industrietauglichen Ausführung und möglichst wenig gesteckten Baugruppen. Als Benutzerschnittstelle wird ein Standard-Touchscreen eingesetzt.

Die Anforderungen der Bildverarbeitung sind nur durch eine für die Aufgabe spezialisierte Beschleunigerhardware möglich, da nur so eine Bildfassung und Bildreduktion mit der angestrebten Messrate möglich ist. Die Steckplätze des Prozessrechners erlauben die INESS-spezifische Anpassung der Rechnerarchitektur. Als Beschleunigerhardware wird ein Framegrabber der Fa. SiliconSoftware eingesetzt, der als FPGA-Board für die schnelle Signalauswertung abgestimmt auf die hochauflösende CMOS-Kamera von PhotonFocus zuständig ist.

Damit steht für die Auswertung der Pre- und Post-Bilddaten genügend Rechenleistung auf der Mainboard-CPU zur Verfügung. Dies gilt auch für die Lageregelung der Positionierachse und die Ansteuerung der Beleuchtungskomponenten über den CAN-Bus.

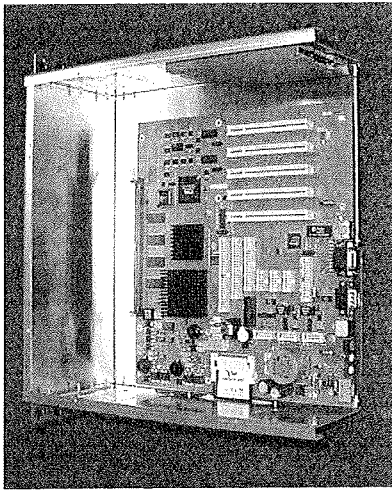


Bild 4-11: Prozessrechner auf Basis des TRUMPF-Standard Sensorikrechners.

Die gesamte Rechnerarchitektur ist in Bild 4-12 nochmals schematisch dargestellt. Der eingesetzte Framegrabber kann – per Software aktivierbar – die Bilddaten über einen separaten Stecker on Board ausgeben. Diese Schnittstelle wird im Forschungsprojekt für die In-Prozessauswertung genutzt. Hierbei werden die In-Prozess Bilder an die DSP-Auswertekarte von Precitec Optonik über ein Flachbandkabel übertragen. Neben der skalierbaren Rechenleistung ist hierbei auch von Vorteil, dass beide Projektpartner unabhängig voneinander eigenständige Entwicklungen bzw. Anpassungen der Software-Algorithmen vornehmen können.

Die grundsätzliche Hardware- und Kommunikationsstruktur ist in Bild 4-13 gezeigt. Über die direkte Schnittstelle zwischen dem Mainboard und der FPGA-Karte werden die grundlegenden Kameraparameter, wie Bildgröße und -position, Exposuretime, LinLog2, Gain und Offset eingestellt. Diese Einstellung wird für alle ROI's (Regions of Interest) vorgenommen, auch für die In-Prozess-Einstellungen. Die direkte Schnittstelle zwischen dem Framegrabber und dem DSP-Board ermöglicht es, die unprozessierten Videodaten aus dem für den In-Prozess-Bereich festgelegten Fenster in den DSP zu transferieren. Dort erfolgt dann die applikationsspezifische Auswertung.

Diese Struktur ist deshalb zielführend, da die notwendigen Algorithmen zur Verarbeitung der In-Prozess Daten und damit zur Bewertung der Bearbeitungsqualität in einer DSP-Struktur (digitaler Signalprozessor) besser zur programmieren sind.

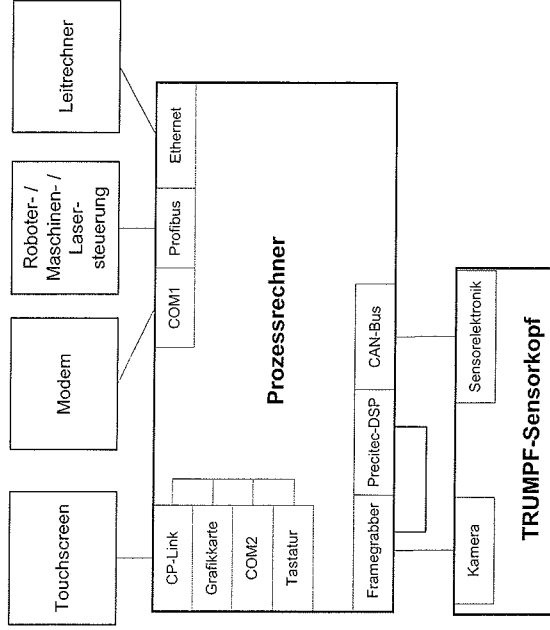


Bild 4-12: Schematische Darstellung der INESS-Rechnerarchitektur.

Im Folgenden ein paar kurze Worte zu den DSPs: Digitale Signalprozessoren sind Mikroprozessoren, die auf die Aufgaben im Bereich der digitalen Signalverarbeitung zugeschnitten sind. Der Code für DSPs umfasst viele arithmetische Operationen, vor allem Multiplikationen und Additionen. Es kommen wenige Verzweigungen vor, wenn doch, dann mit sehr gut vorhersagbaren Sprungzielen. DSPs weisen eine hohe Nebenläufigkeit auf und verarbeiten dabei sehr große Datenmengen. Die Programmiersprache C ist auch bei DSPs zum Standard geworden, jedoch sind zeitkritische Teilprogramme in Assembler zu programmieren. Weil in den meisten signalverarbeitenden Systemen komplexe mathematische Operationen auf zeitkritische Signale (Echtzeit) angewandt werden, besitzen DSPs angepasste Architekturen, um sich wiederholende, numerisch aufwendige Berechnungen zu beschleunigen. DSPs basieren üblicherweise auf einer Architektur, die getrennte Speicher für Befehle und Daten aufweist und dafür separate Speicherbusse zur Verfügung stellt. Dies ermöglicht eine Parallelisierung von Daten- und Befehlsstransfer und damit eine Steigerung der Rechenleistung.

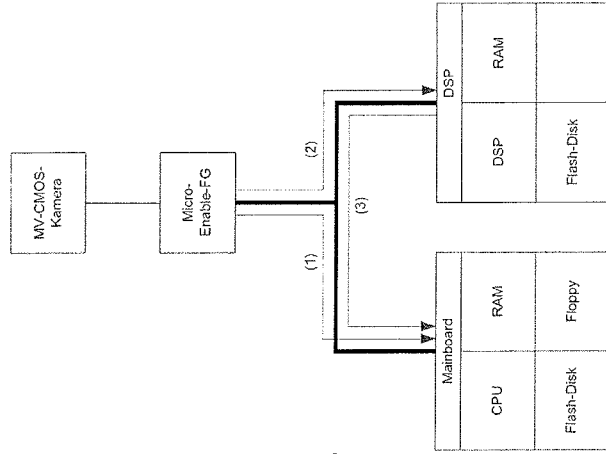


Bild 4-13: Datenlink Schnittstelle zwischen Framegrabber-Karte und Precitec DSP-Karte;
 (1) Datenstrom für Pre- und Post-Daten, (2) Datenstrom für In-Process-Daten,
 (3) Datentransfer der In-Process-Auswertung an den Steuer-PC.

Im Gegensatz dazu sind FPGAs programmierbare Speicherbausteine, die eine Matrix aus Berechnungselementen besitzen und deren Funktionalität durch Konfigurationsbits bestimmt wird. Diese Berechnungselemente, auch als Logikblöcke bezeichnet, sind über eine Vielzahl von Verdrahtungskanälen miteinander verknüpft. Alle internen Ressourcen sind von programmierbaren I/O-Blocks umgeben. Damit können spezifische Schaltungen im FPGA implementiert werden, deren logische Funktionen in den Logikblöcken abgebildet sind und deren Ergebnisse miteinander verknüpft die gesamte Schaltung realisieren. Die meisten heute erhältlichen FPGAs sind SRAM-Bausteine. Bei diesen befinden sich an den Konfigurationsknoten Speicherzellen, die das FPGA konfigurieren, wenn sie programmiert werden. Dies erfordert einen externen Konfigurationsspeicher oder zumindest einen Controller oder Host, damit die Entwurfsdaten in das FPGA geladen werden können. Die Programmierung eines FPGA geschieht in VHDL (VHSIC Hardware Description Language).

Neben der hardwarenahen Software zur Auswertung der Kamerainformationen ist der Treiber für die verwendete Hardware eine wesentliche Komponente in der gesamten

Projektstruktur. Nachdem die Entscheidung getroffen wurde, das INESS-System auf Basis des Betriebssystems LINUX zu programmieren, musste für die DSP-Karte ein entsprechender Treiber erstellt werden, was auch hier die Aufgabe des Hardwareherstellers war.

