

BACHELORTHESES
Kevin Francis Mensah

Bildverarbeitungsalgorithmen zur Vermessung eines Schweißbads

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Computer Science and Engineering
Department Information and Electrical Engineering

Kevin Francis Mensah

Bildverarbeitungsalgorithmen zur Vermessung eines Schweißbads

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.-Ing. Jochen Maaß
Zweitgutachter: Prof. Shahram Sheikhi

Eingereicht am: 23. Juli 2019

Kevin Francis Mensah

Thema der Arbeit

Bildverarbeitungsalgorithmen zur Vermessung eines Schweißbads

Stichworte

Bilverarbeitung, schweißen, Schweißbad

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit hat zum Ziel Bildverarbeitungsalgorithmen zu entwickeln, die das Analysieren und Vermessen eines Schweißbades ermöglichen.

Kevin Francis Mensah

Title of Thesis

Image processing algorithms for weldpoolmeasurement

Keywords

Image processing, welding, weldpool

Abstract

The goal of this thesis is to develop image processing algorithms to analyze and measure weldpools.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik an der HAW	2
1.2 Problem	3
1.3 Aussicht	3
2 Grundlagen	5
2.1 Schweißtechnik	5
2.1.1 Metallschutzgasschweißen (MSG)	5
2.1.2 Laserschweißen	6
2.2 Bildverarbeitung	6
2.2.1 Bildgewinnung	7
2.2.2 Vorverarbeitung	7
2.2.3 Segmentierung	7
2.3 Software	8
2.3.1 Qt	8
2.3.2 Open Computer Vision Library	8
2.4 Mathematische Grundlagen	9
2.4.1 Homogene Koordinaten	9
2.4.2 Koordinaten-Transformation	10
3 Anforderungsanalyse	13
3.1 Prozessanalyse	13
3.1.1 MSG-Verfahren	13
3.1.2 Laserschweißen	14

3.2	Funktionale Anforderungen	16
3.2.1	Region of interest	16
3.2.2	Segmentierung	16
3.2.3	Vermessung	16
3.2.4	Grafische Benutzeroberfläche	16
3.3	Nichtfunktionale Anforderungen	17
3.3.1	Videomaterial	17
3.3.2	Robustheit	17
3.3.3	Unabhängigkeit	17
3.4	Anforderungskatalog	18
4	Konzeption	19
4.1	Konzeption der funktionalen Anforderungen	19
4.1.1	Region of Interest	19
4.1.2	Segmentierung	20
4.1.3	Vermessung	21
4.1.4	Grafische Benutzeroberfläche	26
4.2	Konzeption der nichtfunktionalen Anforderungen	26
4.2.1	Videomaterial	26
4.2.2	Robustheit	29
4.2.3	Unabhängigkeit	31
5	Implementierung und Test	32
5.1	Implementierung der funktionalen Anforderungen	32
5.1.1	Region of Interest	32
5.1.2	Segmentierung	34
5.1.3	Vermessung	38
5.1.4	Grafische Benutzeroberfläche	39
5.2	Implementierung der nichtfunktionalen Anforderungen	41
5.2.1	Robustheit	41
5.3	Programmablauf	43
5.4	Fazit und Ausblick	48
	Literaturverzeichnis	50
A	Anhang 1 - CD	51

Selbstständigkeitserklärung

52

Abbildungsverzeichnis

1.1	Metallschutzgasschweißanlage an der HAW Hamburg	2
1.2	Laserschweißanlage an der HAW Hamburg	2
1.3	3D-Druck Schiffsschraube	3
1.4	3D Druck an der HAW	4
2.1	Vergleich Laserlicht & Glühlampe	6
2.2	Koordinatensysteme einer Schweißanlage	10
3.1	Schweißprozess beim Metallschutzgasverfahren	14
3.2	Schweißprozess beim Laserschweißverfahren	14
4.1	Region of interest MSG-Verfahren	19
4.2	Region of interest Laserschweißen	19
4.3	Perspektivische Verzerrung	22
4.4	Schweißbadvermessung	23
4.5	Benötigte Koordinatentransformationen	24
4.6	Kamerahalter Position 1	27
4.7	Kamerahalter Position 2	28
4.8	Ergebnis der Aufnahme	28
4.9	Aufbau Blende	30
4.10	Blendenblitz-Effekt	30
5.1	Region of interest MSG-Verfahren	33
5.2	Region of interest Laserschweißen	33
5.3	RGB-Farbraum	34
5.4	HSV-Farbraum	34
5.5	Resultierendes Bild	35
5.6	Annähernd störungsfreies Bild	35
5.7	Erfasstes Schmelzbad	36

5.8	Region of interest	37
5.9	Gefiltertes Bild	37
5.10	Erfasstes Schmelzbad	37
5.11	Störung durch Funkenflug	37
5.12	Fehlerhafte Erkennung	37
5.13	Resultierender Richtungspfeil	38
5.14	GUI-Toolbox	39
5.15	GUI Auswahldialog	40
5.16	GUI Auswahldialog geöffnet	40
5.17	Übersicht grafische Nutzeroberfläche	40
5.18	mainwindow	43
5.19	imageProcessingMSG(1)	44
5.20	imageProcessingMSG(2)	45
5.21	imageProcessingMSG(3)	46
5.22	imageProcessingMSG(4)	47

Tabellenverzeichnis

2.1	DFK 33GP2000e Spezifikationen	7
3.1	Anforderungskatalog funktional	18
3.2	Anforderungskatalog nichtfunktional	18
5.1	Erreichte funktionale Anforderungen	48
5.2	Erreichte nichtfunktionale Anforderungen	48

1 Einleitung

Schweißen ist das in der Industrie wichtigste Verfahren zum permanenten Verbinden mehrerer Materialien. Zunehmend an Bedeutung gewinnt in letzter Zeit der Metall-3D-Druck, bei dem durch Schweißverfahren Schicht für Schicht Material aufgetragen wird, um komplexe dreidimensionale Formen zu schaffen, für die sonst üblicherweise Gussverfahren zur Anwendung kämen. Beim 3D-Druck gibt es allerdings Störfaktoren die das Ergebnis negativ beeinflussen können. Einer dieser Faktoren ist die ungleichmäßige Hitzeverteilung des Schweißbads, die beim Auftragen von mehreren Schichten zu einer ungewollten Verformung der Schweißnaht führen kann. Eine Überwachung mit Thermalcameras ist üblich, jedoch sehr teuer. Deshalb befasst sich diese Arbeit mit der Frage, ob und wie der Schweißprozess mit einer Digitalkamera analysiert und überwacht werden kann. Dafür wird exemplarisch das Schutzgas- und Laserschweißen untersucht und als Implementierungswerkzeuge die Open Computer Vision Library mit dem Entwicklungstool Qt genutzt.

1.1 Stand der Technik an der HAW

In der Schweißhalle der HAW befinden sich zwei automatische Schweißanlagen, eine für das Metall-Schutzgasschweißen und eine für das Laserschweißen. Die Schweißanlage für das Metall-Schutzgasverfahren wurde von Studenten der HAW konstruiert. Sie kann in x-, y- und z-Richtung verfahren werden.



Abbildung 1.1: Metallschutzgasschweißanlage an der HAW Hamburg

Bei der Anlage zum Laserschweißen handelt es sich um einen frei beweglichen Kuka-Roboter.



Abbildung 1.2: Laserschweißanlage an der HAW Hamburg

1.2 Problem

Keine der beiden Anlagen ist überwacht, die Steuerung der Energieintensität wird nicht nachgeregelt. Daraus folgt, dass mit steigender Schweißdauer ein stetiger Anstieg der Temperatur im Werkstück einhergeht. Wird die Energiezufuhr zum Schweißgerät nicht händisch beeinflusst, kann es zu einem Einschmelzen der Form kommen und damit zu einem Scheitern des Schweißprozesses.

1.3 Aussicht

Praktische Anwendungsbeispiele des 3D-Metall-Drucks sind z.B. der Druck von großen Metallstrukturen wie die Schiffsschraube in Abbildung 1.3, hergestellt von RAMLAB (Rotterdam Additive Manufacturing LAB).

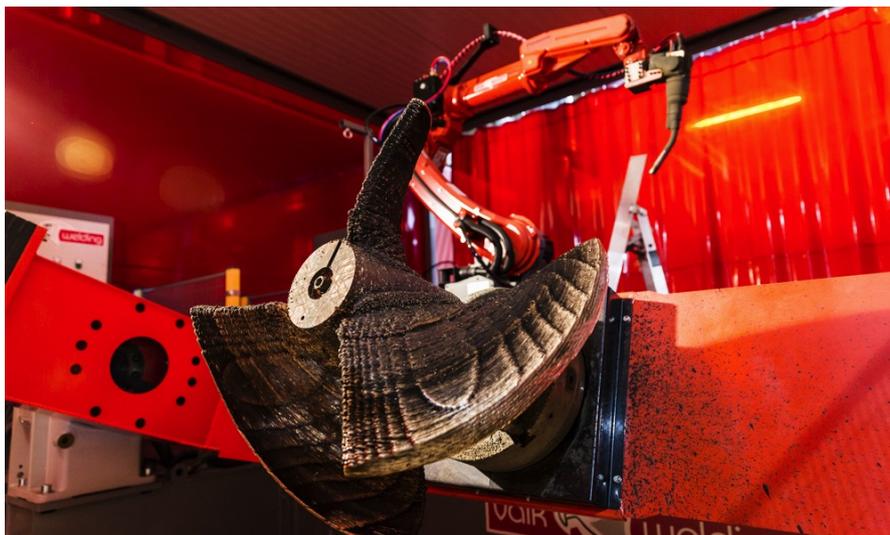


Abbildung 1.3: 3D-Druck Schiffsschraube¹

¹Quelle: <https://www.bairdmaritime.com/work-boat-world/580-prototype-3d-printed-propeller-unvei>
[10.07.2019]

1 Einleitung

Soweit sind die Möglichkeiten an der HAW noch nicht. Die bisherigen Projekte beschränken sich zur Zeit auf kleinere geometrische Formen wie in Abbildung 1.4 zu sehen. Die in dieser Arbeit erarbeiteten Bildverarbeitungsalgorithmen sollen einen Beitrag dazu leisten die Möglichkeiten zu verbessern.



Abbildung 1.4: 3D Druck an der HAW

2 Grundlagen

2.1 Schweißtechnik

Die Schweißtechnik gehört nach DIN 8580 zu den, in sechs Hauptgruppen unterteilten, Fertigungsverfahren. Sie fällt unter die sogenannten Fügeverfahren in Hauptgruppe 4. DIN 8580 definiert das Fügen als “auf Dauer angelegte Verbinden [...] von zwei oder mehr Werkstücken [...] dabei wird der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt”[1]. Beim Fügen durch Schweißen werden Materialien durch Hitze und oder Kraft miteinander verbunden, man unterscheidet in Pressverbindungsschweißen und Schmelzverbindungsschweißen [5, S. 1f.]. Diese Verfahren werden noch in viele weitere Untergruppen unterteilt, für diese Arbeit sind jedoch nur zwei der Schmelzverbindungsverfahren von Bedeutung: das Metallschutzgas- und das Laserschweißverfahren.

2.1.1 Metallschutzgasschweißen (MSG)

Das Metallschutzgasschweißen fällt unter die Verfahren des Lichtbogenschweißens. Dabei wird Hitze durch Strom erzeugt; hierfür wird Gleich- oder Wechselstrom verwendet. Ein nachgeführter Draht, der sowohl als Elektrode, als auch als Schweißzusatz fungiert, brennt zwischen Schweißgerät und Werkstück ab und geht tropfenförmig auf dieses über. Um das Schmelzbad vor Oxidation zu schützen werden Schutzgase wie zum Beispiel Argon, Kohlenstoffdioxid oder Helium verwendet, die den Lichtbogen komplett umhüllen [5, S. 18f & 60f.].

