



Schlussbericht ShipLight / ILT

ShipLight – Nachhaltiger Schiffsleichtbau durch effizientes
und flexibel automatisiertes 3D-Laser-Plasma-
Hybridschweißen

Teilvorhaben

Mehrgrößen-Prozess-Überwachung und Regelung mittels
koaxialer Echtzeit-Bildverarbeitung beim Fügen von
Leichtbaustrukturen mit einem Laser-Plasma Hybrid-
Prozess

Förderkennzeichen: 03SX389M
Laufzeit des Vorhabens 01.06.2015 – 31.08.2018

Fraunhofer Projektnr. 132942 SHIPLIGHT
Aachen, den 13.02.2019

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Berichtersteller:
Wolfgang Fiedler

Mit Beiträgen von:
Frédéric Schulze

Inhalt

I. Teil -	Kurzdarstellung	1
1.	Aufgabenstellung	1
2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	1
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
4.	Wissenschaftlicher und technischen Stand, an den angeknüpft wurde	5
4.1.	Optoelektronische Prozessüberwachungssysteme	5
4.2.	Ortsintegrierend messende Systeme	5
4.3.	Bildgebende Systeme	6
4.4.	Grenzen der bisher angewandten Lösungen	7
4.5.	Normen und Regelwerke	7
4.6.	Bereits durchgeführte Arbeiten des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik	8
4.6.1.	Koaxialer Prozessbeobachtung beim Fügen mit Laserstrahlung	8
4.6.2.	Koaxiale Prozessbeobachtung beim Fügen von 3D-Strukturen mit dem Laser-MSG-Hybrid-Prozess	9
4.7.	Erklärung zur Nutzung von Schutzrechten	12
4.8.	Angabe der verwendeten Literatur	12
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14
II. Teil -	Eingehende Darstellung	15
1.	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	15
1.1.	Definition der Anforderungen an das Prozess-Monitoring und Regelungs-System	16
1.2.	Entwicklung eines Systems zur koaxialen Prozessvisualisierung	17
1.2.1.	Erprobung der Prozessvisualisierung im VIS oder NIR	17
1.2.2.	Untersuchung der Abhängigkeit von Beleuchtungsrichtung zu Beobachtungsrichtung	20
1.2.3.	Installation und Bereitstellung des koaxialen Prozessvisualisierungssystems	25
1.3.	Entwicklung eines Systems zur bildbasierten Fugenfolge in Echtzeit	25
1.3.1.	Implementierung von Algorithmen zur Vorverarbeitung der Bilddaten auf programmierbarer FPGA-Hardware und zur texturbasierten Fugenfolge auf GPU	28
1.3.2.	Kontrastverbesserung durch Histogrammstreckung	30
1.3.3.	Bildverschärfung durch Tiefpassfilterung	30
1.3.4.	Texturbasierte Segmentierung	32
1.3.5.	Objekterkennung	32
1.3.6.	Plausibilitätskontrolle und Glättung des Signals mit Kalman Filter	34

1.3.7.	Offline Annotation der Prozessaufnahmen und Vergleich mit Fugenlagendetektion durch vorhandene texturbasierte Bildverarbeitungsalgorithmen	35
1.3.8.	Weiterentwicklung der texturbasierten Fugenfolge hinsichtlich Detektion aller definierten Stoßfugenkonfigurationen unter Berücksichtigung der relativen Lage im Raum	39
1.4.	Umsetzung des Prozess-Monitoring-Regelungs-System (PMCS) mit Planung, Aufbau und Integration eines Prozess-Monitoring-Control-Systems (PMCS)	52
1.4.1.	Definition und Abstimmung der Schnittstellen	52
1.4.2.	Softwarearchitektur für das PMCS-System	54
1.4.3.	PMCS-Software-Interfaces	55
1.4.4.	Aufbau der Hardware des vollautomatisierten 3D Bearbeitungssystems	60
1.4.5.	Aufbau der Hardware der mobilen PMCS-Einheit für das Traktorsystem und handgeführte laserunterstützte MSG-Schweißen	62
1.5.	Validierung – Feststellung und Bewertung der Fähigkeit des PMCS	64
1.5.1.	Validierung am Automatiksystem	64
1.5.2.	Validierung der Fugenfolge am Demonstrator der Meyer Werft	65
1.5.3.	Demonstration koaxiale Prozessvisualisierung und Fugenfolge im Vorlauf am Handschweißsystem	69
2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	72
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	73
4.	Verwertbarkeit der Ergebnisse	73
5.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	74
6.	Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	75
7.	Danksagung	75

I. Teil - Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Ziel des Teilvorhabens war die Konzeption, Realisierung, Integration und Validierung einer Mehrgrößen-Prozessüberwachung und -Regelung mittels Echtzeitbildverarbeitung zum Fügen mit dem laserunterstütztem MSG-Schweißprozess in einem Automatik- in einem Traktor- und in einem Hand-Schweißsystem.

Mit einem koaxial im Strahlengang der Fokussieroptik für den Laserstrahl angeordneten Bildsensor und mittels Echtzeit-Bildverarbeitung sollte während des Fügens von Kehlnähten am T-Stoß bzw. von I-Nähten am Stumpfstoß mit dem laserunterstütztem MSG-Schweißprozess

- der Abstandes zwischen Stoßfuge und Laserstrahl (TCP)
- die Fugenbreite für eine adaptive Regelung

gemessen und die Messwerte direkt an die Robotersteuerung übermittelt werden. Weicht der gemessene Abstand zwischen Fuge und TCP vom Sollwert ab, weil z.B. sich das Werkstück während der Bearbeitung thermisch bedingt verzieht, korrigiert ein Mehrgrößen-Proportional-Integral-Regler in der Robotersteuerung die Position so, dass die Abweichung ausgeglichen wird. Daneben steuert die Robotersteuerung - abhängig von der aktuellen Bahngeschwindigkeit und der Fugenbreite - die Leistung von Laserstrahl und Lichtbogen sowie die Fördergeschwindigkeit des Fülldrahtes.

Der klassische, auf Helligkeitsgradienten basierende Ansatz zur Segmentierung digitaler Bilddaten versagt bei anspruchsvollen wie der hier gestellten Aufgabe. Für die Bestimmung des Gradienten als Grenze eines Segmentes werden lediglich die absoluten Helligkeitsinformation der unmittelbar um den betrachteten Bildpunkt herum angeordneten Pixel genutzt. Bedingt durch unvermeidliches Rauschen führt dies häufig zu Fehlern bei der Segmentierung von Bildelementen. In dem Vorhaben wird deshalb die robustere aber auch rechenintensivere texturbasierte Segmentierung von digitalen Bilddaten verwendet. Dabei werden die Bilddaten mit einer Filterbank analysiert und abschließend verschiedenen Texturklassen zugeordnet. Da die texturbasierte Segmentierung deutlich mehr Informationen auswertet, ist sie robuster und weniger fehleranfällig. Sie erfordert aber deutlich mehr Rechenleistung, was eine Echtzeimentimentierung bisher unwirtschaftlich gemacht hat. Mit der stetig steigenden Leistungsfähigkeit von programmierbaren Logikgattern (Field Programmable Gate Arrays FPGA) sowie PC-Hardware, wie z.B. Grafikkarten mit einer Vielzahl parallel arbeitender Grafikprozessorkernen, wird die für die Fugenfolgeregelung erforderliche Echtzeimentimentierung der rechenintensiven texturbasierten Bildverarbeitungsalgorithmen erstmalig wirtschaftlich umgesetzt.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Teilvorhaben „Mehrgrößen-Prozess-Überwachung und Regelung mittels koaxialer Echtzeit-Bildverarbeitung beim Fügen von Leichtbaustrukturen mit einem Laser-Plasma Hybrid-Prozess“ wurde innerhalb des Verbundprojektes ShipLight durchgeführt. Das Verbundprojekt ShipLight

ordnete sich in das Forschungsprogramm für Schiffbau, Schifffahrt und Meerestechnik des BMWi „Maritime Technologien der nächsten Generation“ innerhalb des Schwerpunktes „Produktionstechnik zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit maritimer Unternehmen“ mit neuen Fügetechnologien und daran angepassten neuartigen Konstruktionskonzepten ein. Die im Projekt erforschten und entwickelten innovativen Fertigungs-, Qualitätssicherungs-, Konstruktions- und Sicherheitsmethoden liefern dem deutschen Schiffbau die Möglichkeit, dünnwandigen nachhaltigen Schiffsleichtbau mit völlig neuen Konzepten bei einem gleichzeitig beschleunigten Herstellungsprozess durchzuführen und auf diese Weise den stetig steigenden Kunden-, Umwelt- und Klimaschutzanforderungen mit entsprechenden gesetzlichen Vorschriften Rechnung zu tragen, den Ressourceneinsatz zu senken sowie kostengünstiger zu produzieren.

Das ShipLight-Konsortium bestand aus elf direkten Verbundpartnern:

MEYER WERFT GmbH & Co. KG, Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG, Carl Cloos Schweisstechnik GmbH, IPG Laser GmbH, Laserline GmbH, Precitec GmbH & Co. KG, LASER on demand GmbH, DNV GL SE, SET Scientific and Efficient Technologies Ltd., Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT.

Mit Wirkung zum 01.01.2018 wurden sowohl die Tätigkeiten des LZN Laser Zentrum Nord GmbH als auch des Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) der Technische Universität Hamburg-Harburg in die Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT eingegliedert.

Des Weiteren wirkte die TRUMPF GmbH + Co. KG und die Simufact Engineering GmbH als assoziierte Verbundpartner im Gesamtprojekt mit.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde mit einer Projektlaufzeit von drei Jahren beantragt und startete mit einem Kick-off Treffen am 2. Juni 2015 in Hamburg. Das Vorhaben wurde nach drei Jahren und einer kostenneutralen Verlängerung von drei Monaten zum 31.08.2018 beendet. Die Verlängerung war begründet in der Komplexität der einzelnen Forschungsaufgaben und insbesondere in der eng verzahnten Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Teilvorhaben, wodurch notwendige Versuchs- und Validierungsarbeiten erst verzögert durchgeführt werden konnten.

Die Aufgaben des Teilvorhabens wurden entsprechend dem übergeordneten Projektplan des Verbundprojektes gegliedert und zugeordnet, welcher die für das Teilvorhaben betreffenden Forschungsschwerpunkte Prozessentwicklung, Fertigungssystementwicklung und Produktentwicklung vorgab. Zur Prozessentwicklung gehörten „Grundlagen- und Systemversuche“, zur Fertigungssystementwicklung die „manuellen, teilautomatisierten und vollautomatisierten Schweißsysteme“ und zur Produktentwicklung die „Konstruktion und Simulation“. In Abbildung 1 erfolgt eine detaillierte Darstellung der Aufgaben im fortlaufend aktualisierten Arbeitsplan des Teilprojektes.

Das industriegetriebene Forschungsvorhaben im Verbundprojekt ShipLight erforderte in allen Arbeitspaketen eine enge Verzahnung der Aufgaben zwischen den Verbundpartnern. Hervorzuheben sind insbesondere die zahlreichen Versuchsreihen (siehe Tabelle 1), die während der Projektlaufzeit bei unterschiedlichen Projektpartnern stattgefunden haben und essentiell für die Erreichung der Projektziele waren. Der intensive Austausch zwischen den in den Arbeitsgruppen beteiligten Partnern erfolgte in regelmäßigen Telefonkonferenzen sowie Arbeitsgruppentreffen, während denen eine Vor- bzw. Nachbereitung sowie Diskussionen zu den Ergebnissen der ausgewerteten Versuchsreihen stattfanden.

01.- 03.07.2015	Vorversuche in einer Roboterzelle am LZN, Hamburg
14.07.2015	Arbeitsgruppentreffen bei Fa. Cloos, Haiger
07.- 09.09.2015	Versuche am zweiten Portal des Automatiksystems am iLAS, Hamburg
03.- 04.11.2015	Konstruktionsworkshop durch Fa. TRUMPF am Standort der Fr. Lürssen Werft, Bremen
18.- 21.01.2016	Versuche an der dritten Portalbrücke des Automatiksystems am iLAS, Hamburg
21.- 24.03.2016	Versuche an der dritten Portalbrücke des Automatiksystems am iLAS, Hamburg
02.05.2016	Versuche an der dritten Portalbrücke des Automatiksystems am iLAS, Hamburg
21.06.2016	Arbeitsgruppentreffen bei Fa. Cloos, Haiger
20.- 21.02.2017	Schnittstellentests PMCS – Qirox Robotersteuerung bei Fa. Cloos, Haiger
29.03.2017	Arbeitsgruppentreffen am LZN/iLAS, Hamburg
15.-19. 05.2017	Installation PMCS auf dritter Portalbrücke des Fertigungsdemonstrators am iLAS, Hamburg
18.- 20.07.2017	Versuchsreihe Prozessaufnahmen / Regelungstest PMCS – Automatiksystem am iLAS, Hamburg
22.- 24.05.2018	Versuchsreihe Prozessaufnahmen Schiffsbaudemonstrator der Meyer Werft, Papenburg
28.- 29.05.2018	Demonstration des Fugenfolgesystems am Schiffsbaudemonstrator der Meyer Werft, Papenburg
19.- 20.06.2018	Versuchsreihe Handschweißsystem am IAPT, Hamburg
09.- 12.07.2018	Versuchsreihe Fugenfolgeregelung mit einer Robotersteuerung bei Fa. Cloos, Haiger
20.- 23.08.2018	Versuchsreihe Handschweißsystem am IAPT, Hamburg

Tabelle 1 Versuchsreihen und Arbeitsgruppentreffen im Teilvorhaben

Für verschiedene Arbeitspunkte des Teilprojektplans musste die ursprüngliche Arbeitsplanung im Verlauf der Projektlaufzeit angepasst werden. Alle Änderungen wurden im Rahmen der halbjährigen Zwischenberichte angezeigt. Die durchgeführten Anpassungen der Arbeits- bzw. Zeitplanung lassen sich darüber hinaus mit Hilfe des aktualisierten Arbeitsplans nachvollziehen.

Ein wesentlicher Grund für die Notwendigkeit der Anpassung war die Entscheidung des ShipLight-Konsortiums in einem außerordentlichen Arbeitsgruppentreffen am 03.05.2016 den Ansatz des Laser-Plasma Hybrid-Prozesses nicht weiter zu verfolgen. Das laserunterstützte MSG-Schweißen wurde als das aussichtsreiche Verfahren identifiziert und einstimmig für die weitere Prozessentwicklung ausgewählt. Die Grundlagenuntersuchungen zu diesem Verfahren sollten mit dem ersten Projektjahr abgeschlossen sein. Dies bedeutet für die Arbeiten unter AP3.P „Entwicklung eines Systems zur bildbasierten Fugenfolge in Echtzeit für den laser-unterstützten MSG-Prozess“ eine Anpassung auf den neuen Schweißprozess und eine damit verbundene zeitliche Verzögerung, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Versuche mit entsprechender Systemtechnik und Prozessanordnung durchgeführt werden konnten.

Für die Erreichung der wesentlichen Ziele des Teilvorhabens innerhalb der Projektlaufzeit hatten diese Anpassungen jedoch keine negativen Auswirkungen. Im Teilvorhaben wurden fünf Meilensteine vorgesehen, an denen überprüft wurde, ob die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele erreicht wurden.

- MS1 Prozessvisualisierung für das vollautomatisierte 3D Bearbeitungssystem verfügbar
- MS2 Kombination der OpenCL-Implementierung auf Grafikkarte und FPGA-Implementierung abgeschlossen
- MS3 Konzept und Schnittstellen für das Automatik- / Traktorsystem sind definiert
- MS4 Funktionstüchtigkeit des PMCS am vollautomatisierte Bearbeitungssystem nachgewiesen
- MS5 Fähigkeitsnachweis für die Prozess-Monitoring-Control-Systeme am Fraunhofer IAPT

4. Wissenschaftlicher und technischen Stand, an den angeknüpft wurde

4.1. Optoelektronische Prozessüberwachungssysteme

Beim Schweißen mit Laserstrahlung werden optoelektronische Prozessüberwachungssysteme bereits industriell eingesetzt. Diese Systeme verwenden in der Regel optische Sensoren, welche die sekundäre Prozessstrahlung des Laserbearbeitungsprozesses koaxial oder lateral zur Bearbeitungsstrahlung erfassen und in elektronische Signale umwandeln. Beobachtet wird bei diesen Verfahren sowohl die sichtbare Strahlung (VIS) im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 650 nm oder die nahinfrarote Strahlung (NIR) im Bereich von 900 nm bis 2,2 µm. Die Analyse der sichtbaren Prozessstrahlung erlaubt Aussagen über die Tiefe der Kapillare und damit indirekt über die Einschweißtiefe [1]. Die Analyse der infraroten Prozessstrahlung liefert Informationen über die relative Temperaturverteilung in der Wechselwirkungszone.

4.2. Ortsintegrierend messende Systeme

Die Mehrzahl dieser Systeme beruht auf örtlich integral messenden Photodetektoren. Mit ihnen kann der zeitliche Verlauf der Intensität einer Strahlungsquelle mit hoher Zeitauflösung gemessen werden. Die Auswertung der Intensität erfolgt in Form von Frequenz- und Amplitudensignalanalysen. Ändern sich während des Schweißens Prozessparameter, wie z.B. die Fokusslage oder die Einschweißtiefe, so führt dies zu Veränderungen der sekundären Prozessstrahlung. Aus der Änderung der Messsignale kann somit auf Prozessstörungen, durch Verknüpfung mehrerer

Messsignale auch auf das Auftreten bestimmter Fehler, geschlossen werden. Basierend auf diesen Verfahren sind auf dem deutschen Markt die in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgeführten Systeme zur Prozessüberwachung bei der Laserstrahlmaterialbearbeitung erhältlich [2].

Hersteller Prozessüberwachung	Gerätebezeichnung	Weitere Informationen
Armstrong Optical Ltd/LZH	ProWatcher	www.laser-zentrum-hannover.de/
Erlas GmbH	ProCo	www.erlas.com
Plasmo Industrietechnik GmbH (ehemals Incision Lasertec)	Plasmo Process Observer	www.plasmo-observer.com/
Precitec KG	Laser Welding Monitor LWM	www.precitec.de
4D Ingenieurgesellschaft für Technische Dienstleistungen mbH	WeldWatcher®	www.4d-gmbh.de

Tabelle 2 Kommerzielle Detektor-basierte Überwachungssysteme

4.3. Bildgebende Systeme

Mit Bildgebenden Überwachungssystemen, die mit CCD- bzw. CMOS-Kameras aufgebaut sind, kann im Gegensatz zu Photodioden die sekundäre Prozessstrahlung ortsauflösend erfasst werden. Die ortsauflösende Messung ermöglicht mit Hilfe von Mustererkennungsalgorithmen Überwachungsstrategien, Abweichungen und Fehler zuverlässiger zu erkennen [3], [4]. Das Nahtsensormodul SeamLine Pro von TRUMPF verwendet das Lichtschnitt-Triangulationsprinzip um gleichzeitig drei unterschiedliche Messaufgaben beim Fügen mit Laserstrahlung zu bewältigen. Herzstück von SeamLine Pro ist eine CMOS-Hochleistungskamera, die koaxial zum Laserstrahl angeordnet ist. Sie erfasst in jedem Bild die Fuge, die Fugestelle, die vom Laserstrahl erzeugte Kapillare und die fertige Laserschweißnaht. Mit lateral angeordneten Beleuchtungsquellen werden zwei Linien quer zur Fuge vor der Kapillare und quer zur Schweißnaht hinter der Kapillare erzeugt. Mit dem Triangulationsprinzip werden Arbeitsabstand, Position und Querschnittsgeometrie sowohl der Fuge im Vorlauf als auch der Schweißnaht im Nachlauf ermittelt. Über eine Regelung der Bewegungsachsen kann damit der Fokus des Laserstrahl präzise entlang einer Stoßfuge geführt werden [5]. Allerdings ist eine Fugenvorbereitung erforderlich, damit die Fuge im Vorlauf zuverlässig identifiziert werden kann.

Folgende Systeme sind auf dem deutschen Markt erhältlich:

Hersteller Prozessüberwachung	Gerätebezeichnung	Weitere Informationen
Precitec KG	Melt Pool Monitor MPM	www.precitec.de
Prometec GmbH	WELDING MONITOR PD 2000	www.prometec.com
TRUMPF GmbH	SeamLinePro	www.de.trumpf.com

Tabelle 3 Kommerzielle kamerabasierte Überwachungssysteme

4.4. Grenzen der bisher angewandten Lösungen

Bisher industriell angewandte optische Überwachungssysteme müssen für jede Anwendung neu qualifiziert und ‚angelernt‘ werden. In der Regel geschieht dies in Versuchsreihen, in denen gezielt Proben erzeugt die in Ordnung (i.O.) bzw. nicht in Ordnung (n.i.O.) sind. Die dabei aufgezeichneten Signale bzw. Bildfolgen werden anschließend analysiert und miteinander verglichen. In der Praxis scheitert der Einsatz dieser Systeme häufig daran, dass bei den Endanwendern weder Expertenwissen noch Material und Zeit zur Verfügung stehen, um ein Überwachungssystem z.B. nach einem Materialwechsel anzupassen.

Die eigentliche Ursache für diese Einschränkung liegt im gemeinsamen Wirkprinzip. Alle Systeme erfassen entweder ortsintegrierend mit Photodetektoren oder orts aufgelöst mit CCD- oder CMOS-Kameras einen mehr oder weniger großen Anteil des Spektrums der sekundären Prozessstrahlung, die von der Wechselwirkungszone emittiert wird. Um auf bestimmte Störungen oder Unregelmäßigkeiten zurück zu schließen, müssen die detektierten Signale bzw. Bildfolgen an Hand validierter Prozessmodelle interpretiert werden. In der Praxis liegen diese Prozessmodelle meist nicht vor. Deshalb wird hier die Einhaltung von Qualitätsmerkmalen häufig in der Weise überwacht, dass eine Abweichung von den i.O.-Signalen bzw. i.O.-Bildfolgen als Störung und Beeinträchtigungen der Fügequalität bewertet wird, wobei nur in speziellen Fällen die Ursache der Störung identifizierbar ist.

Mit dem bisherigen Stand der Technik bei den Online-Überwachungssystemen ist es nicht möglich, die Prüfungen zu substituieren, die in den Normen und Regelwerken zur Qualifizierung der Schweißverfahren definiert und gefordert sind. Damit sind zerstörungsfreie nachträgliche Prüfungen von Schweißverbindungen z.B. mit Ultraschall oder Röntgenstrahlung immer noch unumgänglich, auch wenn der Schweißprozess mit einem oder mehreren der eben beschriebenen Systeme online überwacht wird.

4.5. Normen und Regelwerke

Das Schweißen mit Laserstrahlung findet sich seit einigen Jahren in verschiedenen industriellen Anwendungen. In den geregelten Bereichen Stahlbau, Schiffbau und Druckbehälterbau wird für die Qualifizierung eines Schweißverfahrens eine systematische Verfahrensprüfung verlangt [6], Dazu liegen bisher die folgenden Regelwerke [7], [8], [9], [10], [11] vor.

Da für das Laser-MSG-Hybridschweißen bisher keine Normen zur Verfügung stehen, erfolgte die Qualifizierung dieses Verfahrens häufig in Anlehnung an die Regelwerke für das Lichtbogenschweißen. Das DVS Merkblatt 3216 gibt allgemeine Hinweise zum Laserstrahl-Lichtbogen-Hybridschweißen [12]. Seit 2006 existiert für die Qualifizierung und Zulassung des Laser-MSG-Hybridschweißen die Richtlinie No.19 des DNV [13]. Weitere Regelwerke befanden sich in der Entwurfsphase.

4.6. Bereits durchgeführte Arbeiten des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik

4.6.1. Koaxialer Prozessbeobachtung beim Fügen mit Laserstrahlung

Im Bereich der kamerabasierten Prozessüberwachung beim Laserstrahlschneiden und -schweißen hat sich das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik eine weltweit führende Stellung erworben. Die beiden kommerziell erhältlichen kamerabasierten Überwachungssysteme (Tabelle 3) basieren auf grundlegenden Arbeiten und Patenten des Antragstellers [14], [15]. Das CPC-System zur Prozessüberwachung findet ebenfalls Anwendung in der industriellen Produktion.

Generell handelt es sich beim Laser um ein berührungsfreies optisches Werkzeug, das nur die ‚freie Sicht‘ auf die Fuge zwischen zwei Blechen benötigt, um das Material zu verschweißen. Die gleichzeitige Zugänglichkeit von der Blechunter- oder Rückseite ist in der Regel nicht erforderlich. Für die online Prozess- und Qualitätsdiagnose von Laserprozessen sind deshalb Systeme wünschenswert, die ebenfalls berührungsfrei und idealerweise entgegengesetzt zur Propagationsrichtung der Laserstrahlung Informationen über die in der Wechselwirkungszone ablaufenden Prozesse liefern. Um die Flexibilität des Werkzeugs Laser nicht zu beeinträchtigen sollte die Zugänglichkeit zum Werkstück nicht durch Sensoren des Prozessdiagnosesystems eingeschränkt werden. Diesen Anforderungen entspricht das am Fraunhofer ILT entwickelte CPC-System, das im Teilvorhaben die Ausgangsbasis für die Entwicklung des Qualitätsdiagnosesystems bildete (Abbildung 2). Durch die Beleuchtung mit einer monochromatischen Lichtquelle, werden die Oberfläche der Schmelze und des Grundwerkstoffs trotz der intensiven von Lichtbogen und Metalldampf emittierten Sekundärstrahlung während des Schweißprozesses sichtbar und messtechnisch erfassbar gemacht.

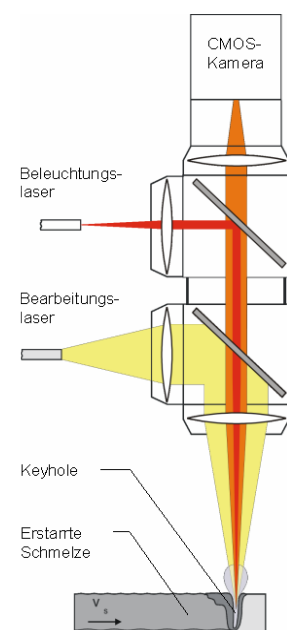


Abbildung 2 Anordnung der koaxialen Prozessbeobachtung mit integrierter Fremdbeleuchtung für fasergeführte Festkörperlaser (Seitenansicht)

Das Licht der Beleuchtungsquelle wird von der flüssigen Schmelze, von der erstarrten Schweißbraupe und vom festen Grundmaterial unterschiedlich reflektiert. Das Beleuchtungslicht, das entgegengesetzt zur Propagationsrichtung der Laserstrahlung rückreflektiert wird, gelangt auf den Bildwandler der CMOS-Kamera, nachdem es durch ein an die Wellenlänge der Beleuchtungsquelle angepassten Bandpassfilter aus dem Strahlengang ausgekoppelt wird.

Im Kamerabild erscheinen das Keyhole, die flüssige Schmelze die erstarrte Schweißbraupe und die raue feste Werkstückoberfläche mit unterschiedlicher Dynamik und Textur. Der mittlere Bereich der gewölbten Schweißbraupe erscheint als langer heller Streifen, weil dieser Bereich senkrecht zur Beleuchtung orientiert ist. Dagegen sind die Flanken der Schweißbraupe als lange dunkle Streifen erkennbar, weil von dort kein Licht rückreflektiert wird. Die Oberfläche der flüssigen Schmelze ist ständig in Bewegung, was sich unmittelbar in eine Bewegung der Glanzpunkte abbildet. Viele

kleine, zufällig verteilte Elemente der rauen festen Oberfläche reflektieren einen Teil des Beleuchtungslichts in Richtung Kamera. Deshalb erscheint die feste Oberfläche mit fein strukturierter und konstanter Textur. Aus den Vorarbeiten zum Schweißen mit Nd:YAG-Lasern war bekannt, dass sich mit der oben skizzierten Anordnung Grauwertbilder der Wechselwirkungszone aufzeichnen lassen. Die Grenze zwischen der fluktuierenden Schmelzbadoberfläche und dem sie umgebenden festen bzw. erstarrten Material ist bei der Wiedergabe der aufgezeichneten Aufnahmen gut zu erkennen (Abbildung 3).



Abbildung 3 Erstarrte und flüssige Schmelze sowie Keyhole mit dem CPC-System während des Schweißprozesses aufgenommen (Draufsicht)

Im IGF-Projekt „Echtzeit-Detektion der Geometrie der Phasengrenze (EDePha)“ [16] und in weiteren Machbarkeitsstudien für industrielle Kunden wurde dieser Ansatz auf das Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern übertragen. Als Herausforderung stellte sich dabei einerseits die Ein- und Auskopplung der Beleuchtungslaserstrahlung und andererseits die Beleuchtungstechnik heraus. Die emittierte Prozessstrahlung ist wesentlich intensiver, als die beim Schweißen mit Festkörperlasern. Die inzwischen gefundenen Lösungsansätze zur Beleuchtung des Prozesses mit gepulster Laserstrahlung sollten im Vorhaben genutzt und weiterentwickelt werden, da beim Laser-Plasma-Hybridenschweißen eine intensive Strahlung des Lichtbogenplasmas erwartet wurde.

Ein wesentlicher Vorteil des Prinzips der koaxialen Prozessbeobachtung ist, dass die tatsächliche Position sowohl der abtropfenden Zusatzdrahtes als auch der Kapillare (Keyhole) relativ zur Stumpfstoßfuge direkt in den erfassten Bildern abzulesen ist. Mit digitalen Algorithmen der Bildverarbeitung bestand die Möglichkeit diese Messung zu automatisieren. Durch Rückkopplung der gewonnenen Information in die Steuerung einer Schweißanlage ließe sich der Schweißprozess somit automatisch auf die Fuge des Stumpfstoßes zentrieren. Systematische Fehler, wie z.B. seitlicher Versatz des Schweißdrahtes und des Fokuspunktes durch Fehljustage oder Temperaturdrift von Optiken, könnten so erkannt und ausgeglichen werden.

4.6.2. Koaxiale Prozessbeobachtung beim Fügen von 3D-Strukturen mit dem Laser-MSG-Hybrid-Prozess

In dem durch das BMWi geförderte Vorhaben ‚QulnLas‘ [17] wurde neben der Entwicklung eines Qualitätsdiagnosesystems die Machbarkeit einer koaxialen Fugenfolge untersucht. Durch die Offline-Analyse von Bilddaten, die beim Hybridenschweißen von 3D-Schiffbaustrukturen aufgezeichneten wurden, konnte nachgewiesen werden, dass mit einem texturbasierten Ansatz eine robuste, von variierenden Beleuchtungsverhältnissen weitgehend unbeeinflusste Identifikation der Stoßfuge möglich ist.

Beim Laserstrahl-Lichtbogen-Hybridschweißen wird intensive Strahlung über das gesamte optische Spektrum (UV, VIS, NIR) aus der Prozesszone emittiert. Die Intensität der Strahlung schwankt mit der Pulsfrequenz des Lichtbogens. Der Schweißprozess wird daher mit einer CMOS Hochgeschwindigkeitskamera durch einen optischen Bandpassfilter koaxial durch die Fokussieroptik hindurch beobachtet. Durch die synchrone Belichtung zwischen den Strompulsen des MSG-Brenners mittels gepulsten Diodenlasers als Beleuchtungsstrahlquelle werden auswertbare Bilddaten aufgezeichnet.

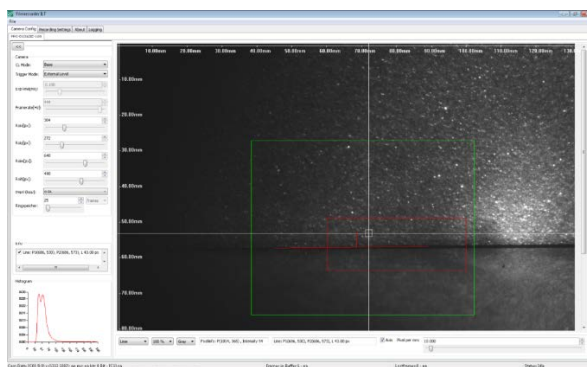


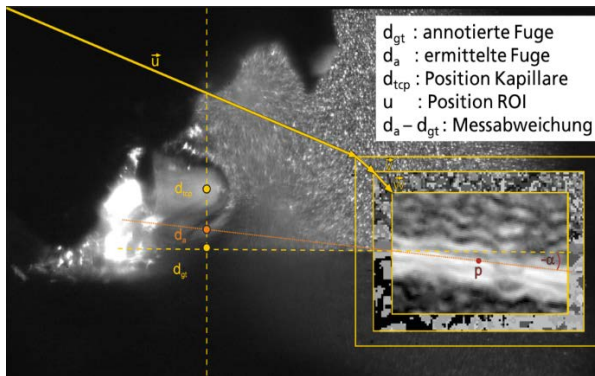
Abbildung 4 Konfigurationsfenster des CPC Visualisierungssystems

Die Visualisierung (Abbildung 4) ermöglicht die unmittelbare Beurteilung des Hybridprozesses von einem Leitstand aus, ohne dass sich der Maschinenbediener dazu, ausgestattet mit persönlicher Schutzausrüstung, im Gefahrenbereich des Schweißprozesses aufhalten muss. Die Visualisierung ermöglicht darüber hinaus, eine Bahn mittels Teach-In an der Roboteranlage genauer zu programmieren, als dies mit dem auf den Blechoberflächen meist kaum sichtbaren Pilotlaser direkt am Bauteil möglich ist.

Eine generelle Schwierigkeit bei der Kantenerkennung beim Laserstrahlschweißen, maßgeblich für eine autonome Fugenfolge, die auf einer Bildverarbeitung basiert, besteht darin, dass sowohl die beleuchteten Bleche als auch die gesuchte Fuge abhängig von Material, Prozess und Aufnahmesystem sehr unterschiedlich aussehen. Auf Grund der Dynamik des Gesamtsystems ist es auch bei großer Sorgfalt kaum möglich, vorherzusagen, wie die Intensitätsverteilung (Helligkeit) des akquirierten Bildmaterials aussehen wird. Insbesondere kann nicht davon ausgegangen werden, dass Intensitätsänderungen an der Stoßfuge besonders ausgeprägt sind.

Einige Lösungsansätze für die (bildbasierte) Fugendetektion verwenden den Canny-Algorithmus oder einfachere Gradientenoperatoren [18], [19], [20], [21], [22], [23]. Um die Erkennungsleistungen zu verbessern, werden Vorverarbeitungsschritte durchgeführt wie Erosion und Dilatation, die einfache Bildstörungen entfernen. Die Erkennungsergebnisse werden gegebenenfalls auf Plausibilität geprüft, um Fehlerkennungen zu reduzieren [23]. Bei reinen Stumpfstößanwendungen kann die Analyse des Schmelzbades Hinweise auf die Positioniergenauigkeit geben [21]. Bei einigen Prozessen kann die Genauigkeit dadurch erhöht werden, dass die Fuge vor dem eigentlichen Schweißvorgang abgefahren und mit den gewonnenen Daten das Roboterbahnprogramm optimiert wird [24]. Alle zitierten Ansätze leiden jedoch unter den erwähnten allgemeinen Nachteilen der intensitätsbasierten Auswertung der Bildinformationen, so dass deren Robustheit und damit die industrielle Anwendbarkeit eingeschränkt bleiben.