4.6 Softwarearchitektur

4.6.1 Softwarearchitektur des TRUMPF Prozessrechners

Der Prozessrechner benötigt eine durchgängige Softwarearchitektur, die den Aufgaben Datenreduktion und -aufbereitung, Datentransfer und -dokumentation, Visualisierung und Schnittstellenverwaltung genügt. Hierbei ist zwischen echtzeitkritischen Berechnungen und unkritischen Auswertungen zu unterscheiden. Die Anwendersoftware wurde in verschiedene Module mit Klassenpaketen strukturiert, siehe Bild 4-14. Als Betriebssystem wurde Linux mit der Echtzeiterweiterung RTAI gewählt.

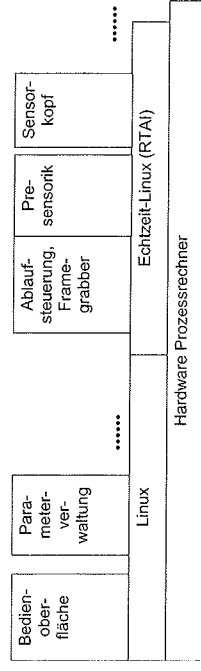


Bild 4-14: Softwarearchitektur des Prozessrechners.

Die Erweiterungsmöglichkeit dieser Architektur zeigt sich auch am Beispiel der Integration der In-Processensorik. Für diese Sensorik, deren eigentliche Auswertung auf dem Precitec eigenen DSP-Board abläuft, wird für die Benutzerschnittstelle ein eigener Prozess auf Linux-Seite gestartet. Der Anwender hat dann die Möglichkeit, zwischen dem Fenster für Pre-/Post- und dem Fenster für die In-Processensorik umzuschalten.

4.6.2 Softwarearchitektur für die In-Processüberwachung

Die Prämisse für alle Arbeiten im INESS-Projekt ist die Modularität, was für den Bereich der Software auch bedeutet, dass die grundsätzliche Möglichkeit besteht, mit dem Ergebnis nicht nur unter dem Betriebssystem LINUX, sondern auch unter WINDOWS® arbeiten zu können. Um hier das Transferpotential optimal auszunutzen, wurde eine Modulstruktur für die Erstellung der hardwarenahen Software erstellt.

Diese Modulstruktur ist in Bild 4-15 dargestellt.

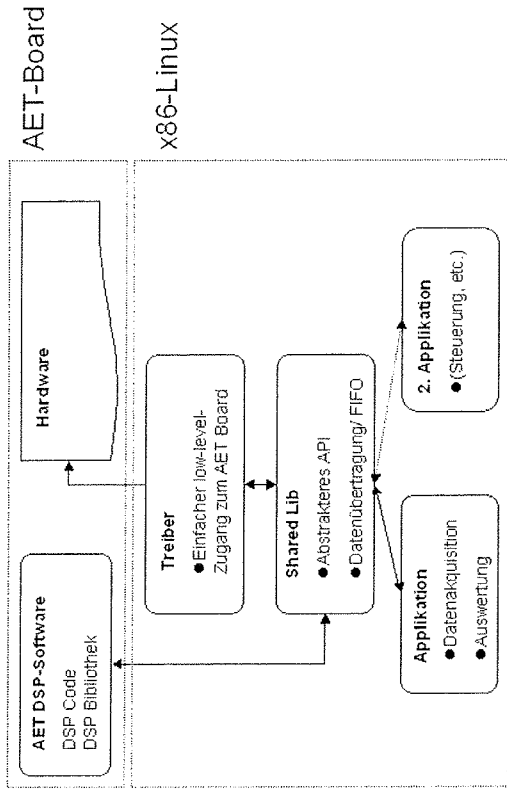


Bild 4-15: Modulstruktur zur Darstellung des Datentransfers zwischen der DSP-Karte (AET Board) für die In-Process-Auswertung über den LINUX-Kernel zur Hardware.

Das Ziel dieser Modulstruktur ist vor allem die direkte und effiziente Unterstützung der Precitec DSP-Karte, gleichzeitig eine API zu gewährleisten, die einfach zu bedienen ist und Freiheiten bei dem Design der Elektronik und der hardwarenahen Software gewährt.

Dieses Multi-Board-, Multi-Process- und Multi-Plattform-Prinzip hat deutliche Vorteile bei der Entwicklung von Applikationen. Die Trennung von Steuer- und Datenakquisitionss-Software, ein grundlegendes Prinzip im Projekt, ermöglichte getrenntes, paralleles Entwickeln. Der DSP-Code zur Auswertung der In-Process-Daten ist unabhängig vom verwendeten Betriebssystem. Ein Vergleich des Shared-Lib-Code zeigt, dass die Betriebssysteme Windows und Linux zu 50 % übereinstimmen, womit ein Transfer der Ergebnisse auch auf andere Systeme möglich ist.

4.7 Datenreduktion Lichtschnitt

Der Einsatz eines Framegrabbers als Beschleunigerhardware erlaubt die Bilddatenerfassung und Bildreduktion mit Abstraten im kHz-Bereich. Die CMOS-Kamera ermöglicht das Auslesen frei wählbarer Teilbilder, wobei die Frameraten jeweils programmierbar und sehr hoch sein können. Verstärkungseinstellungen bzw. Empfindlichkeitscharakteristik (linear, logarithmisch) können für jeden Bildausschnitt unterschiedlich definiert werden.

Eine Analyse der notwendigen Abläufe bei der Bereitstellung von Bilddaten für Pre-, In- und Postprozessoren ergab, dass softwaretechnisch Erweiterungen im Framegrabber für die Kontrolle und Programmierung der CMOS-Kamera und die dynamische Verwaltung von Bilddaten notwendig sind. Auch die Portierung auf die gewählte Linux-Echtzeitplattform RTAI war nötig.

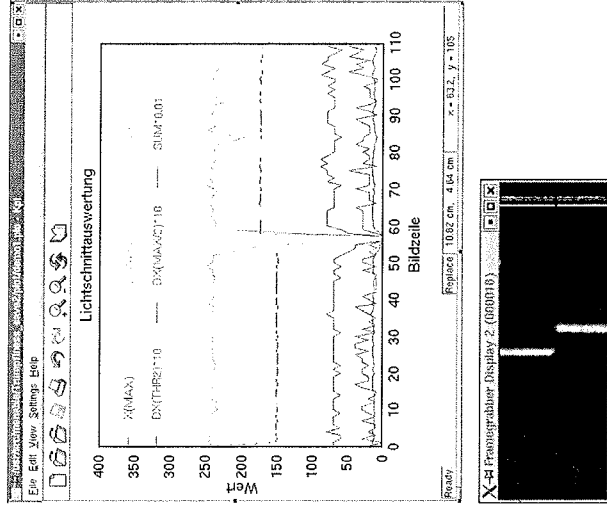


Bild 4-16: Beispiel für die Datenreduktion an einem Lichtschnitt.

Die umgesetzten Maßnahmen erlaubten schließlich die geforderte Bereitstellung der Bilddaten. Bild 4-16 zeigt am Beispiel eines Lichtschnitts die Ergebnisse der Datenreduktions-Hardware.

4.8 Softwareentwicklung

4.8.1 Softwareentwicklung Pre- und Post-Process

Mit Festlegung der Softwarearchitektur des INESS-Sensorsystems von TRUMPF (siehe Abschnitt 4.6.1) konnte auch softwareseitig das Timingkonzept des Gesamtsystems, die Module der Klassenpakete, die Schnittstellen zu den Echtzeitmodulen, die Ansteuerung der Befehlskomponenten und auch die Bedienoberfläche für den Pre- und Post-Process

umgesetzt werden. Im Bild 4-17 dargestellt ist beispielhaft ein mögliches Timingkonzept für die Bildbereiche Pre, In und Post. Aufgrund der Flexibilität ist rein softwareseitig ein anderes Timingkonzept einstellbar.

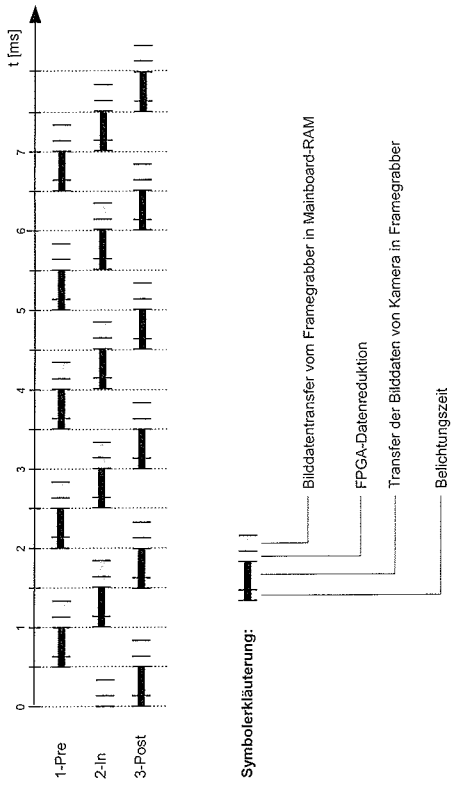


Bild 4-17: Beispielhaftes Timingkonzept für die Bildbereiche Pre, In und Post.