2.1.2 Laserschweißen

Beim Laserschweißen wird ein Photonenstrahl auf das Werkstück geschossen. Dieser wird zum größte Teil (ca. 95%) reflektiert, jedoch reichen die restlichen 5% aufgenommenen Photonen, um die bestrahlte Fläche ausreichend zu erhitzen. Dieser Effekt beruht auf mehreren wichtigen Eigenschaften von Laserstrahlen. Zum einen haben alle gesendeten Wellen die gleiche Länge, sind also monochromatisch und zum anderen Verlaufen sie parallel (Kohärenz). Damit ist ein Photonenstrahl exakt fokussierbar und hat eine hohe Energiedichte ($>10^6 \text{ W/cm}^2$) [5, S. 89f.].

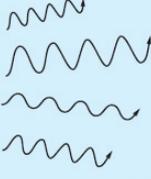
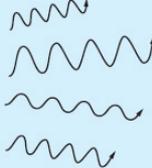
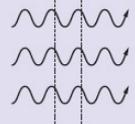
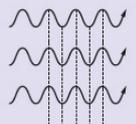
	Richtungs b ündelung (das Licht pflanzt sich in gerade Linie fort)	Monochromatizität	Kohärenz
Gewöhnliches Licht		 Viele unterschiedliche Wellenlängen	
Laserstrahl		 Nur eine einzige Wellenlänge	 Wellenspitzen und Wellentäler verlaufen parallel zueinander

Abbildung 2.1: Vergleich Laserlicht & Glühlampe¹

2.2 Bildverarbeitung

Die industrielle Bildverarbeitung lässt sich allgemein in drei Teile untergliedern. Bildgewinnung, Vorverarbeitung und Segmentierung[4, S. 27ff.].

¹Quelle: https://www.keyence.de/ss/products/marking/marking_central/question/qabasic.jsp [10.07.2019]

2.2.1 Bildgewinnung

Zu Beginn der Untersuchung wurde mit bereitgestellten Videos des Schweißprozesses gearbeitet, im späteren Verlauf der Arbeit wurden jedoch auch neue, genauere Videos mit der Industriekamera DFK 33GP2000e der Firma The Imaging Source erstellt. Die Spezifikationen der Kamera sind in Tabelle 2.1 aufgelistet. Es wurde ein Objektiv mit variabler Brennweite und Blendenöffnung genutzt.

Tabelle 2.1: DFK 33GP2000e Spezifikationen

Max. Auflösung [Pixel]	1920x1200
Pixelgröße [μm]	4.8
Max. Framerate [FPS]	50
Schnittstelle	GigE
Objektivanschluss	C

2.2.2 Vorverarbeitung

Um ein Bild besser bearbeiten zu können, ist meist eine Vorverarbeitung notwendig. Mittel der Vorverarbeitung sind zum Beispiel die Reduzierung der Größe des zu durchsuchenden Bereichs, um die Datenmenge während der Verarbeitung zu reduzieren. Ebenso ist die Rauschunterdrückung und -filterung sowie die Verstärkung und Verringerung gewünschter oder unerwünschter Bildeigenschaften durch Filter- und Unschärfe-Funktionen wichtig.[4, S. 27ff.]

2.2.3 Segmentierung

Anschließend kann dann die Segmentierung des Bildes beginnen, um gewünschte Objekte aufzufinden. Hierfür eignen sich Kantenerkennung oder die Filterung nach gewissen Objekteigenschaften (z.B. Farbe) mit anschließender Binarisierung[4, S. 27ff.].

2.3 Software

Da das Programm in weitere Projekte eingebunden werden soll, die in Qt und C++ geschrieben wurden, soll die Bildverarbeitungssoftware ebenfalls im Anwendungsframework Qt in C++, unter Zuhilfenahme der Open Computer Vision Bibliothek, implementiert werden.

2.3.1 Qt

Qt ist ein Software-Toolkit, dessen Hauptaugenmerk auf der Erstellung von grafischen Benutzeroberflächen und deren Einbindung in Programme ist. Qt ist in C++ programmiert und lässt die Kompilierung mit gängigen Compilern wie MSVC oder MinGW zu. Eine Besonderheit von Qt ist der Signal- und Slot-Mechanismus, der die ereignisgesteuerte Interaktion zwischen Programmobjekten ermöglicht.

Qt lässt sich sowohl kostenlos, über eine gemeinnützige Lizenz, als auch kommerziell nutzen.

2.3.2 Open Computer Vision Library

Die OpenCV Bibliothek ist sehr umfangreich, kann in C++, Python und JAVA genutzt werden und ist als open source Software zudem kostenfrei nutzbar. Sie wurde 1999 von Gary Bradski ins Leben gerufen mit dem Ziel das maschinelle Sehen schneller voranzutreiben.

OpenCV zeichnet sich durch über 500 einfach anzuwendende, jedoch trotzdem äußerst leistungsstarke Bildverarbeitungsfunktionen aus. Unter anderem in den Bereichen industrielle Prozessüberwachung, Kamera-Kalibrierung, Sicherheit, Stereo-Video und Robotik[3].

Die Funktionsweise der im Rahmen dieser Thesis verwendeten OpenCV-Funktionen wird in dieser Arbeit nur soweit erläutert, wie für das Verständnis der Wirkweise erforderlich. Für genauere Funktionsweisen wird an die offizielle Dokumentation verwiesen. Ein Link befindet sich im Literaturverzeichnis[2].

2.4 Mathematische Grundlagen

2.4.1 Homogene Koordinaten

Homogene Koordinaten werden zur einfacheren Darstellung von komplexen Bewegungen innerhalb eines Koordinatensystems oder auch zwischen zwei Systemen benötigt. Mit normalen (inhomogenen) Koordinaten muss zwischen Translationen (Verschiebungen) und linearen Abbildungen (Rotation, Skalierung, Spiegelung) unterschieden werden. Da sich diese nicht zu einer Gesamt-Transformation zusammenfassen lassen, müssen sie nacheinander ausgeführt werden. Dies erhöht jedoch den Rechenaufwand. Hier kommen die homogenen Koordinaten ins Spiel. Erhöht man die Dimension der zu berechnenden Bewegungen, so lassen sich auch Translationen als lineare Abbildung in Form von Matrizen aufschreiben und miteinander verrechnen[7, S. 373-380].

Gleichung 2.1 veranschaulicht dies anhand eines Beispiels.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + x_0 \\ y + y_0 \\ z + z_0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

2.4.2 Koordinaten-Transformation

Die Koordinaten-Transformation ermöglicht die Umrechnung von Koordinaten aus einem System in ein anderes. Die Skizze in Abbildung 2.2 zeigt die prinzipielle Unterteilung der Koordinatensysteme an einer Schweißanlage.

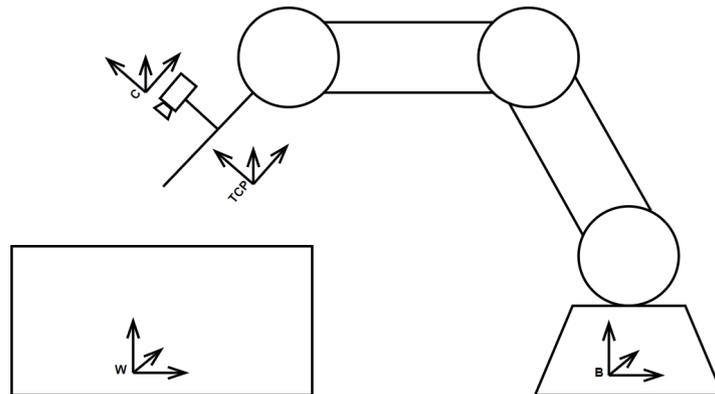


Abbildung 2.2: Koordinatensysteme einer Schweißanlage

Der Aufbau lässt sich noch viel feiner in Koordinatensysteme unterteilen, doch die für die Rechnung Wichtigsten sind das Weltkoordinatensystem, das Roboter-Basis-System, das System des Werkzeugs (Tool-Center-Point), sowie das Kamera-System (*engl. camera system*).

Das Weltkoordinatensystem repräsentiert das System, in dem tatsächlich geschweißt wird. Es ist in der Regel unbeweglich und in einem festen Abstand zur Roboter-Basis. Das Koordinatensystem der Roboter-Basis ist in der Regel ebenfalls fix und bildet die Basis der beweglichen Roboterteile.

Am Ende der beweglichen Roboterteile liegt der sogenannte Tool-Center-Point, also das Zentrum des Werkzeugs, in diesem Fall das Schweißgerät.

Um die Arbeit des Werkzeugs bestmöglich beobachten zu können muss eine Kamera mit einem fixen Abstand und Winkel die Bewegungen des Werkzeugs mitfahren. In der beispielhaften Skizze ist sie daher parallel auf dem Werkzeug befestigt.

Interessant sind nun die Beziehungen zwischen zwei Koordinatensystemen über die ein Ortsvektor des einen, in einen Ortsvektor des anderen Systems umgerechnet werden

kann. Dies gelingt über eine Koordinaten-Transformation, für die die jeweils spezifische Transformationsmatrix benötigt wird.

$${}^1\underline{\mathbf{v}} = \underline{\underline{\mathbf{T}}} \cdot {}^2\underline{\mathbf{v}} \quad (2.2)$$

Die Transformationsmatrix $\underline{\underline{\mathbf{T}}}$ setzt sich aus der Rotationsmatrix $\underline{\underline{\mathbf{R}}}$, sowie Matrizen für Skalierung, Spiegelung und Translation zusammen.[6] Es wird in homogenen Koordinaten gerechnet, damit lineare Abbildungen und Translationen zusammengefasst werden können.

$$\underline{\underline{\mathbf{T}}} = \underline{\underline{\mathbf{T}}}_S \cdot \underline{\underline{\mathbf{T}}}_R \cdot \underline{\underline{\mathbf{T}}}_T \quad (2.3)$$

$\underline{\underline{\mathbf{T}}}_S$ steht hierbei für die Skalierung bzw. Spiegelung um eine oder mehrere Achsen.[6]

$$\underline{\underline{\mathbf{T}}}_S = \begin{bmatrix} s_X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_Y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$\underline{\underline{\mathbf{T}}}_R$ beinhaltet die Rotationsmatrix $\underline{\underline{\mathbf{R}}}$, diese besteht aus drei verschiedenen Matrizen, jeweils eine für Drehungen um die x-, y- und z-Achse.[6]

$$\underline{\underline{\mathbf{R}}} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\underline{\underline{\mathbf{T}}}_R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$\underline{\underline{\mathbf{T}}}_T$ repräsentiert die Translation, also den Abstand der beiden Koordinatensysteme in Form des Translationsvektors.[6]

$$\underline{\underline{\mathbf{T}}}_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_T \\ 0 & 1 & 0 & y_T \\ 0 & 0 & 1 & z_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Da in homogenen Koordinaten gerechnet wird, kann nach der Berechnung der Einzelschritte die Gesamttransformation nach Gleichung 2.3 zusammengefasst werden.

3 Anforderungsanalyse

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an die Software beschrieben, dabei wird in funktionale und nichtfunktionale Anforderungen unterschieden.

3.1 Prozessanalyse

Bevor Anforderungen an das Programm gestellt werden, sollte der Prozess analysiert werden.

Beide Schweißverfahren sind in der Ausführung sehr ähnlich, jedoch nicht identisch. Deshalb müssen die spezifischen Merkmale der beiden Verfahren herausgearbeitet und charakterisiert werden.

3.1.1 MSG-Verfahren

Der Schweißprozess beim MSG-Verfahren zeichnet sich durch einen sehr hellen Punkt zwischen Werkzeug und Werkstück aus. Dies ist der Lichtbogen, der für dieses Verfahren charakteristisch ist. Das Schweißbad lässt sich sehr gut erkennen.



Abbildung 3.1: Schweißprozess beim Metallschutzgasverfahren

Die Maschine fährt in x-, y- und/oder z-Richtung, je nachdem wie es das interne Schweißprogramm vorgibt. Prozessbedingt ist der Schweißvorgang eine kontinuierliche Bewegung. Die Geschwindigkeit variiert, jedoch wird das Werkzeug nach Möglichkeit nicht komplett ausgeschaltet, neu angesetzt und wieder eingeschaltet. Dies ist ein starker Gegensatz zum Kunststoff-3D-Druck, bei dem dies gängige Praxis ist.