Im Forschungsprojekt QulnLas wurden zwei voneinander unabhängige Bildverarbeitungsverfahren bzgl. Genauigkeit, Schnelligkeit und Robustheit miteinander verglichen.



Bei dem ersten intensitätsbasierten Verfahren wurde eine klassische Abfolge von Algorithmen zur digitalen Bildverarbeitung verwendet, bei der u.a. der Canny-Edges Algorithmus zur Kantendetektion und Hough Transform Algorithmus zur Linienidentifikation eingesetzt wurde. Beim zweiten untersuchten texturbasierten Verfahren wurde mittels Filterbank die Textur der Blechoberflächen klassifiziert und darauf aufbauend der Übergang zwischen texturierten Bereichen detektiert (Abbildung 5).

Abbildung 5 Ermittlung der Messabweichung in Abhängigkeit von den Steuerparametern der Bildverarbeitungsverfahren

Das intensitätsbasierte Verfahren erfordert einen erhöhten Aufwand für seine Konfiguration, insbesondere wenn die Intensität der Bilder schwankt. Das texturbasierte Verfahren ist dank der zugrunde liegenden, auf Auswertung der Filterung mit einer Filterbank basierenden Technik, weitgehend unabhängig von Intensitätsschwankungen in den Bildern. Das texturbasierte Verfahren bewertet die Kombinationen unterschiedlicher Filterantworten statt der Auswertung einzelner Filter. Die tatsächlich vorliegende Beleuchtungssituation ist somit weniger entscheidend für die Erkennung der Oberflächen und deren Grenzen. Dies sorgt bei einem geringen Konfigurationsaufwand für deutlich robustere Ergebnisse als bei Anwendung des intensitätsbasierten Verfahrens.

Die texturbasierte Bildauswertung ist komplex und rechenintensiver als Standardtechniken wie intensitätsbasierte Verfahren. Um die Auswertegeschwindigkeit zu steigern, wurde die GPGPU-Programmierschnittstelle (General Purpose GPU, GPU = Graphical Processing Unit) erprobt, mit der die Auswertegeschwindigkeit der gewählten Bildausschnitte auf über 20 fps gesteigert werden konnte.

Moderne Grafikkarten verfügen über eine Vielzahl parallel arbeitender Prozessoren (GPUs). GPGPU-Programmierung basiert auf der Idee, diese Prozessoren für allgemeine Berechnungen zu verwenden. GPUs sind zwar nicht so universal einsetzbar wie CPUs, sie können jedoch bei Verwendung einer geeigneten Programmier-Plattform leicht in bestehende Programme eingebunden werden. Neben dem Einsatz von Spezialhardware besteht für Echtzeitanwendungen die Möglichkeit, die Implementierungen auf gewöhnlicher PC-Hardware ohne Hardware-Erweiterungen zu betreiben. Gerade für Spezial-Hardware wie FPGAs gilt, dass die „Time-to-market“-Zeitspanne, also Dauer und Kosten der Entwicklung zur Produkteinführung, durch unterstützende Techniken wie OpenCL sinkt.

FPGAs und GPUs ermöglichen das beste Verhältnis „Berechnungskraft pro Watt“ [25]. Diese Geräte sind neben der primär gewünschten Leistungsfähigkeit durch Parallelisierung auch hinsichtlich der Energieeinsparungen im Betrieb attraktiv. Erste Ergebnisse zu GPGPU-basierter Berechnung wurden bereits veröffentlicht [26].

Beim Fügen von T-Stößen aus artgleichen Blechen erscheinen durch die gerichtete Beleuchtung und die dazu unterschiedlich ausgerichteten Bleche die beiden Fügepartner in unterschiedlichem Licht, so dass sie durch die Texturanalyse gut voneinander abgegrenzt werden können. Umgekehrt ist eine Unterscheidung bzw. Abgrenzung unterschiedlicher Werkstoffe bei gleicher Orientierung zur Beleuchtungsquelle möglich, wenn diese sich in ihrer Oberflächenbeschaffenheit (Textur) hinreichend unterscheiden. Hierbei wird nun nicht gezielt nach der Fuge gesucht, sondern nach dem Übergang zwischen unterschiedlich texturierten Bereichen. Letztere Anwendung ist besonders interessant für die Detektion technischer Nullspalte. Prinzip bedingt lassen sich diese mit Lichtschnitt-Triangulationssensoren nur dann detektieren, wenn die Kanten vorher z.B. mit einer Phase strukturiert werden, was oft unwirtschaftlich ist.

4.7. Erklärung zur Nutzung von Schutzrechten

Die Fraunhofer Gesellschaft hält diverse Schutzrechte zur Prozessüberwachung beim Fügen mit Laserstrahlung. Nachfolgend sind einige davon gelistet.

EP 1119436 - ILT: Erkennung von Prozessfehlern beim Laserstrahlschweißen von Tailored Blanks, 13.03.1999

DE 102005010381 - ILT: Vermessung der Phasengrenze Fest/Flüssig bei der Lasermaterialbearbeitung mit Hilfe von Fremdbeleuchtung, 07.03.2005

DE 102005022095 - ILT: Verfahren/Vorrichtung zur Bestimmung einer lateralen Relativbewegung zwischen einem Laserbearbeitungsoptik und dem Werkstück während der Bearbeitung des Werkstücks, 12.05.2005

Das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT hatte für den Ansatz der texturbasierten Fugenidentifikation, der im Teilvorhaben angewendet und weiterentwickelt werden sollte, mit der Patentanmeldung DE102013022085 Schutzrechte beantragt, so dass den beteiligten Verbundpartnern eine Verwertung unter sicheren wirtschaftlichen Randbedingungen möglich wäre. Das Patent wurde während der Projektlaufzeit erteilt und liegt mittlerweile als Europäische Patentschrift EP 2 886 239 B1 vor.

Weitere Schutzrechte Dritter waren nicht bekannt, die der Verwertung der technischen Ansätze entgegenstanden.

4.8. Angabe der verwendeten Literatur

- [1] Bollig, Alexander: Prädiktive Prozessregelung beim Schweißen mit Laserstrahlung Forsch.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 1020 Düsseldorf (2004)
- [2] W. Kluff, P. Boerger, R. Schwartz: „On-Line Überwachung beim Laserschweißen von Blechen durch spezielle Auswertung der Plasmastrahlung“, Sonderdruck zu einem Vortrag auf der ICALEO'96 (1996)
- [3] C. Kratzsch: „Realisierung eines Kamera-basierten Prozessüberwachungssystems am Beispiel des Laserstrahlschweißens“, Shakerverlag Aachen (2003)

- [4] Müller-Borhanian, J.; Deininger, C.; Dausinger, F.; Hügel, H.: „Camera Based Monitoring during Laser Beam Welding - Influences of the Detection Wave Length“, Proc. LIM 2005, München (2005)
- [5] <http://www.de.trumpf.com/nc/de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/rec-uid/266996.html>
- [6] Meyer, Georg; Winkel, Gerlinde: „Profile nach Maß – Laserstrahl und Laser-MSG-Hybridschweißen von Profilen aus Baustrahl und CrNi-Stahl, Laser Technik Journal, Volume 5, Issue 5 (p 31-35), 2008
- [7] DIN EN ISO 15614-11 (10/2002)
Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung – Teil 11: Elektronen- und Laserstrahlschweißen
- [8] DIN EN ISO 15609-4(10/2004)
Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung – Teil 4: Laserstrahlschweißen
- [9] DIN EN ISO 13919-1 (06/1996)
Schweißen - Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen; Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten - Teil 1: Stahl;
- [10] DIN EN ISO 13919-2 (12/2001)
Schweißen - Elektronenstrahl- und Laserstrahl-Schweißverbindungen; Richtlinie für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten - Teil 2: Aluminium und seine schweißgeeigneten Legierungen
- [11] Guidelines for the approval of CO2-laser welding (GL), Final Draft 1998
- [12] Merkblatt DVS 3216: Laserstrahl-Lichtbogen-Hybridschweißverfahren
Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V.; Januar 2005
- [13] DNV Guidelines No. 19, Qualification and Approval of Hybrid Laser-Arc Welding in Shipbuilding, April 2006
- [14] Chr.Kratzsch, P. Abels, St. Kaierle
Verfahren u. Vorrichtung zur Kombination der Vermessung von Werkstücken u. Prozessbeobachtung bei der Laserstrahlmaterialbearbeitung, EP 1 128 927 B 1 (2004)
- [15] B. Regaard, P. Abels, S. Kaierle, W. Schulz, J. Michel, R. Bovis (RWTH), A. Moalem (RWTH)
Verfahren und Vorrichtung zur Vermessung der Werkstoffphasengrenzen bei der Bearbeitung mit Laserstrahlung, DE 10 2005 010 381 B 4 (2006)
- [16] IGF-Vorhaben
Echtzeit-Detektion der Geometrie der Phasengrenze zwischen dem flüssigen Schmelzbad und dem festen Grundwerkstoff beim Laserschweißen von Feinblechen mit industriellen Strahlquellen (EDePha)
Bewilligtes Forschungsvorhaben 15243 BG
Vorhabenslaufzeit 01.07.2007 – 30.09.2009
- [17] Drenker, A., Abschlussbericht QulnLas - Qualitätsgerechte 3D Laser-Schweißbearbeitung innovativer Schiffskonstruktion - Teilvorhaben Online-Qualitätsdiagnose für das Festkörperlaser-Lichtbogen-Hybridschweißen im Schiffbau - Förderkennzeichen: 03 SX 271C, 2014.

- [18] Pritschow, G., Mueller, G., Horber, H. „Fast and robust image processing for laser stripe-sensors in arc welding automation“. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2002, Vol. 2. 2002.
- [19] Shi, F., Lin, T., Chen, S. „Efficient weld seam detection for robotic welding based on local image processing“. Industrial Robot: An International Journal 36 (3), S. 277–283, 2009.
- [20] Tuominen, J., Lipping, T. „Direct imaging based seam tracking for welding control“. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 1. 2006.
- [21] Gao, X., Ding, D., Bai, T. „Weld pool image centroid algorithm for seam tracking in arc welding process“. IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, S. 385-390, 2009.
- [22] Liu, X., Cunxi, X. Robotic Seam Tracking by Utilizing Arc Light. Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, VOL. 2, 2006.
- [23] Shen, H. Y, Ma, H., Lin, T. „Research on weld pool control of welding robot with computer vision“. In: Industrial Robot: An International Journal 34 (6), S. 467–475, 2007.
- [24] Chen, J., Su, G., Xiang. S. „Robust welding seam tracking using image seam extraction“. Science and technology of welding and Joining, Volume 17 (2), S. 155-161, 2012.
- [25] Scarpino, M. OpenCL in Action: How to Accelerate Graphics and Computation, Manning Publications Company, 2011.
- [26] Krämer, S., Fiedler, W., Drenker, A., Abels, P. „Seam tracking with texture based image processing for laser materials processing“. PROCEEDINGS OF SPIE 8963SPIE 1-9 2014.
- [27] Emmelman, C; Uhrlandt, D.: Schlussbericht Plasma-Hybrid-Schweißen mit integriertem Laser und Sensorik, Hamburg und Greifswald; IGF-Vorhaben 16414; Dezember 2012

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Um die übergeordneten Arbeitsziele des Verbundprojektes umzusetzen, war eine enge Zusammenarbeit zwischen allen Verbundprojektpartnern in der gesamten Projektlaufzeit notwendig. Zum fachlichen Abgleich und zur Bewertung der Zwischenergebnisse in der laufenden Forschung sowie zur Wahrnehmung administrativer Aufgaben innerhalb der Projektarbeit fanden halbjährliche Verbundtreffen statt. Des Weiteren wurden innerhalb der einzelnen thematisch zugeordneten Arbeitsgruppen Workshops und Arbeitstreffen abgehalten. Bei Bedarf wurden außerdem Telefonkonferenzen zum fachlichen Abgleich der Projektarbeit durchgeführt.

Für die effektive Zusammenarbeit zwischen den Verbundpartnern wurde durch das Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) der Technische Universität Hamburg-Harburg ein BSCW-Server als Datenaustauschplattform zur Verfügung gestellt, wodurch das Projektmanagement auf Distanz hinsichtlich des Austausches, der Verwaltung und der Ablage von Daten, Zwischenergebnissen, Berichten und administrativen Unterlagen wesentlich vereinfacht wurde.

II. Teil - Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Ziel des vorliegenden Teilvorhabens war die Konzeption, Realisierung, Integration und Validierung einer Mehrgrößen-Prozessüberwachung und -Regelung mittels Echtzeitbildverarbeitung zum Fügen mit dem Laser-Plasma Hybrid-Prozess (LPH-Prozess) in einem Automatik- in einem Hand- und in einem Traktor-Schweißsystem. Um die Einhaltung der Füge- und Prozessqualität kontinuierlich sicher zu stellen, sollte im Verbundprojekt ‚ShipLight‘ beim Laserstrahlschweißprozess

- Der Abstand Δy zwischen Wechselwirkungspunkt und Fuge durch Regelung automatisch in engen Toleranzen gehalten werden.
- Das erforderliche Messglied entwickelt werden, das den Abstand Δy zwischen Wechselwirkungspunkt und Fuge (Ist-Wert) ermittelt.
- Ein weiterer Regelkreis für eine adaptive Regelung der Schweißstromquelle in Abhängigkeit von der gemessenen Spaltbreite bereitgestellt werden.

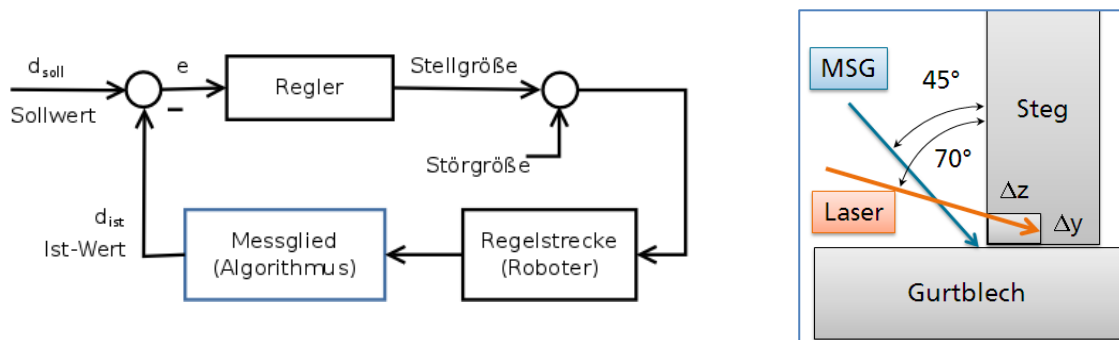


Abbildung 6 links: schematisch dargestellter Fugenfolgeregelkreis, rechts Schweißanordnung des Laser-Hybrid-schweißprozesses

Im darzustellenden Teilvorhaben wurde dazu ein Prozess-Monitoring-Regelungs-System (PMCS) realisiert und erprobt. Das PMCS wurde in drei Fertigungssysteme (Automatik-, Handschweiß- und Traktor-System) integriert und an vorab definierten Demonstrator-Bauteilen in enger Zusammenarbeit mit den beteiligten Werften validiert. Die Anforderungen an das zu entwickelnde Messglied wurden wie folgt definiert:

- Genauigkeit: Messabweichung (Soll-Wert \Leftrightarrow Ist-Wert) $< 0,1$ mm
- Robustheit: Schwankungen der Aufnahmequalität und Prozessstörungen beeinflussen das Messergebnis nicht.
- Schnelligkeit: Analyserate mindestens 10 Hz.

Der Arbeitsplan des Teilvorhabens fügte sich nahtlos in den Gesamtarbeitsplan des Verbundvorhabens ein und gliederte sich grob in vier Phasen schematisch dargestellt in Abbildung 7.

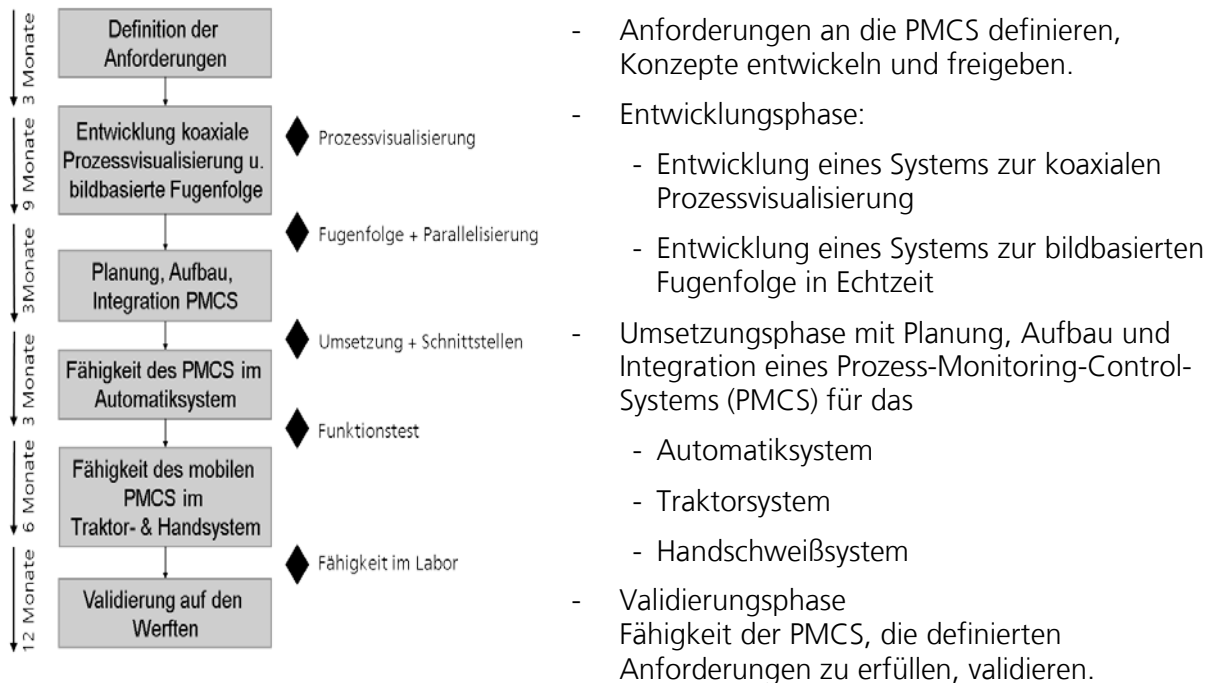


Abbildung 7 Ablaufstruktur des Teilvorhabens

1.1. Definition der Anforderungen an das Prozess-Monitoring und Regelungs-System

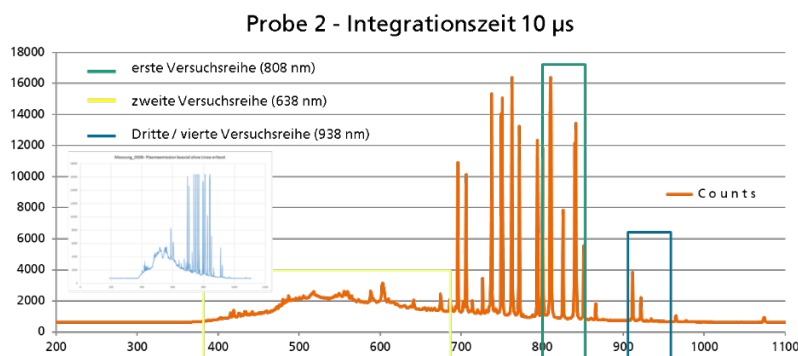
Zu Beginn des Vorhabens identifizierten und dokumentierten die Projektpartner Carl Cloos Schweißtechnik (CLOOS), Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS), Laser Zentrum Nord (LZN), Meyer Werft (MEYER), Lürssen Werft (LÜRSEN) ihre Anforderungen an das System zur Prozessvisualisierung und Prozessregelung genannt Prozess-Monitoring und Regelungs-System (PMCS). Das Fraunhofer ILT dokumentierte in einem Lastenheft, was das PMCS leisten und welche Anforderungen es erfüllen sollte. Das Lastenheft wurde im nächsten Schritt den Verbundpartnern zur Freigabe vorgelegt.

Um die Anforderungen weiter zu konkretisieren, wurde gemeinsam mit den Werften ein Musterkatalog erstellt, der Objekte mit allen für die Aufgabenstellung relevanten Ausprägungen (das heißt Referenzmuster, Grenzmuster, Gutteile, Schlechteile, mit unterschiedlichen Oberflächenzuständen, aus unterschiedlichen Chargen, usw.) enthielt, die in der Praxis vorkommen können und an denen das Bildverarbeitungs-System (BV-System) die genannten Größen messen sollte. Der Fokus lag hierbei auf den Objekteigenschaften Oberflächenbeschaffenheit, Arten des Zuschnittes / der Nahtvorbereitung und unterschiedlichen Chargen. Musterbauteile, die sowohl Standards als auch einige Extreme abbildeten, wurden dem Fraunhofer ILT durch die Meyer Werft zur Verfügung gestellt.

1.2. Entwicklung eines Systems zur koaxialen Prozessvisualisierung

1.2.1. Erprobung der Prozessvisualisierung im VIS oder NIR

Im ersten Projektjahr wurden insgesamt fünf Versuchsreihen für die Erprobung der Prozessvisualisierung mit unterschiedlichen Beleuchtungsquellen durchgeführt. Im Vorfeld wurden die Spektren des jeweiligen Prozesses aufgezeichnet, um Intensitätsmaxima zu lokalisieren und die Systemtechnik entsprechend auszuwählen.



In Abbildung 8 sind die erfassten Prozessemissionen für den laser-unterstützten MSG-Prozess dargestellt. Die geringen Emissionen im Wellenlängenbereich größer 920 nm waren mit ausschlaggebend für die gewählte Beleuchtungswellenlänge.

Abbildung 8 Spektroskopie des laser-unterstützten MSG-Prozesses

In der ersten Versuchsreihe fand die Verifizierung des vorhandenen Zielsystems für den Laser-Plasma-Hybrid-Prozess statt. In einer zweiten Versuchsreihe wurde untersucht, ob eine Prozessvisualisierung mit Fremdbeleuchtung im sichtbaren Spektrum (638 nm) mit einer deutlich geringeren optischen Leistung im Vergleich zu einer Beleuchtungswellenlänge im NIR (808 nm) zu realisieren ist. Das durch den Lichtbogen erzeugte Argon-Plasma ist mit über 20.000°C sehr heiß und emittiert intensive Temperaturstrahlung. Im Spektralbereich von 700 nm bis 1000 nm wurden zusätzlich intensive Linienemissionen gemessen (Abbildung 8). Dieser Spektralbereich ist daher zu meiden, da selbst eine Beleuchtungsleistung von 250 Watt bei 808 nm verteilt auf eine Fläche von etwa 10 cm² nicht ausreichend ist, um die Plasmaemission mit dem an der Blechoberfläche diffus reflektierten Beleuchtungslaserlicht zu überstrahlen.

Die Versuche mit einem Diodenlaser der Firma DILAS mit einer Leistung von 40 W bei 638 nm haben die Hypothese bestätigt, dass im sichtbaren Spektrum eine kleinere optische Ausgangsleistung zur Fremdbeleuchtung ausreicht im Vergleich zu einer Beleuchtungswellenlänge im NIR (808 nm). Die Beleuchtung der Stoßfuge durch eine Wellenlänge im sichtbaren Spektrum kann hinsichtlich der Arbeitssicherheit sinnvoll sein. Allerdings wird diese Wellenlänge auch für Pilotlaser zur Justage in Laseranlagen verwendet. Deshalb sind dichroitische Strahlteiler i.d.R. so beschichtet, dass sie sowohl die Wellenlänge des Bearbeitungslasers (1070 nm) als auch die des roten Pilotlasers (ca. 635 nm) reflektieren. Standardmäßig sind die Strahlteiler im sichtbaren grünen Spektralbereich transmittierend, sodass der Ansatz der koaxialen Prozessbeobachtung mit diesen Spiegeln bei 638 nm nicht funktionieren würde. Denkbar ist auch eine Beleuchtung bei einer Wellenlänge von 532 nm. Alternativ kann eine Wellenlänge für den Pilotlaser im grünen Wellenlängenbereich gewählt werden. Im Vorhaben wurde abschließend entschieden, für die Beleuchtung keinen Diodenlaser mit Wellenlängen im sichtbaren Bereich zu verwenden, einerseits wegen hoher Kosten

für die Strahlquelle und für die Spezialbeschichtung des Strahlteilerspiegels und andererseits wegen der zum damaligen Zeitpunkt noch zu geringen Lebensdauer dieser Strahlquellen.

In weiteren Versuchsreihen wurde eine Beleuchtungsquelle mit 938 nm untersucht, die im Spektralbereich mit im Verhältnis geringeren Prozessemissionen liegt und erwartungsgemäß kleinere optisch Leistungen erforderlich machte. Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Versuch sollte zunächst verifiziert werden, dass der Plasma-Laser-Hybridprozess durch einen Beleuchtungs-Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 938 nm und einer maximalen optischen Ausgangsleistung von 175 W überstrahlt werden kann, um die Fuge und Fugenbreite im Vorlauf zu detektieren. Als Bearbeitungsoptik diente zunächst eine OPTOSCAND Optik von ROFIN SINAR, die am Roboter unter dem 3. Portal des Fertigungsdemonstrators installiert wurde. Der darin befindliche Strahlteiler gestattet die koaxiale Prozessbeobachtung bei einer Beleuchtungswellenlänge von 940 nm.



In einer weiteren Versuchskampagne wurde eine Schweißoptik von PRECITEC mit speziell beschichtetem Strahlteiler für die Beleuchtungswellenlänge von 938 nm eingesetzt (Abbildung 9), die im weiteren Projektverlauf Bestandteil des Schweißkopfes war. Wegen dieser Beschichtung konnten im Diodenlaser von LASERLINE nur die zwei Module mit den Wellenlängen 1020 und 1060 nm für den Laserstrahlschweißprozess genutzt werden.

Abbildung 9 Versuchsanordnung laserunterstützter MSG-Prozess

Weiterhin sollte festgestellt werden, ob eine Prozessvisualisierung mit Fremdbeleuchtung im NIR Spektrum (938 nm) mit einer geringeren optischen Leistung im Vergleich zu einer Beleuchtungswellenlänge im NIR (808 nm) realisierbar ist. Außerdem wurden unterschiedliche Anordnung von Bearbeitungsoptik und Beleuchtungsmodul hinsichtlich der Detektion von Fuge und Fugenbreite untersucht.

Um die Oberflächen der zu fügenden Bleche bei dem gewählten optischen Aufbau und dem eingesetzten Strahlteiler visualisieren zu können, musste die vom Prozess emittierte Strahlung durch eine Blende mit einer Apertur von 2 mm auf den CMOS-Chip der koaxial angeordneten Kamera abgebildet werden. Die optische Ausgangsleistung des Beleuchtungslasers war ausreichend, um kontrastreiche Bilder der Fuge aufzunehmen. Im Vergleich dazu reichte eine Beleuchtungsleistung von 250 Watt bei 808 nm verteilt auf eine Fläche von etwa 10 cm² nicht aus, um die Plasmaemission mit dem an der Blechoberfläche diffus reflektierten Beleuchtungslaserlicht zu überstrahlen.

Bei den Versuchen wurde festgestellt, dass die Fähigkeit des Prozessbeobachtungssystems, die Fugenlage und Spaltbreite zuverlässig zu detektieren, von dem Winkel zwischen Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung abhängt. Insbesondere bei T-Stößen muss die Ausrichtung der Beleuchtung in Abhängigkeit der gewählten Einspannung von Gurt- und Stegblech vorgenommen werden.

Kritisch ist außerdem die Zuführung des Zusatzwerkstoffs und der damit verbundenen Position der Drahtdüse. Die Drahtzufuhr ist so auszuführen, dass diese die Fuge im Vorlauf nicht verdeckt und der Schattenwurf des Drahtes nicht in unmittelbarer Nähe der Fuge vorhanden ist. Gleiches ist bei Stumpfstößen zu beachten.

Eine flache Anordnung der Beleuchtung im Vorlauf bei Stumpfstößen hatte die besten Ergebnisse, da beide Fügeflanken homogen ausgeleuchtet wurden. Bei einer seitlichen Anordnung des Beleuchtungsmoduls kam es bei einem Höhenversatz der Fügepartner zu einem Schattenwurf, der fälschlich als Fuge detektiert werden kann.

Durch eine weitere Versuchsreihe wurde verifiziert, dass auch der laserunterstützte MSG-Prozess durch einen Beleuchtungs-Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 938 nm und einer maximalen optischen Ausgangsleistung von 165 W überstrahlt werden kann, um die Fuge und Fugenbreite im Vorlauf zu detektieren. Um die Oberflächen der zu fügenden Bleche bei dem gewählten optischen Aufbau und dem eingesetzten Strahlteiler visualisieren zu können, musste die vom Prozess emittierte Strahlung durch eine Blende auf den CMOS-Chip der koaxial angeordneten Kamera abgebildet werden. (Einstellungen mit Durchmessern der Blende von 2 bis 8 mm wurden untersucht). Die optische Ausgangsleistung des Beleuchtungs-lasers war ausreichend, um kontrastreiche Bilder der Fuge aufzunehmen. Zur besseren Nachfokussierbarkeit wurde die abbildende Optik in einem verstellbaren Tubus eingesetzt. Die beleuchtete Fläche konnte durch einen variablen Kollimator eingestellt werden. Als Schlussfolgerungen können aufgeführt werden, dass

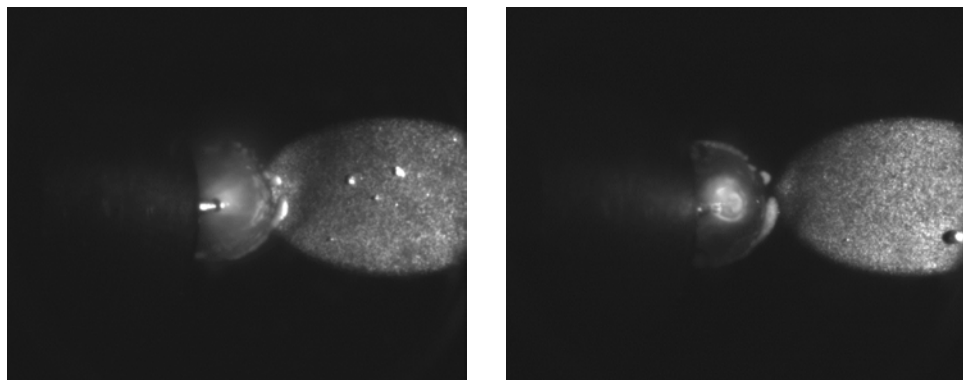
- die Beleuchtungswellenlänge von 938 nm für den Plasma-Laser-Hybridprozess sowie für den laserunterstützte MSG-Prozess zur Prozessvisualisierung eingesetzt werden kann.
- beim Konzept/Design des neuen Bearbeitungskopfes sind die Abhängigkeiten von Beleuchtungsrichtung zu Beobachtungsrichtung zu berücksichtigen.

Die folgenden beiden Bilder in Abbildung 10 zeigen exemplarisch zwei Aufnahmen einer Blindschweißung mit unterschiedlicher Blendenöffnung und der damit abhängig eingestellten optischen Ausgangsleistung. Der im Vorhaben entwickelte koaxiale Aufbau aus CameraLink-Kamera von PhotonFocus (Typ MV1 D1312E-160CL-12) hinter einem Bandpassfilter von Thorlabs 940 ± 2 nm (FWHM = 10 ± 2 nm, $\varnothing 1$ ") und hinter einer Blende variierbarer Apertur und mit einem verstellbaren Optiktubus ist für die Prozessvisualisierung im NIR Spektralbereich geeignet.

Abbildung 10
Prozessvisualisierung
bei 938 nm

links:
Belichtungszeit:
300 μ s @ 70 W
Blende 2 mm

Rechts:
Belichtungszeit:
300 μ s @ 25 W
Blende 4 mm

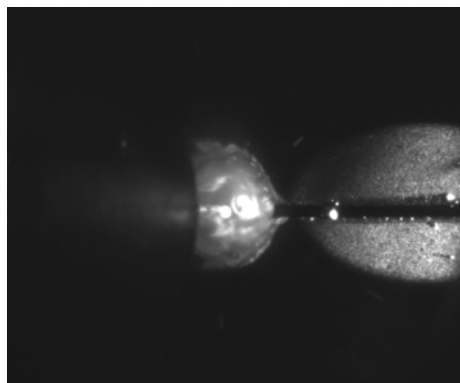


In Abbildung 11 (links) ist ein Bild einer Prozessaufnahme bei einer Schweißung einer I-Naht am Stumpfstoß bei einer Blendenöffnung von 4 mm und einer optischen Ausgangsleistung von 25 W dargestellt. Die Stoßfuge ist im kontrastreichen Bild gut zu detektieren. Die Versuche zeigten, dass das Prozessvisualisierungssystem für die Visualisierung der Fuge und einen Teil der Prozesszone für den laserunterstützten MSG-Prozess geeignet ist. Auf die Darstellung von Ergebnissen von Versuchen mit dem Laser-Plasma Hybrid-Prozess wird an dieser Stelle verzichtet, da dieser Fügeprozess im Projekt wegen geringer Erfolgsaussichten nicht weiter entwickelt wurde.

Abbildung 11
Prozessvisualisierung
bei 938 nm bei I-
Naht am Stumpfstoß

links:
Belichtungszeit:
300 μ s @ 25 W
Blende 4 mm

Rechts:
Ermittlung
Abbildungsmaßstab



Die Abbildung 11 (rechts) zeigt die koaxiale Abbildung eines Stahllineals durch den PRECITEC Bearbeitungs-kopf YW30. Bei einer Pixelgröße von $8,0 \times 8,0 \mu\text{m}^2$ ergab sich damit ein Abbildungsmaßstab von $\beta = 0,298$.

1.2.2. Untersuchung der Abhängigkeit von Beleuchtungsrichtung zu Beobachtungsrichtung

Die Zielsetzung dieses Arbeitspaketes war die systematische Analyse der Anordnung der Beleuchtung und daraus abgeleitet die Anforderung an die konstruktive Auslegung eines Bearbeitungskopfes für die integrierte koaxialer Prozess-Beobachtung. Für die Fugenfolge wurde ein Ansatz mit texturbasierter Segmentierung und anschließender Merkmalsextraktion sowie Klassifizierung verfolgt. Zudem war ein weiterer wichtiger Bestandteil für die autonome Prozessführung die Vermessung der Spaltbreite. Dazu sollten die Schattenwürfe der beiden Fügepartner in Abhängigkeit von der jeweiligen Beleuchtungsrichtung in den Kamerabildern identifiziert und ausgewertet werden. Die Eigenschaften der Beleuchtungsquelle sowie perspektivische Einflüsse auf die Abbildung waren hierbei zu berücksichtigen und im Besonderen zu untersuchen.

Insbesondere bei T-Stößen musste die Ausrichtung der Beleuchtung in Abhängigkeit der gewählten Einspannung von Gurt- und Stegblech vorgenommen werden. Die nachfolgenden Bilder (Abbildung 12 bis Abbildung 15) zeigen Aufnahmen bei unterschiedlicher T-Stoßkonfiguration und Beleuchtungsrichtung in der Mitte der Bahn und in der Endposition.