Die für die Benutzerschnittstelle umgesetzten Bedienoberflächen wurden an die TRUMPF-Richtlinien für Touchbedienung angelehnt. Nachfolgend sind einige Beispiele von Ein-/Ausgabemaschinen für die Pre- und Postsensoren, sowie für die Systemparametrisierung dargestellt.

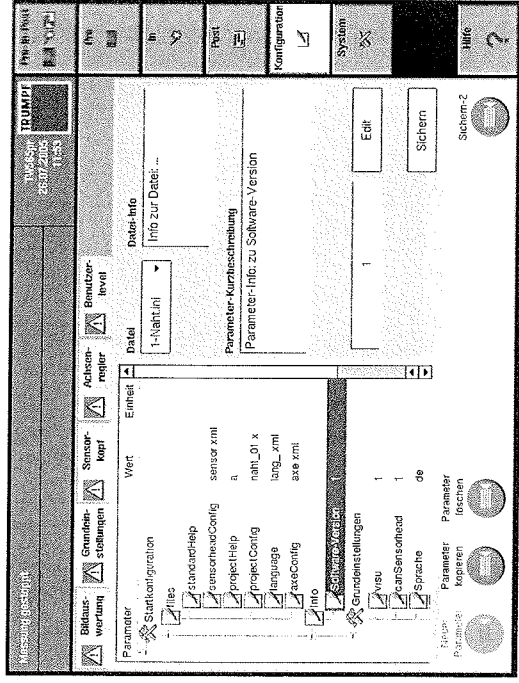


Bild 4-18: Beispiel für eine Eingabemaske: Grundkonfiguration.

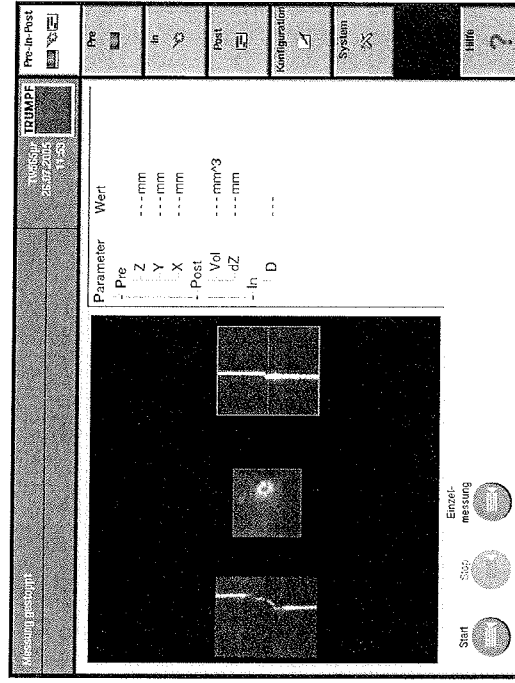


Bild 4-19: Beispiel für die Prozessfenster Pre-In-Post.

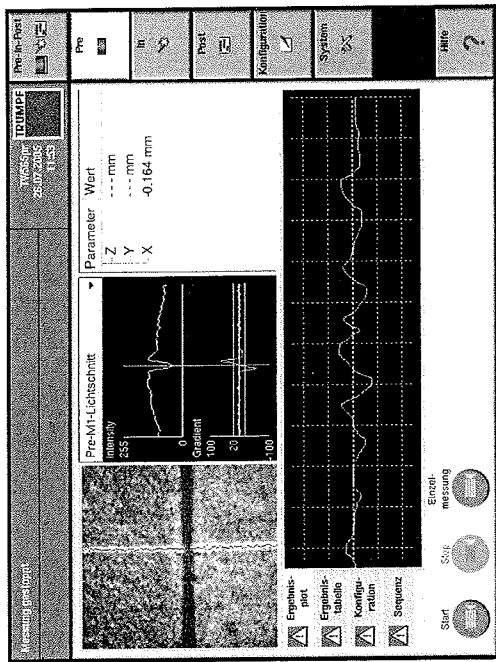


Bild 4-20: Beispiel für die Eingabemaske Pre-Prozesssensorik.

4.8.2 Softwareentwicklung In-Prozess

Das Softwaremodul für die In-Prozess-Auswertung wird als einzelnes Programm auf dem Systemrechner gestartet. Die Kommunikation mit dem Steuerprogramm ist über die Kameraparameter möglich, ansonsten ist dieses Programm völlig autark. Aus Bild 4-13 geht hervor, dass in jedem Fall eine Kommunikation mit dem DSP-Board der Firma Precitec Optronik GmbH stattfinden und dieses Board auch über einen Treiber mit dem PC kommunizieren muss. Im Folgenden sind einige Screenshots der Anwendersoftware für den In-Prozess dargestellt. In dieser Software werden sowohl die Bildverarbeitung, als auch die Photodioden-Sensoren parametrisiert und zusätzlich für jeden Datenkanal die Einstellung für die Fehlerauswertung. Je nach Auswertestrategie können die Signalspuren einer Einlernprozedur unterzogen werden, ansonsten wird über spezielle mathematische Algorithmen eine IO/NIO-Aussage generiert.

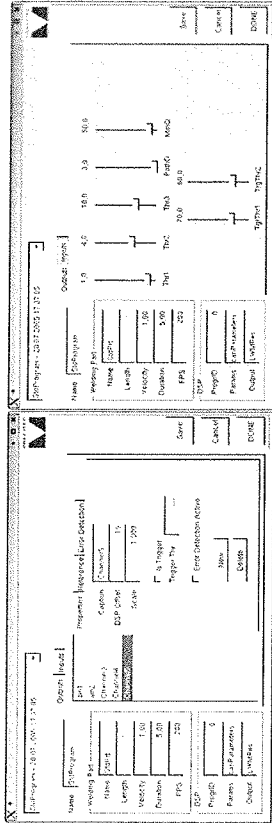


Bild 4-21: Eingabemaske für die In-Prozess-Parametrierung: Einstellung der analogen Signale (Quelle: Photodiode) und der Kameraparameter (Quelle: In-Prozess-ROI).

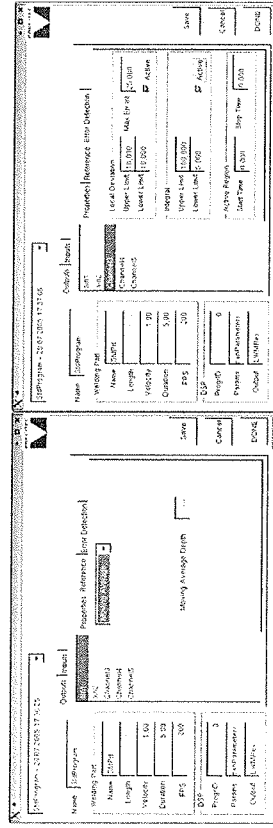


Bild 4-22: Eingabemaske Fehlerverarbeitung.

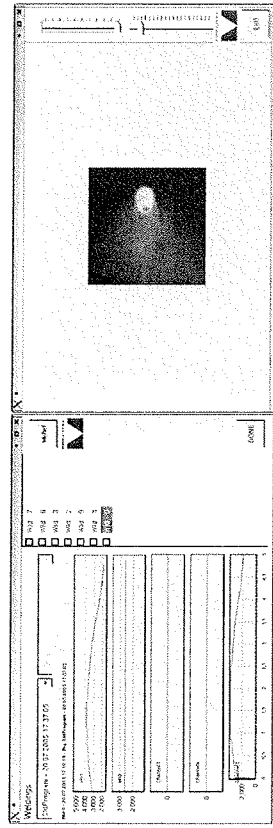


Bild 4-23: Screenshot Datenkurven und In-Prozess Video.

5 Erprobung des Gesamtsystems

5.1 Erprobung an Bauteilen von DaimlerChrysler

Die Applikation des assoziierten Partners DaimlerChrysler für die Evaluierung des Gesamtsystems war die Nahtgeometrie Kehlnaht am Überlappstoß. Im wesentlichen wurden verzinkte Stahlbleche geschweißt, d.h. in Bezug auf die vom Werkstück ausgehenden optischen Emissionen sind die Voraussetzungen für die Sensorik, wie in Abschnitt 3.2.3.3 beschrieben. Es wurden jedoch auch grundlegende Versuche mit dem Werkstoff Aluminium durchgeführt.

Für die geschweißten Testteile wurden verschiedenen Grenzmusterschweißungen durchgeführt mit Variation von Laserleistung, Fokuslage und Nahtposition. Aus der Erfahrung in der Praxis sind das wichtige, potenziellen Fehlerquellen.

5.1.1 Erprobung an einem Testbauteil

Die Randbedingungen für die Schweißungen an den Testbauteilen waren:

Nahtgeometrie: Kehlnaht am Überlappstoß
 Material: DC04 (el. verzinktes Stahlblech), Blechstärke 1,25 mm
 Laserleistung: 4 kW
 Vorschubgeschwindigkeit: 4,5 m/min.

