

# Masterarbeit

Lucas-Christoph Ebel

Dezentrales Roboter-Schweißen mithilfe eines optisch  
verfolgten Eingabegerätes

Lucas-Christoph Ebel

# Dezentrales Roboter-Schweißen mithilfe eines optisch verfolgten Eingabegerätes

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung  
im Studiengang Master of Science Automatisierung  
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. Dr.-Ing. Florian Wenck

Eingereicht am: 20. Januar 2020

## **Lucas-Christoph Ebel**

### **Thema der Arbeit**

Dezentrales Roboter-Schweißen mithilfe eines optisch verfolgten Eingabegerätes

### **Stichworte**

Stereoskopie, Echtzeit, Schweißen, Robot Sensor Interface, KUKA, Systemintegration, Linux, Preempt\_RT, Koordinatentransformation, Sicherheitsbox, Bildverarbeitung, Prädiktion, Kalman, Ebenenreferenzierung, ferngesteuert

### **Kurzzusammenfassung**

Diese Ausarbeitung beschäftigt sich mit der Inbetriebnahme einer Mensch-Roboter-Applikation für das ferngesteuerte Schweißen. Dafür wird im Verlauf ein Testsystem entwickelt, mit welchem eine Fachkraft in Echtzeit schweißen kann, ohne sich den dazugehörigen körperlichen Beanspruchungen und Gefährdungen aussetzen zu müssen. Diese Arbeit baut auf der Abschlussarbeit von P. Zuther [28] auf. In ihr wird die Brennerbewegung des Schweißers über ein stereoskopisches Sensorsystem erfasst. Weiterführend wird aufgrund der Geschwindigkeit der Erfassung und der Abfrage nach Daten durch die Steuerung eine Prädiktion entwickelt, die aus den quantisierten Daten eine möglichst kontinuierliche, zweifach differenzierbare Trajektorie generiert. Hierzu wird ein Kalman-Filter in Kombination mit einem PT-2-Störgrößenbeobachter eingesetzt, welcher die Handbewegung nahezu phasenfrei und korrekt wiedergibt. Die Ausführung der Algorithmen erfolgt auf einem Echtzeitsystem auf Linux-Basis und Preempt\_RT. Für die Gewährleistung einer analogen Bewegung des Brenners von Anwender und Roboter in derselben Ebene müssen die jeweiligen Arbeitsbereiche zueinander referenziert werden. Für die Vermessung der geometrischen Lage der Arbeitsebene des Roboters wird ein zweidimensionaler Laserscanner genutzt. Auf der Anwenderseite wird zur Erstellung der Basisebene die Orientierung und Lage eines Markers bestimmt, welcher in einer Momentaufnahme den Koordinatenursprung und die Achsausrichtungen vorgibt. Weiterführend wird die Werkzeugspitze über eine definierte Halterung in ihrer Orientierung und Lage zu dem am Brenner befestigten Marker ermittelt. Dadurch ist es möglich, die Werkzeugspitzen des Roboters als auch die des Anwenders zu koppeln. Die Resultate der Validierung bestätigen, dass das System erfolgreich in Betrieb genommen werden konnte und die Schweißergebnisse in der Ebene von guter Qualität sind.

---

**Lucas-Christoph Ebel**

**Title of Thesis**

Decentralized robot welding using an optically tracked input device

**Keywords**

stereoscopy, real-time, welding, robot sensor interface, KUKA, system integration, Linux, Preempt\_RT, coordinate transformation, safety box, image processing, prediction, Kalman, plane referencing, remote controlled

**Abstract**

This master thesis deals with the commissioning of a human-robot application for remote controlled welding. For this purpose, a test system will be developed. It allows a skilled worker to weld in real time without having to expose himself to the associated physical stress and hazards. This work builds on the bachelor thesis of P. Zuther [28]. In it the torch movement of the welder is recorded by a stereoscopic sensorsystem. Further on, due to the speed of the acquisition and the query for data by the control system, a prediction has to be developed. It should generate a trajectory from the quantized data, which is as continuous as possible and which can be differentiated twice. For this purpose, a Kalman-Filter in combination with an PT-2 disturbance observer is used. It reproduces the hand movement almost phase-free and correctly. The required algorithm performs on a real-time operating system based on Linux and Preempt\_RT. In order to guarantee the movement of the torch by user and robot in the same plane, the respective working areas have to be referenced to each other. A two-dimensional laserscanner is used to measure the Orientation and Position of the working plane from the robot. To create a base-plane for the user the geometric position of a Marker is used. Due to a snapshot of the System, the coordinate origin and axis directions are created. The Tool Center Point (TCP) of the torch is determined via a defined holder in its location. From there on the TCP gets referred to the Marker attached to the torch. Now it is possible to couple the TCPs of the Robot as well as those of the user. The results of the validation confirm that the system has been successfully put into operation and that the welding results in the plane are of good quality.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>x</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problembeschreibung und Zielsetzung der Arbeit . . . . .	3
1.2 Struktur der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Entwicklungsumgebung . . . . .	5
2.1.1 Programmierumgebung Qt . . . . .	5
2.1.2 Open Computer Vision . . . . .	6
2.2 Stereokamerasystem . . . . .	6
2.3 Kalman-Filter . . . . .	8
2.4 Koordinatensysteme . . . . .	13
2.5 KUKA Agilius KR6 R900 . . . . .	17
2.6 Metall-Schutzgas-Schweißen . . . . .	21
<b>3 Konzept und Integration</b>	<b>24</b>
3.1 Algorithmische Problembeschreibung . . . . .	25
3.2 Systemaufbau . . . . .	27
3.3 Real-Time-System . . . . .	30
3.3.1 Validierung des zeitlichen Verhaltens . . . . .	32
3.3.2 Interface-Aufbau . . . . .	33
3.4 Sensor Interface . . . . .	35
3.4.1 I/O Schnittstellen . . . . .	36
3.4.2 Zweidimensionaler Laserscanner . . . . .	38
3.4.3 Sensorsystem . . . . .	40
3.5 Signalverarbeitung . . . . .	42

3.6	Ebenenreferenzierung . . . . .	47
3.6.1	Werkzeugverwendung . . . . .	49
3.6.2	Werkzeughalter . . . . .	51
3.6.3	Validierung der Ebenenreferenzierung . . . . .	57
3.6.4	Integration der Schweißbettbeobachtung . . . . .	60
3.6.5	Integration des Schweißsystems . . . . .	61
3.7	Sicherheitskonzept . . . . .	62
3.7.1	Validierung des Sicherheitskonzeptes . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Validierung der Mensch-Roboter-Interaktion</b>	<b>65</b>
4.1	Versuchsaufbau . . . . .	65
4.2	Signalfilterung des Sensorsystems . . . . .	67
4.3	Überprüfung der Zielerreichung . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>73</b>
5.1	Ausblick . . . . .	74
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>75</b>
	<b>A Anhang</b>	<b>78</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>81</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Konzeptzeichnung des Sensorsystems . . . . .	6
2.2	Verzeichnungen [2] durch die Optik einer Kamera . . . . .	7
2.3	Berechnungsablauf des Kalmanfilters mit zeitlicher Zuordnung der Zustände $\hat{x}$ . . . . .	8
2.4	Der Kalman-Fliter berechnet mit jeder neuen Messung den Verlauf der Trajektorie bei einem verrauschten Messsignal [19] . . . . .	9
2.5	Trajektorienfassung trotz stark verrauschtem Messsignal $z_k$ . . . . .	11
2.6	Schematischer Ablauf der Kalman-Gleichungen . . . . .	12
2.7	Darstellung der Beschreibung im Raum des Koordinatensystems K . . . . .	13
2.8	Darstellung der Rotation einer Ebene um zwei Achsen in unterschiedlicher Reihenfolge [26, S.62] . . . . .	14
2.9	Beispielanordnung von Koordinatensystemen . . . . .	16
2.10	Systemaufbau eines KUKA Manipulators mit KRC4 und UI [11] . . . . .	17
2.11	Aufbau der RSI-Schnittstelle innerhalb der KRC4 . . . . .	19
2.12	Lage der Bezugs-Koordinatensysteme angelehnt an [10, S.71] . . . . .	20
2.13	Schnittdarstellung eines gasgekühlten Brennerkopfes der Firma Dinse . . . . .	21
2.14	Zyklus des CMT-Verfahrens mit Angabe der Leistungsparameter [8] . . . . .	22
3.1	Konzeptzeichnung des Aufbaus zum ferngesteuerten Schweißen . . . . .	24
3.2	Prädiktion (blau) des Messsignales (rot) durch Kalman-Filter zweiter Ordnung . . . . .	26
3.3	Darstellung des erwarteten zeitlichen Verhaltens . . . . .	27
3.4	Bearbeitungsdauer der XML-Telegramme vom Eintreffen bis zum Rücksenden. Die Messung erfolgte über 52 Sekunden. Es sind 26392 relevante Pakete erfasst und dargestellt . . . . .	28
3.5	Erweiterte Konzeptzeichnung des Aufbaus zum ferngesteuerten Schweißen . . . . .	29
3.6	Vergleich/ Darstellung des Dual-Kernel und In-Kernel Ansatzes bei der Realisierung von Linux-RTOS . . . . .	31

---

3.7	Darstellung der Beantwortungszeiten des User Datagram Protocol (UDP)-Telegramms gemessen an der Ethernet Schnittstelle . . . . .	33
3.8	Das RTOS-Interfaces ermöglicht das Erstellen einer Verbindung zur KRC4, das Speichern aller eingehenden und abgehenden Daten sowie grundlegende Einstellungen der Schweißbettbeobachtung . . . . .	34
3.9	Erweitertes Sensor-Interface zur Ansteuerung des Gesamtsystems . . . . .	35
3.10	D-I/O-Box mit 24 schaltbaren Ports. Versorgungsspannung 24 V mit maximal 60 mA Ausgangsstrom pro Port. [17, S.13ff] . . . . .	36
3.11	Struktur des XML-Formates. Rot markiert das Wurzelement, in Grün sind die Unterelemente und in Blau die Kinder gekennzeichnet. . . . .	37
3.12	Darstellung der von <i>microEpsilon</i> bereitgestellten Interfaces zum Programmieren des Sensors . . . . .	39
3.13	Optionsmenü für die Einrichtung der Schnittstelle: links: Einstellungen bezüglich der verwendeten Schnittstelle, rechts: Auflistung und Codierung des UDP-Pakets . . . . .	39
3.14	Laserscanner-Halterung: links: CAD-Zeichnung der Laser-Halterung rechts: Mit dem FDM-Verfahren hergestellte Halterung mit Werkzeughalter und Scanner . . . . .	40
3.15	Aufbau des Sensorsystems mit visuellem Feedback, Brennerhalterung und steifem Kameraaufbau . . . . .	41
3.16	Prädiktion (blau) des Messsignales (rot) durch Kalman-Filter zweiter Ordnung . . . . .	42
3.17	Prädiktion (blau) des Messsignals (rot) durch Kalman-Filter zweiter Ordnung und dritter Ordnung (grün) . . . . .	43
3.18	Signalflussdiagramm des PT-2-Gliedes mit Korrekturtaufschaltung . . . . .	44
3.19	Realisierung einer idealen Prädiktion mittels Kalman- und PT-2-Filterung . . . . .	45
3.20	Vergleich des Soll-Wertes durch das Messsystem zu dem Ist-Wert der Manipulator-Pose . . . . .	45
3.21	Zustandsdiagramm der Ebenenreferenzierung . . . . .	47
3.22	Zuerst wird die Position des TCP aus dem Koordinatensystem der Ebene in das Basis-Koordinatensystem des Manipulators transformiert. Anschließend erfolgt die Transformation vom TCP zur KUKA-Pose. . . . .	49
3.23	Durch optische Vermessungsmethoden erstellte Netzansicht für die CAD-Konstruktion . . . . .	52
3.24	Darstellung zur Erstellung der kinematischen Kette am Eingabegerät . . . . .	53
3.25	Zustandsautomat für Winkelbestimmung in A und B . . . . .	54

3.26	Zustandsautomat zur Kantendetektion des Referenzierungsobjektes . . . . .	55
3.27	Bestimmung des Winkels C in Bezug auf die Ebene. Die rote Linie simuliert die vom Laserscanner projizierte Linie . . . . .	55
3.28	Darstellung der Nutzung des Validierungsobjektes auf dem Aufbau des Sensorsystems . . . . .	57
3.29	Bestimmung des Winkels C in Bezug auf die Ebene . . . . .	58
3.30	Schweißbettbeobachtung mittels einer Farbkamera . . . . .	60
3.31	Für alle Koordinaten beispielhafte Messung . . . . .	64
4.1	Prozesskette des Systems unter Berücksichtigung der essenziellen Kompo- nenten . . . . .	66
4.2	Erfassung der Position des Brenners über die Posen der Marker. Unterhalb ist das Validierungsmuster vorgedruckt . . . . .	67
4.3	Messung des Sensorsystems und anschließende Prädiktion und Filterung der Werte . . . . .	68
4.4	Soll- und Ist-Wert-Vergleich einer Rotation und einer Translation des Ma- nipulators . . . . .	68
4.5	Schweißergebnis einer komplexen Struktur während des Validierungsexpe- riments zur Roboter-Mensch-Interaktion . . . . .	70
A.1	Sprungantwortaufnahmen des Sensorsystems mit anschließender Filterung	79
A.2	Ist- und Sollwert Vergleich des Manipulators . . . . .	80

# Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

## 1. Kennzeichnung durch Art und Schreibweise

$P^-$	a-priori
$P$	Matrix
$p$	Vektor
$x(t), y(t), \text{etc.}$	Augenblickswerte
$\hat{x}$	Schätzwerte
$X, Y \text{ etc.}$	Effektivwerte

## 2. Symbole

<b><i>Abkürzung</i></b>	<b><i>Beschreibung</i></b>	<b><i>Einheit</i></b>
$\alpha$	Rotation um die X-Achse	rad oder $^\circ$
$B$	Eingangsmatrix	
$\beta$	Rotation um die Y-Achse	rad oder $^\circ$
$\gamma$	Rotation um die Z-Achse	rad oder $^\circ$
$\in$	Element der Mengenlehre oder Klassenlogik	
$H$	Messmatrix	
$K$	Vertärkungsfaktor	
$P$	Schätzfehlerkovarianz	
$p$	Punkt-Vektor	
$Q$	Matrix des Prozessrauschens	
$R$	Matrix des Messrauschens	
$\mathbb{R}$	Menge reeller Zahlen	
$T$	Periodendauer	sek
$T$	Transformationsmatrix	
$u$	Eingangssignal	

$v$	Messrauschen	
$v$	Geschwindigkeit	$m/s$
$X$	Weg	$m$
$x, y, z$	Raumachsen des Koordinatensystems	$mm$
$z$	Messwert (Kalman)	

### 3. Indizes

$z_k$	Zählindex für diskrete Schritte
$x_0$	Startwert

### 4. Abkürzungsverzeichnis

<b>KUKA</b>	Keller und Knappich Augsburg.
<b>BCP</b>	Basis Center Point.
<b>BV-Einheit</b>	Bildverarbeitungseinheit.
<b>EDF</b>	Earliest Deadline First.
<b>GUI</b>	Graphical User Interface.
<b>ID</b>	Identifikationsnummer.
<b>KF</b>	Kalman-Filter.
<b>KRC4</b>	<i>KUKA</i> Robot Control 4 Compact.
<b>MAG</b>	Metall-Aktiv-Gas.
<b>MSG</b>	Metall-Schutz-Gas.
<b>ROI</b>	Region of Interest.
<b>ROSE-Filter</b>	Rapid Ongoing Stochastic Covariance Estimation Filter.
<b>RSI</b>	Robot Sensor Interface.
<b>RTOS</b>	Real-Time Operating System.
<b>TCP</b>	Tool Center Point.
<b>TCP/IP</b>	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol.
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol.
<b>WIG</b>	Wolfram-Inert-Gas.
<b>XML</b>	Extensible Markup Language.

# 1 Einleitung

In den letzten Jahren wurde die Symbiose von Mensch und Maschine immer weiter vorangetrieben. Dabei wird stets der Kompromiss zwischen Flexibilität und Produktionszeiten eingegangen. Ganze Fertigungsstraßen arbeiten mittlerweile zu 90 % autonom [7]. Daher ist die Steuerung, Programmierung, Wartung und Vernetzung der einzelnen technischen Zellen von enormer Bedeutung. Sofern diese Aspekte gewährleistet sind, kann eine solche Fertigungsstraße hohe Stückzahlen bei einer geringen Standzeit der Maschinen in einem Produktionszyklus erreichen. Der Einsatz von Robotern ist besonders für die Erstellung von Schweißnähten von Vorteil. Der Mensch an sich wird durch den Roboter vor den Gefahren des Schweißens geschützt, da letzterer die Arbeit mit den unter Spannung stehenden Teilen übernimmt. Gefährdungen durch Spannungen und Ströme, Gas und Rauchentwicklung sowie körperliche Beeinträchtigungen durch eventuelle Zwangshaltungen [23][21] werden für den Benutzer minimalisiert. Während die Serienfertigung hohe Stückzahlen erreichen kann, da sie dieselben Abläufe immer weiter perfektioniert, bietet der Einsatz von Fachkräften hohe Flexibilität bei neuen Herausforderungen. Robotergestützte Verfahren müssen für neue Aufgaben aufwändig vorbereitet und angelernt werden. Eine Fachkraft kann solche Aufgaben in sehr viel weniger Zeit erledigen.

Der momentan diskutierte Fachkräftemangel in technischen Berufen sorgt indes dazu, dass die Weiterleitung von Erfahrungen durch selbständiges Schweißen als auch durch das Anlernen junger Fachkräfte immer weiter abnimmt. Hinzukommt, dass durch die jahrelange, körperliche Zwangslage ältere Fachkräfte meist nicht mehr in der Lage sind, ihre Tätigkeiten auszuüben. Für diese bleibt neben dem Einstig in die Lehre oft nur die Arbeitsunfähigkeit, sodass qualifiziertes Fachpersonal und die Weitergabe von dringend notwendiger Erfahrung zur Ausübung des Berufs [22] fehlen. Das Ziel, eine Fachkraft nicht länger den Gefahren des Schweißens an sich auszusetzen und auch für arbeitsunfähige Fachkräfte eine Aussicht auf Fortführung des Arbeitsverhältnisses zu gewährleisten, erfordert die Interaktion von Mensch und Maschine. Während der Mensch in der Lage ist, die hohen Anforderungen der Datenverarbeitung zu übernehmen, nutzt der Roboter

sein Potenzial in der Ausführung der körperlich höchst anspruchsvollen Tätigkeiten. Yu-Kang Liu entwickelte mit seinem Team im Jahr 2014 bereits einen ersten Ansatz für das Erfassen der Handbewegung eines Schweißers beim Wolfram-Inert-Gas (WIG)-Verfahren [14]. Dieses System arbeitet mit einem Leap-Motionssensor als Erfassungsgerät. Unter Berücksichtigung, dass kein Sonnenlicht die Messung stört, erreicht das System eine Genauigkeit der Verfolgung der Pose im  $\mu\text{m}$  Bereich. Im weiteren Verlauf der Forschung ist ein System zum ferngesteuerten Schweißen entstanden [15]. Dieses System erfasst über einen bildgebenden Sensor das Schweißbett und projiziert dieses für den Benutzer; zusätzlich wird über ein lasergestütztes Verfahren auch das Schweißbett vermessen.

[16] stellt ein Projekt vor, in dem die Augmented-Reality-Umgebung (AR) für einen realen Schweißprozess genutzt wird. Ziel dieser Arbeit ist es, das Schweißen so realitätsnah wie möglich zu realisieren. Zusätzlich ist die Datenerfassung über die Position und Lage der Handschuhe und damit des Brenners von Interesse, da sie über die Qualität der Naht entscheiden. Für die genaue Ausführung der Arbeiten ist die Erfassung der Position des Roboters im Raum notwendig. [6] entwickelt dazu einen optischen dreidimensionalen Sensor, der im IR-Spektrum arbeitet. Das Besondere daran ist die Fähigkeit, bei hohen Genauigkeiten ( $< 100 \mu\text{m}$ ) Echtzeitfähigkeit zu erlangen. [5] stellt ein System zum Fernschweißen vor. Dabei wird die Bewegung der Fachkraft erfasst und auf einen Manipulator in geschützter Umgebung übertragen. Dies stellt sicher, dass Prozessparameter eingehalten und der Einteilch-Aufwand gering gehalten werden. Diese Methodik verlangt allerdings eine exakte Nachbildung des Werkstücks für die Fachkraft.

All diese weiterführende Forschung des ferngesteuerten Schweißens motiviert bei der Erstellung eines Konzeptes, welches ebenfalls die Handbewegung einer Fachkraft aufnehmen kann und an einem Roboter Soll-Werte für die Position vorgibt. Anschließend soll aufbauend ein System entstehen, welches zukünftige Fachkräfte anlernen und berufsunfähigen Fachkräften die Möglichkeit eröffnen kann, wieder zu arbeiten.

## 1.1 Problembeschreibung und Zielsetzung der Arbeit

In der Ausarbeitung von P. Zuther [28] wird ein stereoskopisches System vorgestellt, welches unter anderem die Pose von gekennzeichneten Objekten (Markern) erfassen kann. Darüber hinaus ist die Prozesskette zum Roboter der Firma *Keller und Knappich Augsburg* (KUKA) erstellt worden. Darauf aufbauend ist ein System zu entwickeln, welches das Schweißen ermöglicht, ohne dass sich die Fachkraft in der Nähe des Objektes aufhalten muss bzw. die Erfassung der Schweißbewegung dezentral über das Sensorsystem erfasst wird.

Um die Einhaltung der zeitkritischen Kommunikation zwischen dem Sensorsystem und dem Roboter sicherzustellen, soll ein zweites Gerät eingebunden werden, welches deterministisch die Kommunikation ermöglicht. Für die Interaktion mit dem Roboter ist die Lage der Arbeitsebene zu erfassen und mit der Benutzerebene des Sensorsystems zu referenzieren. Zusätzlich ist die Einbindung und Nutzung von Eingabegeräten nötig. Die Steuerung des Roboters erfolgt durch die Vorgabe von kartesischen Posen im Raum. Sie spiegeln die geometrische Position des Tool Center Point (TCP) des Eingabegerätes in Bezug auf die gewählte Ebene wider. Dazu ist der TCP zum Marker zu referenzieren.

Ein weiterer Aspekt ist die Vergütung des Positionssignals. Hier sind die entsprechenden Frequenzen, verursacht durch das Quantisierungsrauschen, zu verringern, und es muss eine möglichst phasenfreie Prädiktion ermöglicht werden. Ein erster Ansatz ist in [28] durch die Verwendung eines Kalman-Filter (KF) realisiert. Dieser Ansatz soll weiterverfolgt und verbessert werden. Für die Verwendung unterschiedlicher Werkzeuge am Endeffektor des Roboters ist ein flexibles und nutzerfreundliches Konzept für den Werkzeugwechsel erforderlich. Es soll der Fachkraft ermöglichen, das Werkzeug zu wechseln, ohne vom Roboter gefährdet zu sein. Die Gefährdung durch den Roboter ist durch eine Gefährdungsbeurteilung zu analysieren und entsprechende Maßnahmen zum Schutz des Menschen sind vorzunehmen.

Ziel ist es, ein Gesamtsystem für das ferngesteuerte Schweißen zu erstellen und dessen Arbeitsweise im Gesamten als auch in den Teilaufgaben zu bewerten.

## 1.2 Struktur der Arbeit

Nachdem die Problematik grundlegend in Abschnitt 1.1 dargelegt wurde, soll im Folgenden der Aufbau der Arbeit beschrieben werden. Das erste Kapitel setzt die für das Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen. Diese geben unter anderem kurze Einblicke in die Funktionsweise des Kalman-Filters und die Berechnung von Koordinatentransformationen. Das Kapitel 3 führt in die Systemkomponenten und deren Integration ein. Besonders wird auf die Einbindung eines echtzeitfähigen Systems und der Verwendung des Laserscanners eingegangen. Die Validierung der Komponenten ist ebenfalls Bestandteil des Kapitels 3. Daran anschließend wird ein Sicherheitskonzept vorgestellt und in seiner Funktion bestätigt. Im letzten Kapitel wird das Gesamtsystem in Betrieb genommen und die Funktionalität anhand einer Schweißaufgabe bewiesen. Die Güte des Systems wird mittels einer komplexen Form für das Auftragsschweißen analysiert und bewertet. Im Anschluss wird ein Ausblick auf kommende Aspekte und Aufgabenbereiche gegeben, welche den weiteren Forschungsbedarf des Themas darlegen.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für das Verständnis der nachfolgenden Arbeit gelegt. Einzelne werden auf die Programmierumgebung, das Eingabesystem, den Kalman-Filter, den verwendeten Manipulator samt Schnittstellen sowie auf die Koordinatentransformation und das Schweißverfahren eingegangen.

### 2.1 Entwicklungsumgebung

Entwicklungsumgebungen bieten dem Anwender die Möglichkeit, sein Produkt mittels bereits getesteter Software zu vervollständigen und zu verbessern. Die folgenden Punkte beschreiben das genutzte Framework und die Bildverarbeitungsbibliothek.

#### 2.1.1 Programmierumgebung Qt

Für die Entwicklung und Einbindung des Robotersystems wird das auf C++ basierende Framework Qt genutzt. Dieses ermöglicht eine objektorientierte und plattformübergreifende Entwicklungsumgebung, welche unter anderem speziell für das Erstellen von umfangreichen Graphical User Interface (GUI) verwendet wird. Zusätzlich sind die Erstellung und Verwaltung von Prozessoraufgaben (Thread) möglichst einfach gestaltet. Als Alleinstellungsmerkmal verfügt das Framework über den sogenannten Meta-Object-Compiler (moc), welcher unter anderem die Interaktion von Signals und Slots realisiert. Das Konzept von Signals<sup>1</sup> und Slots ermöglicht die thread-basierte Weitergabe von Objekten, ohne dass sich die Klassen, zwischen denen diese geteilt werden, kennen müssen. Ein signifikanter Vorteil des Signal/Slot-Systems ist, dass die Übergabe der Objekte thread-sicher ist und der Aufruf der Slots entweder in dem aktuellen Thread oder erst nach dessen Abarbeitung durchgeführt wird.