Abbildung 12
Beleuchtungs-
richtung beim T-Stoß

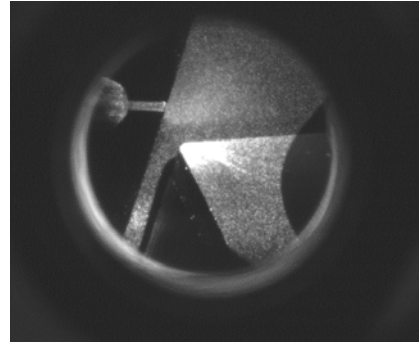
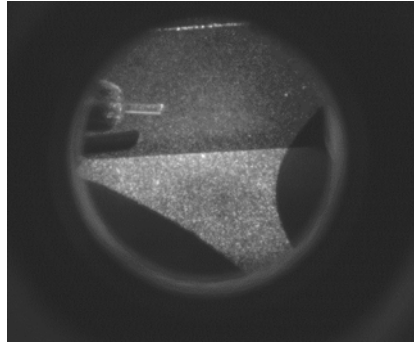
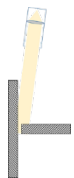


Abbildung 13
Beleuchtungs-
richtung beim T-Stoß

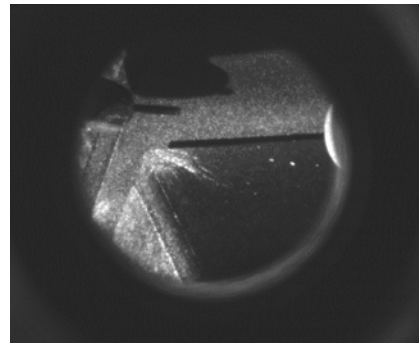
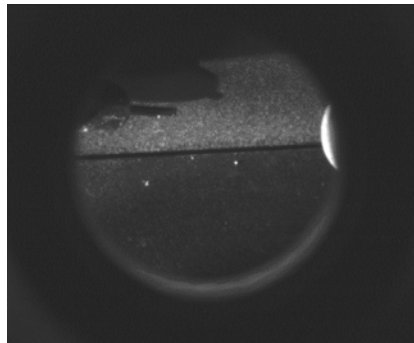
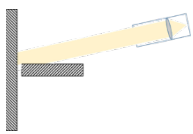


Abbildung 14
Beleuchtungs-
richtung beim T-Stoß

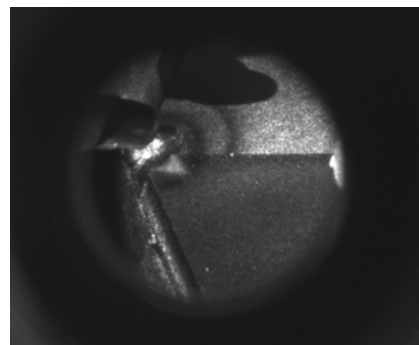
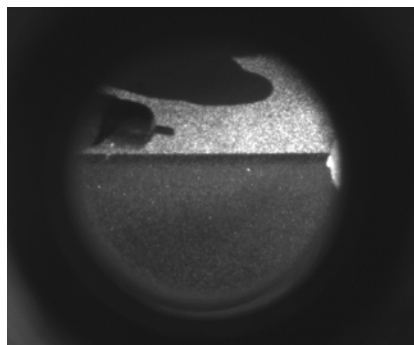
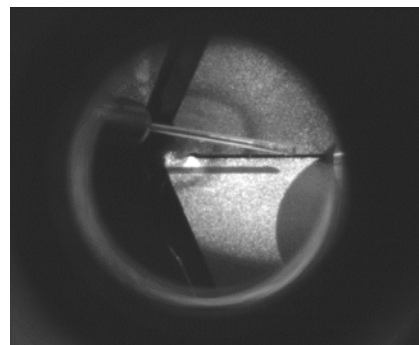
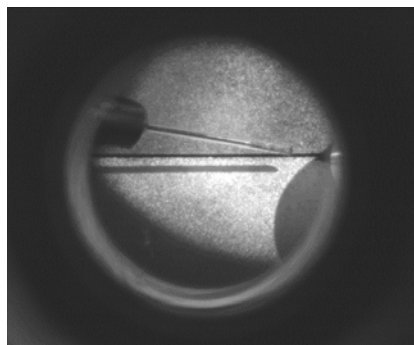
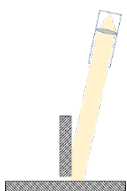


Abbildung 15
Beleuchtungs-
richtung beim T-Stoß



In Abbildung 12 und Abbildung 14 ist bei der jeweiligen Stoßkonfiguration und Anordnung der Beleuchtung kein Spalt zu erkennen und wird nur in der Endposition für den Betrachter ersichtlich. In Abbildung 13 und Abbildung 15 kann ein Spalt zwischen den Fügepartnern detektiert werden. Diese Erkenntnis musste in der weiteren Auslegung des Gesamtsystems (Bearbeitungskopf) berücksichtigt werden. Kritisch war außerdem die Zuführung des Zusatzwerkstoffs und der damit verbundenen Position der Drahtdüse. Die Drahtzufuhr war in der Art auszuführen, dass diese die Fuge im Vorlauf nicht verdeckte und der Schattenwurf des Drahtes nicht in unmittelbarer Nähe der Fuge vorhanden war. Gleiches war bei Stumpfstößen zu beachten.

Bei Stumpfstößen erzielte eine flache Anordnung der Beleuchtung im Vorlauf die besten Ergebnisse, da beide Fügeflanken homogen ausgeleuchtet wurden (Abbildung 17). Bei einer seitlichen Anordnung des Beleuchtungs-moduls kam es bei einem Höhenversatz der Fügepartner zu einem Schattenwurf, der irrtümlich auch als Fuge detektiert werden kann (Abbildung 16).

Abbildung 16
Beleuchtungsrichtung
beim Stumpfstoß

Links:
Anordnung
Beleuchtung seitlich
von oben

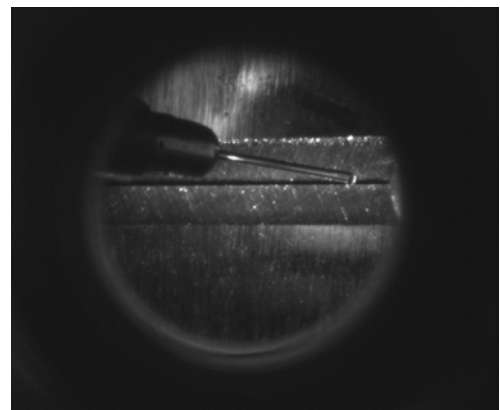
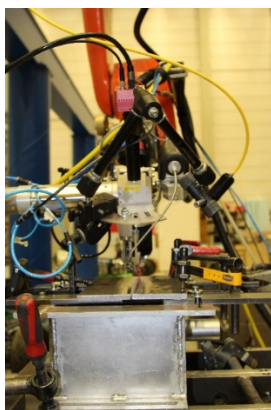
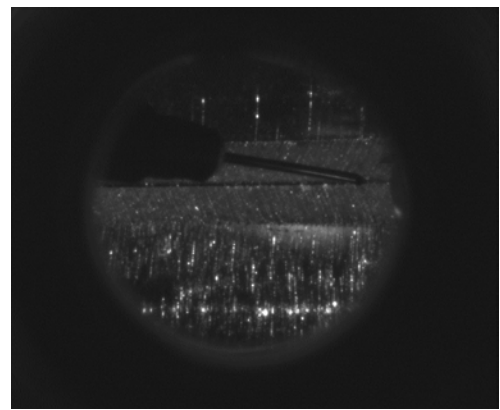
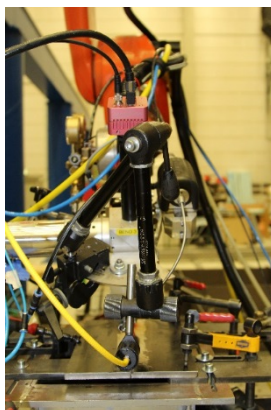


Abbildung 17
Beleuchtungsrichtung
beim Stumpfstoß

Links:
Anordnung
Beleuchtung flach im
Vorlauf



Bei den Versuchen konnte wegen fehlender freier Weglänge keine homogene Beleuchtung unter einem kleinen Winkel zur Oberflächennormalen umgesetzt werden. Aufgrund der sich ergebender Störkontur der im Vorlauf flach angeordneten Beleuchtung war eine Anordnung mit kleinem Winkel zur Oberflächennormalen zu bevorzugen und konstruktiv umzusetzen.



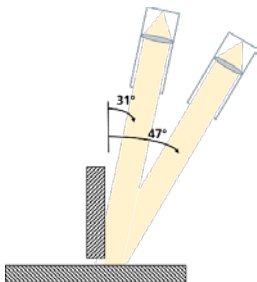
Des Weiteren wurde am Fraunhofer ILT eine Versuchsreihe durchgeführt, die Detektion der Stoßfuge in Abhängigkeit von der Orientierung bzw. dem Winkel der Beleuchtung bei einer technischen Nullspalt-Konfiguration zu untersuchen. Eine Schweißoptik YW 30 wurde durch den Projektpartner PRECITEC zur Verfügung gestellt.

In Abbildung 18 ist der opto-mechanische Aufbau für die T-Stoß-konfiguration wiedergegeben, der eine freie Ausrichtung der Schweißoptik im Raum in Bezug auf die Probe ermöglicht. Der Abstand der Zoomoptik zur Werkstückoberfläche betrug ca. 200 mm, wobei das Faserende auf einen Beleuchtungsfleck von etwa 40 mm abgebildet wurde. Die Schweißoptik war gegenüber dem Gurtblech um 20° gekippt. Die Anstellung in Vorschubrichtung betrug 0° .

Abbildung 18 Versuchsanordnung der T-Stoß-konfiguration

Für den Abbildungsmaßstab und das Sichtfeld bei der zu dem Zeitpunkt optischen Auslegung galt:

Sensorbreite:	$2040 \text{ px} * 5,5 \mu\text{m/px} = 11,22 \text{ mm}$
Sensorhöhe:	$1088 \text{ px} * 5,5 \mu\text{m/px} = 5,98 \text{ mm}$
Sichtfeld Schweißoptik ILT:	Abbildung 1:3 => 33,66 mm x 17,94 mm
Sichtfeld Schweißoptik LZN:	Abbildung 1:4 => 44,88 mm x 23,96 mm



Bei einem Sichtfeldes von 44,88 mm x 23,96 mm in der Werkstückebene wurde für eine Beleuchtung mit einem Zoom Fiber Collimator der Fa. Thorlabs ein Mindestabstand von 200 mm bei einem Spotdurchmesser von 40 mm zur Ausleuchtung erforderlich. Die Ausrichtung der Beleuchtung in Bezug auf das Stegblech wurde bei den Versuchen in Winkeln von 31° bis 47° angepasst. In Abbildung 19 wird diese Anordnung schematisch wiedergegeben

Abbildung 19 Anordnung der Beleuchtung

Durch Auswertung der in Abbildung 20 bis Abbildung 22 dargestellten Ergebnisse wurde deutlich, wie sich die Ausprägung der zu detektierenden Stoßfugen bzw. die Auflösung dieser bei unterschiedlichen Beleuchtungswinkeln ändert.

Abbildung 20
T-Stoßkonfiguration
mit Nullspalt bei
einer Anstellung der
Beleuchtung von 31°
→ Spalt 6 px

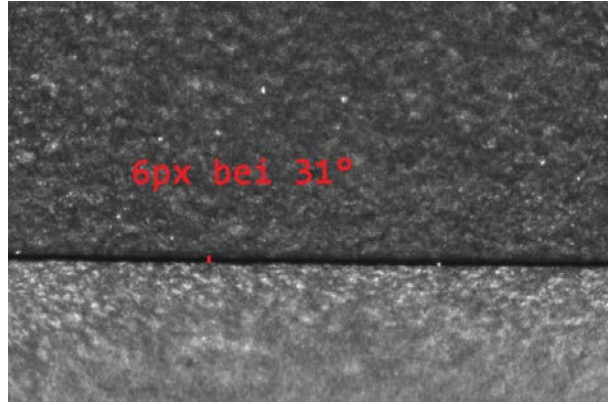
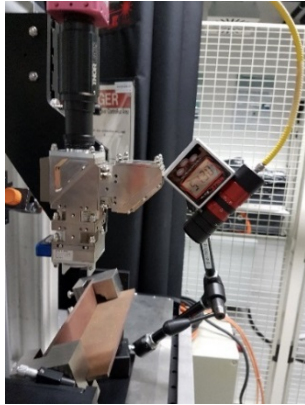


Abbildung 21
T-Stoßkonfiguration
mit Nullspalt bei
einer Anstellung der
Beleuchtung von 39°
→ Spalt 4 px

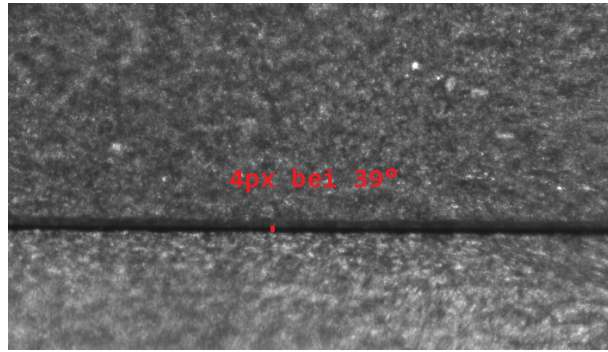
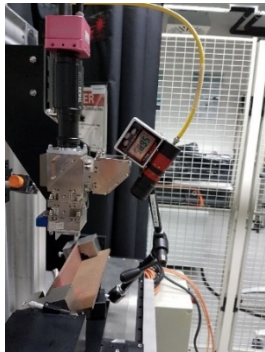
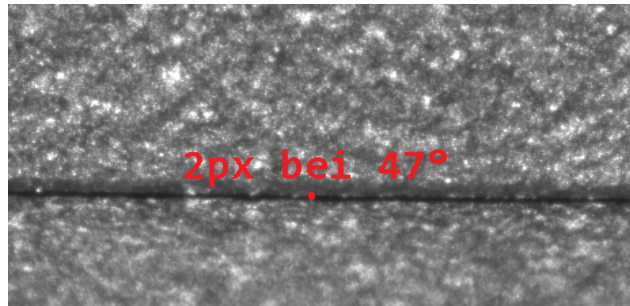


Abbildung 22
T-Stoßkonfiguration
mit Nullspalt bei
einer Anstellung der
Beleuchtung von 47°
→ Spalt 2 px



Wenn eine konstruktive Umsetzung, insbesondere hinsichtlich der sich daraus ergebenden Störkontur, mit einem Winkel zwischen Beleuchtungsmodul und Schweißoptik von 40° möglich wurde, war diese zu bevorzugen. Ein kleiner werdender Winkel zwischen beiden Komponenten hat bei einer Nullspalt-Situation eine größer werdende Unsicherheit bei der Fugenlagendetektion zur Folge. Ein sehr flacher Winkel zwischen Stegblech und Beleuchtungsmodul war nicht zu realisieren. Bezüglich der Abbildungsqualität des optischen Systems vor der Kamera wurden im weiteren Projektverlauf Verbesserungen zur Reduzierung von Aberrationen vorgenommen.

1.2.3. Installation und Bereitstellung des koaxialen Prozessvisualisierungssystems

Das Prozessvisualisierungssystem hat als wichtiges Werkzeug die Grundlagenversuche unterstützt, wobei zusätzliches Prozessverständnis generiert werden sollte. Dazu hat das Fraunhofer ILT nach Abschluss der Erprobung der Beleuchtungsquellen und Prozessvisualisierung Ende März 2016 zunächst ein mobiles System am iLAS/LZN bereitgestellt.

Zu Beginn des ShipLight-Projektes wurde innerhalb der Arbeitsgruppe „Automatiksystem (Prozess und Systeme)“ beschlossen, das bestehende CPC-Zielsystem am Fertigungsdemonstrator (zweite Portalbrücke) nicht umzubauen, um weitere Prozessentwicklungen mit dem Festkörperlaser-Metall-Schutzgas-Lichtbogen-Hybridschweißprozess durchführen zu können. Die Arbeitsgruppe beschloss weiter, die dritte Portalbrücke des Fertigungsdemonstrators am iLAS für alle Systemaufbauten für den Laser-Plasma-Hybridprozess bzw. den laserunterstützten MSG-Prozess einzurichten. Dazu hat das Fraunhofer ILT einen weiteren kompletten Schaltschrank mit allen benötigten Komponenten ausgestattet und aufgebaut. Die Konfiguration der benötigten Systemtechnik erfolgte basierend auf den Ergebnissen aus den vorangegangenen Arbeitspaketen und entsprechend der Definition und Abstimmung der Schnittstellen.

Die Beschaffung der benötigten Komponenten wurde August 2016 (Projektmonat 15) abgeschlossen. Anschließend wurde das System aufgebaut, was sowohl die Hardwareinstallation betraf, wie auch die Erstellung aller elektrischen Schaltpläne. Der aktualisierte Zeitplan sah eine Installation des stationären PMCS-Systems auf der dritten Portalbrücke zur Mitte des zweiten Projektjahres vor. Bis zu seiner Installation wurde dieses System am Fraunhofer ILT für die Entwicklung der Algorithmen zur Bildverarbeitung eingesetzt.

1.3. Entwicklung eines Systems zur bildbasierten Fugenfolge in Echtzeit

In diesem Arbeitspaket wurde ein Echtzeit-Sensorsystem zur koaxialen bildbasierten Fugenfolge entwickelt. Der Sensor detektiert die Lage der Fuge im Kamerabild und bestimmt die Spaltbreite. In Echtzeit werden die Ist-Werte relativ zum vorgegebenen TCP an die übergeordnete Anlagensteuerung des Automatik- bzw. Traktorsystems übertragen. Die dazu nötigen Entwicklungsschritte waren:

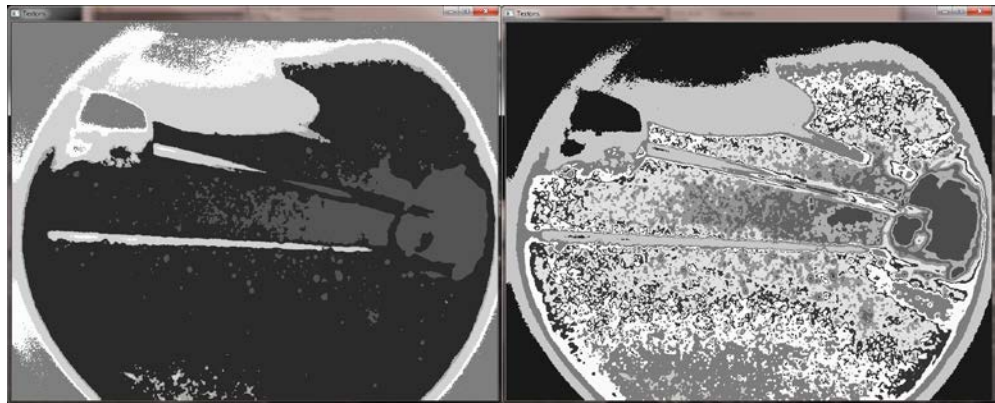
- Implementierung von Algorithmen zur Vorverarbeitung der Bilddaten auf programmierbarer FPGA-Hardware und zur texturbasierten Fugenfolge auf GPU,
- Offline Annotation der Prozessaufnahmen und Vergleich mit Fugenlagendetektion durch vorhandene texturbasierte Bildverarbeitungsalgorithmen,
- Weiterentwicklung der texturbasierten Fugenfolge hinsichtlich Detektion aller definierten Stoßfugenkonfigurationen unter Berücksichtigung der relativen Lage im Raum.

Für eine robuste Erkennung auf Basis der Intensitätsverteilung werden stabile Gradienten zur Extraktion der Kanten der zu segmentierenden Szene benötigt. Im Rahmen des Vorläuferprojektes QulnLas wurden bereits die Schwächen des intensitätsbasierten Ansatzes im Vergleich zu einer texturbasierten Segmentierung ermittelt. Bei variierender Oberflächenbeschaffenheit der Fügepartner schwanken die ermittelten Gradienten (Ableitungen) statistisch mit großen

Streuungen, was eine zuverlässige automatisierte Detektion der Stoßfugen anhand von fest definierten Schwellwerten praktisch unmöglich macht. Die bereitgestellten Musterbauteile der Werften wiesen sehr unterschiedliche Oberflächen auf, somit wurde ein intensitätsbasierter Ansatz als nicht mehr zielführend bewertet.

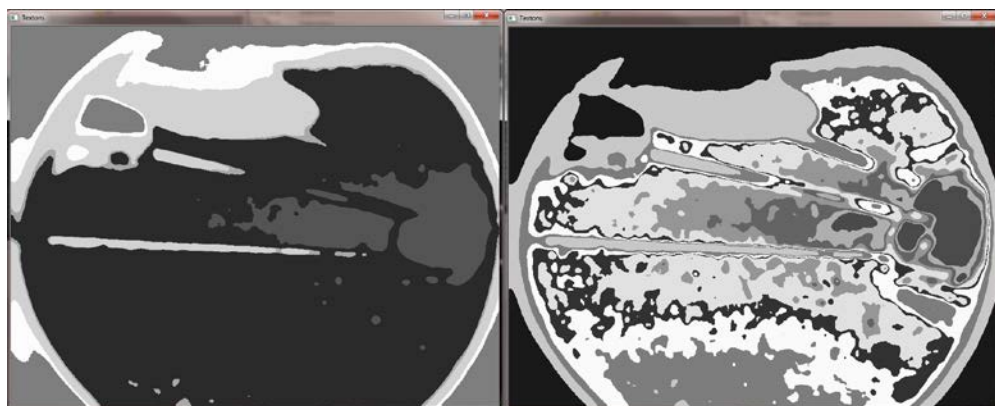
Die Auswertung der Prozessaufnahmen der verschiedenen Versuchsreihen und die Bewertung der Ergebnisse führten zu der Erkenntnis, dass für eine stabile texturbasierte Segmentierung einer Szene diverse Vorverarbeitungsschritte benötigt werden. Die Szene musste in der Art geglättet werden, dass die Texturen homogene Flächen bildeten. Die Glättung ermöglichte somit, dass bei wechselnden Gradienten aufgrund der Materialeigenschaften immer die gleiche Anzahl an Texturen zur Segmentierung der Szene eingesetzt werden konnten.

Abbildung 23
Texturbilder von
Prozessaufnahme
mit sechs (links) und
zehn (rechts)
Texturen
segmentiert ohne
Median-Filter



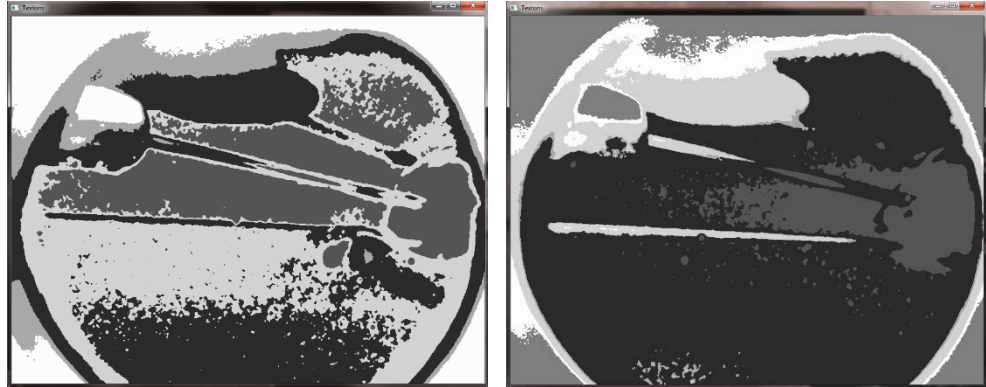
Beispielhaft sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 Texturbilder von Prozessaufnahmen ohne und mit Glättung durch einen Median-Filter gegenübergestellt.

Abbildung 24
Texturbilder von
Prozessaufnahme
mit sechs (links) und
zehn (rechts)
Texturen
segmentiert mit
Median-Filter



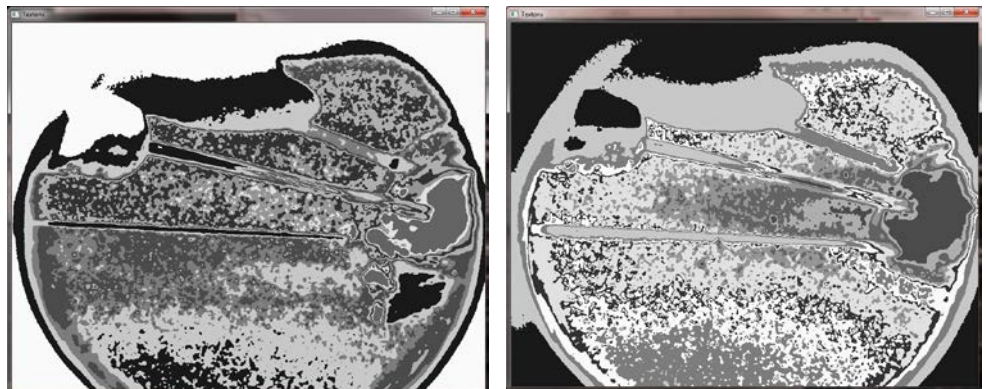
Ohne Glättung als Vorverarbeitungsschritt entstanden bei der Erzeugung der Texturbilder wechselnde Texturen für die gleiche Oberfläche und eine größere Anzahl an Texturen wurden benötigt, um die Szene stabil zu segmentieren. Dabei konnte sich die Zuordnung zwischen den Objekten der Szene und der Textur verschieben.

Abbildung 25
 Texturbilder von
 Prozessaufnahme
 mit sechs Texturen
 segmentiert



In Abbildung 25 sind zwei Texturbilder von zwei unterschiedlichen Prozessaufnahmen, die mit sechs Texturen segmentiert worden, gegenübergestellt. In der linken Abbildung wird die Fuge nur einem Texturcluster TC1 zugeordnet während in der rechten Abbildung die Fuge den Texturclustern TC5 und TC6 zugeordnet wird. Die Ergebnisse bei einer Segmentierung mit zehn Texturen ist entsprechend wie in Abbildung 26 dargestellt (linke Fuge in TC 1 und rechte Fuge in TC 8 und TC 9).

Abbildung 26
 Texturbilder von
 Prozessaufnahme
 mit zehn Texturen
 segmentiert



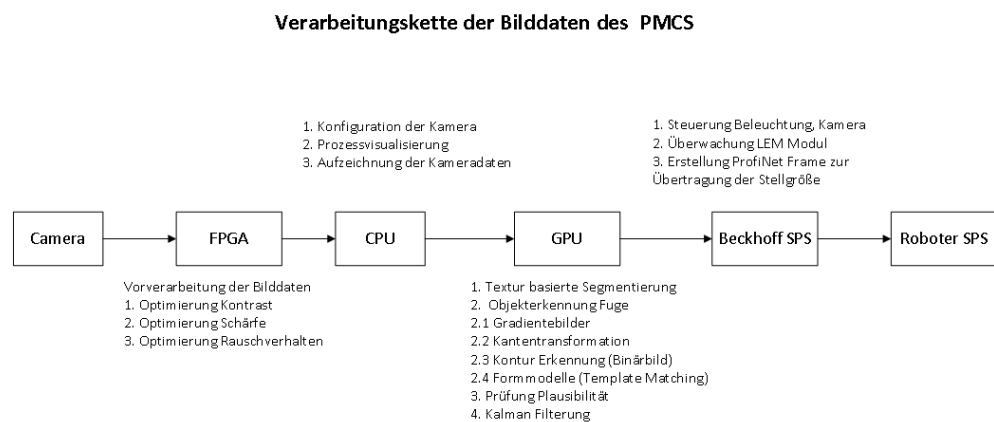
Durch die größere Anzahl an Texturen vergrößerte sich der benötigte Rechenaufwand, da der euklidische Abstand zwischen allen Clusterzentren (Feature Vektoren der Schwerpunkte trainierter Texturen) und dem Feature Vektor jedes Pixels (Filterantworten der MR8 Filterdatenbank) berechnet werden musste. Außerdem wurde die robuste Erkennung der Objekte einer Szene erschwert, wenn die Fuge aus mehreren Texturen bestand oder sich zwischen ihnen verschob. Je weiter die Clusterzentren voneinander entfernt sind, desto robuster kann die Szene segmentiert werden. Bei vielen Texturen liegen die Clusterzentren jedoch näher beieinander und somit werden Oberflächen, die nur geringe Unterschiede aufweisen, in mehrere Texturen segmentiert. Damit die Objekte einer Szene auch bei Aufnahmen mit geringem Kontrast voneinander segmentiert werden konnten, wurde eine Bildverbesserung durch eine Transformation der Grauwertkennlinie vorgenommen. Die Bildverbesserung vergrößerte durch Spreizung des Histogramms die Gradienten zwischen den Objekten der Szene und führte zu weiter entfernten Clusterzentren als Texturschwerpunkte.

Eine Schärfung der Kanten erleichterte die Erkennung der Objektgrenzen insbesondere für die Gradienten basierten Verfahren bzw. erlaubte den Einsatz möglichst allgemeiner Templates und stabilisierte die Erkennung geschlossener Konturen. Eine Unterdrückung des systembedingten Rauschens war erforderlich, um Messfehler zu vermeiden. Außerdem wurde durch die Glättung der Bilddaten, die bei der Optimierung des Kontrast und der Kantenschärfe entstandenen Artefakte wieder entfernt und die abgebildeten Oberflächen der Bleche homogenisiert. Aus den zuvor beschriebenen Zusammenhängen ergaben sich somit folgende benötigte Vorverarbeitungsschritte:

- Kontrastverbesserung durch Histogrammstreckung
- Bildverschärfung durch Tiefpassfilterung
- Verminderung des Bildrauschens durch Glättung mit Gauß-Filter

Die für die der verschiedenen Vorverarbeitungsschritte benötigten sehr rechenintensiven Algorithmen wurden in die FPGA Hardware des Framegrabbers verlagert, damit die Bilddaten direkt aufbereitet aus der Framegrabber-Karte ausgegeben werden konnten. Die Bilddaten wurden dadurch ohne zusätzliche Rechenzeit mit der gleichen Taktrate der Kamera zur texturbasierten Segmentierung an die GPU weitergeleitet. Zusätzliche Rechenleistung der langsameren CPU wurde nicht mehr zur Vorverarbeitung der Bilder benötigt. Mit diesem Konzept ergab sich die in Abbildung 27 skizzierte Verarbeitungskette für die Bilddaten im PMCS.

Abbildung 27
Verarbeitungskette
der Bilddaten durch
das PMCS



1.3.1. Implementierung von Algorithmen zur Vorverarbeitung der Bilddaten auf programmierbarer FPGA-Hardware und zur texturbasierten Fugenfolge auf GPU

In Abbildung 27 ist die Datenverarbeitungskette des PMCS dargestellt. Die Bilder des PMCS durchlaufen dabei zunächst die im FPGA des Framegrabbers implementierten Algorithmen zur Vorverarbeitung der Bilddaten. Anschließend werden die Bilddaten vom Framegrabber des Industrie PC an die CPU übergeben und zur echtzeitfähigen texturbasierten Fugenfolge an die GPU weiter geleitet. Anschließend erfolgt durch die CPU noch eine Plausibilitätskontrolle zur Erkennung von Fehlmessungen und eine Glättung der Messdaten mit Hilfe des Kalman Filters. Die auf Plausibilität geprüften und geglätteten Messdaten werden im nächsten Schritt durch eine Sensorschnittstelle über die Beckhoff SPS als Profinet Frame an die Qirox Steuerung der Roboteranlage gesendet.

Die Implementierungen der Algorithmen zur Vorverarbeitung der Bilddaten wurden auf Basis der grafischen Programmierumgebung Visual Applets von SiliconSoftware für die Framegrabber Karten ME4-VD4-PoCL und ME5-VD8-PoCL erstellt (s. Abbildung 28).

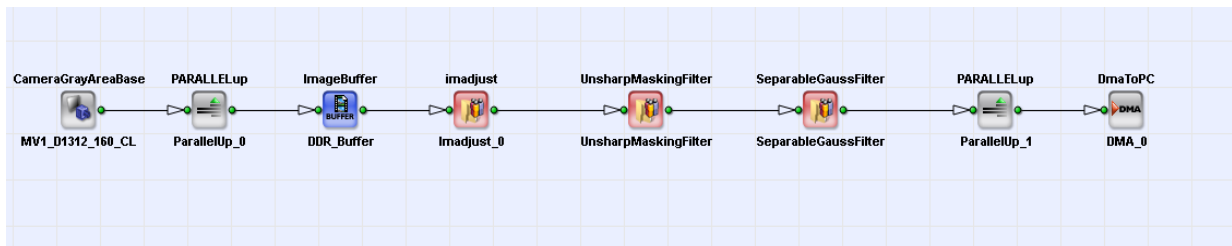


Abbildung 28 Datenverarbeitungskette zur Vorverarbeitung der Bilddaten im FPGA Applet

Folgende Operatoren sind zur Vorverarbeitung der Bilddaten im FPGA implementiert worden:

1. ImAdjust Kontrastverbesserung
2. UnsharpMask Bilderverschärfung
3. SeparableGaussian Verminderung des Bildrauschens

Der Algorithmus wurde außerdem hinsichtlich der Fähigkeit der Lageerkennung beider Stoßkanten der Fügepartner erweitert. Der Algorithmus nutzt hierzu die in Abbildung 29 im Suchbereich des Sensors dargestellten Messpunkte.

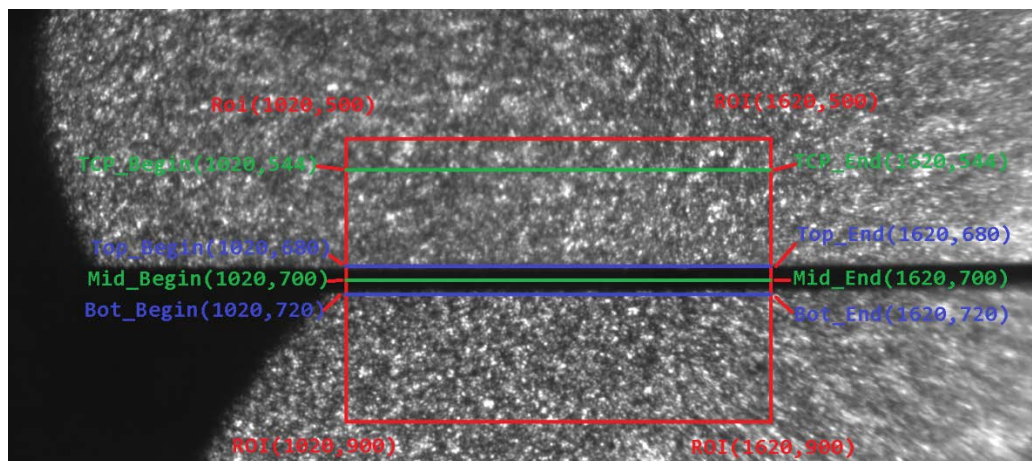


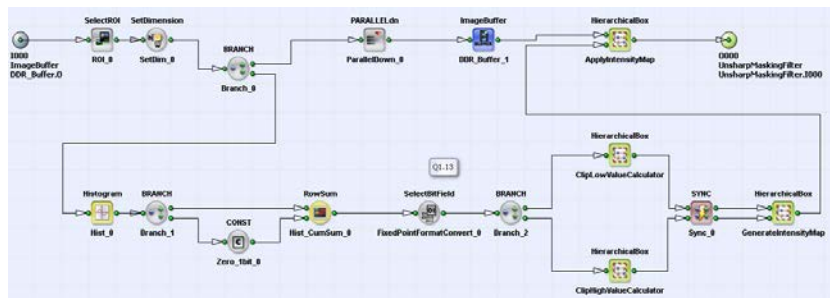
Abbildung 29 Darstellung der Messpunkte des Algorithmus am T-Stoß mit 5 mm Spalt unter 45°. Zudem sind die Sollposition des TCP an der Chipmitte der Kamera (TCP_Begin 1020,544), die Sollkurve der Bahn entlang der Chipmitte parallel zur X-Achse des Sensors (obere grüne Linie) und der Suchbereich des Algorithmus (600 px, 400 px) dargestellt.