5.1.1.1 Auswertung Pre- und Post-Prozess

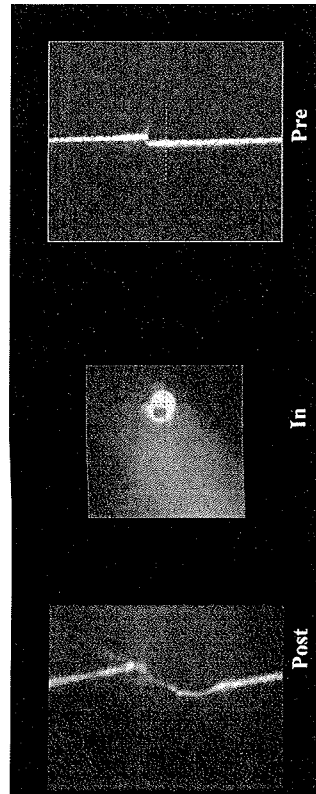


Bild 5-1: Schweißen eines Testbauteils (Messung S061, Bild-Nr. 71).

5 Erprobung des Gesamtsystems

Bewertung zu Bild 5-1:

Pre: Die Kante ist gut detektierbar.

Post: Die Schweißraupe ist gut durch den Post-Lichtschnitt detektierbar.

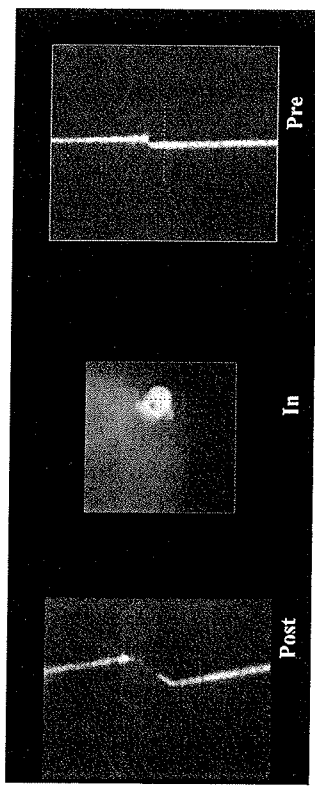


Bild 5-2: Schweißen eines Testbauteils (Messung S061, Bild-Nr. 87).

Bewertung zu Bild 5-2:

Pre: Die Kante ist gut detektierbar.

Post: Stellenweise ist der Post-Lichtschnitt unterbrochen. Für eine sichere Detektion von Löchern ist ein lückenloser Lichtschnitt erforderlich. Durch weitere Erhöhung des Laserleistung des Post-Lichtschnitts kann die Lichtschnittqualität verbessert werden.

5.1.1.2 Auswertung In-Prozess

In dem Abschnitt 3.2.3.3 wurden bereits die potentiellen Nähtfehler erwähnt, die bei der Nahtgeometrie Kehlnaht am Überlappstoß im Karosserie-Rohbau typisch sind und daher durch die In-Prozesssensorik sicher detektiert werden müssen.

Die entsprechenden Momentaufnahmen aus der In-Prozess Perspektive für die typischen Bearbeitungsfehler werden im Folgenden dargestellt:

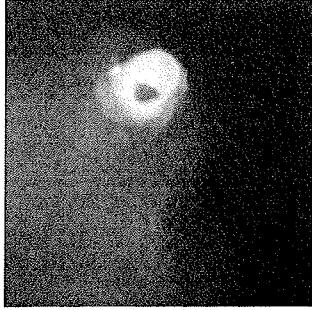


Bild 5-3: Schweißen eines Testbauteils: Screenshot einer IO-Situation.

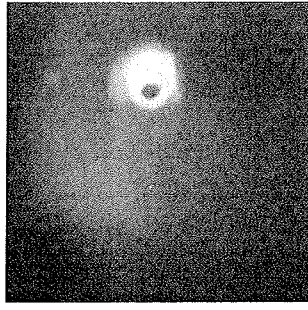


Bild 5-4: Schweißen eines Testbauteils: Screenshot Fehlpositionierung auf Unterblech.



Bild 5-5: Schweißen eines Testbauteils: Screenshot Fehlpositionierung auf Oberblech.

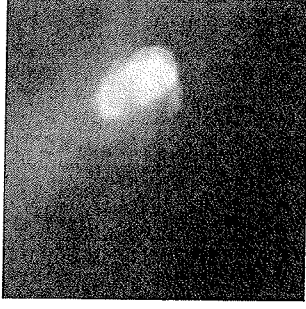


Bild 5-6: Schweißen eines Testbauteils: Screenshot einer unzureichenden Durchschweißung.

5.1.2 Erprobung am Realbauteil *Dachrahmen*

Das Realbauteil Dachrahmen ist in Bild 5-7 dargestellt. Die Randbedingungen für das Realbauteil sind mit denen des Testbauteils vergleichbar.

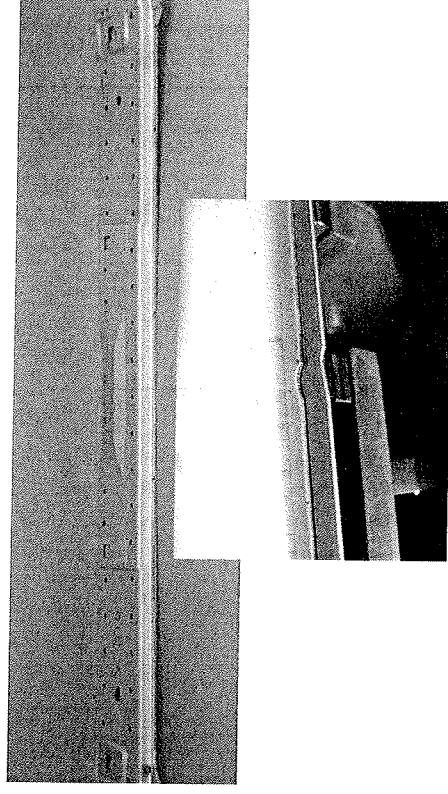


Bild 5-7: Realbauteil zur Evaluierung des Gesamtsystems: Dachquerträger Baureihe 211.

5.1.2.1 Auswertung Pre- und Post-Prozess

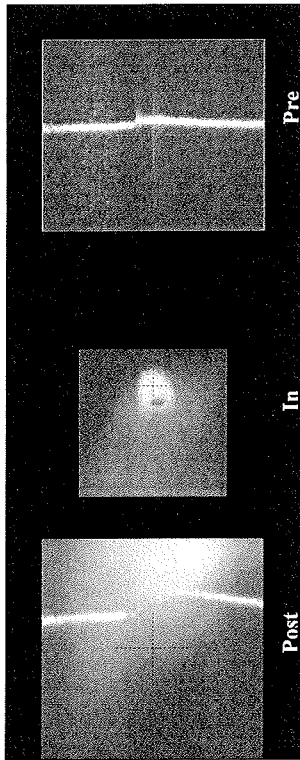


Bild 5-8: Schweißen eines Realbauteils (Messung S104, Bild-Nr. 129).

Bewertung Bild 5-8:

Pre: Der Höhengsprung an der Fügestelle ist durch den Pre-Lichtschnitt detektierbar. Das Prozesslicht wird im Pre-Messfenster nahezu vollständig unterdrückt.

Post: Beim Schweißen von verzinktem Stahl entsteht intensives Prozesslicht, das teilweise den Post-Lichtschnitt überstrahlt. Das Prozesslicht im Post-Messfenster kann durch gezielte Schutzgaszuführung von hinten in die Schmelze reduziert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Unterdrückung des Prozesslichts wäre eine kürzere Belichtungszeit der Kamera in Kombination mit einer weiter erhöhten Laserleistung des Post-Lichtschnitts.

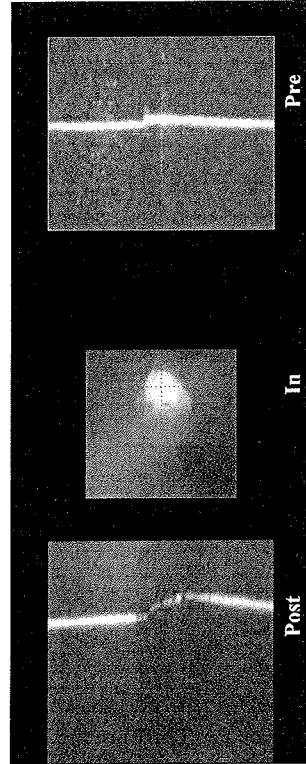


Bild 5-9: Schweißen eines Realbauteils (Messung S104, Bild-Nr. 130).

5 Erprobung des Gesamtsystems

Bewertung zu Bild 5-9:

Pre: Die Kante ist gut detektierbar.

Post: Das Prozesslicht variiert stark von Messung zu Messung. Bei dieser Bildaufnahme ist die Schweißraupe gut durch den Post-Lichtschnitt detektierbar.