---

<sup>1</sup>Auch wenn diese Arbeit in der deutschen Sprache verfasst ist, werden die in der Disziplin gängigen Begriffe verwendet.

### 2.1.2 Open Computer Vision

Open Computer Vision (OpenCV) ist eine freie auf C++ basierende Programmierbibliothek für die Bildverarbeitung. Mit über 2500 optimierten Algorithmen ist die Bibliothek echtzeitfähig und ermöglicht durch unterschiedliche Funktionen die Erkennung, Bearbeitung und Ausgabe der Aufnahmen im zwei- und dreidimensionalen Bereich. Die Bibliothek besitzt Interfaces für C++, Python, Java und MATLAB und wird von allen gängigen Betriebssystemen unterstützt, wobei in dieser Arbeit, zusätzlich zu der Version 4.0, die Bibliothek ArUco mit eingebunden und genutzt wird. Dies ermöglicht eine optimierte Erkennung von speziellen und robusten Objektmarkierungen (sogenannte Marker) in einem Bild.

## 2.2 Stereokamerasystem

Das Sensorsystem zur Erfassung der Schweißbewegung besteht aus zwei bildgebenden Sensoren, die in einem definierten Winkel zueinander angebracht sind. Der markierte Bereich in der Abbildung 2.1 zeigt exemplarisch die Überlappung der Sichtfelder beider Kameras an. In diesem Bereich ist es möglich, über den geometrischen Ansatz der Tri-

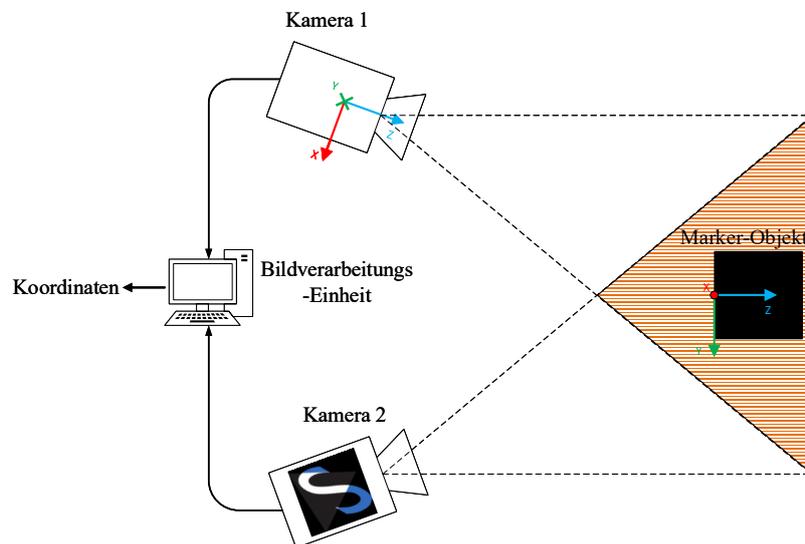


Abbildung 2.1: Konzeptzeichnung des Sensorsystems

angulation eine Tiefeninformation aus den zweidimensionalen Aufnahmen zu gewinnen. Mithilfe der Tiefeninformation ist die Berechnung der Pose (Orientierung und Ort) des Markers im Raum erst möglich. Das Konzept sowie die Durchführung des Sensorsystems werden in [28] ausführlich behandelt. Das Sensorsystem verfolgt den Ansatz der passiven Stereoskopie. Der Begriff *passiv* bezieht sich dabei auf die Verarbeitung von Sensordaten ohne zusätzliche Informationen im Bild (z. B. durch eine Lichtquelle). Die Identifikation eindeutiger Korrespondenzpunkte ist für die Triangulation notwendig. Dies wird durch die Verwendung von ArUco-Markern gelöst. Von dem System wird anschließend die Pose des Markers zu einem festen Koordinatensystem ausgegeben. Die Betrachtung der Kameraparameter ist für die Erstellung eines solchen Messsystems unerlässlich. Diese gliedern sich in extrinsische (von außen) und intrinsische (von innen) Parameter. Die intrinsischen Parameter beschreiben die Lage des Bildsensors zum Ursprung der Kamera (Bildweite). Die Abbildung eines Lichtpunktes im Raum erfolgt auf dem Bildsensor. Die Entfernung eines Bildpunktes auf der Sensorfläche der Kamera zum Kameraursprung ist durch diesen Wert erst bestimmbar.

Die extrinsischen Parameter beschreiben die Position des Kameraursprunges im Raum. Somit muss die Lage der beiden Kameras zueinander bekannt sein. Beschrieben wird dies durch eine Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$  mit  $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ . Die Koordinatentransformation wird in Abschnitt 2.4 näher behandelt.

Durch die Nutzung von Optiken mit ortsvariantem Abbildungsmaßstab kann es zu Verzeichnungen kommen. Diese bewirken, dass gerade einfallende Lichtstrahlen in gekrümmter Bahn auf dem Bildsensor abgebildet werden. Dadurch entstehen charakteristische Verzeichnungen (vgl. Abbildung 2.2). Damit die Verzeichnung und die Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$  mit optimierten Verfahren ermittelt werden können, wird durch die bereits erwähnte OpenCV Bibliothek eine Kalibrierung der Kameras mit einem speziellem Muster durchgeführt.

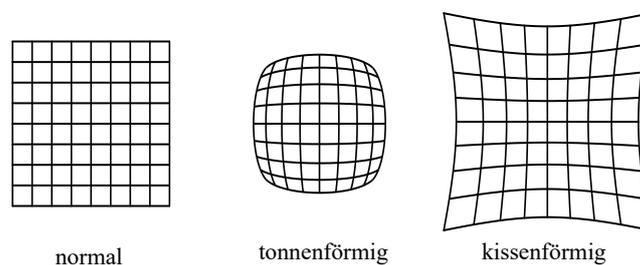


Abbildung 2.2: Verzeichnungen [2] durch die Optik einer Kamera

## 2.3 Kalman-Filter

Rudolph E. Kalman entwickelte 1960 einen Filter für lineare, zeitdiskrete Systeme. Der Vorteil des Filters liegt in der algorithmischen Struktur, die es erlaubt, verrauschte und teilweise redundante Systemgrößen zu schätzen. Der erste erfolgreiche und nennenswerte Einsatz, der die Möglichkeiten des Filters im gesamten Umfang nutzte, war im Rahmen des Apollo-Programms der NASA. Dort wurde der Filter in der Echtzeitnavigation und den Leitsystemen eingesetzt. Mittlerweile ist der Kalman-Filter weitverbreitet und weiterentwickelt worden. Die bekanntesten Vertreter sind der linearisierte Kalman-Filter (LKF), der extended Kalman-Filter (EKF) für nicht linearisierte Zustandsschätzungen oder der Sigma-Point-Kalman-Filter. Der Kalman-Filter schätzt mithilfe eines Systemmodells und der Informationen aus dem letzten Zeitintervall die Zustände des Systems. Diese Schätzung wird a-priori (abgeleitet aus dem Lateinischen a priore, der Frühere) genannt. Für die Optimierung der Vorhersage a-posteriori (abgeleitet aus dem Lateinischen a posteriore, der Folgende) des Zustandes wird der Kalman-Algorithmus mit einer Messung in dem jeweiligem Zeitintervall beaufschlagt. Die optimierte Schätzung (a-posteriori) wird im darauffolgenden Zeitintervall die neue a-priori-Schätzung. Ausgehend von dem Initial-Wert  $x_0$  stellt die Abbildung 2.3 den zeitlichen Verlauf der Korrektur und Prädiktion dar.  $T$  beschreibt dabei die Periodendauer und der Index  $k$  das zeitliche Intervall. Der algorithmische Aufbau macht den Kalman-Filter zu einem optimalen Schätzver-

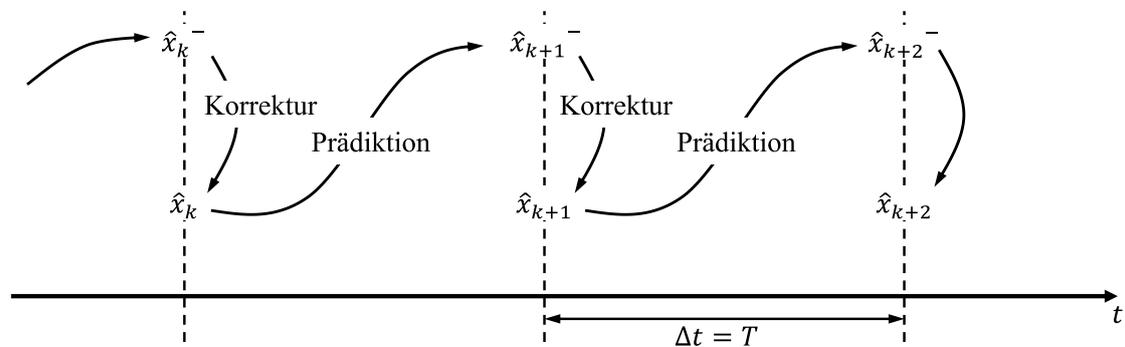


Abbildung 2.3: Berechnungsablauf des Kalmanfilters mit zeitlicher Zuordnung der Zustände  $\hat{x}$

fahren. Der Anwendungsbereich erstreckt sich über viele Teilbereiche, von denen einige exemplarisch genannt werden:

- Geschwindigkeitsvorhersage bei bekannter Position und einem Systemmodell (Apollo-Programm)

- für die Vorhersage der Position bei Radar und GPS
- Rauschunterdrückungen (Beispiel für Rauschen: Quantisierungsrauschen) von Messwerten
- zur Bestimmung von Flugbahnen

Mit dem Verfahren des Kalman-Filters ist es weitgehend möglich, statistische und systematische Messfehler zu eliminieren und die eigentliche Messgröße nahezu optimal wiederzugeben (vgl. Abbildung 2.4). Der in Abbildung 2.3 dargestellte Ablauf unterteilt sich in

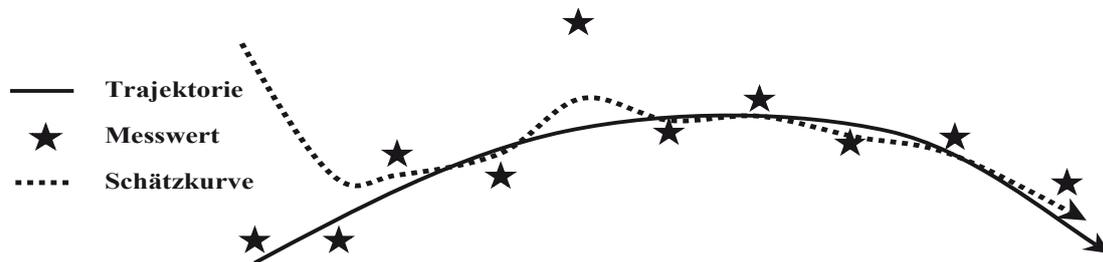


Abbildung 2.4: Der Kalman-Fliter berechnet mit jeder neuen Messung den Verlauf der Trajektorie bei einem verrauschten Messsignal [19]

zwei wesentliche Bereiche: die Prädiktion und die Korrektur. Bei erfolgter Messung der Systemzustände wird die Korrektur durchgeführt. Diese beinhaltet die Berechnung der Kalman-Verstärkung (Gleichung 2.1) mit der a-priori-Schätzung  $\mathbf{P}^-$  und der Messfehlerkovarianz  $\mathbf{R}$ . Sobald die Matrizen den Rang zwei überschreiten, ist das Problem der Inversen einzig durch die Numerik zu lösen (Problematik der Ricatti-Gleichung). Ziel ist es,  $\mathbf{K}$  so zu wählen, dass die Schätzfehlerkovarianz  $\mathbf{P}$  minimiert wird.

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (2.1)$$

In Gleichung 2.2 werden die geschätzten a-posteriori-Zustände  $\hat{\mathbf{x}}$  auf Grundlage der Kalman-Verstärkung  $\mathbf{K}$ , des Messwertes  $\mathbf{z}_k$ , des a-priori-Vektors  $\hat{\mathbf{x}}^-$  und der Messwertmatrix  $\mathbf{H}$  berechnet. Dabei gibt  $\mathbf{H}$  an, welche Zustände von der Systemstrecke gemessen werden können.

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (2.2)$$

Der Messwert  $\mathbf{z}_k$  ergibt sich formal aus Gleichung 2.3, wobei  $\mathbf{v}_k$  das Messrauschen darstellt.

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2.3)$$

Die a-posteriori-Schätzfehlerkovarianz  $\mathbf{P}_k$  wird anschließend mit der Kalman-Verstärkung  $\mathbf{K}$ , der Messwertmatrix  $\mathbf{H}$  und der a-priori-Schätzfehlerkovarianz  $\mathbf{P}_k^-$  für die Prädiktion berechnet (vgl. Gleichung 2.4).

