

Bachelorarbeit

Alexander Marek Richter

Entwicklung und Evaluation von
Bildverarbeitungsalgorithmen zur
Schmelzbadüberwachung in Lichtbogenauftragprozessen

Alexander Marek Richter

Entwicklung und Evaluation von
Bildverarbeitungsalgorithmen zur
Schmelzbadüberwachung in
Lichtbogenauftragprozessen

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik*
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Michael Erhard
Zweitgutachter: Dr.-Ing. Dirk Herzog
Betreuer: M. Sc. Bohdan Vykhthar

Eingereicht am: 14. März 2022

Alexander Marek Richter

Thema der Arbeit

Entwicklung und Evaluation von Bildverarbeitungsalgorithmen zur Schmelzbadüberwachung in Lichtbogenauftragprozessen

Stichworte

Bildverarbeitung, Schmelzbadüberwachung, CMT, WAAM, Robotik, Additive Fertigung

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Entwicklung eines Systems zur Überwachung des Schmelzbades in Lichtbogenauftragprozessen. Ein entwickeltes Aufnahmesystem ermöglicht die Aufnahme des Schmelzbades und die Ausblendung des überbelichteten Lichtbogens. Folglich findet die Analyse und Entwicklung von Bildverarbeitungsalgorithmen zur Extraktion der Schmelzbadgeometrie statt.

Alexander Marek Richter

Title of Thesis

Development and evaluation of image processing algorithms for weld pool monitoring in arc deposition processes

Keywords

Image processing, Melt pool monitoring, CMT, WAAM, Robotics, Additive Manufacturing

Abstract

This work involves the development of a system for monitoring the molten pool in arc deposition processes. A developed imaging system allows to capture the molten pool and to mask out the overexposed arc. Consequently, the analysis and development of image processing algorithms for the extraction of the molten pool geometry takes place.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vi
Abkürzungen	vii
1 Einleitung und Motivation	1
2 Grundlagen	3
2.1 Fertigungsverfahren und Schweißtechnik	3
2.2 Sensorik in Lichtbogenschweißen	8
2.3 Sichtprüfung	11
2.4 Bildaufnahme und Digitalisierung	12
2.5 Bildverarbeitung	15
2.5.1 Bildvorverarbeitung	15
2.5.2 Lineare Filter	16
2.5.3 Rauschunterdrückung	17
2.5.4 Kantendetektion	20
2.5.5 Segmentierung	23
2.5.6 Merkmalsextraktion	26
2.5.7 Klassifizierung	27
3 Stand der Technik	28
4 Methodisches Vorgehen	30
5 Versuchsaufbau und Voruntersuchung des Aufnahmesystems	34
5.1 Versuchsaufbau zur Aufnahme des Schmelzbades	35
5.1.1 Kameratechnik zur Aufnahme von Schmelzbadbildern	35
5.1.2 Versuchsaufbau zur Aufnahme von Daten	37

5.1.3	Versuchsdurchführung zur Ermittlung optimaler Kameraparameter	39
5.2	Versuchsaufbau zur Synchronisierung der Bildaufnahme	42
5.2.1	Hardware zur Kamerasynchronisation	43
5.2.2	Versuchsaufbau und Lichtbogendetektion	43
5.2.3	Lichtbogenanalyse und Hardware-Trigger	46
5.3	Zusammenfassung und Ergebnisse der Voruntersuchung	48
6	Analyse und Vergleich von Bildverarbeitungsalgorithmen	50
6.1	Verwertbare Bildinformationen	51
6.2	Bildglättung	52
6.3	Kantendetektion	58
6.4	Segmentierung des Schmelzbades	62
6.4.1	Allgemeine Binarisierung	63
6.4.2	Binarisierung mittels Schwellwertverfahren	64
6.4.3	Konturverfolgung des Schmelzbades	71
6.5	Merkmalsextraktion zur ROI-Bestimmung und der Schmelzbadanalyse	73
7	Entwicklung und Implementierung von Algorithmen zur Beobachtung der Schmelzbadstabilität im CMT-Prozess	74
7.1	ROI Merkmalsextraktion	75
7.2	Implementierung des ROIs an einem Einzelbild	77
7.3	Konturverfolgung des Schmelzbades	81
7.4	Merkmalsextraktion des Schmelzbades	84
8	Validierung der Schmelzbadgeometrie	86
8.1	ROI Ermittlung unter verschiedenen Prozessleistungen	87
8.2	Detektion von langsamen Schmelzbadveränderungen	89
8.2.1	Aufnahme des Versuchs	89
8.2.2	ROI-Bestimmung	90
8.2.3	Berechnung der Schmelzbadmerkmale	91
8.3	Detektion von schnellen Schmelzbadveränderungen	93
8.4	Maßnahmen zur Optimierung der Schmelzbaddetektion	95
9	Zusammenfassung und Ausblick	96
	Literaturverzeichnis	97
	Selbstständigkeitserklärung	101

Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersicht der Fertigungsverfahren und des genutzten Verfahren in Anlehnung an [10]	3
2.2	Aufbau eines MSG-Verfahrens [13]	5
2.3	Cold Metal Transfer (CMT) Prozess mit Drahtbewegung [11]	7
2.4	Sensorik beim Lichtbogenschweißen in Anlehnung an [8]	9
2.5	Spektroskopie Messung mit verschiedenen Prozessgasen in Anlehnung an [12]	10
2.6	Abfolge einer automatischen Sichtprüfung in Anlehnung an [2]	11
2.7	Wellenlängenbereiche [2]	12
2.8	Bildmatrix in Anlehnung an [18]	14
2.9	Funktionsweise einer linearen Filteroperation [7]	17
2.10	Verbildlichung der diskreten Approximation der Gauß'schen Glockenkurve [7]	18
2.11	Funktionsweise unterschiedlicher Rauschunterdrückungsfilter in Anlehnung an [7]	19
2.12	Eindimensionale Grauwertkante und die dazugehörige erste Ableitung [2] .	20
2.13	Vergleich der Kantendetektionsfilter, (a) ungefiltert, (b) Prewitt in x-Achsen-Richtung, (c) Prewitt in y-Achsen-Richtung, (d) Prewitt Betrag, (e) Sobel Betrag, (f) Scharr Betrag, in Anlehnung an [7]	23
2.14	Funktionsweise einer typischen Histogrammanalyse in Anlehnung an [26] .	24
2.15	Funktionsweise einer Konturverfolgung mittels Achternachbarschaft in Anlehnung an [27]	25
2.16	Funktionsweise einer Konturverfolgung mittels zufälliger Punkte, links zufällige Bildpunkte, rechts verbundene Punkte mittels konvexen Hüllen [27]	26
4.1	Eingrenzung der Arbeit	32
5.1	Aktueller Stand und folgende Entwicklung	34
5.2	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Aufnahmesystem	35
5.3	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Kamera	35

5.4	Spektrale Empfindlichkeit der Basler Kamera [1]	36
5.5	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Kamerahaltung	37
5.6	Skizze und montierter Versuchsaufbau der Basler Kamera	38
5.7	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Kameraparameter und optische Filter	39
5.8	Beispielaufnahmen vom erstellten Versuchsaufbau	41
5.9	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Kamerasynchronisation	42
5.10	Typische Bildersequenz bei freilaufender Bilderaufnahme	42
5.11	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Kamerasynchronisation	43
5.12	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Lichtbogendetektion	43
5.13	Versuchsaufbau der Photodiodenhalterung	44
5.14	Transimpedanzverstärker, in Anlehnung an [29]	45
5.15	Darstellung der gemessenen Werte aus dem Mikrocontroller	46
5.16	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Lichtbogenanalyse und Trigger	46
5.17	Auswertung und Triggerzeitpunkte der Photodiodenmessung	47
5.18	Bildersequenz bei synchroner Bilderaufnahme	48
5.19	Vergleich der Aufnahmen mit verschiedenen Winkeln	48
6.1	Aktueller Stand und folgende Analyse	50
6.2	links Graustufenbild, rechts Pseudofarbdarstellung, erstellt mittels OpenCV [3]	51
6.3	Aktueller Stand und folgende Analyse: Bildinformationen	51
6.4	linkes Bild zeigt ein ideales Schmelzbad nach Schuler [25], rechts eine eigene Aufnahme mit verwertbaren Bildinformationen	52
6.5	Aktueller Stand und folgende Analyse: Bildglättung	52
6.6	Bild in Pseudofarbdarstellung ohne Glättungsfilter	53
6.7	Bilder in Pseudofarbdarstellung mit 10 dB und 20 dB Rauschen im Vergleich	54
6.8	Vergleich der Bildglättung mittels SNR	55
6.9	Vergleich der Bildglättung mittels SNR und Entropie	56
6.10	Vergleich der Rauschunterdrückung mittels Medianfilter	57
6.11	Aktueller Stand und folgende Analyse: Kantendetektion	58
6.12	Kantendetektion mit 5×5 Medianfilter	59
6.13	Geschätztes Ground Truth Bild	60
6.14	Vergleich der Kantendetektionsalgorithmen mittels Leistungsverhältnis	61
6.15	Aktueller Stand und folgende Analyse: Segmentierung	62

6.16	Binärbild mit Schwellwert 50 und invertiertes Bild	63
6.17	Vergleich der Binärbilder mit unterschiedlichen Schwellwerten	64
6.18	Histogramm des Kantenbildes mit logarithmischer Y-Achse	65
6.19	Geglättetes Histogramm nach dem Minimum-Algorithmus	66
6.20	Binarisierung mit Schwellwert $T = 120$	66
6.21	Binarisierung mit Schwellwert $T = 3$	67
6.22	Vorgehensweise des Triangle Algorithmus, in Anlehnung an [35]	68
6.23	Binarisierung mit Schwellwert $T = 2$	68
6.24	Visualisierung der in Isodata verwendeten Funktionen	70
6.25	Binarisierung mit Schwellwert $T = 44$	70
6.26	Aktueller Stand und folgende Analyse: Konturverfolgung	71
6.27	links Konturverfolgung mit der Achternachbarschaft und rechts mittels zufälliger Punktmenge	72
6.28	Aktueller Stand und folgende Analyse: Merkmalsextraktion	73
7.1	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Entwicklung von Algorithmen	74
7.2	Entwicklungsstand der Arbeit: ROI Merkmalsextraktion	75
7.3	Ermittelbare Punkte zur Bestimmung des ROIs und des Drahtes	75
7.4	Funktionsweise der ROI Ermittlung	77
7.5	Eindimensionale Umrechnung der ermittelten Höhen	78
7.6	Funktionsweise der ROI Ermittlung	79
7.7	Funktionsweise der ROI Ermittlung	79
7.8	Funktionsweise der ROI Ermittlung	80
7.9	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Schmelzbad Konturverfolgung	81
7.10	Erfolgreiche ROI Ermittlung	81
7.11	Schmelzbadmerkmalsextraktion unter verschiedenen Abtastlängen und ver- schiedenen Achternachbarschaftslängen	83
7.12	Entfernen störender gefundener Drahtbildpunkte	84
7.13	Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Schmelzbad Merkmalsextraktion	84
7.14	Berechnete Ellipse durch gesammelte Bildpunkte	85
8.1	Aktueller Stand der Entwicklung	86
8.2	Vergleich der Nahtgrößen mit unterschiedlichen Drahtvorschubgeschwin- digkeiten	87
8.3	ROI Bestimmung mit unterschiedlichen Prozessleitungen	88
8.4	Schweißnaht des ausgeführten Versuchs	89

8.5	Bestimmung des ROIs mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten	90
8.6	Darstellung der Schmelzbadgröße	91
8.7	Auswertung der Schmelzbadgröße	92
8.8	Darstellung der Schmelzbadgröße	93
8.9	Auswertung der Schmelzbadgröße	94

Tabellenverzeichnis

2.1	Prozessvarianten des MSG-Schweißens in Anlehnung an [25]	5
4.1	Zusammenfassung aus dem Kapitel Stand der Technik: Hardware	30
4.2	Zusammenfassung aus dem Kapitel Stand der Technik: Bildverarbeitung	31
5.1	Prozessgeräte und -einstellungen	34
5.2	Kameraspezifikationen der Basler Kamera [1]	37
5.3	Versuchsplan zur Ermittlung der Kameraparameter und filter	40
6.1	Vergleich der Glättungsfilter aus dem Stand der Technik	53
6.2	Vergleich der Kantendetektion aus dem Stand der Technik	58
6.3	Vergleich der Segmentierungsverfahren aus dem Stand der Technik	62
6.4	Übersicht der zu analysierenden Schwellwertverfahren	65
6.5	Vergleich der Konturverfolgung aus dem Stand der Technik	71
6.6	Vergleich der Merkmalsextraktion aus dem Stand der Technik	73
8.1	Auflistung der Unterschiede zwischen Drahtvorschubgeschwindigkeiten	87

Abkürzungen

CCD Charge Coupled Device.

CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor.

CMT Cold Metal Transfer.

EV Exposure Value.

MSG Metallschutzgasschweißen.

ROI Region of Interest.

VIS Visible.

WAAM Wire and Arc Additive Manufacturing.

1 Einleitung und Motivation

Der CO₂-Ausstoß ist, mit 9.1 Tonnen jährlich pro Einwohner in Europa, maßgeblich für den Klimawandel verantwortlich. Die additiven Fertigungsverfahren kann zur Senkung des CO₂ Ausstoßes beitragen. Die konventionellen Verfahren, wie das CNC-Fräsen, besitzen im Vergleich zur additiven Fertigung eine um bis zu achtfach größere Kohlendioxidbelastung sowie Umweltkosten als bei additiven Fertigungsverfahren [17].

Eines der genutzten Verfahren ist das Lichtbogenauftragschweißen (WAAM). Es zeichnet sich über hohe Auftragsraten und ein breites Wissen in der Verwendung aus, da es auf konventionellem Schweißen aufbaut. Dieses Verfahren wird sowohl in der Reparatur von Bauteilen als auch in der Herstellung dreidimensionaler Strukturen angewendet [15].

Bei diesem Verfahren wird ein Kurzschluss zwischen der Drahtelektrode und dem Werkstück geschlossen. Der fließende Strom erwärmt die Elektrode, bis das Material zum Schmelzpunkt gelangt und sich schließlich als Tropfen von der Elektrode ablöst. Die Elektrode wird bewegt und gleichzeitig der Draht nachgeführt, wodurch Schweißnähte entstehen. Über das Übereinanderlegen solcher Nähte werden dreidimensionale Objekte generiert. Der Lichtbogenauftragsprozess kann unter Umständen instabil werden, was dazu führt, dass im Prozess Spritzer, Temperaturänderungen oder Änderungen in der Schmelzbadgeometrie entstehen. Die Ursache für diese Instabilität könnten unter anderem ein zu nah gerichteter Prozesskopf oder Schwankungen in der Versorgungsspannung sein [15].

Durch das Zusammenspiel vieler physikalischer Größen kommt es zu Herausforderungen im Prozess der additiven Fertigung, die mittels intelligenter Sensorsysteme das Potenzial haben, weitere Kosten zu sparen [17]. Die Möglichkeit einer berührungslosen Überwachung des Schmelzbades im Prozess ist besonders wichtig, da sie einen wesentlichen Bestandteil der Qualitätssicherung darstellt. Die geometrischen und thermischen Eigenschaften des Schmelzbades, die Tropfenform oder auch die Position des Drahtes liefern Informationen über die Stabilität des Prozesses, die eine Beurteilung der Qualität und eine Prozessregelung bei Störungen ermöglichen.

Derzeit existiert kein industrielles Verfahren zur optischen Detektion der Schmelzbadstabilitäten, weshalb Gegenstand dieser Arbeit die Untersuchung von Schmelzbadgeometrien mithilfe eines Kamerasystems und die Entwicklung intelligenter Algorithmen zur Auswertung ist.

Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Detektion von Instabilitäten mithilfe der Bildfolge des Prozesses. Es wird ein Algorithmus entwickelt, der die Schmelzbadgeometrie kontinuierlich auswertet. Ziel ist es, danach anhand von Bilderfolgen Rückschlüsse auf die Stabilität zu schließen.

Folglich findet ein Überblick über die Grundlagen der Technik und der Bildverarbeitung statt, sowie im Kapitel drei der aktuelle Stand der Technik und Forschung. Im vierten Kapitel wird ein methodisches Vorgehen für die Entwicklung festgelegt. Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit dem Versuchsaufbau und der Voruntersuchung des Aufnahmesystems, auf dessen Grundlage die Analyse von Bildverarbeitungsalgorithmen stattfindet, die die Informationen aus dem Bild extrahieren sollen. Die extrahierten Informationen werden im Anschluss validiert. Letztlich werden eine Zusammenfassung und ein Ausblick im letzten Kapitel vorgestellt.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen der genutzten Technik erläutert. Zunächst wird der Lichtbogenschweißprozess nach Fertigungsverfahren eingeordnet. Im Anschluss wird auf die optische Detektion eingegangen und die damit zusammenhängenden Methoden der Bildverarbeitung vertieft.

2.1 Fertigungsverfahren und Schweißtechnik

In der Norm DIN ISO EN 8580 werden in der Fertigung sechs Hauptgruppen unterschieden. Die vierte Hauptgruppe, das „Fügen“, ist die für diese Arbeit relevante Gruppe. Fügen ist definiert als die Verbindung mehrerer Werkstücke in eine feste Form. Darunter fallen lösbare, kraftschlüssige, formschlüssige, stoffschlüssige und unlösbare Verbindungen. Im Schweißprozess entstehen unlösbare Verbindungen.

Die Abbildung 2.1 zeigt die Fülle an Fertigungsverfahren und die aktuell verwendete.

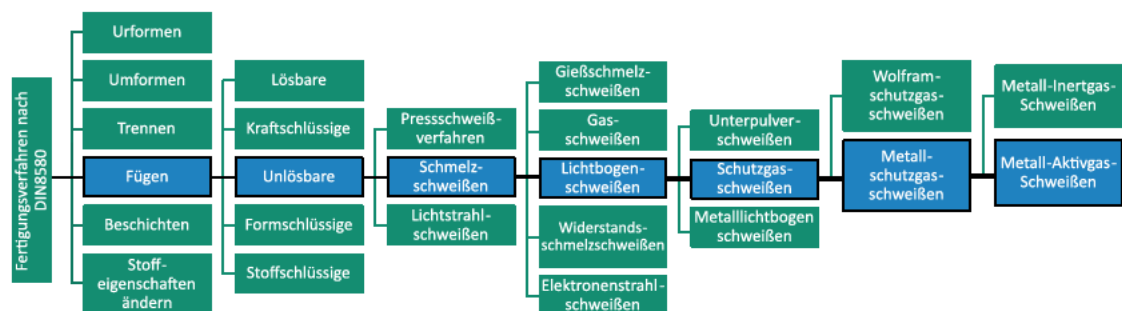


Abbildung 2.1: Übersicht der Fertigungsverfahren und des genutzten Verfahren in Anlehnung an [10]

Laut DIN ISO 857-1 beschreibt das Schweißen das Verbinden gleichartiger Werkstoffe, bei dem die Festigkeit der Verbindung auf den Kräften der Kohäsion beruht. Die Verbind-

dung von zwei Werkstoffen wird mit Zufuhr von Wärmeenergie hergestellt, die den zu verbindenden Bereich in einen schmelzflüssigen Zustand überführt. Abhängig von dem gewählten Schweißverfahren wird ein Zusatzstoff für die bessere Bindung beigefügt. Durch das darauffolgende Abkühlen der Schmelze entsteht die feste Verbindung [25] [10]. Der Lichtbogen schmilzt die Elektrode durch einen elektrischen Strom mithilfe von Temperaturen zwischen 4000°C und 18000°C . Ein Werkstück ist mit dem Pluspol des Schweißgerätes verbunden, die Elektrode mit dem Minuspol. Durch einen Kurzschluss zwischen Werkstück und Elektrode legt eine Stromstärke von bis zu 300A an, die den Lichtbogen zündet und das Material in den schmelzflüssigen Zustand führt [10].

Eine weitere Vertiefung ist das Schutzgasschweißen, hierbei wird mithilfe eines zugeführten Gases die Schweißstelle vor der umgebenden Atmosphäre geschützt. Allerdings muss bei diesem Verfahren zwischen Aktivgas und Inertgas unterschieden werden [8]. Aktive Gase wie Kohlendioxid oder Mischgase aus Kohlendioxid, Argon und Sauerstoff werden als reaktionsfreudige Gase bezeichnet, die die Fugestellen vor Oxidation und Verunreinigung schützen. Diese Gase eignen sich somit nur für unlegierte bis niedriglegierte Stähle, unterstützen jedoch aktiv die Stabilität des Lichtbogens [10] [4].

Im Gegensatz dazu ist das Inertgas reaktionsträge, kann jedoch für legierte Stähle, Aluminium, Kupfer, Nickel und viele weitere Metallen verwendet werden. Die häufig dafür verwendeten Gase sind Argon und Helium [10].

Das in dieser Arbeit verwendet Verfahren ist ein modifiziertes Metallschutzgasschweißen (MSG) und gehört zu den Lichtbogenschweißverfahren in der die geförderte Drahtelektrode im Lichtbogen abschmilzt und als Schweißzusatz auf das Werkstück tropft. Wie in Abbildung 2.2 zu sehen, umhüllt das Schutzgas den kompletten Lichtbogen und schützt somit die Schweißnaht vor Oxidation [25].

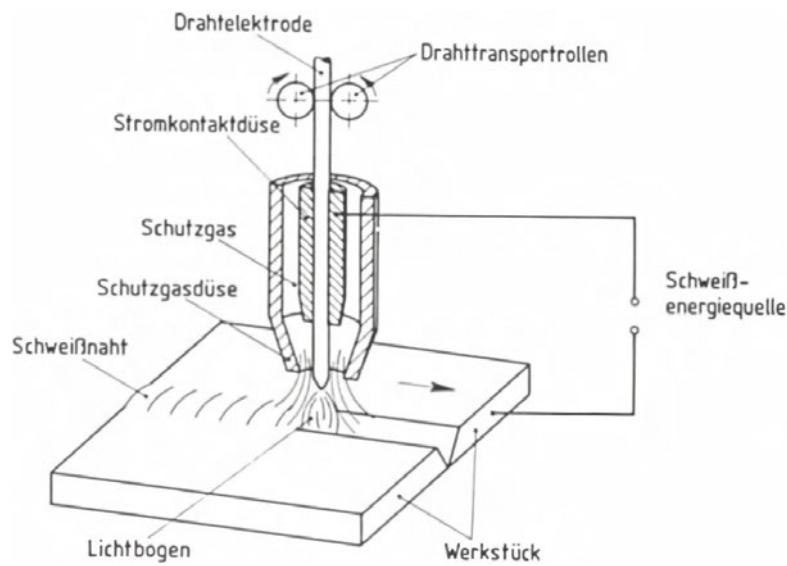


Abbildung 2.2: Aufbau eines MSG-Verfahrens [13]

Durch Verstellen von Parametern wie der Schweißspannung, des Schweißstroms, der Drahtvorschubgeschwindigkeit oder das Verändern des Schutzgases lassen sich verschiedene Prozessvarianten einstellen. Diese Parametereinstellungen erlauben die Veränderung des Lichtbogens [25]. Siehe Tabelle 2.1.

Lichtbogenart	Werkstoffübergang	Anwendung
Kurzlichtbogen	Tropfenübergang im Kurzschluss, geringe Spritzerbildung	Dünne Bleche
Übergangslichtbogen	Grobtropfiger Übergang, teilweise im Kurzschluss	Mittlere Blechdicken
Langlichtbogen	Grobtropfiger Übergang, Spritzerbildung	Größere Blechdicken
Sprühlichtbogen	Feintropfiger Übergang, ohne Kurzschlüsse	Große Blechdicken

Tabelle 2.1: Prozessvarianten des MSG-Schweißens in Anlehnung an [25]

Eine ausführliche Beschreibung der jeweiligen Prozessvarianten sind durch Schuler beschrieben [25].

In der Industrie wird stetig nach neuen Methoden gesucht, den Prozess des Schweißens spritzfeier sowie die Stabilität des Tröpfchenübergangs und des Lichtbogens zu erhöhen. Ein spezielles Verfahren basierend auf dem Kurzlichtbogenprozess ist der von Fronius entwickelte Cold Metal Transfer, auch CMT genannt.

Cold Metal Transfer

Im Vergleich zu herkömmlichen MSG Verfahren besitzt der CMT eine deutlich geringere Wärmeeinbringung auf das Werkstück. Dies lässt sich damit erklären, dass der Draht und somit auch die Elektrode nicht nur in die Richtung des Werkstücks bewegt wird, sondern auch zurückgezogen [8]. Diese Bewegung findet in einem Frequenzbereich von 50 bis 150 Hz statt und ist in die Prozessregelung mit eingebunden [11]. Die Abbildung 2.3 zeigt die oszillierende Drahtbewegung. Eine weitere Besonderheit des CMT-Prozesses ist der Kurzschlussstrom, dieser wird beim Übergang der abschmelzenden Elektrode gering gehalten, sodass der Kurzschluss nicht unkontrolliert abbricht, sondern gezielt durch zurückziehen des Drahtes herbeigeführt wird [25]. Der beschriebene Vorgang wird in Abbildung 2.3 dargestellt.

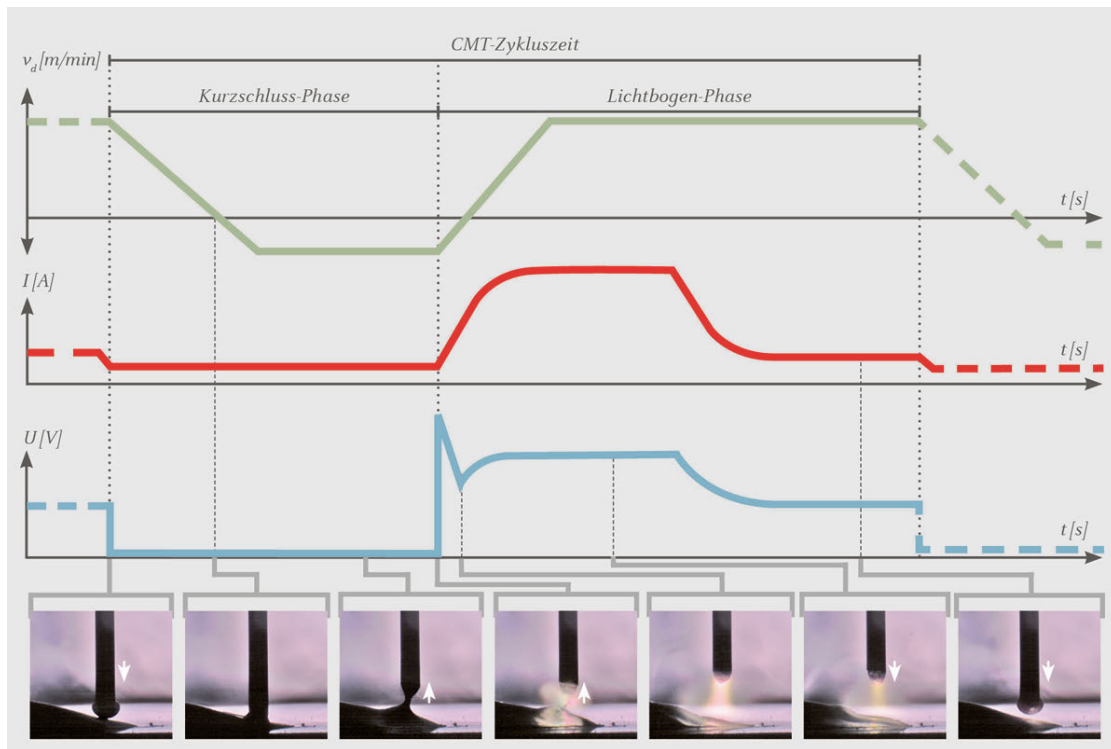


Abbildung 2.3: CMT Prozess mit Drahtbewegung [11]

Folglich ist der CMT ein sehr spritzarmes Verfahren, jedoch nicht spritzfrei. Andere typische Fehler sind Bindefehler, welche durch eine unvollständige und unzureichende Verschweißung deutlich werden. Üblicherweise wird ein Bindefehler durch eine falsch eingestellte Lichtbogenleistung oder durch eine Fehlplatzierung des Schweißkopfes erzeugt, aber auch ein zu weit entfernter Draht kann zu Bindefehlern führen. Ein weiterer Prozessfehler, der durch eine zu hohe Lichtbogenleistung entsteht, ist das Bilden eines zu großen Schmelzbades und das daraus resultierende größere Abschmelzen der Drahtelektrode. Dieses Phänomen kann unter anderem in gesetzlichen Gegebenheiten entstehen, in der die Lichtbogenleistung zu gering ist. Diese Veränderung des Schmelzbades macht sich somit im Prozess durch ein zu starkes oder zu schwaches Abschmelzen der Elektrode bemerkbar [13].

Lichtbogenauftragschweißen

Mithilfe des vorgestellten MSG/CMT-Verfahrens und einem Roboter lassen sich dreidimensionale Bauteile erstellen. Dieses Verfahren nennt sich Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) und erstellt metallische Bauteile in dem Draht mithilfe des Lichtbogens aufgeschmolzen und schichtweise aufgetragen wird. Dieses Verfahren bietet eine hohe Aufbaugeschwindigkeit, in der mehrere Kilogramm Draht pro Stunde verarbeitet werden kann, jedoch sind nach Lachmayer [15] die Fertigungstoleranzen größer als mehrere zehntel Millimeter. Andere Verfahren wie das Pulverbettverfahren oder das Laser-Metal-Deposition bieten höhere Auflösungen als das WAAM, allerdings zeigen sie deutliche Nachteile auf, wie den Laserschutz, die hohen Investitionskosten aber auch die hohen Werkstoffkosten, die zu einem höheren Ausstoß von CO_2 führen, als mit herkömmlichem Schweißdraht.

Das WAAM-Verfahren verspricht somit eine höhere Aufbaugeschwindigkeit. Die Werkstoffkosten sind durch das weit verbreitende Lichtbogenschweißen gering, wofür es eine Vielzahl an verschiedenen Drähten gibt. Zusätzlich eignet sich dieses Verfahren, beschädigte Werkstücke zu reparieren und bietet damit eine sehr ökonomische Arbeitsweise [15].

2.2 Sensorik in Lichtbogenschweißen

Der immer größer werdende Automatisierungsgrad des Lichtbogenschweißens erfordert immer mehr Sensorik für den Prozess zur Überwachung. Die Möglichkeiten der Sensorfassung in Lichtbogenprozessen ist vielfältig und abhängig von der zur bestimmenden physikalischen Größe.

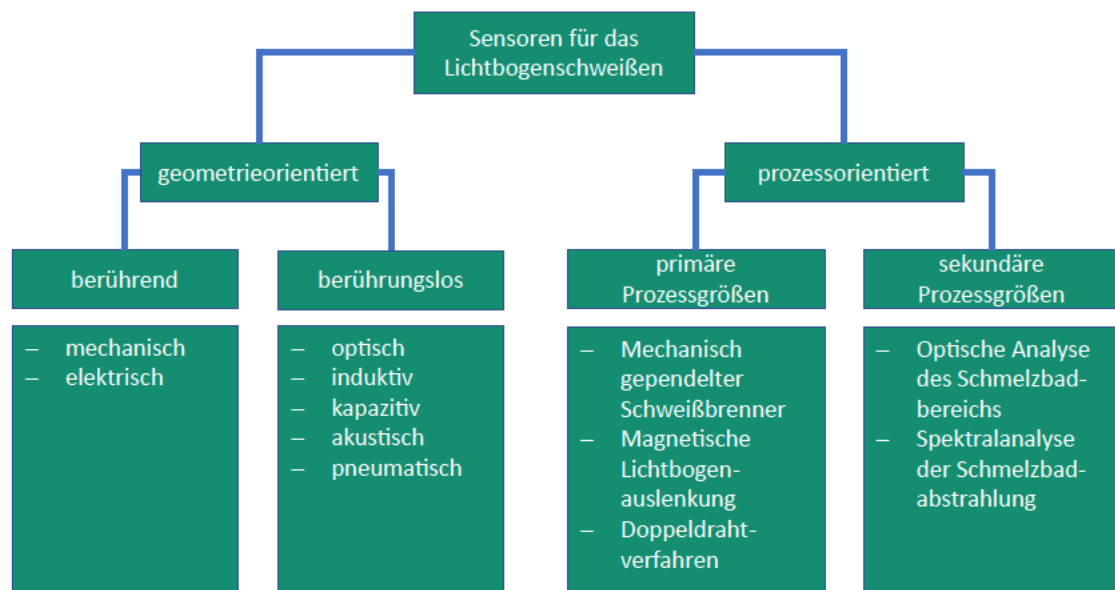


Abbildung 2.4: Sensorik beim Lichtbogenschweißen in Anlehnung an [8]

Nach Abbildung 2.4 sind die Sensoren in zwei Kategorien unterteilt. Die geometrieorientierten Sensoren messen die Geometrie der Fuge oder Kanten und Fläche des zu verarbeitenden Werkstücks, werden aber ebenfalls zur Bestimmung der Nahtanfangsfindung und zur Nahtverfolgung verwendet [20] [8]. Zu der Gruppe der geometrieorientierten berührenden Sensoren gehören unter anderem die taktilen sowie die optischen Sensoren nach Dilthey [8]. Mit den taktilen Sensoren ist es möglich, die Verschiebungen des Werkstückes wahrzunehmen und eine Korrektur des Prozesskopfes vorzunehmen, während optische Sensoren das Triangulationsprinzip zur Berechnung der Abstandsänderung nutzen.