3.1.2 Laserschweißen

Beim Laserschweißen sind deutlich mehr Störungen zu erkennen. Auch hier sind ein heller Punkt in Form des Photonenstrahls und ein rotes Schmelzbad zu erkennen. Durch die Störungen sind sie jedoch weniger gut erkennbar als dies beim MSG-Verfahren der Fall ist.



Abbildung 3.2: Schweißprozess beim Laserschweißverfahren

Beide Prozesse haben eines gemeinsam: beide Maschinen arbeiten nach Schweißprogrammen, die ihnen mitteilen, in welche Richtung sie sich bewegen und schweißen müssen. Eine automatische Prozessüberwachung gibt es nicht. Tritt während des Ablaufs des Programms eine Störung auf, z.B. wenn das Werkstück zu heiß wird, dann kann die Maschine nicht darauf reagieren. Dies hat zur Folge, dass zur Zeit immer ein Mitarbeiter neben der Maschine stehen und die Energieintensität nachstellen muss um auf eventuelle Störfaktoren reagieren zu können.

3.2 Funktionale Anforderungen

Funktionale Anforderungen beschreiben die gewünschte Funktionalität der Bildanalyse-Software.

3.2.1 Region of interest

Die Bildverarbeitungssoftware soll den interessanten Bildbereich (*engl. region of interest*) in Präsenz von Funkenflug, Lichtbogen bzw. Laserstrahl robust erfassen. Diese Eingrenzung sorgt dafür, dass nicht das gesamte Bild durchsucht und bearbeitet werden muss, was die verarbeiteten Datenmengen möglichst gering hält und somit die Rechenzeit verringert.

3.2.2 Segmentierung

Der interessante Bildbereich soll in Schmelze und Plasma bzw. Laserstrahl segmentiert werden. Dies legt die Grundlage für die Vermessung.

3.2.3 Vermessung

Das Schweißbad soll vermessen und die erhaltenen Daten in reale Millimeter-Maße umgerechnet werden.

3.2.4 Grafische Benutzeroberfläche

Die grafische Benutzeroberfläche (*engl. graphical user interface (kurz GUI)*) soll nachvollziehbar und gut zu bedienen sein. Die Auswahl der verschiedenen Videodateien soll über einen Dialog möglich sein. Wichtige Prozessparameter sollen angezeigt und gegebenenfalls geändert werden können. Da das Programm noch nicht als Endanwender-Software gedacht ist, kommt dem optischen Erscheinungsbild ansonsten nur geringe Bedeutung zu.

3.3 Nichtfunktionale Anforderungen

Nichtfunktionale Anforderungen erweitern die funktionalen Anforderungen und beschreiben über diese hinaus, wie das System seine Leistung qualitativ erbringt.

3.3.1 Videomaterial

Zu Beginn der Arbeit lagen erste Videodateien vor. Im Verlauf sollen neue Aufnahmen gemacht und zur Validierung genutzt werden. Die Kamera soll am beweglichen Teil des Schweißgeräts festgemacht werden, so dass sie der Bewegung des Geräts folgen kann.

3.3.2 Robustheit

Die Robustheit der Schweißbaderkennung gegenüber Beleuchtungssituation, Bewegungsrichtung des Werkzeugs und weiteren Gegebenheiten soll gewährleistet sein.

Die Anforderungen des zukünftigen Reglers sind nicht bekannt, jedoch ist eine möglichst fehlerfreie und zuverlässige optische Erkennung der Schweißsituation für die präzise Funktion des Reglers unerlässlich.

3.3.3 Unabhängigkeit

Das Programm soll möglichst unabhängig vom verwendeten Schweißverfahren funktionieren. Eine universell anwendbare Lösung wird daher angestrebt.

3.4 Anforderungskatalog

Die einzelnen Anforderungen werden noch einmal in den Tabellen 3.1 und Tabelle 3.2 zusammengefasst und nach ihrer Priorität bewertet.

Tabelle 3.1: Anforderungskatalog funktional

Nummer	Funktionale Anforderung	Priorität
1.	Region of interest	hoch
2.	Segmentierung	hoch
3.	Vermessung	hoch
4.	Grafische Benutzeroberfläche	mittel

Tabelle 3.2: Anforderungskatalog nichtfunktional

Nummer	Nichtfunktionale Anforderung	Priorität
5.	Videomaterial	mittel
6.	Robustheit	hoch
7.	Unabhängigkeit	niedrig

Zu diesen Anforderungen lassen sich nun Lösungskonzepte erstellen.

4 Konzeption

In diesem Kapitel werden Lösungsvorschläge für die vorliegenden Anforderungen erarbeitet.

4.1 Konzeption der funktionalen Anforderungen

4.1.1 Region of Interest

Der interessante Bildbereich, den es genauer zu untersuchen gilt, sollte sehr nah um das Schmelzbad herum liegen, siehe Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2.



Abbildung 4.1: Region of interest MSG-Verfahren



Abbildung 4.2: Region of interest Laserschweißen

Er darf jedoch nicht zu nah gewählt werden, damit bei steigender Erwärmung des Werkstücks nicht das Schmelzbad über den gewählten Bereich hinausgeht und nicht mehr korrekt vermessen wird. Ebenso ist darauf zu achten, dass durch die freie Beweglichkeit der Schweißanlagen das Schmelzbad links, rechts, oberhalb und unterhalb des Werkzeugs sein kann. Zieht man diese Faktoren in Betracht, so wäre die ideale Lösung ein quadratischer Bereich rund um die Spitze des Werkzeugs.

Um diesen Punkt zu erkennen gibt es mehrere Möglichkeiten. So wäre es zum Beispiel denkbar die Umrisse des Schweißgeräts zu suchen und am unteren Ende den Mittelpunkt des interessanten Bildbereichs zu wählen. Das wäre jedoch umständlich und würde dem gewünschten universellen Charakter des Programms entgegenwirken, da nicht jedes Schweißgerät, das mit dem fertigen Programm überwacht werden können soll, ein ähnlich geformtes Werkzeug besitzt.

Im weiteren Verlauf des Projektes ist vorgesehen, dass die Kamera fest am Schweißgerät montiert wird, das bedeutet, dass die Spitze des Werkzeugs immer am gleichen Punkt im Bild ist, sodass auch ein auf dem Bildschirm gewählter, fixer Punkt als Mitte für die region of interest fungieren könnte. Da das Programm jedoch mit verschiedenen Kameras und Haltern verwendet werden soll, scheidet auch diese Möglichkeit aus.

Eine Konstante im Bildbereich bildet der Lichtbogen des MSG-Schweißgeräts, beziehungsweise der Photonenstrahl des Laserschweißgeräts. Beide zeichnen sich als sehr hellen Punkt auf dem ansonsten dunklen Bild deutlich ab. Es bietet sich an, nach diesem hellen Punkt zu suchen und den interessanten Bildbereich als Viereck hierum zu wählen. Damit wird gleichzeitig das Problem der Richtungswechsel gelöst. Da die region of interest auf allen vier Seiten mit Abstand um die Spitze des Werkzeugs gelegt werden kann, bleibt das Schmelzbad auch bei Richtungswechseln eingefangen.

4.1.2 Segmentierung

Bei der Segmentierung muss zwischen den beiden Verfahren unterschieden werden, da sie sich in der Abgrenzung von Schmelze und Plasma bzw. Laser stark unterscheiden.

MSG-Verfahren

Beim Metallschutzgasverfahren gibt es eine deutliche Abgrenzung des Schweißbads von dem Plasma. Eine Abgrenzung über Form oder Farbe ist grundsätzlich möglich. Zu Anfang des Schweißverfahrens ist das Schmelzbad oval, wird jedoch mit steigender Dauer immer länger und ändert somit seine Form. Zudem lässt sich mit diesem Verfahren auch ein Richtungswechsel des Werkzeugs nicht korrekt erfassen. Damit scheidet die Abgrenzung über die Form aus.

Bei der Segmentierung über die Farbe sieht es anders aus, da das Schmelzbad durch die

Hitze gleichbleibend orange-rot glüht, bis es abkühlt. Die Realisierung der Segmentierung über die Farbe ist damit das Verfahren der Wahl.

Laserschweißen

Das Laserschweißen unterscheidet sich bezüglich der Erkennbarkeit des Schweißbads stark vom MSG-Verfahren. Auf Abbildung 4.2 gut erkennbar, liegt eine Vielzahl von Störungen in Form von Funkenflug vor. Diese Funken weisen in Form und Farbe eine starke Ähnlichkeit mit dem Schmelzbad auf und können so fälschlicherweise als Schmelzbad erkannt werden. Auch eine Segmentierung über Nachbarschaft von angrenzenden Pixeln in Graustufen mit Schwellwert kommt aufgrund des zu geringen Kontrasts zwischen Schweißbad und Funken nicht in Frage. Eine Möglichkeit das Problem der Ähnlichkeit zu umgehen, wäre die region of interest sehr nah um das Schmelzbad zu legen, um dann möglichst viel Schmelzbad und möglichst wenig Funkenflug im zu analysierenden Bildbereich zu haben. Eine solche Lösung wäre jedoch speziell auf eine besondere Situation zugeschnitten und wäre sehr störungsanfällig gegenüber Änderungen der Fahrtrichtung oder der Dauer des Schweißvorgangs.

4.1.3 Vermessung

Die Vermessung des Schweißbads ist unerlässlich, wenn im künftigen Verlauf des Projekts ein Regler die Energiezufuhr des Schweißgeräts regeln soll.

Handelt es sich bei den vom Schweißgerät ausgeführten Bewegungen lediglich um parallel zur x-Achse verlaufende Änderungen, so reicht eine Betrachtung der relativen Größenänderungen aus.

Steigt die Schmelzbadgröße um einen gewissen Faktor an, so könnte der Regler die Energiezufuhr um einen gewissen Faktor verringern. Der genaue mathematische Zusammenhang wäre vorher zu ermitteln.

Ausschließlich Bewegungen entlang der x-Achse sind jedoch selten der Fall, Bewegungen in y- und z-Richtung sind beim Druck geometrischer Formen unvermeidbar. Hier muss, aufgrund der perspektivischen Verzerrung, mit absoluten Werten gerechnet werden.

Da die Bewegungsdaten des Roboters aus der Steuerung bekannt sind liegt es nahe, die Daten aus dem Roboter-System einfach auf die Bilddaten zu übertragen. Dies wäre technisch zwar möglich aber nicht zielführend, da im Bild die Komponente der Tiefe vollkommen fehlt und es daher zu Verzerrungen in der Darstellung kommt.

Perspektivische Verzerrung

In Abbildung 4.3 ist dies einmal beispielhaft zu sehen. Die geometrische Figur wurde mit gleicher Seitenlänge gedruckt, im Bild wird es jedoch dargestellt, als wäre die der Kamera zugewandt liegende Seite doppelt so lang wie die, die von der Kamera in die Tiefe wegzeigt.



Abbildung 4.3: Perspektivische Verzerrung

Wird die perspektivische Verzerrung ausser Acht gelassen, kann also nicht zuverlässig aus den, aus dem Bild gewonnenen, Bewegungsdaten in Pixeln die realen Bewegungsdaten berechnet werden.

Über die Nutzung der Bewegungsdaten des Roboters lässt sich dieses Problem lösen. Wählt man einen beliebigen Startpunkt aus und rechnet den dazugehörigen Ortsvektor der Spitze des Werkzeugs in Sensorkoordinaten um, so kann man bei Erreichen diesen Punktes mit dem Ende der Schweißbadspur den derzeitigen Standort der Spitze des Werkzeugs als Endpunkt setzen. Der Abstand von Start- und Endpunkt ist dann gerade die gesuchte Länge des Schweißbads.