Die 2D Bildkoordinaten der Messpunkte werden mit Hilfe einer Kalibration der Kamera in das Weltkoordinatensystem des Roboters transformiert. Dadurch wird die perspektivische Verzerrung und damit die relative Lage im Raum und Orientierung zum Werkstück berücksichtigt.

1.3.2. Kontrastverbesserung durch Histogrammstreckung

In Abbildung 30 ist der Programmablauf des ImAdjust Operators dargestellt. Zur Kontrastverbesserung der Bilddaten führt der Operator eine lineare Anpassung der Grauwerte durch. Der Operator berechnet das Histogramm der Bilddaten und streckt dieses dann linear auf den Intensitätsbereich zwischen den beiden Schranken ClipLow und ClipHigh. Der dabei erzeugte LookUpTable der neuen Intensitätswerte wird anschließend auf die Bilddaten angewendet.

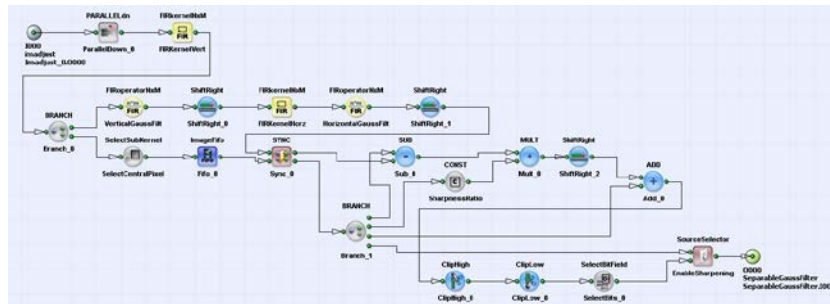
Abbildung 30
FPGA Applet des
ImAdjust Operators



1.3.3. Bildverschärfung durch Tiefpassfilterung

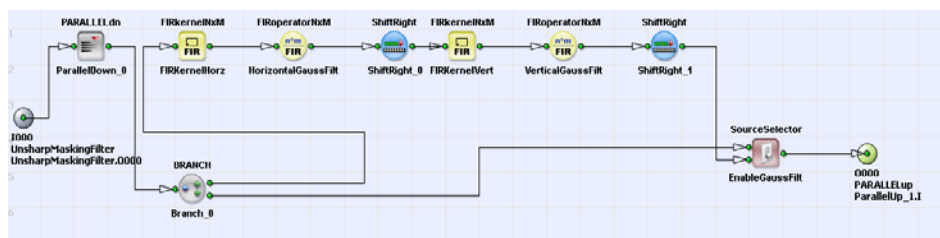
Zur Bildverschärfung der Bilddaten führt der Operator UnSharpMask zunächst eine Glättung des Bildes mit einem separierbaren Gaußfilter durch. Danach berechnet der Operator das neue Bild als gewichtete Summe des geglätteten Bildes und der aktuellen Bilddaten. Verminderung des Bildrauschens durch Glättung mit Gauß-Filter.

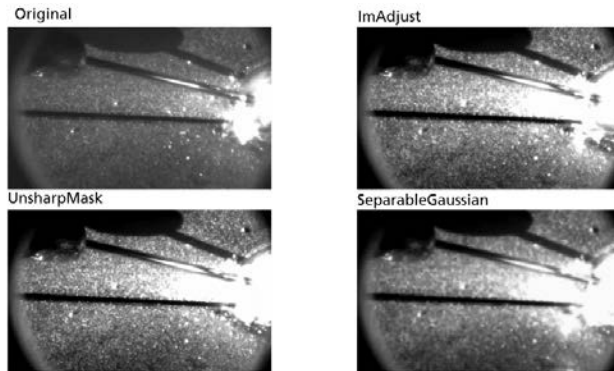
Abbildung 31
FPGA Applet des
UnSharpMask
Operators



Der Operator SeparableGaussian führt zur Verminderung des Bildrauschens und zur Entfernung der durch Ausführung der vorherigen Operatoren entstanden Artefakte eine Glättung der Bilddaten mit einem separierbaren Gaußfilter durch.

Abbildung 32
FPGA Applets des
SeparableGaussian
Operators





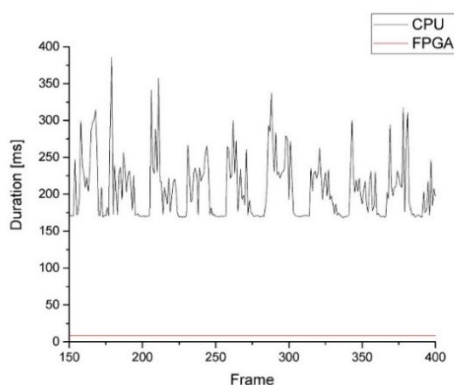
In Abbildung 33 ist das Ergebnis der Ausführung der einzelnen Operatoren an einer Prozessaufnahme des Laserhybridprozesses dargestellt. Der Benchmark (Tabelle 4) der Vorverarbeitungsschritte des Algorithmus wurde auf einer Sequenz von 250 Bildern bei einer ROI Größe von 832 x 512 Pixeln durchgeführt.

Abbildung 33 Vorverarbeitung der Bilddaten

Die Kernelgröße des Gaußfilters wurde für die Operatoren UnSharpMask und Separable Gaussian auf 9 x 9 Pixeln eingestellt. Damit ergab sich für die gesamte Vorverarbeitungskette auf dem FPGA im Durchschnitt eine Steigerung der Auswertegeschwindigkeit um das fünfundzwanzigfache verglichen mit der CPU Implementierung. In Abbildung 34 wird die Gesamtverarbeitungszeit Vorverarbeitung der Bilddaten als Vergleich CPU zu FPGA in einem Graphen dargestellt.

Tabelle 4
Benchmark der Operatoren zur Vorverarbeitung der Bilddaten CPU vs. FPGA

Vorverarbeitung mit	ImAdjust [ms]	UnSharp_Mask [ms]	Gaussian 9x9 [ms]	Gesamtzeit [ms]
CPU Avg	164,33	11,47	31,29	207,09
CPU Worst	334,85	50,55	152,87	385,59
FPGA	8,21	0,06	0,06	8,32
Verhältnis der Vorverarbeitungszeiten von CPU / FPGA				
CPU Avg / FPGA	20,01	209,33	573,03	24,89
CPU Worst / FPGA	40,78	922,46	2794,77	46,34



Der FPGA kann mit den angegebenen Operatoreinstellungen somit eine maximale Frequenz von 120 Hz bei einer festen Latenz von 8,32 ms erreichen. Die FPGA Operatoren haben eine ausreichend hohe Bandbreite, um die maximale Datenrate von 350 Mbit/s der Kamera zu verarbeiten. Zur Bewertung des Einflusses der Vorverarbeitungsschritte auf die Messgenauigkeit des Sensors müssen Vergleiche des Messfehlers mit und ohne die entsprechenden Operatoren über mehrere Messreihen durchgeführt werden.

Abbildung 34 Gesamtausführungszeit Vorverarbeitung der Bilddaten CPU vs. FPGA

1.3.4. Texturbasierte Segmentierung

Die Operatoren zur echtzeitfähigen texturbasierten Segmentierung sind vollständig auf die GPU übertragen worden. In der nachfolgenden Tabelle ist der Vergleich der Ausführungszeiten der SingleThreaded CPU Implementierung und der parallelen GPU Implementierung dargestellt.

Tabelle 5
Ausführungszeiten
der Operatoren zur
texturbasierte
Segmentierung

Segmentierung mit	MR8 Filterung [ms]	Texturbasierte Segmentierung [ms]	Gesamtzeit [ms]
CPU Avg	91,96	183,87	275,81
CPU Worst	98,56	237,68	336,24
GPU Avg	12,98	3,87	16,85
GPU Worst	15,11	4,20	19,31
Verhältnis der Vorverarbeitungszeiten von CPU / FPGA			
CPU Avg / FPGA	7,084	47,46	16,37
CPU Worst /	6,521	56,62	17,41

Der Benchmark wurde auf einer Sequenz von 500 Bildern und einem Suchbereich von 600 x 400 Pixeln durchgeführt. Im Durchschnitt ergibt sich für die GPU basierte Implementierung eine Steigerung der Performance um das sechszehnfache gegenüber der CPU Implementierung. Die GPU Implementierung der texturbasierten Segmentierung schafft somit im Durchschnitt bei einer Gesamtausführungszeit von 17 ms eine maximale Segmentierungsrate von knapp 60 Hz.

1.3.5. Objekterkennung

Die algorithmischen Ansätze zur Detektion der Fugenlage als nachgelagerten Schritt der texturbasierten Segmentierung wurden, sofern für die Performance des Algorithmus zuträglich, für die GPU in Form von OpenCL Operatoren parallelisiert. Folgende Ansätze zur Objekterkennung wurden hierbei vollständig bzw. teilweise auf die GPU übertragen:

1. Gradienten Bilder mit Compass Operator, Linienenerkennung durch Hough Lines
2. Gradienten Bilder mit Canny Operator, Linienenerkennung durch Hough Lines
3. Binärbilder der Texturen, Konturerkennung durch Connected Components Labeling
4. Gradienten Bilder mit Compass Operator, Linienenerkennung durch Template Matching
5. Gradienten Bilder mit Canny Operator, Linienenerkennung durch Template Matching

Die Algorithmen wurden bis auf die Konturerkennung durch das Connected Components Labeling (Blob Analyse) und die Hough Line Transformation vollständig für die GPU parallelisiert. Bei der Konturerkennung konnte auf Grund der hohen Komplexität des Verfahrens und bei der Hough Line Transformation aufgrund der zu geringen Problemgröße (Suchbereich 600 px*400 px) keine

relevante Performancesteigerung erzielt werden, deshalb wurde auf den Implementierungsaufwand der Portierung auf die GPU für die beiden Operatoren verzichtet.

Erst ab einem Suchbereich von > 2 MPixeln konnte auch bei der Hough Line Transformation durch Parallelisierung eine Steigerung der Performance beobachtet werden. Im nachfolgenden sind die Benchmarks für den Vergleich zwischen der CPU und der parallelen GPU Implementierung der unterschiedlichen algorithmischen Ansätze zur Objekterkennung aufgelistet.

Tabelle 6
Ausführungszeiten
des Operatoren zur
Objekterkennung
beider Blechkanten
der Fügepartner

Objekterkennung	Compass Edges GPU + HoughLines CPU	Canny Edges GPU + HoughLines CPU	Binarize CPU + Contour Detection	3D Transformation CPU
CPU Avg [ms]	4730,99	7,70	0,76	0,05
CPU Worst [ms]	4951,06	9,13	0,97	0,07
GPU / CPU Avg	28,00	7,64	0,72	0,05
GPU / CPU Worst	30,14	8,86	0,97	0,08
SpeedUp Avg	168,98	1,01	1,06	1,00
SpeedUp Worst	164,27	1,03	1,00	0,92

Für den ersten Ansatz (Compass Edges GPU mit HoughLines CPU) ergab sich durch den hohen Rechenaufwand beim Vergleich der Histogramme der beiden Hälften des „Compass“ Operators eine signifikante Steigerung der Performance um das hundertachtundsechzigfache gegenüber der reinen CPU Implementierung. Beim zweiten Ansatz (Canny Edges GPU mit HoughLine CPU) wurde keine Performance Steigerung erzielt, da hier der signifikante Rechenaufwand in der Linienenerkennung durch die HoughLines-Transformation und nicht in der Kantenerkennung des Canny-Operators (Kernelgröße 3x3) steckt. Wie eingangs erklärt, wurde bedingt durch die geringe Problemgröße keine signifikante Reduktion der Ausführungszeit durch die Parallelisierung der Hough Transformation erreicht. Für den dritten Ansatz (SD-Transformation) wurde wegen der Komplexität des Algorithmus und dessen bereits geringe Rechenzeit von unter 1 ms auf eine Parallelisierung verzichtet.

Für die texturbasierte Segmentierung der Bilddaten und Objekterkennung einschließlich der Koordinatentransformationen ergaben sich folgende Gesamtausführungszeiten (Tabelle 7). Die Gesamtausführungszeiten der verschiedenen Algorithmen zeigten, dass eine Kantenerkennung durch den Compass Operator auch bei einer parallelen GPU Implementierung für eine Auswerterate von 50 Hz zu rechenintensiv ist. Der dritte Ansatz erlaubte eine Rate von > 50 Hz und der zweite Ansatz konnte bei Anwendung der erweiterten Hough Transformation, die nur ein zufällige Auswahl der Kantenpunkte transformierte auch auf über 50 Hz gesteigert werden.

Tabelle 7
Gesamtausführungszeiten
der texturbasierten
Segmentierung und
Objekterkennung mit
Koordinatentransformation

Segmentierung + Objekterkennung + 3D Transformation	Gesamtzeit Ansatz 1	Gesamtzeit Ansatz 2	Gesamtzeit Ansatz 3
CPU Avg [ms]	5006,87	288,00	278,44
CPU Worst [ms]	5217,60	339,27	323,35
GPU / CPU Avg [ms]	44,90	23,89	16,92
GPU / CPU Worst [ms]	47,61	27,42	18,41
SU Avg	111,50	12,06	16,46
SU Worst	109,58	12,40	17,57
Frequenz CPU [Hz]	0,20	3,47	3,59
Frequenz GPU / CPU [Hz]	22,27	41,86	59,10

1.3.6. Plausibilitätskontrolle und Glättung des Signals mit Kalman Filter

Für die Plausibilitätskontrolle der Messdaten wurden zunächst Annahmen aufgestellt, die in einer Messreihe validiert werden mussten. Anschließend wurde jeder der Messwerte (Seitenversatz und Spaltbreite) durch einen Kalman Filter geglättet. Das Fraunhofer ILT hatte bereits in anderen Projekten nachgewiesen, dass durch eine einfache Kalman Filterung eine robuste Messgröße abgeleitet werden kann. Der Kalman Filter wurde dabei mit einer linearen Glättung der Messwerte verglichen. Zur Plausibilitätsprüfung der Messdaten wurden folgende Annahmen aufgestellt:

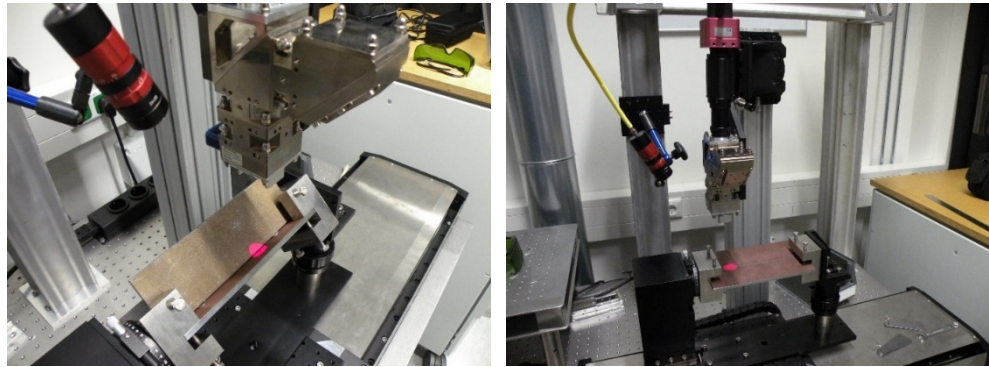
1. Lage und Winkel der Fugenkanten werden im zeitlichen Verlauf auf Sprünge geprüft.
Geprüft wird, wie groß die Sprünge der Position und des Winkels der Fugenkanten sind und welche maximale Änderungsrate sie aufweisen dürfen (0 mm auf 5 mm).
2. Spaltbreite und Fläche im zeitlichen Verlauf auf Sprünge prüfen.
Geprüft wird, wie groß die minimale und maximale Fugenbreite bzw. Fugenfläche bei der Abbildung über das optische System der Bearbeitungsoptik sind und welche Änderungsrate sie aufweisen dürfen.
3. Der Schwerpunkt der Fugenkontur des neuen Bildes hat den minimalen Abstand aller erkannten Konturen zum Schwerpunkt der letzten Fugenkontur.
Geprüft wird, ob die Annahme eine robuste Erkennung der richtigen Fugenkontur ermöglicht oder ob weitere Eigenschaften der Konturen als Filterkriterium zur Identifikation der Fuge berechnet werden müssen.
4. Überprüfung der Zirkularität und des Längen-/ Breitenverhältnis der Fugenkontur.
Geprüft wird, welche Zirkularität die als Fuge erkannten Konturen aufweisen, um sie z.B. von Konturen der Heftpunkte zu unterscheiden. Untersucht wird, welche Längen zu Breiten Verhältnisse die Fugenkonturen aufweisen.

Zur Bewertung der Einflüsse der Annahmen auf die Messgenauigkeit des Sensors wurden Vergleiche des Messfehlers mit und ohne das entsprechende Prüfkriterium über mehrere Messreihen durchgeführt.

1.3.7. Offline Annotation der Prozessaufnahmen und Vergleich mit Fugenlagendetektion durch vorhandene texturbasierte Bildverarbeitungsalgorithmen

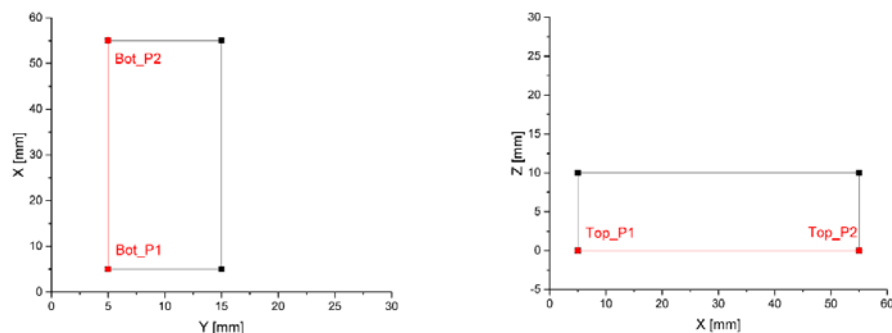
Eine händische Annotation von Bilddaten ist fehleranfällig und zeitaufwendig. Fehler bei der Annotation bilden sich als Messfehler ab und verhindern eine genaue Analyse der Messmittelfähigkeit. Für einen automatisierten Vergleich der unterschiedlichen Verfahren zur Objekterkennung und eine Bewertung der Einflüsse der verschiedenen Vorverarbeitungsschritte wurden möglichst präzise Referenzdaten benötigt. Die Generierung exakter "GroundTruth" Daten der Fugenlage wurde erst durch den Aufbau eines Prüfstands am Fraunhofer ILT ermöglicht.

Abbildung 35
Versuchsaufbau zur automatisierten Erfassung der 3D Ground Truth Daten
Links: T-Stoß
Rechts: Stumpfstoß



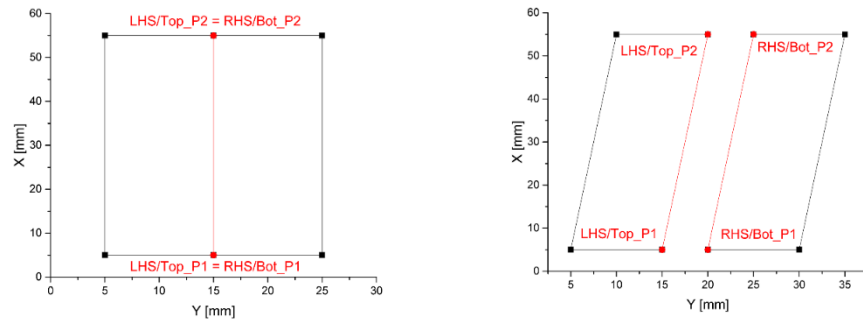
Durch die definierte Einspannung der Proben war die Lage und Breite der Fuge durch die Start- und Endpunkte der Blechkanten eindeutig definiert. Aus den Eckpunkten wurden die Geradengleichungen der beiden Blechkanten berechnet. Durch diese Maßnahme waren die Positionen beider Fugenkanten im Raum über den gesamten Bahnverlauf eindeutig bestimmt.

Abbildung 36
3D Ground Truth Daten am T-Stoß

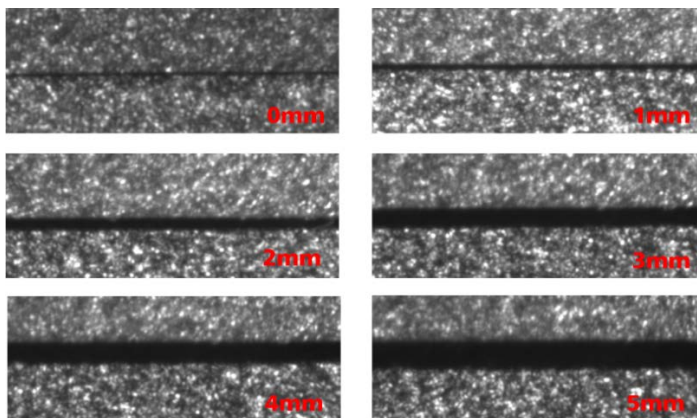


In Abbildung 36 sind die erfassten 3D "GroundTruth" Daten am T-Stoß für den technischen Nullspalt abgebildet. Die Eckpunkte der Bleche lagen am Prüfstand in der X-, Y-Ebene für das Gurtblech und in der Y-, Z- Ebene für das Stegblech.

Abbildung 37
Ground Truth Daten
am Stumpfstoß
„technischer
Nullspalt“ und
„paralleler Spalt“



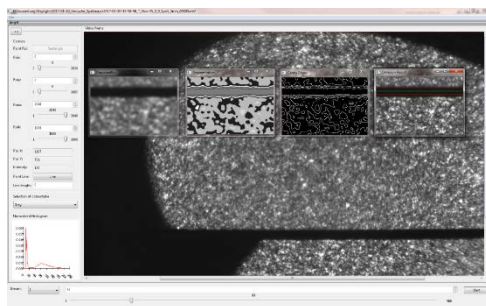
In Abbildung 37 sind die 3D "GroundTruth" Daten für den technischen Nullspalt und paralleler Spalt am Stumpfstoß dargestellt. Die Eckpunkte der Bleche lagen am Prüfstand in der X-, Y-Ebene. Das linke Blech entsprach dabei dem Stegblech des T-Stoßes und das rechte dem Gurtblech.



Außerdem wurde eine Softwarelösung zur Offline Evaluation der Algorithmen entwickelt, um die erfassten Messdaten des Prüfstandes und der Prozessaufnahmen des iLAS automatisiert auszuwerten. Über ein Konsolenprogramm konnten, sofern bekannt, weitere 3D "GroundTruth" Daten der Fugenlage anhand der Eckpunkte und die zugehörige Kalibration der Kamera eingelesen werden.

Abbildung 38 Visualisierung T-Stoß 0 – 5 mm Spaltbreite unter 45° am Prüfstand mit PRECITEC YW30 Schweißoptik

Ohne "GroundTruth" Daten wurden nur die Messergebnisse ohne ihre Referenz und Messfehler ausgegeben. Die Schnittstelle des Algorithmus war in der Art ausgeführt, dass sämtliche Parameter über die Konfigurationsnummer (Template-Nr. des Roboters) kodiert waren, und die Kamerakalibration abhängig von der aktuellen Winkelorientierung des Sensors geladen wurde. Dadurch konnte der Algorithmus nach Abschluss der Offline Evaluation ohne Anpassungen in das PMCS eingebunden werden.

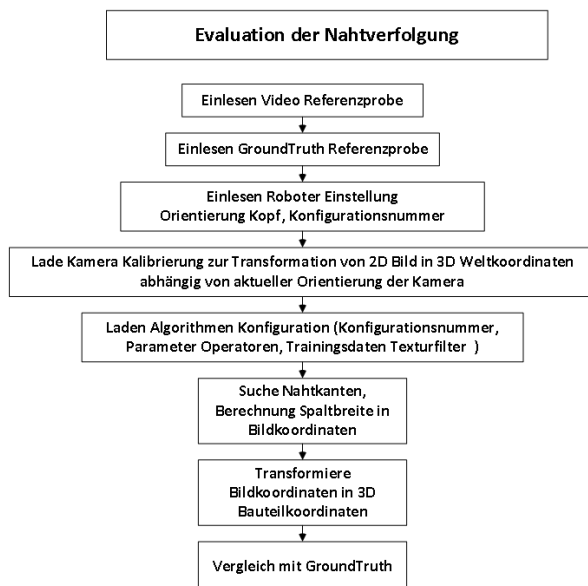


Die Benutzeroberfläche der Softwarelösung ist in Abbildung 39 abgebildet. Exemplarisch wird im Bild der ausgeführte Algorithmus Canny Edges mit Hough Line Detektion der Fugenkanten gezeigt. Durch eine Kalibration der Kamera unter den entsprechenden Orientierungen des Bearbeitungskopfes zum Werkstück wird die Messgenauigkeit des Systems nicht mehr in 2D Bildkoordinaten, sondern direkt in 3D Weltkoordinaten am Bauteil evaluiert.

Abbildung 39 Benutzeroberfläche der Software zur Evaluation der Algorithmen

Eine Annotation der Fugenlage über 2D Bildpunkte konnte diese Einflüsse nicht berücksichtigen und beschrieb lediglich wie genau der Algorithmus die Fuge im Bild erkennen konnte, aber nicht die tatsächliche Messgenauigkeit am Werkstück.

Außerdem ließ sich die Erfassung der 3D "GroundTruth" Daten am Prüfaufbau automatisieren und die händische Annotation der Bilddaten entfiel vollständig. Der Programmablauf Evaluation der Algorithmen ist in Abbildung 40 schematisch dargestellt.



Die Evaluation der Messgenauigkeit des Algorithmus in 2D Bildkoordinaten konnte nach wie vor durchgeführt werden, in dem die 3D Weltkoordinaten der Fugenkanten über die Kalibrationsmatrizen der Kamera in 2D Bildkoordinaten zurück transformiert worden. Durch die Rücktransformation der Bauteilkoordinaten auf den Kamerachip konnte außerdem die Güte der Kalibrierung bzw. die Messunsicherheit des Sensors unter einer bestimmten perspektivischen Anordnung untersucht werden. Zur Berücksichtigung der relativen Lage des Schweißkopfes im Raum hatte das Fraunhofer ILT einen Versuchsstand zur Kalibrierung der Kamera aufgebaut.

Abbildung 40 Programmablauf Evaluation der Algorithmen

Der Versuchsstand ermöglichte die Kalibrierung der Kamera an beiden Stoßarten Stumpf- und T-Stoß unter den entsprechenden Orientierungswinkeln des Bearbeitungskopfes relativ zum Werkstück.

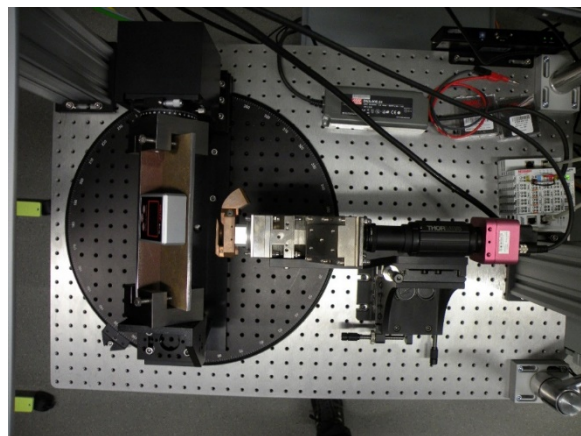
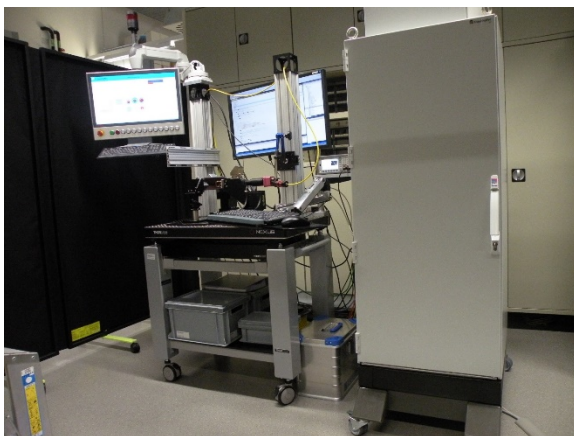


Abbildung 41 Versuchsstand zur perspektivischen Kalibrierung der Kamera

Für den Stumpfstoß wurde zunächst eine Kalibrierung für eine Orientierung von 90° zur X- und Y-Achse durchgeführt, so dass die Kamera senkrecht auf das Bauteil blickte. Dies entsprach, bezogen auf das zur Kalibrierung eingesetzte Lochkameramodell (s. Abbildung 42 links), einer idealen Anordnung der Kamera zum Bauteil und diente der Analyse der intrinsischen Daten der Kamera, da sich die Perspektive in der senkrechten Anordnung durch eine einfache Skalierung zwischen Bildebene und Kamerachip ergab und der Abbildungsmaßstab (Skalierungsfaktor) für die gesamte Bildebene konstant war. Alle Verzerrungen der Bildpunkte waren in dieser Anordnung ausschließlich auf die Aberrationen des optischen Systems zurückzuführen.

Werden die Lichtstrahlen an den Randbereichen der Linsen des optischen Systems stärker bzw. schwächer gebrochen, kommt es zu einer negativen bzw. positiven radialen Verzeichnung der Bilddaten. Die intrinsischen Daten werden als ein Polynom von Verzeichnungskoeffizienten modelliert. Die erfassten Bild- bzw. Messdaten werden dann im Sensorbetrieb durch Faltung mit den Verzeichnungskoeffizienten entzerrt.

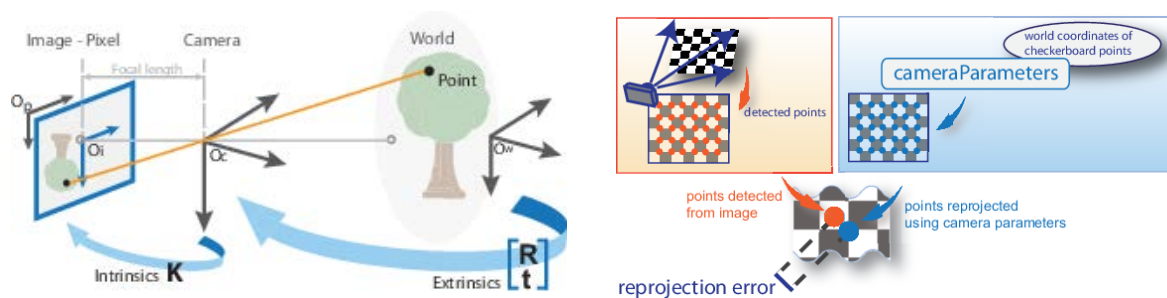


Abbildung 42 links: Visualisierung des Lochkameramodells (Quelle: MathWork Online Dokumentation)
rechts: Fehler bei Rückprojektion der 3D Koordinaten der Bildpunkte des Kalibrationsmusters in 2D Bildpunkte

Für den T-Stoß wurde eine Kalibrierung für die Orientierung von 0° zur X-Achse und 45° zur Y-Achse (Ideale Anordnung Kamera zum T-Stoß in der Winkelhalbierenden) bzw. für die Orientierung von 5° zur X-Achse und 20° zur Y-Achse (Orientierung des Bearbeitungskopfes im Prozess) durchgeführt. Die perspektivische Verzerrung der Bilddaten wurde in Form einer Rotationsmatrix und einem Translationsvektor modelliert und beschreibt die extrinsischen Daten des Kameramodells. Auf Basis der verschiedenen Kalibrierungen der Kamera wurde der perspektivische Einfluss auf die Verzerrung der Bilddaten am T-Stoß mit der idealisierten Anordnung am Stumpfstoß und T-Stoß verglichen. Die Güte der Kalibrierung bzw. der Einfluss der perspektivischen Verzerrung wurde durch den mittleren Fehler der Rücktransformation der Punkte des Kalibrationsmusters bewertet (s. Abbildung 42 rechts). Durch die Kalibrierung der Kamera wurde so sichergestellt, dass die Einflüsse der perspektivischen Verzerrung und die Aberrationen des optischen Systems korrekt berücksichtigt wurden und die Messgenauigkeit abhängig von der Orientierung des Sensors und der Geometrie des Stoßes genau spezifiziert war.

1.3.8. Weiterentwicklung der texturbasierten Fugenfolge hinsichtlich Detektion aller definierten Stoßfugenkonfigurationen unter Berücksichtigung der relativen Lage im Raum

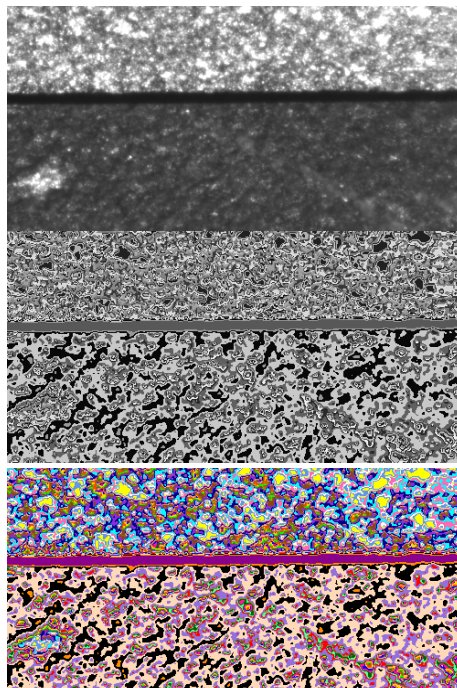
Index Textur / Cluster	Name	R	G	B	RGB Color
1	Black	0	0	0	Black
2	green	0	255	0	Green
3	blue	0	0	255	Blue
4	yellow	255	255	0	Yellow
5	red	255	0	0	Red
6	White	255	255	255	White
7	navy	0	0	128	Navy
8	DarkGreen	0	100	0	DarkGreen
9	DarkOliveGreen2	202	255	112	DarkOliveGreen2
10	gold	255	215	0	Gold
11	DarkMagenta	139	0	139	DarkMagenta
12	MediumPurple	147	112	219	MediumPurple
13	goldenrod4	139	105	20	Goldenrod4
14	DarkSlateGrey	47	79	79	DarkSlateGrey
15	PaleVioletRed	219	112	147	PaleVioletRed
16	cyan	0	255	255	Cyan
17	Blue Violett	138	43	226	Blue Violett
18	kañki4	139	134	78	Kañki4
19	DarkOrange	255	140	0	DarkOrange
20	chocolate 4	139	69	19	Chocolate 4
21	Snow2	205	201	201	Snow2
22	CornflowerBlue	100	149	237	CornflowerBlue
23	DeepPink	255	20	147	DeepPink
24	OliveDrab	107	142	35	OliveDrab
25	PeachPuff	255	218	185	PeachPuff
26	salmon	250	128	114	Salmon
27	HotPink	255	105	180	HotPink
28	OrangeRed	255	69	0	OrangeRed
29	purple4	85	26	139	Purple4
30	SeaGreen1	84	255	159	SeaGreen1
31	gray40	102	102	102	Gray40
32	MistyRose1	255	228	225	MistyRose1

Im weiteren Projektverlauf wurden hinsichtlich der Weiterentwicklung der Algorithmen zur Stabilisierung des Ergebnisses der texturbasierten Segmentierung weitere Anstrengungen unternommen. Eine Farbkarte zur Falschfarbendarstellung der Texturen wurde entwickelt. Diese Farbkarte befähigt den Benutzer auch bei einer hohen Anzahl an Texturen (8 bis 32) eine Liste der zu verfolgenden Texturen auszuwählen und entsprechend in der Sensorkonfiguration zu hinterlegen.