Im Kontrast hierzu bestimmen die prozessorientierten Sensoren die Prozessgrößen anhand der Position des Schweißkopfs und folglich nicht mittels der Werkstückgeometrie [20]. Die lichtbogenbasierten Sensoren gehören zu den primären Prozessgrößen und diese messen die Veränderung des Schweißstromes in Abhängigkeit zum Abstand des Werkstückes [8]. Zur sekundären Prozessgröße der Schmelzbadabstrahlung gehören die optische Analyse des Schmelzbadbereiches und die Spektralanalyse [8].

Durch die breite Strahlung des Lichtbogens, siehe folgende Abbildung 2.5, ist es nicht möglich, mit einer Visible (VIS) Kamera eine Schmelzbadaufnahme durchzuführen. Eine VIS-Kamera ist eine Kamera, die sichtbares Licht aufnehmen kann. Die Lichtemission verhindert die Aufnahme. Eine Möglichkeit, dem entgegenzuwirken, wurde von Halish et al. eine Spektroskopie des Lichtbogens in Abhängigkeit der Wellenlänge und des Schutz-

gases ermittelt. Die Lichtbogenemission in intensity counts kann aus der Abbildung 2.5 entnommen werden.

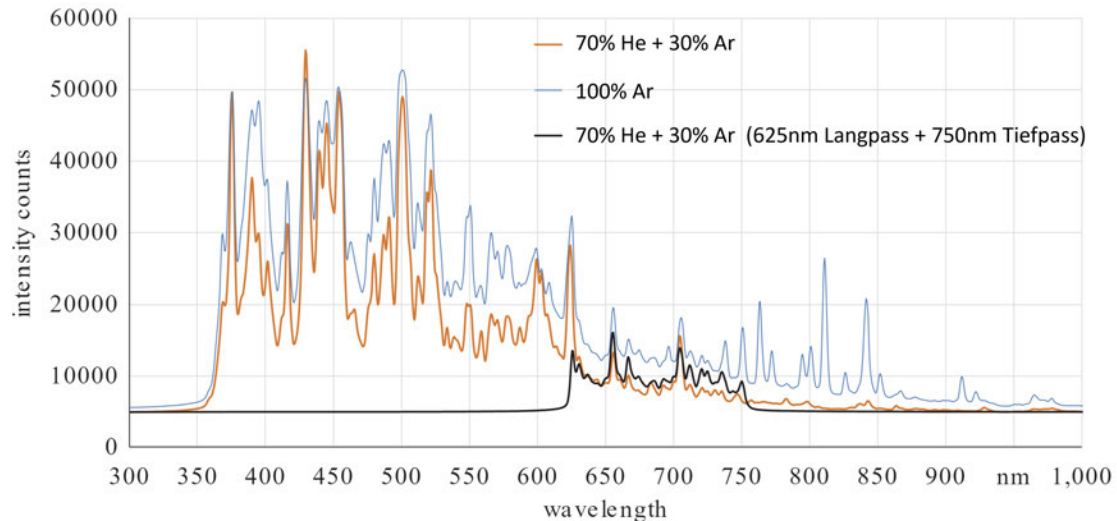


Abbildung 2.5: Spektroskopie Messung mit verschiedenen Prozessgasen in Anlehnung an [12]

Halisch et al. beschreibt, dass die meisten Schweißfehler mit der thermischen Vorgeschichte zusammenhängen. Aus diesem Grund wurde der Versuch unternommen, mithilfe einer Highspeed Kamera und einem Beleuchtungslaser die Veränderungen im Schmelzbad zu detektieren. Als Prozess wurde das CMT-Verfahren verwendet. Mit Hilfe der Spektroskopieanalyse in Abbildung 2.5 wird die Verwendung von Bandpassfiltern für eine mögliche Reduzierung der Lichtbogenemission mit dem Ziel untersucht, das Schmelzbad weiterhin sichtbar zu erhalten.

Da die Lichtbogenemission abhängig vom Gasgemisch ist, wurde mit einem Helium-Argon Gemisch sowie mit reinem Argon gemessen. Die Emissionen sind bei beiden Versuchen ähnlich, die durch das Argon erzeugten Emissionen sind bei genauerer Betrachtung allerdings höher als die Emissionen des Gasgemischs. Besonders stark fällt der Wellenlängenbereich zwischen 350 und 625 nm auf, in dem eine hohe Emission oberhalb von 15.000 IC gemessen wird.

So wählt diese Bachelorarbeit denselben Ansatz zur Untersuchung der Schmelzbadgeometrie.

2.3 Sichtprüfung

Nach aktuellem Stand der Technik ist eine Sichtprüfung aus dem industriellen Fertigungsprozess nicht mehr wegzudenken, denn sie ist wichtiger Bestandteil für die Gewährleistung bestimmter Qualitätsmerkmale von Zwischen- und Endprodukten oder aber auch, um Veränderungen des Produktionsprozesses festzustellen und zu analysieren. Unter dem Begriff Sichtprüfung wird eine visuelle Überprüfung hinsichtlich bestimmter Parameter mit dem Ziel, Qualitätsmerkmale zu erhalten und vor allem Veränderungen im Fertigungsprozess identifizieren zu können, verstanden. Abbildung 2.6 zeigt den typischen Verlauf einer Sichtprüfaufgabe [2].



Abbildung 2.6: Abfolge einer automatischen Sichtprüfung in Anlehnung an [2]

Sichtprüfungen werden mittels aufgenommenen Bildmaterials vollzogen. Dabei müssen die Bilder vor allem den aufgestellten Zielvorgaben entsprechen, indem sie die relevanten Aspekte darstellen. Bildinformationen, die hier fehlen, lassen sich nur schwer oder gar nicht wiederherstellen.

Im nächsten Schritt werden die gesammelten Rohdaten mit dem Ziel einer Verbesserung hin verfeinert. Dies ist eine wichtige Maßnahme, da die Rohdaten störende oder irrelevante Daten wie Rauschen enthalten [2].

Die verbesserten Bilddateien können im nächsten Schritt weiter in Teile reduziert werden (Segmentierung), aus denen sich bestimmte Merkmale gewinnen lassen, wie zum Beispiel Fläche, Umfang, Position oder Orientierung des Segments. Die Ergebnisse der Segmentierung werden dann mit den Vorgaben der Klassifizierungen verglichen und auf mögliche

Abweichungen geprüft.

Durch die Setzung eines Region of Interest (ROI), d.h. einer Begrenzung auf einen bestimmten Bildausschnitt, wird das Bildmaterial noch weiter eingegrenzt, sodass zur Sichtprüfung schlussendlich nicht mehr die gesamte Bilddatei, sondern nur noch der relevante Ausschnitt betrachtet werden muss. Dies macht das Verfahren der Sichtprüfung noch effektiver und effizienter [7].

2.4 Bildaufnahme und Digitalisierung

Der Einsatz der Bildaufnahme ist breit gefächert und abhängig vom Aufgabenbereich. So unterscheiden sich die Bildaufnahmesysteme im Aufnahmeverfahren, in der Aufnahmegeschwindigkeit, in der Auflösung, in der Sensorik, in der spektralen Empfindlichkeit und im Dynamikbereich [9].

Eine zentrale Rolle in der Auswahl des Sensors spielt dabei die spektrale Empfindlichkeit. So können Sensoren Wellenlängen in dem Spektrum von Radiowellen bis hin zu Gammastrahlung aufnehmen, jedoch sind die Sensoren auf nur eine bestimmte Strahlungsart ausgelegt [9].

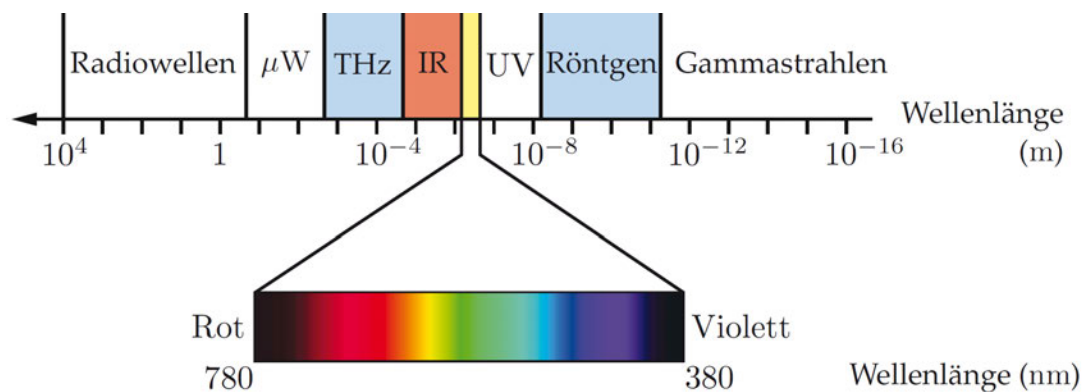


Abbildung 2.7: Wellenlängenbereiche [2]

Kameratechnik

In der automatischen Sichtprüfung wird oft zwischen Charge Coupled Device (CCD) Sensoren und Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) Sensoren unterschieden. Beide Sensorarten benutzen dasselbe Prinzip zur Detektion der Photonen mittels photosensitiver Elemente, jedoch unterscheiden sie sich in ihren Ausleseverfahren. Während in CCD-Sensoren separate Steuerbausteine erforderlich sind, sind CMOS-Sensoren in der Lage jeden einzelnen Pixel auszulesen [2]. Ein gravierender Nachteil der CCD-Sensoren ist der auftretende Effekt namens Blooming. Blooming beschreibt den Effekt durch eine Überbelichtung auftretende Beeinflussung der benachbarten Pixel. So wird beispielsweise die Aufnahme einer hellen Lichtquelle mit dunklem Hintergrund die Bildinformationen verfälschen [9]. Die Vorteile der CMOS-Sensoren sind ein geringerer Energieverbrauch, die Adressierbarkeit der Pixel, das geringe Blooming und die niedrigeren Herstellungskosten [2] [7]. Um mit der Kameratechnik aussagekräftige Bilder aufnehmen zu können, müssen bestimmte Emissionsbereiche des Lichtes gefiltert werden, welches mit optischen Filtern möglich ist.

Optische Filter

Mit dem Einsetzen von optischen Filtern ist es möglich, bestimmte Wellenlängenbereiche zu selektieren oder zu absorbieren.

Die Absorptionsfilter (ND) absorbieren mithilfe von Farbstoffen bestimmte Wellenlängenbereiche. Mit steigender Dicke des Filters steigt die Absorption exponentiell.

Interferenzfilter selektieren mithilfe von vielen dünnen reflektierenden Schichten die Wellenlängenbereiche. Diese Schichten werden in einem definierten Abstand angeordnet und durch die entstehende Mehrfachreflexion werden bestimmte Wellenlängenbereiche absorbiert, während andere durchgelassen werden. Je nach Dicke und Materialeigenschaften der Schichten lassen sich beispielsweise Bandpass (BP), Langpass (LP) oder Tiefpass (TP) erstellen [2].

Digitalisierung von Grautonbildern

Nachdem die selektierten Wellenlängen durch die optischen Filter gelangen, müssen die von der Kamera gesammelten Photonen mittels Analog/Digital-Wandler in ein für den Computer kompatibles Format digitalisiert werden. Dabei wird das reale Bild einer Rasterung und Quantisierung vollzogen und in eine Bildmatrix gewandelt.

Die Bildmatrix hat C Bildzeilen (cols) und R Bildspalten (rows). Innerhalb dieser Matrix werden diese Elemente auch als Bildpunkte (Pixel) bezeichnet. Die Zählung der Zeilen und Spalten fängt immer oben links an und beginnt mit der Null. Die Variablen x und y bestimmen die Position des Ausgewählten Bildpunktes, siehe Abbildung 2.8. Außerdem besitzen Bildpunkte eine Grauwertmenge, die in Regel $[0\ 255]$ Werte umfasst [18].

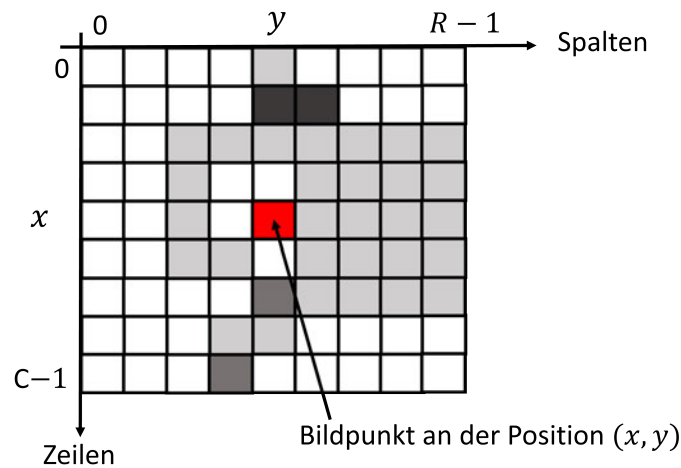


Abbildung 2.8: Bildmatrix in Anlehnung an [18]

So lässt sich ein digitalisiertes Bild wie folgt beschreiben:

$$G = 0, 1, \dots, 255 \quad \text{Grauwertmenge} \quad (2.1a)$$

$$S = (s(x, y)) \quad \text{Bildmatrix des Grauwertes} \quad (2.1b)$$

$$x = 0, 1, \dots, C - 1 \quad \text{C Bildzeilen} \quad (2.1c)$$

$$y = 0, 1, \dots, R - 1 \quad \text{R Bildspalten} \quad (2.1d)$$

$$p = (x, y) \quad \text{Ortskoordinaten des Bildpunktes} \quad (2.1e)$$

$$s(x, y) = g \in G \quad \text{Grauwert des Bildpunktes} \quad (2.1f)$$

entnommen aus [18].

2.5 Bildverarbeitung

2.5.1 Bildvorverarbeitung

Bildvorverarbeitungsalgorithmen sind oft der erste Schritt nach der Bildaufnahme [7]. Die Hauptziele der Vorverarbeitung sind die Gewinnung visuell aussagekräftigerer Bilder sowie eine Vereinfachung der nachfolgenden Signalverarbeitung. Damit soll die automatische Bildauswertung vereinfacht werden [2]. Besonders Fehler wie das Rauschen durch die Atmosphäre oder Elektronik und Unschärfe durch Bewegung sollen damit eliminiert werden. Mithilfe spezieller Verfahren, wie unter anderem durch einer Veränderung der Helligkeit, des Kontrasts oder mit digitalen Filtern, lassen sich diese Fehler korrigieren [18].

In der Bildvorverarbeitung wird oft zwischen der Punktoperation und der lokalen Operation unterschieden. Die Punktoperation verwendet ein Bildpunkt des Eingangsbildes zur Berechnung einer Operation und ändert abhängig von der Vorverarbeitungsfunktion an der selben stelle den Bildwert. Es existieren keine Abhängigkeiten zu den Bildpunkten, jeder Punkt wird einzeln berechnet. Beispiele für solche Operationen sind Grauertransformationen, Bildarithmetik oder Binarisierung.

Im Gegensatz dazu beziehen die lokalen Operationen eine Punktnachbarschaft mit ein, welches eine Gruppe von Pixeln in der Bildmatrix berücksichtigt [7].

Eine Achternachbarschaft lässt sich wie folgt definieren:

$$N = \begin{bmatrix} p_{x-1,y-1} & p_{x,y-1} & p_{x+1,y-1} \\ p_{x-1,y} & p_{x,y} & p_{x+1,y} \\ p_{x-1,y+1} & p_{x,y+1} & p_{x+1,y+1} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Der ausgewählte Pixel ist $p_{x,y}$ und um ihm herum seine berücksichtigte Nachbarschaft. Jedoch gibt es auch andere Arten der Nachbarschaften, wie die Vierernachbarschaft, in der orthogonale Nachbarn als Bildpunkte betrachtet werden, oder Nachbarschaften, die größer als acht Bildpunkte sind.

Mit der Berücksichtigung der Nachbarschaft werden die lokalen Operationen ebenfalls punktweise über das Bild verschoben und Pixel für Pixel berechnet. Die Abbildung 2.9 zeigt eine Art der lokalen Operation anhand von linearen Filtern. Weitere Arten von lokalen Operationen sind beispielsweise die morphologischen Operationen wie der Medianfilter [7].

2.5.2 Lineare Filter

Die Anwendung von linearen Filtern ist nach Demant ein häufig genutztes Vorgehen in der Bildvorverarbeitung und lässt sich mit folgender Formel beschreiben [7]:

$$p(x, y) = \frac{1}{t} \sum_{r=x-k}^{x+k} \sum_{c=y-k}^{y+k} f_{rc} \cdot p(r, c) \quad (2.3)$$

mit f_{cr} bei einer Kernelgröße von $k = 1$

$$f_{cr} = \begin{bmatrix} f_{c-1,r-1} & f_{c,r-1} & f_{c+1,r-1} \\ f_{c-1,r} & f_{c,r} & f_{c+1,r} \\ f_{c-1,r+1} & f_{c,r+1} & f_{c+1,r+1} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$p(x, y)$ ist der ausgewählte Pixel, t beschreibt meist die Summe der Filterkoeffizienten f_{cr} , während k die Kernelgröße ist. Bei einem 3×3 Kernel entspricht die Kernelgröße eins, im Vergleich ein 5×5 Kernel von zwei. Die Filterkernel besitzen in der Regel immer ungerade Kantenlängen damit der ausgewählte Bildpunkt in der Mitte ist. Die Parameter r und c stehen für row (Reihe) und column (Spalte) des Filteroperators. So wird nun innerhalb der beiden Summen die definierte Nachbarschaft des Bildes mit dem dazugehörigen Filterkoeffizienten multipliziert und addiert. Je nach Filterkern kann mithilfe des Faktors t das Ergebnis skaliert werden. Das Ergebnis lässt sich durch dieses Vorgehen berechnen und wird als Pixel in ein neues Bild geschrieben [7]. Die Abbildung 2.9 veranschaulicht dieses Vorgehen.

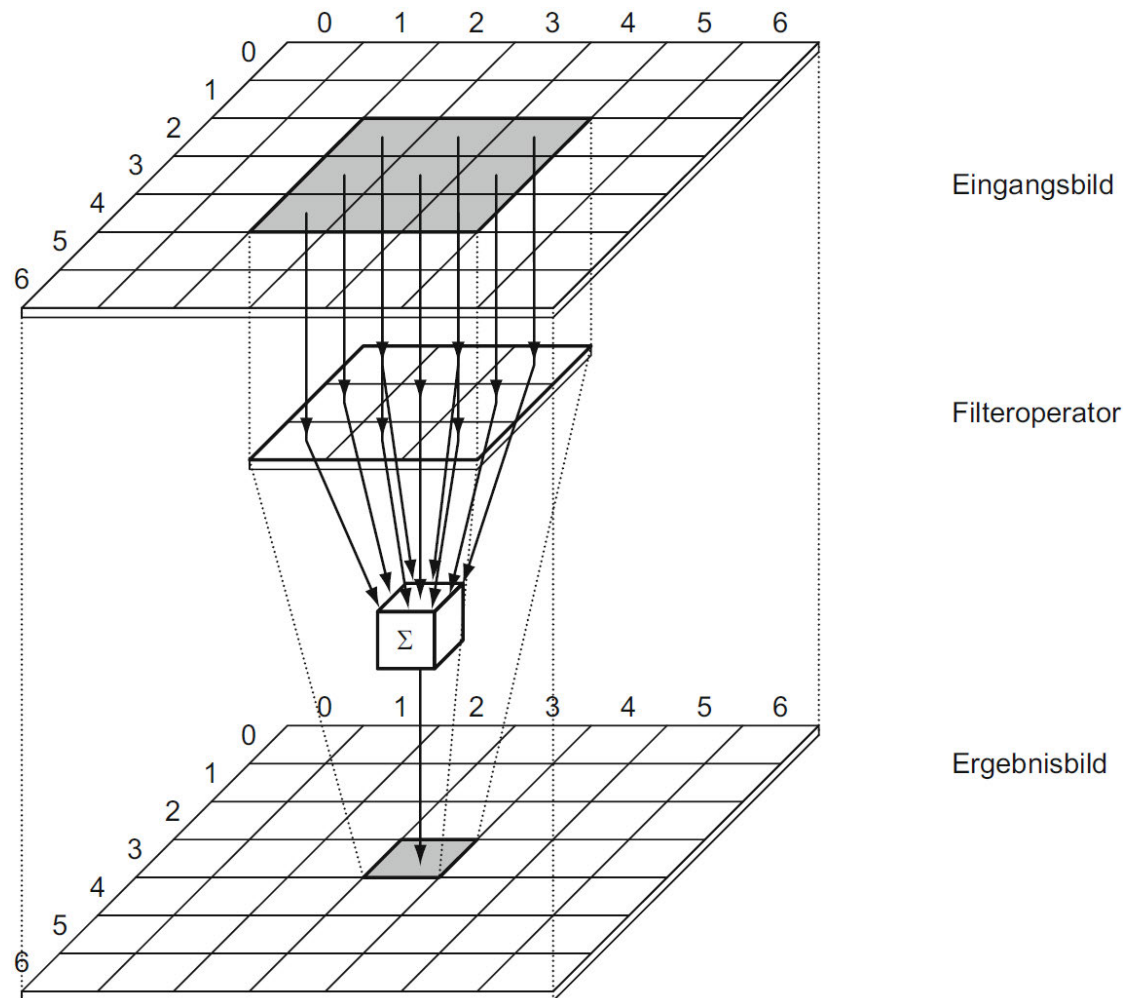


Abbildung 2.9: Funktionsweise einer linearen Filteroperation [7]

Zwei beliebige Einsatzgebiete der linearen Filter sind das entrauschen von Bildern und das Hervorheben von Kanten.

2.5.3 Rauschunterdrückung

Glättungsfilter und Tiefpassfilter glätten die Bilder und entfernen hochfrequentes Rauschen, welches sich als Grauwertspitze im Bild abzeichnet [9]. Die meisten Glättungsfilter nutzen die Methode der Mittelwertbildung, um störende Bildpunkte zu reduzieren [7].

Der **Rechteckfilter**, auch Mittelwertfilter genannt, nutzt die aus der Statistik bekannte Mittelwertbildung zur Reduzierung des Rauschanteils. In Gleichung 2.5 exemplarisch anhand eines 3×3 Kernels [7].

$$f_1 = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Der **Gaußfilter** ist eine diskrete Approximation der zweidimensionalen Gauß'schen Glockenkurve [7]. Durch die charakteristische Form der Glockenkurve haben benachbarte Bildpunkte einen stärkeren Einfluss auf die Mittelung als Punkte, die weiter entfernt sind [2]. Die Gleichung 2.6 zeigt einen 3×3 sowie einen 5×5 Kernel.

$$f_2 = \frac{1}{28} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & 12 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{pmatrix}, \quad f_3 = \frac{1}{121} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 7 & 11 & 7 & 2 \\ 3 & 11 & 17 & 11 & 3 \\ 2 & 7 & 11 & 7 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

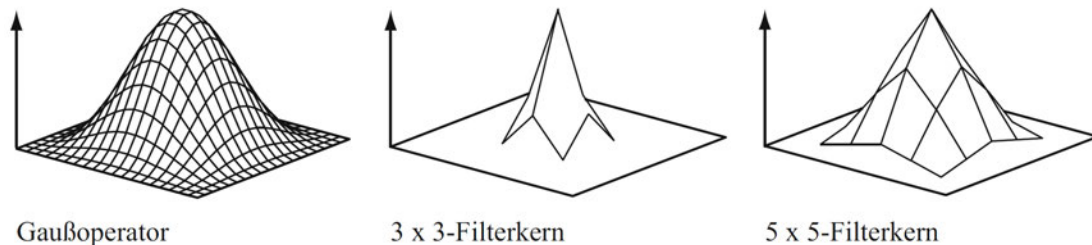


Abbildung 2.10: Verbildlichung der diskreten Approximation der Gauß'schen Glockenkurve [7]

Der **Medianfilter** gehört zu den Rangordnungsfiltern und lässt sich nicht mittels Linearer Filter berechnen. Dieser Filter sortiert alle Elemente nach der Größe des Grauwertes. Ein Medianfilter mit einer Größe von 3×3 sortiert insgesamt 9 Grauwerte. Die vierte Stelle ist der Median, hierbei wird von einem Rangordnungsfilter des vierten Ranges gesprochen. In einem 5×5 Filter ist der Rang an zwölfter Stelle [9].

Wenn g die sortierte Graumenge ist,

$$g_1 \leq g_2 \leq \dots \leq g_n \quad (2.7)$$

dann definiert sich der Median als,

$$g = \begin{cases} g_{\frac{n+1}{2}} & , \text{ für ungerades } n \\ \frac{1}{2}(g_{\frac{n}{2}} + g_{\frac{n}{2}+1}) & , \text{ für gerades } n \end{cases} \quad (2.8)$$

entnommen aus [7].

Die Abbildung 2.11 erklärt die unterschiedliche Funktionsweise der drei vorgestellten Filter mithilfe eines 3×3 Kernels.

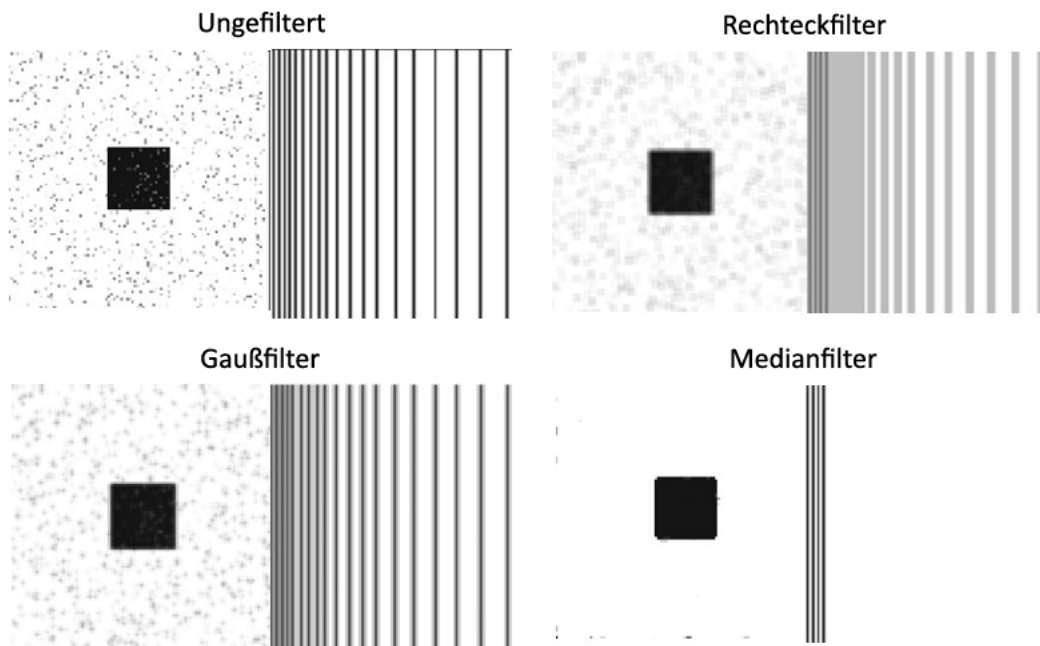


Abbildung 2.11: Funktionsweise unterschiedlicher Rauschunterdrückungsfiler in Anlehnung an [7]

Alle drei Filter haben besondere Merkmale. Der Rechteckfilter ist in der Lage, störbehaftete Bildpunkte mit dem Hintergrund zu verschmelzen, jedoch erhöht sich die Kantenschärfe deutlich. So können Kanten miteinander verschmelzen oder aufgeheilt werden.

Der Gaußfilter besitzt dank der stärkeren Gewichtung im Kernelmittelpunkt eine höhere Kantenerhaltung, sodass es nicht zur völligen Verschmelzung kommt. Ähnlich hierzu ist der Medianfilter ein kantenerhaltender Filter, der Stärken in der Eliminierung von punktförmigen Ausreißern besitzt [7].

2.5.4 Kantendetektion

Während Glättungsfilter Veränderungen im Bild unterdrücken, so ist die Aufgabe der Kantendetektion, diese Veränderung von Grauwerten im Bild zu verstärken [7]. Die Kantendetektion kann beispielsweise ein Objekt von seinem Hintergrund trennen und Aufschluss über die Geometrie und Form eines Objektes geben [5].

Zur Detektion von Kanten wird mittels Ableitungsoperatoren nach Veränderungen der Grauwerte gesucht. So hat die erste Ableitung des in Abbildung 2.12 gezeigten Kante zwei Extremwerte, die je nach Steigung positiv oder negativ ist [14].

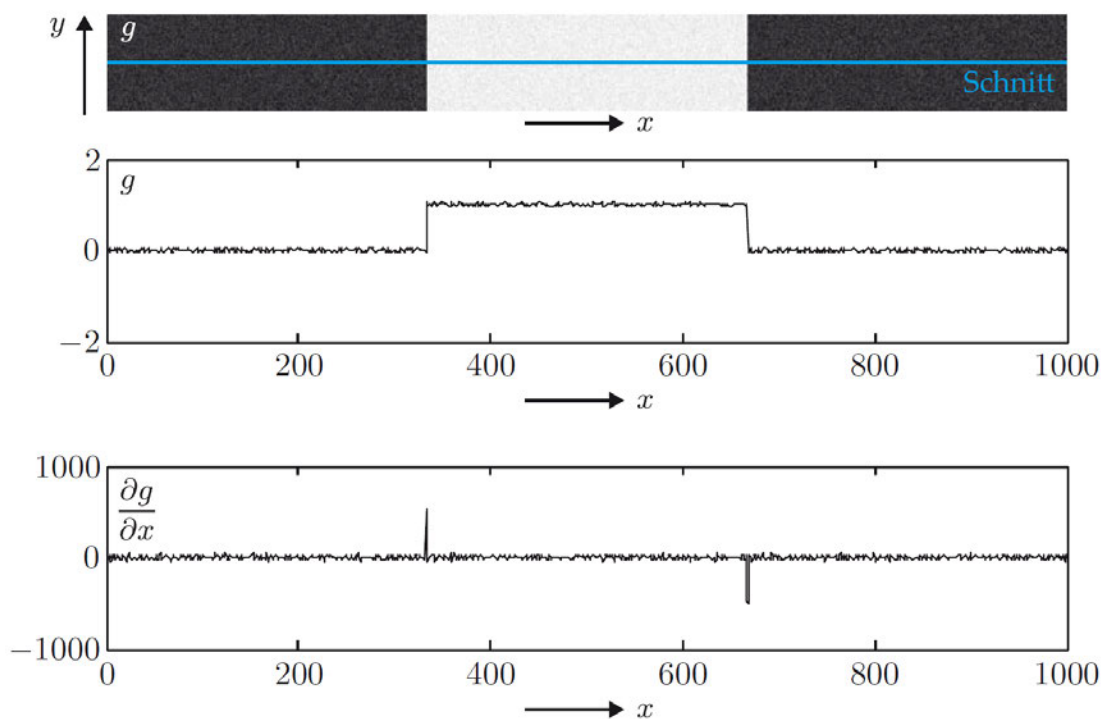


Abbildung 2.12: Eindimensionale Grauwertkante und die dazugehörige erste Ableitung [2]

Diese Art der Kantendetektion in einer Bildmatrix nennt sich Gradientenfilter und beruht auf der Diskretisierung der ersten Ableitung in x - und y -Richtung. Mittels Differenzenquotient und normieren des Abstands von zwei Pixeln auf 1, definiert sich folgender Filter zur Extraktion von Kanten:

$$D^x = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ und } D^y = (D^x)^T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

entnommen aus [5].

Das Anwenden der Ableitungsrichtungen ist jedoch anfällig gegenüber Störungen, weshalb senkrecht zur Ableitungsrichtung eine Mittellug genutzt wird [18].

Der **Prewitt-Operator** ist eine Kombination der Ableitungsrichtung und des Rechteckfilters. Die Filterkerne haben die Form:

$$f_{\text{prewittX}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10a)$$

$$f_{\text{prewittY}} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10b)$$

in Anlehnung an [9] mit $t = \frac{1}{3}$ und soll somit die Rauschanfälligkeit verringern.

Der **Sobel-Operator** berechnet sich durch Mittelung eines Gaußfilter über 3 Pixel. Die Filterkerne haben die Form:

$$f_{\text{sobelX}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11a)$$

$$f_{\text{sobelY}} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11b)$$

in Anlehnung an [9] mit $t = \frac{1}{4}$.

Der **Scharr-Operator** soll durch einen Optimierten Glättungsfilter eine deutlich bessere Rotationsinvarianz vorweisen können [24]. Die Filterkerne haben die Form:

$$f_{\text{scharrX}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (2.12a)$$

$$f_{\text{scharrY}} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 \end{bmatrix} \quad (2.12b)$$

in Anlehnung an [24] mit $t = \frac{1}{32}$.

Die Berechnung mit den Operatoren führt durch die Filterelemente zu positiven und negativen Grauwerten. Diese müssen durch eine Punktoperation auf die gegebene Grauwertmenge normiert werden [9].