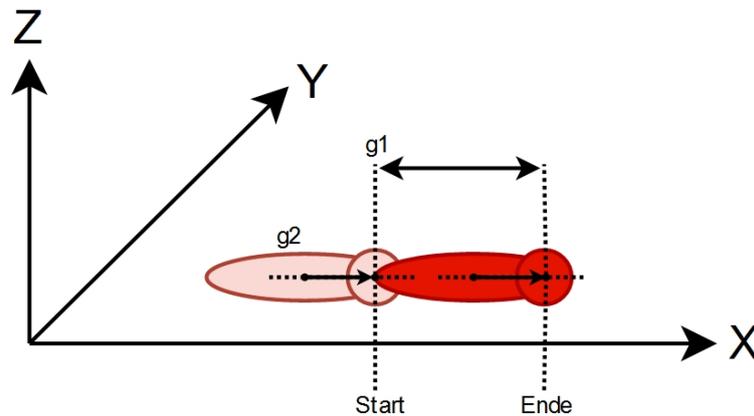


Abbildung 4.4: Schweißbadvermessung

Für das in Abbildung 4.4 dargestellte Verfahren sind einige Voraussetzungen zu erfüllen. Den genauen Startpunkt mit dem Ende der Schweißspur zu treffen ist sehr unwahrscheinlich, daher wird eine Gerade benötigt die diesen Punkt schneidet. Ändert das Schweißgerät seine Richtung während der Fahrt nicht, so wird diese Gerade auf jeden Fall vom Ende der Schweißspur geschnitten. Um die Ausrichtung dieser Geraden ($g1$ in Abbildung 4.4) möglichst genau zu erreichen sollte sie orthogonal zum Richtungsvektor (Pfeil bzw. $g2$ in Abbildung 4.4) des Schweißgeräts sein.

Von der Wahl des Startpunkts bis zum Erreichen des Startpunkts mit dem Ende des Schweißbads können mehrere Sekunden vergehen, dies würde das Programm verlangsamen und zu Problemen führen. Um eine kontinuierliche Messung der Länge zu erreichen müssen daher möglichst alle Ortsvektoren der Spitze des Schweißgeräts gespeichert und als Startpunkte verwendet werden. Je kleiner das Intervall für die Speicherung der Vektoren gewählt wird, umso öfter kann die Schweißbadlänge aktualisiert werden.

Für die Umrechnung der gespeicherten Vektoren ist dann eine Koordinatentransformation notwendig.

Diverse Transformationen sind bereits aus der Robotersteuerung bekannt und werden als gegeben angenommen (*die Umsetzung der Verknüpfung von Robotersteuerung und Bildverarbeitungsprogramm soll jedoch nicht Teil dieser Arbeit sein*). Die Transformation von Roboter-Basis zur Bewegung des Werkzeugs (**T**ool **C**enter **P**oint) ${}^B\mathbf{T}_{TCP}$ ist von großer Wichtigkeit, ebenso die Transformation von Roboter-Basis zum **W**eltkoordinatensystem ${}^B\mathbf{T}_{W}$.

Gesucht wird die Transformationsmatrix vom Kamerasystem (*engl. camera system*) zum Weltkoordinatensystem ${}^C\underline{T}_W$.

Diese lässt sich berechnen indem die Transformationen von der Kamera rückwärts gehend ausgeführt werden. Diese Operation entspricht einer Matrizenmultiplikation. Transformationen die in entgegengesetzter Richtung ausgeführt werden, werden mit der Inversen der Transformationsmatrix ausgeführt.

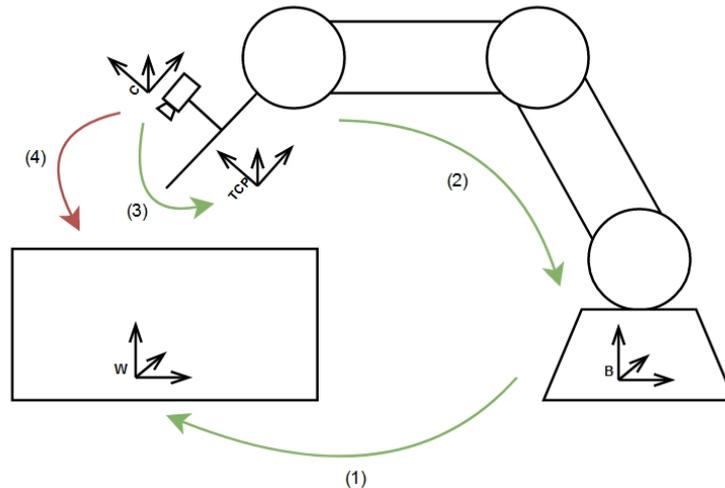


Abbildung 4.5: Benötigte Koordinatentransformationen

mit (1) $\hat{=} {}^B\underline{T}_W$, (2) $\hat{=} {}^{TCP}\underline{T}_B = {}^B\underline{T}_{TCP}^{-1}$, (3) $\hat{=} {}^C\underline{T}_{TCP} = {}^{TCP}\underline{T}_C^{-1}$, (4) $\hat{=} {}^C\underline{T}_W$

Damit ergibt sich Gleichung 4.1:

$${}^C\underline{T}_W = {}^{TCP}\underline{T}_C^{-1} \cdot {}^B\underline{T}_{TCP}^{-1} \cdot {}^B\underline{T}_W \quad (4.1)$$

Die einzige Unbekannte in dieser Gleichung ist die Transformationsmatrix ${}^{TCP}\underline{T}_C^{-1}$. Sie ist abhängig von der Anbringung der Kamera.

Hinweis: Die Translationsmatrix \underline{T} erfordert, dass Position und Ausrichtung der Kamera genau bekannt sind. Während der Dauer der Bachelorarbeit war eine präzise und dauerhafte Anbringung der Kamera aus Zeit- und Materialbeschaffungsgründen nicht möglich, deshalb wird die weitere Berechnung lediglich theoretisch dargestellt und wird auch im Programm selbst nur vorbereitend implementiert.

Zur weiteren Berechnung wird ${}^W \underline{v}$ benötigt. Dieser Vektor ist bekannt, da er sich aus der Robotersteuerung über die Vorschrift 4.2 berechnen lässt.

$${}^W \underline{v} = {}^B \underline{\underline{T}}_W^{-1} \cdot {}^B \underline{\underline{T}}_{TCP} \cdot {}^{TCP} \underline{v} \quad (4.2)$$

Mit Gleichung 4.3 lässt sich ein Ortsvektor ${}^W \underline{v}$ in Weltkoordinaten nun in sein Abbild im Kamerakoordinatensystem transformieren.

$${}^C \underline{v} = {}^C \underline{\underline{T}}_W \cdot {}^W \underline{v} \quad (4.3)$$

Mit den Bewegungsdaten der Kamera kann die Bewegung auf dem Computerbildschirm bzw. Kamerasensor berechnet werden. Dafür wird als letzte Transformation noch die Kameramatrix $\underline{\underline{K}}$ benötigt, sie besteht aus einer 2x2-Matrix mit der Brennweite auf der Hauptdiagonalen sowie einem angehängten Vektor, der den Versatz vom Bildschirmkoordinatenursprung zum Hauptpunkt der Kamera berücksichtigt. Die Matrix wird ebenfalls um eine Dimension erweitert.

$$\underline{\underline{K}} = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

OpenCV bietet die Funktion `cv::calibrateCamera()` die das Erstellen der Kamera-Matrix automatisch übernimmt[2]. Dafür wird mit der zu analysierenden Kamera eine bekannte Struktur mit einem Testmuster aus mehreren Winkeln betrachtet[3].

Mit Gleichung 4.4 folgt dann der letzte Schritt, die Umrechnung in Sensorkoordinaten.

$${}^S \underline{v} = \underline{\underline{K}} \cdot {}^C \underline{v} \quad (4.5)$$

$$\begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

4.1.4 Grafische Benutzeroberfläche

Die GUI wird von Qt bereits standardmäßig im Vorfeld als leeres Windows Fenster erstellt. Da alle Bilddarstellungen in separaten Fenstern aufgerufen werden, wird dieses eine Fenster für die GUI reichen. Da der Prozess nicht von alleine startet wird ein Knopf benötigt der das Video und damit auch die Bildverarbeitung startet. Ebenso wird ein Auswahldialog für die verschiedenen Videodateien benötigt.

Wichtige Prozessparameter die dem Nutzer angezeigt und von ihm verändert werden können sollten, sind die Minimum- und Maximum-HSV-Werte für die Farbfilterung bei der Suche nach den roten Konturen. Je nach Material, Kamera oder Lichtverhältnissen kann der Rot-Ton des Schmelzbads abweichen und muss für die korrekte Funktion des Programms vom Nutzer nachgestellt werden können.

Ebenso ist die Justierung der region of interest über die GUI von großer Wichtigkeit. Kann die region of interest während des Betriebs verkleinert werden, so wird die zu analysierende Datenmenge deutlich kleiner. Kann der interessante Bildbereich im Nachhinein vergrößert werden, so kann auf Änderungen in der Schmelzbadgröße/-länge reagiert werden ohne das Programm zu beenden und Variablen im Code ändern zu müssen.

Eine Schaltfläche zum Rücksetzen des gebildeten Mittelwerts ist ebenfalls wichtig und schlussendlich muss auch eine Schaltfläche vorhanden sein, die das Programm beenden kann.

4.2 Konzeption der nichtfunktionalen Anforderungen

4.2.1 Videomaterial

Hinweis: Bei der Erstellung neuen Videomaterials wurde sich auf den vielversprechenderen MSG-Prozess konzentriert. Das im Vorfeld zur Verfügung gestellte Video des Laserschweißprozess' reicht vorläufig aus.

Für die Befestigung der Kamera am Schweißgerät wurde eine Position unterhalb des Werkzeugs gewählt, da hier bereits Möglichkeiten zur Anbringung gegeben waren und die Kamera an dieser Position in alle Richtungen mitgenommen wird. Siehe Abbildung 4.6



Abbildung 4.6: Kamerahalter Position 1

Es stellte sich jedoch heraus, dass die Distanz viel zu kurz und der Winkel viel zu flach war. Es bestand die Gefahr, dass das Objektiv Spritzer abkriegen könnte, ausserdem wurden durch den zu geringen Winkel Details des Werkstücks in erheblichen Maße verdeckt.

Durch die Erhöhung von Abstand und Betrachtungswinkel, siehe Abbildung 4.7, wurden diese Probleme beseitigt. Die Kamera wurde parallel zum Werkzeug angebracht. Durch die leicht erhöhte Position war ein sehr guter Betrachtungswinkel von annähernd 45 Grad zu realisieren. Zu beachten ist, dass die Kamera in dieser Position lediglich Bewegungen in x- und y-Richtung mitgeht, für das Mitfahren der z-Richtung müsste ein Halter direkt am Werkzeug angebracht werden. Für die Erstellung des Programms reicht jedoch dieser provisorische Aufbau.



Abbildung 4.7: Kamerahalter Position 2

Als Aufnahmeformat wurde ein unkomprimiertes RGB32-Format mit 1920 x 1080 Pixel Auflösung genutzt. Damit war eine sehr saubere und detaillierte Aufnahme möglich. Die Kamera nutzt automatische Einstellungen für gain (Lichtempfindlichkeit) und Belichtungszeit. Um bessere Ergebnisse zu erhalten wurde gain manuell auf 0 dB gesetzt, die Belichtungszeit wurde auf 1/2000 Sek. gestellt. Abbildung 4.8 zeigt das Ergebnis.

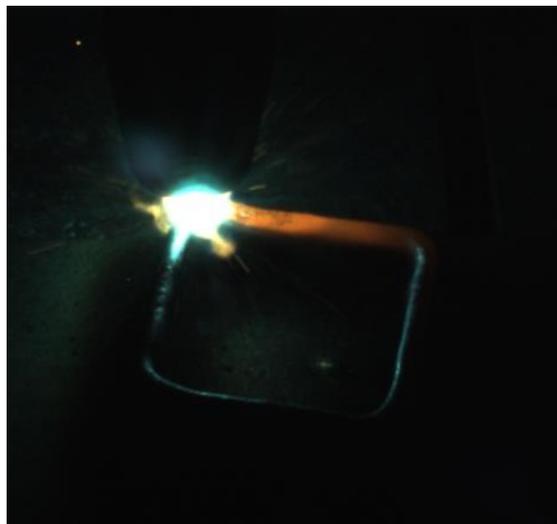


Abbildung 4.8: Ergebnis der Aufnahme

4.2.2 Robustheit

Bezüglich der Robustheit der Prozessanalyse gibt es für die beiden Schweißverfahren erhebliche Unterschiede.