Abbildung 43 Farbkarte zur Auswahl der zu verfolgenden Texturen

Die Auswahl der Texturen, die die Fuge beschreiben, anhand einer Liste in Falschfarbendarstellung bietet eine bessere Selektivität als dies durch ein Graustufenbild für den Benutzer möglich ist. Exemplarisch ist dieser Vorgang in Abbildung 44 für eine Aufnahme am T-Stoß dargestellt.

Abbildung 44 Aufnahme „Technischer Nullspalt“ am T-Stoß unter 45°



Texturbild der Aufnahme in Graustufen mit 30 Texturen

Texturbild in Falschfarbendarstellung mit 30 Texturen.

Zu verfolgende Texturen nach Farbkarte 11 (Magenta) und 19 (Dark Orange)

Durch dieses zusätzliche Werkzeug wurde die Anwendbarkeit des Verfahrens bei Segmentierung eines „technischen Nullspalts“ gesteigert. Die Spaltbreitenerkennung wurde ebenfalls durch die stabilere Segmentierung der Bilddaten verbessert. Dies wird nachfolgend am Beispiel einer Abbildung des „technischen Nullspalts“ am T-Stoß unter 20° demonstriert. Hierzu werden zunächst eine, dann zwei und im letzten Schritt drei Texturen als Fuge ausgewählt und verfolgt.

Abbildung 45
Technischer Nullspalt
T-Stoß unter 20°

Falschfarben
Darstellung der
Texturen

Segmentierung der
Textur 11 (Magenta)

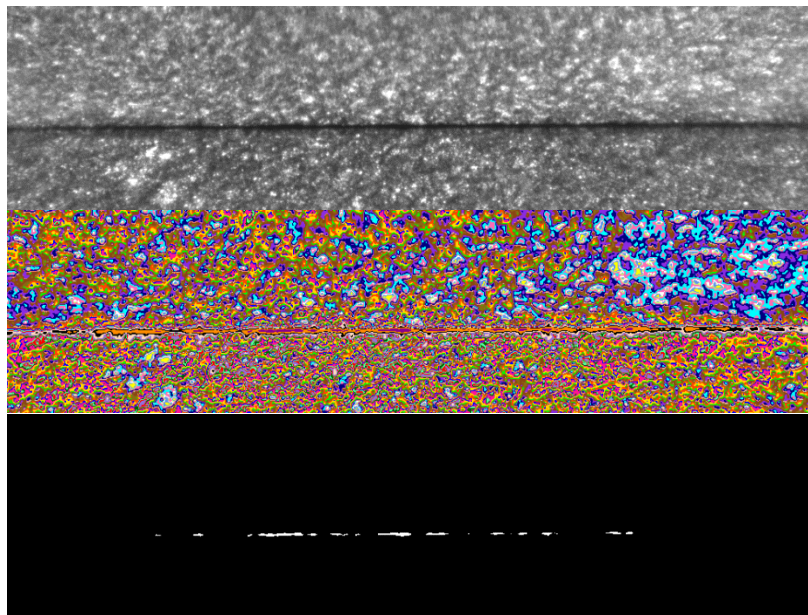


Abbildung 45 stellt das Segmentierungsergebnis mit nur einer Textur dar. Der flache Beobachtungswinkel unter 20° und die damit verbundenen projektiven und perspektivischen Verzerrungen des Bildes führen zu einer kleineren Darstellung des Spaltes im Bild als unter einem Beobachtungswinkel von 45°. Der Spalt kann nicht zuverlässig durch nur eine ausgewählte Textur als geschlossene Kontur segmentiert werden. In Abbildung 46 ist das Segmentierungsergebnis mit zwei und in Abbildung 47 mit drei segmentierten Texturen dargestellt. Durch eine größere Anzahl an Texturen wird der Bereich der vorliegenden Fuge eindeutiger erfasst.

Abbildung 46
Segmentierung der
Textur 11 (Magenta)
und 19 (Dark
Orange)

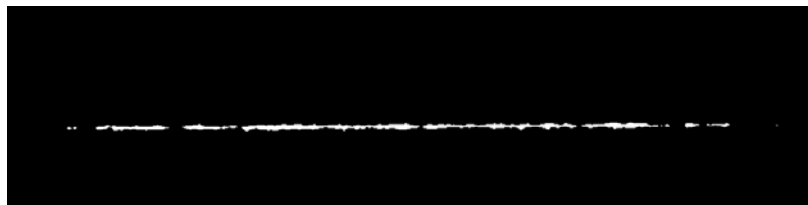


Abbildung 47
Segmentierung der
Textur 1 (Schwarz),
11 (Magenta) und
19 (Dark Orange)



In Abbildung 48 bis Abbildung 50 ist das Ergebnis der nachgelagerten Konturerkennung der segmentierten Fuge dargestellt. In roter Farbe wird die als Fuge erkannte Kontur und in blauer Farbe alle erkannten Konturen dargestellt. Die grüne Linie repräsentiert die aus der Punktwolke aller Randpixel der als Fuge erkannten Texturen mittels linearer Regression berechnete Mittellinie (Fugenmitte / Sollposition TCP). Die gelben Linien geben die obere und untere Fugenkante wieder, die sich aus der Verschiebung der Fugenmitte um die halbe Höhe des minimal umschließenden Rechtecks (rotes Rechteck) der als Fuge erkannten Kontur ableiten. Der grüne Punkt zeigt die Chipmitte des Sensors (TCP der Bearbeitungsoptik) an.

Abbildung 48
Ergebnis der
Konturerkennung
der Fuge bei
Segmentierung einer
Textur

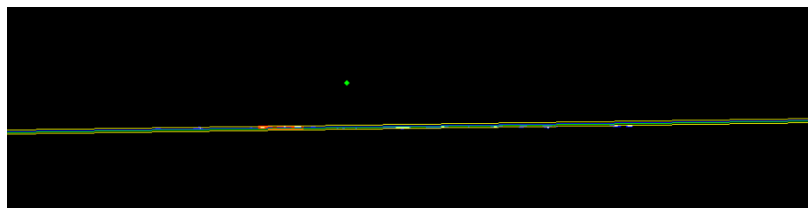


Abbildung 49
Ergebnis der
Konturerkennung
der Fuge bei
Segmentierung von
zwei Texturen

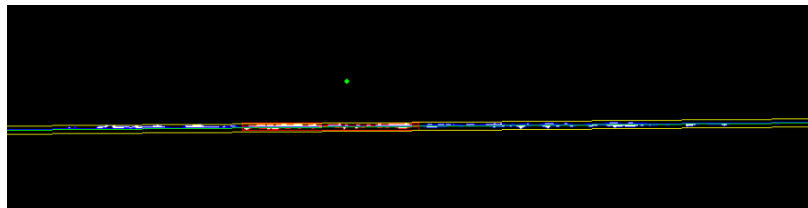
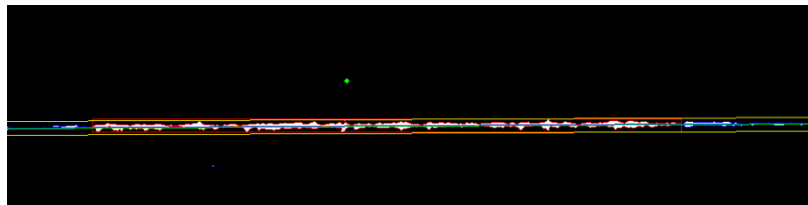


Abbildung 50
Ergebnis der
Konturerkennung
der Fuge bei
Segmentierung von
drei Texturen

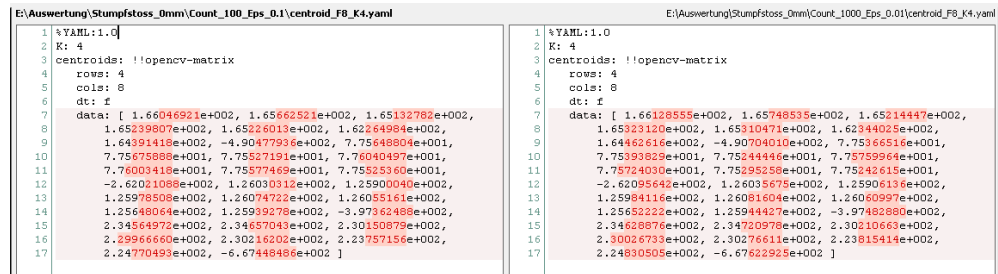


Die Bewertung der Ergebnisse führte zu dem Schluss, dass durch die Segmentierung mehrerer Texturen, die die Fuge als geschlossene Kontur beschreiben, die Orientierung der Fuge, repräsentiert durch die berechnete Mittellinie (grüne Linie), genauer bestimmt werden kann. In Abbildung 48 bis Abbildung 50 wird dieses Ergebnis verdeutlicht. Durch nur eine Textur (vgl. Abbildung 45) besteht die segmentiert Fläche aus mehreren Konturen. Für die Berechnung der Mittellinie wird die Kontur mit der größten Fläche angenommen. Das Ergebnis der Konturerkennung ist in Abbildung 48 dargestellt. Der Winkel in Bezug auf die horizontale Kamerachipachse ist größer als die tatsächliche Lage der Fuge. Durch die Auswahl von drei Texturen (vgl. Abbildung 47) wird eine größere geschlossene Kontur segmentiert. Das Ergebnis der Konturerkennung in Abbildung 50 nähert sich der tatsächlichen Lage der Fuge im Raum wesentlich besser an.

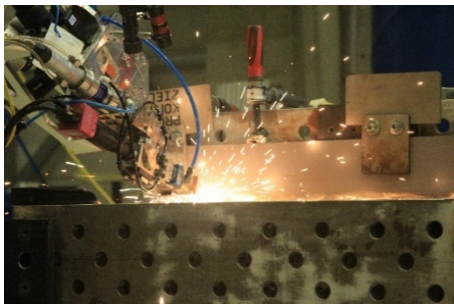
Des Weiteren wurde die Parametrierung des k-means Clustering untersucht, um sicherstellen zu können, dass während der Trainingsphasen der Clusterzentren (Schwerpunkte der MR8 Filterantworten zur Beschreibung der Texturen) keine Verschiebungen zwischen den Schwerpunkten stattfinden. Dies war notwendig, um die online Auswertung der Bilddaten auf stabilen Trainingsdaten aufzusetzen.

Dazu wurde zum einen die maximale Anzahl der Iterationen als auch die Genauigkeit der Zentren als Abbruchkriterium der Trainingsphase variiert. Die maximale Anzahl an Iterationen wurde dabei systematisch von 100 bis 10.000.000 und die Genauigkeit Epsilon von 0,1 bis 0,0000001 in Zehnerpotenzen variiert (s. Abbildung 51).

Abbildung 51
Vergleich von
Iterationen = 100,
Epsilon = 0,1 mit
Iterationen = 1000,
Epsilon = 0,01



Auf Grund der Anpassung der Brennweite des Bearbeitungskopfes am vollautomatisierten System von 150 mm auf 200 mm und der Auswahl eines Kamerachips mit höherer Auflösung und spektraler Empfänglichkeit bei 940 nm (Sensor: CMV2000) wurde das optische System der Abbildungsoptik zur Verringerung von Aberrationen überarbeitet. Nach Abschluss der Anpassungen wurde eine vollständige Kamerakalibrierung für beide Brennweiten und die Prozessanordnungen Stumpfstoß 90°, T-Stoß 45° und T-Stoß 20° (quer zur Vorschubrichtung), 5° (in Vorlauf) durchgeführt.



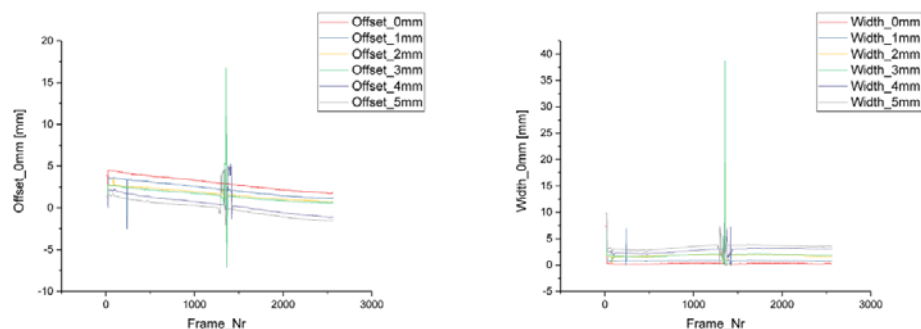
Im Oktober 2016 wurde eine Versuchsreihe zur Aufnahme von Schweißprozessen sowie Regelungstest mit dem PMCS-System des Automatiksystems am iLAS durchgeführt.

Die Versuche beinhalteten Aufnahmen mit und ohne Schweißprozess an Schweißproben als auch am Demonstratorbauteil der Meyer Werft. Zunächst wurden Aufnahmen am T-Stoß ohne Prozess unter Anstellung der Schweißoptik von 20° zum Gurtblech aufgezeichnet. Der Spalt zwischen den Fügepartnern wurde durch Abstandsbleche eingestellt. Die Aufnahmen wurden nach der Versuchsreihe offline ausgewertet

Abbildung 52 Versuchsanordnung am iLAS, Oktober 2016

Abbildung 53
Auswertung der
Aufnahmen Nr.02-
07 mittels
texturbasierter
Fugenfolge

links: Offset zum
TCP
rechts: Spaltbreite



In Abbildung 53 links wird der Graph der gemessenen Offsetwerte des TCPs (Bildmitte) zur Fugenmitte für eingestellte Spaltmaße von 0 bis 5 mm dargestellt. Die Interpretation der Messdaten für den eingestellten Nullspalt wies auf eine deutliche Dejustage des TCP zur Fugenmitte hin. Der jeweils fallende Kurvenverlauf ließ sich durch eine falsche Ausrichtung der Klemmvorrichtung zur programmierten Bahn erklären, da sich der während der Messung aufgezeichnete Bahnrichtungsvektor in Vorschubrichtung nicht verändert. Die in Abbildung 53 rechts dargestellten Messwerte für die detektierten Spaltbreiten der jeweiligen Messung deuteten auf ein robustes Messergebnis hin. Die Messabweichungen in der Mitte der Kurven wurden durch ein Blech, das zur Einstellung des definierten Spaltmaßes genutzt wurde, verursacht. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 54 anhand der detektierten Kontur und der vermeintlich erkannten Kanten verdeutlicht.

Abbildung 54
Messfehler im
Bereich des
Abstandshalters

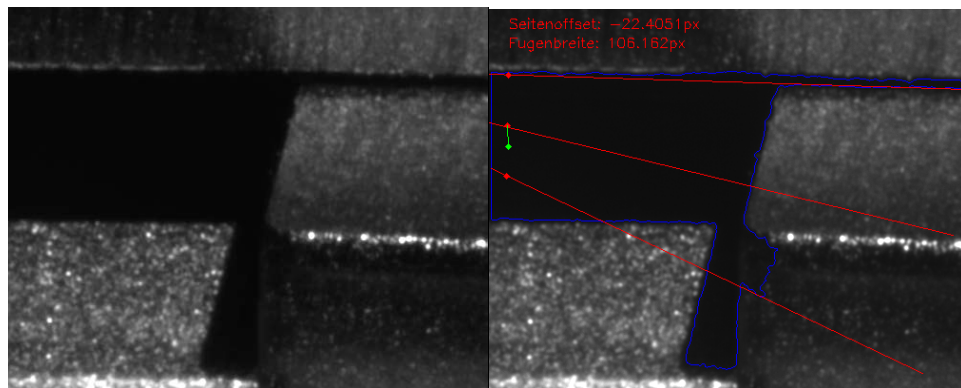
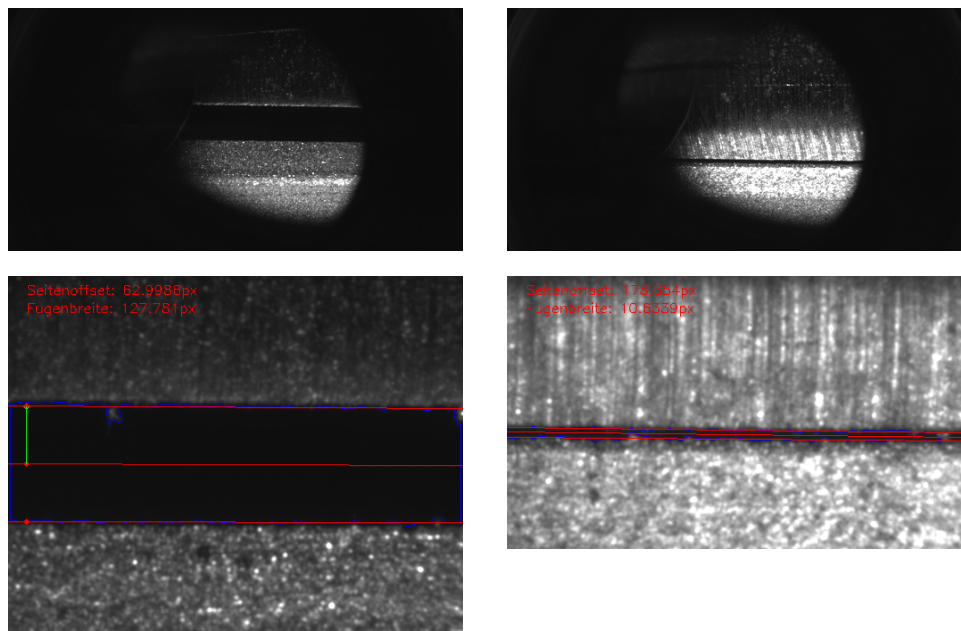


Abbildung 55
Visualisierung
Aufnahme (oben)
und Messergebnis
der koaxialen
texturbasierten
Fugenfolge (unten)

Links: Messung 05
rechts: Messung 07

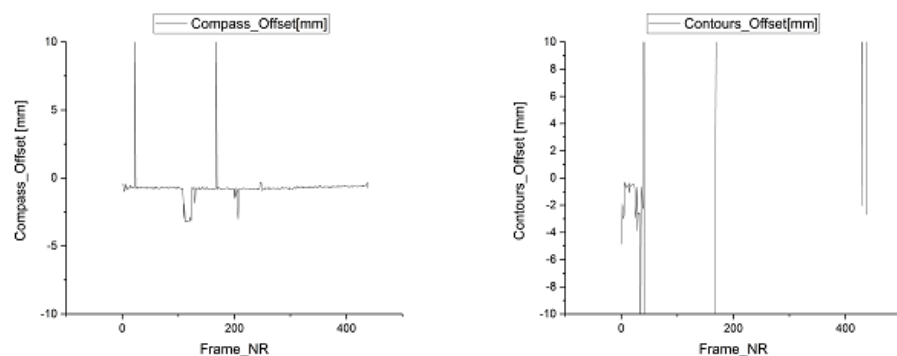


In Abbildung 55 werden die erkannten Fugenkanten für einen 5 mm Spalt (links) und einen Nullspalt (rechts), eingezeichnet in einen Bildausschnitt des aufgenommenen Kamerabildes, gegenübergestellt.

Des Weiteren wurden Aufnahmen am T-Stoß mit Prozess aufgezeichnet und nach der Versuchsreihe ausgewertet. Die Versuche mit definiert eingestellter Spaltbreite zeigten, dass sich aufgrund von thermischen Verzug der Bauteile während des Schweißprozesses, die Stoßfugen zu Nullspalten ausprägten. Da die Fugenlagendetektion für Nullspalt noch nicht abschließend verifiziert und keine maximale Begrenzung für den seitlichen Versatz in der Robotersteuerung hinterlegt war, wurde vorerst auf einen Onlinetest der Regelung verzichtet. Das Risiko einer Beschädigung der Schweißoptik wurde als zu hoch eingeschätzt, da sich diese während der Schweißung durch den flach eingestellten Bearbeitungswinkel von 20° bereits sehr nahe am Gurtblech befanden.

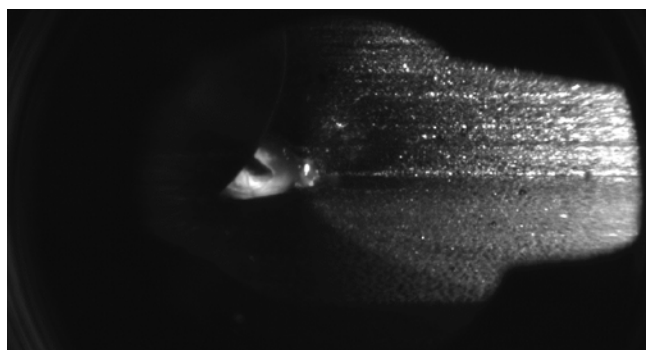
Abbildung 56
Auswertung der
Aufnahme Nr.12
eingestellter
Nullspalt

Operatortyp
links: Kante
rechts: Kontur



Die Auswertung der Prozessaufnahmen Nr.12 zeigten die Grenzen der bisher implementierten Konturerkennung zur Spaltdetektion durch den Einsatz eines Blob-Operators auf. Die Konturerkennung benötigte zur sicheren Erfassung der Fuge immer ein Binärbild, in dem auch eine flächige Textur der Fuge vorhanden war. Bei einem vollständig geschlossenen Spalt war dies nicht der Fall, lediglich ein Gradient der Texturen entlang der Stoßfugen der beiden Fügepartner konnte ermittelt werden. In Abbildung 56 rechts ist der durch den Ansatz der Konturerkennung und in Abbildung 56 links der durch einen Kantendetektor ermittelte Offsetwert dargestellt.

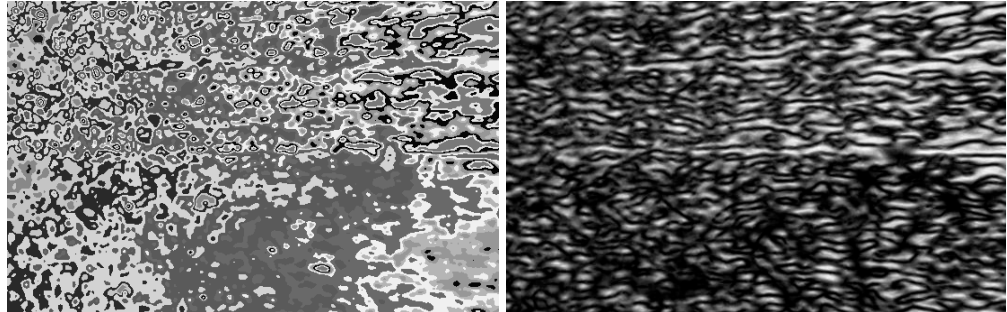
Abbildung 57
Einzelbild aus
Aufnahme 12



Exemplarisch sind in Abbildung 57 bis Abbildung 59 die einzelnen Bildverarbeitungsschritte zur Kantendetektion dargestellt. Abbildung 57 gibt das ausgewählte Eingabebild einer Schweißung beim technischen Nullspalt am T-Stoß wieder. Der Betrachter kann an den sich unterschiedlich ausprägenden Blechoberflächen in der Darstellung die Stoßfuge erahnen.

Abbildung 58
Operator-Schritte

Links: Textur
rechts: Gradienten-
Bild nach Compass-
Operator



In Abbildung 58 links ist das aus der zuvor gezeigten Aufnahme ermittelte Texturbild wiedergegeben. In Abbildung 58 rechts wird das mit dem Compass-Operator berechnete Gradienten-Bild gezeigt.

Abbildung 59
Bestimmung der
Stoßfuge nach
Hough-
Transformation

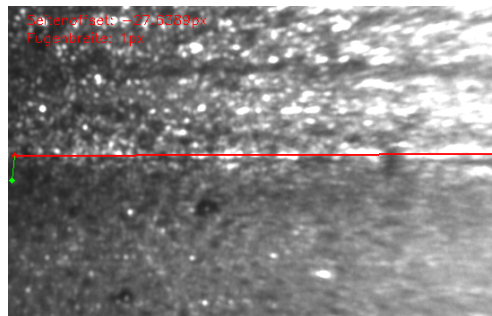
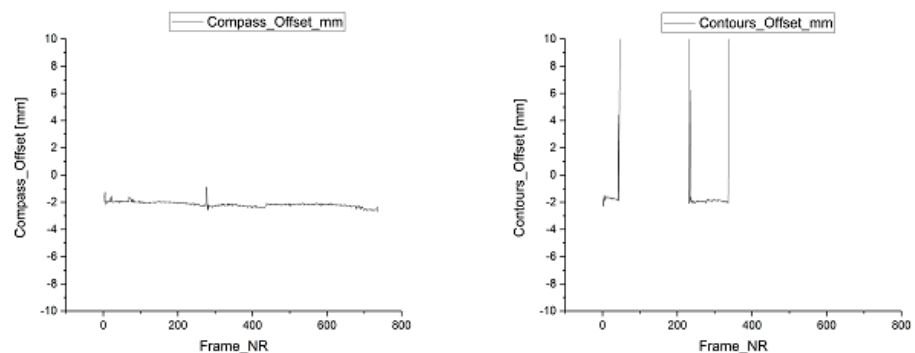


Abbildung 59 stellt das Ergebnis der Geradenerkennung mittels der Hough-Transformation dar.

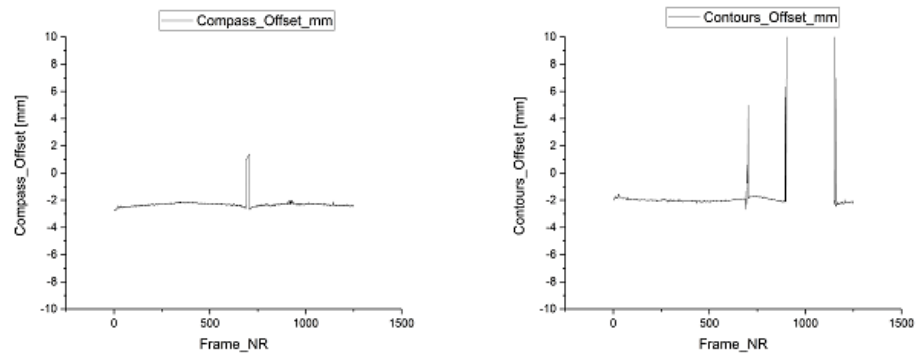
In den folgenden Bildern werden die Ausgaben durch Anwendung der beiden unterschiedlichen Operatoren für wechselnde Spaltmaße von 1 bis 3 mm gegenübergestellt. Zu beachten ist zudem, dass sich der Spalt durch den Schweißprozess schloss und nur an den Stellen mit Abstandsblechen in einer Zwangsposition befand.

Abbildung 60
Auswertung
Aufnahme 15
Spalt 1 mm



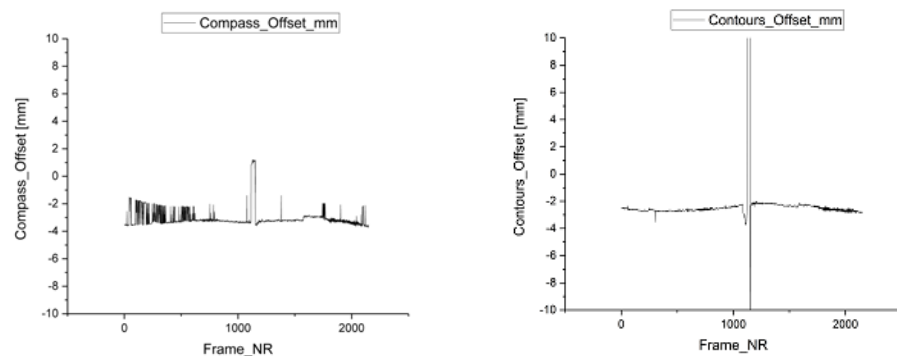
Für einen voreingestellten Spalt von 1 mm war das Ergebnis (siehe Abbildung 60) mit dem zuvor dargestellten technischen Nullspalt vergleichbar. Der Spalt schloss sich kurz nach Schweißbeginn und die Auswertung durch die Konturerkennung lieferte kein zuverlässiges Ergebnis.

Abbildung 61
Auswertung
Aufnahme 17
Spalt 2 mm



Die Auswertung, dargestellt in Abbildung 61, repräsentiert den Übergang der Anwendbarkeit von Kanten- und Konturerkennung. In der ersten Hälfte der Schweißung lieferte der Contour-Operator ein brauchbares Ergebnis bis zur mittleren Einspannung. In der zweiten Hälfte des Schweißprozess konnte jedoch kein Offsetwert bestimmt werden.

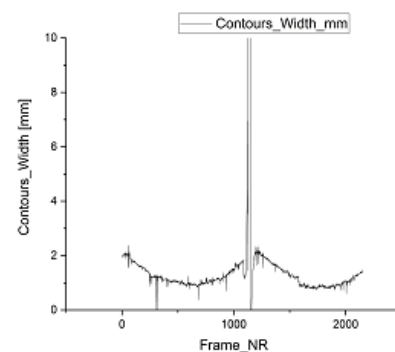
Abbildung 62
Auswertung
Aufnahme 09
Spalt 3 mm



Ab einem Spaltmaß von 3 mm (siehe Abbildung 62) konnte der Offsetwert durch die Anwendung des Compass-Operators nicht mehr zuverlässig bestimmt werden, dem gegenüber war eine Konturerkennung über die gesamte Aufnahme möglich.

Abbildung 63
Auswertung
Aufnahme 17
Spalt 2 mm

Vermessung der
Fugenbreite mittels
Konturerkennung



Abschließend wird in Abbildung 63 das Ergebnis der Vermessung der Fugenbreite mittels Konturerkennung graphisch dargestellt. Der Kurvenverlauf gibt den sich schließenden und öffnenden Spalt wieder, wobei in Mitte der Schweißnaht der Spalt durch das Abstandsblech offen gehalten wurde.

Anhand der oben dargestellten Ergebnisse wurde nachgewiesen, dass auch im Schweißprozess die Fugenlage und –breite mit dem texturbasierten Ansatz erfasst werden kann. Die Ergebnisse führten ferner zu dem Schluss, dass für ein zuverlässiges Verfahren, zum einen der Gradienten basierte Ansatz zur Bestimmung der Fugenlage (Compass Operator, HoughLines) bei kleinen Spaltmaßen und zum anderen die Konturerkennung zur robusten Vermessung der Fugenlage und –breite einzusetzen ist.

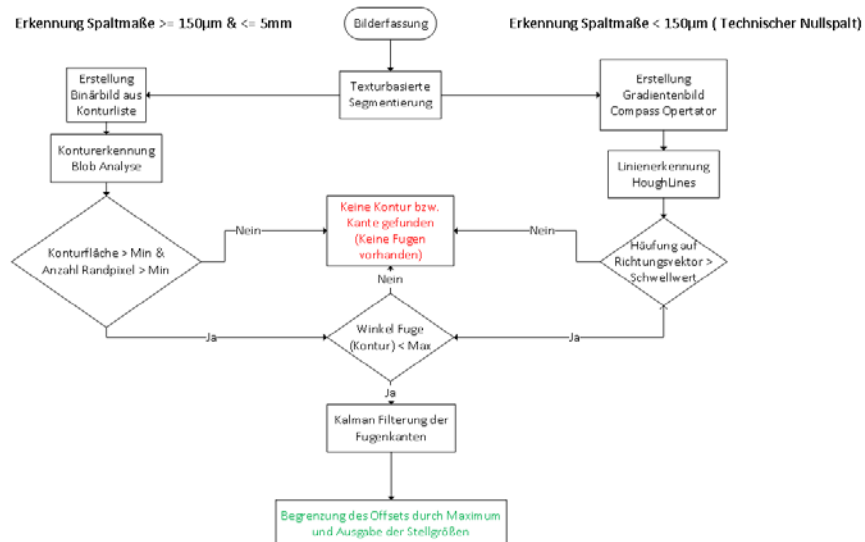
Bewertung der Ergebnisse der Messreihe (Vor und Nachteile der beiden Verfahren):

Tabelle 8
Vor und Nachteile
der beiden
texturbasierten
Verfahren

Verfahren	Vorteile / Nachteile
Konturerkennung	Robust bei Messunsicherheiten
	Vermessung der Fugenbreite
	Bei technischer Nullspalt nicht verwendbar
Linienerkennung	Gradienten-basierter Ansatz Prinzip bedingt fehleranfälliger
	Fugenbreite kann nicht vermessen werden
	Bestimmung der Fugenlage bei technischem Nullspalt möglich

Auf Basis der zuvor beschriebenen Ergebnisse wurde durch das Fraunhofer ILT ein kombiniertes Verfahrens, aus Linien- und Konturerkennung zur geschlossenen Auswertung der Prozessaufnahmen mittels texturbasierter Bildverarbeitung entwickelt, und dazu eine Aussagelogik zur Prüfung der Validität der Messwerte des jeweiligen Verfahrens erarbeitet.

Abbildung 64
Aktualisierter PAP
für kombiniertes
Verfahren aus
Linien- und
Konturerkennung



In Abbildung 64 wird der daraufhin aktualisierte Programmablaufplan für das kombinierte Verfahren dargestellt. Die erfassten Bilder werden nach der texturbasierten Segmentierung sowohl durch einen Compass Operator als auch durch eine Blob-Analyse zur Konturerkennung verarbeitet. Durch logische Verknüpfung der jeweiligen Ergebnisse, wird das valide Ergebnis identifiziert und für die Ausgabe weiter verarbeitet. Für die Konturerkennung werden folgende Kriterien für ein valides Messergebnis geprüft:

1. Anzahl der Randpixel der Kontur > 100 Punkte
2. Fläche der Kontur > 200 px²
3. Kontur mit größter Fläche im Suchbereich (Sensor ROI)
4. Winkel der linearer Regression der Punktwolke der Kontur < 3° (für lineare Nähte)

Für die Linienerkennung werden folgende Kriterien geprüft:

1. Maximaler Gradient mit Häufung > Schwellwert Hough Transformation vorhanden?
2. Winkel des Richtungsvektors des maximalen Gradienten < 3° (für lineare Nähte)

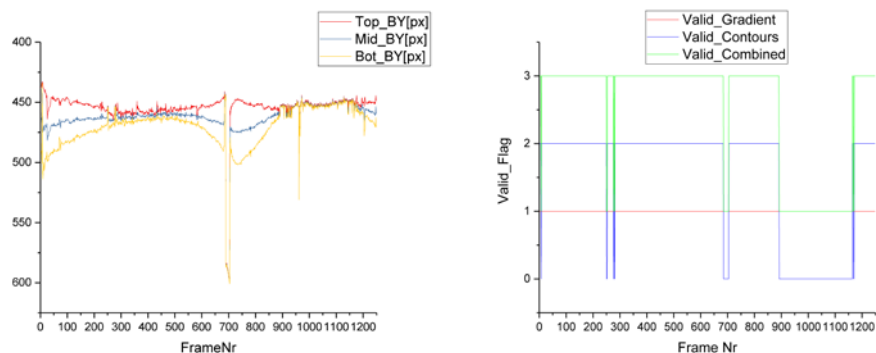
Weist die Konturerkennung ein valides Ergebnis auf, wird der Ausgabewert als aktueller Messwert bestätigt, da nur die Konturerkennung auch die Fugenbreite vermessen kann. Liefert die Konturerkennung kein valides Ergebnis, wird geprüft ob die Linienerkennung einen validen Messwert für die Fugenlage berechnen konnte. Werden für beide Verfahren die Kriterien verletzt, wird die Information über eine ungültige Messung ausgegeben. Für die validen Messwerte wird nun eine Kalman Filterung zur Glättung der Stellgröße des Regelkreises des Roboters über die letzten zehn gültigen Messpunkte ausgeführt. Der Filter wird verwendet, um Sprünge in der Stellgröße zu glätten sowie Schleppfehler oder ein Überspringen des Regelkreises zu vermeiden. Wenn mehr als fünf ungültige Messungen in Folge auftreten, wird der Kalman Filter zurückgesetzt und mit der nächsten gültigen Messung eine neue Filterung gestartet, da sich das a priori Wissen des Filters nicht mehr auf die Messpunkte der aktuellen Bildsequenz bezieht.