Durch die getrennte Berechnung in x - und y -Richtung, ist es notwendig, den Betrag aus den beiden erzeugten Grauwertbilder zu berechnen, um eine Schätzung der tatsächlichen Kantenrichtung zu erhalten.

$$\sqrt{s_x(x, y)^2 + s_y(x, y)^2} \quad (2.13)$$

entnommen aus [18].

Die Abbildung 2.13 veranschaulicht das Vorgehen der Kantendetektion in x -Richtung und y -Richtung sowie den erzeugten Betrag beider Bilder.

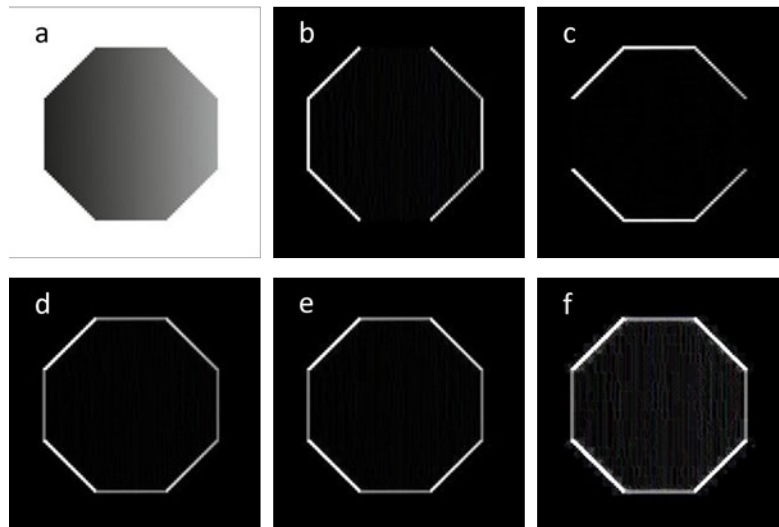


Abbildung 2.13: Vergleich der Kantendetektionsfilter, (a) ungefiltert, (b) Prewitt in x-Achsen-Richtung, (c) Prewitt in y-Achsen-Richtung, (d) Prewitt Betrag, (e) Sobel Betrag, (f) Scharr Betrag, in Anlehnung an [7]

2.5.5 Segmentierung

Nach der erfolgreichen Vorverarbeitung des Bildes folgt die Segmentierung. Das Ziel hierbei ist es, das identifizierbare Objekt vom Hintergrund zu trennen und hervorzuheben. Eine bekannte Art der Segmentierung ist mithilfe eines Binärbildes die Pixel zu trennen. In diesem Schritt wird für jeden Bildpunkt entschieden, ob dieser zum Objekt gehört. Dazugehörige Bildpunkte erhalten somit den Wert eins, während der Hintergrund den Wert null erhält [14].

Eine Methode zur Identifizierung der Grenze zwischen Bildpunkt und Hintergrund ist mit einem Schwellwert oder auch engl. Threshold genannt. Mithilfe dieses Schwellwertes T ist es möglich, das Grauwertbild $s(x, y)$ in ein Binärbild $b(x, y)$ zu überführen [27].

$$b(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{falls } s(x, y) \geq T \\ 0, & \text{falls } s(x, y) < T \end{cases} \quad (2.14)$$

Zur automatischen Bestimmung des Schwellwertes werden oft die Informationen des Histogramms verwendet, da diese eine einfache Methode zur Auswertung statischer Daten ist. Demnach beschreibt das Histogramm die Verteilung der Grauwerte eines Bildes unabhängig der Lage der Bildpunkte [32]. Wie anhand der Abbildung 2.14 zu erkennen ist,

handelt es sich um ein bimodales Histogramm, welches zwei lokale Maxima und ein lokales Minimum aufweist. Schwellwertalgorithmen analysieren Histogramme mithilfe statischer Methoden und berechnen so einen Schwellwert T .

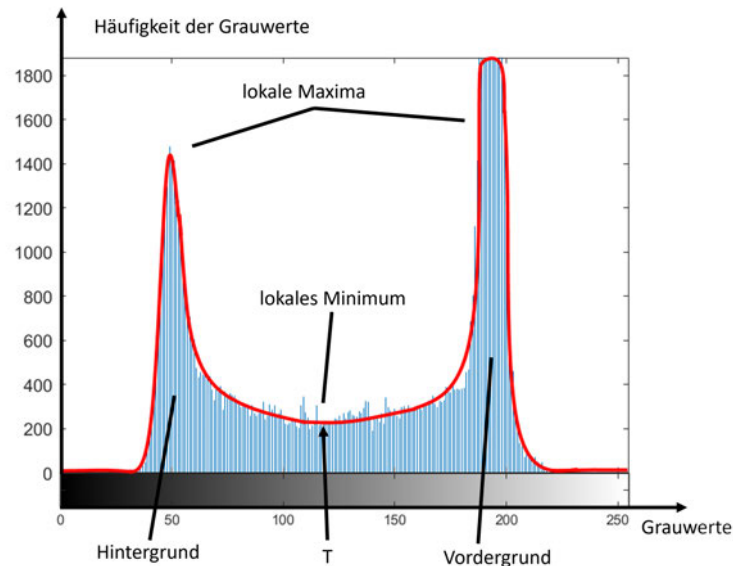


Abbildung 2.14: Funktionsweise einer typischen Histogrammanalyse in Anlehnung an [26]

Konturverfolgung

Der nächste Schritt der Segmentierung ist die weitere Extraktion der Segmente aus dem Bild. Das aktuelle Binärbild lässt sich mithilfe einer Konturverfolgung in ein anderes, schneller zu verarbeitendes Format übertragen.

Eine Methode zur Extraktion geschlossener Konturen ist mittels der Achternachbarschaft, welche sich in drei Schritte unterteilen lässt. Der erste Schritt ist das Finden eines Objektpunktes, hierbei wird vom Ursprung nach Bildreihe für Bildreihe nach dem ersten Objektpunkte gesucht.

In dem zweiten Schritt wird in der Nachbarschaft nach einem weiteren Objektpunkt gesucht. Die Suchreihenfolge in der Achternachbarschaft ist abhängig vom zuletzt gefundenen Objektpunkt und startet die Suche aus ihrem letzten bekannten Randpunkt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die letzte Bedingung erfüllt ist.

Im letzten Schritt ist die Konturverfolgung beendet, wenn der Anfangspunkt dem Ausgangspunkt entspricht [7]. Die Abbildung 2.15 veranschaulicht dieses Vorgehen.

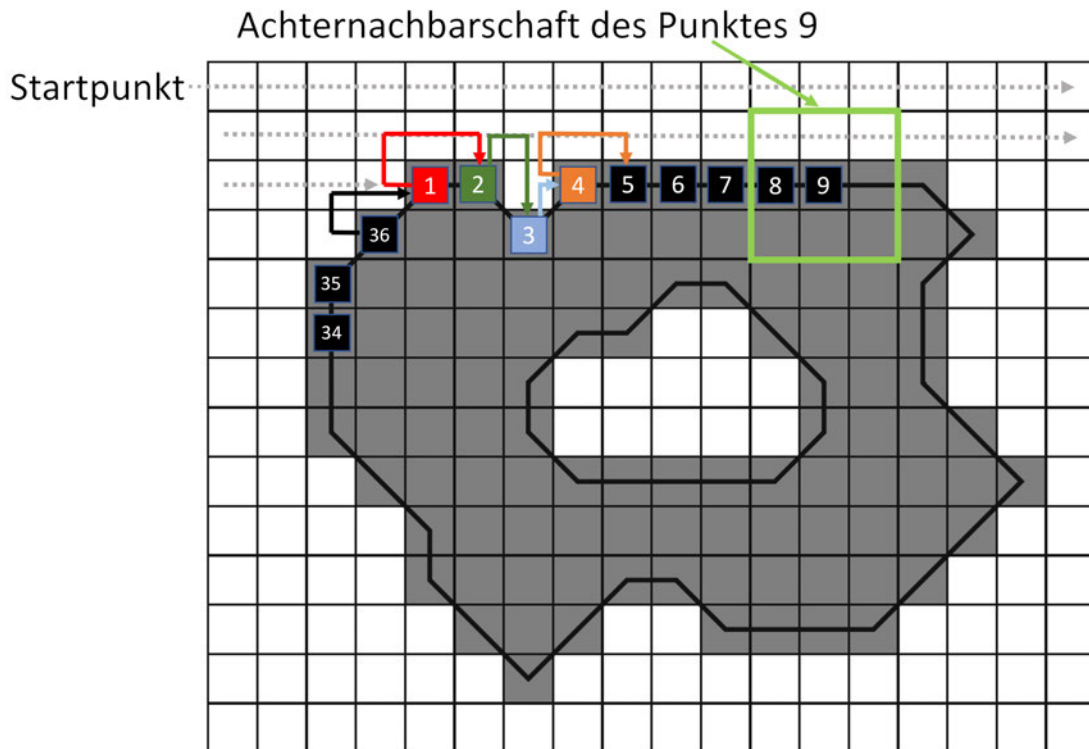


Abbildung 2.15: Funktionsweise einer Konturverfolgung mittels Achternachbarschaft in Anlehnung an [27]

Eine andere Methode zur Konturverfolgung, in der keine geschlossene Kontur erforderlich ist, ist mittels zufällig erzeugter Bildpunkte. Trifft der zufällig ausgewählte Punkt auf einen Objektpunkt, so wird der Objektpunkt markiert und gespeichert. Die Menge an zufällig gesetzten Punkten wird vom Anwender gesetzt. Die gefundene Punktmenge kann beispielsweise mittels der konvexen Hüllen die Konturen abbilden. Abbildung 2.16 veranschaulicht dieses Vorgehen [27].

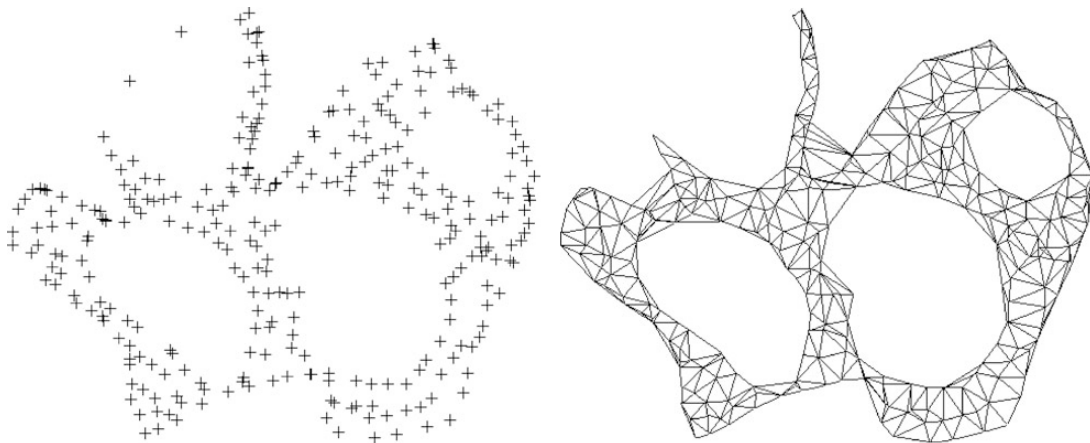


Abbildung 2.16: Funktionsweise einer Konturverfolgung mittels zufälliger Punkte, links zufällige Bildpunkte, rechts verbundene Punkte mittels konvexen Hüllen [27]

2.5.6 Merkmalsextraktion

Die zentrale Aufgabe der Merkmalsextraktion ist, dem segmentierten Objekt eindeutige Merkmale zuzuschreiben. Laut Erhardt müssen diese Merkmale idealerweise folgende Bedingungen erfüllen [9]:

- **Translationsinvarianz:**
Objektparameter bleiben bei Verschieben des Objekts konstant.
- **Rotationsinvarianz:**
Objektparameter bleiben bei Rotation des Objektes konstant.
- **Größeninvarianz:**
Objektparameter bleiben bei Vergrößern oder Verkleinern des Objektes konstant [...]
- **Spiegelinvarianz:**
Objektparameter bleiben bei Spiegelung um eine Symmetrieachse konstant [...]

Alle vier Invarianzen gleichzeitig zu erfüllen ist derzeit laut Steinmeier nicht möglich und Gegenstand der aktuellen Forschung [26].

Um jedoch möglichst viele der Merkmale zu nutzen, wird ein sogenannter Merkmalsvektor \vec{x} zum beschreiben der Objekte erstellt. Hier müssen Merkmale ausgewählt werden, die in der Lage sind, die Schmelzbadgeometrie zu beschreiben. Desto größer ein Merkmalsvektor ist, desto länger werden die Berechnungen dauern.

Typische geometrische Merkmale, die Translations- und rotationsinvariant sind, ist beispielsweise die Berechnung der Anzahl von Pixel eines Objektes, welches der Fläche entspricht. Eine weitere Methode ist die Bestimmung der Masse des Segments, indem alle Grauwertmengen des Segments summiert werden. Ein weiteres Verfahren ist die Berechnung des Umfangs, welcher der Anzahl der Konturpixel entspricht. Ein Verfahren, um fehlerkannte Segmente zu eliminieren ist mithilfe einer Approximation einer Ellipse an das Segment, dies geschieht mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate [9].

2.5.7 Klassifizierung

Besitzt der Merkmalsvektor die benötigten Parameter zur Bestimmung der Schmelzbadgeometrie, wird mittels der Klassifizierung das analysierte Bild einer Bedeutung zugewiesen [9] [26]. Eine unterschiedliche Bedeutung kann beispielsweise zwischen einem runden oder quadratischen Objekt sein. So müssen vor der Klassifizierung alle Bedeutungen bekannt sein oder durch Verfahren, die das maschinelle Lernen anwenden, ermittelt werden. Schlussendlich ermittelt die Klassifizierung aus der Menge an Bedeutungen das Ergebnis, welches dazu genutzt werden kann, eine Aktion durchzuführen [26].

3 Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird eine durch Recherche gefundene Auswahl wissenschaftlicher Arbeiten und Veröffentlichungen zur Detektion des Schmelzbades aufgeführt. Ein Fokus liegt auf der verwendeten Kameratechnik und Aufnahmeverfahren, der Anwendung und Erstellung eines ROIs sowie die Vorgehensweise der Bildverarbeitung.

Vykhtar und Richter beschäftigt sich in [31] im Bereich der Laserschmelzbadforschung und überwacht mithilfe von optischen Überwachungssensoren die Schmelzbadgeometrie und -temperatur. Als Prozess wird der Direct Energy Deposition angewandt. Der vorgestellte Ansatz basiert auf der Untersuchung der Schmelzbadgeometrie mithilfe einer Graustufen-CMOS-Kamera und einem $685 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ Bandpassfilter sowie einem Abdunklungsfilter mit 85% Lichtdämpfung. Die aufgenommenen Bilder werden mit dem Gaußfilter geglättet, fortführend mit einer Histogrammanalyse und einem Schwellwertverfahren in ein Binärbild umgewandelt. Die nachfolgende Konturverfolgung wird mittels der Achternachbarschaft gestartet und für die Merkmalsextraktion wird das Approximieren einer Ellipse gewählt. Ein ROI wird angewandt, jedoch ohne Erklärung zur automatischen Detektion.

Ye et al. beschäftigen sich in [34] mit der Detektion der Schweißnaht im laufenden Prozess. Als Prozess wird das Metallaktivgasschweißen verwendet. Die Aufnahme wird mittels einer CCD Kamera und einem 650 nm Bandpass sowie einem Abdunklungsfilter mit 96% Dämpfung erstellt. Ein ROI wird gesetzt, um den überbelichteten Lichtbogen aus dem Bild zu entfernen. Es werden Algorithmen zur Bildverbesserung angewandt und verglichen. In der Rauschunterdrückung werden der Rechteckfilter und der Medianfilter verglichen. Als Kantendetektionalgorithmen wird der Roberts-, Laplacian-, Prewitt-, Sobel-Operator und der Canny-Algorithmus verglichen. Die nachfolgenden Algorithmen zur Bestimmung der Schweißnaht sind Dilation, Erosion, die Hough Transformation und die Geradenapproximation in der Anwendung.

Die Arbeit von Purrio in [20] ist in die Offline- und Inline-Bildauswertung unterteilt. Die Offline-Auswertung dient dem Zweck, nach dem Prozess die aufgenommenen Bilder auf Prozessfehler zu analysieren. So werden mittels Durchlichtverfahren Tropfenform, Trop-

fenschwerpunkt, der Kontaktrohrabstand und die Länge des freien Drahtendes auf Fehler geprüft. Hierbei wird mittels Linescans und dem Canny-Algorithmus das Bild verarbeitet.

Die für diese Arbeit relevante Inline-Auswertung findet im laufenden Prozess statt. Die Inline Auswertung detektiert den Bildschwerpunkt, die Position der Drahtelektrode und Fuge sowie die Schmelzbadränder. Als Schweißprozess wird das CMT Verfahren verwendet und die Lichtbogenintensität wird mittels einem $830 \text{ nm} \pm 30 \text{ nm}$ Bandpass mit einer Abdunklungsrate von 60% gesenkt. Die dafür verwendeten Algorithmen basieren auf Linescans, Segmentierung mittels Binärisierung und verfolgen der Konturen mittels der Achternachbarschaft. Ein Linescan ist die Analyse einer einzelnen Bildreihe oder Bildzeile. Ein ROI wird gesetzt und mittels Erfahrungswerten eingeschränkt.

In [6] beschäftigt sich Wu et al. mit der Detektion des Schmelzbades in Schutzgasschweißprozessen. Die Aufnahme wird mittels zweier CCD Kameras und eines 1064 nm Bandpasses erstellt. Die Kameras sind in unterschiedlichen Winkel und Positionen angeordnet. Zur Rauschunterdrückung wird ein 9×9 Medianfilter angewandt. Die Kantendetektion wird mittels Canny-Algorithmus ausgeführt und mithilfe einer polynomialen Regression geglättet.

Liu und Zhao [16] verwenden eine Hochgeschwindigkeitskamera mit einem Bandpassfilter zur Detektion des Schmelzbades in Schutzgasschweißprozessen. Zur Vorverarbeitung wird der Butterworth-Filter verwendet und zur Kantendetektion eine Reihe an Filtern verglichen, darunter der Roberts-, Sobel-, Prewitt-Operator, Laplacian of Gaussian, Difference of Gaussian und der Canny-Algorithmus.

In [33] entwickeln Xiong und Zhang einen Algorithmus zur Detektion der Nahtgeometrie in Schutzgasschweißprozessen. Dafür werden zwei Kameras mit einem Bandpass von 650 nm verwendet. Die Vorverarbeitung wird mittels einem Gaussianfilter bearbeitet. Zur Kantendetektion wurde der Sobel-, Roberts-, Prewitt-Operator und der Canny-Algorithmus angewandt und verglichen. Die Merkmalsextraktion findet mithilfe der Hough-Transformation statt. Ein ROI wird gesetzt, jedoch ohne Erklärung zur automatischen Detektion.

4 Methodisches Vorgehen

Für die Festlegung der methodischen Vorgehensweise und zur Herleitung von Maßnahmen für das Detektieren der Schmelzbadgeometrie werden die im Stand der Technik erwähnten wissenschaftlichen Arbeiten und Veröffentlichungen verglichen. Der Fokus liegt auf der verwendete Kamertechnik und den Aufnahmeverfahren, die Anwendung und Erstellung eines ROIs sowie die Vorgehensweise der Bildverarbeitung.

Zuerst wird in der folgenden Tabelle 4.1 die verwendete Kamera, die optischen Filter betrachtet und das Anwenden eines ROIs.

Autor	Quelle	Kamera	Optische Filter	ROI
Vykhtar et al.	[31]	CMOS-Kamera	BP 685 nm \pm 5nm ND 0.85	✓
Ye et al.	[34]	CCD-Kamera	BP 650 nm ND 0.96	✓
Purrio	[20]	CMOS-Kamera	BP 830 nm \pm 30nm ND 0.60	✓
Wu et al.	[6]	CCD-Kamera	BP 1064 nm	✗
Liu et al.	[16]	keine Angabe	BP	✗
Xiong et al.	[33]	keine Angabe	BP 650 nm	✓

Tabelle 4.1: Zusammenfassung aus dem Kapitel Stand der Technik: Hardware

Anhand der Tabelle 4.1 wird deutlich, dass aktuelle Forschungen, zur Aufnahme von Schweißprozessen, Kameras verwenden. Angaben über Kameramodelle oder Kameraeinstellungen sind nicht gegeben, jedoch fällt auf, dass jede Arbeit einen optischen Filter zur Unterdrückung der Lichtbogenintensität nutzt. Keine der Arbeiten weisen Angaben über eine automatische Bestimmung des ROIs. Entweder wird das ROI gar nicht gesetzt oder mittels Erfahrungswerten geschätzt.

Die folgende Tabelle 4.2 bezieht sich auf die Bildverarbeitung bei den verwendeten wissenschaftlichen Arbeiten und Veröffentlichungen. Dazu gehören die Bildglättung, die Kantendetektion und die Segmentierung, sowie die Konturverfolgung und Merkmalsextraktion .

Autor	Quelle	Glättung	Kantendetektion	Segmentierung	Konturverfolgung	Merkmalsextraktion
Vykhtar et al.	[31]	✓	✗	✓	✓	✓
Ye et al.	[34]	✓	✓	✓	✗	✗
Purrio	[20]	✗	✗	✓	✓	✓
Wu et al.	[6]	✓	✓	✗	✗	✗
Liu et al.	[16]	✓	✓	✗	✗	✗
Xiong et al.	[33]	✓	✓	✓	✓	✗

Tabelle 4.2: Zusammenfassung aus dem Kapitel Stand der Technik: Bildverarbeitung

Anhand der Tabelle 4.2 wird deutlich, dass aktuelle Forschungen die Aufnahme mithilfe eines Glättungsfilters glätten, gefolgt von einer Kantendetektion oder Segmentierung. Anzumerken ist jedoch, dass die in dieser Arbeit diskutierten Bildverarbeitungsschritte nach der Glättung stark von der Aufnahme des Bildes abhängig sind. Anhand der Tabelle 4.2 wird deutlich, dass aktuelle Forschungen kaum Konturverfolgungen oder Merkmalsextraktionen durchführen.

Die Analyse der Arbeiten führt zusammengefasst zu dem Ergebnis, dass die Literaturrecherche ein Defizit in der Detektion der Schmelzbadgeometrie im Bereich des CMT-Verfahrens zeigt und der Lichtbogen der störende Faktor zur korrekten Bestimmung der Schmelzbadgeometrie ist.

Die angewendete Kameratechnik und die dafür verwendeten optischen Filter ähneln sich in den Arbeiten. Es werden Bandpassfilter und Abdunklungsfiler verwendet, um die Lichtbogenintensität zu schwächen. Die Vorverarbeitung wird in den meisten Fällen mittels Rauschunterdrückungsfiltren eingeleitet und mithilfe von Kantendetektionfiltren in ein Kantenbild überführt. Je nach Gegebenheit des Bildes eignet sich auch ein einfaches Schwellwertverfahren zur Bestimmung der Segmente. Die Merkmalsextraktion und Merkmalsberechnung des Schmelzbades sind in vielen Fällen nicht gegeben.

Aus der Grundlage der vergleichenden Arbeiten wird folgendes Vorgehen für diese Arbeit

entwickelt, zur Detektion und Auswertung der Schmelzbadgeometrie, siehe Abbildung 4.1.

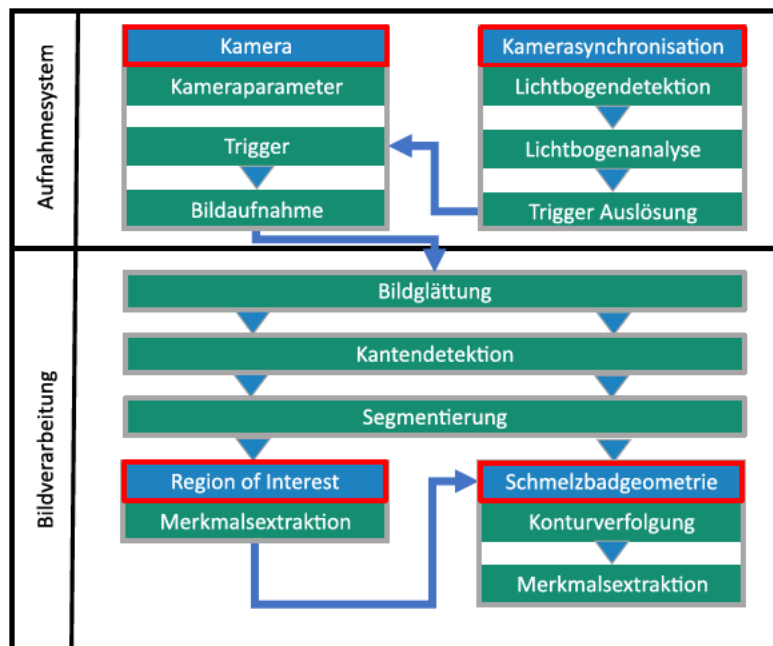


Abbildung 4.1: Eingrenzung der Arbeit

Die Abbildung 4.1 ist in zwei Kategorien unterteilt, in das Aufnahmesystem und in die Bildverarbeitung. Das Aufnahmesystem ist eine Anforderung von zentraler Bedeutung. Diese Randbedingung erfordert die korrekte Auswahl und Einrichtung der Hardware. Dazu gehört die Erstellung eines Versuchsaufbaus zur Bestimmung der optischen Filter, worin auch die Auswahl, die Parametrierung und Erstellung einer Halterung der Kamera mit inbegriffen ist. Aus dem Ziel, die Bildqualität zu erhöhen und die resultierende Informationsgewinnung zu maximieren, wird eine Kamerasynchronisation entwickelt, die vom CMT-Verfahren erzeugte Drahtbewegungen nutzt, um Bilder im richtigen Zeitpunkt aufzunehmen.

Aufbauend auf dem Aufnahmesystem und den Untersuchungen werden Maßnahmen anhand der zuvor analysierten Ausarbeitungen entwickelt, die der Extraktion der Schweißprozessdaten aus dem Bild dienen.

Für die folgende Validierung der entwickelten Maßnahmen wird eine Versuchsreihe mit verschiedenen Prozessparametern durchgeführt, die Aufschluss darüber geben soll, ob das analysierte Bildverarbeitungsmodell Fehler oder Veränderungen im Schweißprozess detektieren kann.

Um die Funktionalität gewährleisten zu können, werden die Anforderungen festgesetzt zu:

- Das Aufnahmesystem muss das Schmelzbad erkennbar machen.
- Das Aufnahmesystem soll die Bildaufnahme synchronisieren.
- Das Bildverarbeitungssystem soll richtungsabhängig ein ROI bestimmen können.
- Das Bildverarbeitungssystem muss eine manuelle ROI-Eingabe ermöglichen.
- Das Bildverarbeitungssystem muss die Schmelzbadränder richtungsabhängig detektieren können.
- Das Bildverarbeitungssystem muss Veränderungen am Schmelzbad detektieren können.

5 Versuchsaufbau und Voruntersuchung des Aufnahmesystems

Dieses Kapitel beschreibt den Versuchsaufbau zur Prozessbeobachtung und grenzt die Analyse des Schmelzbades auf den CMT-Prozess ein. Die Abbildung 5.1 zeigt die Inhalte dieses Kapitels in Anlehnung an Abbildung 4.1.

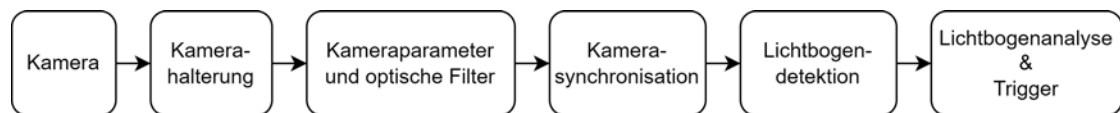


Abbildung 5.1: Aktueller Stand und folgende Entwicklung

Die folgenden Geräte und Prozesseinstellungen werden, wenn nicht anders verwiesen, wie folgt verwendet.

Geräte & Einstellungen	Wert
Roboter	Kuka KR60HA
Schweißstromquelle	Fronius TPS 400i PULSE
Drahtmaterial	Stahl
Drahtdurchmesser	1.2 mm
Schutzgas	82% Argon, 18% CO ₂
Schweißspannung	13.2 V
Schweißstrom	≈ 110 A
Drahtfördergeschwindigkeit	2.9 m/min
Materialstärke	1.0 mm

Tabelle 5.1: Prozessgeräte und -einstellungen

Diese Arbeit verwendet zur Berechnung und Auswertung der Bildinformation die Bibliothek OpenCV 4.5.3, die eine Open-Source-Software ist und eine Vielzahl leistungsstarker Bildverarbeitungsfunktionen zur Analyse anbietet [3].

5.1 Versuchsaufbau zur Aufnahme des Schmelzbades

Im Folgenden findet, wie in Abbildung 5.2 gezeigt, die Auswahl der Kamera, die Konstruktion der Kamerahalterung sowie die Ermittlung der Kameraparameter und der optischen Filter statt.

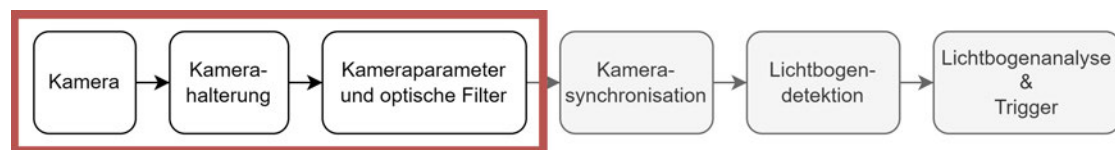


Abbildung 5.2: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Aufnahmesystem

5.1.1 Kameratechnik zur Aufnahme von Schmelzbadbildern

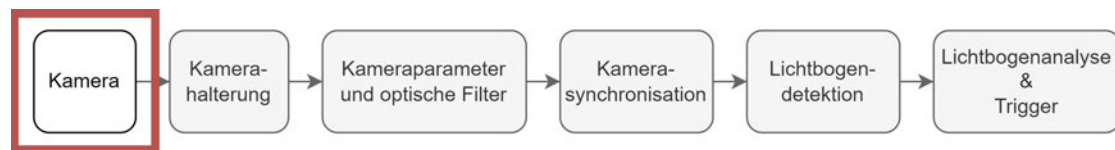


Abbildung 5.3: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Kamera

Das zu verfolgende Ziel des Versuchsaufbaus ist die Detektion und Untersuchung der Form des Schmelzbades. Aus dieser Untersuchung werden die aus dem Stand der Technik gewählten Ausarbeitungen, die verwendete Kamera und die optischen Filter aufgezeigt. Aus der Tabelle 4.1 lässt sich ableiten, dass CMOS sowie CCD Kamera zur Aufnahme verwendet werden, jedoch liegt der Unterschied in der Technik nur im Aufnahmeverfahren und somit für diese Arbeit von marginaler Bedeutung. Beim Verwenden der optischen Filter werden hauptsächlich Bandpassfilter genutzt und je nach Stärke der Lichtbogenhelligkeit ein Absorptionsfilter hinzugefügt.

Die Ausarbeitung von Halisch et al. hat mit der in Abbildung 2.5 gezeigten Spektroskopie die Lichtbogenemissionen im CMT-Verfahren gemessen, anhand welcher die spektrale Empfindlichkeit der Kamera und die zu verwendeten optischen Filter bestimmt werden.

Aus der o.g. Abbildung ist zu erkennen, dass die Wellenlängenbereiche 350nm bis 625 nm besonders hohe Lichtbogenemissionen vorweisen. Im Vergleich zu 650 nm und 680 nm bis 690 nm hat die Lichtbogenemissionen einen Rückgang und geringere Emissionenausschläge vorzuweisen. In den höheren Wellenlängenbereichen fallen besonders die Wellenlängen 780 nm und ab 850 nm auf, in denen die Lichtbogenemission rapide abfällt. Außerdem ist eine Voraussetzung der für den Versuch verwendeten Kamera, dass eine spektrale Empfindlichkeit für die oben genannten Wellenlängenbereiche und eine besonders hohe Effizienz in der Detektion des Lichtes vorhanden sind.

Die in dieser Arbeit verwendete Kamera, das Modell Basler daA1920-160um, besitzt einen monochromen CMOS-Sensor, der Farben nur in Graustufen aufnehmen kann. Die Bildaufnahmegewindigkeit beträgt 164 fps. Zu den weiteren Vorteilen gehören die hohe Bildauflösung, die geringe Baugröße und das leichte Gewicht. Die Bildübertragung ist mittels der USB-Schnittstelle USB3.0 sichergestellt und wird mit dem Programm Pylon zum Speichern der Bilddateien genutzt [1].

Die Abbildung 5.4 repräsentiert die spektrale Empfindlichkeit der Basler Kamera.