5.1.2.2 Auswertung In-Prozess

Das Sensorsystem wurde für die Datenaufnahme so eingestellt, dass ausschließlich die Signale der Photodioden mit einer Abiastrate von 333 Hz aufgenommen und bewertet wurden. Die Datenkurven dieser Schweißvorgänge sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

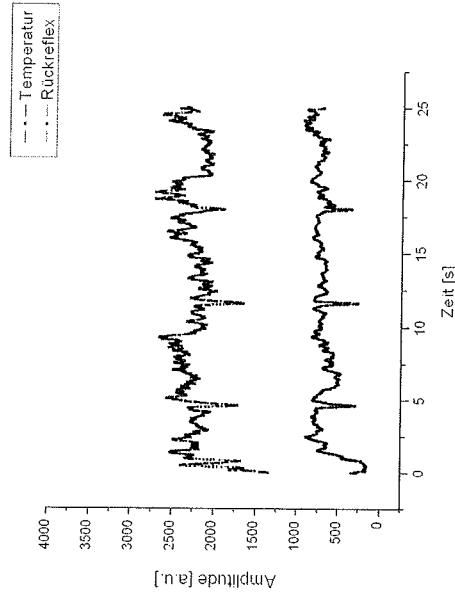


Bild 5-10: Sensorsignale vom Temperatur- (oben) und Rückreflexsensor (unten) vom Schweißvorgang eines Dachquerträgers Laserleistung 4 kW, Vorschubgeschwindigkeit 4,5 m/min.

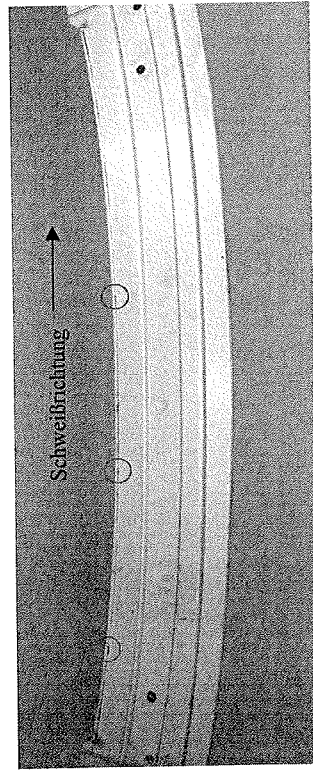


Bild 5-11: Foto des geschweißten Bauteils mit Markierungen.

Ein Vergleich von Bild 5-10 und Bild 5-11 macht deutlich, dass eine Aussage über die Durchschweißung in dem Rückreflexsignal zu erkennen ist. An den markierten Positionen, wo das Signal deutlich einbricht, findet man auf dem Werkstück die Ausbrüche, wie in Bild 5-7 gezeigt. An diesen Stellen ist die Durchschweißung auch vollständig.

Deutlicher wird das Potential des Rückreflexensors zur Überwachung der vollständigen Durchschweißung in Bild 5-12.

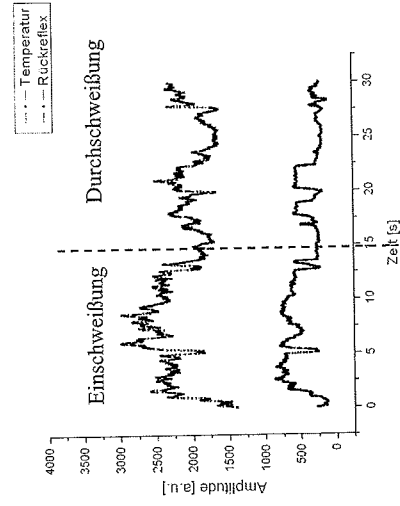


Bild 5-12: Sensordaten vom Temperatur- (oben) und Rückreflexsensor (unten) vom Schweißvorgang eines Dachquerträgers. Laserleistung 4 kW, Vorschubgeschwindigkeit 4,5 m/min.

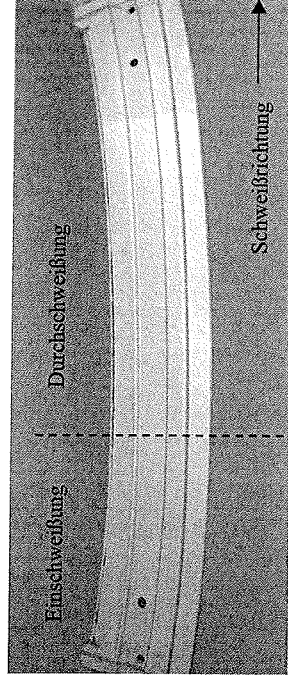


Bild 5-13: Rückansicht eines geschweißten Dachquerträgers (Basis für Signale aus Bild 5-12).

Im Vergleich von Bild 5-12 und Bild 5-13 ist zu erkennen, dass an den Positionen, an denen der Rückreflex ein deutliches Minimum aufweist, eine vollständige Durchschweißung vorliegt und in den Bereichen, wo das Sensorsignal maximal ist, keine vollständige Durchschweißung vorliegt. Somit zeigt das Gesamtsystem aus INESS das erwartete Verhalten in den Sensorsignalen, wie es durch die Theorie vorgegeben ist.

5.1.3 Erprobung am Werkstoff Aluminium

5.1.3.1 Auswertung Pre- und Post-Prozess

Die Randbedingungen für das Schweißen des Aluminiumwerkstoffes waren:

- Nahgeometrie: Kehlnaht
- Material: AA6082, Blechstärke 1,0 mm
- Laserleistung: 4 kW
- Vorschubgeschwindigkeit: 5 m/min

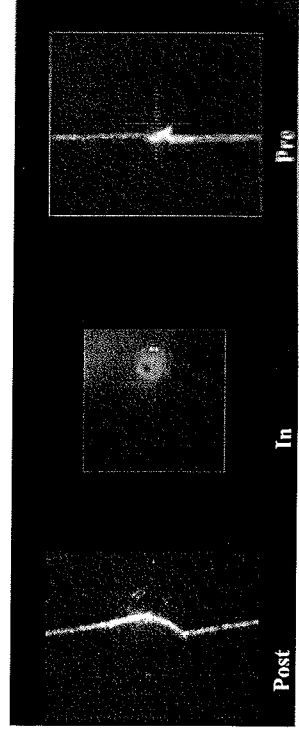


Bild 5-14: Schweißen von Aluminium (Messung S02.5, Bild Nr. 6)

Bewertung Bild 5-14:

Pre: Die Blechkaute ist gut im Pre-Lichtschnitt detektierbar.

Post: Im Vergleich zum Laserstrahlschweißen von Stahl entsteht beim Aluminium in dem für die Post-Messung relevanten Spektralbereich relativ wenig Prozesslicht. Im Post-Messfenster ist nahezu kein störendes Prozesslicht sichtbar. Aufgrund der diffus reflektierenden Oberfläche der Schweißnaht ist das Teil gut durch den Post-Lichtschnitt detektierbar.

5.2 Erprobung an Realbauteilen von Bosch

Die Randbedingungen für das Realbauteil von Bosch im INESS-Projekt waren:

Nahgeometrie:	Bördelnaht
Material:	St 1.4301, Blechstärke 0,4 mm
Laserleistung:	2 kW
Vorschubgeschwindigkeit:	10 m/min

Es wurden im wesentlichen Versuche mit Variation der Spaltbreite durchgeführt.

5.2.1 Auswertung Pre- und Post-Prozess

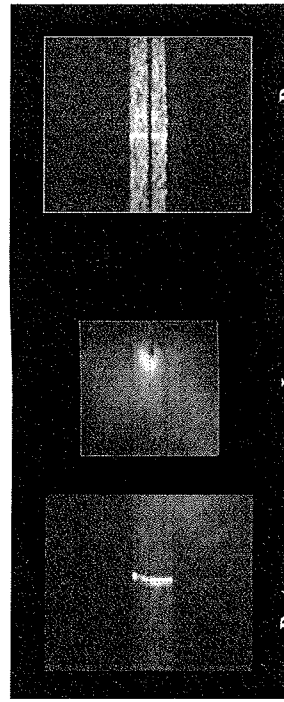


Bild 5-15: Realbauteil Bosch (Messung S039, Bild-Nr. 89, ohne Spalt).

Bewertung Bild 5-15:

Pre: Durch Auflichtbeleuchtung sind der Spalt und die Außenkanten des Bauteils gut detektierbar. Die gemessene Spaltbreite beträgt 0,08mm. Im Pre-Messfenster ist kein Prozesslicht sichtbar.

Post: Die Wölbung der Nahtberraupe ist gut detektierbar.

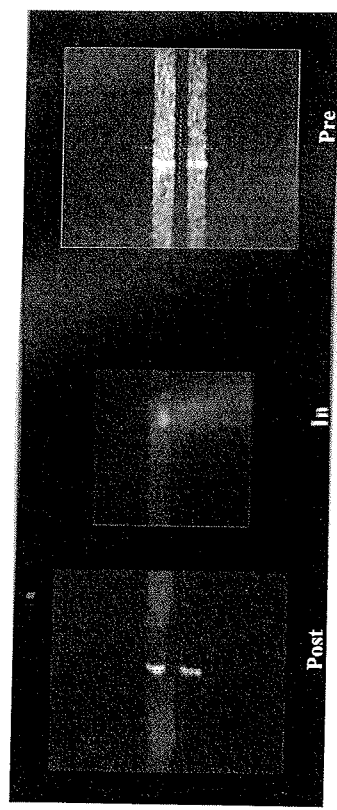


Bild 5-16: Realbauteil Bosch (Messung S049, Bild-Nr. 89, mit Spalt).