MSG-Verfahren

Die Hauptstörfaktoren bei der Bildanalyse des Metall-Schutzgas-Schweißens sind Funkenflug, die Variation in der Intensität des Lichtbogens, Verdeckung durch das Werkzeug, sowie ein Glühen rund um das Auftreffen des Lichtbogens, welches farblich dem Schmelzbad sehr ähnlich sieht.

Der Funkenflug ist besonders stark beim Start des Schweißvorgangs, sowie an dessen Ende. Zum Großteil verläuft der Prozess sehr stabil, einzelne Spritzer können gut ausgefiltert werden. Beim Start des Prozesses (im weiteren Verlauf Einschwingvorgang genannt) würden jedoch alle Berechnungen nur unbrauchbare Informationen liefern, daher sollten sie erst nach Beendigung der Einschwingzeit aktiviert werden. Dies geschieht nach einer vorgegebenen Zeit oder kann vom Benutzer manuell in der grafischen Benutzeroberfläche aktiviert werden.

Die Variation, die man in regelmäßigen Intervallen beim Lichtbogen beobachten kann, ist eine Mischung aus den Faktoren Belichtungszeit und weit zugezogener Blende. Die Belichtungszeit ist sehr niedrig eingestellt (ca. 1/2000s) um trotz der extremen Helligkeit des Lichtbogens den Prozess beobachten zu können. Die Blende ist auf das Minimum zuge dreht, nur so kann ein Überstrahlen des Bildes verhindert werden. Dadurch, dass die Blende soweit zugezogen ist, kommt es jedoch zum Blendenblitz-Effekt. Hierbei bricht sich das Licht an den Einzelteilen der Blende, der sogenannten Iris. Da die Blendenöffnung durch diesen Aufbau (siehe Abbildung 4.9) nicht exakt rund ist, kommt es hier zu den genannten Brechungseffekten, die in Abbildung 4.10 dargestellt sind. Dieser Effekt hält in der Regel nur ein Bild lang an.

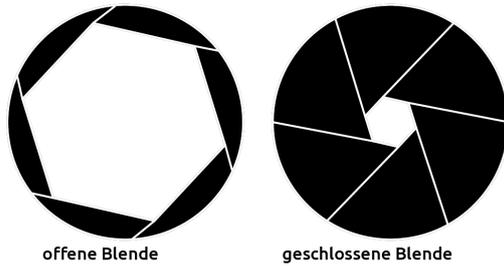


Abbildung 4.9: Aufbau Blende¹

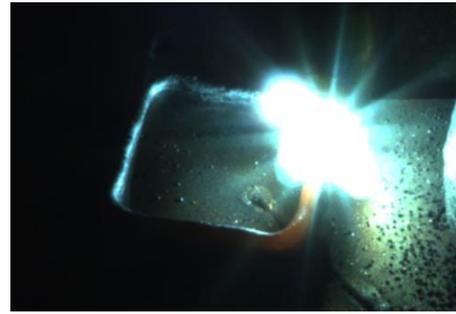


Abbildung 4.10: Blendenblitz-Effekt

Eine Lösung für das Problem wäre ein Neutrallichtfilter, der vor das Objektiv gesetzt werden kann. Damit wird das Bild dunkler, die Blende kann weiter geöffnet werden und der Blitzeffekt verringert sich. In der Kürze der Zeit war ein Test dieses Verfahrens jedoch nicht möglich.

Eine Lösung des Problems mit Software ist nachträglich nicht möglich, allerdings lässt sich über eine Mittelwertbildung der Konturengröße genau ermitteln wann ein Blendenblitz bzw. eine andere Bildstörung vorliegt. Für die Dauer der auftretenden Störung kann dann die Berechnung unterbrochen werden, um ein möglichst sauberes Ergebnis zu erzielen.

Dieselbe Lösung löst gleichzeitig auch das Problem der Verdeckung durch das Werkzeug. Bei Bewegungen des Werkzeugs auf die Kamera zu wird das Schmelzbad immer verdeckt sein, dann liefert der Algorithmus fälschlicherweise eine Schmelzbadgröße von 0 zurück. Hier ist ebenfalls eine Mittelwertbildung der Konturgrößen sinnvoll. Weicht die Kontur von einem Moment auf den anderen signifikant von der letzten Größe ab, so ist von einer Störung auszugehen. Dieser Zusammenhang gilt generell, da die Temperaturänderungen des Schweißbads eher träge ablaufen. Die Grenzen, ab denen eine Konturgröße als Störung bewertet wird, dürfen bezüglich der perspektivischen Verzerrung jedoch nicht zu eng gewählt werden, da sonst bei einem Richtungswechsel fälschlicherweise von einer Störung ausgegangen werden könnte.

Laserschweißen

Eine ausreichende Robustheit ist mit den Kompromissen aus dem Segmentierungskonzept aus Abschnitt "4.1.2 Segmentierung" nicht erreichbar.

¹Quelle: <https://reisezoom.com/wp-content/uploads/2016/03/blende.png>

4.2.3 Unabhängigkeit

Schon bei der Suche nach dem hellsten Punkt und bei der Erstellung der region of interest zeigt sich, dass die Schweißverfahren zu unterschiedlich sind, als dass Sie durch dieselbe Funktion bearbeitet werden könnten. Allerdings ähneln sie sich trotzdem in gewissem Maße, so dass zumindest dieselben, vom Nutzer zu beeinflussenden, Variablen verwendet werden können. Somit wird lediglich eine grafische Oberfläche für die zwei Verfahren benötigt.

5 Implementierung und Test

In diesem Kapitel wird zuerst die Implementierung der Konzepte vorgestellt, danach wird der Gesamtablauf des Programms erklärt und das Erreichen der Anforderungen getestet.

5.1 Implementierung der funktionalen Anforderungen

5.1.1 Region of Interest

Zur Umsetzung des in Abschnitt "4.1.1 Region of Interest" erarbeiteten Konzepts eignet sich die Funktion `cv::inRange()`. Diese Funktion filtert einen gewählten Farbbereich aus dem Ursprungsbild und speichert das Ergebnis ab. Der Rest des Bildes bleibt schwarz. Um Variationen in der Weißintensität abzufangen wurde zwischen $(235, 235, 235)$ RGB, was ein sehr leichtes Grau abbildet und $(255, 255, 255)$ RGB, was reines Weiß darstellt, gefiltert[2]. Das entstandene binarisierte Bild wird mit der Funktion `cv::findContours()` bearbeitet, welche in einem Bild, das als `cv::Mat`-Format vorliegt, alle Konturen auffindet und abspeichert[2]. Über einen Größenvergleich der gefundenen Konturen muss noch nach der größten Kontur gefiltert werden. Diese entspricht dem gewünschten hellsten Punkt im Bild. Danach kann, wie in Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 zu sehen, über die Funktion `cv::minRect()` ein Rechteck um die Kontur gelegt werden[2].



Abbildung 5.1: Region of interest MSG-Verfahren

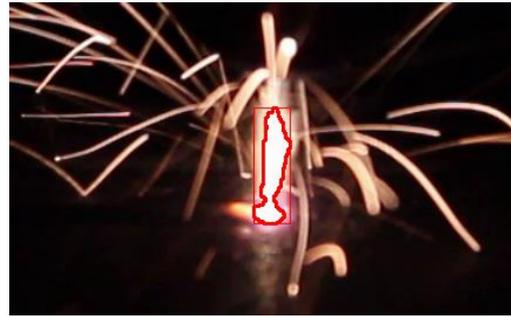


Abbildung 5.2: Region of interest Laserschweißen

Um den Anforderungen gerecht zu werden muss dieses Rechteck nun noch vergrößert und verschoben werden. Hierbei muss in die unterschiedlichen Verfahren unterschieden werden.

MSG-Verfahren

Beim MSG-Verfahren ist die Anpassung des Konturen-Rahmens an die Anforderungen der region of interest problemlos. Da die Größe der umrandeten Kontur nach dem Einschwingen konstant bleibt, muss der Rahmen nur ausreichend Richtung Ursprung versetzt und sowohl in der Länge, als auch in der Breite so weit vergrößert werden, dass das Schweißbad auch bei steigender Hitze bzw. Länge, und bei Richtungswechseln vollständig sichtbar ist.

In der grafischen Nutzeroberfläche wurden außerdem Schaltflächen zur nachträglichen Anpassung an veränderte Gegebenheiten wie zum Beispiel Änderungen der Schweißbadtemperatur und damit einhergehender Änderung der Länge, implementiert.

Laserschweißen

Beim Laser-Schweißen ist die Größe der umrandeten Kontur sehr unstetig, zudem erfolgen Änderungen sprunghaft. Da diese Änderungen jedoch nur die vertikale Achse in positiver Richtung beeinflussen, bietet sich die untere, rechte Ecke der Kontur als Basis für den interessanten Bereich bei diesem Verfahren an. Dafür muss die untere rechte Ecke der Umrandung des hellsten Punkts als Basis für die obere linke Ecke der region

of interest gewählt werden und dann ähnlich wie beim MSG-Verfahren in Richtung Koordinatenursprung verschoben werden. Danach müssen ebenfalls noch Länge und Breite des Bereichs erhöht werden.

Auswertung und Test: Die Anforderung den interessanten Bildbereich ungeachtet der Störeinflüsse zu erkennen, wurde für beide Schweißarten gleichermaßen erfüllt. Über die Anforderung hinaus ist auch eine nachträgliche Justierung der region of interest möglich.

5.1.2 Segmentierung

MSG-Verfahren

Das in Abschnitt "4.1.2 Segmentierung" erstellte Konzept wird ebenfalls durch die OpenCV-Funktion `cv::findContours()` realisiert. Da nicht alle Konturen erwünscht sind und `cv::findContours()` mit binarisierten Bildern am besten funktioniert, müssen zuerst einige Umwandlungen ausgeführt werden.

Als erstes wird das Bild mit der Funktion `cv::cvtColor()` vom RGB-Farbraum, in dem Bilder über die Rot-, Grün- und Blau-Werte ihrer Pixel repräsentiert werden, in den HSV-Farbraum überführt, wo Bilder über den Farbwert (engl. *hue*), die Farbsättigung (engl. *saturation*) und Hellwert (engl. *value*) dargestellt werden[2].



Abbildung 5.3: RGB-Farbraum

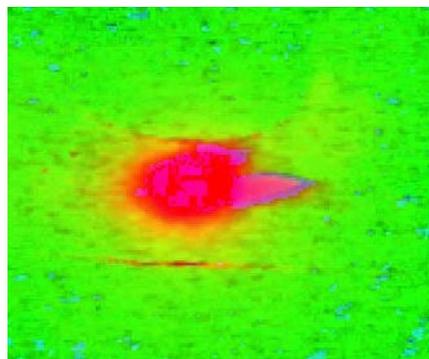


Abbildung 5.4: HSV-Farbraum

Danach wird über die Funktion `cv::inRange()` der Farbbereich rausgesucht der das Schweißbad am besten repräsentiert, der Rest wird ausgeblendet. Wie in Abbildung 5.5 zu erken-

nen ist, ist das gefilterte Bild noch mit einigen Störungen versehen, die die Suche nach Konturen negativ beeinflussen würden[2].



Abbildung 5.5: Resultierendes Bild

Um diese Störungen zu entfernen eignen sich die blurring-Funktionen (*deutsch verschwimmen/verwischen*) von OpenCV. Es gibt mehrere dieser Funktionen doch eignet sich nur die `cv::medianBlur()` Funktion, da sie im Gegensatz zur normalen `cv::blur()` oder `cv::GaussianBlur()` nicht nur verwischt, sondern einen Bereich gewählter Größe (*Kernel, hier 7*) betrachtet und für diesen Bereich einen Mittelwert der benachbarten Pixel berechnet[2].