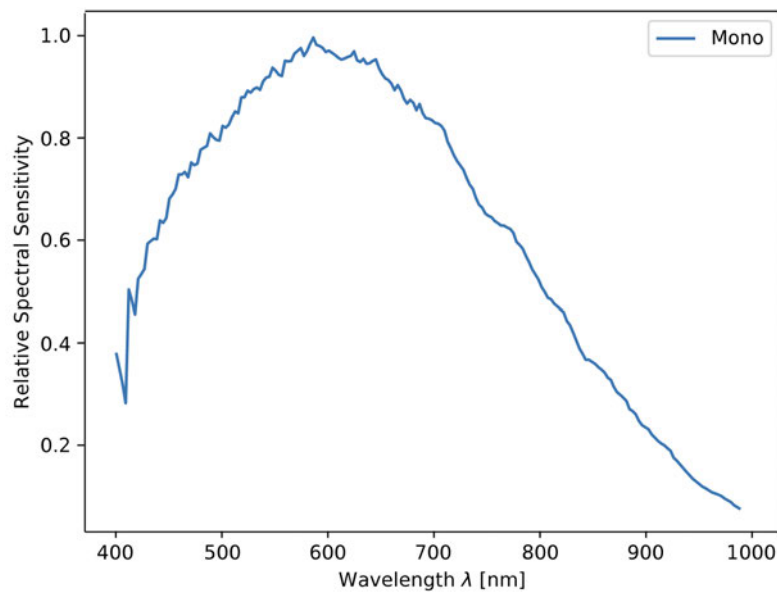


Abbildung 5.4: Spektrale Empfindlichkeit der Basler Kamera [1]

Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit befindet sich bei einer Wellenlänge von 590 nm. Im Wellenlängenbereich von 500 bis 700 nm beträgt die relative spektrale Empfindlichkeit mindestens 0.8. So eignet sich diese verwendete Kamera zur Untersuchung des Schmelzbades im Wellenlängenbereich von 650 nm sowie zwischen 680 und 690 nm.

Im Wellenlängenbereich 780 nm beträgt die relative spektrale Empfindlichkeit in etwa 0.6 und sinkt im Bereich von 850 nm rapide auf 0.35 und ist somit schlechter geeignet. Anhand der spektralen Empfindlichkeit der Kamera und der Spektroskopiemessung des Lichtbogens werden für die folgende Untersuchung diese optischen Filter verwendet:

- Bandpass: 650 nm \pm 5 nm, 685 nm \pm 5 nm und 690 nm \pm 5 nm
- Langpass: 780 nm und 850 nm
- Absorptionsfilter: 40% und 0.001%

Dort, wo die spektrale Empfindlichkeit der Kamera besonders hoch ist, wird mittels Bandpass der Wellenlängenbereich eingeschränkt und in den weniger empfindlichen Bereichen wird mittels eines Langpasses versucht, diese Unempfindlichkeit im Kamerasensor zu umgehen.

Die Absorptionsfilter werden in dem Fall genutzt, dass das aufzunehmende Bild zu hell ist.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Kameraspezifikationen zusammen.

Kameraspezifikationen	Wert
Kamera	Basler daA1920-160um
Sensortyp	CMOS monochrom
Sensorgroße	6,6 mm x 4,2 mm
Auflösung	1920 x 1200 px
Bildaufnahmegeschwindigkeit	164 fps

Tabelle 5.2: Kameraspezifikationen der Basler Kamera [1]

5.1.2 Versuchsaufbau zur Aufnahme von Daten

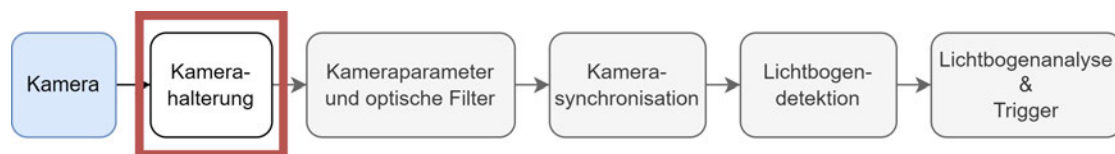


Abbildung 5.5: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Kamerahaltung

Zum Ausführen des nachfolgenden Versuchsaufbaus wird eine Befestigung der Kamera auf dem Schweißkopf benötigt. Die direkte Befestigung hat den Vorteil, dass Bilder kon-

stant und unabhängig von der Bewegung des Prozesskopfs aufgenommen werden. Zum Schutz der Kamera vor Schweißspritzer und der ausstrahlenden Wärme wird für eine ausreichende Entfernung eine 50 mm Sammellinse vor das Objektiv der Kamera gesteckt. Mithilfe der Linsengleichung aus [9]

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \quad (5.1)$$

und mittels des Abbildungsmaßstabs

$$\frac{a'}{a} = \frac{y}{y'} \quad (5.2)$$

lassen sich anhand der Sensorgröße $y' = 4.2 \text{ mm}$, der Brennweite $f = 50 \text{ mm}$ und des zu beobachteten Gegenstandes $y = 10 \text{ mm}$ die Position des Kamerasensors und der Sammellinse zum Schmelzbad bestimmen. Der Richtwert der Gegenstandsgröße basiert auf der Voruntersuchung der Größe einer Schweißnaht, diese beträgt $\approx 3.2 \text{ mm}$

Die Anforderungen an den Befestigungsmechanismus sind eine hohe Verstellbarkeit, dazu gehört die Veränderung der Gegenstandsgröße, eine Veränderung des aufzunehmenden Winkels, sowie eine Feinjustierung der Kamera, um fertigungstechnische Toleranzen auszugleichen.

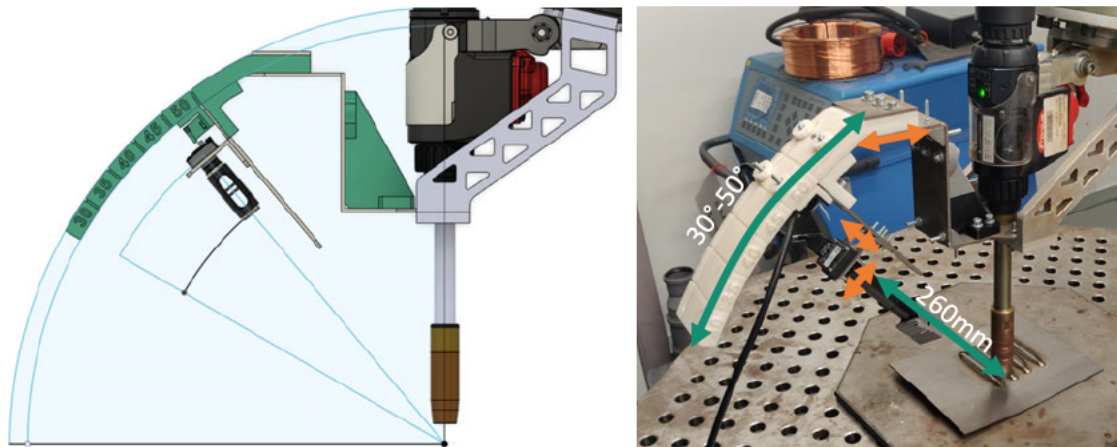


Abbildung 5.6: Skizze und montierter Versuchsaufbau der Basler Kamera

Mithilfe einer Kombination von Laserschneiden und einem 3D-Drucker ließen sich alle Anforderungen erfüllen. Die Befestigung besitzt eine stufenlose Verstellung des Winkels zwischen 30° und 50° ohne Neujustierung der Linse. Die 50° gelten als Maximum, da an-

sonsten die Schweißdüse die Aufnahme stört. Die 30° ist das Minimum der Konstruktion um die Stabilität zu gewährleisten, da es ansonsten zu Schwingungen im Prozess kommen kann. Außerdem lässt sich die Gegenstandsgröße von 10mm bis 18mm frei wählen.

5.1.3 Versuchsdurchführung zur Ermittlung optimaler Kameraparameter

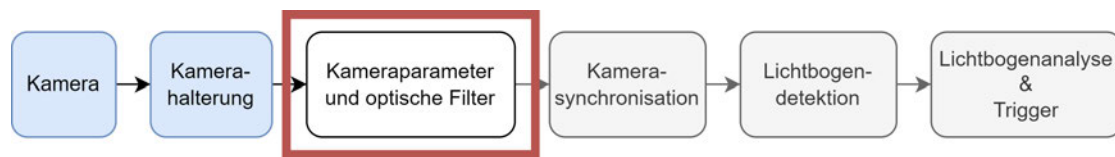


Abbildung 5.7: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Kameraparameter und optische Filter

Mittels der vorgestellten Konstruktion ist es möglich, Aufnahmen im laufenden Prozess durchzuführen. Das Objektiv beinhaltet die Sammellinse, die optischen Filter und das Schutzglas. Die fortführende Aufgabe besteht in der Optimierung der Bildaufnahme zur Reduktion der Überbelichtung durch den Lichtbogen.

Nach Demant [7] ist der wichtigste Kameraparameter die Belichtungszeit (engl. Exposure Value (EV)), mit der die Länge und Helligkeit der Bildaufnahme gesteuert wird. Jedoch gilt, je länger die Belichtungszeit, desto unschärfer ist das Bild bei einer Aufnahme während einer Bewegung. So muss diese so gering wie möglich gehalten werden. Die Signalverstärkung (engl. gain) muss auf null gesetzt werden, um eine Verstärkung des Bildrauschens zu verhindern.

Die nachfolgende Tabelle 5.3 beschreibt den entwickelten Versuchsplan, anhand der verwendeten Bandpass-, Langpass- sowie Absorptionsfilter .

Versuchsreihe	BP 650	BP 685	BP 690	LP 780	LP 850	ND 40%	ND 0.001%
V1-V6							
V7-V12	X						
V13-V18		X					
V19-V24			X				
V25-V30				X			
V31-V36					X		
V37-V42	X					X	
V43-V48		X				X	
V49-V54			X			X	
V55-V60				X		X	
V61-V66					X	X	
V67-V72	X						X
V73-V78		X					X
V79-V84			X				X
V85-V90				X			X
V91-V96					X		X
V97-V102		X	X				
V103-V108		X	X			X	
V109-V114		X	X				X

Tabelle 5.3: Versuchsplan zur Ermittlung der Kameraparameter und filter

Insgesamt wurden 114 Versuche zur Detektion geplant. Jede Versuchsreihe umfasst maximal fünf Versuche zur Bestimmung der Belichtungszeit. Die von der Kamera geringste wählbare Belichtungszeit beträgt $20 \mu\text{s}$.

Die Abbildung 5.8 zeigt exemplarisch die aus dem Versuch ermittelten Bilder mit dem am deutlichsten erkennbaren Schmelzbad.

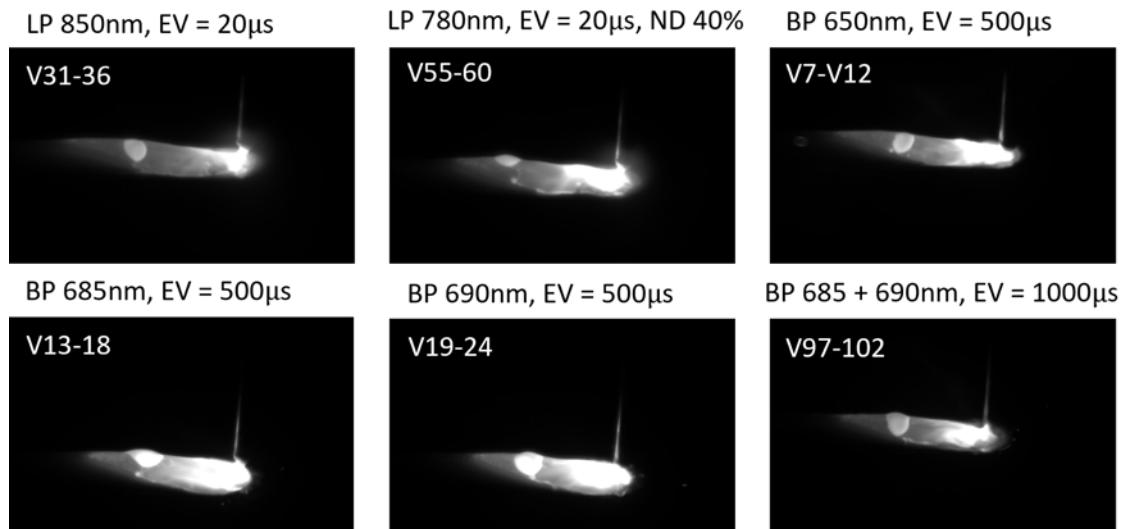


Abbildung 5.8: Beispielaufnahmen vom erstellten Versuchsaufbau

Alle ausgewählten optischen Filter können mithilfe richtig eingestellter Parameter das Schmelzbad sichtbar machen, insbesondere fällt auf, dass der Absorptionsfilter 0.001% aufgrund der hohen Absorption kein sichtbares Schmelzbad zulässt. Der Absorptionsfilter in Höhe von 40% trägt in allen Versuchen zu einer höheren Belichtungszeit und Unschärfe bei. Bis auf die Versuchsreihe 55-60 in Abbildung 5.8, kann das Hinzufügen des Absorptionsfilters das überbelichtete Schmelzbad sichtbar machen.

Beide Langpassfilter können das Schmelzbad nur mit sehr geringer Belichtungszeit aufnehmen, außerdem ist deutlich erkennbar, dass eine erhellte Fläche in Form eines Schweißs, um die hellsten Punkte zu erkennen ist.

Die Bandpassfilter haben die besten Ergebnisse erzielt. Der Versuch mit dem Bandpass 650 nm, 685 nm und 690 nm ergab gut sichtbare Schmelzbäder, jedoch hat die Kombination der Bandpässe 685 nm \pm 5 nm und 690 nm \pm 5 nm einen Bandpass mit einer Transmissionsrate von 687.5 nm \pm 2.5 nm erschaffen. Durch diese Kombination ist eine Aufnahme des Schmelzbades möglich, in der die helle Schmelze deutlich abgeschwächt ist und somit eine genauere Analyse des Schmelzbades erlaubt. Aufgrund dessen verwendet diese Arbeit im Folgenden die Kombination der beiden Bandpässe 685 nm und 690 nm.

5.2 Versuchsaufbau zur Synchronisierung der Bildaufnahme

Im Folgenden werden, wie in Abbildung 5.9 gezeigt, die Auswahl der Hardware zur Kamerasynchronisation, die Konstruktion und Halterung zur Detektion des Lichtbogens, sowie die Analyse der Messdaten und der gewählten Triggerzeitpunkte aufgezeigt.

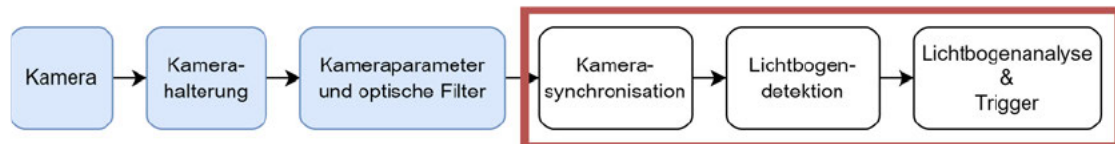


Abbildung 5.9: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Kamerasynchronisation

Die Synchronisierung der Bildaufnahme hat das Ziel, eine konstante Bildaufnahme zu ermöglichen. Die Aufnahme findet in der Kurzschlussphase statt und soll eine genauere Analyse der Veränderung des Schmelzbades ermöglichen. Somit ist die Kamerasynchronisation an das CMT-Verfahren oder ähnliche oszillierende Verfahren gebunden.

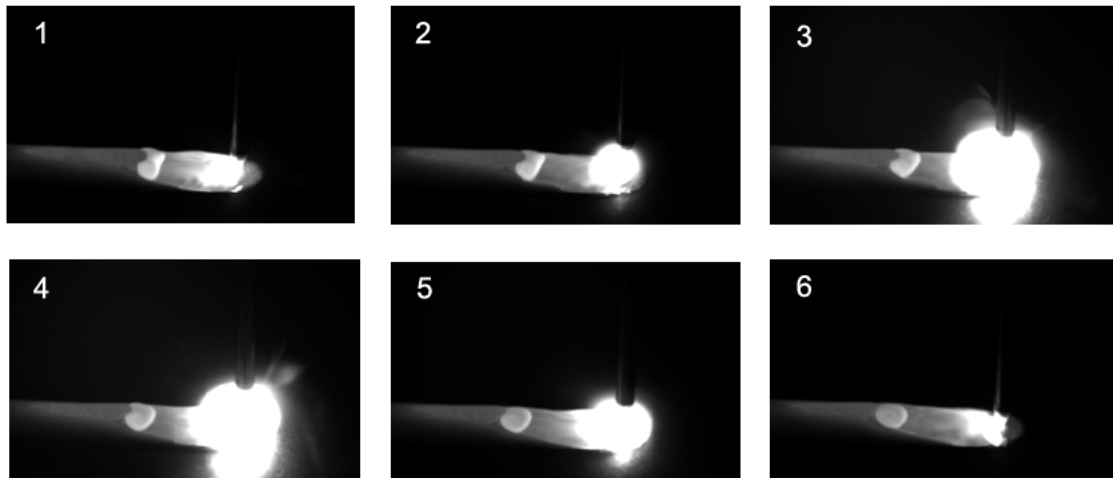


Abbildung 5.10: Typische Bildersequenz bei freilaufender Bildaufnahme

Anhand der Abbildung 5.10 ist der Verlauf des CMT-Prozesses, wie bereits in Abbildung 2.3 deutlich wird, erkennbar. Die Bilder 1 und 6 sind in der Kurzschlussphase, während die Bilder 2, 3, 4 und 5 in der Lichtbogenphase wiederfinden.

5.2.1 Hardware zur Kamerasynchronisation

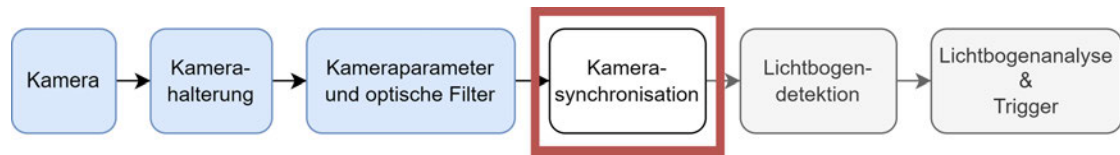


Abbildung 5.11: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Kamerasynchronisation

Diese Arbeit verwendet eine Photodiode zur Synchronisation der Bildaufnahme. Die Photodiode des Modells FD10D ist für die Beobachtung von Infrarotstrahlung geeignet und detektiert Wellenlängenbereich von 900 nm bis 2600 nm. Die höchste Ansprechempfindlichkeit liegt in der Wellenlänge 2300 nm [30]. Die Photodiode eignet sich somit für die berührungslose Temperaturmessung, wenn mittels eines Bandpasses die Wellenlängen begrenzt werden. Nach Forster [10] herrschen im Lichtbogen Temperaturen zwischen 4000°C und 18000°C, wodurch die Lichtbogenlöschung und -zündung in der Photodiode detektierbar ist. Ein Bandpass 1550 nm \pm 5 nm wird für diese Messung verwendet.

5.2.2 Versuchsaufbau und Lichtbogendetektion

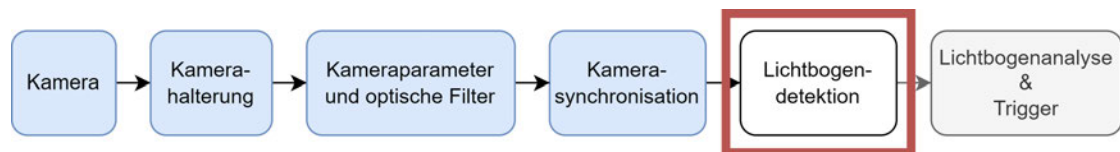


Abbildung 5.12: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Lichtbogendetektion

Das Ziel des Versuchsaufbaus ist es, die Photodiodensignale mithilfe eines Mikrocontroller zu analysieren und ein Triggersignal an die Kamera weiterzuleiten. Im Datenblatt der Photodiode ist der maximale Photostrom nicht gegeben. Um eine mögliche Sättigung der Photodiode zu verhindern, muss die Entfernung zum Schmelzbad durch eine variable Photodiodenhalterung gesichert werden.

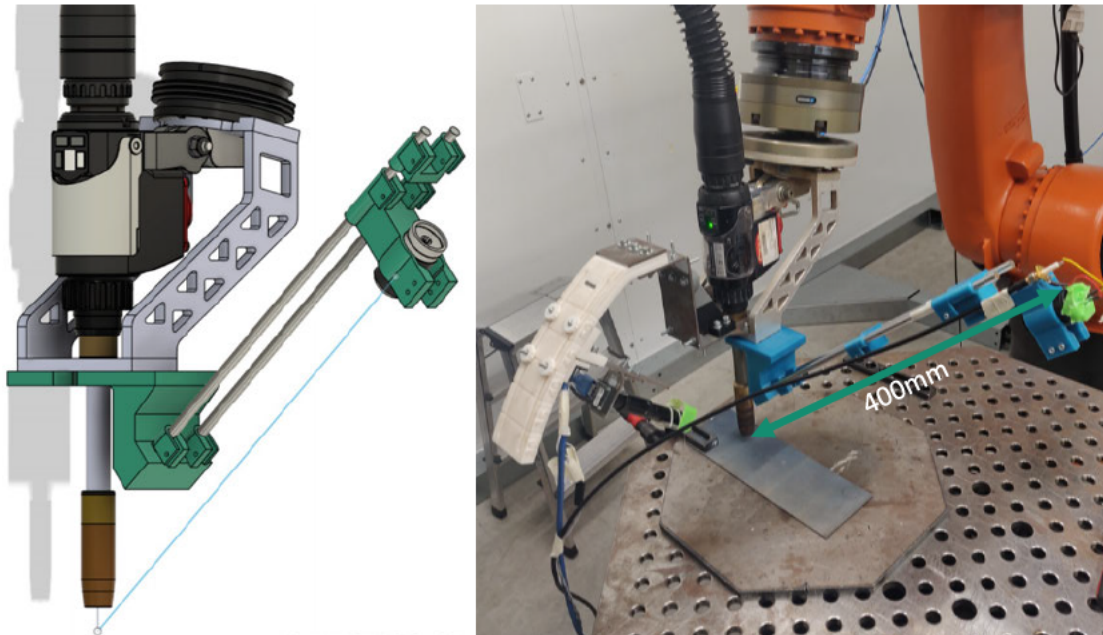


Abbildung 5.13: Versuchsaufbau der Photodiodenhalterung

Die genutzte Photodiodenhalterung aus Abbildung 5.13 erfüllt die Anforderung, eine konstant ausgerichtete Aufnahme auf das Schmelzbad zu erlauben und die Photodiode variabel einstellen zu können. Da der von der Photodiode erzeugte Strom von der Lichtbogenleistung und der Entfernung zum Schmelzbad abhängig ist, wird der Abstand so groß wie möglich gehalten. Die Photodiode hat somit einen Abstand von **370 mm** zum Schmelzbad. Mithilfe des Ohm'schen Gesetzes

$$I_{\text{photo}} = \frac{U_{\text{photo}}}{R_L} \quad (5.3)$$

mit $R_L = 50\Omega$ und einer Spannungsmessung mit $U_{\text{photo}} \approx 12\text{mV}$, berechnet sich ein Photostrom der $I_{\text{photo}} \approx 240\mu\text{A}$ beträgt.

Um die Photodiodensignale in ein für den Mikrocontroller kompatibles Format zu übertragen, wird mittels eines Transimpedanzverstärkers der Photostrom in eine Spannung gewandelt. Es wird der OPA380 ausgewählt, der speziell für eine Transimpedanzverstärkerschaltung konzipiert ist [29].

Die Abbildung 5.14 ist eine aus der Dokumentation des OPA380 empfohlene Schaltung zur Transimpedanzberechnung.

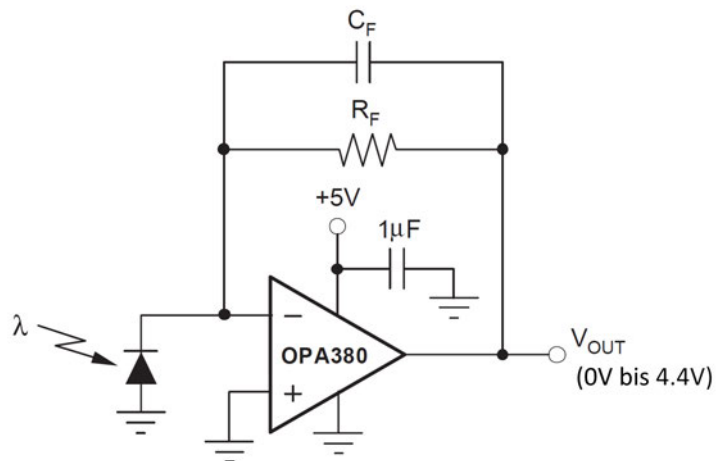


Abbildung 5.14: Transimpedanzverstärker, in Anlehnung an [29]

Die Berechnungen zum Dimensionieren eines Transimpedanzverstärkers der Bauelemente R_F und C_F werden nach der Anleitung von Texas Instruments durchgeführt [28]. Die maximale Ausgangsspannung des OPA380 beträgt 4.5 V. Um während der Analog-Digital-Messung nicht die Messgrenze des A/D-Wandlers zu erreichen, wird die Ausgangsspannung des Transimpedanzverstärker auf 2.2 V festgelegt.

$$R_F = \frac{V_{\text{OUTMax}} - V_{\text{OUTMin}}}{I_{\text{photoMax}}} = \frac{2.2 \text{ V} - 0 \text{ V}}{240 \mu\text{A}} = 9.16 \text{ k}\Omega \quad (5.4)$$

Nach der Widerstandsreihe E24 wird $R_F = 10 \text{ k}\Omega$ gewählt. Nachfolgend wird der zur Glättung verwendete Kondensator mit einer Grenzfrequenz von 2 kHz berechnet.

$$C_F = \frac{1}{2\pi \cdot R_F \cdot f_p} = \frac{1}{2\pi \cdot 9.16 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ kHz}} = 8.69 \text{ nF} \quad (5.5)$$

Nach der E-Reihe 12 wird $C_F = 8.20 \text{ nF}$ gewählt.

Die Abbildung 5.15 zeigt die gemessenen Werte des Mikrocontrollers mit und ohne Glättung des Kondensators auf.

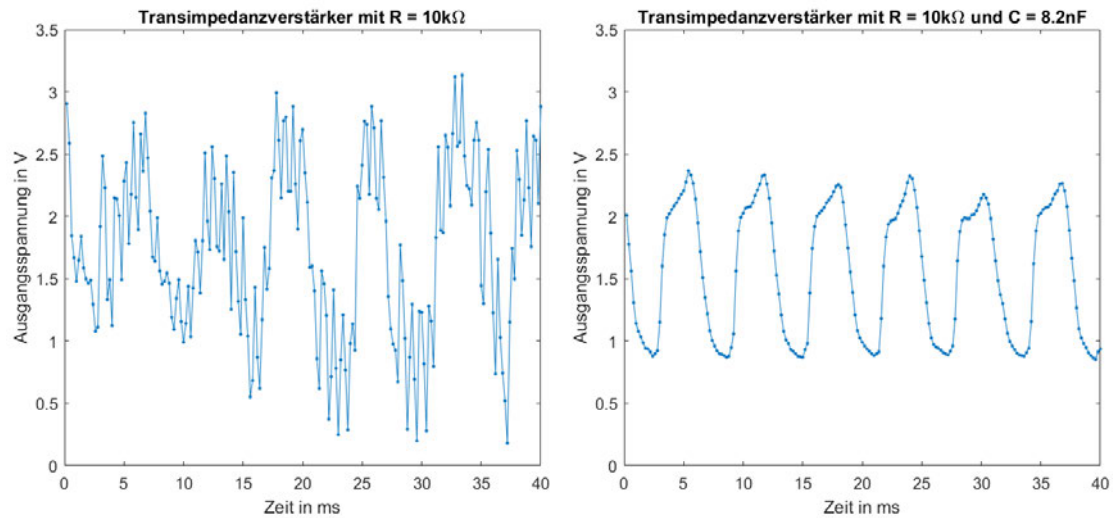


Abbildung 5.15: Darstellung der gemessenen Werte aus dem Mikrocontroller

5.2.3 Lichtbogenanalyse und Hardware-Trigger

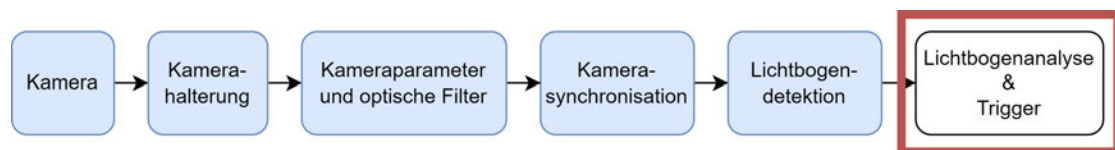


Abbildung 5.16: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Lichtbogenanalyse und Trigger

Anhand der Abbildung 5.15 wird deutlich, dass eine Transimpedanzverstärkerschaltung eine Glättung mittels Kondensators benötigt, um eine rauscharme Messung zu ermöglichen. Durch Mittelung der Messpunkte und Zählen der Signalspitzen, berechnet sich für das CMT-Verfahren eine Frequenz von ≈ 150 Hz in der der Lichtbogen oszilliert.

Die Auswertung der Triggerzeitpunkte wird, wie im Folgenden beschrieben, einfach gehalten. Mittels eines durch den Mikrocontroller berechneten gleitenden Mittelwertfilters werden die Messwerte stark geglättet. Der Triggerzeitpunkt bestimmt sich, mit $m(t)$ als den gleitenden Mittelwert, durch die folgende Bedingung.

$$m(t - 2) > m(t - 1) < m(t) \quad (5.6)$$

Die Abbildung 5.17 zeigt die gemittelten Messwerte und die Triggerzeitpunkte nach Gleichung 5.6 auf.

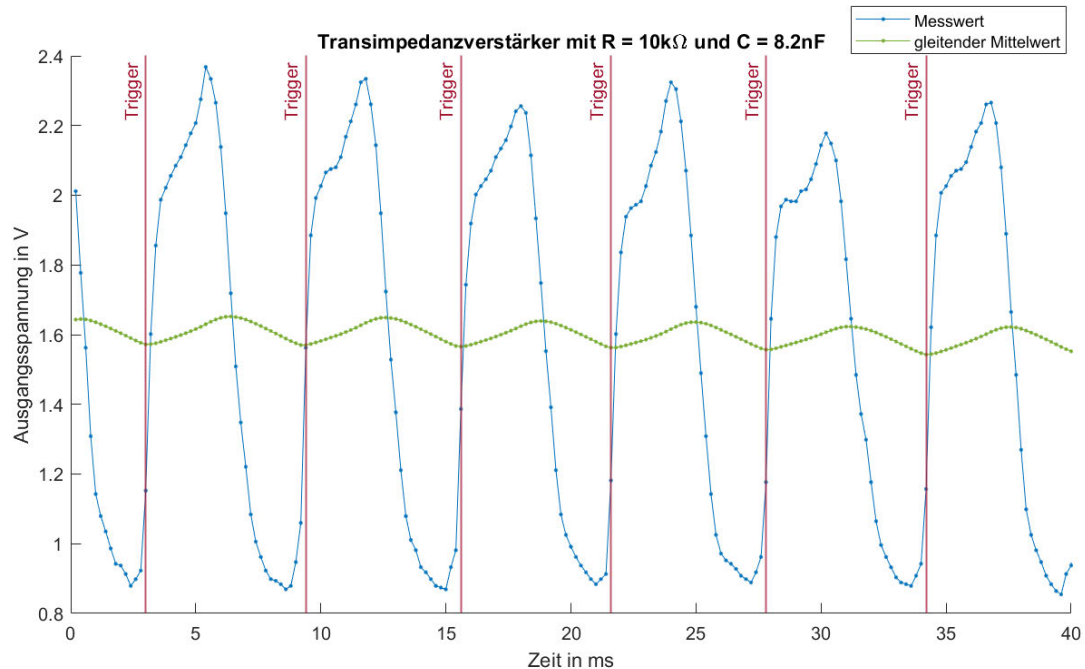


Abbildung 5.17: Auswertung und Triggerzeitpunkte der Photodiodenmessung

Diese Triggerzeitpunkte werden mittels digitalen Ausgangs am Mikrocontroller an die Kamera weitergeleitet. Mithilfe einer einzustellenden Wartezeit (Delay) an der Kamera wird ein Zeitpunkt gewählt, in der der Lichtbogen nicht sichtbar ist. Mit der Abbildung 5.17 lässt sich die einzustellende Wartezeit abschätzen. Die Wartezeit darf bei maximal $4500\mu\text{s}$ liegen, durch Unregelmäßigkeiten in der Messung kann es zu Falschaufnahmen kommen, in denen eine Aufnahme mit sichtbaren Lichtbogen erfolgt. Im Folgenden werden alle synchronisierten Bilderaufnahmen mit einer Wartezeit von $4000\mu\text{s}$ ausgeführt. Die Abbildung 5.18 zeigt eine Bilderfolge, die synchronisiert wurde.