Nachfolgend wird die Auswertung der Prozessaufnahmen der Versuchsreihe mit dem kombinierten Verfahren und der nachgelagerten Kalman Filterung vorgestellt. Hierzu werden exemplarisch die Ergebnisse von Aufnahme 17 – Schweißprozess mit eingestellter 2 mm Spaltbreite – dargestellt, da bei den eingestellten Versuchsparametern beide Verfahren zum Einsatz kamen und der Übergang zwischen den Verfahren anschaulich dargestellt werden kann.

Abbildung 65
Auswertung
Aufnahme 17

(li.) Ungefilterte
Messergebnisse des
kombinierten
Algorithmus

(re.) Flags valider
Messergebnisse der
Verfahren

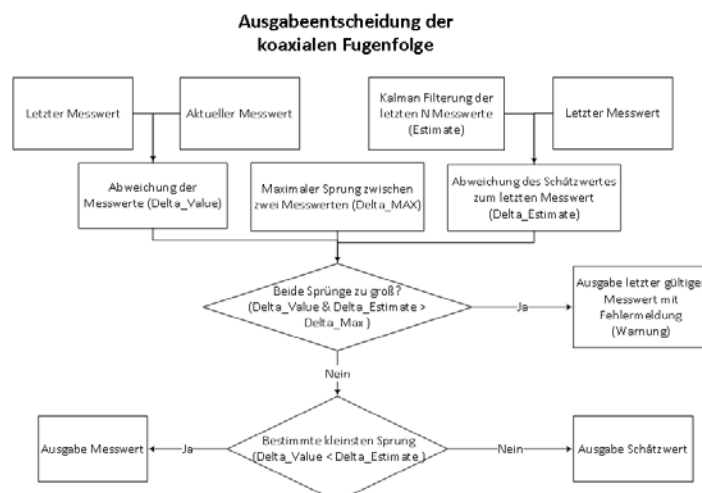


In Abbildung 65 (links) wird das ungefilterte Messergebnis des kombinierten Algorithmus für eine Prozessaufnahme mit 2 mm Spaltbreite am T-Stoß aufgetragen für die jeweils detektierte obere und untere Stoßfuge sowie gefittete Mittellinie für die Punktwolke der als Stoßfuge erkannten Kontur. In Abbildung 65 (rechts) wird anhand von sogenannten Flags die Validität der Messergebnisse graphisch visualisiert. Ein zuverlässiges Ergebnis mittels Gradienten-Bild (Compass Operator) und anschließender Hough Transformation erhält den Wert ,1'. Ein zuverlässiges Ergebnis mittels Konturerkennung durch Blob-Analyse erhält der Wert ,2'. Die Addition der beiden Flags hat als Wert ,3', falls beide Verfahren einen zuverlässigen Wert ausgeben, bei anderen Kombinationen ist der Ausgabewert entsprechend. Bei Betrachtung des Kurvenverlaufs ist erkennbar, dass unter Anwendung der Filterkriterien der Bereich an Position des Abstandsbleches als Messunsicherheit erkannt wurde. Außerdem führte der sich schließende Spalt, vor und nach dem Abstandsblech, zu Bereichen in denen nur eine Linienerkennung (Gradienten-Verfahren) einen zuverlässigen Ausgabewert ermittelte. Anhand der Kurvenverläufe lässt sich somit auf die tatsächliche Prozesssituation schlussfolgern.

Im weiteren Programmablauf (siehe schematische Darstellung in Abbildung 66) wird die Filterung der Messwerte mit einem Kalman-Filter vorgenommen. Die einzelnen Ablaufschritte sind wie folgt:

- Die maximal angenommene Änderung der Fugenlage wird als fester Wert in der Variablen *Delta_Max* hinterlegt
- Berechnung des neuen Schätzwerts durch eine Kalman Filterung der letzten *N* Messwerte unter Einbeziehung des letzten Messwerts
- Bestimmung der Abweichung des Schätzwerts zum letzten Messwert als Variable *Delta_Estimate*
- Berechnung der Abweichung des aktuellen und letzten Messwerts als Variable *Delta_Value*
- In einer Verzweigung wird entschieden, ob *Delta_Max* überschritten wurde. Ist dies der Fall wird der letzte gültige Messwert mit einer Fehlermeldung ausgegeben. Ist dies nicht der Fall, wird das kleinere *Delta_Wert* an den Regler übergeben (**konservative Regelstrategie**).

Abbildung 66
Programmablaufplan
für die Ausgabe-
entscheidung nach
Kalman Filterung



In Abbildung 67 wird der Einfluss des vorgegebenen maximal zulässigen Δ_{Max} in einer Gegenüberstellung zweier unterschiedlicher Einstellungen verdeutlicht. Ein festgelegter Wert von 5 Pixeln führt zu einer größeren Glättung der Ausgabewertekurve. Bei Abschaltung der Erhöhung der maximalen Änderungsrate des Messwertes von Bild zu Bild wird außerdem über eine längere Bildsequenz kein neuer Messwert vom Filter als gültig angenommen und der letzte gültige Messwert ausgegeben.

Durch die Vorgabe eines größeren Δ_{Max} werden nur größere Abweichungen durch den Filter geglättet und kleinere Änderungen nicht direkt an den Regler weitergegeben. Ungültige Messwerte werden nicht in die Ausgabeentscheidung mit einbezogen, stattdessen erfolgt eine Ausgabe des letzten gültigen Messwerts.

Abbildung 67

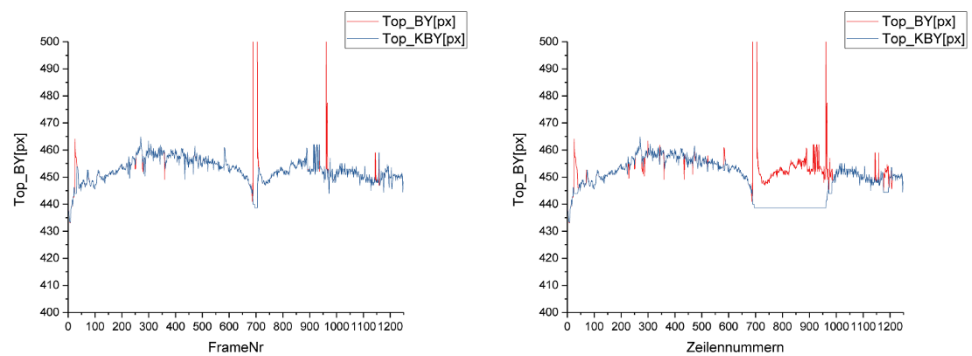
Filterung der
Messwerte obere
Stoßkante nach
Kalman

li.:

$\Delta_{Max} = 10 \text{ px}$

re.:

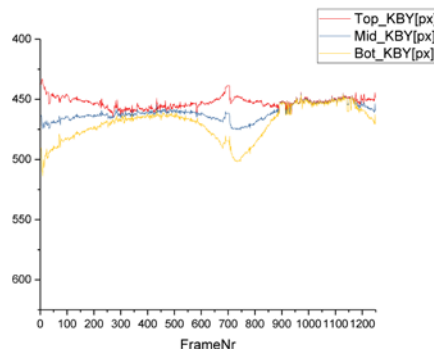
$\Delta_{Max} = 5 \text{ px}$



Abschließend wird das gefilterte Messergebnis des kombinierten Algorithmus für eine Prozessaufnahme mit 2 mm Spaltbreite am T-Stoß aufgetragen für die jeweils detektierte obere und untere Stoßfuge sowie gefittete Mittellinie für die Punktwolke der als Stoßfuge erkannten Kontur in Abbildung 68 vorgestellt (vgl. ungefiltertes Messergebnis in Abbildung 65 links).

Abbildung 68

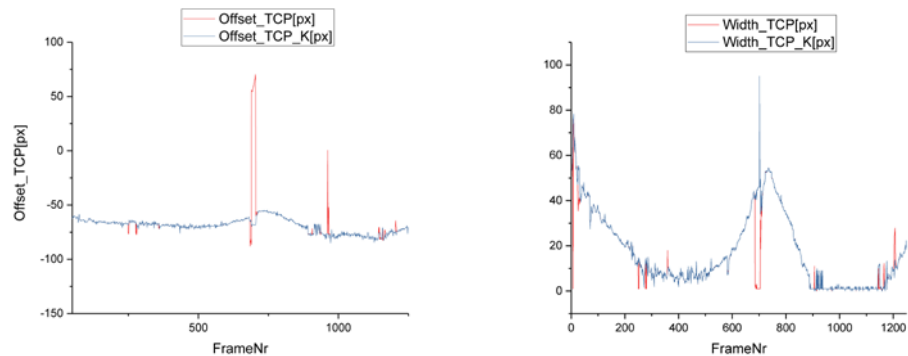
Messwerte der
Position der
Fugenkanten mit
angewendeten
Filterkriterien und
Kalman Filterung mit
 $\Delta_{Max} 10 \text{ px}$



Die folgenden beiden Graphen in Abbildung 69 vergleichen die Ausgabewerte bei gefilterter und ungefilterter Fugenposition für den Offsetwert (links) und Spaltbreite (rechts).

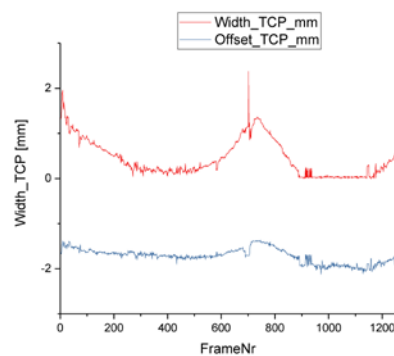
Abbildung 69
Vergleich der
Ausgabewerte bei
gefilterter und
ungefilterter
Fugenposition

Links: Offsetwert
bezogen auf TCP
rechts: Spaltbreite



In Abbildung 70 werden die Ausgabewerte für Offset und Spaltbreite zur Veranschaulichung in der Maßeinheit mm wiedergegeben.

Abbildung 70
Ausgabewerte für
Offset und
Spaltbreite in
umgerechnete
Maßeinheit mm



Für die Finalisierung der Software wurde nach Durchführung des Regeltests am LZN folgenden Mechanismen für die Ausgabe der Stellgröße ergänzt:

1. Begrenzung der Stellgröße durch maximalen Offset je Taktzyklus
2. Einführung Einstellmöglichkeit **relative** und **absolute** Regelung
 - i. Absolute Regelung: Der seitliche Versatz zwischen TCP und Fugenmitte wird zyklisch durch einen maximalen seitlichen Versatz je Takt begrenzt ausgegeben.
 - ii. Relative Regelung: Der seitliche Versatz wird als feste Abweichung je Takt ausgegeben (z.B. -100 μm , 0, +100 μm)
3. Die Spaltbreite wird in beiden Fällen direkt und ohne Begrenzung ausgegeben. Die Ausgabewerte der Spaltbreite sind für eine adaptive Steuerung der Schweißstromquelle notwendig, so dass Parameter wie Drahtfördermenge im Schweißprozess dynamisch an die jeweilige Spaltsituation angepasst werden können.

1.4. Umsetzung des Prozess-Monitoring-Regelungs-System (PMCS) mit Planung, Aufbau und Integration eines Prozess-Monitoring-Control-Systems (PMCS)

Das Fraunhofer ILT entwickelte zunächst ein Konzept zum Aufbau und zur Integration des stationären PMCS in das Automatiksystem. Das Konzept war zudem in der Art und Weise ausgelegt, dass eine einfache Portierung auf das mobile PMCS für das Traktor- / Handschweißsystem möglich war. Nachdem mit dem stationären PMCS-System weitere Erfahrungen und Erkenntnisse gewonnen waren, wurde ein weiteres mobiles PMCS für das Traktor- und das Handschweißsystem ausgelegt, konstruiert, aufgebaut und erprobt. In mehreren Telefonkonferenzen und Arbeitsgruppentreffen wurde das Konzept und die Definition der Schnittstellen mit den beteiligten Projektpartnern detailliert abgestimmt worden.

Das Lastenheft für das gesamte Automatiksystem wurde unter der Federführung des Projektpartners Cloos erstellt und mit den beteiligten Partnern abgestimmt. Das PMCS des Automatiksystems und Traktor- / Handschweißsystem wurde nach den während der Umsetzung vorliegenden Anforderungen konzipiert und aufgebaut. Für das Traktor- / Handschweißsystem wurde im weiteren Verlaufe des Vorhabens ein zweites PMCS-System im mobilen Schaltschrank aufgebaut, da das Automatiksystem dauerhaft auf der dritten Portalbrücke installiert wurde. Der Verbundpartner Cloos stellte eine weitere Steuerung für das Traktorsystem zur Verfügung, wodurch eine Ansteuerung der Schweißstromquelle analog zum Automatiksystem ermöglicht wurde.

1.4.1. Definition und Abstimmung der Schnittstellen

Folgende Anforderungen sollten das Schnittstellenkonzept des Automatiksystems genügen:

- Echtzeit-Anpassung des Bahnprogramms durch Robotersteuerung
- Bewegungssteuerung des 2D Pendelmoduls
- Ansteuerung der Laserstrahlquellen
- Adaptive Steuerung der Schweißstromquelle
- Handshakes (SPS) zwischen Robotersteuerung und PMCS

Die Protokolle (Schnittstellen) der einzelnen Feldgeräte wurden wie folgt festgelegt:

Tabelle 9
Schnittstellen der
Feldgeräte

Feldgeräte	Verantwortlich	Protokoll
Qirox Controller V6	Cloos	Profibus
Schweißstromquelle	Cloos	Profibus
Diodenlaser	Laserline	PROFINET
Faserlaser	IPG	PROFINET
Pendeloptik	Precitec	2 Kanal Analog
Leitstand	LZN	Ethernet
PMCS	ILT	EtherCAT,
Beleuchtungslaser	ILT	RS232, USB
BV-Rechner	ILT	EtherCAT,

Die Prozesssteuerung des Automatiksystems wurde durch die Robotersteuerung übernommen. Das bedeutete im Einzelnen, dass in die Steuerung des dritten Portals eine zusätzliche Profinet-Schnittstelle zu integrieren war, um die Kommunikation mit den beiden Laserstrahlquellen zu ermöglichen. Die Implementierung erfolgte durch den Verbundpartner Cloos. Des Weiteren wurde die Vernetzung mit dem PMCS-System, der Pendeloptik und der Schweißstromquelle, Geräte die sich auf der dritten Portalbrücke befanden, durch eine Profibuschnittstelle umgesetzt. Das PMCS-System wurde in einem Schaltschrank auf der Portalbrücke installiert. Die Steuereinheit des Pendelmoduls und der LWL-Umsetzer des PMCS waren in der Nähe des Roboters auf einer separaten Montageplatte zu installieren. In Abbildung 78 wird das Schnittstellenkonzept des gesamten Automatiksystems schematisch dargestellt.

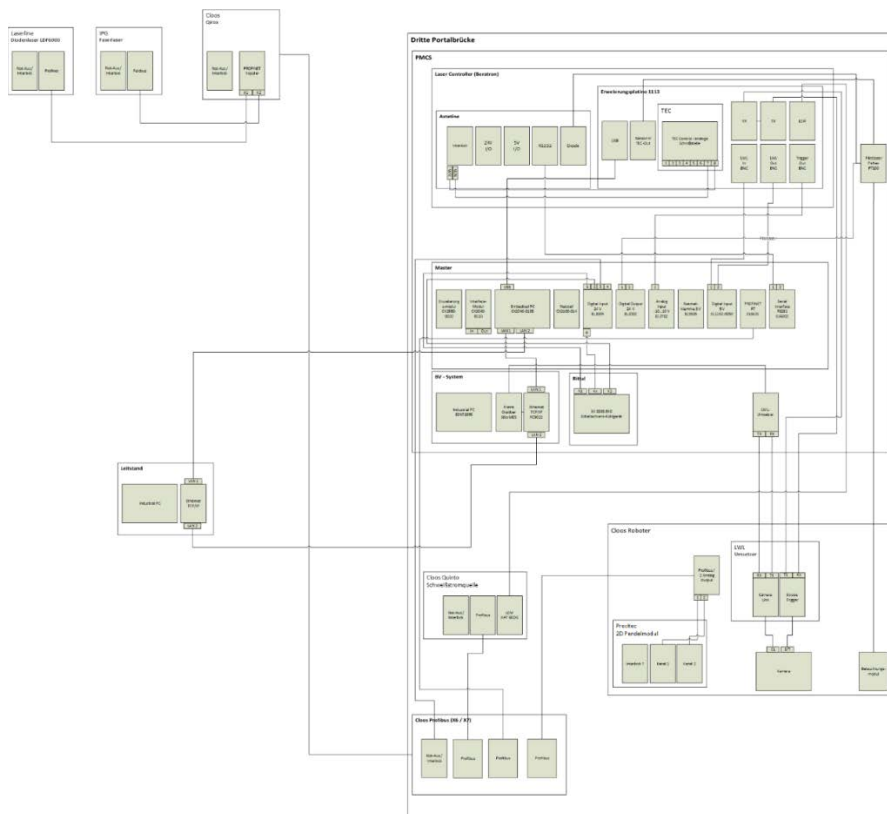


Abbildung 71 Schnittstellenplan des Automatiksystems mit allen Feldbusteilnehmern

Der Schnittstellenplan zeigt die Feldbusteilnehmer des Automatiksystems. Das echtzeitfähige ProfiNet RT Netzwerk bestand aus dem „PMCS“ des ILT, der Qirox Steuerung von Cloos, der Pendeloptik von Precitec, dem Diodenlaser von Laserline und dem Festkörperlaser von IPG. Die Laserstrahlquellen und das Modul zum Pendeln des Laserstrahls wurden direkt in die Qirox Steuerung eingebunden. Die Funktion der Fugenfolgeregulierung wurde durch die im folgenden Abschnitt beschriebene Sensorschnittstelle zwischen der Qirox Steuerung und dem PMCS realisiert.

1.4.2. Softwarearchitektur für das PMCS-System

Auf Basis der Planungsarbeiten wurde eine Rahmenstruktur (Anwendungsarchitektur) für die PMCS-Software entwickelt. Diese integrierte die Prozessvisualisierung und die entwickelten Algorithmen zur Erkennung der Fugenlage unter einer gemeinsamen Benutzeroberfläche für das PMCS. Die Gesamtsoftware implementierte außerdem sämtliche vereinbarten Schnittstellen für die verschiedenen Zielsysteme. Die Umsetzung der einzelnen Schnittstellen erfolgte dann bei der Realisierung des jeweiligen Zielsystems. Beim Design der Softwarearchitektur der Gesamtanwendung wurde größter Wert auf die Implementierung von Interfaces gelegt, die möglichst unabhängig von den Algorithmen und Schnittstellen der verschiedenen Zielsysteme sein sollten. Dadurch konnte die Gesamtanwendung weitestgehend parallel und unabhängig von den Algorithmen und Schnittstellen der Zielsysteme entwickelt werden.

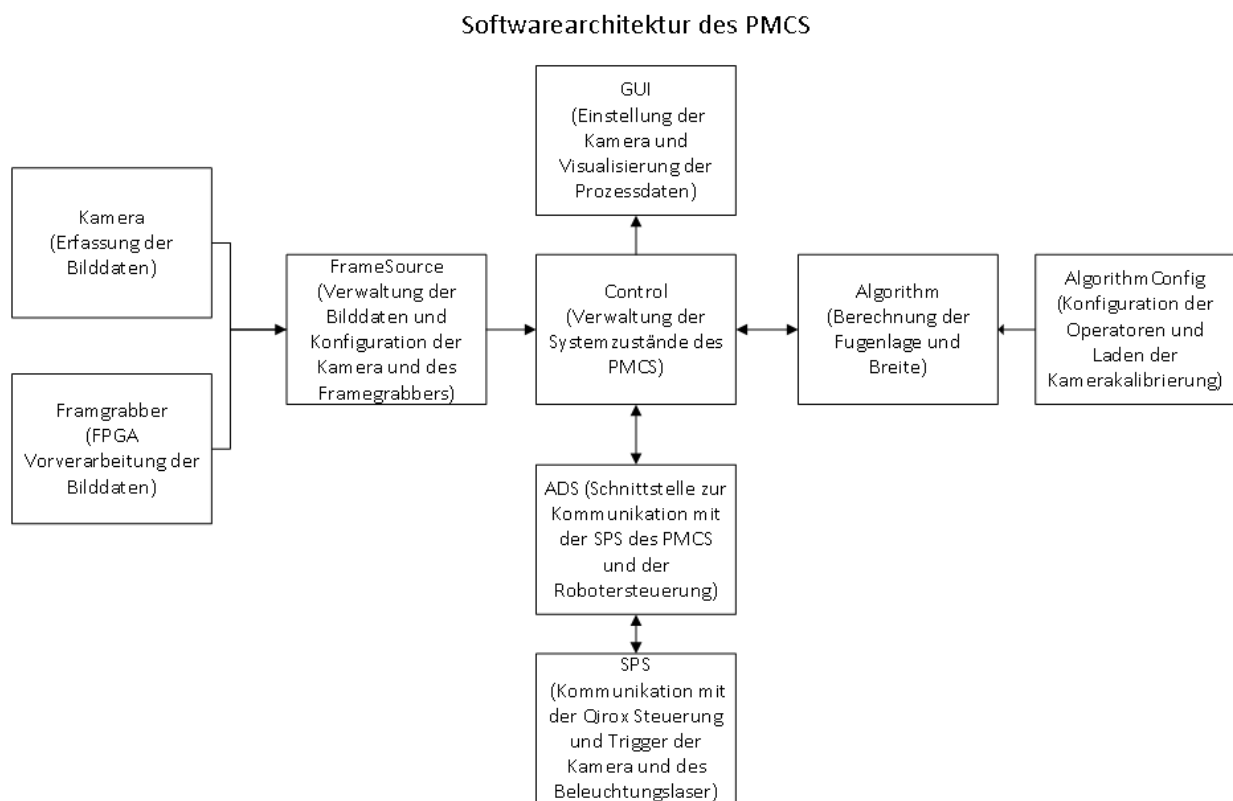
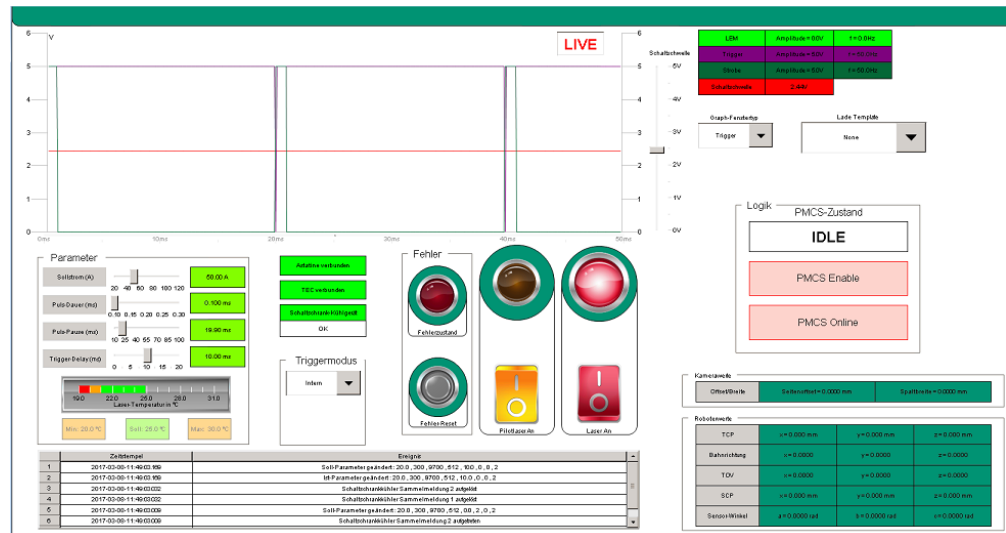


Abbildung 72 Module der grundlegenden Softwarearchitektur des PMCS

Die Module der Softwarearchitektur des PMCS basieren im Wesentlichen auf der Datenverarbeitungskette der PMCS (siehe Abbildung 72). Dabei werden die bereits im FPGA vorverarbeitenden Daten durch das FrameSource Modul empfangen und vom Control Modul an den Algorithmus zur Auswertung weitergeleitet. Das Control Modul gibt die Ergebnisse der Berechnung über die ADS Schnittstelle an die SPS weiter und zeigt die Bild und Messdaten im GUI Modul des PMCS an. Die gemeinsame Benutzeroberfläche des PMCS ist in Abbildung 73 dargestellt.

Abbildung 73
Grafische
Benutzeroberfläche
zur Bedienung der
SPS des PMCS

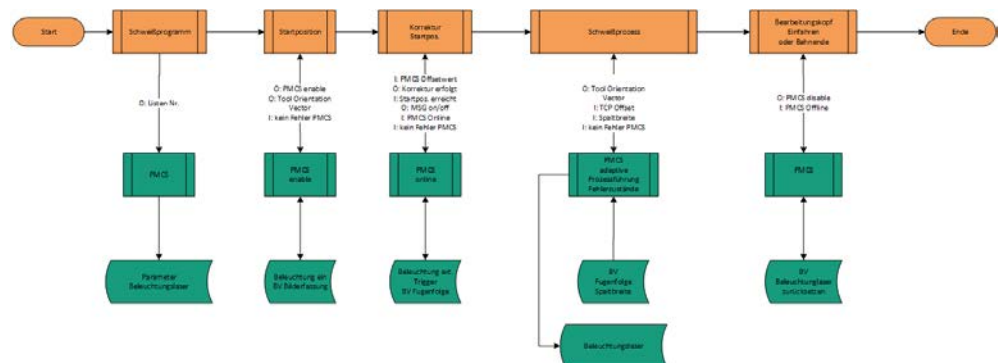


Die Benutzeroberfläche bietet diverse Funktionalitäten wie die Steuerung des Diodenlaser-Controllers und Darstellung von Systemzuständen. Zudem wird der Strom-Zeitverlauf der Schweißstromquelle visualisiert und Trigger- sowie Strobesignale der Kamera in dem gleichen Diagramm wiedergegeben. In der Benutzeroberfläche werden zudem noch die Übergabewerte mit der Qirox-Steuerung angezeigt.

1.4.3. PMCS-Software-Interfaces

Aufbauend auf der Anwendungsarchitektur der Software für das PMCS-System wurde das PMCS-Software-Interface für das Automatik- und das Traktor- /Handschweißsystem entwickelt. Im Vordergrund stand die Übergabe des Wertes für den Abstand und die Lage des Wechselwirkungspunktes in Bezug auf die Stoßkanten an die Steuerung des vollautomatisierten Bearbeitungssystems.

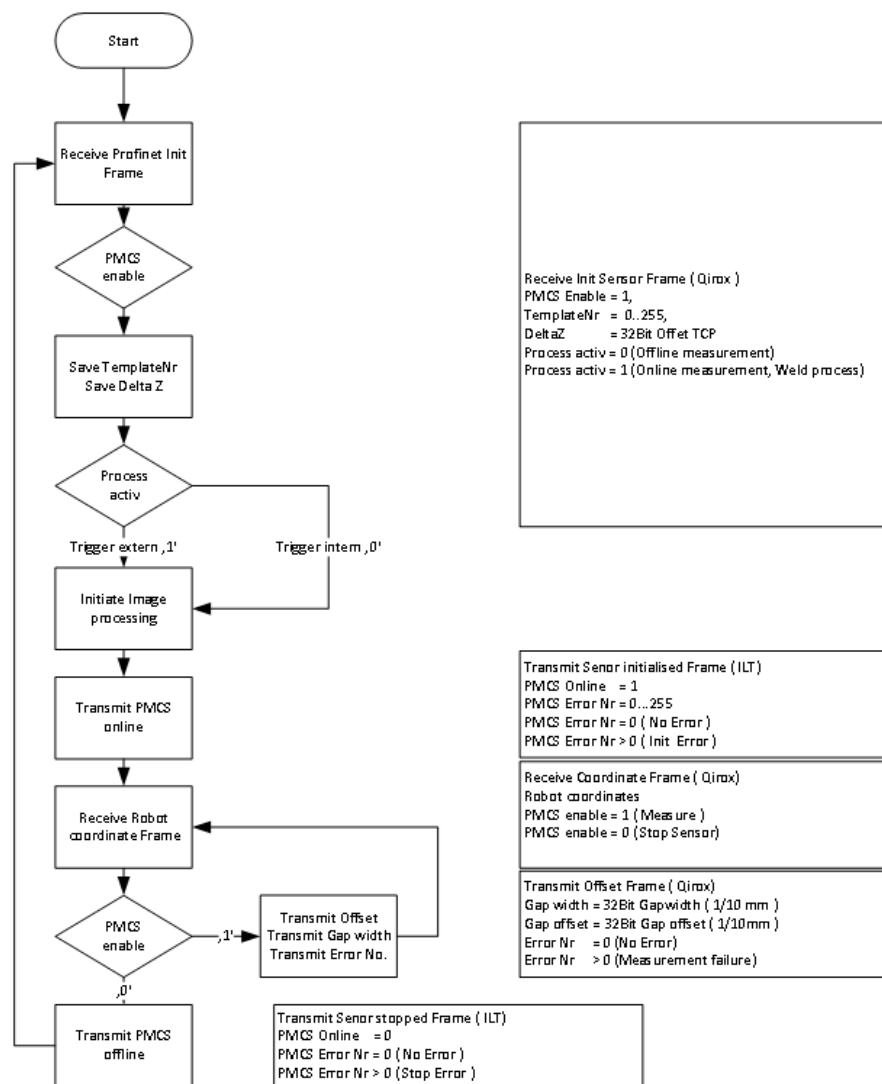
Abbildung 74
Bahnprogramm-
ablauf der Qirox
Steuerung und
Interaktion mit dem
„PMCS“



Der Ablaufplan des Bahnprogramms (siehe Abbildung 74) beschreibt die Interaktion zwischen dem Bahnprogramm der Qirox Steuerung des Roboters und dem Fugenfolgesensor des PMCS. Am Start des Bahnprogramms wird der Sensor über die Listennummer (Templatenummer) für die anstehende Messaufgabe konfiguriert. Vor Start des Bahnprogramms kann dann über das Bit „PMCS Enable“

eine Korrektur der Startposition ausgeführt werden. Nach der Korrektur der Startposition beginnt der Schweißprozess, dabei unterscheidet das PMCS grundsätzlich zwischen Prozessen mit und ohne Lichtbogen. Während der Ausführung des Bahnprogramms teilt die Qirox Steuerung des Roboters dem PMCS zyklisch seine aktuellen Positions- und Orientierungsinformationen mit. Das PMCS liefert der Qirox Steuerung zyklisch bezogen auf den aktuellen „TCP“ (Aktueller Bahnpunkt des Roboters) den seitlichen Versatz zur Fugenmitte und die Spaltbreite.

Abbildung 75
Programmablaufplan
der
Sensorschnittstelle



Der in Abbildung 75 veranschaulichte Programmablaufplan der Sensorschnittstelle beschreibt die Zustände des Fugenfolgesensors und die Interaktion mit der Qirox Steuerung des Roboters. Die in Tabelle 10 und Tabelle 11 dargestellten Datagramme listen die Parameter, die zwischen der Qirox Steuerung und dem PMCS zyklisch ausgetauscht werden.

Tabelle 10
Datagramm ProfiNet
Frame „Qirox
Steuerung“ an
„PMCS“

Qirox Controller->SPS	Daten- typ	Daten- länge Bit	Einheit	Werte- bereich	Bit- Offset
Tool-Center-Point (TCP) X	FLOAT	32	mm		0
Tool-Center-Point (TCP) Y	FLOAT	32	mm		32
Tool-Center-Point (TCP) Z	FLOAT	32	mm		64
Bahnrichtung X	FLOAT	32		Betrag 1	96
Bahnrichtung Y	FLOAT	32			128
Bahnrichtung Z	FLOAT	32			160
TOV-Richtung X	FLOAT	32		Betrag 1	192
TOV-Richtung Y	FLOAT	32			224
TOV-Richtung Z	FLOAT	32			256
Sensor-Center-Point (SCP) X	FLOAT	32	mm		288
Sensor-Center-Point (SCP) Y	FLOAT	32	mm		320
Sensor-Center-Point (SCP) Z	FLOAT	32	mm		352
Sensor-Orientierungs- Winkel Alpha	FLOAT	32	rad		384
Sensor-Orientierungs- Winkel Beta	FLOAT	32	rad		416
Sensor-Orientierungs- Winkel Gamma	FLOAT	32	rad		448
Höhenoffset	FLOAT	32	mm		480
Reserve	FLOAT	32			512
Reserve	FLOAT	32			544
Reserve	FLOAT	32			576
Templatenummer	UINT16	16		0..6553	608
Reserve	INT16	16			624
Reserve	INT16	16			640
Reserve	INT16	16			656
Reserve	INT16	16			672
Reserve	INT16	16			688
PMCS Enable	BOOL	1	Wahrheitswert	0/1	704
Process Active	BOOL	1	Wahrheitswert	0/1	705
Reserve	BOOL	1	Wahrheitswert	0/1	706
...					
Reserve	BOOL	1	Wahrheitswert	0/1	719

Tabelle 11
Datagramm ProfiNet
Frame „PMCS“ an
„Qirox Steuerung“

PMCS ->Qirox Controller	Datentyp	Datenlänge Bits	Einheit	Wertebereich	Bit-Offset
Seitenoffset	FLOAT	32	mm	-5 mm bis 5mm	0
Spaltbreite	FLOAT	32	mm		32
Reserve	FLOAT	32			64
Reserve	FLOAT	32			96
PMCS Error Nr.	UINT16	16		0..65535	128
Reserve	INT16	16			144
Reserve	INT16	16			160
Reserve	INT16	16			176
PMCS Online	BOOL	1	Wahrheit	0/1	192
Reserve	BOOL	1			193
...					
Reserve	BYTE	8			216

Der Fugenfolgesensor des PMCS hat drei Systemzustände:

1. *Sensor offline* (Konfigurationsmodus Laser / Kamera)
Im Offline Modus wartet das PMCS auf Befehle der Qirox Steuerung. Das PMCS startet bei empfangen des „PMCS Enable“ Bit. Das Bit „Process Active“ gibt gleichzeitig an ob das PMCS mit einem externen Trigger (Prozess mit Lichtbogen) oder einem internen Trigger (Prozess ohne Lichtbogen) arbeitet. Dadurch kann das PMCS für den laserunterstützter MSG Prozess bzw. den Laser MSG Hybridprozess und das reine Laserstrahlschweißen eingesetzt werden. Außerdem empfängt das PMCS von der Qirox Steuerung noch die Parameter Templatenummer und „DeltaZ“. Die Templatenummer gibt an mit welchen Einstellungen die Beleuchtung, die Kamera, der Framgrabber und der Algorithmus betrieben werden. Der Parameter DeltaZ beschreibt den Grad der Defokussierung des Lasers.
2. *Sensor online ohne Lichtbogen* (Interner Trigger Laser / Kamera)
Bei Prozessen ohne Lichtbogen bzw. bei Korrektur der Startposition werden der Beleuchtungslaser und die Kamera mit einer internen Pulsfrequenz von 50 Hz betrieben. Die Aufnahme wird intern über den Astatine Controller des PMCS gesteuert.
3. *Sensor online mit Lichtbogen* (Externer Trigger Laser / Kamera)
Bei Prozessen mit Lichtbogen werden der Beleuchtungslaser und die Kamera über ein externes LEM Modul, das ein Spannungssignal analog zum Pulsverlauf der Schweißstromquelle liefert, getriggert. Der Bediener des PMCS kann dabei über eine Schaltwelle bezogen auf die Amplitude des Signalverlaufs des LEM Moduls (Schweißstromquelle) und über eine Verzögerungszeit (Trigger Delay) den genauen Zeitpunkt der Bilderfassung innerhalb der Pulspause der Schweißstromquelle festlegen. Das System kann hierbei mit einer maximalen Framerate von 85 Hz bei Vollbildeinstellung der Kamera (2040 x 1088 Pixel) betrieben werden, dadurch bedingt kann nicht zu jedem Puls der Stromquelle ein Bild erfasst werden.