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \quad (2.4)$$

Nachfolgend wird die Prädiktion durchgeführt. Mit dem gewählten Systemmodell und den a-posteriori-Zuständen  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$  der letzten Messung wird der a-priori-Systemzustand  $\hat{\mathbf{x}}_k^-$  bestimmt (vgl. Gleichung 2.5). Sollten die Zustände durch äußere Einflüsse  $\mathbf{u}_k$  beeinflusst werden, wird dies in der Eingabematrix  $\mathbf{B}$  berücksichtigt.  $\mathbf{w}_k$  stellt das Systemrauschen dar.

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (2.5)$$

Anschließend ist die a-priori-Kovarianz unter Berücksichtigung des Prozessrauschens  $\mathbf{Q}$  und des Zustandsmodells zu berechnen.

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (2.6)$$

Für die optimale Nutzung des Kalman-Filters ist es von großer Bedeutung, die Kovarianzen des Messrauschens  $\mathbf{R}$  und des Prozessrauschens  $\mathbf{Q}$  exakt zu bestimmen. In vielen Anwendungen können diese sich mit der Zeit verändern. Eine adaptive Lösung bietet der sogenannte Rapid Ongoing Stochastic Covariance Estimation Filter (ROSE-Filter). Für den zu betrachtenden Fall in dieser Arbeit reicht ein empirisches Einstellen der Matrizen aus. Die Abbildung 2.6 bietet eine Übersicht über den schematischen Ablauf der Kalman-Gleichungen. In einem nachfolgenden Beispiel soll die Anwendung des Kalman-Filters demonstriert werden. Dabei ist das in Kapitel 2.2 vorgestellte Sensorsystem zu betrachten. Dieses nimmt die Pose des Schweißers in den drei Raum-Achsen (Translation) und deren Rotation auf. Es wird angenommen, dass das System einem starken Messrauschen unterliegt. Damit ein Nutzen aus den ermittelten Daten gezogen werden kann, ist eine phasenfreie Filterung notwendig. Hier bietet sich die Signalaufbereitung über einen Kalman-Filter an. Um die Matrizen und den damit verbundenen Rechenaufwand klein zu halten, wird für jeden Freiheitsgrad des Markers ein eigener Kalman-Filter implementiert. Es wird an dieser Stelle einzig die Translation auf der X-Achse betrachtet. Analog dazu werden die anderen Kalman-Filter für die restlichen fünf Freiheitsgrade erstellt. Das Systemmodell für eine Bewegung kann mit zwei Gleichungen beschrieben werden:  $X$  beschreibt den Ort und  $v$  die Geschwindigkeit. Mit den Gleichungen 2.7 und 2.8 kann die Systemdynamik für ein linear-zeitinvariantes System gebildet werden. Anschließend

wird die Systemdynamik für die Nutzung auf einem Rechner diskretisiert (vgl. Gleichung 2.11).

$$X = v \cdot t + X_0 \quad (2.7)$$

$$v = \frac{d}{dt}\{X\} + v_0 \quad (2.8)$$

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u + w \quad (2.9)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u \quad (2.10)$$

$$\dot{x}_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ v \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_k + w_k \quad (2.11)$$

Durch die Matrizen  $\mathbf{Q}$  und  $\mathbf{R}$  lässt sich anschließend das verrauschte Messsignal filtern. Zur Veranschaulichung der Arbeitsweise eines Kalman-Filters ist eine Translation in X-Richtung simuliert und mit einem Rauschen beaufschlagt worden. Die Abbildung 2.5 zeigt diesen Sachverhalt. Es ist ersichtlich, dass der Kalman-Filter trotz eines stark verrauschten Eingangssignals die eigentliche Trajektorie gut wiedergeben kann.

Das gewählte Modell eignet sich aufgrund der Systemordnung nicht für schnelle Rich-

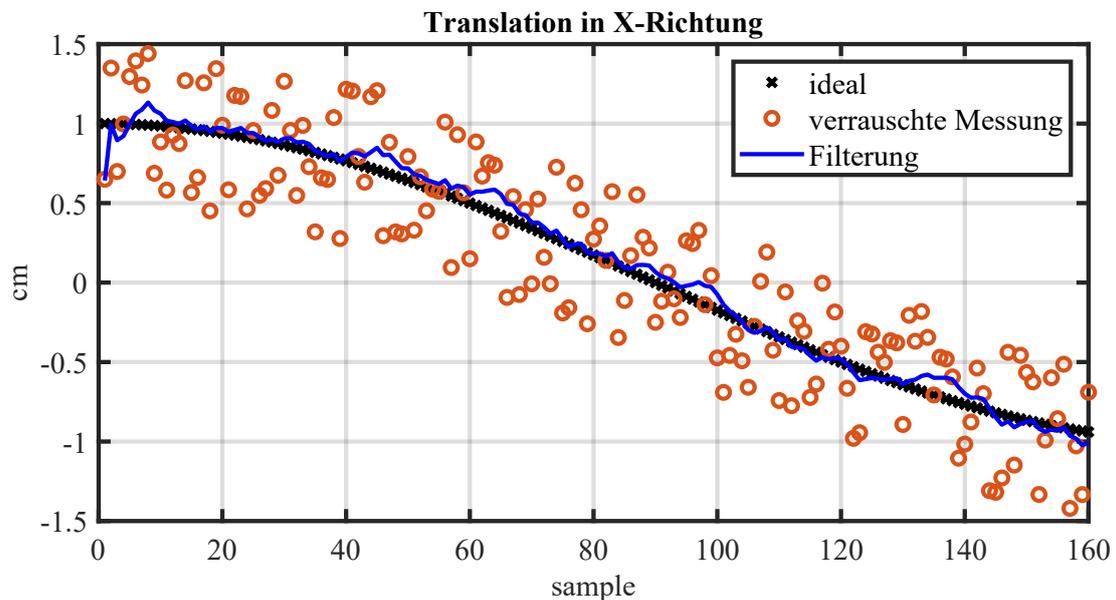


Abbildung 2.5: Trajektorienerfassung trotz stark verrauschtem Messsignal  $z_k$

tungswechsel. Hierfür wäre es sinnvoll, die Systemdynamik um die Beschleunigung zu erweitern, damit auch Umkehrpunkte in der Bewegung korrekt erfasst werden könnten.

Für die Erstellung dieses Kapitels ist die folgende Literatur verwendet worden [9], [20], [25].

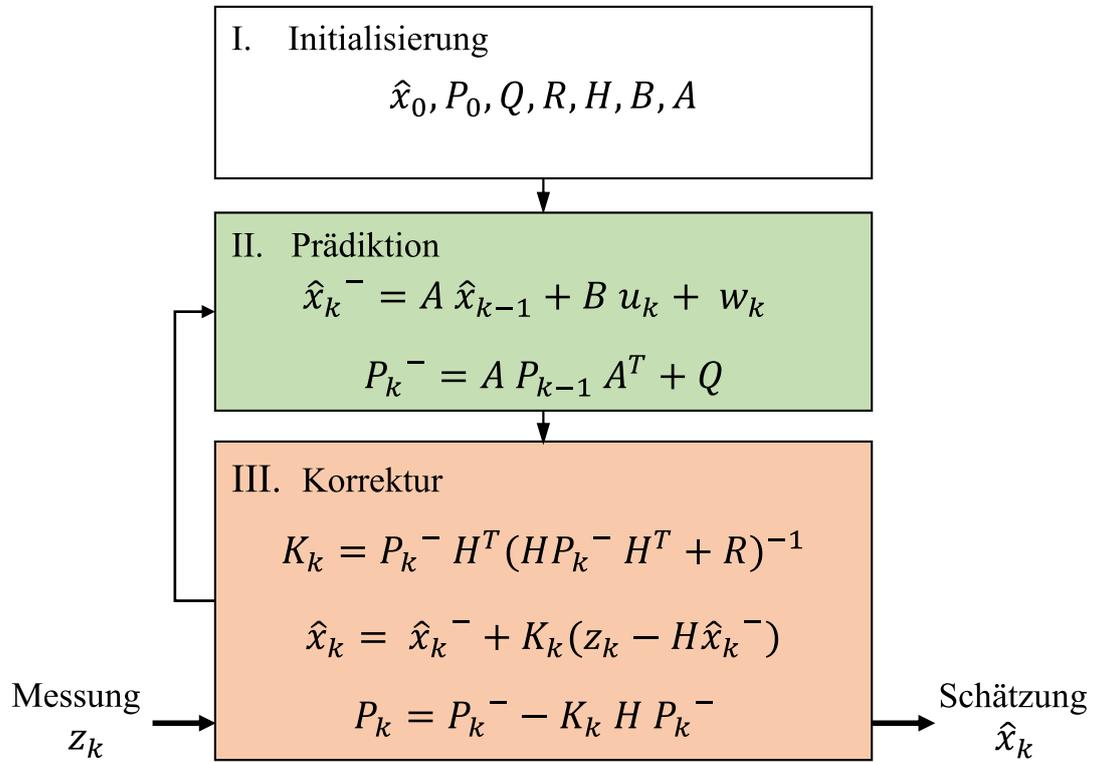


Abbildung 2.6: Schematischer Ablauf der Kalman-Gleichungen

## 2.4 Koordinatensysteme

Eine Möglichkeit für die Beschreibung der Lage eines Punktes im dreidimensionalen Raum ist die kartesische Darstellung. Die Koordinaten-Achsen ( $x, y, z \in \mathbb{R}$ ) stehen paarweise rechtwinklig zueinander. Dabei besitzen sie die gleiche Orientierung wie Daumen, Zeige- und Mittelfinger der rechten Handregel. Die Beschreibung der Lage eines Raumpunktes  $\mathbf{p}$  wird durch drei Abstandsvektoren auf den Koordinatenachsen eindeutig beschrieben. Wird in dem Punkt  $\mathbf{p}$  ein zweites Koordinatensystem aufgespannt, so ist zusätzlich zu der Lage auch die Orientierung im Raum nötig (vgl. Abbildung 2.7). Die

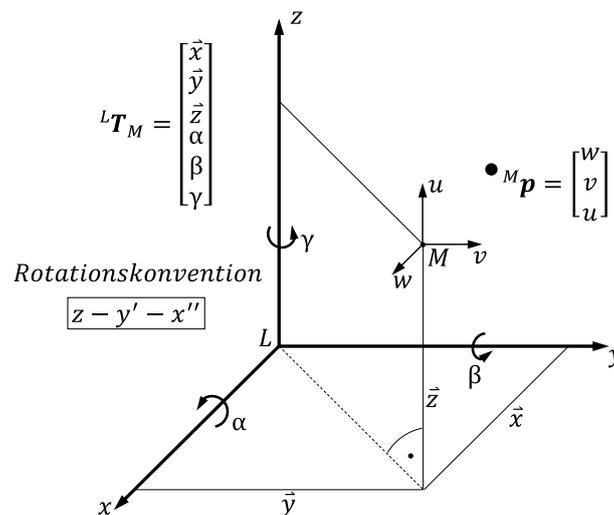


Abbildung 2.7: Darstellung der Beschreibung im Raum des Koordinatensystems K

Orientierung des neu aufgespannten Koordinatensystems  $M$  lässt sich beispielsweise in eulerschen Winkeln angeben. Die Rotation bei aufeinanderfolgenden Achsen ist nicht kommutativ (vgl. Abbildung 2.8). Folgerichtig ist eine Konvention festzulegen, welche beschreibt, wie die Berechnung der Rotation durchzuführen ist. Anschließend kann die Lage des Punktes  $\mathbf{p}$ , welcher im Koordinatensystem  $M$  angegeben ist, im Ursprungskordinatensystem  $L$  bestimmt werden. Der in dieser Arbeit verwendete Roboterarm (Manipulator) ist von der Firma *KUKA*. Die interne Schnittstelle für das externe Steuern des Manipulators gibt zwei Konventionen vor. Die Rotation kann entweder über die mit rotierenden Achsen mit der Reihenfolge  $z - y' - x''$  oder um die raumfesten Achsen mit der Reihenfolge  $x - y' - z''$  erfolgen. P. Zuther [28] legte diese bereits in seiner Arbeit auf die Drehreihenfolge  $z - y' - x''$  fest. Das bedeutet, die Berechnung der Rotation erfolgt erst über die Z-Achse, anschließend um die Y-Achse und abschließend um die X-Achse. Die