Diese Funktion alleine reicht jedoch nicht aus, um das Bild störungsfrei zu bekommen. Um die Störungen annähernd vollständig zu entfernen, wird zusätzlich die Funktion `cv::erode()` benötigt[2]. Diese Funktion nimmt alle Konturen und erodiert, verkleinert sie auf das gewünschte Maß. Zu beachten ist hierbei, dass die Funktion nicht nur unerwünschte, sondern auch erwünschte Details aus dem Bild entfernt. Deshalb wird die Funktion lediglich zweimal aufgerufen, obwohl minimale Störungen zurückbleiben. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.6 zu sehen.



Abbildung 5.6: Annähernd störungsfreies Bild

Das annähernd störungsfreie Bild eignet sich nun zur Verwendung mit `cv::findContours()`.

Die Funktion wird mehrere Konturen zurückliefern, beispielhaft wären es drei in Abbildung 5.6. Man kann davon ausgehen, dass im eingeschwungenen, stabilen Zustand die Kontur des Schweißbades immer größer sein wird als alle anderen. Daher kann man die Konturen mit `cv::contourArea()` auf ihre Größe hin untersuchen und nur jeweils die größte davon anzeigen lassen. Diese Kontur kann dann mit Hilfe von `cv::drawContours()` farblich umrahmt werden. Dies ist am anschaulichsten auf dem unbearbeiteten, ursprünglichen Bildsignal, siehe Abbildung 5.7[2].



Abbildung 5.7: Erfasstes Schmelzbad

Auswertung und Test: Die Anforderung den interessanten Bildbereich in Plasma und Schmelze zu unterteilen wurde, wie in Abbildung 5.7 zu sehen, eindeutig erfüllt.

Laserschweißen

Der Prozess des Laserschweißens ist durch starke Störungen in Form von Funkenflug charakterisiert. Die Funken treten kontinuierlich in einer nicht unerheblichen Anzahl auf und ähneln dem Schweißbad in Form, Größe und Farbe. Daher eignet sich der für das MSG-Verfahren implementierte Algorithmus nur bedingt für die Analyse dieses Verfahrens.

Wendet man die gleichen Schritte wie beim MSG-Verfahren an, verringert jedoch den zu durchsuchenden Bereich auf ein absolutes Minimum (siehe Abbildung 5.11), so wird zumindest die Erkennung eines Teils des Schmelzbades möglich. Dafür müssen wie beim MSG-Verfahren die richtigen Farbwerte gefiltert werden. Das resultierende binarisierte Bild ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Das Ergebnis der `cv::findContours`-Funktion ist in Abbildung 5.10 zu sehen.



Abbildung 5.8: Region of interest



Abbildung 5.9: Gefiltertes Bild

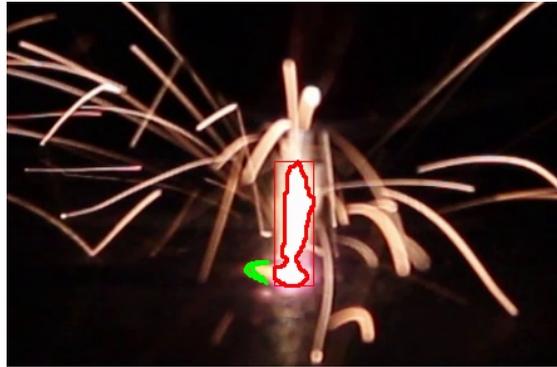


Abbildung 5.10: Erfasstes Schmelzbad

Auswertung und Test: Durch die `cv::medianBlur`- und `cv::erode`-Funktionen wird das Schmelzbad deutlich kleiner angezeigt, als eigentlich erkennbar wäre. Die Form der vom Algorithmus erkannten Kontur lässt sich jedoch zumindest erahnen. Mit diesem Ergebnis ließe sich weiterarbeiten, wenn die Erkennung stabil wäre. Bei genauerem Hinsehen wird jedoch deutlich, dass es sich um viele kleine Konturen handelt, die in ihrer Gesamtheit nach einer großen aussehen. Die Darstellung ist auch nicht gleichbleibend gut und wird zum Beispiel von über das Schweißbad fliegenden Funken gestört.

Die Anforderung den interessanten Bildbereich in Laser und Schmelze zu unterteilen wurde daher nicht erreicht.

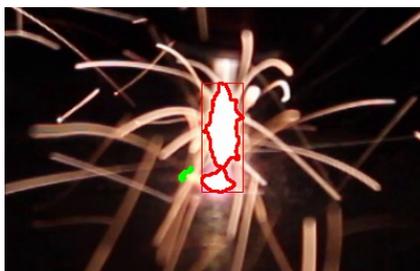


Abbildung 5.11: Störung durch Funkenflug

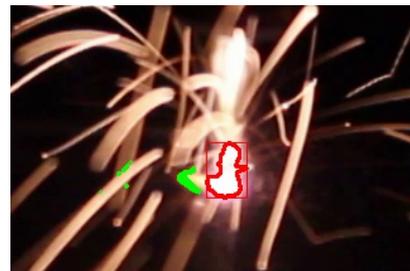


Abbildung 5.12: Fehlerhafte Erkennung

5.1.3 Vermessung

Die relative, Verzerrung ausser Acht lassende, Vermessung des Schweißbads ist über die Funktion `cv::size()` möglich. Die Länge des Schweißbads lässt sich über die Breite der Konturumrandung bei horizontalen Bewegungen und über die Höhe des Rahmens bei vertikalen Bewegungen berechnen. Der Richtungsvektor des Werkzeugs lässt sich über die Schwerpunkte der Kontur des hellsten Punkts sowie der größten roten Kontur berechnen. Legt man durch diese Punkte eine Gerade, so stellt diese den Richtungsvektor dar. Da die Kontur des hellsten Punkts annähernd rund ist, lässt sich mit der Funktion `cv::minEnclosingCircle()` ein umrandender Kreis finden, der gleichzeitig auch den Mittelpunkt dieses Kreises zurückliefert. Das ist Punkt eins der Geraden. Den zweiten Punkt erhält man durch den Schwerpunkt des Schmelzbads. Das Schmelzbad hat keine runde Form, daher muss der Mittelpunkt anders berechnet werden um genaue Ergebnisse zu erzielen. Dazu wird die Funktion `cv::moments()` genutzt[2].

Mit den beiden gefundenen Punkten lässt sich nun eine Gerade beziehungsweise ein Richtungspfeil bestimmen und einzeichnen (siehe Abbildung 5.13).

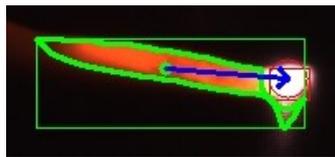


Abbildung 5.13: Resultierender Richtungspfeil

Die Matrizen und Vektoren die für die Koordinatentransformation benötigt werden, wurden bereits vorbereitend implementiert, konnten jedoch noch nicht mit richtigen Werten gefüllt werden.

Da noch keine Schnittstelle zwischen Steuerung und Programm entwickelt wurde und kein endgültiger Platz für die Kamerabefestigung feststeht, wurde die genauere Berechnung der Werte über die Robotersteuerung vorerst nicht implementiert.

Auswertung und Test: Es wurde ein den Anforderungen entsprechendes Konzept erstellt. Die Umsetzung dieses Konzepts soll zwar nicht Teil dieser Arbeit sein, eine theoretische Überlegung zum Konzept ist jedoch trotzdem möglich.

Ein großer Nachteil des Konzepts ist, dass das Verfahren nicht mit Richtungswechseln zurechtkommt. Es liefert nur für lineare Bewegungen in horizontaler oder vertikaler Richtung genaue Werte. Hier gibt es noch Verbesserungspotential.

5.1.4 Grafische Benutzeroberfläche

Die Umsetzung des Konzepts aus Abschnitt "4.1.4 Grafische Benutzeroberfläche" ist in Qt sehr intuitiv und anwenderfreundlich. Aus einer vorgegebenen Toolbox (siehe Abbildung 5.14) können verschiedene Knöpfe, Taster und Anzeigeelemente per "drag and drop"-Verfahren ausgewählt und in dem leeren Fenster platziert werden. Über den Signal-Slot-Mechanismus kann den Elementen dann eine spezielle Funktion zugewiesen werden.

Relevant für die grafische Nutzeroberfläche waren ein Auswahldialog für die Videoateien, der Startknopf für die Videoanalyse, Schaltflächen zur Nachjustierung der region of interest, eine Rücksetztaste für die Mittelwertbildung sowie eine Schaltfläche zur Beendigung des Programms.

Für den Auswahldialog bietet sich eine Combo-Box an. Wird die Combo-Box angeklickt öffnet sich ein Auswahlbereich, in dem selbsterstellte Auswahlmöglichkeiten dargestellt werden. Die Auswahl per Mausklick ist das Signal, dass eine Integer-Übergabe an `mainwindow` zur Funktion `selectVideo()` auslöst. Hier wird durch eine `switch-case`-Anweisung das gewünschte Video ausgewählt und zusätzlich auch die standardmäßigen HSV- und Einschwingwerte voreingestellt. Ein Programmablaufplan für `selectVideo()` ist in Abschnitt "5.3 Programmablauf" dargestellt, das Ergebnis der Schaltfläche ist in den Abbildungen Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 zu sehen.

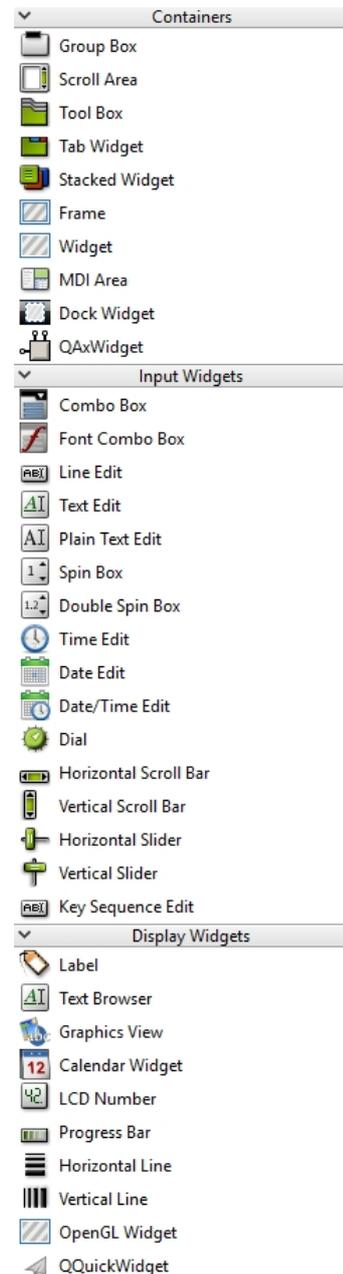


Abbildung 5.14: GUI-Toolbox

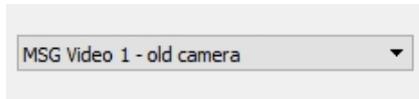


Abbildung 5.15: GUI Auswahldialog

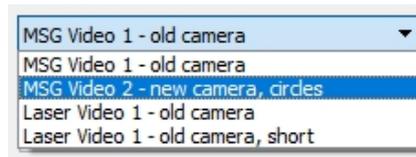


Abbildung 5.16: GUI Auswahldialog geöffnet

Für die restlichen Schaltflächen können sogenannte Push-Buttons verwendet werden, das sind Schaltflächen die bei einem bestimmten Signal (z.B. anklicken) eine bestimmte Aktion ausführen. In diesem Fall die Änderung von Prozessparametern sowie das Beenden des Programms. Die GUI ist in Abbildung 5.17 dargestellt.