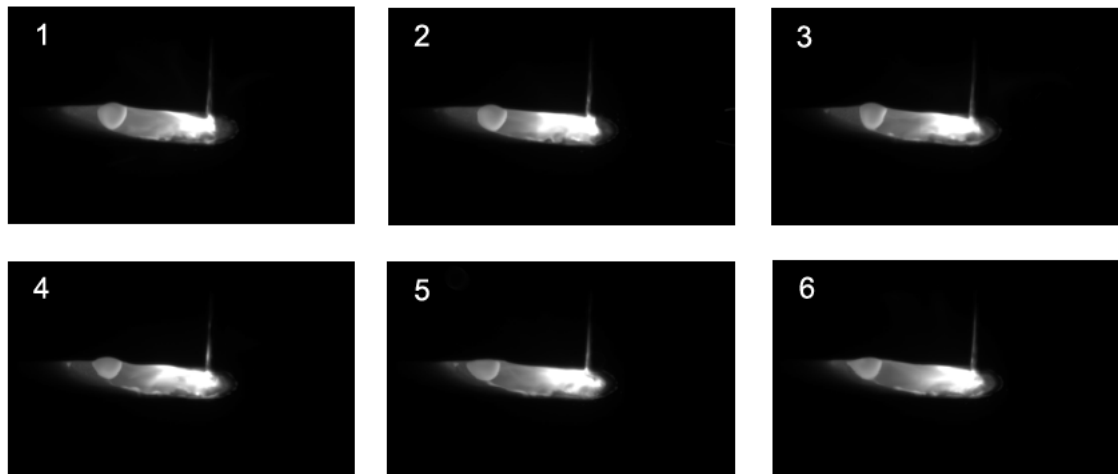


Abbildung 5.18: Bildersequenz bei synchroner Bilderaufnahme

5.3 Zusammenfassung und Ergebnisse der Voruntersuchung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den ermittelten Aufnahmen. Die im Versuchsaufbau erstellte Konstruktion zur Befestigung der Kamera verfügt über die Möglichkeit einer stufenlosen Verstellung des Winkels zum Schmelzbad. Die Abbildung 5.19 veranschaulicht die Veränderung des Winkels.

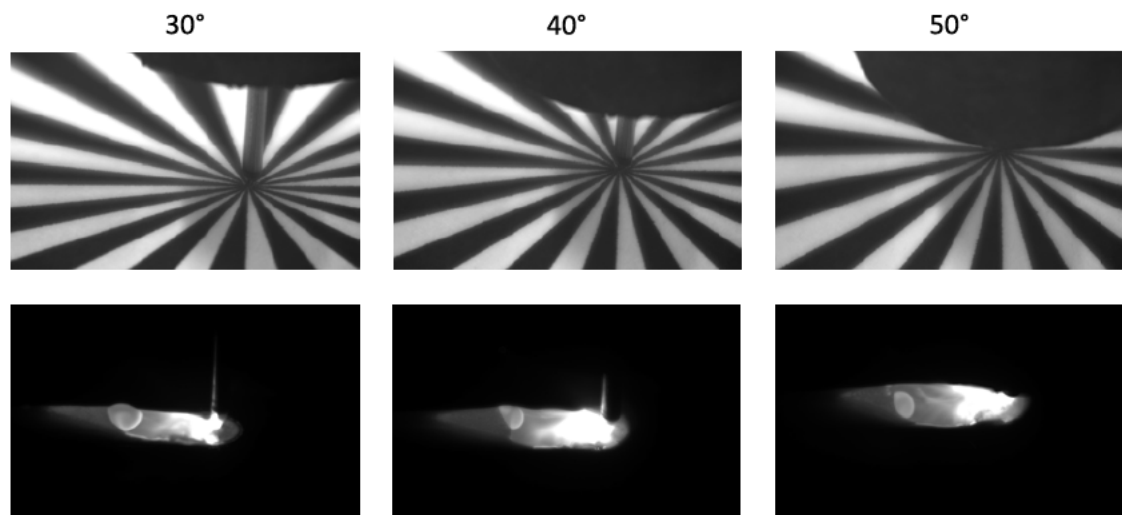


Abbildung 5.19: Vergleich der Aufnahmen mit verschiedenen Winkeln

Die Bilder, die aus den verschiedenen Winkeln aufgenommen werden, weisen keine großen Unterschiede auf. Die Veränderung des Winkels bewirkt eine perspektivische Veränderung der Schmelzbadbreite. So ist es möglich, mit einem Winkel von 30° Höhenunterschiede besser zu erkennen, während ein Winkel von 50° die Veränderung der Schmelzbadbreite sichtbarer macht. Da jedoch der Prozeskopf im Winkel 50° die freie Sicht der Kameralinse verhindert und einen Teil des Schmelzbades blockiert, wird der Winkel für die weitere Messung auf 40° gehalten.

Durch die Bestimmung eines Systems, mit dem Aufnahmen gemacht werden können, ist die Voruntersuchung des Aufnahmesystem fertiggestellt. Die verwendete Kamera nutzt die Bandpässe 685 nm und 690 nm mit einer Belichtungszeit von $1000 \mu\text{s}$ und einem eingestellten Winkel von 40° . Die Lichtbogendetektion ist mittels einer Photodiode und einem Transimpedanzverstärker durchgeführt. Die folgende Auswertung der Kamerasynchronisation findet durch einen Mikrocontroller statt, der die Signale an die Kamera weitergibt. Die Kamera wartet nach Erhalt des Trigger-Signals $4000 \mu\text{s}$.

6 Analyse und Vergleich von Bildverarbeitungsalgorithmen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Bildverarbeitung des Schmelzbades sowie mit der Auswahl und den Eigenschaften der Auswertungsmethoden und der Informationsgewinnung. Die im methodischen Vorgehen vorgestellte Vorgehensweise aus Abbildung 4.1 wird erneut in eine Kette von Schritten umgeschrieben, in diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Bildverarbeitung.

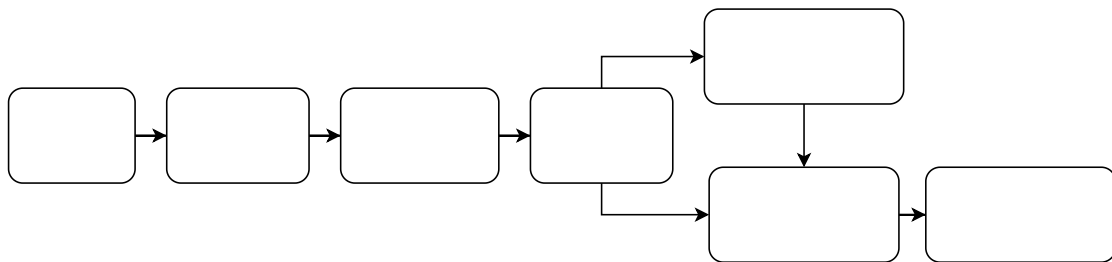


Abbildung 6.1: Aktueller Stand und folgende Analyse

Im Folgenden werden alle in Abbildung 6.1 gezeigten Schritte analysiert und es wird entschieden, wofür eigene Entwicklungen notwendig sind, damit eine korrekte und zuverlässige Schmelzbaddetektion gewährleistet werden kann.

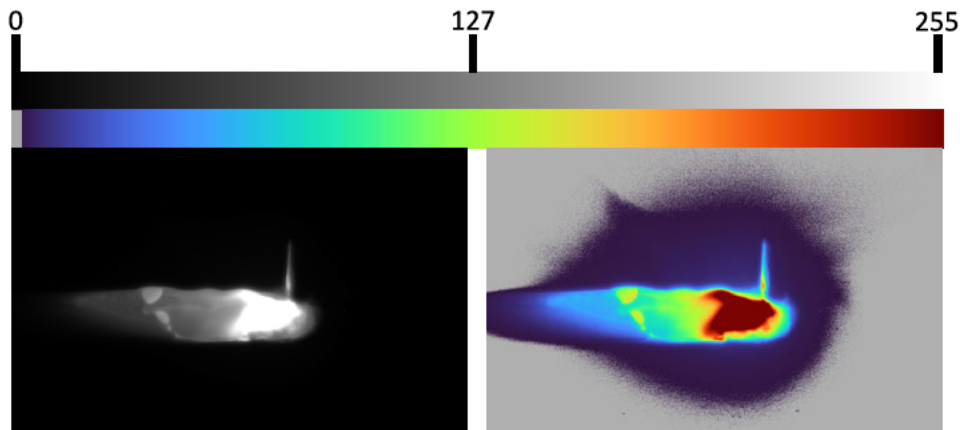


Abbildung 6.2: links Graustufenbild, rechts Pseudofarbdarstellung, erstellt mittels OpenCV [3]

Alle nachfolgenden Bilder in den Kapiteln Bildglättung und Kantendetektion erhalten eine modifizierte Pseudofarbdarstellung, um insbesondere die Unterschiede des Rauschens zu verdeutlichen. Die in Abbildung 6.2 abgebildete Aufnahme eines Schmelzbades wird für alle weiteren Analysen verwendet.

6.1 Verwertbare Bildinformationen

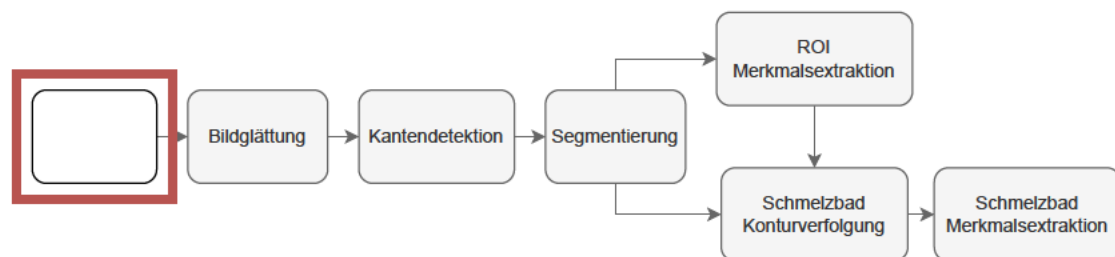


Abbildung 6.3: Aktueller Stand und folgende Analyse: Bildinformationen

Im Folgenden werden, wie in Abbildung 6.3 gezeigt, die möglich extrahierten Bildinformationen betrachtet. Die Abbildung 6.4 beschreibt die auswertbaren Informationen aus der Aufnahme des Schmelzbades.

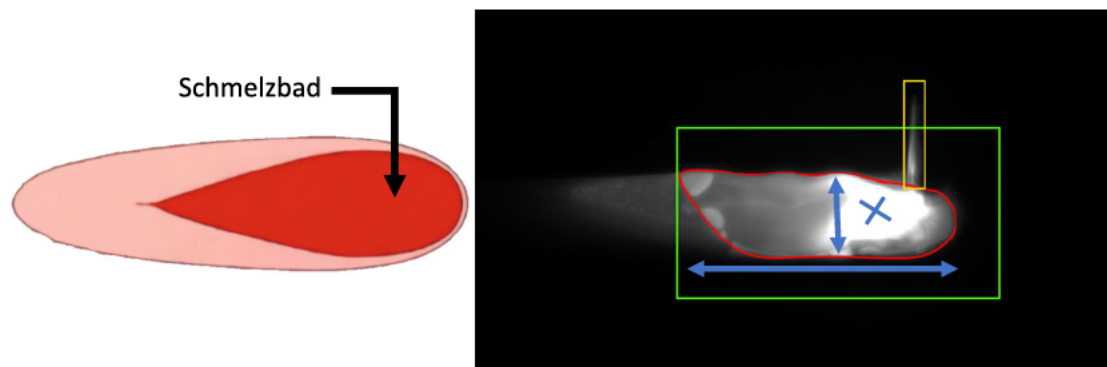


Abbildung 6.4: linkes Bild zeigt ein ideales Schmelzbad nach Schuler [25], rechts eine eigene Aufnahme mit verwertbaren Bildinformationen

Das linke Bild zeigt ein Schmelzbad, welches als Ideal angesehen wird. Im Vergleich dazu wird mit der roten Kontur im rechten Bild das detektierbare, flüssige Schmelzbad dargestellt, woraus sich beispielsweise Merkmale wie Breite, Länge, Schwerpunkt oder die Fläche ableiten lassen. Die gelb markierte Fläche stellt die Reflektion des Drahtes dar und ist vorrangig ein störender Faktor im Bild, welcher eliminiert werden muss. Das grüne Rechteck zeigt ein provisorischeres ROI, welches eine höhere Genauigkeit zur Bestimmung des Schmelzbad erreicht, sowie die Berechnungszeit deutlich verkürzt.

6.2 Bildglättung

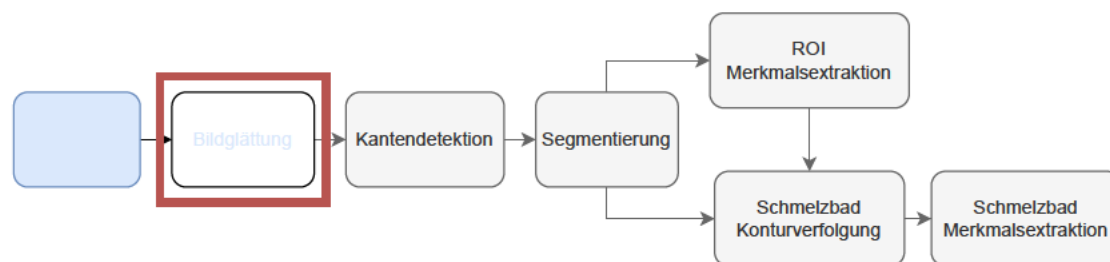


Abbildung 6.5: Aktueller Stand und folgende Analyse: Bildglättung

Die Bildglättung ist eine Art der Vorverarbeitung des Bildes. So enthalten nach Bredies [5] auch Kameras Rauschen. Das Ziel der Bildglättung ist somit das Identifizieren und Entfernen von Rauschen, ohne die wichtigsten Informationen zu entfernen. Zu diesen

wichtigsten Informationen gehört die Erhaltung der Schmelzbadränder. Für die folgende Analyse werden die im Stand der Technik analysierten Arbeiten mit einbezogen und auf die Glättung des Bildes begrenzt.

Autor	Arbeit	Glättung
Vykhtar et al.	[31]	3×3 Gaußfilter
Ye et al.	[34]	3×3 Rechteckfilters
Wu et al.	[6]	9×9 Medianfilter
Liu et al.	[16]	Butterworth-Filter
Xiong et al.	[33]	3×3 Gaußfilter

Tabelle 6.1: Vergleich der Glättungsfilter aus dem Stand der Technik

Anhand der Tabelle 6.1 wird schnell ersichtlich, dass hauptsächlich 3×3 Kernelfilter verwendet werden. So hat Ye et al. [34] den Rechteckfilter mit dem Medianfilter in Kernelgrößen von 3×3 bis 7×7 verglichen und vertritt den Standpunkt, dass ein 3×3 Rechteckfilter in Metall-Aktivgasschweiß-Prozess Rauschen stärker minimiert. Außerdem werden die Kernelgrößen 3×3 , 5×5 und 7×7 untersucht. Die Untersuchungen ergeben keine große Veränderung der Kanten und Rauschunterdrückung, weshalb, um die Rechengeschwindigkeit zu erhöhen, der 3×3 Rechteckkernel verwendet wird.

So verwendet diese Arbeit zur folgenden Analyse den Rechteckfilter, den Gaußfilter sowie den Medianfilter und untersucht die Unterschiede zwischen der 3×3 und 11×11 Kernelgröße. Die Begründung dafür ist, dass der Rechteckfilter die Eigenschaft besitzt Rauschen stark zu glätten, während der Gaußfilter einen ähnlichen Effekt, mit dem Unterschied der größeren Kantenerhaltung, erreicht. Der Medianfilter gilt ebenfalls als effektiver Kantenerhaltender Filter.

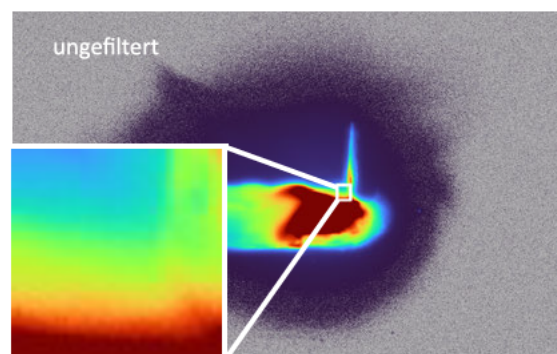


Abbildung 6.6: Bild in Pseudofarbdarstellung ohne Glättungsfilter

Auf dem Bild ist ein deutliches Rauschen zu erkennen, welches die spätere Kantendetektion stört. Es wird angenommen, dass jedes aufgenommene Bild Gaußesrauschen durch den Kamerasensor enthält, sowie eine durch das leuchtende Schmelzbad entstehende Ringförmige Störung. Um zu entscheiden, welches des Filterdesign Rauschen am effektivsten entfernt, werden die Algorithmen mittels des Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und der Entropie verglichen.

Nach Werner beschreibt das SNR das Verhältnis der Leistungen von Nutzsignal und Störsignal [32].

Nach Erhardt [9] ist das SNR wie folgt definiert:

$$SNR = 10\text{dB} \lg \frac{I_{\text{Signal}}}{I_{\text{Rauschen}}} \quad (6.1)$$

I_{Signal} beschreibt die Signalintensität und I_{Rauschen} die Rauschintensität. So ist I_{Signal} das ungefilterte Originalbild aus Abbildung 6.2, während nach Gleichung 6.1 I_{Rauschen} das mit additivem Rauschen gefiltertes Bild darstellt. Bezogen auf die Bildverarbeitung ist das SNR wie folgt definiert:

$$SNR = 10\text{dB} \cdot \lg \frac{g_\mu}{\sigma} \quad (6.2)$$

Hierbei beschreibt g_μ das Verhältnis des mittleren Grauwertes zur Standardabweichung σ [9].

Zur Ermittlung des Verhaltens der Filter wird weißes gaußsches Rauschen zum Bild addiert. Die Gleichung 6.2 wird nach σ umgestellt und jeweils mit 10 dB und 20 dB Rauschen addiert. Der Mittlere Grauwert beträgt $g_\mu = 0.0249$, so beträgt bei $SNR = 10\text{ dB}$ die Standardabweichung $\sigma \approx 0.0025$ mit einem $SNR = 20\text{ dB}$ ist $\sigma \approx 0.00025$. Bei einem $SNR = \infty$ wird das Bild ohne Addition von Rauschen mit den Bildglättungsfilttern verglichen.

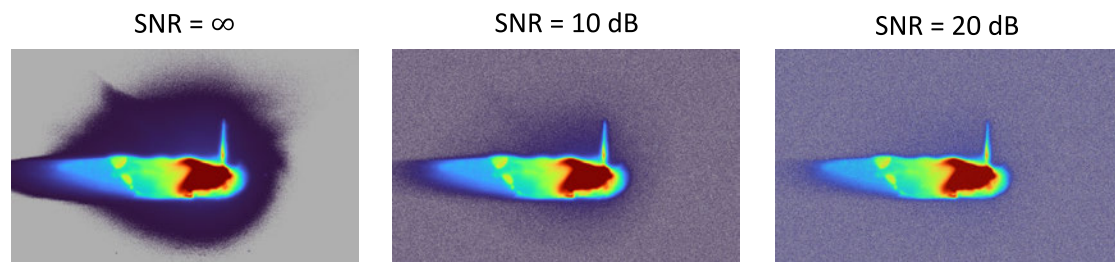


Abbildung 6.7: Bilder in Pseudofarbdarstellung mit 10 dB und 20 dB Rauschen im Vergleich

Die Entropie H kann aus dem Grauwert histogramm $h(g)$ abgeleitet werden und misst den Informationsgehalt eines Bildes. Die Entropie berechnet sich für ein Grauwertbild $S = (s(x, y))$ mit der Grauwertmenge $G = 0, 1, \dots, 255$ [18] mit

$$H = - \sum_{g=0}^{255} (h(g) \cdot \log_2(h(g))) \quad (6.3)$$

entnommen aus [18].

Daraus lässt sich annehmen, dass mittels der Entropie die Veränderung des Bildes durch das Anwenden der Filter messbar ist.

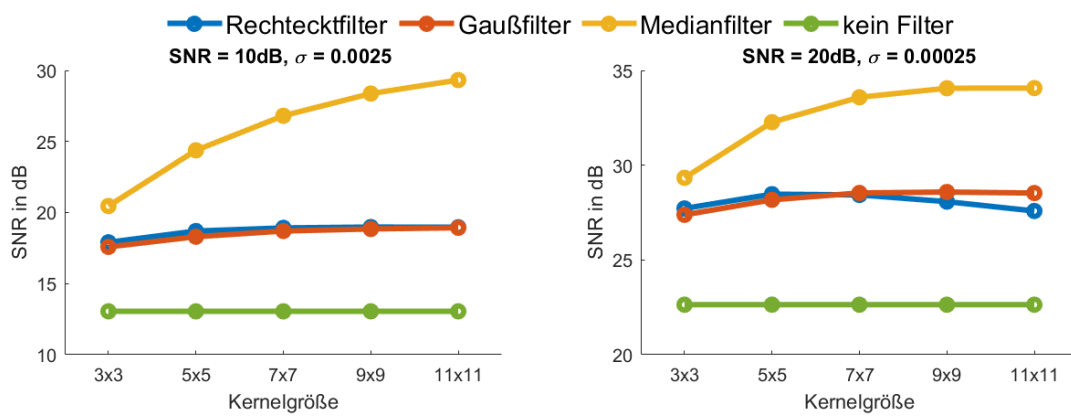


Abbildung 6.8: Vergleich der Bildglättung mittels SNR

Anhand der Grafiken 6.8 ist deutlich erkennbar, dass der Medianfilter mit jeder Kernelgröße das Rauschen stärker filtert, während der Gaußfilter und der Rechteckfilter ähnliche Ergebnisse erzielen.

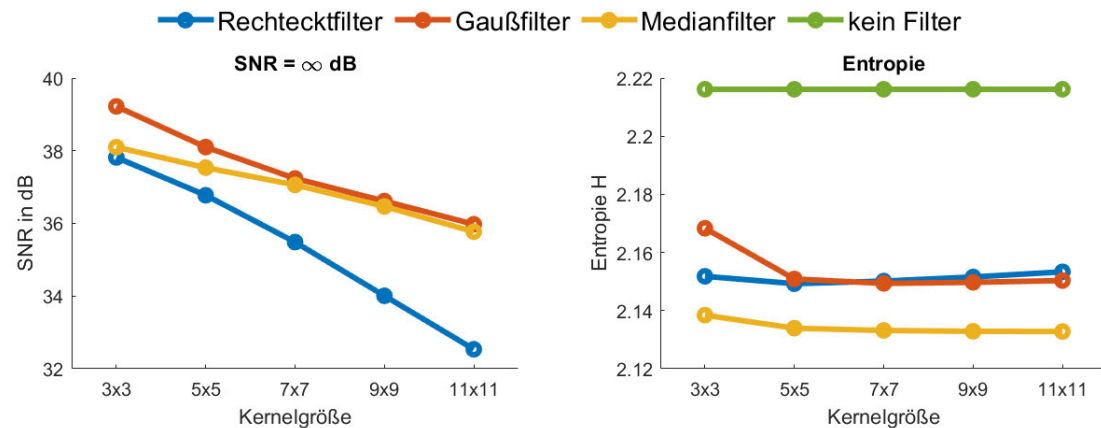


Abbildung 6.9: Vergleich der Bildglättung mittels SNR und Entropie

Die Grafik 6.9 mit $SNR = \infty$ vergleicht die Veränderungen im Originalbild durch das Anwenden von Glättungsfilttern. Hierbei ist auffällig, dass insbesondere der Rechteckfilter eine im Verhältnis starke Veränderung bei größer werdendem Kernel ausweist. Begründet wird dies mit immer größer werdender Kantenunschärfe, wodurch die Kanten unpräzise werden können. Der Rechteckfilter ist hierdurch nicht für größere Kernel geeignet, da es zu Informationsverlusten durch Kantenunschärfe kommen kann, die die späteren Kantenerhaltungsfilter beeinträchtigen. So weisen insbesondere der Medianfilter und der Gaußfilter, die als kantenerhaltende Filter fungieren, eine geringere Veränderung auf.

Die Grafik 6.9 Entropie vergleicht die Veränderungen im gefilterten Originalbild. Die größte Entropie weist das ungefilterte Bild auf, da hier das Rauschen den Informationsgehalt erhöht. Durch das Anwenden von Filtern sinkt dieser Informationsgehalt. Der Medianfilter zeigt die geringste Entropie auf. Die Veränderung der Entropie sinkt mit steigendem Kernel. Der größte sichtbare Unterschied des Informationsgehaltes ist zwischen 3×3 und 5×5 Kernel zu erkennen.

Unter Berücksichtigung der vier Abbildungen und der Erklärung nach Wu et al. [6], dass der Medianfilter Rauschen, Spritzer und Reflexionen des Lichtbogens eliminieren kann, wird der Medianfilter für die weitere Analyse betrachtet.

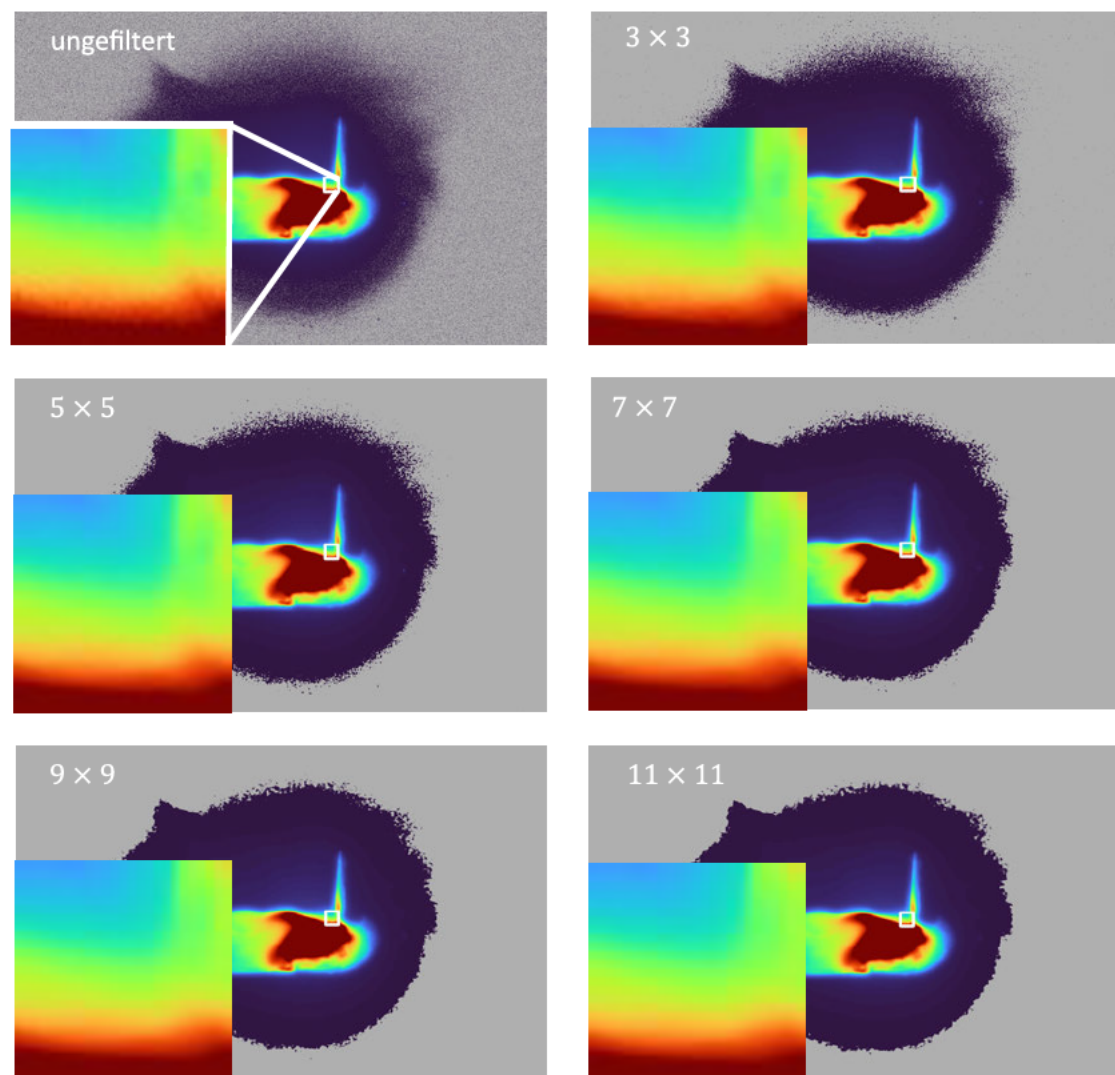


Abbildung 6.10: Vergleich der Rauschunterdrückung mittels Medianfilter

Die Abbildung 6.10 nutzt die veränderte Pseudodarstellung zur Darstellung des Rauschens, anhand derer deutlich erkennbar ist, dass das Anwenden eines 3×3 Kerns das Rauschen im Bild deutlich verringert. Dieser Kernel eliminiert das Rauschen nicht vollständig. Bei der Anwendung größerer Kernel ist eine Verbesserung des Bildes feststellbar, desto höher der gewählte Kernel jedoch ist, desto geringer ist die Verbesserung der Glättung. So ist nach einem 5×5 Kernel keine größere Verbesserung mehr erkennbar, weshalb diese Kernelgröße für die weitere Analyse verwendet wird.

6.3 Kantendetektion

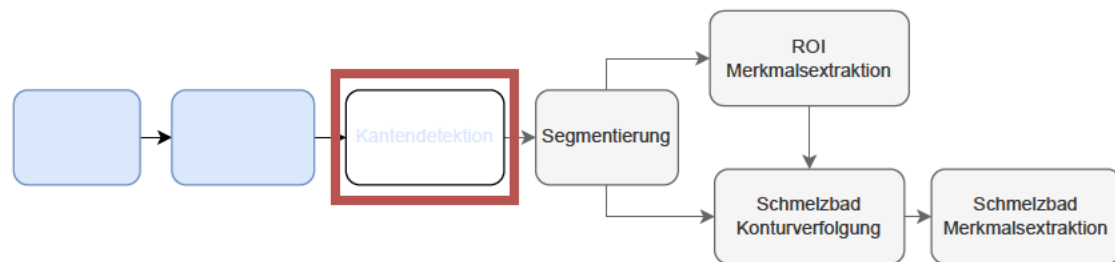


Abbildung 6.11: Aktueller Stand und folgende Analyse: Kantendetektion

Die nachfolgende Kantenerkennung ist nach Bredies ein wichtiger Teil zum Verstehen von aufgenommenen sowie verarbeiteten Bildern. So können Kanten Objekte vom Hintergrund trennen oder Aufschluss über die Geometrie geben [5]. Das Ziel der Kantendetektion ist somit das Identifizieren von Schmelzbadkanten und dient dem Zweck das Bild für die folgende Segmentierung vorzubereiten. Für die folgende Analyse werden die im Stand der Technik analysierten Arbeiten mit einbezogen und auf die Kantendetektion begrenzt.

Autor	Arbeit	Kantendetektion
Ye et al.	[34]	Sobel-Operator
Wu et al.	[6]	Canny-Algorithmus
Liu et al.	[16]	Canny-Algorithmus
Xiong et al.	[33]	Sobel-Operator

Tabelle 6.2: Vergleich der Kantendetektion aus dem Stand der Technik

Anhand der Tabelle 6.2 wird ersichtlich, dass hauptsächlich der Sobel-Operator und der Canny-Algorithmus zur Detektion der Kanten ausgewählt werden. Die Analyse der Arbeiten weist ein häufiges Vorkommen der Operatoren Sobel, Roberts, Prewitt, Laplace und den Canny-Algorithmus, die untereinander verglichen werden, auf.

Der Roberts-, Laplace-Operator sowie der Canny-Algorithmus sind nicht Teil dieser Arbeit, was daran liegt, dass der Roberts-Operator ein 2×2 Kernel ist, der die Diskretisierung der ersten Ableitung nutzt und die Kantendifferenz in diagonaler Richtung bestimmt. Somit erreicht der Roberts-Operator keine Glättung und verbleibt stark Rauschempfindlich [9]. Der Laplace-Operator verwendend die Diskretisierung der zweiten

Ableitung und ist ein richtungsunabhängiger 3×3 Kantefilter, jedoch ist nach Beyrer dieser Filter ebenfalls sehr Rauschempfindlich, da er ebenfalls keine Glättung vornimmt [2]. So ist der Canny-Algorithmus eine Zusammensetzung mehrerer Algorithmen mit dem Ziel, keine Kanten zu übersehen und keine Kanten zu detektieren, wo sich keine Kante befindet. Hierdurch wird zuerst das Bild mit einem Gaußschen Kernel gefiltert, anschließend findet eine Kantendetektion, wie im Stand der Technik erläutert, statt. Verwendet werden nach Nischwitz die Kantefilteroperatoren Robert's Cross-, Prewitt- oder der Sobel-Operator. Zuletzt findet ein Kantentracking statt, in welchem mittels einer Nicht-Maxima-Unterdrückung und einer Hysterese die Kanten erzeugt werden. Die Hysterese benötigt zur Ermittlung der Kanten zwei gegebene Schwellwerte [18].

So nutzen Da Wu et al. [6] und Liu und Zhao [16] den Canny-Algorithmus mit selbst gesetzten Schwellwerten. Xiong und Zhang beschreiben in ihrer Arbeit [33], dass der Sobel-Operator dem Canny-Algorithmus überlegen ist und Ye et al. [34] beschreibt ebenfalls, dass der Sobel-Operator die Kanten besser detektiert und der Canny-Algorithmus mehr Rauschkanten erkennt.