Bewertung Bild 5-16:

Pre: Der Spalt und die Außenkanten sind gut detektierbar. Die gemessene Spaltbreite beträgt 0,3 mm.

Post: Bedingt durch den zu großen Spalt fand keine Anbindung zwischen den Teilen statt. Die fehlende Anbindung ist deutlich im Post-Lichtschnitt sichtbar.

5.2.2 Auswertung In-Prozess

Für die Bördelnaht, der Applikation von Bosch im INESS Projekt, liegen noch keine gefestigten Algorithmen vor, daher beschränkt sich die Präsentation der In-Prozess Ergebnisse auf Momentaufnahmen aus dem In-Prozess Bereich und auf deren Beschreibung.

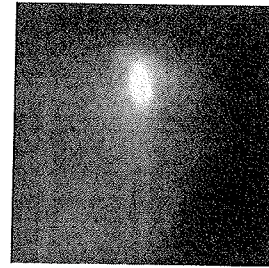


Bild 5-17: In-Prozess-Aufnahme beim Schweißen einer Bördelnaht ohne Spalt.

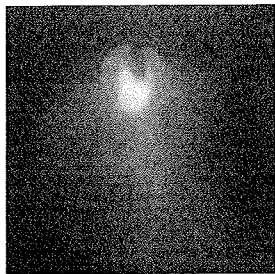


Bild 5-18: In-Prozess-Aufnahme beim Schweißen einer Bördelnaht mit einem Spalt von 0,2 mm zwischen den Blechen.

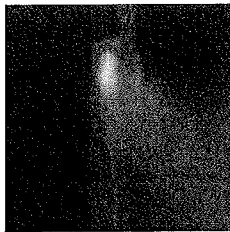


Bild 5-19: In-Prozess-Aufnahme beim Schweißen einer Bördelnaht mit einem Spalt von 0,6 mm zwischen den Blechen.

Die Auswertung der Daten zeigt, dass mit applikationsspezifischen Algorithmen in der Bildverarbeitung eine In-Prozess-Analyse möglich ist. Voraussetzung dafür ist allerdings eine Vorgabe seitens des Anwenders, auf welche potentiellen Schweißfehler die Sensorik ausgerichtet werden soll.

5.3 Erprobung an Realbauteilen von Audi

Verzinktes Stahlblech, I-Naht

Nahtgeometrie: I-Naht

Material: DC06, el. verzinkt, Blechstärke 0,9 mm

Laserteistung: 4 kW

Es wurden Variationen der Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt.

5 Erprobung des Gesamtsystems

5.3.1 Auswertung Pre- und Post-Prozess

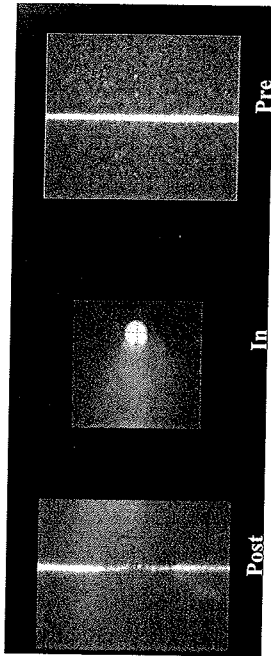


Bild 5-20: Schweißen eines Testbauteils (Messung S082, Bild-Nr. 81, Vorschub 5 m/min).

Bewertung Bild 5-20:

Pre: Der Pre-Lichtschnitt eignet sich gut zur Abstandsmessung. Es ist kein störendes Prozesslicht sichtbar.

Post: Der relativ geringe Nahtneigungswinkel kann gut durch den Post-Lichtschnitt detektiert werden. Mit der gewählten Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min wird das Teil fehlerfrei geschweißt.

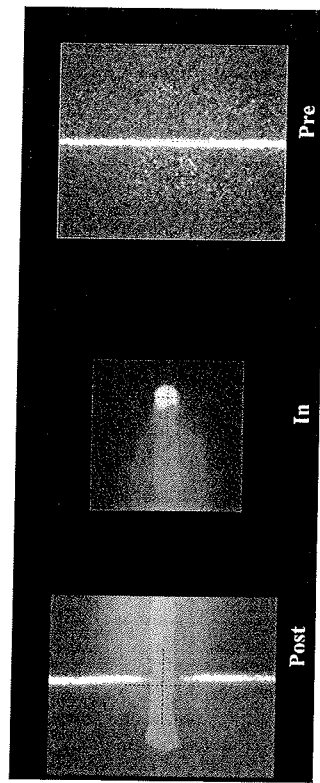


Bild 5-21: Schweißen eines Testbauteils (Messung S083, Bild-Nr. 11, Vorschub 3 m/min).

Bewertung Bild 5-21:

Pre: Der Pre-Lichtschnitt eignet sich gut zur Abstandsmessung.

Post: Durch die auf 3 m/min reduzierte Vorschubgeschwindigkeit wird in das Teil am Anfang ein Spalt geschmitten. Der Spalt ist deutlich im Post-Messfenster erkennbar.

5.3.2 Auswertung In-Prozess

Obwohl das Laserstrahlschweißen in der Automobilindustrie schon weit verbreitet ist, werden die Vorteile dieses Fügeverfahrens noch nicht voll ausgeschöpft. Besonders schwierig erweist sich das prozessichere Überlappschweißen von verzinkten Blechen, wie diese insbesondere in gewölbten Bahnen bei Automobilkarosserien üblich sind. Da die Zinkschicht auf den Karosserieblechen eine vergleichsweise geringe Verdampfungstemperatur gegenüber dem Stahl aufweist, kommt es zu einer starken Zinkausgasung im Bereich der Laserschweißung. Eine kontrollierte und stabile Ausgasung wird üblicherweise über ein definiertes Spaltmaß weniger Zehntelmillimeter zwischen dem Überlappstoß realisiert. In der Praxis führen jedoch bereits kleine Abweichungen von der optimalen Spaltgröße zu Prozessinstabilitäten, die wiederum zu Materialauswürfen, Löchern, Nahtineinfällen oder Anbindungsfehlern führen.

Während der Projektlaufzeit wurden mit dem Gesamtsystem Versuche an solchen Karosserieblechen durchgeführt. Wie oben beschrieben ist der Spalt zwischen den Fügepartnern mit der wesentliche Parameter für eine akzeptable Nahtqualität. Wie schon aus Kapitel 3.2.3 bekannt, gibt es Algorithmen für die kamerabasierte Auswertung der keyholena-hen Schmelze, um eine Aussage über dieses Spaltmaß zu bekommen.

Eine Variation des Spaltmaßes resultiert vorzugsweise in einem nicht akzeptablen Nahtine-fall, im Extremfall dann in einem so genannten *Falschen Freund*, wobei die Anbindung zwischen den Fügepartnern komplett fehlt.

5.3.2.1 Darstellung der Ergebnisse

Für zwei typische Fehlerbilder im Vergleich mit einer IO-Schweißung sind die Datenkur-ven in den folgenden Abbildungen dargestellt. Schon hier zeigen sich die Vorteile der Kombination von Photodioden-Sensoren und Kamera deutlich. Es findet eine optimale Ergänzung statt.

5 Erprobung des Gesamtsystems

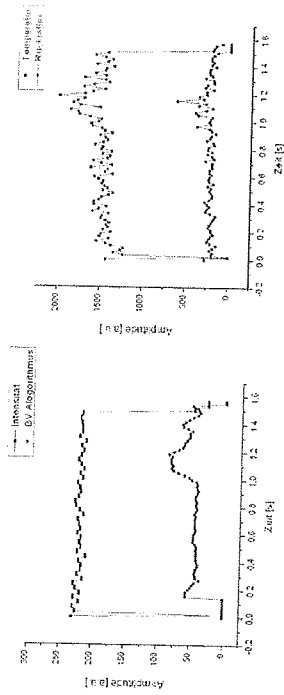


Bild 5-22: Datenkurven einer fast vollständigen IO-Schweißung - Probleme im letzten Drittel der Schweißnaht.

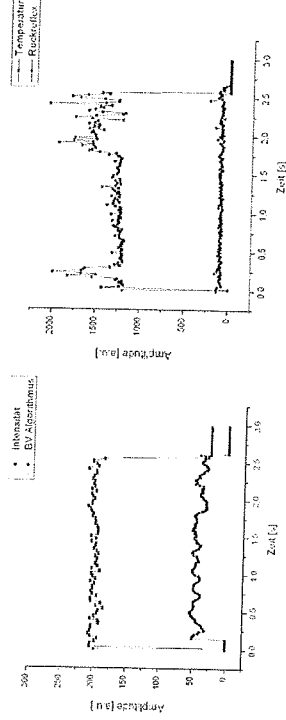


Bild 5-23: Datenkurven einer NIO-Schweißung - langer Schnittspalt am Anfang und Ende (Material DC06, Blechstärke 2 x 0,9 mm, Spalt 0,1 mm, Vorschub 3 m/min, Laserleistung 4 KW).