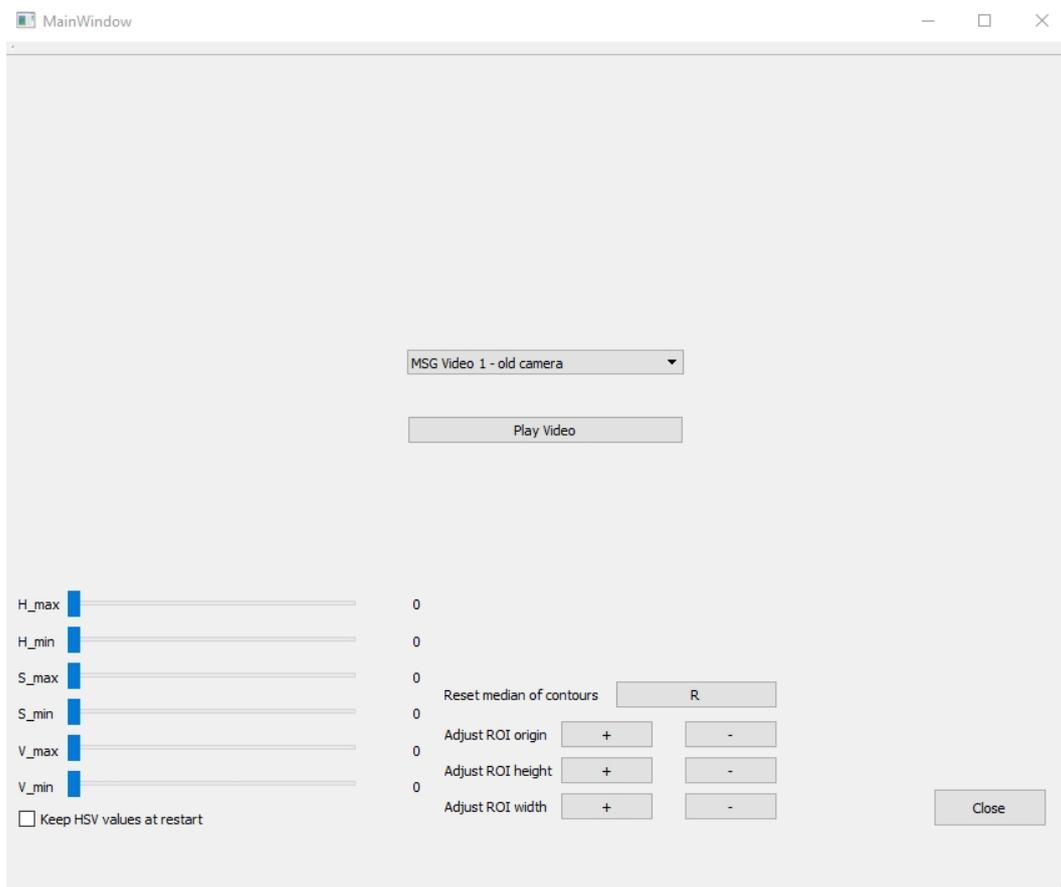


Abbildung 5.17: Übersicht grafische Nutzeroberfläche

Auswertung und Test: Alle Anforderungen an die grafische Nutzeroberfläche sind erfüllt.

5.2 Implementierung der nichtfunktionalen Anforderungen

5.2.1 Robustheit

Die Umsetzung des in Abschnitt "4.2.2 Robustheit" erarbeiteten Konzepts für den MSG-Schweißprozess geschieht teilweise schon bei der Segmentierung, da hier der Funkenflug größtenteils aus dem Bild gefiltert wird.

Es bleiben noch die Störungen während der Einschwingzeit, spontane Störungen während des Schweißvorgangs sowie die Verdeckung durch das Werkzeug.

Die Störungen während der Einschwingzeit lassen sich leicht aussondern in dem man die Berechnungen erst nach Erreichen des stabilen Zustands aktiviert. Bei den Videodateien ist dies über eine festgestellte Zeit gesteuert. Erst nach Ablauf dieser Zeit starten die Berechnungen. Im zukünftigen Verlauf des Projektes sollen die Videodateien durch einen Kamera-Live-Feed ersetzt werden. Hier wäre es denkbar, dass der Nutzer einen Knopf bei Erreichen des stabilen Zustands betätigt, oder dass über die Änderungsrate der Schmelzbadgröße geschlussfolgert wird, wann die Einschwingphase beendet ist.

Für die spontanen Störungen wurde das Konzept einer Mittelwertabfrage entwickelt; im Detail wurde diese Abfrage zweistufig implementiert. Im ersten Schritt werden alle Werte der Schmelzbadgrößen betrachtet. Von diesen werden zum Start des Verfahrens die ersten beiden Größen aufaddiert und durch ihre Anzahl geteilt, um einen Mittelwert zu bilden. Danach wird jede weitere Schmelzbadgröße zuerst mit dem Mittelwert verglichen und nur zur Mittelwertbildung hinzugezogen, wenn sie in einem gewissen Rahmen liegt. In der Praxis erwies sich eine Abweichung von 300% nach oben, sowie 33% nach unten als praktikabel. Durch dieses Verfahren werden Störungen gar nicht erst in den Mittelwert eingerechnet.

Wenn es um die Einzeichnung der Konturen, Rahmen und des Pfeils geht, wird dasselbe Verfahren angelegt, hier werden die Grenzen jedoch noch etwas enger gelegt. Sie werden nur eingezeichnet wenn die Kontur maximal 1.5 Mal größer und minimal 0.5 Mal kleiner ist als der Mittelwert der Konturen.

Auswertung und Test: Die Schweißbad-Fehlerkennung sollte möglichst gering sein. Wird ein Videodurchlauf Bild für Bild angezeigt und analysiert, lässt sich eine prozentuale Fehlerkennungsquote berechnen. Dafür werden nur Werte aus dem stabilen Zustand des Schweißvorgangs gezählt. Anfang und Ende bleiben außen vor.

Wertet man den stabilen Bereich des ersten, zu Anfang zur Verfügung gestellten MSG-Videos aus, so kommt man von Bild 140 bis zu Bild 490 auf 32 Fehlerkennungen, das macht bei 350 durchsuchten Frames eine Fehlerquote von rund 9,14%. Es ist auffällig, dass es direkt nach dem Umschwenken der Kamera eine Häufung von Störungen gibt. Hier wird die Mittelwertabfrage durch die perspektivische Verzerrung gestört. Um Bild 335 herum ist eine echte Störung erkennbar, die Energieintensität wird für einen kurzen Moment erhöht, dadurch wird das Bild stark überbelichtet und das Schmelzbad wird für den Algorithmus nicht mehr erkennbar.

Beim neugedrehten Video kommt der Algorithmus auf eine Fehlerquote von 12,12%, wenn man nur die Bilder auswertet, die zwischen der Verdeckung des Schweißbads vom Werkzeug (wie zum Beispiel zwischen Bild 16 und 132) liegen. Dies ist hauptsächlich auf die Blendenblitze zurückzuführen. Diese Strahlen so intensiv, dass das Schmelzbad teilweise oder komplett verdeckt wird. Danach ist die Schweißbadgröße zu klein für die Mittelwertabfrage.

5.3 Programmablauf

Der Programmablauf ist sehr linear. Das Programm teilt sich auf in main, mainwindow und die Klasse weldpoolmeasurement. Main und mainwindow werden von Qt automatisch erzeugt. Main ruft mainwindow auf und wurde nicht verändert.

Im Folgenden werden die wichtigsten Funktionen in abstrakter Weise als Programmablaufplan dargestellt.

mainwindow: In mainwindow laufen alle Ein- und Ausgaben der GUI zusammen. Erst mit einem Klick auf "Play Video" wird die Bildanalyse wirklich gestartet. Zuerst wird die Funktion selectVideo() gestartet, welche anhand der Video-Auswahl im Dialogfenster einige Einstellungen vornimmt wie Farbwerte, nach denen gefiltert werden muss oder die Dauer des Einschwingvorgangs. Alle diese Werte können jedoch jederzeit über die Nutzeroberfläche abgeändert werden.

Je nach Auswahl wird danach die Bildverarbeitungs-Funktion für das MSG- oder das Laserschweißen gestartet. Die jeweilige Funktion läuft dann in einer Dauerschleife und gibt nach jedem Durchlauf das bearbeitete und analysierte Bild an mainwindow zurück, welches dieses dann ausgibt.

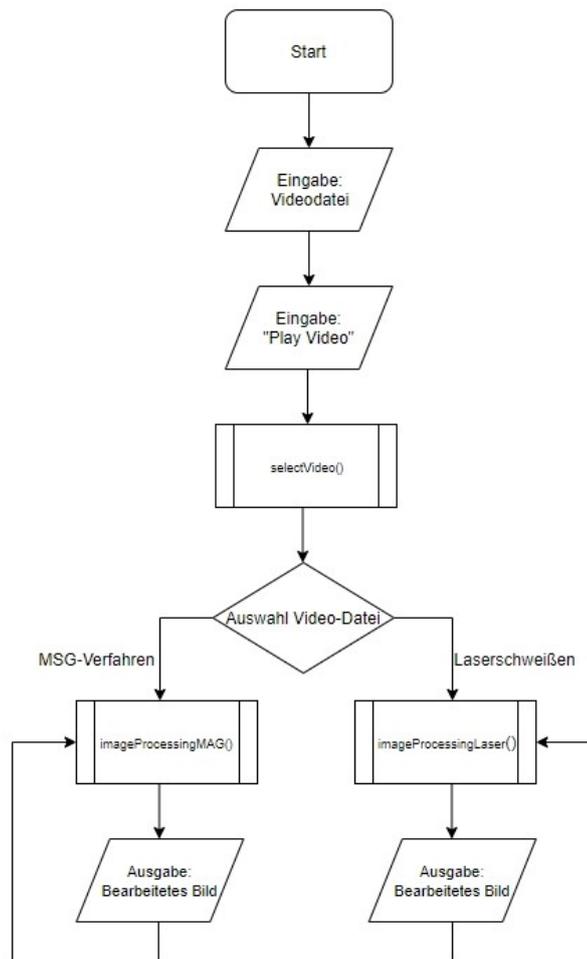


Abbildung 5.18: mainwindow

selectVideo: Die Funktion selectVideo bekommt aus dem Video-Auswahldialog einen Integer-Wert geliefert, anhand dessen sie per Switch-Case-Anweisung das gewünschte Video wählt und spezifische Einstellungen für Verfahrenstyp, HSV-Filterwerte und Dauer des Einschwingvorgangs auswählt.

imageProcessingMSG(1): Die Funktionen der Klasse weldpoolmeasurement sind von der mainwindow Klasse ausgelagert, um möglichst einfach in andere Programme integrierbar zu sein. Sie enthält die Funktion imageProcessingMSG und imageProcessingLaser, die die eigentliche Bildverarbeitung enthalten. Der Programmablauf ist in Abbildung 5.19 dargestellt.

Nach ihrem Aufruf in mainwindow beginnt die Funktion mit der bereits in 5.1.1 (Region of Interest) beschriebenen Suche nach dem hellsten Punkt, der Ermittlung des größten hellen Punkts, sowie der Berechnung der Rahmen und Umkreisungen. Sind alle gefundenen Konturen durchgegangen geht es weiter mit dem nächsten Schritt.

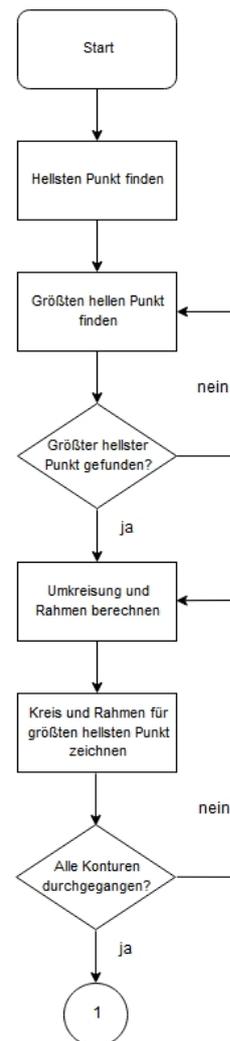


Abbildung 5.19: imageProcessingMSG(1)

imageProcessingMSG(2): Der nächste Schritt ist in Abbildung 5.20 dargestellt.