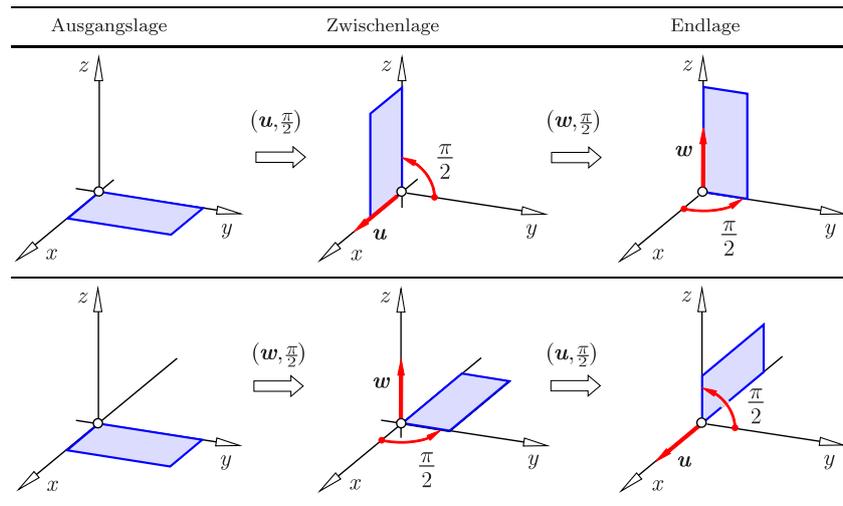


Abbildung 2.8: Darstellung der Rotation einer Ebene um zwei Achsen in unterschiedlicher Reihenfolge [26, S.62]

Transformation des Punktes  $\mathbf{p}$  im  $M$ -Koordinatensystem in das Koordinatensystem  $L$  erfolgt mit der Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$ . Für die Berechnung wird die Rotation mittels homogener Koordinaten in  $\mathbf{T}$  berücksichtigt. Das hat zum Vorteil, dass die Berechnung durch eine einzige Multiplikation erfolgt. Nachteilig ist die zusätzliche Rückrechnung der eulerschen Winkel bei einer Multiplikation mehrerer Transformationsmatrizen  $\mathbf{T}$ . Dabei gibt der niedriggestellte Index die Richtung und der hochgestellte Index den Ursprung an.  ${}^L\mathbf{T}_M$  transformiert von dem Koordinatensystem  $M$  in das Koordinatensystem  $L$ . [27] Gleichung 2.13 beschreibt, wie die Lage des Punktes  $\mathbf{p}$  im Koordinatensystem  $L$  berechnet werden kann.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{mit } \mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \mathbf{t} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}, \mathbf{0} \in \mathbb{N}^{1 \times 3} \quad (2.12)$$

$${}^L\mathbf{p} = {}^L\mathbf{T}_M \cdot {}^M\mathbf{p} \quad (2.13)$$

Die Transformationsmatrix wird nach der zuvor festgelegten Rotationskonvention gebildet. (vgl. Gleichung 2.14, 2.15, 2.16).

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\gamma) \cdot \mathbf{R}_y(\beta) \cdot \mathbf{R}_x(\alpha) \quad (2.14)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha - \cos \gamma \sin \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ \cos \beta \sin \alpha & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha \\ -\sin \beta & \sin \gamma \cos \beta & \cos \gamma \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Nach [3] lassen sich die eulerschen Winkel aus den homogenen Koordinaten mit den Gleichungen 2.17, 2.18 berechnen.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \beta &= \text{atan2} \left( -r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \right) \\ \alpha &= \text{atan2} \left( \frac{r_{21}}{\cos \beta}, \frac{r_{11}}{\cos \beta} \right) \\ \gamma &= \text{atan2} \left( \frac{r_{32}}{\cos \beta}, \frac{r_{33}}{\cos \beta} \right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Tritt der Fall auf, dass  $\beta = \pm 90^\circ$  ist, so sind die Gleichungen für  $\alpha$  und  $\gamma$  aufgrund unendlich vieler Lösungen nicht lösbar. Diese Singularität wird Gimbal-Lock genannt. Es beschreibt das Übereinanderliegen zweier Achsen. Für die Lösung der Singularität schlägt Craig17 die Fallunterscheidung in Gleichung 2.19 vor.

$$\beta = \begin{cases} 90^\circ \rightarrow \left( \begin{array}{l} \alpha = 0 \\ \gamma = \text{atan2}(r_{12}, r_{22}) \end{array} \right) \\ -90^\circ \rightarrow \left( \begin{array}{l} \alpha = 0 \\ \gamma = -\text{atan2}(r_{12}, r_{22}) \end{array} \right) \end{cases} \quad (2.19)$$

In dem folgenden Beispiel (vgl. Abbildung 2.9) ist die Koordinatentransformation exemplarisch dargestellt. Die Lage des Punktes  $\mathbf{p}$  ist im Koordinatensystem  $C$  bekannt. Benötigt wird aber die Lage des Punktes  $\mathbf{p}$  aus dem Koordinatensystem  $A$ . Die drei Koordinatensysteme  $A, B$  und  $C$  sind über die Transformationsmatrizen  ${}^A\mathbf{T}_B, {}^B\mathbf{T}_C$  (vgl. 2.20, 2.21) gekoppelt. Die Bildung der Haupttransformationsmatrix  ${}^A\mathbf{T}_C$  wird durch Multiplikation (unter Beachtung der Matrizen-Rechnung rechtsseitig) der einzelnen Transfor-

mationsmatrizen in Reihenfolge gebildet (vgl. Gleichung 2.22). Die Lage des Punktes  ${}^C\mathbf{p}$  im Koordinatensystem A kann anschließend bestimmt werden. Analog zu dem Beispiel wird die Lage und Orientierung eines Koordinatensystems mit dem Ursprung in Punkt  ${}^C\mathbf{p}$  durch den vorgestellten Formalismus berechnet.

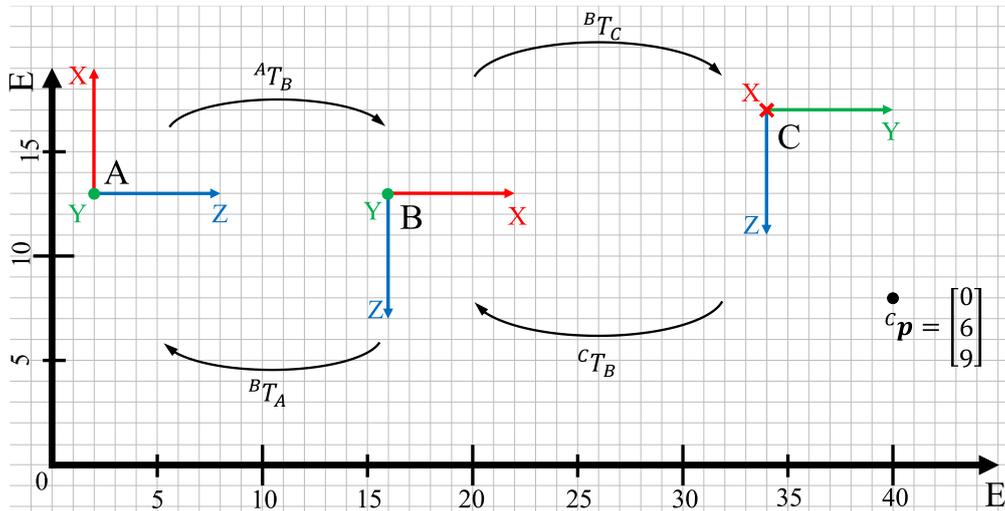


Abbildung 2.9: Beispielanordnung von Koordinatensystemen

$${}^A\mathbf{T}_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 14 & 0 & -90^\circ & 0 \end{bmatrix}^T \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$${}^B\mathbf{T}_C = \begin{bmatrix} 18 & 0 & -4 & -90^\circ & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 18 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$${}^A\mathbf{T}_C = {}^A\mathbf{T}_B \cdot {}^B\mathbf{T}_C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 4 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 32 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} {}^A\mathbf{p} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^A\mathbf{T}_C \cdot \begin{bmatrix} {}^C\mathbf{p} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5 & 0 & 38 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2.23)$$

## 2.5 KUKA Agilius KR6 R900

Der Aufbau des Robotersystems (Abbildung 2.10) der Firma *KUKA* besteht aus dem Manipulator ① (Roboter-Arm), dem Bedienpanel ② (SmartPAD), der Motoransteuerungs- und Sensorauswertungseinheit KUKA Robot Control 4 Compact (KRC4) ④ sowie folgenden Schnittstellen: ③ (Verbindungsleitung SmartPAD), ⑤ (Datenleitung), ⑥ (Motorleitung) und der Geräteanschlussleitung ⑦. Die externe Vorgabe von Koordinaten

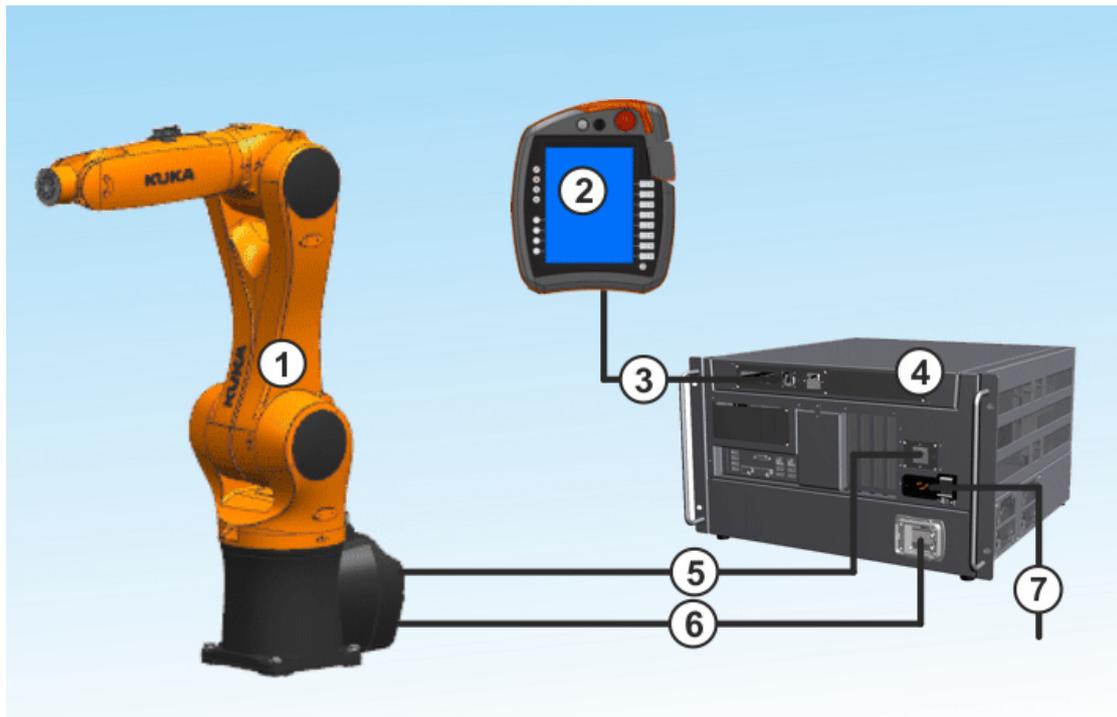


Abbildung 2.10: Systemaufbau eines KUKA Manipulators mit KRC4 und UI [11]

erfolgt über das Robot Sensor Interface (RSI), einem zusätzlichen Modul der KRC4. Es ermöglicht eine Vorgabe der Lage und Orientierung des Endeffektors und richtet sich in erster Linie an eine Echtzeit-Beeinflussung der Trajektorien des Manipulators. Eine mögliche Anwendung ist hier die Abstandskontrolle des Endeffektors zu einer Oberfläche. Die Positionierung, Ansteuerung und Regelung der einzelnen Effektoren wird nach Auswertung der RSI-Struktur durch die KRC4 realisiert. Die Kommunikation erfolgt über ein Request-Telegramm in XML-Struktur, welche unter anderem eine fortlaufende Telegramm-Nummer (IPOC) beinhaltet. Erfolgt keine Antwort innerhalb eines Intervalls mit der entsprechenden IPOC, wird dies als Fehlertelegramm aufgefasst. Die KRC4

beendet die Ansteuerung des Manipulators nach einer einstellbaren Anzahl von aufeinanderfolgenden Fehlertelegrammen.

Das RSI-Modul ermöglicht eine Signalverarbeitung durch eine in einer Shell eingebetteten, graphischen Oberfläche. Regelkreise, logische Abfragen, mathematische Funktionen, das Speichern von Variablen oder das Setzen von Filterstrukturen sind realisierbar. Anschließend ist/sind die entsprechende/n Achse/n (oder Rotation/en) über ein Korrektur-Objekt anzusteuern. Signale, die nicht über das Extensible Markup Language (XML)-Telegramm realisierbar sind, können über die Schnittstellen der DI/DO (AI/AO) abgefragt und/oder gesetzt werden. Eine erste Einrichtung und Validierung für das RSI ist ausführlich in [28, S.48ff] erfolgt.

Die in [28] genutzte RSI-Systemstruktur ist für die Fortführung der Arbeit gemäß Abbildung 2.11 angepasst worden. Das Ethernet-Objekt ① ermöglicht den Kommunikationsaufbau zum Sensorsystem. Innerhalb einer zusätzlichen Datei, dem sogenannten Config-File, ist die XML-Telegramm-Struktur für das Senden und Empfangen von verbundenen Variablen festgelegt. Die Anzahl der Nachkommastellen für die Winkelgeber des Manipulators kann bei Precision (vgl. Abbildung 2.11) eingestellt werden und wurde auf zwei gesetzt. ② beschreibt die digitalen Eingänge des Systems. Über die Objekte *DIGOUT* (Digitaler Ausgang) und *DIGIN* (Digitaler Eingang) wird der Status abgefragt. Die Zuordnung erfolgt dabei durch den Index und die Angabe der Datengröße.