So erfordert der Canny-Algorithmus besonders genau gesetzte Schwellwerte, um eine gute Kantenextraktion zu gewährleisten. Nach aktuellem Stand ist kein automatisches Schwellwertverfahren bekannt, weshalb der Canny-Algorithmus in der weiteren Analyse ausgeschlossen wird.

Für die weitere Analyse der Kantendetektion werden die Operatoren Prewitt, Sobel und der Scharr verwendet.

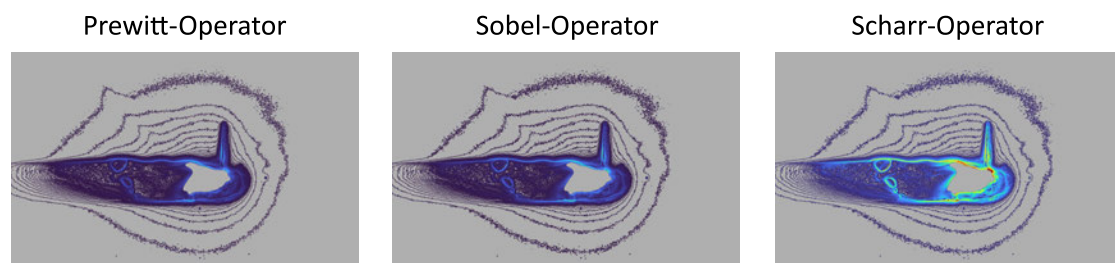


Abbildung 6.12: Kantendetektion mit 5×5 Medianfilter

Die Abbildung 6.12 zeigt die Kantendetektion mit einem 5×5 Medianfilter. Das Ringförmige Rauschen lässt sich mit keinem der hier verglichenen Glättungskernel vollständig eliminieren. Da die Kantendetektion bei den drei vorgestellten Operatoren nach dem selben Prinzip der ersten Ableitung berechnet werden, sind keine großen Unterschiede zu erwarten. So weisen der Prewitt- und Sobel-Operator kaum unterscheidbare Ergebnisse auf. Der Scharr-Operator zeigt eine deutlich stärkere Rotationssymmetrie und Kantenstärke auf.

Ein wichtiger Aspekt für die folgende Segmentierung ist die Stärke der Kanten. So muss die Kantenstärke einen möglichst hohen Wert im Vergleich zum Rauschen aufweisen, um das Rauschen effektiv eliminieren zu können. Im Vergleich dazu weist der Scharr-Operator die stärksten Kanten auf.

Eine Methode zur Bewertung von Kantendetektionsalgorithmen beschreiben Khaire und Thakur in [21]. Diese Arbeit verwendet Ground Truth Bilder zum Vergleichen der Algorithmen. Der Begriff Ground Truth beschreibt ein Bild, welches das ideale Kantenbild beinhaltet. Zur Analyse wird das Spitzen-Signal-Rausch-Verhältnis (PSNR) und das Leistungsverhältnis (PR) von echten zu falschen Kanten berechnet. Nach Khaire und Thakur soll die die Anzahl der falschen Kanten gering sein und die Erkennung der echten Kanten maximal. Das Leistungsverhältnis ist wie folgt definiert:

$$PR = \frac{\text{echte Kanten}}{\text{falsche Kanten}} \quad (6.4)$$

Die echten Kanten sind die aus dem Ground Truth Bild definierten Kanten und die Falschen Kanten sind alle Kanten und Bildpunkte, die nicht erkannt worden sind oder nicht auf den Echten Kanten liegen. Diese Arbeit wählt denselben Ansatz zur Bewertung der Kantendetektionsalgorithmen mittels Leistungsverhältnis.



Abbildung 6.13: Geschätztes Ground Truth Bild

Die Abbildung 6.13 veranschaulicht ein Ground Truth Bild, welches mittels der ermittelten Kantendetektionsalgorithmen nachgezeichnet worden ist. Da der hier bestimmte Ground Truth nur eine Nachzeichnung ist, dient die nachfolgende Analyse zur Schätzung. Da die Bestimmung des Schwellwertes zur Segmentierung gehört und der geeignete Schwellwert noch unbekannt ist, wird in der folgenden Abbildung ein Vergleich zwischen den Schwellwerten 0 bis 255 unternommen.

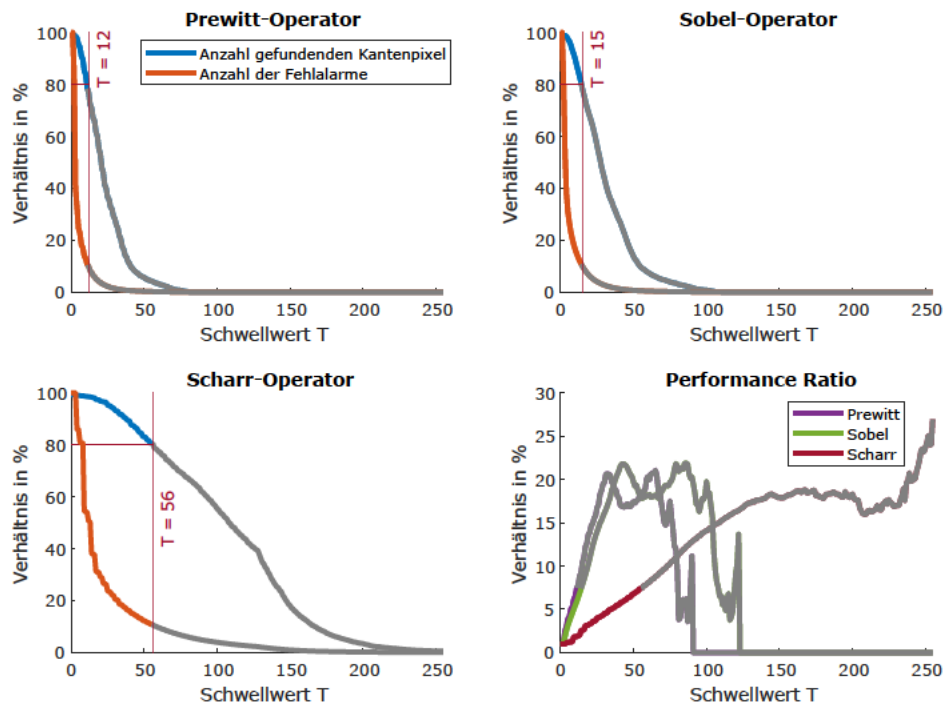


Abbildung 6.14: Vergleich der Kantendetektionsalgorithmen mittels Leistungsverhältnis

Die Abbildung 6.14 beschreibt das Verhältnis der gefundenen Kantenbildpunkte und der fehlerbehafteten Kantenbildpunkte. Es sei jedoch angemerkt, dass insbesondere ein Schwellwert von 0 das gesamte Rauschen einbezieht, weshalb alle Diagramme eine hohe Anzahl an gefundenen Kantenpixel sowie eine hohe Anzahl an fehlbestimmten Bildpunkten hat. Durch das Erhöhen des Schwellwertes sinkt das Rauschen und die zu ermittelnden Kanten werden sichtbar. Ein zu hoher Schwellwert führt dazu, dass das Verhältnis der echten Kante zur falschen Kante steigt, wobei die Merkmale der Schmelzbadränder verschwinden. Aus diesem Grund wird die Anzahl der gefundenen Kantenpixel auf 80% begrenzt und beobachtet.

Die Grafiken mit der Überschrift Prewitt- und Sobel-Operator zeigen im Vergleich zum Scharr-Operator eine stark fallende Tendenz. So haben die beiden Operatoren, durch eine zu geringe Kantenhelligkeit nur einen sehr schmalen Schwellwertbereich, in denen das Schmelzbad gut sichtbar ist. Der Scharr-Operator hingegen weist durch die bessere Rotationsinvarianz eine deutlich langsamer fallende Kantenhelligkeit auf. So weisen alle drei Kantendetektionsalgorithmen dasselbe Leistungsverhältnis bei der Anzahl der ge-

fundenen Kantenpixel von 80% auf, nur ist der Schwellwert durch die Kantenhelligkeit verschoben. Aufgrund der Erkenntnisse, dass der Scharr-Operator eine höhere Unempfindlichkeit bei der Wahl des Schwellwertes vorweist, wird dieser zur folgenden Segmentierung verwendet.

6.4 Segmentierung des Schmelzbades

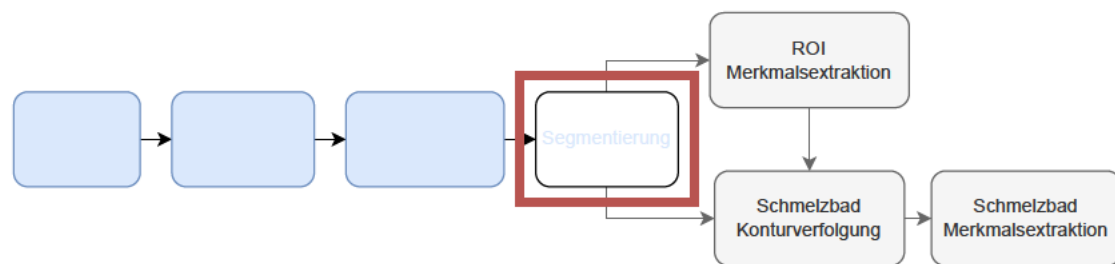


Abbildung 6.15: Aktueller Stand und folgende Analyse: Segmentierung

Die Segmentierung des Bildes hat das Ziel, das Bild in eindeutige Segmente zu unterteilen. Für die folgende Analyse werden die im methodischem Vorgehen analysierten Arbeiten mit einbezogen und auf die Segmentierung des Bildes begrenzt.

Autor	Arbeit	Segmentierung
Vykhtar et al.	[31]	Binarisierung
Ye et al.	[34]	Hough Transformation
Purrio	[20]	Binarisierung
Wu et al.	[6]	Canny-Algorithmus
Liu et al.	[16]	Canny-Algorithmus
Xiong et al.	[33]	Hough-Transformation

Tabelle 6.3: Vergleich der Segmentierungsverfahren aus dem Stand der Technik

Die Analyse der Arbeiten ergibt, dass die Schmelzbadaufnahmen in den wissenschaftlichen Arbeiten in wiederkehrenden Verfahren segmentiert werden, jedoch weicht die Wahl des Segmentierungsalgorithmus von den Gegebenheiten der Aufnahme ab.

So ist der Canny-Algorithmus durch die Zusammenschaltung mehrerer Algorithmen auch

ein Teil der Segmentierung, wird jedoch aus den oben genannten Gründen nicht weiter betrachtet.

Die Arbeiten Ye et al. [34] und Xiong und Zhang [33] verwenden die Hough Transformation zur Segmentierung. Das Ziel der Hough Transformation ist das Finden von geometrischen Strukturen. Die Hough Transformation ist somit ein Verfahren für die Erkennung von Geraden, Kreisen, Ellipsen und beliebigen anderen Formen. Der Algorithmus transformiert das kartesische Koordinatensystem des Bildes in die Polarkoordinaten um und sucht für jeden Punkt im Bild die vorgegebene Form [18]. Die Hough Transformation wird somit ebenfalls für die weitere Analyse ausgeschlossen, weil die zu wählenden Formenparameter im Voraus festgelegt werden müssen.

6.4.1 Allgemeine Binarisierung

Aufgrund der genannten Umstände wählt diese Arbeit für die weitere Analyse die Binarisierung aus.

Aus Abbildung 6.14 kann ein Schwellwert abgeschätzt werden, der bei einem Grauwert von 50 liegt. Der Schwellwert 50 besitzt über 80% der aus dem Ground Truth gezeichneten Bildpunkte bei stark fallender Anzahl der Fehlalarme.

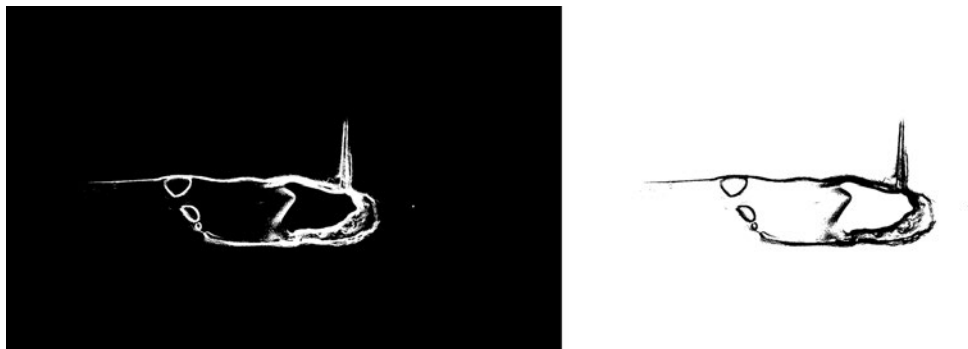


Abbildung 6.16: Binärbild mit Schwellwert 50 und invertiertes Bild

Zur Leichtereren Erkennung der Kantenbildpunkte werden folglich alle Binärbilder invertiert. Die folgende Abbildung 6.17 veranschaulicht die Veränderung durch Setzen verschiedener Schwellwerte.

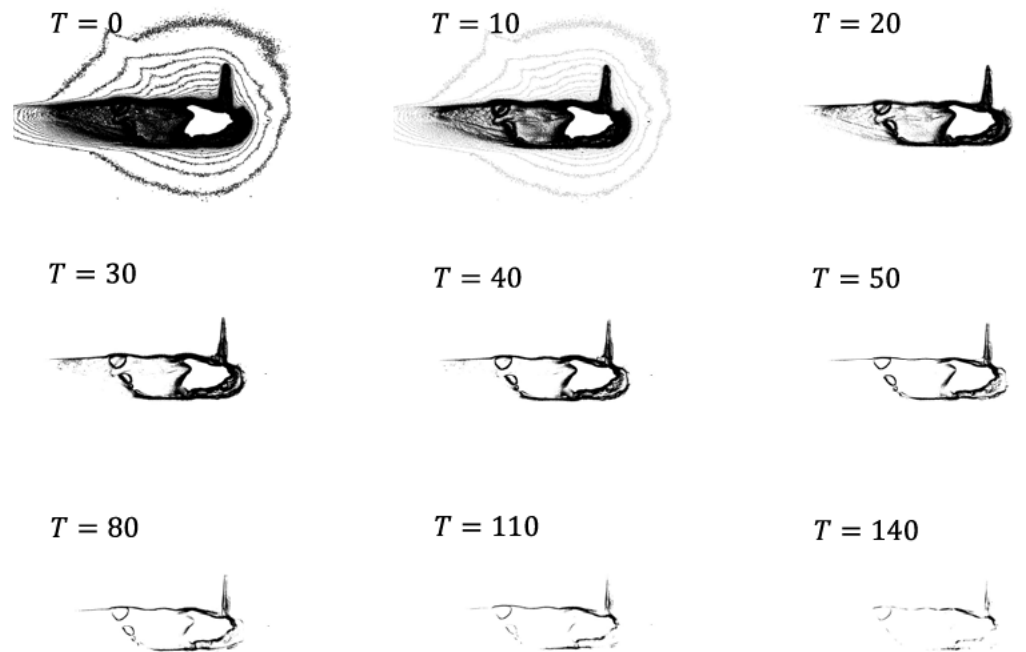


Abbildung 6.17: Vergleich der Binärbilder mit unterschiedlichen Schwellwerten

In der Abbildung 6.17 wird die Veränderung des segmentierten Schmelzbades in Abhängigkeit zum Schwellwert sichtbar. Es wird deutlich, dass die Schwellwerte 0 bis 20 Rauschen enthalten, während die Schwellwerte zwischen 30 bis 50 als ideal angenommen werden. Ein Schwellwert von über 50 führt zu höheren Verlusten in der Geometrie des Schmelzbades.

6.4.2 Binarisierung mittels Schwellwertverfahren

Schwellenwertverfahren sind Algorithmen zur Segmentierung digitaler Bilder. Das Ziel eines Schwellwertverfahrens ist die automatische Ermittlung des Schwellwertes zur Binarisierung.

Dafür werden folgende Schwellwertverfahren in Betracht gezogen:

Autor	Arbeit	Segmentierung
Vykhtar et al.	[31]	Minimum
Ye et al.	[34]	Mean
Zack et al.	[35]	Triangle
Ridler et al.	[23]	IsoData

Tabelle 6.4: Übersicht der zu analysierenden Schwellwertverfahren

Die Schwellwertverfahren Minimum und Mean sind Verfahren, die aus dem Stand der Technik zur Segmentierung genutzt werden. Die Schwellwertverfahren Triangle und IsoData sind altbewährte Verfahren zur Schwellwertberechnung.

Die nachfolgende Aufgabe ist die Analyse der Histogrammschwellwertverfahren zur Bestimmung des Schwellwertes.

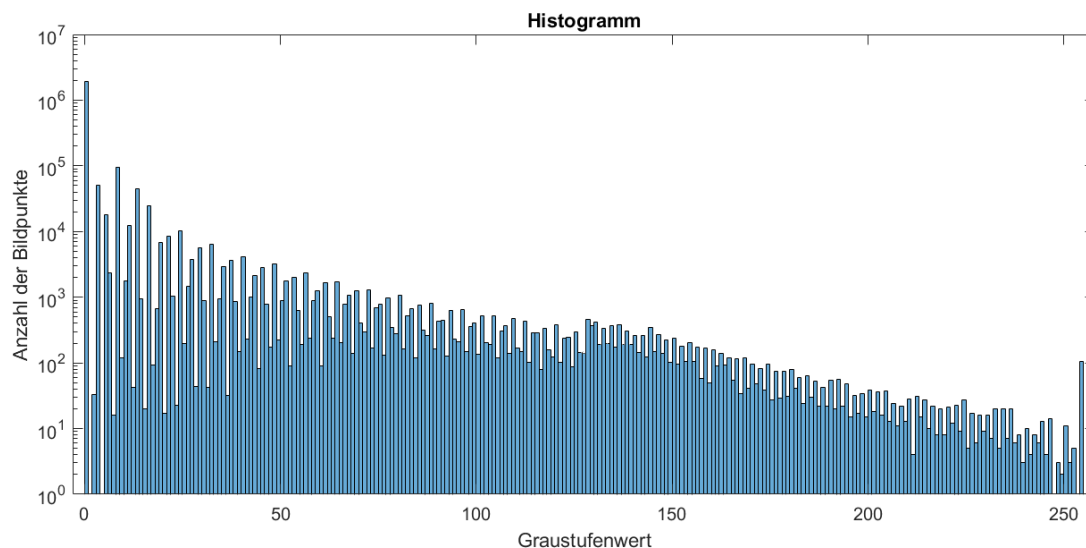


Abbildung 6.18: Histogramm des Kantenbildes mit logarithmischer Y-Achse

Die Abbildung 6.18 zeigt das Histogramm des Kantenbildes mit Logarithmischer Skalierung. Die Herausforderung der Schwellwertverfahren ist die richtige Detektion des Schwellwertes trotz der sehr hohen Anzahl schwarzer Bildpunkte und der sehr geringen Anzahl an hellen Bildpunkten.

Minimum

Das Schwellwertverfahren Minimum nach Prewitt und Mendelsohn [19] setzt ein Bimodales Histogramm voraus und berechnet das lokale Minimum zwischen den beiden lokalen Maxima. Das Schwellwertverfahren glättet das Histogramm, bis ein einziges lokales Minimum übrigbleibt.

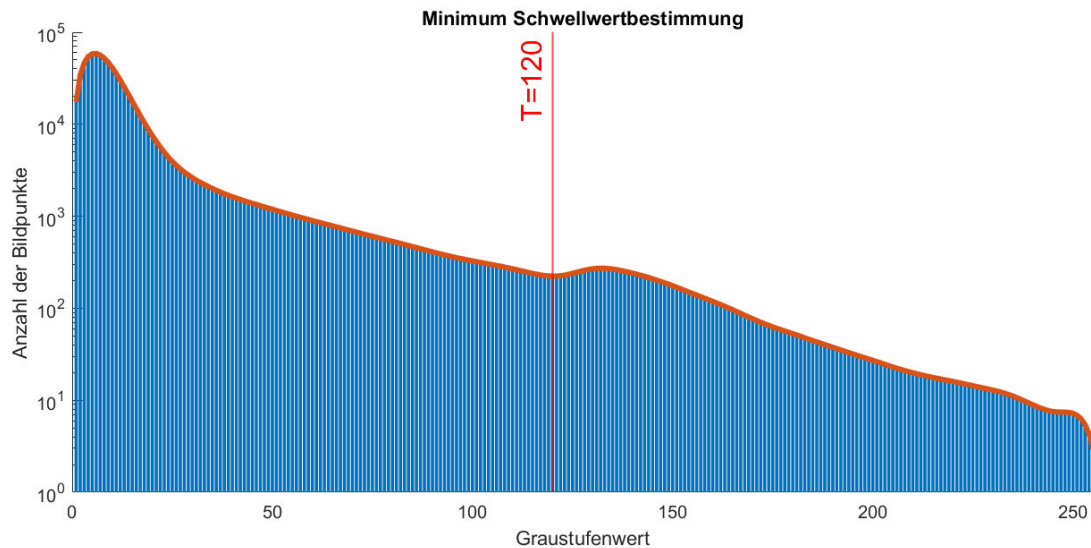


Abbildung 6.19: Geglättetes Histogramm nach dem Minimum-Algorithmus

Anhand der Abbildungen 6.18 und 6.19 wird deutlich, dass dieses Schwellwertverfahren nicht geeignet ist, da das Kantenbild kein eindeutiges Bimodales Histogramm darstellt.



Abbildung 6.20: Binarisierung mit Schwellwert $T = 120$

Mean

Das Schwellwertverfahren Mean oder auch Mittelwert der Grauwerte des Bildes wird in [34] beschrieben. Bei diesem Verfahren wird als Schwellwert der Arithmetischer Mittelwert verwendet. Das Verfahren ist bei einem Kantenbild $K = k(x, y)$ mit C Spalten und R Zeilen wie folgt definiert.

$$T = \frac{1}{R \cdot C} \sum_{x=0}^{C-1} \sum_{y=0}^{R-1} k(x, y) \quad (6.5)$$

Die Berechnung 6.5 führt zu einem Schwellwert $T = 3$. Durch den sehr hohen Anteil an schwarzen Bildpunkten im Kantenbild ist dieses Verfahren nicht geeignet.

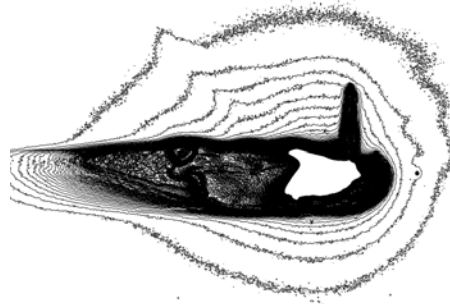


Abbildung 6.21: Binarisierung mit Schwellwert $T = 3$

Triangle

Das Schwellwertverfahren Triangle ist eine geometrische Methode zur Bestimmung des Schwellwertes. Der Algorithmus sucht nach dem größten Maxima im Histogramm. Ausgehend von diesem Punkt wird nach Zack et al. [35] das andere Ende des Histogramms mit dem Punkt verbunden. Die Richtung ist hier vorgeschrieben. Ausgehend von dieser Verbindung wird die Distanz orthogonal ermittelt. Der Schwellwert T ist die Stelle an der die Distanz d am größten ist.

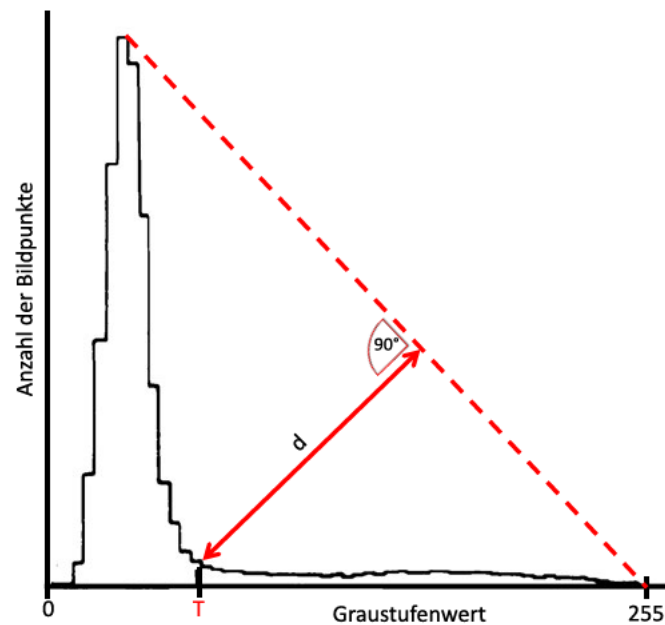


Abbildung 6.22: Vorgehensweise des Triangle Algorithmus, in Anlehnung an [35]

Die Abbildung 6.22 veranschaulicht dieses Verfahren. Das Ausführen des Schwellwertverfahrens berechnet einen Schwellwert von $T = 2$. Durch die unregelmäßige Verteilung des Schwarzanteils im Kantenbild, siehe Abbildung 6.18 mit Grauwert = 1, beinhaltet dieser genau 0 Bildpunkte. Dieses Verfahren eignet sich nicht für unregelmäßig verteilte Grauwerte, wodurch es sich nicht zur Segmentierung eignet.

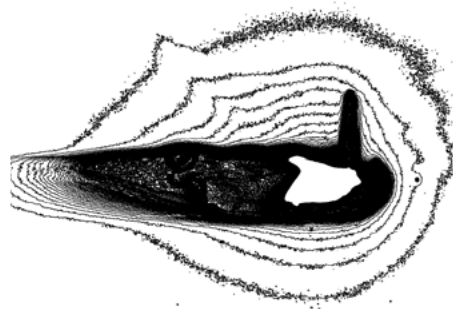


Abbildung 6.23: Binarisierung mit Schwellwert $T = 2$

Isodata

Das Schwellwertverfahren Isodata aus [23] berechnet den Schwellwert T mit dem arithmetischen Mittel der Grauwerte und dem Schwerpunkt des Histogramms. Das Histogramm wird in zwei Gruppen unterteilt, m_L und m_H , welches als Hintergrund und Objekt beschrieben werden kann. Diese Unterscheidung findet mit einem gewählten Schwellwert statt und wird iterativ wiederholt, bis die folgende Bedingung wahr ist [22].

Der Schwellwert T ist nach [22] definiert als:

$$T = \frac{m_L + m_H}{2} \quad (6.6)$$

m_L und m_H sind die gewichteten Mittelwerte. Der gewichtete Mittelwert ist wie folgt definiert mit dem Grauerthistogramm $h(x)$:

$$\mu = \frac{\sum x_k h(x_k)}{\sum h(x_k)} \quad (6.7)$$

Es ist zu beachten, dass m_L und m_H eine Funktion über t beschreiben, angepasst an $m_L(t)$ und $m_H(t)$:

$$m_L(t) = \frac{\sum_{k=0}^t kh(k)}{\sum_{k=0}^t h(k)} \quad (6.8)$$

$$m_H(t) = \frac{\sum_{k=t}^{255} kh(k)}{\sum_{k=t}^{255} h(k)} \quad (6.9)$$

Der Schwellwert T berechnet sich somit über folgende Gleichung:

$$T(t) = \frac{m_L(t) + m_H(t)}{2} = m(t) \quad (6.10)$$

So ist der zu bestimmende Schwellenwert der Durchschnitt der beiden Funktionen m_L und m_H an der Stelle T .

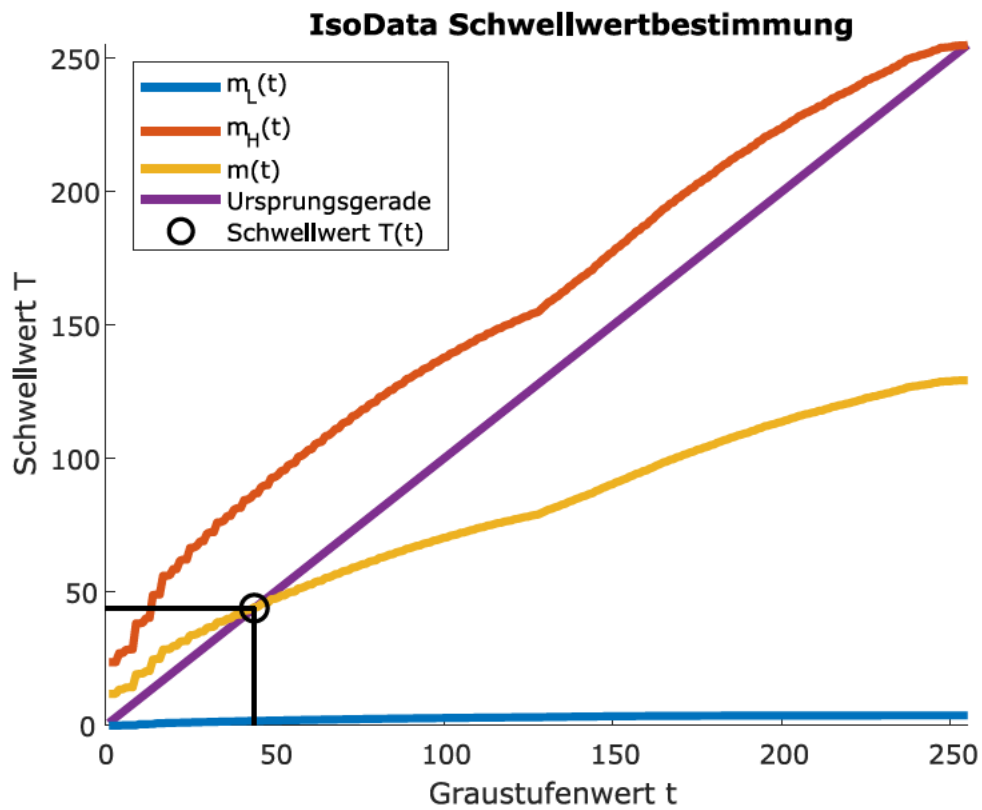


Abbildung 6.24: Visualisierung der in Isodata verwendeten Funktionen

Die Gleichung 6.10 erfüllt die Bedingung bei einem Schwellwert von $T = 44$.



Abbildung 6.25: Binarisierung mit Schwellwert $T = 44$

Das Schwellwertverfahren Isodata wird für die Segmentierung verwendet, weil durch die Aufteilung des Histogramms in Hintergrund und Objekt der Schwellwert richtig bestimmt

wird. Der hohe Schwarzanteil des Kantenbildes wird in der Berechnung zur Bestimmung des Schwellwertes berücksichtigt. Es sei jedoch anzumerken, dass der Schwellwert nicht bestimmbar ist, wenn die Ursprungsgerade sich mit $m(t)$ zu keinem Zeitpunkt schneidet.

6.4.3 Konturverfolgung des Schmelzbades

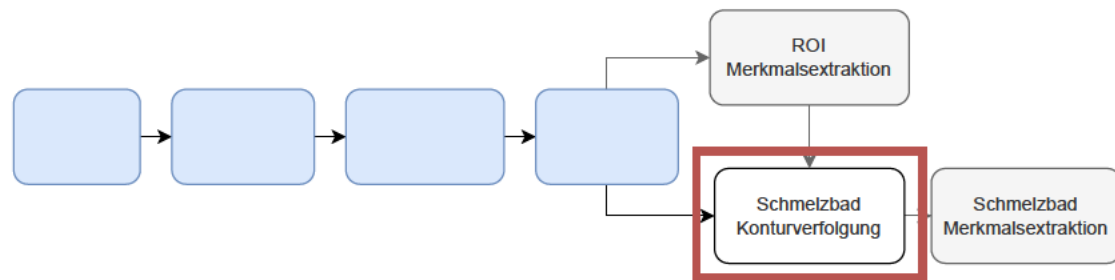


Abbildung 6.26: Aktueller Stand und folgende Analyse: Konturverfolgung

Die Konturverfolgung hat das Ziel, die Schmelzbadkanten aus dem binarisierten Bild zu extrahieren und ist somit ein Teil der Segmentierung. Für die folgende Analyse werden die im methodischen Vorgehen analysierten Arbeiten mit einbezogen und auf die Konturverfolgung des Bildes begrenzt.

Autor	Quelle	Konturverfolgung
Vykhtar et al.	[31]	Achternachbarschaft
Purrio	[20]	Achternachbarschaft
Xiong et al.	[33]	Geradenapproximation

Tabelle 6.5: Vergleich der Konturverfolgung aus dem Stand der Technik

Die Analyse der Arbeiten ergibt, dass Binarisierte Bilder mithilfe der Achternachbarschaft die Informationen aus dem Bild extrahieren. Xiong et al. nutzt die Hough Transformation zusammen mit einer Geradenapproximation zur Extraktion der Merkmale. Die von Xiong et al. verwendete Methode ist hier nicht anwendbar, weil sich die Merkmale nicht mittels einer Geradenapproximation ermitteln lassen.

Im Folgenden wird die Achternachbarschaft aus dem Stand der Technik und die Methode mittels zufälliger Punkten aus den Grundlagen an das Segmentierte Bild mit einem Schwellwert von $T = 44$ angewandt.