Durch die Simulation des Profinet Masters stellvertretend für die Robotersteuerung wurde sichergestellt, dass bei Weiterentwicklung des PMCS und der Algorithmen zur Datenauswertung immer ein stabiler Zustand der Schnittstelle gewährleistet wurde und jeder Zeit ein vollständiger Systemtest entsprechend der Spezifikation durchgeführt werden konnte.

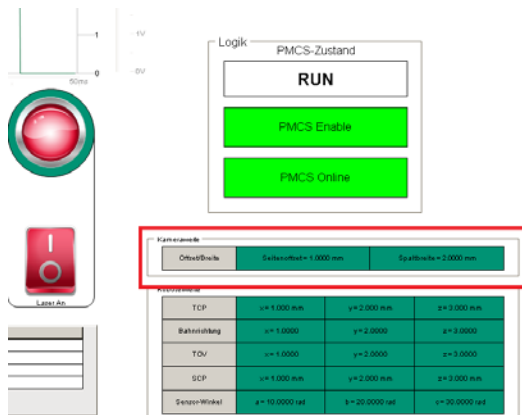


Abbildung 77 GUI der PMCS SPS im Onlinebetrieb

Außerdem wurden für die Profinet Datagramme der Schnittstellen ausreichend viele leere Datenblöcke vorgesehen, die eine zukünftige Weiterentwicklung bzw. eine Übertragung des Sensorkonzepts auf andere Anlagen und Prozesse ermöglichen ohne eine Anpassung der bestehenden Implementierung vornehmen zu müssen. Durch dieses Vorgehen konnte die Sensorschnittstelle des PMCS jeder Zeit flexibel an zusätzliche Anforderungen am Traktor- bzw. mobilen System angepasst werden.

1.4.4. Aufbau der Hardware des vollautomatisierten 3D Bearbeitungssystems



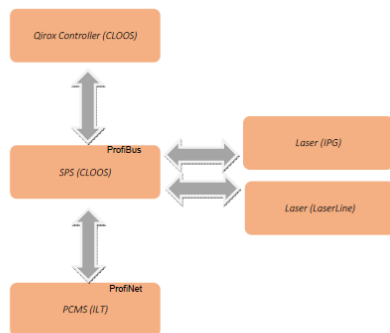
Abbildung 78 Prozessvisualisierungssystem für Installation auf der dritten Portalbrücke

Die Beschaffung der benötigten Komponenten wurde zu Beginn August 2016 (Projektmonat 15) abgeschlossen. Anschließend wurde das System aufgebaut, was sowohl die Hardwareinstallation betraf, wie auch die Erstellung aller elektrischen Schaltpläne. Der aktualisierte Zeitplan sah eine Installation des stationären PMCS-Systems auf der dritten Portalbrücke zur Mitte des zweiten Projektjahres vor.

Folgende Anpassungen wurden beim Aufbau des Schaltschranks gegenüber dem im Vorläuferprojekt QulnLas entwickeltem System vorgenommen, um den spezifizierten Prozessanforderungen zu genügen:

1. Austausch des Jenoptik Diodenlaser Moduls mit einer Standardwellenlänge von 808 nm durch ein Modul mit einer Standardwellenlänge von 940 nm angepasst an die emittierte Strahlung während des Schweißprozesses.
2. Austausch des SiliconSoftware Framegrabbers ME4-VD4-PoCL durch einen ME5-VD8-PoCL, um die zur Umsetzung der Vorverarbeitungsschritte auf dem FPGA benötigten Rechenressourcen zu erhalten.

3. Austausch der Photonfocus Hochgeschwindigkeitskamera MV1-1312IE-CL-8 durch eine MV1-D2048I-CL-8, um ein größeres Sichtfeld im Vorlauf der Prozesszone zu erzielen.
4. Austausch der National Instruments I/O Module durch eine echtzeitfähige Beckhoff EtherCat SPS mit einem Profinet Adapter zur echtzeitfähigen Profinet RT Kommunikation mit der Qirox Robotersteuerung.
5. Aktualisierung des Industrie-PCs auf aktuellsten Stand für mehr Rechenleistung und bessere Performance des Gesamtsystems.
6. Einbau eines Schaltschrankdeckenkühlers zur Vermeidung der Abschaltung von Systemkomponenten auf Grund von Überhitzung.



Vor der Installation der neuen Systemtechnik des PMCS am Automatiksystem wurde ein ausführlicher Schnittstellentest bei Fa. Cloos in Haiger durchgeführt. Dabei wurde die Kommunikation über das zwischen dem ILT und Cloos vereinbarte Schnittstellenprotokoll ausführlich getestet und die letzten Implementierungsfehler behoben. Die Softwarearbeiten der Qirox-Steuerung an Cloos-SPS sind für die Softwareversionen v7.13 und v8.20 umgesetzt worden. Das Grundprinzip der Kommunikation zwischen Qirox-Steuerung und PMCS ist in Abbildung 79 dargestellt.

Abbildung 79 Grundprinzip Shiplight Kommunikation zwischen Qirox Steuerung und PMCS

Die neue Systemtechnik des PMCS wurde Mitte Mai 2017 auf der dritten Portalbrücke des Fertigungsdemonstrators am iLAS installiert.



Abbildung 80 Prozessvisualisierungssystem auf der dritten Portalbrücke sowie Umsetzerbox für Datenübertragung und Ansteuerung der Kamera

Die Bilddaten vom CMOS-Sensor werden mit Lichtleitern zur Auswerteeinheit des PMCS-Systems über eine Entfernung von ca. 25 Metern übertragen. Die Bedienung des PMCS-Systems erfolgt von einem Leitstand aus über ein lokales Ethernet (remote Access).

1.4.5. Aufbau der Hardware der mobilen PMCS-Einheit für das Traktorsystem und handgeführte laserunterstützte MSG-Schweißen

Für das Handschweißsystem wurde vom Verbundpartner LZN ein handgeführter Bearbeitungskopf ausgelegt und aufgebaut, wobei die Schnittstellen für das mobile PMCS entsprechend den vereinbarten Spezifikationen berücksichtigt wurden. Nach Beendigung der Konzeptionsphase für das Handschweißsystem wurde ein Konzept für die Integration der Systemtechnik des PMCS in das Handschweißsystem entwickelt und ein entsprechendes opto-mechanisches Interfaces (OMI) vorgesehen.

Für beide, das Traktor-System und das Handschweißsystem wurde jeweils ein separates opto-mechanisches Interface (OMI) ausgelegt, konstruiert und aufgebaut. Im Laufe des Projektes wurde bezüglich des Traktorsystems die Vereinbarung getroffen, dass der überarbeitete Schweißkopf des Automatiksystems auf den von Cloos entwickelten Traktor übertragen wird. Bezüglich des Handschweißsystems wurde eine leichte und kompakte Umsetzung der Visualisierung der Fügepartner im Vorlauf angestrebt. Dazu wurde eine entsprechende Kamera mit GeniCam Interface ausgewählt. Außerdem konnte eine breitbandigere Beleuchtung genutzt werden, da die Fuge außerhalb der Prozesszone erfasst wurde. Die wichtigsten Eckpunkte der Anbindung des PMCS an das Traktorsystem waren:

- Das Traktorsystem nutzte einen baugleichen Bearbeitungskopf des Automatiksystems.
- Die Kamera wurde zur Datenauswertung an das mobile PMCS-System angeschlossen. Der mobile Schaltschrank wurde mit einem Multitouch Control Panel ausgestattet.
- Das Traktorsystem verfügte über eine Robotersteuerung der Fa. Cloos.
- Zur Übertragung der Stellgrößen an den Traktor konnte die vorhandene ProfiNet Schnittstelle genutzt werden.

Das Konzept der Anbindung des PMCS an das Handschweißsystem sah die folgenden Vereinbarungen vor:

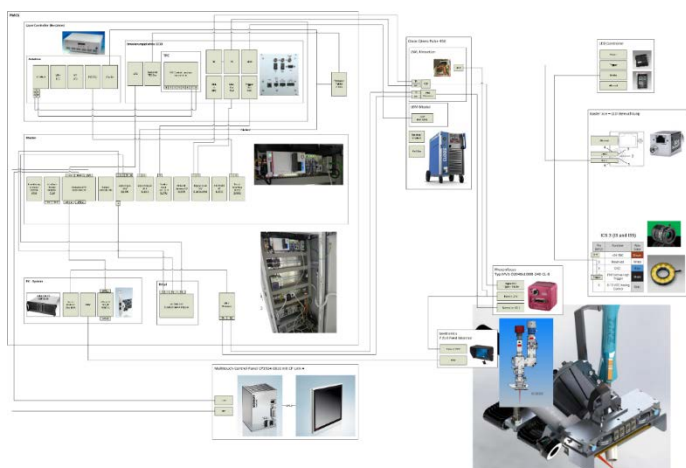
- Der Trigger der Kamera für die Prozessvisualisierung fand synchron zur Grundstromphase der Schweißstromquelle statt.
- Zur Bereitstellung aller Funktionen des vollautomatisierten PMCS hatte das Fraunhofer ILT die GeniCam Schnittstelle zur Ansteuerung von GigE Vision Kameras implementiert.
- Durch die Einbindung einer GigE Vision Kamera für die Fugenfolge standen dem mobilen PMCS alle Funktionen des Automatiksystems zur Verfügung.
- Die Korrektur der Bahn durch Übertragung von Offset-Werten an eine Arduino-Steuerung sollte erst in einer späteren Phase auf Machbarkeit hin getestet werden. Der erste Schritt war die Visualisierung des Prozesses und gleichzeitige Erfassung sowie Detektion der Fugenkanten.

Tabelle 12
Auswahl der
Systemkomponenten
des
Handschweißsystems

Komponente	Bezeichnung
GigE-Kamera:	Basler ace – acA2000-50gm
Monitor für Videosignal:	7" Beetronics
Objektiv:	8,5 mm Objektiv von Edmund Optics
Hellfeldbeleuchtung:	High Performance Bright Field Ring Light
Dunkelfeldbeleuchtung:	MicroBrite™ Series Dark Field Ring Lights
LED Controller:	Advanced Illumination

In Tabelle 12 werden die für die Fugenfolge ausgewählten Komponenten des Handschweißsystems aufgelistet. Dabei wurde als Sensor für die Erkennung der Fuge die Basler acA2000-50gm, die mit dem gleichen CMOSIS Chip wie die Photonfocus D2048I am Automatik- und Traktorsystem ausgestattet ist, ausgewählt. Für die GigE Vision Kamera wurde eine GeniCam Klasse mit identischer Schnittstelle wie die „FrameSource“ Klasse des ME5 Framegrabbers am Automatik- und Traktorsystem implementiert. Für die Implementierung der Klasse zur Ansteuerung der GigE Vision Kamera wurde das Pleora SDK ausgewählt, da das SDK Hersteller unabhängig ist und mit dem Lizenz Dongle zur Ansteuerung aller GeniCam konformen Geräte eingesetzt werden konnte.

Für die Prozessvisualisierung wurde mit dem LZN gemeinsam die Kamera MV1-D2048x1088-96-G2 ausgewählt. Die Kamera verfügt über den gleichen CMOSIS Detektor (CMV2000) wie die Kamera am Automatiksystem (MV1-D2048x1088I-240-CL). Diese Kamera ist ebenfalls eine GigE Kamera, somit wurde kein Framegrabber zur Datenerfassung benötigt. Dieses Vorgehen reduzierte die Kosten für ein mobiles Visualisierungssystem.



Die Kamera konnte ohne größeren Implementierungsaufwand als weitere Bildquelle (FrameSource) in das PMCS integriert werden, ohne Änderungen an der bestehenden Softwarearchitektur oder den Schnittstellen vorgenommen werden mussten.

In Abbildung 81 wird das aktuelle Schnittstellenkonzept des gesamten Handschweißsystems schematisch dargestellt.

Abbildung 81 Schnittstellenplan des Handschweißsystems mit allen Systemkomponenten

1.5. Validierung – Feststellung und Bewertung der Fähigkeit des PMCS

Die Fähigkeit des PMCS die spezifizierten Anforderungen im Automatik-, Traktor- und Handschweißsystem System zu erfüllen, wurden in Versuchsreihen systematisch ermittelt. Dabei wurde festgestellt, wie genau und zuverlässig mit dem PMCS die spezifizierten Anforderungen eingehalten worden. Die Einzelheiten der für die Fähigkeitsuntersuchung erforderlichen Versuchsdurchführungen wurden vorab mit den Verbundpartnern detailliert abgestimmt und festgelegt. Parallel zur den Fähigkeitsuntersuchungen und basierend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurden die Algorithmen zur Echtzeitbildverarbeitung kontinuierlich weiterentwickelt und angepasst. Nachfolgend werden beispielhaft einige Versuche zur Bewertung der Funktionsfähigkeit des PMCS vorgestellt.

- 1.5.1 Validierung am Automatiksystem
- 1.5.2 Validierung der Fugenfolge am Demonstrator der Meyer Werft (öffnender Spalt, Steignaht)
- 1.5.3 Demonstration koaxiale Prozessvisualisierung und Fugenfolge im Vorlauf am Handschweißsystem

1.5.1. Validierung am Automatiksystem

Nachfolgend wird die Auswertung der Prozessaufnahmen der Versuchsreihe mit dem kombinierten Verfahren und der nachgelagerten Kalman Filterung vorgestellt. Hierzu werden exemplarisch die Ergebnisse einer Aufnahme – Schweißprozess mit eingestellter 2 mm Spaltbreite – dargestellt, da bei den eingestellten Versuchsparametern beide Verfahren zum Einsatz kamen und der Übergang zwischen den Verfahren anschaulich dargestellt werden kann.

Wie in Abschnitt 1.3.8 „Weiterentwicklung der texturbasierten Fugenfolge hinsichtlich Detektion aller definierten Stoßfugenkonfigurationen unter Berücksichtigung der relativen Lage im Raum“ dargestellt, sind weitere Arbeiten zur Verbesserung der Algorithmen insbesondere zur Erkennung am technischen Nullspalts durchgeführt wurden. Zur Validierung wurden Versuche an einem Prüfaufbau durchgeführt, bei denen der Seitenoffset sowie die Fugenbreite beim Stumpfstoß (90°) und T-Stoß (20°) für eingestellte Spaltmaße von 0 bis 5 mm ermittelt wurden. Die Ergebnisse der Messdatenauswertung sind in Abbildung 82 und Abbildung 83 dargestellt.

Abbildung 82
Stumpfstoß unter
90°

links: Fugenbreite
rechts: Seitenoffset

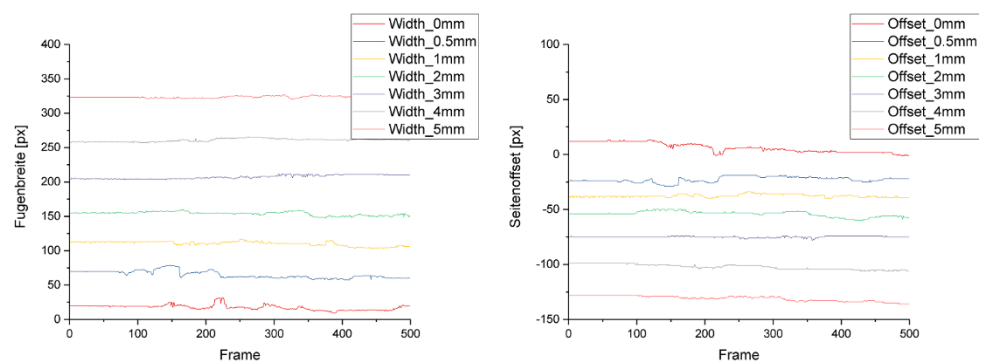
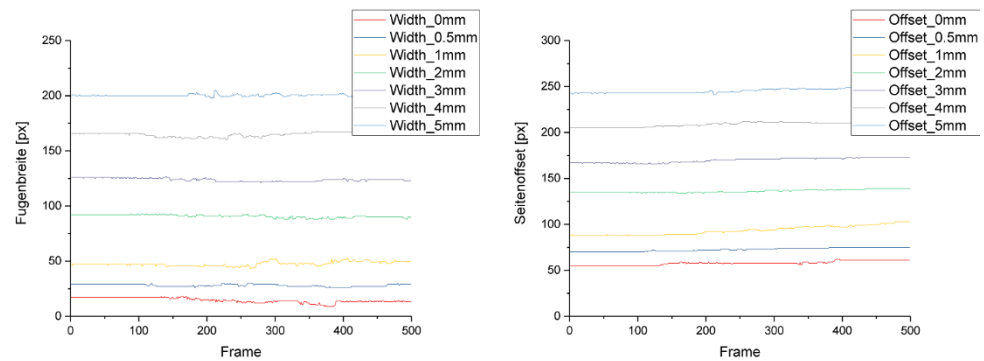


Abbildung 83
T-Stoß unter 20°

links: Fugenbreite
rechts: Seitenoffset

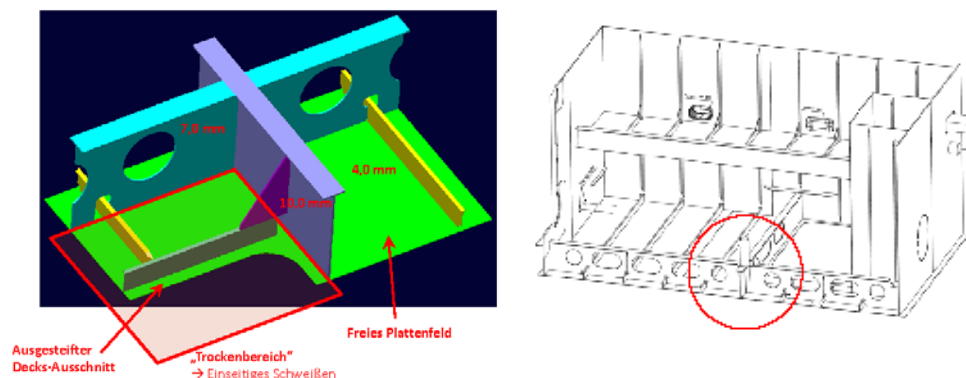


Die Graphen der dargestellten Messdaten belegen die Eignung des Algorithmus bestehend aus texturbasierter Segmentierung mit nachgelagerter Konturerkennung zur Verfolgung der Fugenlage für Spaltbreiten von 0 bis 5 mm für alle im Projekt geforderten Stoßkonfigurationen und Orientierungen des Bearbeitungskopfes zum Werkstück. Während der Validierungsphase im letzten Projektjahr wurden nun die Übertragbarkeit des Algorithmus auf andere Bleche des Musterkataloges der Meyer Werft und an den Schiffsbaudemonstratoren am Standort des Fraunhofer IAPT untersucht und bei Bedarf weiter angepasst.

1.5.2. Validierung der Fugenfolge am Demonstrator der Meyer Werft

Um die Auswirkungen der reduzierten Wärmeeinbringung durch den im ShipLight-Projekt entwickelten laserunterstützten MAG-Schweißprozess auf eine 3D-Struktur mit dünnen Blechen näher zu untersuchen, wurde durch den Verbundpartner Meyer Werft ein zusätzlicher kleiner dimensionierter Demonstrator zur Validierung konzipiert.

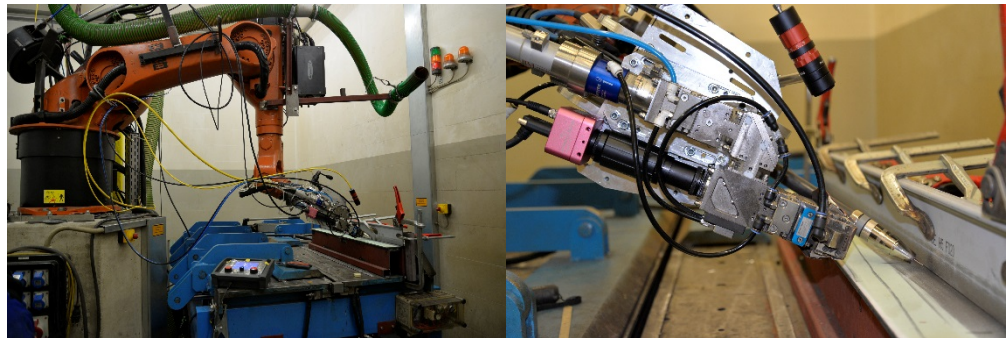
Abbildung 84
Kleiner
Demonstrator



Der kleine Demonstrator (siehe Abbildung 84) stellte einen Ausschnitt aus dem großen Demonstrator dar mit dem Augenmerk auf kleine Strukturen, die eine Bearbeitung im Laserlabor der Meyer Werft erlaubten, sowie eine Anhäufung von Schweißnähten, um besonders kritische Bereiche darzustellen. Nach Aufbau und Inbetriebnahme des Sensorsystems im Laserlabor erfolgten zunächst Testschweißungen an T-Stößen aus HP-Profil und Gurtblech. Die Versuche wurden sowohl mit als auch ohne Prozess gefahren. Bei den Versuchen wurden zum einen die

Beleuchtungsparameter angepasst als auch das Bahnprogramm in der Art manipuliert, dass z.B. die Bahnmitte um 2 mm quer zur Vorschubrichtung versetzt wurde.

Abbildung 85
Versuchsaufbau für
Testschweißungen



Während der Testschweißungen zeigte sich, dass einige Anpassungen bezüglich Beleuchtung und optischer Ausgangsleistung vorzunehmen waren. Zum einen war eine Anpassung des Spotdurchmessers der Beleuchtung notwendig, da ein durch die Einspannung verursachter Schattenwurf Teilbereiche der Stoßfuge verdeckte. Des Weiteren wurde festgestellt, dass durch den Einsatz von Aktivgas (laserunterstütztes MAG-Schweißen) eine größere Rußbildung im Vergleich zum zuvor eingesetzten laserunterstützten MSG-Schweißprozess auftrat. Dieser Effekt wurde noch vergrößert, als sich der Roboter zum Bahnstart verzögert in Bewegung setzte. Die größere Rußbildung hatte zur Folge, dass in Teilen der Aufnahmen nur eine Auswertung der Fugenlage ohne Spaltbreitenmessung möglich war.

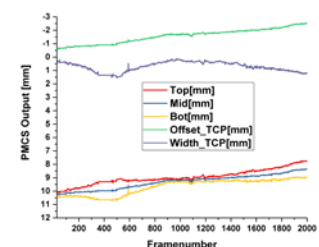
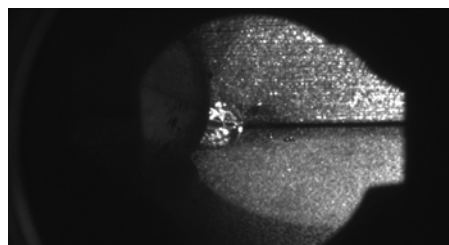
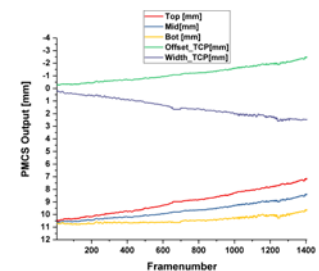
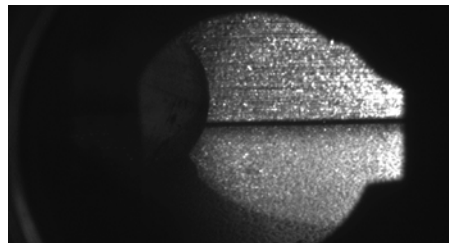


Abbildung 86 Schweißprobe mit sich öffnendem Spalt (Spaltbreite von 0 bis 4 mm, Stoßkonfiguration: T-Stoß mit HP-Profil)
oben: ohne Schweißprozess (Beleuchtungsparameter: Stromstärke: 120 A, Pulsdauer: 100 μ s)
unten: mit MAG-Prozess (Beleuchtungsparameter: Stromstärke: 120 A, Pulsdauer: 100 μ s)

Exemplarisch für die Vorversuche ist in Abbildung 86 eine Gegenüberstellung einer Auswertung von zwei Versuchen mit einem eingestellten öffnenden Spalt von 0 bis 4 mm mit und ohne Schweißprozess gegeben. Anhand der Kurvenverläufe in Graph Abbildung 86 (unten rechts) wird ersichtlich, dass sich der Fugespalt während des Schweißprozesses im mittleren Bahnabschnitt schließt und an den Positionen der Spannvorrichtung bzw. an der gehefteten Endposition geöffnet bleibt.

Im weiteren Verlauf der Versuchsreihe wurden Schweißungen am kleinen Demonstrator zur Ermittlung der Fähigkeiten des PMCS-Systems durchgeführt. Vor den Versuchen am kleinen Demonstrator fanden noch Vorschweißungen an einem Testbauteil zur Ermittlung der Parameter für Steignähte statt. Anschließend wurden Aufnahmen ohne Schweißprozess erzeugt, damit nötige Anpassungen, wie Ausrichtung der Beleuchtung um Zugänglichkeit des Bearbeitungskopfes zu gewährleisten, vorgenommen werden konnten. Der kleine Demonstrator ermöglichte die Bewertung an drei unterschiedlichen Stoßkonfigurationen bzw. Schweißpositionen. Die Versuche umfassten Schweißungen am T-Stoß mit HP-Profil als Steg auf Platte, Kehlnaht an Knieblech auf HP-Profil und Steignaht am T-Stoß mit Knieblech. Die nachfolgenden Bilder und Graphen geben die Auswertung der einzelnen Fälle beispielhaft wieder.

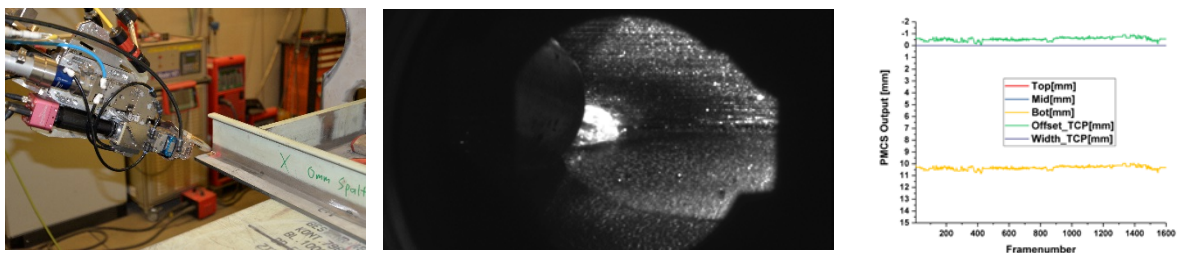


Abbildung 87 MAG Schweißprozess mit 2 kW Laserunterstützung; Stoßkonfiguration: T-Stoß mit HP-Profil als Steg; Beleuchtungsparameter: Stromstärke: 70 A, Pulsdauer: 100 μ s

In Abbildung 87 links ist der Aufbau für den MAG-Schweißprozess mit 2 kW Laserleistung für die T-Stoßkonfiguration mit HP-Profil als Steg abgebildet. Die Ausrichtung der Beleuchtung der Bearbeitungszone beträgt ca. 45° zum HP-Profil und zur Platte. Die optische Leistung betrug 90 W bei einer Pulsdauer von 100 μ s. In Abbildung 87 rechts ist der zeitliche Verlauf der detektierten Fugenlage wiedergegeben. Der Kurvenverlauf gibt in diesem Fall nur die erkannte Fugenposition als Offsetwert des TCPs wieder, da durch die Situation eines technischen Nullspalts kein Spalt vorhanden war und somit keine Fugentextur segmentiert wurde (Verfahren mit Texturgradienten).

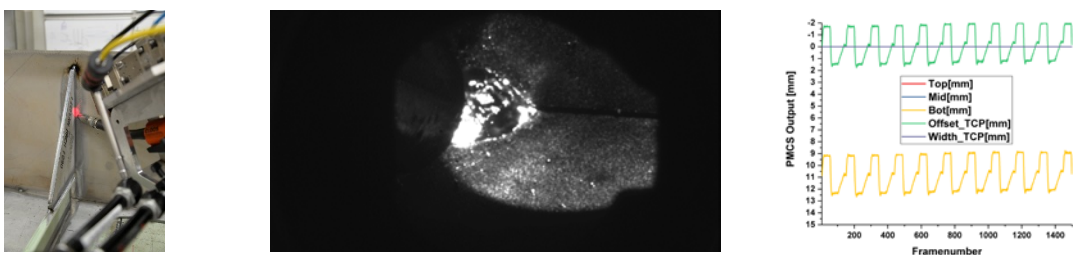


Abbildung 88 Steignaht mit laserunterstützten MAG-Schweißprozess; Beleuchtungsparameter: Stromstärke: 120 A, Pulsdauer: 200 μ s

Für die Steignachtschweißung kam die Technik mit Dreieckspendeln (in der Praxis auch als Tannenbaumschweißen bekannt) zum Einsatz. Die Anordnung der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 88 links wiedergegeben. Der Auswertebereich für die Fugenfolge wurde entsprechend angepasst, da aufgrund der pendelnden Bewegung sichergestellt sein musste, dass die Fuge immer im Auswertebereich lag. Der ermittelte zeitliche Verlauf des TCPs ist in Abbildung 88 rechts dargestellt und zeigt die um die programmierte Bahn dreiecksförmige Bewegung des Schweißprozesses.

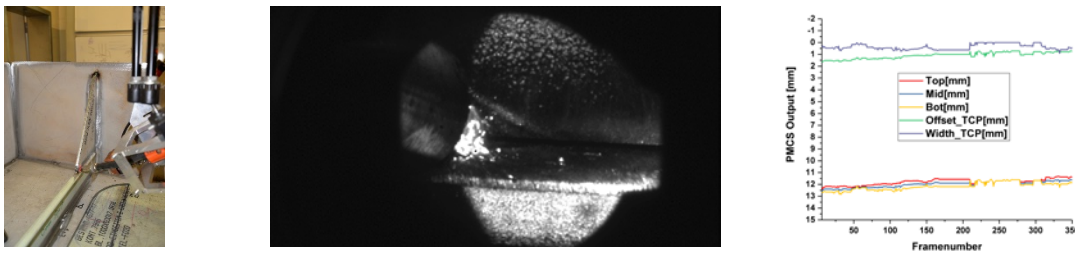


Abbildung 89 Kehlnaht auf HP-Profil und am Knieblech; Beleuchtungsparameter: Stromstärke: 70 A, Pulsdauer: 100 μ s

Die Kehlnahtschweißung am aufgesetzten Knieblech auf HP-Profil wird in Abbildung 89 gezeigt. Hervorzuheben ist bei dieser Schweißung, dass der zeitliche Verlauf der Spaltbreite einen Bereich aufweist zwischen Bildnummer \approx 220 und \approx 260 in dem sich der Spalt im Prozess schließt und das kombinierte Texturverfahren seine Fähigkeiten, auf unterschiedliche Spaltsituationen zu reagieren, unter Beweis stellt. Die Detektion der Fugenlage konnte bei allen Aufnahmen, außer bei Aufnahmen mit großer Rußbildung erfolgreich durchgeführt werden. Beim reinen MAG und Laser-only Schweißen eines technischen Nullspaltes konnte außerdem erfolgreich eine Spaltbreitenmessung durchgeführt werden. Die gemessenen Spaltbreiten lagen zwischen 0 μ m und \sim 300 μ m. Die Auswertung der Ergebnisse führte zu folgenden Schlussfolgerungen bezüglich der Bewertung der Funktionsfähigkeit des mobilen PMCS:

- Die Fugenfolge des PMCS liefert ohne optische Störungen solide Messwerte und zeigt die exakte Bahnbewegung des Roboters.
- Bei Spaltbreiten $>0,5$ mm kann das System für das adaptive Schweißen eingesetzt werden. Das System erkennt die Veränderung der Spaltbreite im Prozess zuverlässig, sodass die Prozessparameter entsprechend dynamisch angepasst werden können und der Energieeintrag auf das benötigte Minimum reduziert werden kann.
- Das System kann auch zur Fugenfolge einer Steignacht mit einer „Tannenbaum“ Bewegung des Roboters erfolgreich eingesetzt werden.
- Aufgrund des Schweißrauches und der Rußbildung wurde eine Anpassung des Crossjet-Moduls zur Erweiterung des Sichtfeldes im Vorlauf der Prozesszone nötig, um noch robustere und störungsfreie Messergebnisse zu erzielen.
- Die Ausrichtung der Beleuchtung sollte für eine industrielle Lösung konstruktiv gelöst werden, um eine reproduzierbare Beleuchtungseinstellung und gleichbleibende Abbildungsergebnisse zu garantieren.
- Die Fugenbreitenmessung benötigt einen ausreichenden Kontrast zwischen Spalt und den zu verschweißenden Fügepartnern, da sich sonst der Spalt nicht eindeutig von den verdunkelten Oberflächen der Bleche unterscheiden lässt.

1.5.3. Demonstration koaxiale Prozessvisualisierung und Fugenfolge im Vorlauf am Handschweißsystem

Nachdem das mobile PMCS für das Handschweißsystem konfiguriert und an den Verbundpartner Fraunhofer IAPT transferiert wurde, installierte das Fraunhofer ILT dieses am Hand-Bearbeitungskopf und nahm es vor Ort in Betrieb. Anschließend wurde das Handschweißsystem hinsichtlich der Fugenfolge und Prozessvisualisierung am Fraunhofer IAPT erprobt. Mitte Juni 2018 fanden die Versuche zur Erprobung der Fugenfolge am Handschweißsystem am Fraunhofer IAPT statt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 90 links dargestellt.