③ dient zur Glättung der eintreffenden Signale. Hier wird eine Tiefpassfilterstruktur nach Bessel angewendet. Diese weist ein optimales Rechteckübertragungsverhalten auf. Dadurch wird gewährleistet, dass kein Überschwingen beim Erreichen von Soll-Werten auftritt, welche die Manipulator-Position nachträglich beeinflussen. Abschnitt ④ ermöglicht die direkte Manipulation der Orientierung und Lage des Endeffektors in Bezug auf ein festgelegtes Koordinatensystem. Für die Verwendung des IPO-Fast-Modus (Zykluszeit  $T_{RSI} = 4 \text{ ms}$ ) ist nach [12] die Verwendung des Basiskoordinatensystems vorgeschrieben. Um das Tool-Koordinatensystem manipulieren zu können, ist eine Zykluszeit von  $T_{RSI} = 12 \text{ ms}$  nötig, welche zu Dynamikverlusten führen könnte.

Für die Nutzung der hohen Zykluszeit wird die Koordinatentransformation zum Tool-Koordinatensystem auf der Sensorsystemseite durchgeführt. Abbildung 2.12 zeigt die Anordnungen der Koordinatensysteme. Zusätzlich besteht die Notwendigkeit eines definierten Bereichs (genannt Safety-Box), in dem sich der Endeffektor bewegen darf. Das Objekt *POSSCORRMON* ermöglicht zusätzlich die Angabe einer maximalen Translationsbewegung. Diese addiert sich aus den Translationen in allen drei Achsen. Die Darstellung der Daten auf dem SmartPAD wird über den RSI-Monitor mittels des Objektes *MONITOR* realisiert. Abschnitt ⑤ ermöglicht das Setzen von DO's.

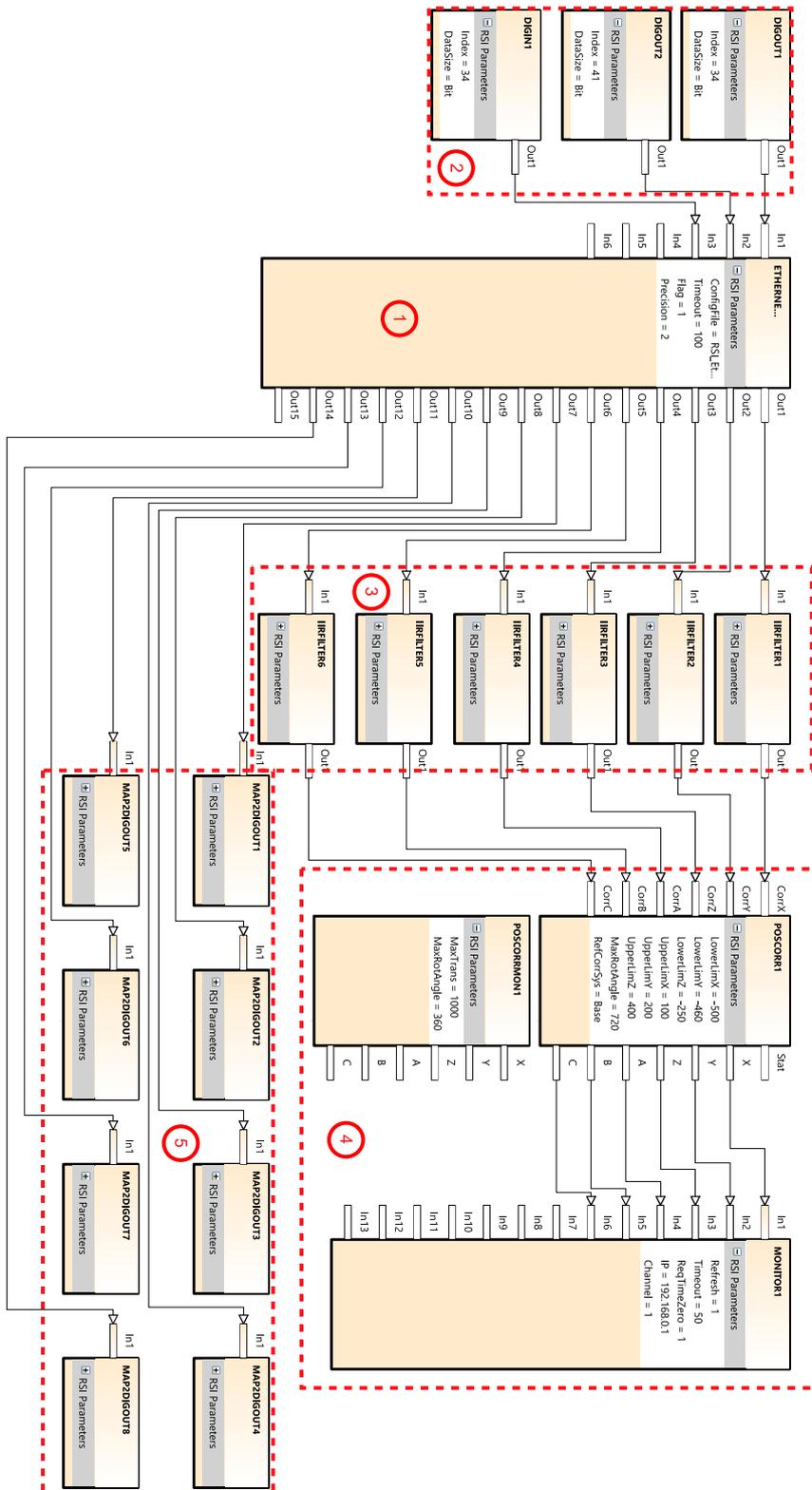


Abbildung 2.11: Aufbau der RSI-Schnittstelle innerhalb der KRC4

Dadurch ist es möglich, die SPS als Schnittstelle für weitere Peripherie zu nutzen. Für ein erstes Verständnis der Koordinatensysteme sind diese in Abbildung 2.12 dargestellt. Um eine fehlerfreie Bewegung in einem der gewünschten Koordinatensysteme des Sensorsystems durchzuführen, ist eine Definition der Basis-Pose notwendig. Die Angabe der Pose erfolgt in Bezug auf das Root-Koordinatensystem, welches sich im Fußpunkt des Manipulators befindet. Das Basis-System ist in die Verbindungsebene des Werkzeughalters gelegt worden. Ein Werkzeugwechsel durch Änderung einer KUKA-internen Variable innerhalb der RSI-Routine ist nur möglich, wenn das RSI mit einer Zykluszeit von  $T_{RSI} = 12 \text{ ms}$  arbeitet. Bei dieser Einstellung filtert KUKA die eingehenden Werte vor, ohne dass der Benutzer einen Einfluss auf die Einstellungen des Filters hat oder dessen Filterung näher kennt.

Das Sensorsystem gibt eine Pose vor, welche dem TCP des Roboters entsprechen soll. Da die kinematische Kette vom TCP zum Basis Center Point (BCP) bekannt und konstant ist, kann die Pose des BCP berechnet werden. Das RSI-Modul führt anschließend die Bewegung des Manipulators durch. Die kinematische Kette zur Berechnung des BCP wird in Kapitel 3.6.1 vertieft. Dies ermöglicht eine unabhängigere Software, die mit Schnittstellen externer Manipulatoren theoretisch nutzbar sein sollte. Der Werkzeugwechsel erfolgt mittels einer Routine. Der Manipulator hat sich in eine definierte Position zu begeben, erst beim Erreichen wird ein definierter pneumatischer Druck  $p$  auf den Werkzeugwechsler *WWR63L-B* der Firma *Zimmer Group* beaufschlagt und das Tool kann gewechselt werden.

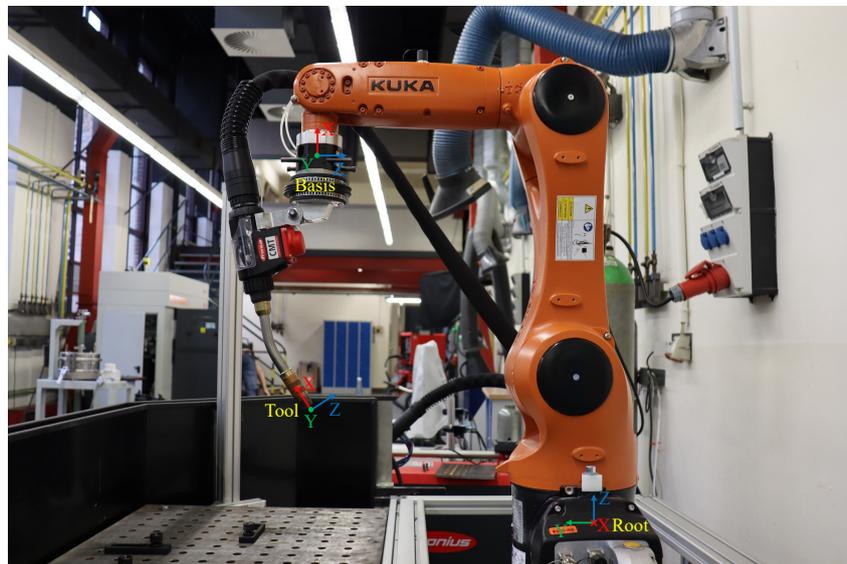


Abbildung 2.12: Lage der Bezugs-Koordinatensysteme angelehnt an [10, S.71]

## 2.6 Metall-Schutzgas-Schweißen

Das Schweißen ist ein Fügeprozess, bei dem zwei oder mehrere Halbzeuge miteinander zu einem Kontinuum verbunden werden [24]. Das Kontinuum wird zusätzlich zu dem Einbringen von Wärme teils mit einer definierten Kraft erzeugt. Die Nutzung von Schweißzusatzwerkstoffen ist optional, für einige Naht- und Schweißverfahren aber unerlässlich. Es ist außerdem möglich, mithilfe des Schweißens Materialdicken zu vergrößern, Abriebflächen zu reparieren oder Konstruktionen mittels additiver Verfahren zu erstellen.

Das Fügen ist nach DIN 8580 die Hauptgruppe 4. In dieser Hauptgruppe bezeichnet die DIN 8593-6, Abschnitt 4.6.2, das Schmelzverbindungsschweißen als eigenständige Unterart des Fügens. Die Bezeichnung des Schmelzschweißens begründet sich darauf, dass die Fügeflächen der Halbzeuge angeschmolzen und verbunden werden.

Beim Schweißen von Metall-Schutz-Gas (MSG) brennt ein Lichtbogen zwischen der abschmelzenden Drahtelektrode und dem Werkstoff. Zum Schutz der Wärmeeinflusszone vor Oxidation wird ein spezielles Gas durch die Gasdüse geführt. Durch die Zusammensetzung des verwendeten Schutzgases können unterschiedliche Eigenschaften gesteuert werden. Dies Beschreibt das Metall-Aktiv-Gas (MAG)-Schweißen. In Abbildung 2.13 ist der Kopf eines MAG-Handbrenners in Schnittdarstellung abgebildet. Die blau gekennzeichneten Pfeile stellen den Gasfluss innerhalb der Düse dar. Das Isolierstück dient zur Abschirmung des Stromkontaktrohres und der von außen berührbaren Gasdüse. Nahezu

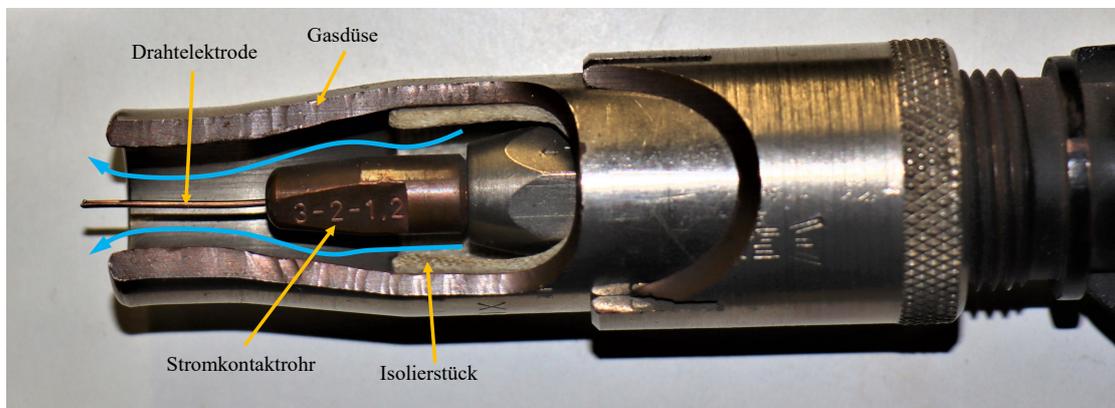


Abbildung 2.13: Schnittdarstellung eines gasgekühlten Brennerkopfes der Firma Dinse

alle Materialien in allen Schweißpositionen können mit dem Prozess des MAG-Schweißens gefügt werden. Hohe Schweißgeschwindigkeiten und die gute Beobachtbarkeit eignen sich für die Automatisierung durch Manipulator-gestützte Verfahren. Die Art des Lichtbogens hat ebenfalls Einfluss auf die Schweißnaht. So unterscheidet man zwischen Sprühlicht-,

Langlicht-, Übergangs-, Kurz- und Impulslichtbogen. Der zu verwendende Lichtbogen ist abhängig von der Nahtart, der Bauteildicke, dem zu schweißenden Werkstoff und der Schweißhaltung. Das Erreichen des richtigen Lichtbogens wird durch das Einstellen der elektrischen Spannung, Drahtfördergeschwindigkeit, Stromstärke, den Elektrodendurchmesser, der Brennerhaltung, den Abstand zum Werkstück und der Schutzgasart beeinflusst. Es ist ersichtlich, dass der Schweißer einen großen Parameterraum kennen muss, um seine Tätigkeit korrekt ausführen zu können.