Abbildung 6.27: links Konturverfolgung mit der Achternachbarschaft und rechts mittels zufälliger Punktemenge

Keine der in der Abbildung 6.27 vorgestellten Methoden bietet eine vollständige Konturextraktion des Schmelzbades an. Die Achternachbarschaft hat den Vorteil, möglichst genau die Kanten extrahieren zu können, ist jedoch stark anfällig gegenüber Lücken im Segment und bietet somit keine zuverlässige Konturdetektion. So kann es vorkommen, dass nur Teile des Schmelzbades extrahiert werden.

Die Konturverfolgung mittels zufälliger Bildpunkte ist für diese Vorgehensweise der Segmentierung ebenfalls ungeeignet. Aufgrund der Erstellung eines Kantenbildes und der folgenden Segmentierung sind nur die Konturmerkmale von Bedeutung. Hiermit werden jedoch auch Bildpunkte außerhalb der Kontur miteinbezogen.

So erfordert die Konturextraktion des Schmelzbades eine eigene Entwicklung.

6.5 Merkmalsextraktion zur ROI-Bestimmung und der Schmelzbadanalyse

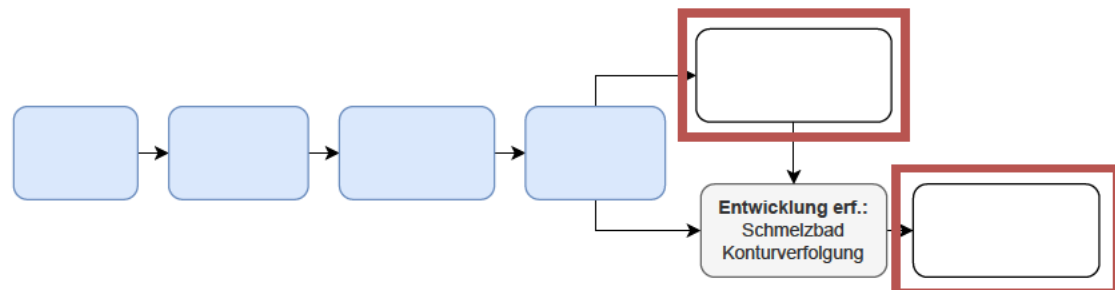


Abbildung 6.28: Aktueller Stand und folgende Analyse: Merkmalsextraktion

Die Merkmalsextraktion hat das Ziel, die extrahierten Merkmale eindeutig zu beschreiben. Für die folgende Analyse werden die im methodischen Vorgehen analysierten Arbeiten mit einbezogen und auf die Merkmalsextraktion des Bildes begrenzt.

Autor	Quelle	Merkmalsextraktion
Vykhtar et al.	[31]	Ellipse
Purrio	[20]	Schwerpunkt

Tabelle 6.6: Vergleich der Merkmalsextraktion aus dem Stand der Technik

Die Analyse der Arbeiten ergibt, dass beide Merkmalsextraktionen zur Beschreibung des Schmelzbades verwendet werden. So verwenden Vykhtar und Richter [31] eine Approximation mittels Ellipse zur Beschreibung der Schmelzbadgeometrie. Purrio [20] berechnet den Schwerpunkt zur Beschreibung von Veränderungen.

Die Auswahl der Merkmalsextraktion ist abhängig von der Entwickelten Konturverfolgung, weshalb die Wahl der verwendeten Methode im späteren Kapitel auffindbar ist. Keine der im Stand der Technik beschriebenen Arbeiten hat eine Methode zur Ermittlung des ROIs vorgestellt, weshalb hier ebenfalls eine eigene Entwicklung notwendig ist.

7 Entwicklung und Implementierung von Algorithmen zur Beobachtung der Schmelzbadstabilität im CMT-Prozess

Die Entwicklung von Algorithmen wird für die Merkmalsextraktion des ROI und der Konturverfolgung aus den segmentierten Bildern benötigt. Hierfür werden zwei unabhängige Algorithmen entwickelt. Zuerst wird ein Konzept zur Bestimmung des ROI's vorgestellt und erarbeitet, hiernach findet die Konturverfolgung aus dem Bild anhand des ermittelten ROI's statt.

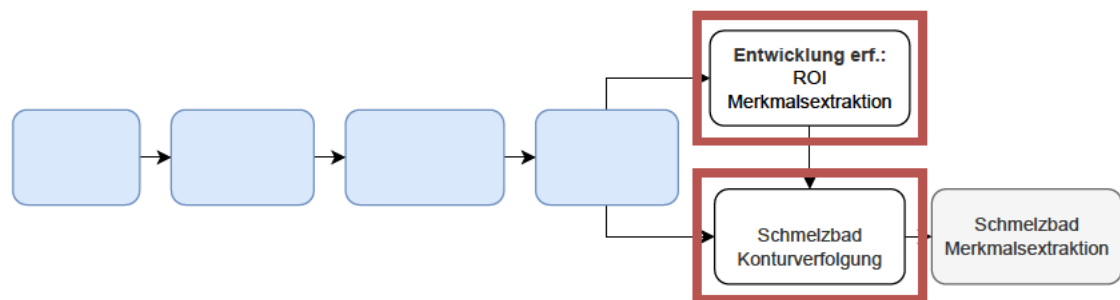


Abbildung 7.1: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Entwicklung von Algorithmen

7.1 ROI Merkmalsextraktion

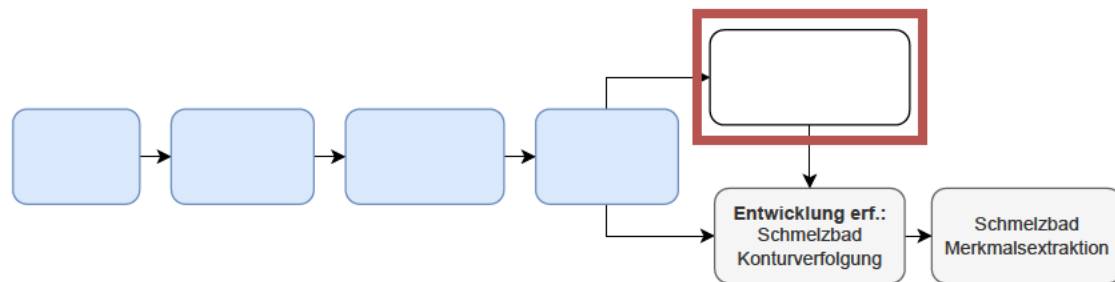


Abbildung 7.2: Entwicklungsstand der Arbeit: ROI Merkmalsextraktion

Die Bestimmung des Merkmals der ROI lässt sich, bei der Annahme eines geraden Rechteckigen ROIs, in die Bestimmung der Schmelzbadanfang, -ende und -breite unterteilen, sowie die Ermittlung des reflektierenden Drahtes.

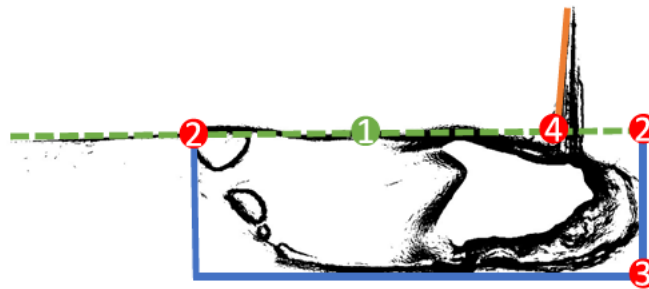


Abbildung 7.3: Ermittlungbare Punkte zur Bestimmung des ROIs und des Drahtes

Die Abbildung 7.3 beschreibt die Informationen, die aus Bild gewonnen werden können. Das Ziel ist die Entwicklung einer richtungsabhängigen Bestimmung des ROIs, wodurch die vier markierten Bildpunkte in einer Bildfolge eine ähnliche Position aufweisen. Die dafür genutzte Methode basiert auf der von Purrio vorgestellten Methode namens Linescans [20]. Diese Arbeit umfasst eine eigene Entwicklung eines Algorithmus zur Bestimmung des ROIs.

Die Entwicklung des ROIs lässt sich in folgende Schritte unterteilen, die Nummerierung bezieht sich auf die in Abbildung 7.3 gezeigten Punkte.

1. Die Bestimmung einer Geradenannäherung der oberen Schmelzbadkante. Die zu ermittelnden Bildpunkte werden mittels Linescan vom oberen Bildrand bis zum

- ersten gefunden weißen Pixel gestartet. Dies wird so lange wiederholt, bis das gesamte Bild analysiert wurde, hierbei wird der erste weiße Pixel aus jeder Spalte zwischengespeichert. Mittels der gefundenen weißen Pixel wird eine Gerade approximiert. Alle weiteren Berechnungen basieren auf dieser ermittelten Geraden.
2. Die Bestimmung des Schmelzbadanfangs und -endes wird mittels eines steilen Werteaufstiegs der Schmelzbadbreite ermittelt. Unter Berücksichtigung der Geraden wird ein Linescan Reihe für Reihe mit dem veränderten Startpunkt unter den Geraden gestartet. Im Linescan wird somit der letzte gefundene weiße Bildpunkt gespeichert. Die algorithmische Bestimmung des Schmelzbadrandes und somit der größten Veränderung der Schmelzbadbreite wird mithilfe der in der Analyse besprochenen Methode namens Triangle gestartet.
 3. Die Bestimmung der Schmelzbadbreite berechnet sich ausgehend vom Schmelzbadanfang und -ende (Punkt 2) und unter Berücksichtigung der linearen Geraden (Punkt 1). Die Schmelzbadbreite wird durch Mittelung bestimmt.
 4. Die Bestimmung des Schnittpunktes zwischen der Geraden aus Punkt 1 und der ermittelten Gerade des Drahtes. Dafür wird ein linksbündiger Linescan der Zeilen angefangen. Die Suche bricht ab, wenn die ermittelte Gerade aus Punkt 1 getroffen wird. Die so ermittelten Drahtbildpunkte werden zu einer Geraden angenähert und der Schnittpunkt zum Schmelzbadrand berechnet. Die Berechnung des Schnittpunktes hat das Ziel, den Draht so nah wie möglich am Schmelzbad zu entfernen, ohne Teile des Schmelzbad selbst zu entfernen.

7.2 Implementierung des ROIs an einem Einzelbild

Bestimmung der Gerade

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf Punkt 1 in Abbildung 7.3. Mittels der OpenCV Funktion `cv::fitLine()` werden die durch den Linescan gesammelten Bildpunkte zu einer Geraden approximiert. Das Verfahren verwendet zur Approximation die Methode der kleinsten Quadrate. Der Rückgabewert der Funktion hat vier Funktionsparameter $[v_x, v_y, x_0, y_0]$ mit der Beziehung:

$$(x, y) = (x_0, y_0) + t \cdot (v_x, v_y) \quad (7.1)$$

Diese werden zur leichteren Handhabung umgerechnet in $y = m \cdot x + b$ mit:

$$m = \frac{v_y}{v_x} \quad (7.2a)$$

$$b = y_0 - m \cdot x_0 \quad (7.2b)$$

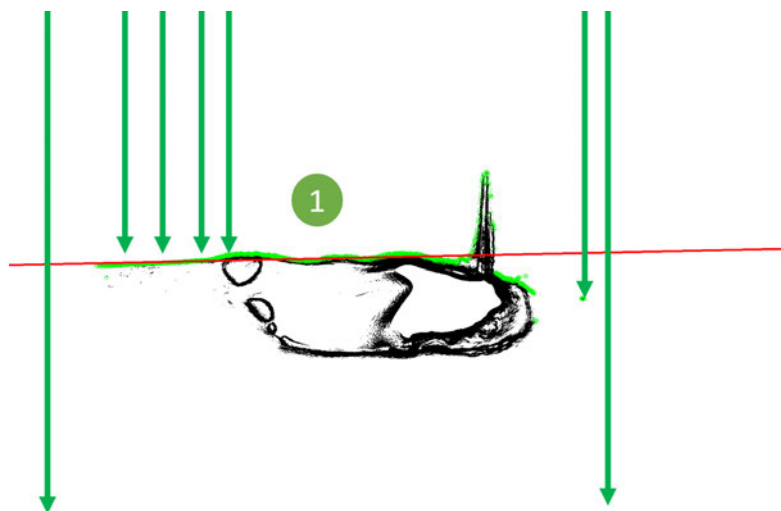


Abbildung 7.4: Funktionsweise der ROI Ermittlung

Bestimmung des Schmelzbadanfangs und -endes

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf Punkt 2 in Abbildung 7.3. Die Bestimmung des Schmelzbadanfangs und -endes setzt eine korrekt approximierte Gerade voraus. Aus-

gehend von dieser Geraden findet die Messung des Schmelzbades statt. Das Schmelzbad wird aus dem zweidimensionalen Bild in ein eindimensionales umgerechnet. Die approximierte Geraden dient als variable x-Achse und mittels Linescan wird die maximale Höhe bestimmt. Dadurch bestimmt sich eine Verteilung des Bildes, in denen die Veränderung von Höhen sichtbar ist.

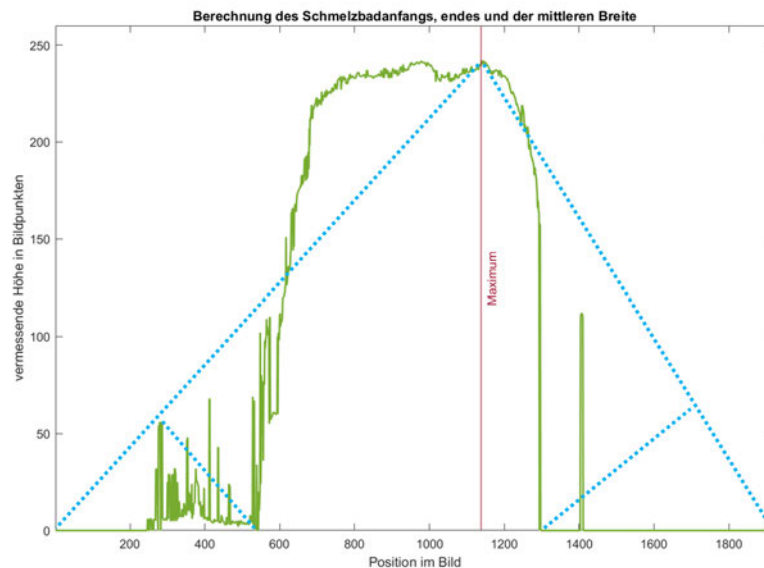


Abbildung 7.5: Eindimensionale Umrechnung der ermittelten Höhen

Die Abbildung 7.5 beschreibt die Vorgehensweise dieser Methode. Das Schmelzbad ist durch starke Kanten sichtbar, wodurch eine schnelle Veränderung der Schmelzbadbreite stattfindet. Diese ermittelte Verteilung lässt sich nun mittels des Triangle Algorithmus zur Bestimmung der größten Veränderung nutzen.

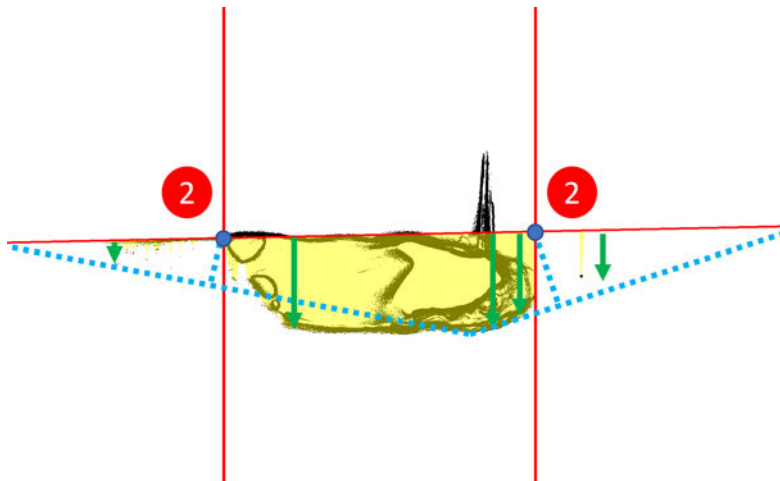


Abbildung 7.6: Funktionsweise der ROI Ermittlung

Bestimmung der Schmelzbadbreite

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf Punkt 3 in Abbildung 7.3. Nach Ermittlung des Schmelzbadanfangs und -endes wird zwischen den beiden ermittelten Positionen die mittlere Höhe berechnet und als Schmelzbadbreite angenommen.

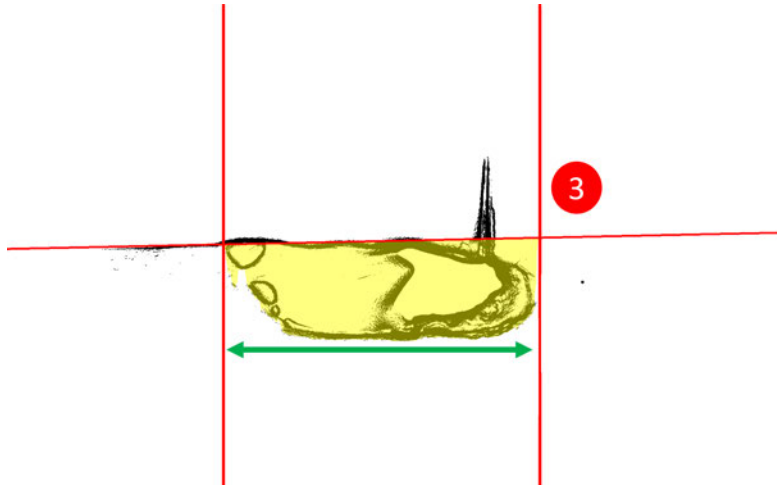


Abbildung 7.7: Funktionsweise der ROI Ermittlung

Bestimmung des Drahtschnittpunktes

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf Punkt 4 in Abbildung 7.3. Die Bestimmung der Drahtgerade nutzt die Linescans zur Ermittlung der Position des Drahtes und die OpenCV Funktion `cv::fitLine` zur Approximation einer Drahtgeraden. Drahtgeraden, die eine Abweichung von mehr als $\pm 45^\circ$ aufweisen, werden ignoriert. Zur Berechnung des Schnittpunktes wird die folgende Formel verwendet.

$$x_{\text{schnittpunkt}} = \frac{b_{\text{draht}}}{m - m_{\text{draht}}} - \frac{b}{m - m_{\text{draht}}} \quad (7.3a)$$

$$y_{\text{schnittpunkt}} = x_{\text{schnittpunkt}} \cdot m + b \quad (7.3b)$$

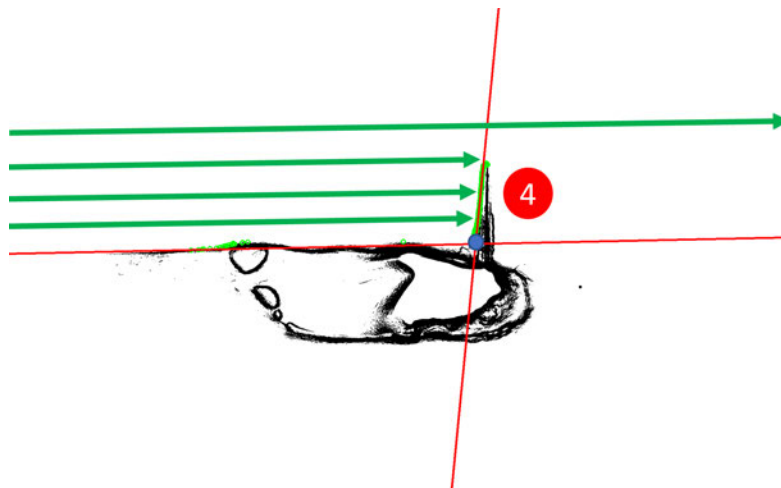


Abbildung 7.8: Funktionsweise der ROI Ermittlung

7.3 Konturverfolgung des Schmelzbades

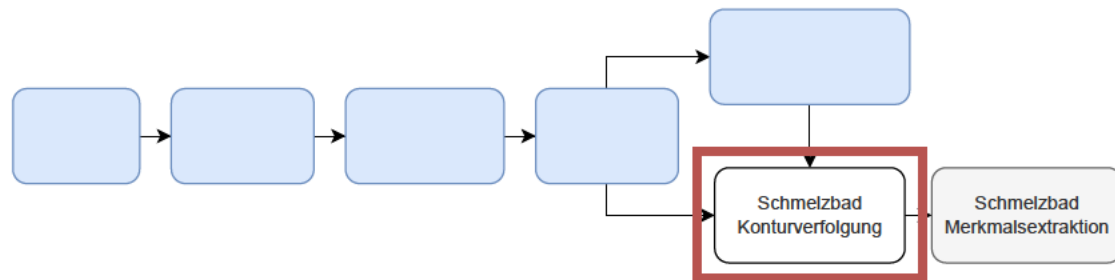


Abbildung 7.9: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Schmelzbad Konturverfolgung

Die Konturverfolgung ist notwendig, da die Analyse des gesamten binären Bildes einen zu hohen Rechenaufwand bedeutet. Außerdem soll die folgende Merkmalsextraktion des Schmelzbades nicht durch Bildpunkte beeinflusst werden, die nicht die Schmelzbadgeometrie beschreiben.

Um die Entwicklung fortführen zu können, muss nach der Implementierung das ROI an einem Einzelbild bestimmt werden. Hierfür wird das berechnete ROI um einen Faktor vergrößert, um keine Schmelzbadränder auszuschließen.

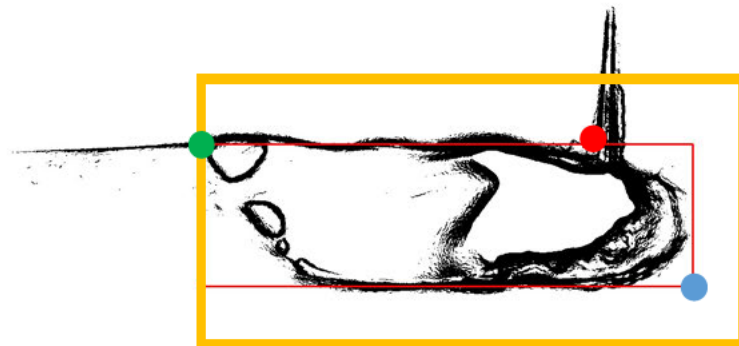


Abbildung 7.10: Erfolgreiche ROI Ermittlung

Nach der erfolgreichen Bestimmung des ROIs beginnt die Verfolgung des Schmelzbadrandes. Das Ziel ist, eine rotationunabhängige Detektion zu ermöglichen. Durch das Setzen des ROIs sinkt die Menge des zu erwartenden Rauschens erheblich. Eine Möglichkeit, die Schmelzbadkanten zu verfolgen, ist das Abtasten des Bildes vom Bildrand mit Linescans. Diese Art der Abtastung ist jedoch besonders Rechenaufwendig, weshalb eine

Abtastung des Bildes mit integrierter Achternachbarschaft entwickelt wird. Das Abtasten in Kombination mit der Achternachbarschaft ist rotationsunabhängig und enthält die Konturgenauigkeit der Achternachbarschaft.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Funktionsweise.

1. Auswählen der Anzahl der Abtastung. In einer Bildreihe von 1920 px entspricht eine Abtastung mit 20 Wiederholungen einer Anzahl von 96 Abtastungen. So werden 96 Linescans, ausgehend vom Bildpunkt (0,0) bis (0,1920), ausgeführt. Die Abtastungen finden in jedem der vier Bildränder statt und stoppen beim ersten gefundenen weißen Pixel.
2. Auswählen der Anzahl zu suchender Bildpunkte. Die Achternachbarschaft sucht, ausgehend vom abgetasteten Bildpunkt, nach weiteren benachbarten weißen Bildpunkten. Die Anzahl der zu findenden Bildpunkte wird hiermit begrenzt. Bei einer Länge von 20 Bildpunkten ist beispielsweise der Prozess der Achternachbarschaft beendet, wenn 20 Bildpunkte gefunden worden sind oder keine weiteren Bildpunktnachbarn auffindbar sind.
3. Ausführen der Abtastung in alle vier Richtungen.

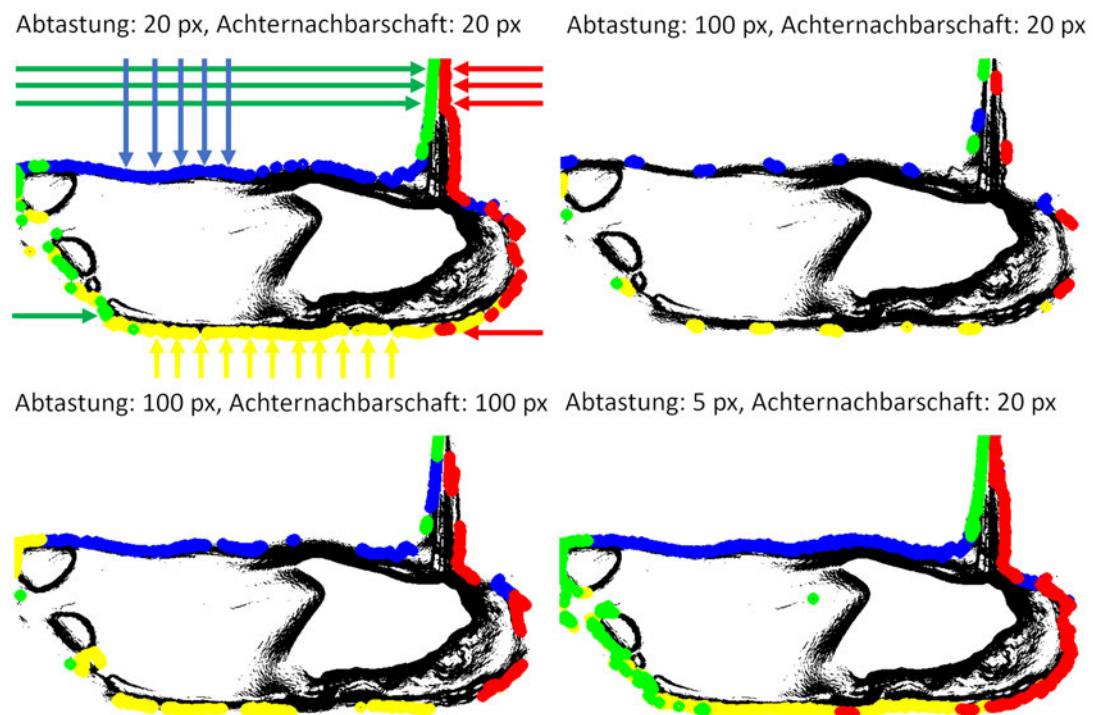


Abbildung 7.11: Schmelzbadmerkmalsextraktion unter verschiedenen Abtastlängen und verschiedenen Achternachbarschaftslängen

Die Abbildung 7.11 veranschaulicht die verschiedenen Einstellungsmöglichkeiten der Abtasthäufigkeit und der Achternachbarschaftslänge. Damit ist es möglich, die Genauigkeit vom zu vermessenden Objekt zu erhöhen oder die Berechnungsdauer zu verkürzen. Es wird jedoch deutlich, dass insbesondere im Bild 'Abtastung: 100px und Achternachbarschaft 100px', die Konturlänge nicht überall gleich lang ist. So kann es vorkommen, dass je nach Startpunkt der Achternachbarschaft keine weiteren Bildpunktnachbarn enthalten sind. Die weitere Analyse verwendet eine Abtastung und Achternachbarschaftslänge von 20px. Diese wird gewählt, da sie eine hohe Genauigkeit der Detektion der Schmelzbadränder vorweist und somit wenige Konturlücken besitzt.

Merkmalsextraktion des Schmelzbades unter Berücksichtigung der Drahtposition

Anhand der Abbildung 7.11 wird deutlich, dass ein großer Teil des Drahtes ebenfalls abgetastet wird. Der Draht ist ein störender Teil des Bildes, welcher die Messgenauigkeit

des Schmelzbades stört. Der im ROI berechnete Schnittpunkt wird nun verwendet, um die gefundenen Drahtbildpunkte zu eliminieren.

Die Funktionsweise zum Entfernen der Bildpunkte ist bei einer richtungsabhängigen Detektion einfach. Der berechnete Schnittpunkt wird als Ausgangspunkt zur Berechnung eines Rechtecks verwendet. Da hier bekannt ist, dass das Schmelzbad unter dem Bildpunkt liegt, wird alles über und rechts vom Schnittpunkt entfernt. Die Abbildung 7.12 zeigt das Ergebnis der entfernten Bildpunkte.

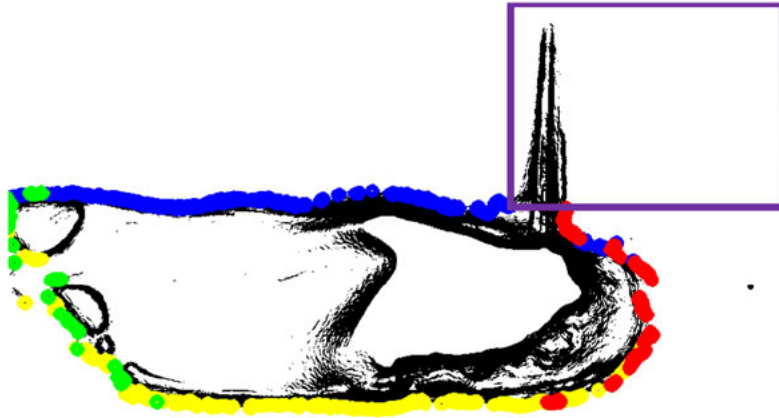


Abbildung 7.12: Entfernen störender gefundener Drahtbildpunkte

7.4 Merkmalsextraktion des Schmelzbades

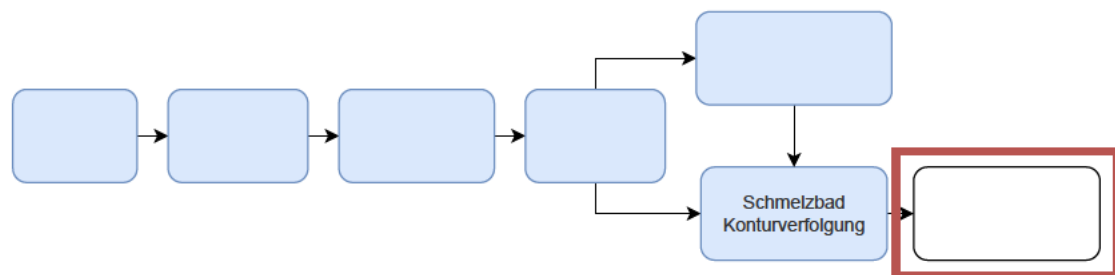


Abbildung 7.13: Aktueller Stand und folgende Entwicklung: Schmelzbad Merkmalsextraktion

Da die Detektion derzeit nur aus Bildpunkten besteht wird das detektierte Schmelzbad, wie in Vykhtar und Richter [31] beschrieben, mittels einer Ellipse an die Bildpunkte

berechnet. Es wird eine Ellipse zur Extraktion der Informationen gewählt, um eine Beschreibung der gesammelten Bildinformationen in vier Parameter zu ermöglichen. Zu den vier Parametern gehören die Position des Mittelpunktes, die Breite und Länge der Ellipse sowie der Winkel. Dafür wird das von OpenCV verwendete Modell `cv::fitEllipse()` verwendet, welches die Ellipsenform mittels der Methode der kleinsten Quadrate berechnet.

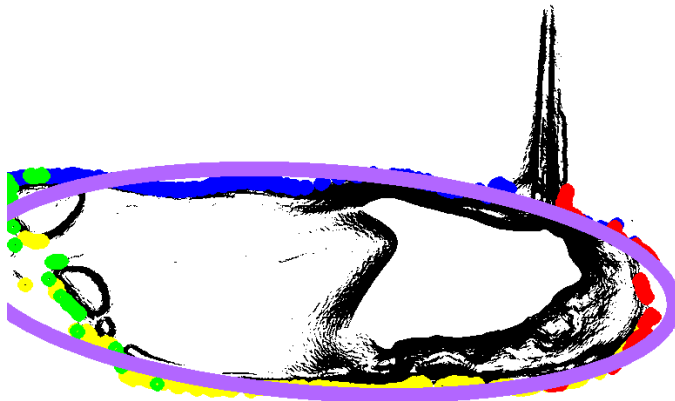


Abbildung 7.14: Berechnete Ellipse durch gesammelte Bildpunkte

Die Abbildung 7.14 zeigt die eingezeichnete Ellipse, die an die gefundenen Schmelzbadrandpunkte angepasst ist.

Mit diesem Schritt ist das Ziel der Entwicklung erreicht und bereit zur Anwendung. Im nachfolgenden Kapitel wird die somit erreichte Extraktion des Schmelzbadrandes validiert.

8 Validierung der Schmelzbadgeometrie

Zur Validierung werden drei Versuche ausgeführt. Die Versuche beinhalten die Tauglichkeit der ROI-Ermittlung mit unterschiedlichen Prozessleistungen, sowie zwei Versuche zur Merkmalsextraktion mittels einer Ellipsenberechnung. So muss dieser Algorithmus Veränderungen im Schmelzbad detektieren können.