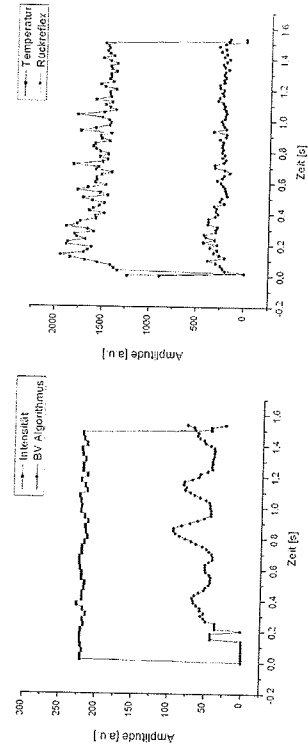


Bild 5-24: Datenkurven einer NIO Schweißung – kleine Löcher und deutlicher Nahtineinfall (Material DC06, Blechstärke 2 x 0,9 mm, Spalt 0,1 mm, Vorschub 3 m/min, Laserleistung 4 KW).

Die zu den Fehlerbilder zugehörigen Videosignale sind beispielhaft in der folgenden Abbildung dargestellt. Es wird deutlich, dass ein kompaktes, keyholenahes Schmelzbad einem IO-Prozess entspricht, bei den Fehlerbildern Nahtemfall und Schnittspalt sich jedoch im hinteren Bereich des Keyholes deutliche Änderungen ergeben.

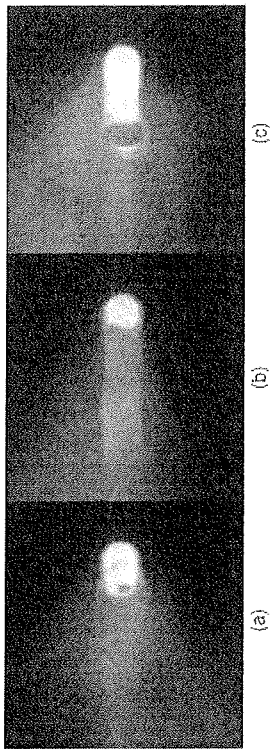


Bild 5-25: Beispielhafte Screenshots von typischen Schweißsituationen, (a) IO-Prozess, (b) Schnittspalt, (c) Nahtemfall.

In jedem der Videobilder ist das Prozessleuchten, bzw. der Metaldampf als Grauschleier über dem Werkstück zu erkennen, das Schmelzbad, bzw. die keyholenahes Schmelze kann dennoch mit bildverarbeitenden Mitteln erfasst und ausgewertet werden.

5.3.2.2 Bewertung der Ergebnisse

Die vorgestellten Beispiele zeigen, dass mit einer Kombination von kamerabasierter Sensorik und Photodioden eine deutlich höhere Fehlerdetektionsrate verbunden ist, als mit separierten Sensorsystemen. Die Bildverarbeitungsalgorithmen können bei dieser Nahtgeometrie I-Naht am Überlappstoß sehr zuverlässig auf die Erkennung des Spaltmaßes ange setzt werden. Der Hintergrund dieser Algorithmen wurde schon in Kapitel 3.2.3 beschrieben.

Für das Fehlerbild *Schnittspalt* zeigt dagegen das Temperatursignal einen deutlichen Effekt. Im Vergleich ist auch zu erkennen, dass die Amplitude des Rückreflex Signals geringer ist, als bei den beiden anderen Beispielen. Deutlich ist jedoch, dass die für die Erkennung des Spaltmaßes entworfenen Bildverarbeitungsalgorithmen bei diesem Fehlerbild keine Reaktion zeigen.

Für eine IO-Schweißung, wie in Bild 3-78 gezeigt, sind die Signale typischerweise keinen großen Schwankungen unterworfen, die Sensorsignale aus den Photodioden zeigen ein so genanntes statistisches Rauschen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projekts INESS wurde ein industrietaugliches Prozessüberwachungssystem für das Laserstrahlschweißen mit Festkörperlasern entwickelt. Das System kombiniert die Pre-, In- und Post-Prozessüberwachung in kompakter Bauweise. Der hohe Integrationsgrad wurde durch Miniaturisierung der Sensorik erreicht.

Zur Steigerung der Aussagekraft gegenüber herkömmlichen Systemen wurde für die Überwachung des In-Prozess-Bereichs Kamera- und Photodioden-Technologie kombiniert. Dabei werden die derzeitigen technischen Möglichkeiten der CMOS-Kameratechnik konsequent genutzt.

Es wurde ein Prozessrechner entwickelt, mit dessen Hilfe die Daten der einzelnen Sensoren zentral erfasst, ausgewertet und archiviert werden. Der Rechner dient weiter der Visualisierung der Daten und der Konfiguration der verschiedenen Sensorsysteme.

Darüber hinaus wurden Methoden für die Entwicklung eines Keyholesensors und eines axial messenden Topometers untersucht. Diese Systeme sind jedoch als Stand-Alone-Lösungen zu verstehen und wurden nicht in den Schweißkopf integriert. Ihr Anwendungsgebiet ist insbesondere die Analyse von Feinschweißungen.

Mit dem INESS-System wurde bereits eine Vielzahl von Applikationen untersucht. Hierbei hat sich das System als flexibles Werkzeug für die Prozessüberwachung beim Schweißen unterschiedlicher Stoßgeometrien erwiesen.

- [1] Behr, F.: *Qualitätskontrollsysteme für das Laserstrahlschweißen*. Aachener Kolloquium für Lasertechnik, 2000.
- [2] Müller-Borhanian, J.: *Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen (INESS)*. Laser Magazin, Vol. 1, S. 60 (2003).
- [3] *Betriebsanleitung Nahsensorik TSD + TSD2*. Trumpf Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, 2001.
- [4] Horn, A.: *Optische Sensorik zur Bahnführung von Industrierobotern mit hohen Bahngeschwindigkeiten*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1994.
- [5] Deinger, C.; Müller-Borhanian, J.; Dausinger, F.: *Development of multi-detector systems for the process monitoring of laser beam welding capable for industrial use*. Proc. of the LANE 2004, Vol. 1, pp. 107.
- [6] Müller, M.G.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung*. Dissertation. Forschungsberichte des IFSW, Herbert Utz Verlag. Stuttgart 2002.
- [7] Mueller-Borhanian, J.; Deiminger, C.; Dausinger, F.; Huegel, H.: *Spatially resolved on-line monitoring during laser beam welding of steel and aluminum*. Proc. ICALEO 2004, Sensing, Monitoring & Control, pp. 80, Art.-No. (1306).
- [8] Müller-Borhanian, J.; Dausinger, F.; Hügel, H.: *Camera based monitoring during laser beam welding – influences of the detection wave length*. In: GERMAN SCIENTIFIC LASER SOCIETY; WLT WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT LASERTECHNIK E.V. (Hrsg.): Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, June 2005. Stuttgart: AT-Fachverlag GmbH, 2005, S. 137.
- [9] Körner, K.; Wiesendanger, T.; Osten, W.: *Verfahren und Anordnung zur Keyhole-Tiefendetektion*, DE 10356415 A1, Anmeldetag: 24.11.2003.
- [10] Ruprecht, A. K.; Wiesendanger, T. F.; Tiziani, H. J.: *Signal evaluation for high speed confocal measurements*, Applied Optics 41 (35), 7410-7415 (2002).
- [11] Wiesendanger, T. F.; Körner, K.; Ruprecht, A. K.; Tiziani, H. J.; Osten, W.: *Fast confocal point sensor for In-Process control of laser welding*, VDI-Berichte Nr. 1860 pp. 131-136 (2004).
- [12] Leonhardt, K.; Droste, U.; Tiziani, H. J.: *Microshape and rough surface analysis by fringe projection*. Appl. Opt. 33, 7477-7488, 1994.
- [13] Gärtner, H.; Lehle, P.; Tiziani, H. J.: *New, highly efficient, binary codes for structured light methods*. SPIE 2599, 4-13, 1995.
- [14] Osten, W.; Andrá, P.; Nadeborn, W.; Jüptner, W.: *Modern approaches for absolute phase measurement*. SPIE 2647, 529-540, 1995.