Das in dieser Arbeit verwendete Schweißverfahren ist eine Unterart des MAG-Schweißens. Bei den meisten Verfahren wird die abschmelzende Elektrode mit konstanter Geschwindigkeit durch den Brenner geführt. Bei Kontakt der Elektrode mit dem Werkstück kommt es zum Kurzschluss. Um diesen wieder aufzubrechen, wird die Stromstärke stark erhöht und der Lichtbogen erneut gezündet. Dies führt zu einer erhöhten Wärmeeinbringung in das Material. Das Verfahren des Cold Metal Transfer (CMT) verringert durch zyklische Vor- und Rückschubbewegungen des Schweißdrahtes diese Wärmeeinbringung. Dies geschieht durch kontrollierte Tropfenablösung und Wiederzündung des Lichtbogens. Der Zyklus beginnt mit dem Vorschub des Drahtes bis hin zum Kurzschluss.

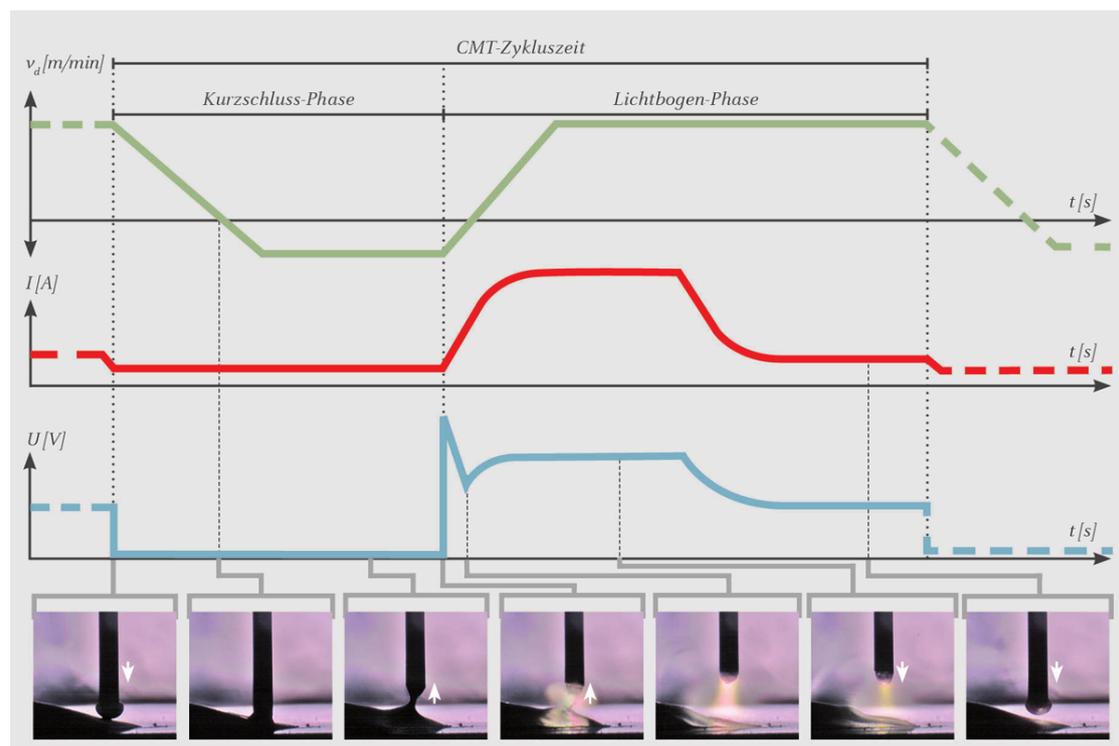


Abbildung 2.14: Zyklus des CMT-Verfahrens mit Angabe der Leistungsparameter [8]

Nach Erlöschen des Lichtbogens wird der Draht eingezogen. Dadurch wird das flüssige Material abgelegt und der Lichtbogen bricht beim Verlassen des Kurzschlussbereichs wieder auf. Anschließend beginnt der nächste Zyklus. Die Wiederholrate erfolgt mit einer Frequenz von  $f_{cmt} = 50 \text{ Hz}-130 \text{ Hz}$  [8]. Die Hauptvorteile gegenüber anderen Verfahren sind die reversierende Elektrode, spritzfreie Wiederezündung und der Erhalt eines gleichmäßigen und kontrollierten Lichtbogens [8].

### 3 Konzept und Integration

Das Konzept der Arbeit soll das ferngesteuerte Schweißen mit einem Manipulator in Echtzeit ermöglichen (vgl. Abbildung 3.1). Dabei wird der Ansatz verfolgt, ein Dummy-System aufzubauen, mit welchem eine gelernte Fachkraft schweißen kann, ohne sich Gefahren und körperlichen Beanspruchungen aussetzen zu müssen. Der Manipulator übernimmt dabei die Arbeit mit dem eigentlichen Schweißgerät. Die Brennerbewegung des Schweißers wird durch ein stereoskopisches Sensorsystem erfasst. Für die erfolgreiche Anpassung der Parameter beim Schweißen ist es notwendig, dem Benutzer ein Feedback bereitzustellen. Dies soll in Form von akustischen, visuellen und haptischen Eindrücken erfolgen. Zusätzlich ist mittels eines Laserscanners am Werkzeughalter des Manipulators eine mögliche Abstandskontrolle vorgesehen. Die Signalverarbeitung und Weiterleitung erfolgt dabei über eine Signalverarbeitungseinheit. In dem folgenden Abschnitt wird die algorithmische sowie die technische Problemstellung thematisiert.

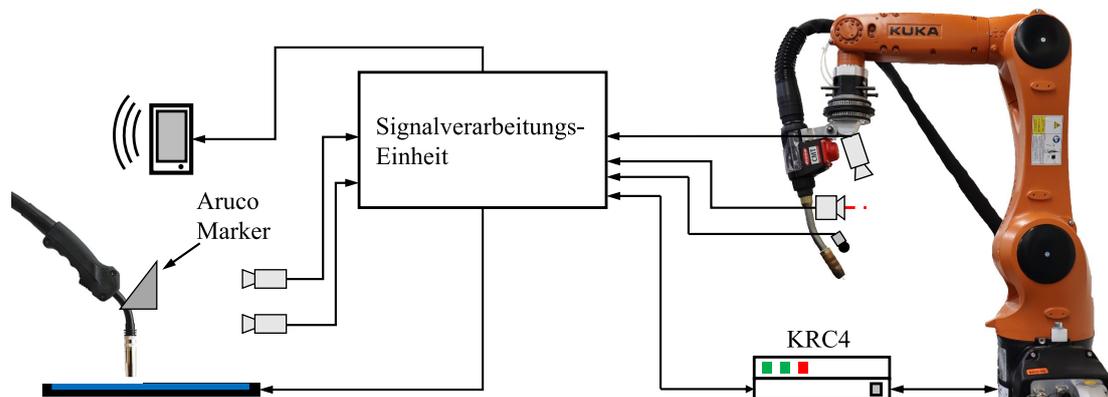


Abbildung 3.1: Konzeptzeichnung des Aufbaus zum ferngesteuerten Schweißen

### 3.1 Algorithmische Problembeschreibung

Die Vorarbeit in [28] ermöglicht die Erfassung der Schweißbrennerbewegung im dreidimensionalen Raum mithilfe eines stereoskopischen Systems und robusten Markern. Darüber hinaus ist die Prozesskette vom Sensorsystem bis hin zum Manipulator erfolgreich in Betrieb genommen worden. Das Sensorsystem ermöglicht in seinem Arbeitsbereich die Festlegung eines Basis-Koordinatensystems. Anschließend wird die Pose in Relation zu dem frei wählbaren Punkt berechnet und an die Manipulator-Steuerung gesendet. Der Manipulator führt das Anfahren der Endpose mit seinem Endeffektor von seiner jeweiligen Position aus.

Die *Synchronisation* über einen Bezugspunkt innerhalb der Systeme (Manipulator/ Sensorsystem) ist dabei von entscheidender Bedeutung. Ziel ist es, die frei wählbare Bezugspose des Sensorsystems mit einem im Arbeitsraum des Manipulators definierten Bezugspunkt zu verbinden. Dabei bietet sich die Brennerspitze der jeweiligen Systeme als ideale Kopplung an. Für eine möglichst nutzerfreundliche Bedienung soll der Marker, welcher am Eingabegerät montiert ist, frei verschieb- und drehbar sein. Die kinematische Kopplung ist durch eine zu entwickelnde Methodik nach jeder Veränderung des Markers neu zu berechnen. Eine weitere Herausforderung ist die Referenzierung der Bezugsebenen zueinander. Erst wenn diese erfolgt, können Abstand, Neigungswinkel und Geschwindigkeit erfolgreich vom Schweißer auf den Manipulator und damit auf das zu schweißende Objekt übertragen werden.

Die KRC4 fordert mit einer Frequenz von  $f_{KRC4} = 250 \text{ Hz}$  ein Telegramm an. Eine Aktualisierung der Pose kann das Sensorsystem aufgrund der verwendeten Peripherie mit einer maximalen Frequenz von  $f_{BV} = 50 \text{ Hz}$  erstellen. Damit entsteht ein Zeitbereich, in dem keine aktualisierte Information für die Manipulator-Steuerung zur Verfügung steht. Für eine möglichst unverzerrte Bewegung des Endeffektors in Bezug auf die Änderung der zu messenden Objekt-Pose ist eine Prädiktion unverzichtbar. Diese ermöglicht die Vorgabe einer für den Manipulator echtzeitfähigen und verfolgbaren Pose. Die Prädiktion selbst erfolgt durch ein Systemmodell zweiter Ordnung und der Algorithmik eines Kalman-Filters [28]. Dadurch ist es möglich, gezielt Eingriff auf die prädizierte Trajektorie zu nehmen und die wahrscheinlichste Verlaufsrichtung anzugeben. Abbildung 3.2 zeigt einen Ausschnitt aus einer Messung des Sensorsystems mit Prädiktion. Bei annähernd konstanter Geschwindigkeit des Messobjektes kann mithilfe des Kalman-Filters die Bewegung gut vorhergesagt werden. Kritisch zu betrachten sind die Wendepunkte

(Sample 0-50, 100-150). Es bildet sich ein deutlich ausgeprägter, sägezahnähnlicher Verlauf, der nur langsam abklingt. An dieser Stelle ist eine geeignete Signalaufbereitung zu entwickeln, die eine möglichst phasenfreie und stetige Trajektorie erzeugt. Dies kann unter anderem mit einem anderen Algorithmus erreicht werden oder durch Erhöhung der Modell-Ordnung innerhalb des Kalman-Filters. Das Erhöhen der Systemordnung würde die Beschleunigung miteinbeziehen und kann für einen stärkeren Angleich der Prädiktion an die eigentliche Messung in den Umkehrpunkten führen.