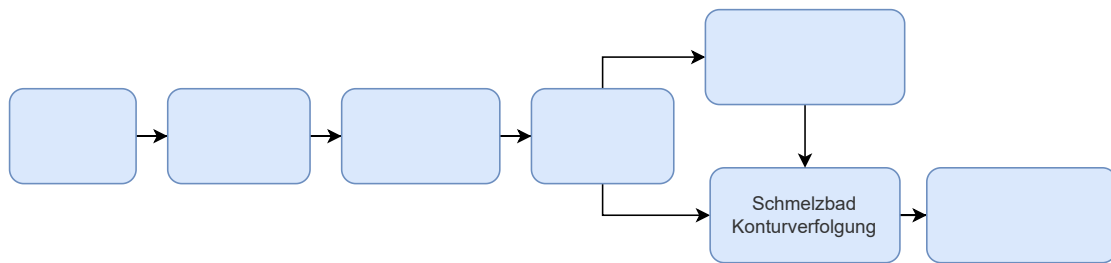


Abbildung 8.1: Aktueller Stand der Entwicklung

Im Folgenden findet die Bilderaufnahme zur Validierung mittels Kamerasynchronisation statt. Jedes Bild wird mittels Medianfilter geglättet, folglich mit dem Scharr-Operator in ein Kantenbild gewandelt. Die Segmentierung findet mittels Binarisierung statt und das Histogrammschwellwertverfahren IsoData berechnet den Schwellwert. Mit Änderung von Prozessparametern wird die eigene Entwicklung auf Funktionalität getestet.

8.1 ROI Ermittlung unter verschiedenen Prozessleistungen

Die Untersuchung des Algorithmus zur Bestimmung eines ROIs verwendet sechs verschiedene Drahtvorschubgeschwindigkeiten bei konstanter Bewegung des Roboters. Die Veränderung der Drahtvorschubgeschwindigkeiten erhöht automatisch die Schmelzleistung wie folgt:

Bild Nr.	Drahtvorschub	Stromstärke	Spannung
1	1.5 m/min	≈ 60 A	11.5 V
2	2 m/min	≈ 78 A	12.1 V
3	3 m/min	≈ 114 A	13.3 V
4	4 m/min	≈ 144 A	14.6 V
5	5 m/min	≈ 176 A	15.4 V
6	6 m/min	≈ 210 A	15.9 V

Tabelle 8.1: Auflistung der Unterschiede zwischen Drahtvorschubgeschwindigkeiten

Die Veränderungen sind in der Nahtbreite und -höhe ersichtlich und somit auch im Schmelzbad. Die folgende Abbildung 8.2 zeigt die Unterschiede der Naht unter verschiedenen Drahtvorschubgeschwindigkeiten auf.



Abbildung 8.2: Vergleich der Nahtgrößen mit unterschiedlichen Drahtvorschubgeschwindigkeiten

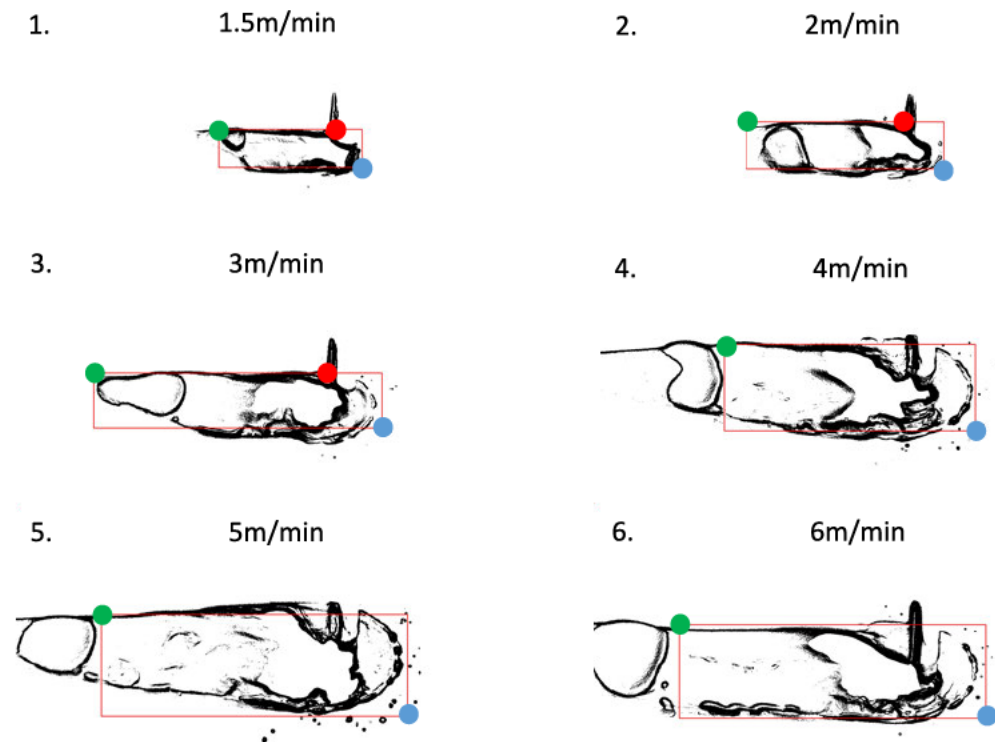


Abbildung 8.3: ROI Bestimmung mit unterschiedlichen Prozessleitungen

Die Abbildung 8.3 zeigt das Schmelzbad mit unterschiedlichen Drahtvorschubgeschwindigkeiten auf. Die Nummerierung bezieht sich auf die in 8.1 gegebene Tabelle.

Anhand dessen wird deutlich, dass bei den Drahtvorschubgeschwindigkeiten 1.5 m/min - 3 m/min das ROI korrekt erkannt wird. Der Drahtschnittpunkt wird ebenfalls korrekt berechnet. Ab der Drahtvorschubgeschwindigkeit von 4 m/min fallen in den Schmelzbadrändern Lücken auf, die die ordnungsgemäße Detektion hindern und das erkannte ROI am Schmelzbadende kürzer berechnen als nötig. Als Ursache hierfür wird von Kanten ausgegangen, die schwach ausgeprägt sind.

Die Drahtposition lässt sich an Drahtvorschubgeschwindigkeiten von 4m/min durch die geringe Reflexion nicht ermitteln. Es werden keine Bildpunkte gefunden, die zu einer Geraden berechnet werden können. Die Schmelzbadanfänge und -breiten werden mit allen Drahtvorschubgeschwindigkeiten richtig bestimmt. Die Ermittlung des ROIs ist in den meisten Fällen erfolgreich, benötigt jedoch insbesondere bei höheren Drahtvorschubgeschwindigkeiten eine robustere Methode zur Detektion des Schmelzbadendes.

8.2 Detektion von langsamen Schmelzbadveränderungen

Dieser Konturverfolgungsversuch hat das Ziel, langsame Veränderungen im Schmelzbad zu erkennen. Die Veränderungen sind Beeinflussungen der Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters. So wird die Geschwindigkeit von 0.040 m/s bis 0.007 m/s stufenweise in 0.001 Schritten verändert.

Es ist zu erwarten, dass das Schmelzbad bei einer Robotergeschwindigkeit von 0.007 m/s am größten ist. Die standardmäßige Drahtvorschubgeschwindigkeit von 2.9m/min bleibt unverändert.

Der folgende Versuchsaufbau lässt sich in folgende Schritte unterteilen.

1. Aufnahme der Schmelzbadbilder
2. Bestimmen des ROIs der Versuchsreihe.
3. Durchführen der Konturverfolgung mit dem eigen Entwickeltem Algorithmus und bestimmen der Ellipsenmerkmale zur Validierung des Versuchs.

8.2.1 Aufnahme des Versuchs



Abbildung 8.4: Schweißnaht des ausgeführten Versuchs

Anhand der Abbildung 8.4 ist der ausgeführte Versuch erkennbar. Die Geschwindigkeit ist für etwa ein Zehntel des Schweißnahtanfangs konstant auf eine Geschwindigkeit von 0.040 m/s eingestellt. Die Robotergeschwindigkeit beginnt danach kontinuierlich langsamer zu werden, wodurch die Schweißnaht an breite gewinnt. Im letzte Zehntel ist die Robotergeschwindigkeit ebenfalls konstant auf 0.007 m/s eingestellt.

8.2.2 ROI-Bestimmung

Nach der Aufnahme der Bilder muss für diesen Versuch ein ROI ausgewählt werden, um die Schmelzbadmerkmale genauer bestimmen zu können. Als Vergleich wird ein ROI mit der Robotergeschwindigkeit von 0.040 m/s sowie 0.007 m/s berechnet.

Die Abbildung 8.5 zeigt diese beiden Bilder mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Beide ROIs konnten erfolgreich ermittelt werden. Als ROI wird das Schmelzbad gewählt, in der die Länge und Breite des Schmelzbades maximal sind. Dies tritt bei einer Geschwindigkeit von 0.007 m/s auf. Dieses ROI wird um einen Faktor vergrößert, damit kein Teil des Schmelzbades weggeschnitten wird. Der Drahtschnittpunkt wird verwendet, um die störenden Drahtbildpunkte zu eliminieren.

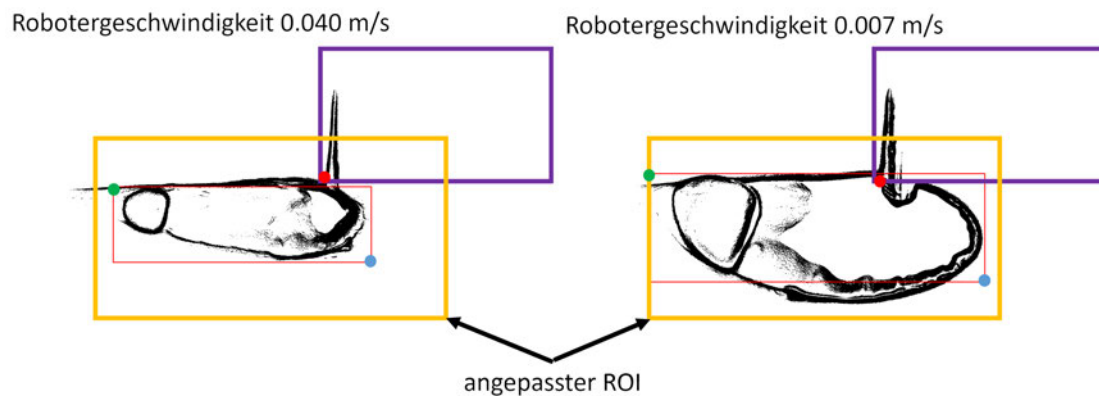


Abbildung 8.5: Bestimmung des ROIs mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten

8.2.3 Berechnung der Schmelzbadmerkmale

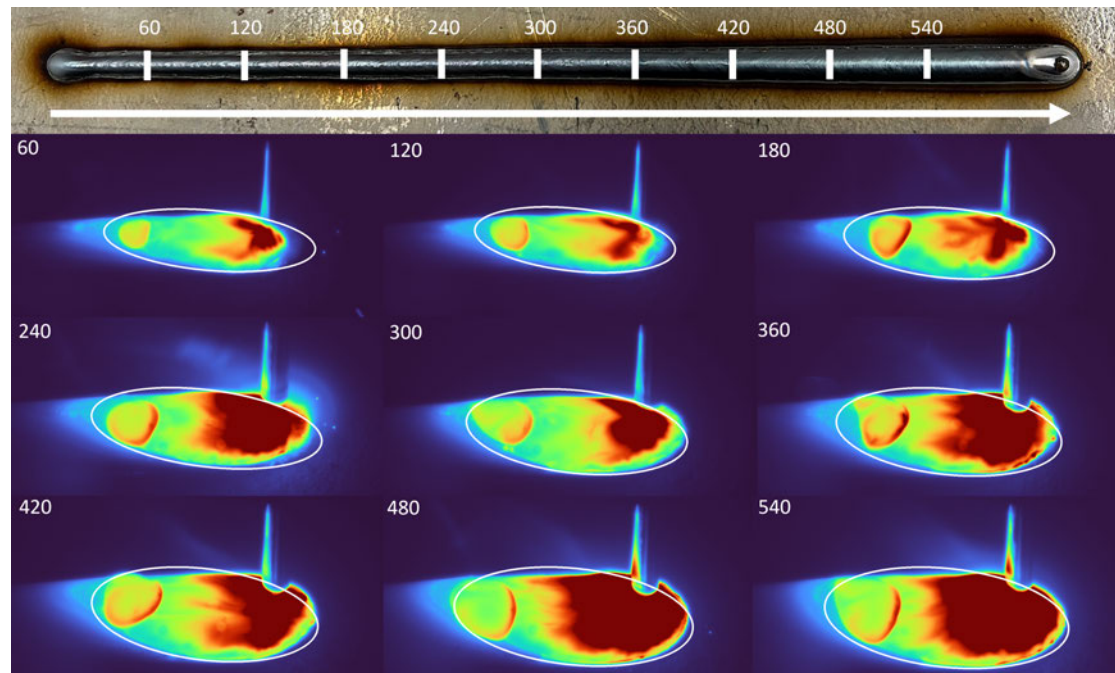


Abbildung 8.6: Darstellung der Schmelzbadgröße

Die Abbildung 8.6 visualisiert die Veränderungen des Schmelzbades mit laufender Bildnummerierung. Es ist deutlich erkennbar, dass das Schmelzbad immer größer wird. Die eingezeichneten Ellipsen dienen für die folgende Auswertung als Richtwert für die Schmelzbadgröße.

Um die Ellipsen quantitativ auszuwerten, wird aus den berechneten Ellipsenparametern die Fläche der Ellipse berechnet. In der folgenden Abbildung 8.7 sind die Ellipsenfläche und der Winkel als Diagramm dargestellt.

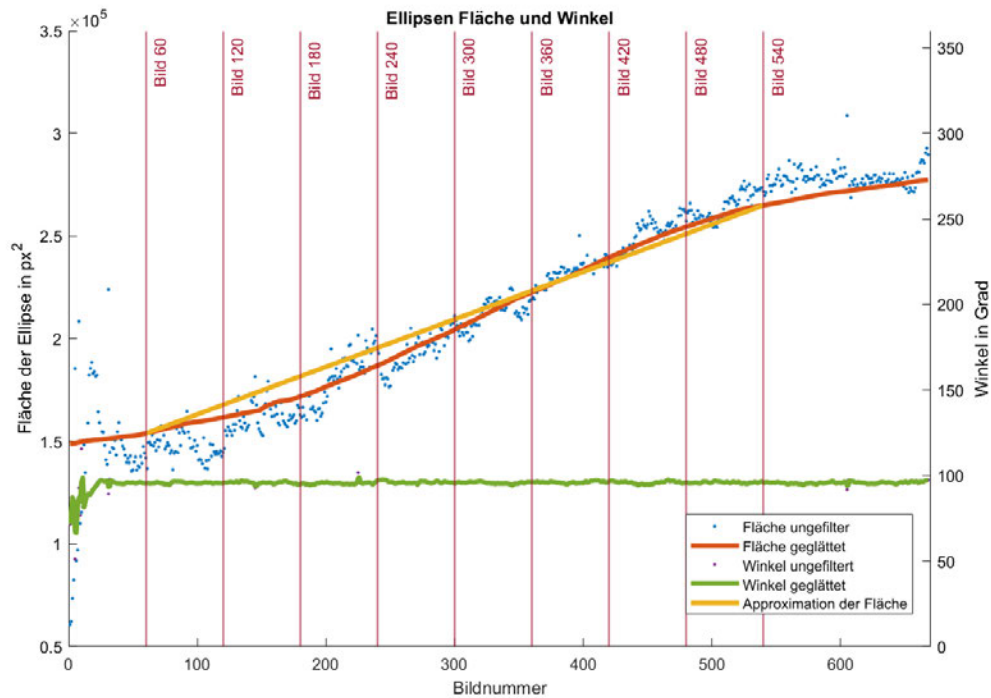


Abbildung 8.7: Auswertung der Schmelzbadgröße

Die Grafik 8.7 zeigt die berechneten Ellipsenflächen als blaue Bildpunkte und die gemittelten Bildpunkte als rote Linie dar. Das gleiche gilt für den Winkel, der als grüne Linie dargestellt ist und als konstant angesehen wird. Besonders auffällig sind die Bildpunkte von 0 bis 60. Hierbei handelt es sich um den Start des Schweißprozesses, welcher durch Spritzer, Rauch oder andere Prozessinstabilitäten die Berechnung stört. Es wird angenommen, dass bei der Bildnummer von 60 das Schmelzbad ab der Geschwindigkeit von 0.040 m/s anfängt, langsamer zu werden. Dies wird durch die langsame Steigerung der Ellipsenfläche bemerkbar.

In der Bildnummer 540 wird das Maximum angenommen, in denen sich die Geschwindigkeit nicht mehr ändert und konstant bei 0.007 m/s bleibt. So lässt sich eine Gerade zwischen diesen Punkten zeichnen und Linearisieren. Es ist jedoch zu bemerken, dass die berechnete Ellipsenfläche abhängig von der Kameraentfernung sowie von den Prozesseinstellungen ist. So lässt sich eine lineare Steigung von der Schmelzbadgröße und der Geschwindigkeit des Roboters bemerkbar machen, jedoch ist diese nach Momentanen Stand nicht universell einsetzbar.

8.3 Detektion von schnellen Schmelzbadveränderungen

Der dritte Versuch soll die Reaktionsgeschwindigkeit der Schmelzbadveränderung prüfen, hierbei werden punktuell schnelle Veränderungen der Geschwindigkeit herbeigeführt. Dabei wird die Geschwindigkeiten 0.040 m/s als normale Geschwindigkeit gewählt und kurzzeitig auf 0.007 m/s geändert.

Das zu bestimmende ROI wird aus dem vorherigen Versuch aus Abbildung 8.5 verwendet und gilt für diesen Versuch ebenfalls, da dieselben Geschwindigkeitsveränderungen auftreten.

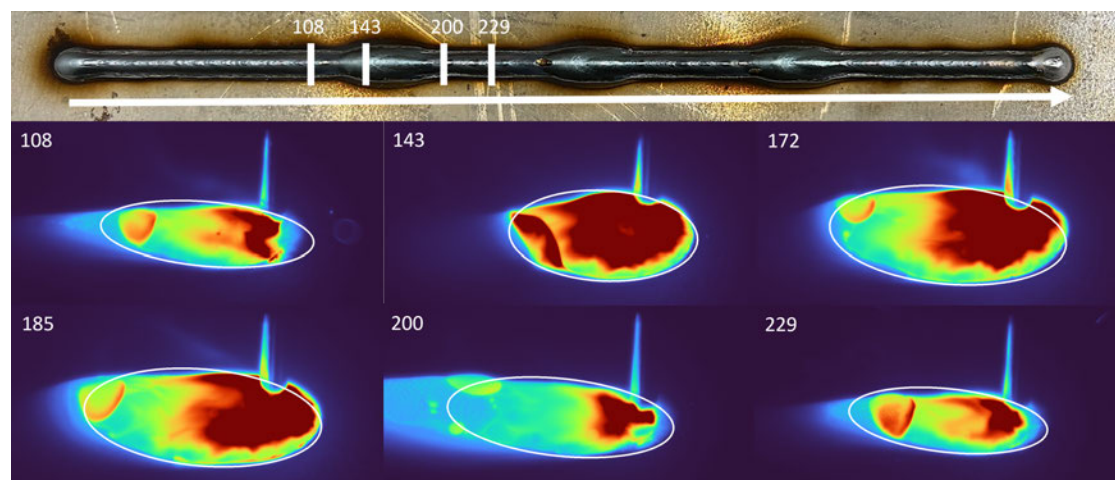


Abbildung 8.8: Darstellung der Schmelzbadgröße

Die Abbildung 8.8 zeigt den ausgeführten Versuch sowie die Veränderungen im Schmelzbad. Hier werden, wie im zuvor erklärten Versuch, die Ellipsen berechnet und als Diagramm dargestellt.

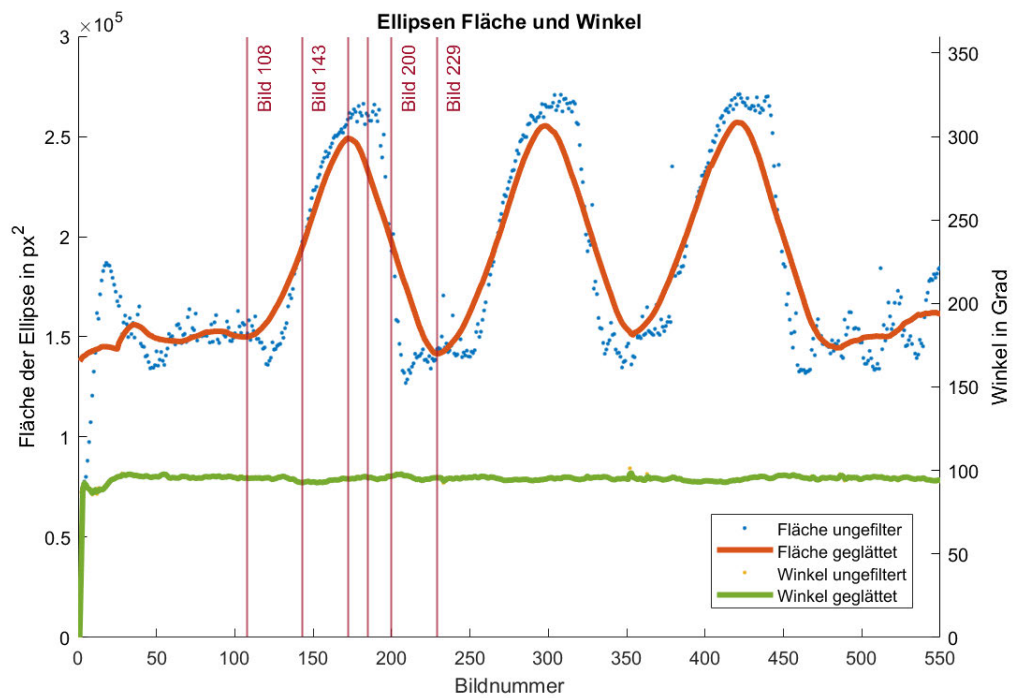


Abbildung 8.9: Auswertung der Schmelzbadgröße

Die Abbildung 8.8 zeigt, dass schnelle Veränderungen mit dem entwickelten Algorithmus detektierbar sind. Der Winkel bleibt trotz starker Veränderungen konstant. So müsste es möglich sein, mit diesem Algorithmus schnelle Veränderungen der Schmelzbadgeometrie zu detektieren und zu korrigieren.

8.4 Maßnahmen zur Optimierung der Schmelzbad detektion

Weitere Forschungen könnten sich darauf fokussieren, Fehler zu minimieren und die Algorithmen robuster gegenüber Spritzern, Reflektionen oder anderer Störungen zu gestalten. So konnte die ROI-Ermittlung mit verschiedenen Prozessleistungen getestet werden, jedoch führen Lücken im segmentierten Schmelzbad zu Abweichungen in der Bestimmung des ROIs. Die Lücken können mit einer Mittelung im segmentierten Bild geschlossen werden. Die Merkmalsextraktion ist ebenfalls anfällig gegenüber Spritzern, Reflektionen oder anderer Störungen. Eine mögliche Maßnahme zur Optimierung der Schmelzbad detektion ist eine anschließende Filterung der Datenpunkte, die mithilfe eines Schwerpunktes umgesetzt werden könnten, der die mittleren Abstände zum Datenpunkt richtungsabhängig misst und Ausreißer filtert.

Ein weiterer Fokus weiterführender Arbeiten sollte die Entwicklung eines Algorithmus zur automatischen Bestimmung des ROIs im Prozess und der richtungsunabhängigen Schmelzbadgeometrie sein.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Ausarbeitung ist die Untersuchung von Schmelzbadgeometrien mithilfe eines Kamerasystems und die Entwicklung intelligenter Algorithmen zur Auswertung. Die Herausforderung der Bildanalyse besteht darin, eine hohe Bildqualität bei der Aufnahme des Schmelzbades zu erzielen. So wurden die Aufnahmen des Schmelzbades mittels einer CMOS-Kamera und zwei Bandpassfiltern durchgeführt.

Aufgrund des verwendeten CMT-Prozesses ergab sich die Möglichkeit einer Synchronisation der Aufnahmen mittels Detektion des Lichtbogens durch eine Photodiode. Dies ermöglicht, den störenden Lichtbogen aus der Bildauswertung auszuschließen.

Verschiedene Algorithmentypen, beispielsweise die Bildglättung, die Kantendetektion sowie die Segmentierung, wurden angewandt und analysiert. Die größte Herausforderung in der Bildauswertung besteht in der Vielzahl möglicher Prozessunregelmäßigkeiten. Zur Minimierung der Prozessunregelmäßigkeiten wurde hierzu ein Algorithmus zur Ermittlung des ROIs entwickelt und getestet. Das Ziel des ROIs ist die Minimierung der Prozessunregelmäßigkeiten im Bild. Zur Bestimmung der Schmelzbadmerkmale wurde ein eigener Algorithmus entwickelt, der auf Linescans und der Konturverfolgung mittels Achternachbarschaft basiert. Zur Auswertung der extrahierten Schmelzbadgeometrie wurde eine approximierende Ellipse an die Datenpunkte angepasst und zur Validierung verwendet.

Dazu wurde ein Versuch erstellt, der die Veränderungen der Schmelzbadgröße gewährleistet. Die Ergebnisse der Validierung verdeutlichen die Wirksamkeit des entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmus, die Schmelzbadveränderungen zu detektieren.

Weiterführenden Arbeiten soll hiermit die Grundlage gegeben werden, eine Prozessregelung zuzulassen. So könnten die Schnittstellen der Roboterkommunikation genutzt werden, um mittels der Schmelzbadgeometrie aktiv in den Prozess einzugreifen und Maßnahmen zur Verbesserung der Schweißnaht durchzuführen. Dafür ist es notwendig, die ermittelte Schmelzbadgeometrie zu klassifizieren. Somit wurden neue Forschungsfelder für die Auswertung des Schmelzbades im WAAM-Prozess erschlossen.

Literaturverzeichnis

- [1] BASLER AG: *daA1920-160um / Basler*. 03.12.2021. – URL <https://docs.baslerweb.com/daa1920-160um#>. – Zugriffsdatum: 12.01.2022
- [2] BEYERER, Jürgen ; PUENTE LEÓN, Fernando ; FRESE, Christian: *Automatische Sichtprüfung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. – ISBN 978-3-642-23965-6
- [3] BRADSKI, G.: *The OpenCV Library*. – URL <https://opencv.org/>
- [4] BRANDENBURG, Annette: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren / Ulrich Dilthey*. Bd. 3: *Gestaltung und Festigkeit von Schweißkonstruktionen*. 2. Aufl. 2002. – ISBN 3540626611
- [5] BREDIES, Kristian ; LORENZ, Dirk: *Mathematische Bildverarbeitung: Einführung in Grundlagen und moderne Theorie*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2011 (Aus dem Programm Mathematik). – ISBN 9783834810373
- [6] DA WU, Wei ; XIONG, Zhen Y. ; GU, Wang P. ; SHAN, Jun: Molten Pool Image Processing and Feature Extraction Based on Multiple Visions. In: *Advanced Materials Research* 753-755 (2013), S. 2131–2134
- [7] DEMANT, Christian ; STREICHER-ABEL, Bernd ; SPRINGHOFF, Axel: *Industrielle Bildverarbeitung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 978-3-642-13096-0
- [8] DILTHEY, Ulrich: *VDI. Bd. / Ulrich Dilthey ; Bd. 1: Schweiß- und Schneidtechnologien*. 3., bearb. Aufl. Berlin : Springer, 2006. – ISBN 3540216731
- [9] ERHARDT, Angelika: *Einführung in die digitale Bildverarbeitung: Grundlagen, Systeme und Anwendungen ; mit 35 Beispielen und 44 Aufgaben*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008 (Studium). – ISBN 351900478X

- [10] FÖRSTER, Ralf ; FÖRSTER, Anna: *Einführung in die Fertigungstechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018. – ISBN 978-3-662-54701-4
- [11] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH: *Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie: Cold Metal Transfer – ein neuer Metall-Schutzgas-Schweißprozess*. Stand: März 2013. Kissing : WEKA-Media, 2013 (WEKA-Praxislösungen). – ISBN 3811168797
- [12] HALISCH, C. ; RADEL, T. ; TYRALLA, D. ; SEEFELD, T.: Measuring the melt pool size in a wire arc additive manufacturing process using a high dynamic range two-colored pyrometric camera. In: *Welding in the World* 64 (2020), Nr. 8, S. 1349–1356. – ISSN 0043-2288
- [13] HANS J. FAHRENWALDT: *Schweißtechnik Verfahren und Werkstoffe*. Vieweg und Teubner Verlag, 1994. – ISBN 978-3-528-24478-1
- [14] JÄHNE, Bernd: *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. – ISBN 978-3-642-04951-4
- [15] LACHMAYER, Roland ; RETTSCHLAG, Katharina ; KAIERLE, Stefan: *Konstruktion für die Additive Fertigung 2019*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020. – ISBN 978-3-662-61148-7
- [16] LIU, Xiao G. ; ZHAO, Bing: Based on the CO₂ Gas Shielded Welding Molten Pool Image Edge Detection Algorithm. In: *Applied Mechanics and Materials* 437 (2013), S. 840–844
- [17] MÖLLER, Mauritz ; VYKHTAR, Bohdan ; EMMELMANN, Claus ; LI, Zhuguo ; HUANG, Jian: SUSTAINABLE PRODUCTION OF AIRCRAFT SYSTEMS: ARBON FOOTPRINT AND COST POTENTIAL OF ADDITIVE MANUFACTURING IN AIRCRAFT SYSTEMS. In: *AST* (2019)
- [18] NISCHWITZ, Alfred ; FISCHER, Max ; HABERÄCKER, Peter ; SOCHER, Gudrun: *Bildverarbeitung*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. – ISBN 978-3-658-28704-7
- [19] PREWITT, J. M. ; MENDELSON, M. L.: The analysis of cell images. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 128 (1966), Nr. 3, S. 1035–1053. – ISSN 0077-8923
- [20] PURRIO, Marion: *Prozessanalyse und -überwachung beim Metall-Schutzgasschweißen durch optische In-situ-Sensorsysteme*, Shaker Verlag, Dissertation, 01/2017

- [21] PUSHPAJIT A.KHAIRE ; DR. NILESHSINGH V. THAKUR: A Fuzzy Set Approach for Edge Detection. (2012), Nr. Volume 6, S. 403–412
- [22] REIN VAN DEN BOOMGAARD: *3.2.3. Thresholding — Image Processing and Computer Vision 2.0 documentation.* 09.05.2017. – URL <https://staff.fnwi.uva.nl/r.vandenboomgaard/IPC20162017/LectureNotes/IP/PointOperators/Thresholding.html>. – Zugriffsdatum: 22.02.2022
- [23] RIDLER, T. W. ; CALVARD, S.: Picture Thresholding Using an Iterative Selection Method. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 8 (1978), Nr. 8, S. 630–632. – ISSN 0018-9472
- [24] SCHARR, Hanno: *Optimale Operatoren in der Digitalen Bildverarbeitung.* Heidelberg, Heidelberg University Library, Dissertation, 2000
- [25] SCHULER, Volkmar ; TWRDEK, Jürgen: *Praxiswissen Schweißtechnik.* Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. – ISBN 978-3-658-24265-7
- [26] STEINMÜLLER, Johannes: *Bildanalyse.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008. – ISBN 978-3-540-79742-5
- [27] SÜSSE, Herbert ; RODNER, Erik: *Bildverarbeitung und Objekterkennung.* Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. – ISBN 978-3-8348-2605-3
- [28] TEXAS INSTRUMENTS ; INCORPORATED [SBOA220 ; A]: Photodiode amplifier circuit (Rev. A). (2019). – URL <https://www.ti.com/lit/an/sboa220a/sboa220a.pdf>. – Zugriffsdatum: 12.01.2022
- [29] TEXAS INSTRUMENTS ; INCORPORATED [SBOS291 ; G]: Precision, High-Speed Transimpedance Amplifier datasheet (Rev. G). (2007)
- [30] THORLABS ; THORLABS (Hrsg.): *Datenblatt Photodiode FD10D.* October 10, 2017, Rev D. – URL <https://www.thorlabs.com/drawings/b404f4929db44163-5D89226F-EC67-1338-F6620AD2A80ED7C4/FD10D-SpecSheet.pdf>. – Zugriffsdatum: 12.01.2022
- [31] VYKHTAR, Bohdan ; RICHTER, Alexander M.: Optical monitoring sensor system for laser-based directed energy deposition. In: *Lasers in Manufacturing Conference* (2021)

- [32] WERNER, Martin: *Digitale Bildverarbeitung*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. – ISBN 978-3-658-22184-3
- [33] XIONG, Jun ; ZHANG, Guangjun: Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision. In: *Measurement Science and Technology* 24 (2013), Nr. 11, S. 115103. – ISSN 0957-0233
- [34] YE, Zhen ; FANG, Gu ; CHEN, Shanben ; DINHAM, Mitchell: A robust algorithm for weld seam extraction based on prior knowledge of weld seam. In: *Sensor Review* 33 (2013), Nr. 2, S. 125–133. – ISSN 0260-2288
- [35] ZACK, G. W. ; ROGERS, W. E. ; LATT, S. A.: Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency. In: *The journal of histochemistry and cytochemistry : official journal of the Histochemistry Society* 25 (1977), Nr. 7, S. 741–753. – ISSN 0022-1554

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort	Datum	Unterschrift im Original
-----	-------	--------------------------