- [15] Hof, A.; Hanßen, A.; Küchel, M.; Schütz, J.: *Streifenprojektionsmethoden in der 3-D-Messtechnik*. VDI Berichte Nr. 1006, (1992) 67-80.
- [16] Windecker, R.; Fleischner, M.; Tiziani, H. J.: *Three-dimensional topometry with stereo microscopes*. Opt. Eng. 36, 3372-3377, 1997.
- [17] Wilson, T. ed.: *Confocal Microscopy*. San Diego: Academic Press, 1990.
- [18] Jordan, M.; Wegner, M.; Tiziani, H. J.: *Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy*. Measurement Science & Technology 9, 1142-1151 (1998).
- [19] Tiziani, H. J.; Wegner, M.; Steudle, D.: *Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis*. Opt. Eng. Vol 39, No 1, 32-39 (2000).
- [20] Wilson, T.; Carlini, A. R.: *Size of the detector in confocal imaging systems*. Opt. Lett. 12(No. 4): 227-229, 1987.
- [21] Tiziani, H. J.; Achi, R.; Krämer, R. N.; Wiegers, L.: *Theoretical Analysis of Confocal Microscopy with Microlenses*. Appl. Opt. Vol. 35, No. 1, 120-125 (1996).
- [22] Tiziani, H. J.; Uhde, H. M.: *Three dimensional analysis by a microlens array confocal arrangement*. Appl. Opt. Vol. 33, No. 4, 567-572 (1994).
- [23] Hessler, T.; Rossi, M.; Pedersen, J.; Gale, M. T.; Wegner, M.; Steudle, D.; Tiziani, H. J.: *Microlens arrays with spatial variation of the optical functions*. Pure & Applied Optics 6, 673-681 (1997).
- [24] Tiziani, H. J.; Achi, R.; Krämer, R. N.; Hessler, T.; Gale, M. T.; Rossi, M.; Kunz, R. E.: *Microlens arrays for confocal microscopy*. Optics & Laser Technology, Vol. 29, No. 2, 85-91 (1997).
- [25] Tiziani, H. J.; Wegner, M.; Steudle, D.: *Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis*. Opt. Eng. Vol 39, No 1, 32-39 (2000)
- [26] Byron, S. L.; Timothy, C. S.: *Profilometry with a coherence scanning microscope*. Appl. Opt. 29, 3784-3788, 1990.
- [27] Deck, L.; de Groot, P.: *High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry*. Appl. Opt. 33 (1994) 7334-7338.
- [28] Windecker, R.; Haible, P.; Tiziani, H. J.: *Fast coherence scanning interferometry for measuring smooth, rough and spherical surfaces*. J. Mod. Opt. 42, 2059-2069, 1995.
- [29] Molesini, G.; Pedrini, G.; Poggi, P.; Quericioli, F.: *Focus-wavelength encoded optical profilometer*. Opt. Comm. 49: 229-233, 1984.
- [30] Tiziani, H. J.; Uhde, H. M.: *Three dimensional imaging sensing by chromatic confocal microscopy*. Appl. Opt. Vol. 33, No. 10, 1838-1843 (1994).
- [31] Lin, P. C.; Sun, P. C.; Zhu, L.; Fainman, Y.: *Single-shot depth-section imaging through chromatic slit-scan confocal microscope*. Appl. Opt. 37: 6764-6770, 1998.

- [32] Ruprecht, A. K.; Wiesendanger, T. F.; Tiziani, H. J. *Chromatic confocal microcopy with finite pinhole size*. Opt. Lett. 29 (18), (15. Sept. 2004).
- [33] Lücke, P.; Last, A.; Mohr, J.; Ruprecht, A.; Osten, W.; Tiziani, H.; Lehmann, P.: *Confocal microoptical distance-sensor for precision metrology*. Optical Sensing, Proceedings of SPIE Vol. #5459-22, Strasbourg, 27-30 April 2004.
- [34] Ruprecht, A. K.; Pruss, C.; Tiziani, H. J.; Osten, W.; Lücke, P.; Last, A.; Mohr, J.; Lehmann, P.: *Confocal micro-optical distance sensor: principle and design*. Optical Metrology, Proceedings of SPIE Vol.#5856-15, Munich, 13-17 June 2005.
- [35] Körner, K.; Ruprecht, A.: *Anordnung und Verfahren zur hochdynamischen, konfokalen Technik*. DE 10321885 A1, Anmeldetag: 07.05.2003.
- [36] Dobson, S. L.; Sun, P.-C.; Fainman, Y.: *Diffraction lenses for chromatic confocal imaging*. Appl. Opt. 36 (20), 4744-4748, 1997.
- [37] Ruprecht, A. K.; Körner, K.; Wiesendanger, T. F.; Tiziani, H. J.; Osten, W.: *Chromatic confocal detection for high speed micro-topography measurements*. Electronic Imaging, Proceedings of SPIE Vol. #5302-6, San Jose (CA), 18-22. Januar 2004, page 53-60.
- [38] Wiesendanger, W.; Ruprecht, A.; Körner, K.; Tiziani, H.; Osten, W.: *Konfokaler Sensor zur Messung der Einschweißtiefe im Keyhole*. 105. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO) Bad Kreuznach, 1.-5. Juni 2004.
- [39] Goth, K.; Herzinger, T.; Kogel-Hollacher, M.: *Online quality assurance of laser welded edge joints in series production*, EALA 2002.
- [40] Dietz, C.; Jurca, M.; Schlichtermann, L.; Kogel-Hollacher, M.; Breitschwerdt, S.; Schmid, C.; Rowold, L.: *Closed-Loop Control System for Laser Welding of Transmission Parts*, Proc. ICALOE 1998, LIA Vol. 85c.
- [41] Kogel-Hollacher, M.; Nicolay, T.; Kattwinkel, A.; Müller, M. G.; Müller, J.: *Online Process Monitoring in Laser Materials Processing – Techniques for the Industrial Environment*, Proc PICALO 2004.
- [42] Kogel-Hollacher, M.; Dietz, C.; Nicolay, T.; Kattwinkel, A.; Herzinger, T.; Kessler, B.; Schürmann, B.; Schmidt, M.; Müller-Borhanian, J.: *Camera based process monitoring of the CO₂ and ND:YAG laser welding process: Experiences from applications in automotive industry*, Proc. ICALOE 2004.

Anhang: Liste der Autoren

- Topografie, axial messend**
Wiesendanger¹, T.; Ruprecht¹, A.; Körner¹, K.; Tiziani¹, H.; J.Osten¹, W.
- Keyholesensor**
Wiesendanger¹, T.; Ruprecht¹, A.; Körner¹, K.; Tiziani¹, H.; J.Osten¹, W.
- Einzeldefektoren**
Deininger², C
- Kamerabasierte Schmelzbad- und Kapillarüberwachung**
Kogel-Hollacher³, M.; Müller-Borhanian², J
- Kamerabasierte Auswertung der reflektierten Leistung**
Müller-Borhanian², J
- Kamerabasierte Lichtschnittprojektion und Graubildauswertung**
Hohnadel⁴, J.Pfizner⁴, D., Magg⁴, W.
- Bearbeitungskopfvarianten, Prozessadapter**
Deininger², C
- Sensorik und Achsen**
Hohnadel⁴, J.Pfizner⁴, D., Magg⁴, W.
- Schweißkopffintegration**
Hohnadel⁴, J.Pfizner⁴, D., Magg⁴, W.
- Schweißkopfelektronik**
Hohnadel⁴, J.Pfizner⁴, D., Magg⁴, W.
- Rechnerarchitektur**
Hohnadel⁴, J.Pfizner⁴, D., Magg⁴, W.; Kogel-Hollacher³, M.; Kattwinkel³, A.
- Softwarearchitektur**
Hohnadel⁴, J.Pfizner⁴, D., Magg⁴, W.; Kogel-Hollacher³, M.; Kattwinkel³, A.
- Datenreduktion Lichtschnitt**
Hohnadel⁴, J.Pfizner⁴, D., Magg⁴, W.
- Softwareentwicklung**
Hohnadel⁴, J.Pfizner⁴, D., Magg⁴, W.; Kogel-Hollacher³, M.; Kattwinkel³, A.
- Evaluierung Gesamtsystem**
Hohnadel⁴, J.Pfizner⁴, D., Magg⁴, W.; Kogel-Hollacher³, M.; Kattwinkel³, A.

¹Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart

²Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge mbH

³Precitec Optronik GmbH

⁴TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG

Danksagung

Die Ergebnisse dieses Abschlussberichtes stammen aus Untersuchungen, die im Rahmen des Verbundprojekts „Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen (INESS)“ durchgeführt wurden.

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung und beim Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) für die Betreuung. Weiter sei all jenen gedankt, die durch ihre Mitarbeit und Unterstützung zum Gelingen des Projekts beigetragen haben, insbesondere sei hier der assoziierte Industriekreis, bestehend aus den Firmen DaimlerChrysler AG, Robert Bosch GmbH und Audi AG, erwähnt.

Der zunehmende Einsatz des Laserstrahlsschweißens in zahlreichen Bereichen der industriellen Fertigung ist im Wesentlichen durch eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit gegenüber konkurrierenden Verfahren begründet. Die Umsetzung der hohen Wirtschaftlichkeit geht jedoch einher mit der Forderung nach einer automatisierten Qualitätsüberwachungs- und Regelstrategie. Mit diesem Thema beschäftigt sich im Zeitraum von 2002 bis 2005 das Verbundprojekt „Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlsschweißen“ (INESS).

Im Mittelpunkt des Projekts stand die Entwicklung eines integrierten und damit industrierelevanten Prozessüberwachungssystems für das Laserstrahlsschweißen mit Festkörperlasern. Das realisierte System kombiniert eine Pre-, In- und Post-Prozessüberwachung in kompakter Bauweise, was durch eine Fusionierung mehrerer Messprinzipien unter Zuhilfenahme bildgebender Sensorik erreicht wurde.

Das INESS-Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PFT), betreut.