Mit den im erstem Schritt gefundenen Kontur-Rahmen für den größten, hellsten Punkt wird nun, wie ebenfalls im Abschnitt 5.1.1 (Region of Interest) erläutert, die region of interest gebildet und diese im Anschluss für die Suche nach den roten Konturen genutzt. Das genaue Vorgehen wurde im Abschnitt 5.1.2 (Segmentierung) genauer erklärt.

Ist die größte, rote Kontur gefunden wird ihre Größe berechnet und auf Plausibilität geprüft (siehe Abschnitt 5.2.1 (Robustheit)). Ist der Wert realistisch, wird er zur Mittelwertbildung hinzugezogen. Weicht er zu stark ab, so wird der Wert nicht in den Mittelwert eingerechnet.

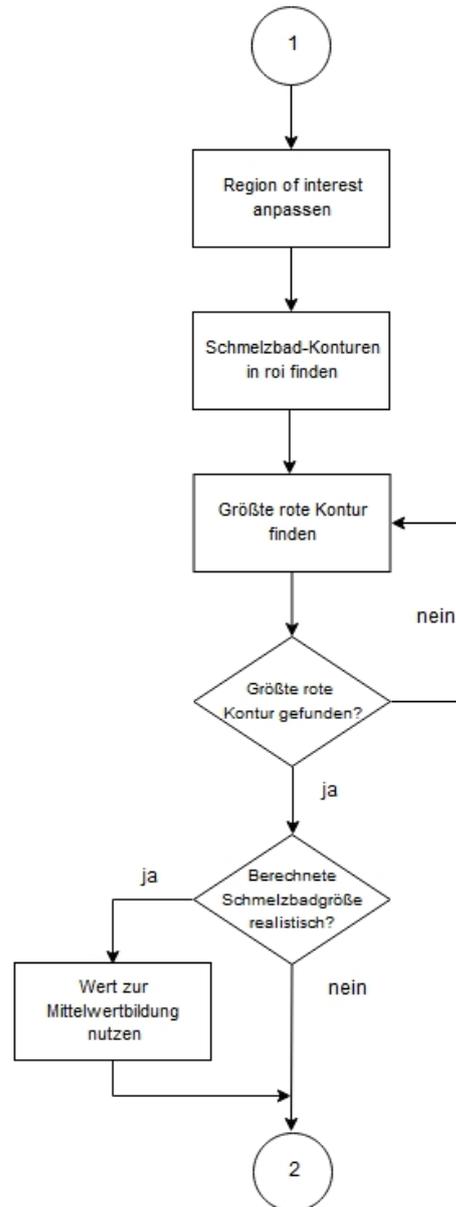


Abbildung 5.20: imageProcessingMSG(2)

imageProcessingMSG(3): Der nächste Schritt ist in Abbildung 5.21 dargestellt.

Ist der Plausibilitätscheck für die Mittelwertbildung erfolgt, folgt im Anschluss die Prüfung der Schmelzbadgröße anhand dieses Mittelwerts. Ist der Wert realistisch, werden Kontur und Rahmen eingezeichnet. Weicht er zu stark ab wird vorgemerkt, dass kein Richtungspfeil benötigt wird. Dieser benötigt nämlich einen Start und einen Endpunkt. Den Endpunkt haben wir jedoch nicht, wenn das Berechnen und Zeichnen der Kontur aufgrund von falschen Schmelzbadgrößen ausgesetzt wird. Dieser Prozess wird wiederholt, bis alle gefundenen Konturen durchgegangen sind.

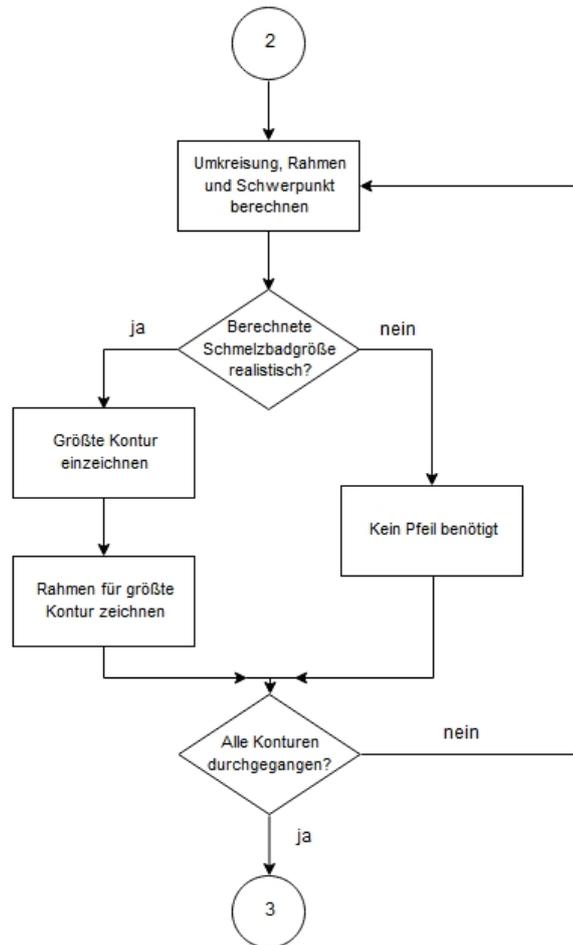


Abbildung 5.21: imageProcessingMSG(3)

imageProcessingMSG(4): Im letzten Schritt, abgebildet in Abbildung 5.22, geht es primär um die Fertigstellung des Bildes für die Ausgabe.

Zuerst wird abgefragt, ob der Richtungspfeil benötigt wird. Ist dies der Fall, so wird der Pfeil erstellt und seine Länge berechnet. Dies wurde bereits im Abschnitt 5.1.3 (Vermessung) genauer beschrieben. Anschließend werden die wichtigsten Informationen auf das Bild geschrieben. Dies sind ein Zähler, der das aktuelle Bild angibt, die Schmelzbadgröße und den Mittelwert aller Größen, die Pfeillänge und ein Status, der anzeigt, ob sich der Prozess im Einschwingvorgang befindet, oder ob eine Störung vorliegt.

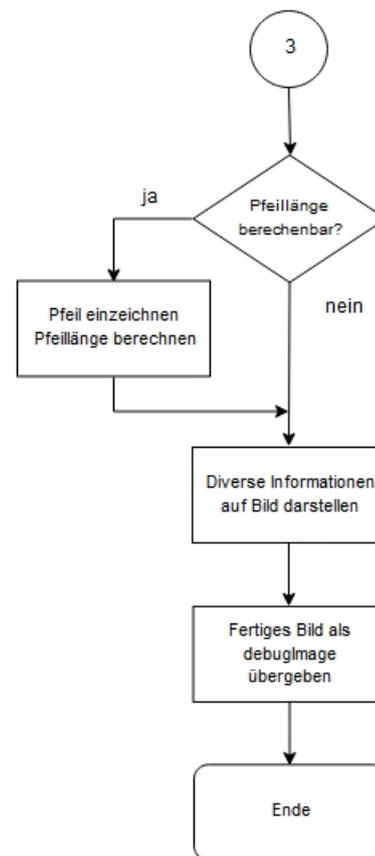


Abbildung 5.22: imageProcessingMSG(4)

imageProcessingLaser: Der Programmablauf der Funktion imageProcessingLaser verläuft anfänglich genau wie imageProcessingMSG, lediglich Filterparameter und Kriterien für das Aufspannen des interessanten Bildbereichs weichen ab. Da unter Verwendung einer Digitalkamera kein geeignetes Mittel gefunden wurde, um eine Segmentierung von Schmelze und Laser zu erreichen, kann das Programm nach der Anpassung der region of interest nicht weitergeführt werden.

5.4 Fazit und Ausblick

In den Tabellen 5.1 und 5.2 sind noch einmal alle Anforderungen aufgelistet.

Tabelle 5.1: Erreichte funktionale Anforderungen

Nummer	Funktionale Anforderung	Ziel erreicht
1.	Region of interest	ja
2.	Segmentierung	MSG: ja / Laser: teilweise
3.	Vermessung	MSG: ja / Laser: nein
4.	Grafische Benutzeroberfläche	ja

Tabelle 5.2: Erreichte nichtfunktionale Anforderungen

Nummer	Nichtfunktionale Anforderung	Ziel erreicht
5.	Videomaterial	MSG: ja / Laser: nein
6.	Robustheit	MSG: ja / Laser: nein
7.	Unabhängigkeit	teilweise

Die Zielanforderung für die Verarbeitung interessanten Bereichs wurde für beide Schweißarten in vollem Umfang erreicht, ebenso wurden die Anforderungen an die grafische Benutzeroberfläche erfüllt. Für alle weiteren Anforderungen muss zwischen den beiden Verfahren unterschieden werden.

Für das Laserschweißen wurde kein hinreichend nutzbares, den Anforderungen entsprechendes, Verfahren zur Vermessung des Schweißbads gefunden.

Der Funkenflug ist zu stark und in seiner Form und Farbe dem Schmelzbad zu ähnlich, um einen stabilen Algorithmus zu erstellen. Zur Lösung des Problems wäre trotz höherer Kosten die Verwendung einer Wärmebildkamera aus heutiger Sicht die beste Option.

Für das MSG-Verfahren wurde ein funktionsfähiges und robustes Analyseverfahren entwickelt. Die Segmentierung konnte mit neuem Videomaterial getestet werden und funktioniert zu annähernd 90% korrekt.

Um den Algorithmus noch weiter zu verbessern, wäre der Einsatz eines Neutrallichtfilters denkbar, um die Störungen durch Blendenblitze zu verhindern.

Die Nutzung zweier sich gegenüberliegender Kameras würde zudem das Problem der Verdeckung des Schweißbads durch das Werkzeug beheben. Ein Ansatz wäre eine bidirektionale Bewegung in mehrere unidirektionale Bewegungen aufzuteilen. So könnte zum

Beispiel ein Schweißvorgang um eine 90 Grad Ecke in einen vertikalen und einen horizontalen Teil aufgeteilt werden.

Die Flächenvermessung der Konturen ohne Beachtung der perspektivischen Verzerrung funktioniert einwandfrei. Ein Konzept zur Realwert-Vermessung wurde vorgestellt, konnte jedoch mangels Kamerahalter noch nicht umgesetzt werden. Ein sicher funktionierender Messalgorithmus für die Schweißbadgröße konnte für unidirektionale Werkzeugbewegungsrichtung entwickelt werden; für die bidirektionale Bewegungsrichtung ist allerdings noch weitere Entwicklungsarbeit erforderlich.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Überwachung und Vermessung eines Schweißbads, beim Metall-Schutzgas-Schweißen, mit einer digitalen Kamera gut möglich und praktisch ist, jedoch noch weiterer Entwicklung bedarf.

Literaturverzeichnis

- [1] *DIN 8580 Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Beuth, 2003. – URL <https://www.beuth.de/de/norm/din-8580/65031153>
- [2] *OpenCV Documentation 3.4.2*. Springer, 2018. – URL <https://docs.opencv.org/3.4.2/>
- [3] BRADSKI, G. ; KAEHLER, A.: *Learning OpenCV*. O'REILLY, 2011. – ISBN 978-0-596-51613-0
- [4] DEMANT, C. ; STREICHER-ABEL, B. ; WASZKEWITZ, P.: *Industrielle Bildverarbeitung*. Springer, 1998. – ISBN 3-540-63877-6
- [5] FAHRENWALDT, H.J. ; SCHULER, V. ; TWRDEK, J.: *Praxiswissen Schweißtechnik*. Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-658-03140-4
- [6] LUHMANN, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie*. Wichmann, 2017. – ISBN 978-3-87907-640-6
- [7] WEITZ, E.: *Konkrete Mathematik (nicht nur) für Informatiker*. Springer Spektrum, 2018. – ISBN 978-3-658-21564-4

A Anhang 1 - CD

Inhalt:

- PDF-Datei der Arbeit
- Qt-Projekt WeldpoolMeasurement (Neu erstelltes MSG-Video aufgrund der Größe separat)

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Ort

Datum

Unterschrift im Original