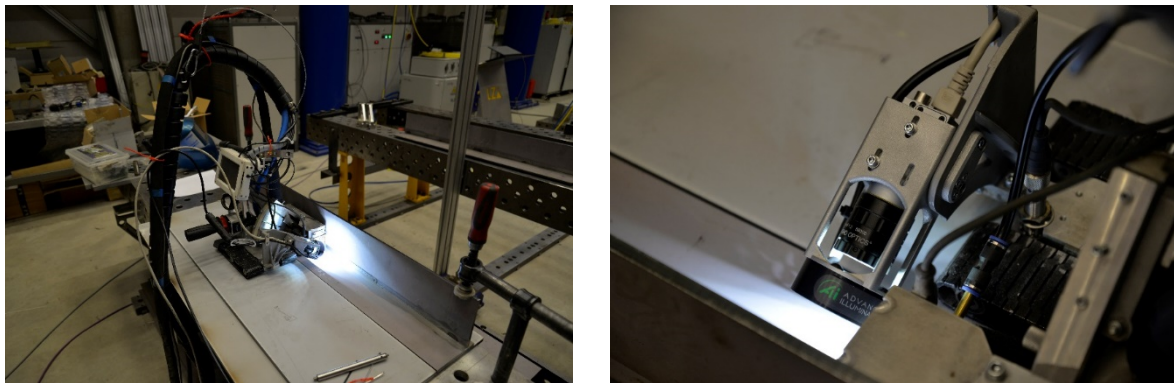


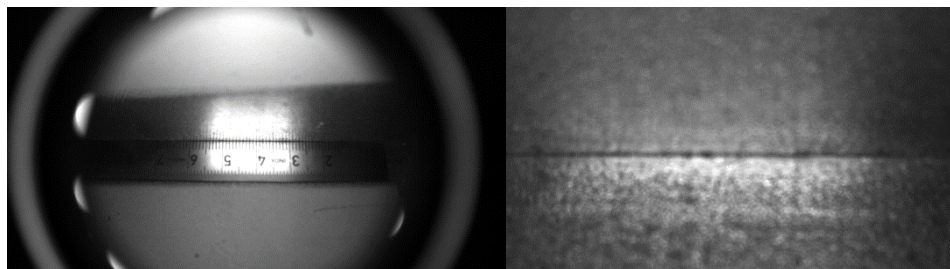
Abbildung 90 links: Aufbau des Handschweißsystems am Versuchstand des Fraunhofer IAPT
rechts: Versuchsaufbau der Fugenfolgesensoren am Handschweißsystem im Vorlauf der Prozesszone

Für die Fugenfolge im Vorlauf der Prozesszone am Handschweißsystem wurden zur Reduktion der Gesamtsystemkosten und zum direkten Vergleich zwischen Automatik- und Handschweißsystem folgende Sensorkomponenten ausgewählt:

- Kamera: Basler acA2000-50gm – GigE Vision Kamera
- Objektiv: 8.5 mm C Series Lens / 58000 von Edmund Optics
- Beleuchtung Dunkelfeld: Advanced Illumination LED Beleuchtung

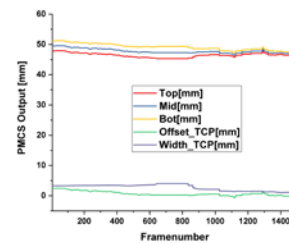
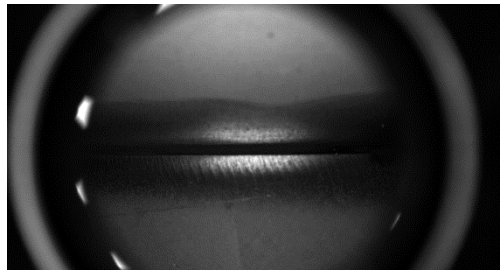
Zunächst wurden Versuche mit einer Dunkelfeldbeleuchtung durchgeführt (Abbildung 90 rechts). Eine Strecke von 1 mm auf der Skala eines Stahllineals in der Gegenstandsebene entsprach einem Abstand von 12 Pixeln auf dem CMOS Chip der Kamera. Bei einer Pixelgröße von $5,5 \times 5,5 \mu\text{m}^2$ ergab sich damit ein Abstand von 0,066 mm in der Bildebene und ein Abbildungsmaßstab von $\beta = 0,066$ (15-fach verkleinerte Abbildung siehe Abbildung 91 links). Der Auswertebereich der Fugenfolge wurde als symmetrisches Bildfeld um die Fugenmitte gewählt (Abbildung 91 rechts).

Abbildung 91
Einzelaufnahme zur Bestimmung des Abbildungsmaßstabs (links)
ROI-Bereich zur Bestimmung der Fugenlage (rechts)



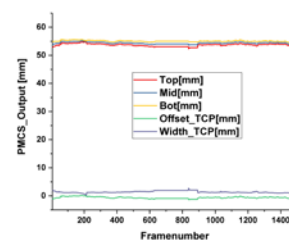
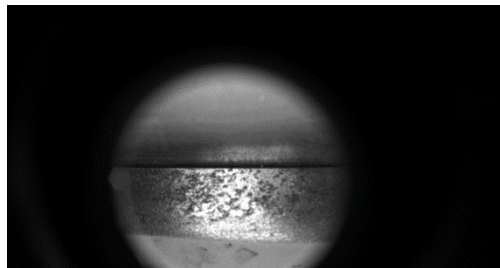
Alle Aufnahmen wurden zu diesem Zeitpunkt noch ohne Prozess durchgeführt, da keine Absaugung im Vorlauf der Brennkammer des Handsystems vorhanden war. Nach erfolgreicher Validierung wurde eine Einhausung zum Schutz der Systemtechnik konzipiert und gefertigt. Mit entsprechender Absaugung des Schweißrauches unterschied sich die Abbildung der Fuge jedoch im Prozess nicht von der ohne Prozess, da sich der Sensor im Vorlauf der gekapselten Prozesszone des Handsystems befand. Die Aufnahmen 0 bis 14 wurden mit einer Dunkelfeldbeleuchtung und die Aufnahmen 15 und 16 mit einer Hellfeldbeleuchtung durchgeführt. Für die einzelnen Aufnahmen wurden die Parameter Spaltbreite und Belichtungszeit variiert und die Fugenlage sowie Spaltbreite durch das PMCS ermittelt.

Abbildung 92
Aufnahme_00010
Probe_3_Part_1



Exemplarisch werden zwei Aufnahmen mit Dunkelfeld- sowie Hellfeldbeleuchtung beschrieben. In Abbildung 92 links wird eine Aufnahme mit Dunkelfeldbeleuchtung für eine Spaltbreite von 2 mm in T-Stoß Konfiguration bei einer Belichtungszeit von 100 μ s wiedergegeben. In Abbildung 92 rechts wird der Graph der gemessenen Offsetwerte des TCPs (Bildmitte) zur Fugenmitte sowie die ermittelte Fugenbreite dargestellt.

Abbildung 93
Aufnahme_00015
Probe_5_Part_1



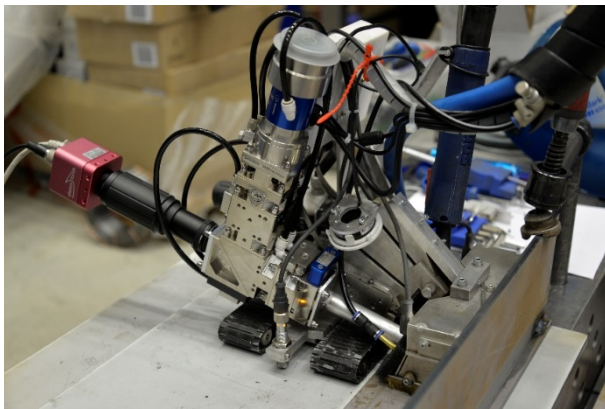
In Abbildung 93 links wird eine Aufnahme mit Hellfeldbeleuchtung für eine Spaltbreite von 1 mm in T-Stoß Konfiguration bei einer Belichtungszeit von 500 μ s wiedergegeben. In Abbildung 93 rechts wird der Graph der gemessenen Offsetwerte des TCPs (Bildmitte) zur Fugenmitte und die ermittelte Fugenbreite dargestellt. Die Auswertung der Versuchsaufnahmen führte zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Wegen der starken Rauchentwicklung am Austritt der Brennkammer und der bei Erprobung der ausgewählten Systemtechnik und der noch nicht vorhandenen Einhausung wurde zunächst auf Aufnahmen im Prozess verzichtet.
- Beim Vergleich der beiden Beleuchtungsmodule hatte sich gezeigt, dass mit einer höheren Belichtungszeit auch die bereits am IAPT vorhandene Hellfeldbeleuchtung erfolgreich zur

Fugenfolge eingesetzt werden konnte. Diese schränkt jedoch das Sichtfeld der Kamera aufgrund des kleineren Innendurchmessers weiter ein.

- Für die Kamera und das Objektiv musste eine entsprechende Einhausung mit Absaugung des Schweißrauches im Vorlauf der Brennkammer des Handsystems konzipiert werden.
- Aufgrund der starken Bildfeldwölbung des Objektivs beschloss das Fraunhofer ILT ein weiteres Objektiv zu beschaffen, das geringere Verzeichnungen aufwies und durch ein kleineres Sichtfeld das Auflösungsvermögen vergrößerte.

Im Rahmen der Versuchskampagne wurden auch Versuche zur Erprobung der koaxialen Prozessvisualisierung durchgeführt. Zur Reduktion der Systemkosten wurde die Photonfocus MV1-D2048x1088-96-G2 als GigE Vision Kamera für die koaxiale Prozessbeobachtung am Handsystem ausgewählt.



In der Versuchsreihe wurde lediglich die koaxiale Aufnahme des Prozessleuchtens zur Visualisierungszwecken für den Bediener erprobt. Ohne Fremdbeleuchtung kann keine optische Fugenfolge realisiert werden, weshalb keine Auswertung der Messdaten durchgeführt wurde. Der in der Bearbeitungsoptik eingesetzte Strahlteiler ist für eine Prozessvisualisierung im sichtbaren Spektralbereich ausgelegt. Daher wurde für die Prozessvisualisierung auf einen Bandpassfilter mit 638 nm zurückgegriffen.

Abbildung 94 Aufbau Sensorik zur koaxialen Prozessbeobachtung

In der Versuchsreihe zur koaxialen Prozessbeobachtung am Handschweißsystem zeigte sich, dass bei Aufzeichnung des Prozessleuchtens eine Synchronisation mit der Grundstromphase der Schweißstromquelle erforderlich war, um eine gleichbleibende Bildqualität zu erzielen. Die Bildersequenz (s. Abbildung 95) veranschaulicht die Notwendigkeit zur Synchronisation mit der Grundstromphase der Schweißstromquelle über das LEM Modul.

Die Messwerte des PMCS zur Fugenfolge sollten für eine einfache Umsetzung der Regelung am Handschweißsystem als analoge Ausgabewerte über die SPS des PMCS bereitgestellt werden. Hierzu waren bereits entsprechend freie analoge Klemmen vorhanden, eine softwaretechnische Anpassung des PLC Programmes wurde erforderlich. Die Versuche zur Feststellung und Bewertung der Fähigkeit des Prozess-Monitoring-Regelungs-Systems (PMCS), die definierten Anforderungen im Handschweißsystem unter Laborbedingungen zu erfüllen, wurden erfolgreich durchgeführt. Zur Bereitstellung aller Funktionen des vollautomatisierten PMCS wurde die GeniCam Schnittstelle zur Ansteuerung von GigE Vision Kameras implementiert. Durch die Einbindung der GigE Vision Kamera für die Fugenfolge standen dem mobilen PMCS alle Funktionen des Automatiksystems zur Verfügung.

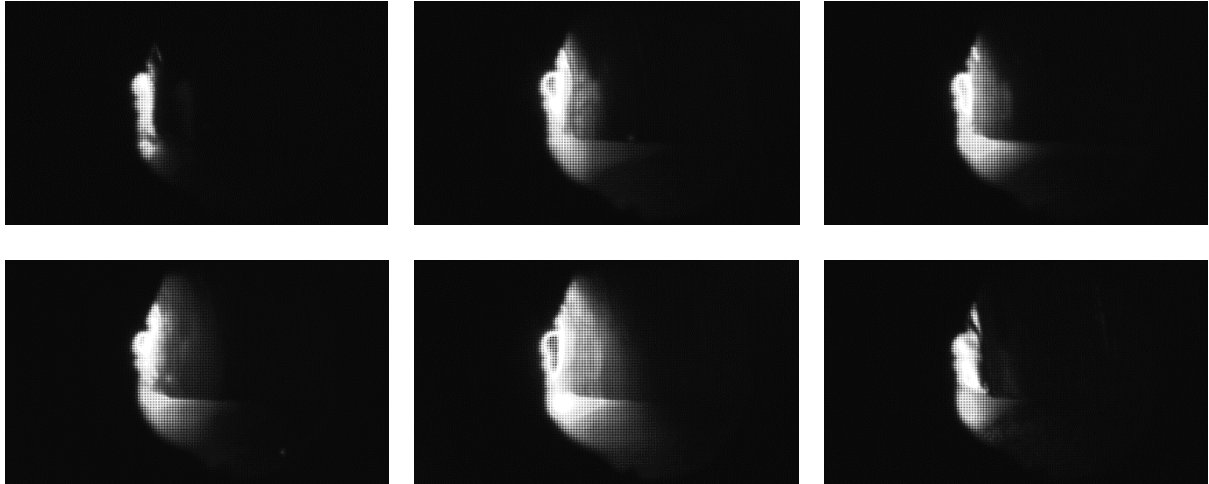


Abbildung 95 Die Bildsequenz Bildnummern 62 bis 67 der Aufnahme_00002 zur koaxialen Prozessbeobachtung am Handschweißsystem zeigt die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen bei konstanter Belichtungszeit der Kamera

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Teilvorhaben „Mehrgrößen-Prozess-Überwachung und Regelung mittels koaxialer Echtzeit-Bildverarbeitung beim Fügen von Leichtbaustrukturen mit einem Laser-Plasma Hybrid-Prozess“ des ShipLight-Verbundprojektes war der wesentliche Teil der Kosten durch Personalausgaben entstanden.

Kostenart	Abgerechnete Kosten
Material	72.823,05 €
Personalkosten	982.092,78 €
Reisekosten	14.091,78 €
Sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	3.392,53 €
Gesamt:	1.072.400,14 €

An zweiter Stelle folgten Ausgaben für den Aufbau der Systemtechnik insbesondere für die Umsetzung des stationären sowie mobilen PMCS-Systems., die durch die Anschaffung folgender Komponenten entstanden:

Grafikkarten, Industrierechner, Framegrabberkarten, Multitouch-Control-Panel, Hutschinen PCs, Schaltschrank mit Dachkühler, Pixel Plant, CameraLink Full Umsetzer, Laserkabel, Diodensteuergerät Typ Astatine, Zoom Fiber Collimator und Beckhoff Softwarelizenz

Die Ausgaben für Dienstreisen sind zum einen in den zahlreichen Versuchskampagnen bei den Verbundpartnern als auch in den Arbeitsgruppen- und Verbundtreffen begründet.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Teilvorhaben sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Bei den geplanten Kosten für Reisen und sonstige unmittelbare Vorhabenkosten konnten Mittel eingespart und für die entstandenen Mehrkosten bei der Umsetzung des Handschweißsystems genutzt werden. Darüber hinaus waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

4. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Verbundvorhaben zielte darauf ab, die Potenziale der jüngsten Entwicklungen der Lasertechnik in der deutschen Werftindustrie für das Fügen von modernen Leichtbaustrukturen zu nutzen. Die neuartig entwickelte ShipLight-Technologie verringert das Gefälle zwischen hochautomatisierter 2D-Paneelfertigung und konventioneller Bearbeitung von 3D-Sektionen im Schiffbau. Als wesentliches Ergebnis konnte gezeigt werden, dass mit dem ShipLight-Prozess, verglichen mit dem konventionellen MAG-Verfahren, sowohl an I- als auch an T-Stößen erheblich höhere Schweißgeschwindigkeiten bei einer gleichzeitig gesteigerten Einschweißtiefe realisierbar sind. Durch die im Teilvorhaben validierte aktive, echtzeitfähige, automatisierte Fugenfolgeregelung sowie die Inline-Qualitätssicherung wird eine hohe Prozesssicherheit erreicht. Die erzielten Ergebnisse haben das Potenzial dazu beizutragen, dass Schiffe künftig mit geringerer Masse, sicherer und kostengünstiger hergestellt werden können. Die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Werftindustrie kann dadurch im internationalen Vergleich insbesondere mit Blick auf die rasch wachsende Werftindustrie in Asien und speziell in China gestärkt werden.

Das Fraunhofer ILT kann mit seinem Beitrag Abweichungen und Fehler beim laserunterstützten MSG-Schweißprozess frühzeitig erkennen und korrigieren, wodurch die Beherrschbarkeit des Fügeprozesses und letztlich die geforderte Prozess- und Fügequalität überhaupt erst gewährleistet werden kann. Die texturbasierten Algorithmen ermöglichen sowohl eine bildbasierte Fugenfolgeregelung als auch die Förderung des Zusatzwerkstoffs abhängig vom zu überbrückenden Spalt, ohne die Störkontur des Bearbeitungskopfes durch lateral angeordnete Sensoren zu vergrößern. Anders als bei kommerziellen Nahtfolgesensoren, die lateral und vorlaufend angeordnet werden müssen, wird hier die Zugänglichkeit zum Werkstück durch die koaxial in den Strahlengang des Lasers integrierte Sensorik nicht eingeschränkt. Das Teilvorhaben konnte somit auch einen wichtigen Beitrag zur wissenschaftlich-technischen Entwicklung beim Fügen von Leichtbaustrukturen mit dem laserunterstützten MSG-Schweißprozess leisten.

Die Arbeiten zur koaxialen Online-Prozessüberwachung und Prozessregelung am Fraunhofer ILT behandelten ein strategisches Schwerpunktthema, das darauf abzielte, Fügeprozesse mit Lasern sicher beherrschbar zu machen und für den geregelten Bereich zu qualifizieren. So ist z.B. die aktive Überwachung der Position von Hybridprozessen relativ zur Fuge mit einem „seeing eye“ eine unverzichtbare Forderung für die Zulassung des Fügeverfahrens im geregelten Bereich (vgl. Abschnitt 2.2 der Guidelines No. 19 von Det Norske Veritas). Deshalb werden die Arbeiten auch nach Abschluss dieses Teilvorhabens fortgesetzt und die Ergebnisse konsequent im Rahmen geförderter Projekte und insbesondere in bilateralen Industrieprojekten auf andere Anwendungen

im geregelten Bereich z.B. beim Bau von Druckbehältern und im Stahlbau übertragen. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse als aktuelle Inhalte in Lehrveranstaltungen der mit dem Fraunhofer ILT verbundenen Lehrstühle an der RWTH Aachen einfließen. Insgesamt wird daher ein hohes Verwertungspotenzial der Entwicklungen Projekt erwartet und die wissenschaftlich-technische Anschlussfähigkeit sichergestellt.

In Kooperation mit interessierten Unternehmen wird die Industrialisierung des Verfahrens forciert, um die Technologie mittelfristig allen Anwendern zugänglich zu machen. Die Ergebnisse werden durch Hersteller von Bearbeitungsköpfen für die Lasermaterialbearbeitung und deren Anwender und durch Hersteller von roboterbasierten Fertigungsanlagen in die industrielle Praxis überführt. Die koaxiale Fugenidentifikation ermöglicht eine verbesserte Prozessführung beim Fügen von 3D-Strukturen. Die texturbasierte Lageerkennung von Stoßgeometrien mit technischem Nullspalt stellt eine innovative Lösung für diese Aufgabe dar und hat das Potential, konventionelle Fugenfolgesensoren zu ersetzen. Neben der weiteren Vertiefung in bereits etablierten Märkten ist auch das Potential vorhanden, neue Anwendungsgebiete zu erschließen, die bislang aufgrund fehlender Fugenfolgetechnologie unzugänglich sind.

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse werden über die Verbundpartner, insbesondere durch die Carl Cloos Schweißtechnik GmbH, in die Praxis transferiert. Durch Präsentation der Ergebnisse im Rahmen von wissenschaftlichen Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, Fachtagungen, Seminaren sowie nationalen und internationalen Konferenzen wird sichergestellt, dass die gewonnenen Erkenntnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Das texturbasierte Messverfahren wird auf einschlägigen Messen, wie z.B. der LASYS, LANE und der LASER gezeigt.

5. Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem Zuwendungsempfänger sind auf dem Gebiet der koaxialen texturbasierten Fugenfolge **keine** Fortschritte anderer Stellen bekannt.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Teilprojektes wurden und werden wie nachfolgend aufgeführt im Rahmen von Fachartikeln in Zeitschriften und Tagungsbänden, Präsentationen auf nationalen und internationalen Tagungen präsentiert.

Liste der im Projektzeitraum erfolgten Veröffentlichungen:

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT (2016): Jahresbericht, S.85, 2017.

AKL - International Laser Technology Congress 2018, im Rahmen der Lasertechnik Live am Fraunhofer ILT unter dem Titel "System Technology New Approach in Seam Tracking by Texture-Based Image Processing", 03.05.2018.

Cerwenka, G.; Steinmeier, O.; Petronis, E.; Keßler, T.; Fischer, A.; Fiedler, W.; Schulze, F.; Emmelmann, C.: Development of a flexible low laser power hybrid (LLPH) technology for shipbuilding including additive manufactured semi-automated hand-held unit, 10th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2018], Fürth, Germany, Procedia CIRP 74 (2018) 770–774.

ShipLight – Nachhaltiger Schiffsleichtbau durch effizientes und flexibles automatisiertes 3D-Laser-Lichtbogen-Hybridschweißen, Statustagung Maritime Technologien (2018). Tagungsband der Statustagung 2018. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH, S.67-84, ISBN 978-3-95806-366-2.

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT (2018): Jahresbericht, 2019.

Liste der noch geplanten Veröffentlichungen:

Projekt ShipLight mit Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband der 114. Hauptversammlung der Schiffbautechnischen Gesellschaft (STG) vom 20. - 22. November 2019 in Papenburg

Partner auf dem Fraunhofer Vision-Stand der Messe Control 2019 zum Themenschwerpunkt: Objektivierung der Qualitätssicherung durch Bildverarbeitung mit Exponat.

7. Danksagung

Das Forschungsprojekt ShipLight wurde mit freundlicher Unterstützung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) nach einem Beschluss des Deutschen Bundestages gefördert. Wir bedanken uns für die Förderung und beim Projektträger Jülich (PtJ) für die hervorragende Zusammenarbeit. Weiterhin bedanken wir uns für die Unterstützung unserer Kollegen und aller Verbundpartner, deren Fachwissen die Forschungsaktivitäten überhaupt ermöglicht hat.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel ShipLight – Nachhaltiger Schiffsleichtbau durch effizientes und flexibel automatisiertes 3D-Laser-Plasma-Hybridschweißen Teilvorhaben: Mehrgrößen-Prozess-Überwachung und Regelung mittels koaxialer Echtzeit-Bildverarbeitung beim Fügen von Leichtbaustrukturen mit einem Laser-Plasma Hybrid-Prozess	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Berichtersteller: Fiedler, Wolfgang Beiträge von: Schulze, Frédéric	5. Abschlussdatum des Vorhabens August 2018
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT Steinbachstr. 15 52074 Aachen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03SX389M
	11. Seitenzahl 75
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 27
	14. Tabellen 12
	15. Abbildungen 95
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) AKL - International Laser Technology Congress, Aachen, 03.05.2018 Statustagung Maritime Technologien, Berlin, 13.12.2018 Conference on Photonic Technologies [LANE 2018], Fürth, 2018 Control - Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung, Messe Stuttgart, Mai 2019	

Ein klassischer, auf Helligkeitsgradienten basierender Ansatz zur Segmentierung digitaler Bilddaten schlägt bei anspruchsvollen Aufgaben oft fehl, weil die für das Ergebnis herangezogenen Informationen auf die Helligkeitsinformationen der unmittelbaren Nachbarschaft des jeweiligen Pixels beschränkt sind. Durch den Einsatz der Filterdatenbank werden nicht mehr nur die auf Intensitäten basierenden Gradienten zwischen einzelnen Bildpunkten, sondern von der Ausprägung der Struktur der Oberfläche abhängige Filterantworten zur Erkennung der Fugenlage eingesetzt. Die durch Faltung mit den Bilddaten erzeugten Antworten der Filter sind weniger von den Intensitäten als von der Orientierung und Größe der Struktur abhängig. Der Ansatz der texturbasierten Segmentierung wurde im Projekt konsequent weiterverfolgt. Das Verfahren wertet deutlich mehr Informationen aus, erfordert jedoch auch mehr Rechenleistung, was eine Echtzeitimplementierung bisher unwirtschaftlich gemacht hat. Mit der stetig steigenden Leistungsfähigkeit von FPGAs sowie PC-Hardware, wie z.B. Grafikkarten mit einer Vielzahl parallel arbeitender Grafikprozessorkernen, wird die für die Fugenfolgeregelung erforderliche Echtzeitimplementierung der rechenintensiven Bildverarbeitungsalgorithmen zeitnah wirtschaftlich umsetzbar sein.

Im Rahmen des Projektes wurde vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ein System zur Fugenfolgeregelung und adaptiven Prozessführung entwickelt. Das Prozessüberwachungs- und Steuerungssystem (PMCS) wurde in Anlehnung an die Richtlinien zur industriellen Bildverarbeitung konzeptioniert und umgesetzt. Das System umfasst eine koaxial zum Strahlengang des Bearbeitungslasers integrierte Kamera sowie eine lateral angeordnete Fremdbeleuchtung.

Während des Schweißprozesses synchronisiert sich die Fremdbeleuchtung mit der Frequenz und dem zeitlichen Stromverlauf der Schweißstromquelle. Diese Herangehensweise ermöglicht es dem Steuerungssystem eine gleichbleibende Bildqualität der Bearbeitungszone und aktuellen Spaltsituation selbst bei schwankenden Schweißprozessbedingungen zu erfassen. Das System analysiert akquirierte Prozessbilder mit Hilfe eines performanten Industrie-PC, der über Field Programmable Gate Arrays (FPGA), einer zentralen Recheneinheit (CPU) und Grafikprozessoren (GPU), auf welchen Operatoren zur texturbasierten Bildverarbeitung implementiert sind, sowie einer echtzeitfähigen Beckhoff EtherCAT SPS für den geschlossenen Regelkreis und zur Kommunikation mit peripheren Geräten verfügt.

Das Bildverarbeitungssystem führt im Rahmen der Bildanalyse die texturbasierte Fugenlagedetektion und Spaltbreitenmessung aus. Des Weiteren validiert das System die gemessenen Werte und prüft den algorithmischen Ausgabewert gegen einen Satz von logischen Randbedingungen wie z.B. den Winkel der Stoßfugen. Für eine robuste Regelung wird ein Kalman-Filter zur Glättung der Messergebnisse in der Art eingesetzt, dass für valide Messwerte eine Glättung der Stellgröße des Regelkreises des Roboters über die letzten zehn gültigen Messpunkte ausgeführt wird. Der Filter wird verwendet, um Sprünge in der Stellgröße zu glätten sowie Schleppfehler oder ein Überschwingen des Regelkreises zu vermeiden.

Im Detail basiert der Fugenfolgealgorithmus auf der Erkennung von lokalen Texturelementen, diese Texturen bestehen dabei aus Clustern ähnlicher Filterantworten einer MR8 Filterdatenbank, sogenannte Textons. In der Trainingsphase (Offline) werden aus aussagekräftigen Prozessaufnahmen Texturmerkmale mit Hilfe der MR8 Filterdatenbank berechnet. Diese vektoriellen Filterantworten werden anschließend mittels des „K-Means Clustering“ zu N-Schwerpunkten, den Textons, zusammengefasst. In der Anwendung, der Echtzeit Bildauswertung (Online), wird aus den aktuellen Prozessdaten erneut die Texturmerkmale berechnet und über den minimalen euklidischen Abstand dem nächstgelegenen Texturschwerpunkt (Texton) zugeordnet.

Der Abstand zwischen dem Merkmalsvektor der aktuellen Prozessdaten und den Merkmalsvektoren der Trainingsphase (Texturschwerpunkte) wird benutzt, um zu entscheiden, welcher Textur der betrachtete Datensatz entspricht. Mit dieser Methode wird die Blechoberfläche in sehr feinkörnige Texturen unterteilt, wodurch die Fügepartner selbst bei Nullspalt-Bedingung noch unterschieden werden können.

Bei einem vorhandenen Spalt werden aus den Texturbildern anhand einer zur Fuge gehörenden Texturliste Binärbilder der Fuge erzeugt und durch einen Blob-Algorithmus analysiert. Durch die Bestimmung aller zusammenhängender Randpixel wird die Kontur und Lage der Stoßfuge im Bild berechnet. Nachdem die Stoßfugenkontur gefunden wurde, teilt der Algorithmus die Randpixel den beiden Fügepartnern zu und führt eine lineare Regression für beide Stoßkanten durch. Im Anschluss erfolgen Plausibilitätskontrollen sowie eine Rauschunterdrückung durch einen Kalman-Filter. Der Ausgabewert, der den Versatz zwischen Wechselwirkungspunkt und Schwerpunkt der Fugenkontur projiziert in die Ebene der Bildmitte angibt, wird an die Robotersteuerung übermittelt, wodurch der Regelkreis geschlossen und die programmierte Bahn korrigiert wird.

Durch die im Teilvorhaben validierte echtzeitfähige, automatisierte Fugenfolgeregelung sowie die Inline-Qualitätssicherung wird eine hohe Prozesssicherheit erreicht. Das Fraunhofer ILT kann mit seinem Beitrag Abweichungen und Fehler beim laserunterstützten MSG-Schweißprozess frühzeitig erkennen und korrigieren, wodurch die Beherrschbarkeit des Fügeprozesses und letztlich die geforderte Prozess- und Fügequalität überhaupt erst gewährleistet werden kann. Die texturbasierten Algorithmen ermöglichen sowohl eine bildbasierte Fugenfolgeregelung als auch die Förderung des Zusatzwerkstoffs abhängig vom zu überbrückenden Spalt, ohne die Störkontur des Bearbeitungskopfes durch lateral angeordnete Sensoren zu vergrößern. Anders als bei kommerziellen Nahtfolgesensoren, die lateral und vorlaufend

angeordnet werden müssen, wird hier die Zugänglichkeit zum Werkstück durch die koaxial in den Strahlengang des Lasers integrierte Sensorik nicht eingeschränkt. Das Teilvorhaben konnte somit auch einen wichtigen Beitrag zur wissenschaftlich-technischen Entwicklung beim Fügen von Leichtbaustrukturen mit dem laserunterstützten MSG-Schweißprozess leisten.

19. Schlagwörter

laserunterstützten MSG-Schweißprozess, Laser-Hybrid-Schweissen, optische Nahtfolge, texturbasierte Bildverarbeitung, koaxiale Fugenfolgeregelung

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title ShipLight - Sustainable lightweight shipbuilding through efficient and flexibly automated 3D laser-plasma hybrid welding Sub-project: Multivariable process monitoring and control by means of coaxial real-time image processing for joining lightweight structures with a laser-plasma hybrid process	
4. author(s) (family name, first name(s)) Author: Fiedler, Wolfgang Contribution from: Schulze, Frédéric	5. end of project August 2018
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT Steinbachstr. 15 52074 Aachen Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 03SX389M
	11. no. of pages 75
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 27
	14. no. of tables 12
	15. no. of figures 95
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) AKL - International Laser Technology Congress, Aachen, 03.05.2018 Statustagung Maritime Technologien, Berlin, 13.12.2018 Conference on Photonic Technologies [LANE 2018], Fürth, 2018 Control - International trade fair for quality assurance, Exhibition Centre Stuttgart, May 2019	

18. abstract

A classical approach to segmenting digital image data based on brightness gradients often fails in challenging tasks because the information used for the result is limited to the brightness information of the nearest neighborhood of the pixel. By the use of the filter database, not only the gradients based on intensities between individual pixels, but also filter responses dependent on the characteristics of the surface structure are used for the detection of the joint position. The filter responses generated by convolution with the image data are less dependent on the intensities than on the orientation and size of the structure. The approach of texture-based segmentation was consistently pursued in the project. The method evaluates significantly more information, but also requires more computing power, which has made real-time implementation uneconomical so far. With the steadily increasing performance of FPGAs and PC hardware, such as graphics cards with a large number of parallel graphics processor cores, the real-time implementation of the calculation-intensive image processing algorithms required for joint tracking control will be economically feasible in the near future.

Within the framework of the project, the Fraunhofer Institute for Laser Technology developed a system for joint tracking and adaptive process control. The PMCS design is implemented in reference to the recommendations for industrial image processing systems. The system includes a coaxial camera and a lateral illumination. It processes images on a high performance PC consisting of field programmable gate array (FPGA), central processing unit (CPU), and graphics processing unit (GPU) operators for the texture-based image analysis and a real-time "EtherCat" programmable logic controller (PLC) for closed-loop control and communication with peripheral devices.

During the Low Laser Power Hybrid (LLPH) process, the illumination synchronizes with the frequency of the GMAW source. This approach enables the PMCS to maintain constant image quality from the process zone and current gap situation even with changing GMAW conditions. The image processing system executes the texture-based joint detection and the measurement of gap width. Furthermore, the system validates measured results and checks the algorithm outcome again a set of logical constraints, such as the angle of the joint edges. Kalman estimation is used to detect uncertainties of measurement for robust closed-loop control.

In detail, the seam tracking algorithm uses textons, clusters of similar textures, derived from training sequences by Kmeans clustering. By this method the surface of sheet metals is segmented into very fine-grained textures. Even under zero gap conditions joint partners can still be distinguished. With this approach, the texture-based seam tracking overcomes the problems of noisy reflections and zero gap situations, which prevents standard operators based on intensity values from working.

For none zero gap conditions a binary blob image is analyzed by a blob detection algorithm, by selecting the largest area and maximum amount of boundary pixels to determine the joint contour. After finding the most likely joint contour, the algorithm divides the boundary pixels into top and bottom mates and performs a linear regression for both parts. After validity checks and Kalman filtering for further noise suppression, an offset value is transmitted to the robot control for closed-loop seam tracking by adjusting the programmed path.

The real-time-capable, automated joint tracking control and the inline quality assurance validated in the subproject ensure a high level of process reliability. With its contribution, the Fraunhofer ILT is able to detect and correct deviations and errors in the laser-assisted GMAW welding process at an early stage, thus ensuring the controllability of the joining process and ultimately the required process and joining quality. The texture-based algorithms enable both image-based joint sequence control and feeding of the filler material depending on the gap to be bridged, without increasing the interference contour of the processing head by laterally arranged sensors. In contrast to commercial seam tracking sensors, which have to be arranged laterally and in advance, the accessibility to the workpiece is not restricted by the coaxial sensor integrated into the beam path of the laser. The subproject was thus also able to make an important contribution to the scientific and technical development of joining lightweight structures with the laser-assisted GMAW welding process.

19. keywords

Low Laser Power Hybrid (LLPH) Technology; Laser Hybrid Welding; Optical Seam Tracking, Texture-based Image Processing

20. publisher

21. price