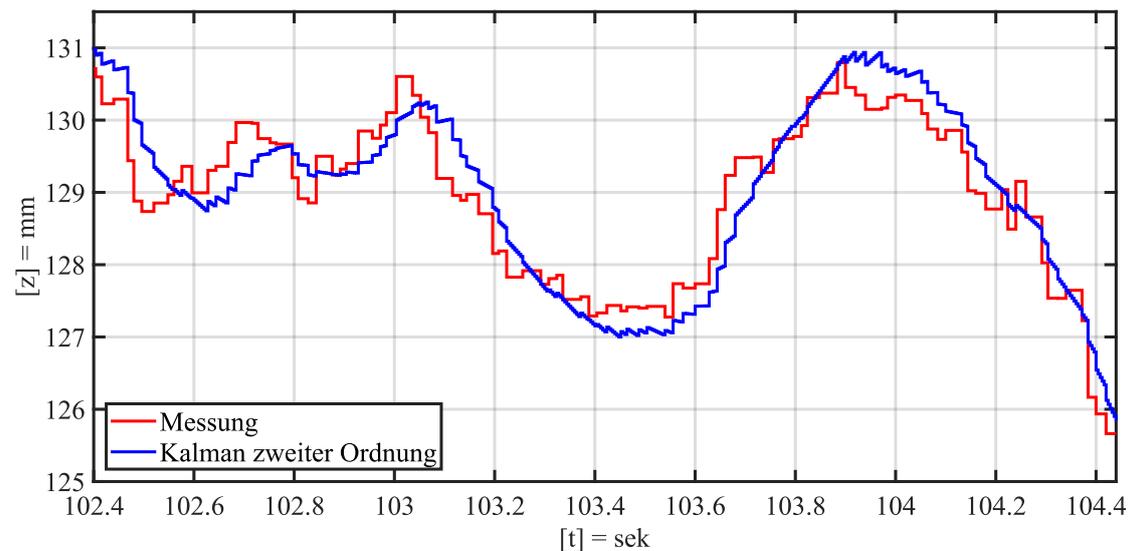


Abbildung 3.2: Prädiktion (blau) des Messsignals (rot) durch Kalman-Filter zweiter Ordnung

Somit sind zusammengefasst vier Kernprobleme zu lösen:

- Referenzierung der jeweiligen TCPs zueinander
- Referenzierung der Ebenen vom Sensorsystem und der Arbeitsebene
- Signalaufbereitung des Sensorsystems
- Lösen des Timingproblems bei Echtzeitanforderungen der KRC4

### 3.2 Systemaufbau

Die technische Herausforderung besteht in der Realisierung eines Systems, welches die harte Echtzeit der Manipulator-Steuerung erfüllt. Dafür wurde eine Software geschrieben, die die Bilderkennungsalgorithmen der Kameras sowie die Aktualisierung der Trajektorie und das Beantworten der Telegramme in einem Thread-Pool auslagert (vgl. Abbildung 3.3). Dadurch konnte die Performance des Systems gesteigert werden. Bei einer Überlastung der Ressourcen (z. B. infolge einer Vergrößerung der Region of Interest (ROI) innerhalb der Bildverarbeitung) sinkt die Anzahl an Bildpaaren pro Sekunde. Dies hat direkten Einfluss auf die Qualität der Messung und die Prädiktion, wodurch die Dynamik des Systems verringert wird. Das Erfüllen der Echtzeitkommunikation mit der

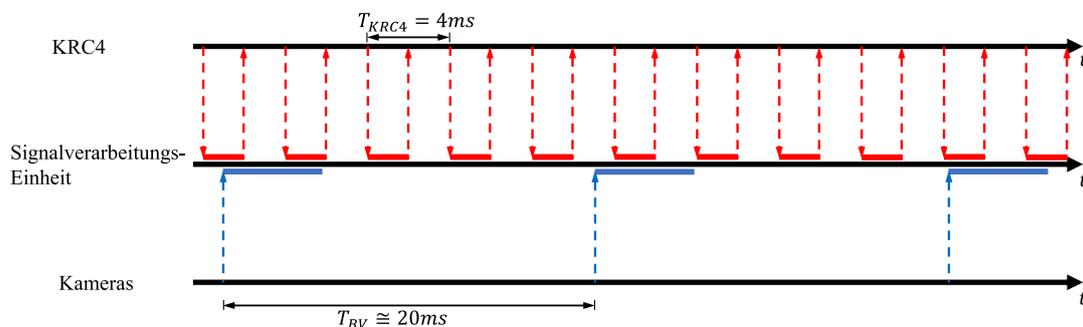


Abbildung 3.3: Darstellung des erwarteten zeitlichen Verhaltens

KRC4 von *KUKA* hat hohe, wenn nicht sogar höchste Priorität. Aus diesem Grund wurde die Bearbeitungsdauer des Telegramms ermittelt (vgl. Abbildung 3.4). Das Telegramm wird an der physischen Schnittstelle mittels eines Switches und der Funktion eines Port-Spiegels abgegriffen. Der Messung kann entnommen werden, dass die harte Echtzeit mit einem geringen Prozentsatz verletzt wird. Die längste gemessene Bearbeitungszeit beträgt  $t_{xml} = 7,3 ms$ . Separate Messungen ergaben, dass die Auslastung des Prozessors, des RAMS, und der Ethernet-Peripherie für die Kameras voll ausgelastet sind. Hinzukommt, dass das Betriebssystem Windows 10 der Firma *Microsoft* nicht für Echtzeitanwendungen geeignet ist. Dieser Fakt beruht auf der Verwendung von energie- und nutzerfreundlichen Scheduler-Strategien, Schlaf-Funktionen der Prozessorkerne sowie Systeminterrupts.

Für die Einhaltung der Echtzeitanforderung und die Entlastung des Bildverarbeitungssystems wird ein Echtzeitsystem in das Gesamtkonzept eingepflegt. Dies soll die synchrone Kommunikation mit der KRC4 und gleichzeitig die asynchrone Kommunikation

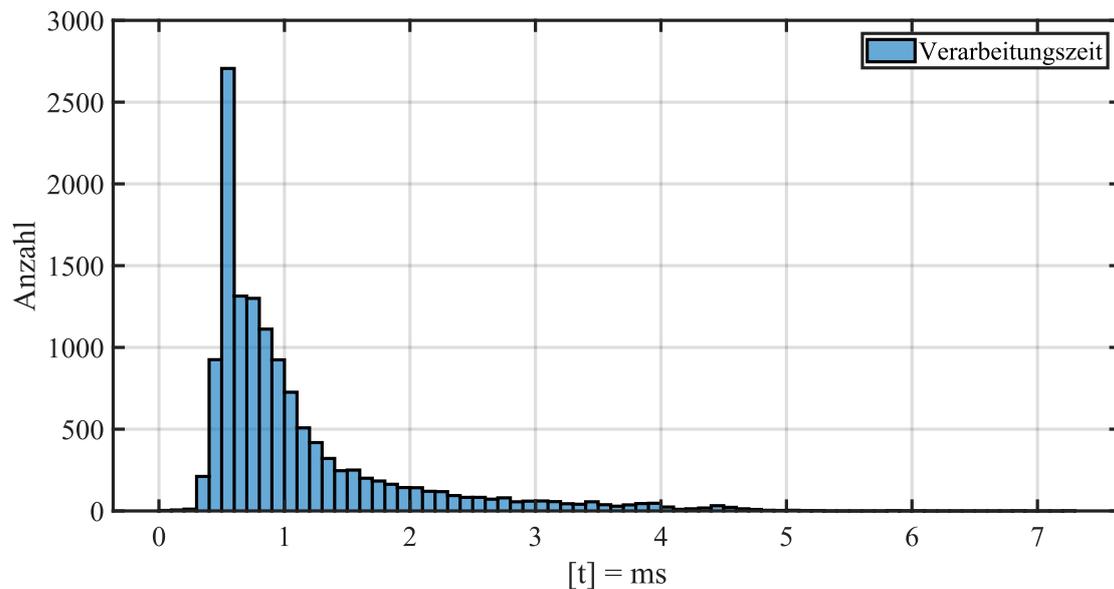


Abbildung 3.4: Bearbeitungsdauer der XML-Telegramme vom Eintreffen bis zum Rücksenden. Die Messung erfolgte über 52 Sekunden. Es sind 26392 relevante Pakete erfasst und dargestellt

mit der Bildverarbeitungseinheit sicherstellen (vgl. Abbildung 3.5). Folgende Aufgaben werden aufgrund von Performance zusätzlich auf dem RT-System integriert:

- **Kalman-Filterung:** Die Prädiktion soll im Moment der Abfrage erfolgen. Die Berechnung erfolgt in neun Kalman-Filtern: jeweils einer für die Translationsachsen, drei für den Real- und drei für den Imaginärteil der jeweiligen Rotationen. Anschließend wird der Real- und Imaginärteil zu einem Winkel vereint.
- **Koordinaten-Transformation:** Die zentralisierten Berechnungen der homogenen Koordinaten in inhomogene Koordinaten ermöglichen die schnelle Anpassung an Systemgegebenheiten und einen strukturierten Programmcode.
- **Messdatenaufnahme:** Als zentrale Einheit ist der Mitschrieb auf dem RT-System zwingend notwendig. Dadurch werden Verzerrungen durch Telegramm-Laufzeiten minimiert. Der Mitschrieb soll bei Aktivierung mit dem Zyklustakt der KRC4 ausgeführt werden.

Die Aufzeichnung und Weitergabe von Bild und Ton soll ebenfalls über das RT-System erfolgen. Hierfür sollen ein Laserscanner, eine Farbkamera und ein Mikrofon am Brennerkopf des Roboters befestigt werden. Die Daten des Mikrofons und der Kamera werden

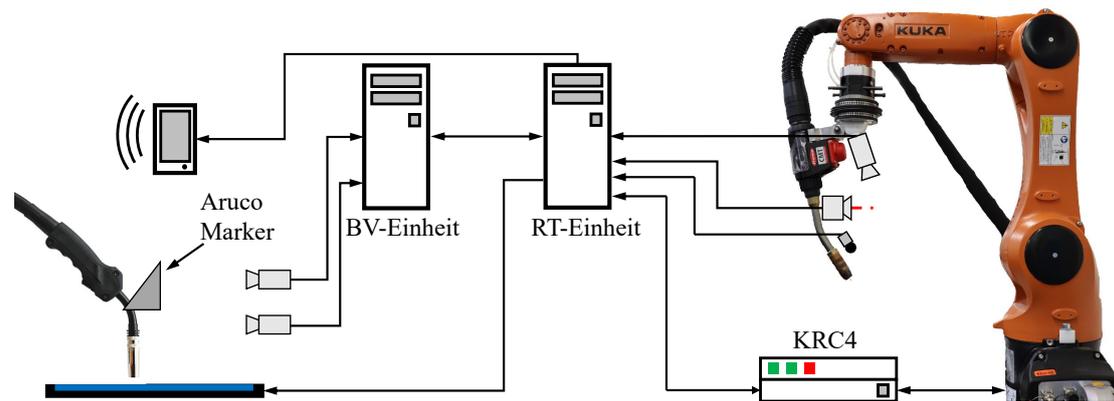


Abbildung 3.5: Erweiterte Konzeptzeichnung des Aufbaus zum ferngesteuerten Schweißen

anschließend direkt an den Benutzer weitergeleitet. Der Laserscanner soll neben einer Abstandskontrolle zum Werkstück die Ebenen-Referenzierung ermöglichen. Hierzu soll ein markantes Objekt lokalisiert werden, an dem sich der Manipulator ausrichtet. Die Kommunikation der Geräte erfolgt über die Geräte-spezifizierte Protokolle.

Das zu verwendende Netzwerkprotokoll zur KRC4 ist das UDP. Dieses Protokoll ermöglicht das Versenden von Paketen an eine definierte IP-Adresse ohne die Sicherstellung, ob die Pakete korrekt am Empfänger angekommen sind. Aufgrund der nicht sicheren Verbindung muss gewährleistet sein, dass die Komponenten der Verbindungsstrecke unempfindlich gegenüber unsortierten oder gar verlorenen Daten sind. Dies soll durch eine physische Verbindung zwischen RT-System und KRC4 mittels eines Pachtkabels sichergestellt werden. In gleicher Weise wird die Kommunikation zwischen dem RT-System und der BV-Einheit sichergestellt. Da der Austausch von Daten um ein Vierfaches langsamer erfolgt, ist die Verwendung des Transmission Control Protocol/ Internet Protocol (TCP/IP) zielführend. Durch das Protokoll wird der korrekte Empfang der Daten sichergestellt. Zusätzlich kann die Verbindung, im Gegensatz zu UDP, erst erfolgen, wenn beide Teilnehmer sich mit einem sogenannten Handschlag (Handshake) bekannt gemacht haben. Der Nachteil dieses Protokolls besteht in dem erhöhten Datenumfang auf dem Bus. Durch das notwendige Vorhandensein eines Teilnehmers ist ein erstes Sicherheitsmerkmal erfüllt. Erst bei aktiver Kommunikation kann die KRC4 korrekt angesteuert werden. Andernfalls bleiben die Kalman-Filter uninitialisiert und es kommt zum kontrollierten Fehlerfall. Zusätzlich werden Verbindungsabbrüche sofort registriert und ein definierter Stopp-Zustand wird erreicht.

### 3.3 Real-Time-System

Das Planen (Scheduling) von Aufgaben (Tasks) innerhalb eines Rechnersystems ermöglicht die zielführende Abarbeitung einzelner Prozessketten (Threads) auf der CPU. Dabei werden unterschiedliche Scheduling-Strategien (preemptiv oder nicht-preemptiv) mit einer zusätzlichen Sekundärstrategie kombiniert. Die wahrscheinlich am meisten verwendete Strategie für Echtzeitsysteme (Realtime operating System (RTOS)) ist die Earliest Deadline First (EDF) Strategie. Diese arbeitet die Tasks ab, welche die geringste, noch zur Verfügung stehende Ausführungszeit vor der zyklischen Wiederholung haben. Für die Steigerung der Geschwindigkeit, mit der ein RTOS zyklische Tasks abarbeiten kann, werden nur grundlegende Funktionen des Betriebssystems ausgeführt. Dies erhöht neben der Geschwindigkeit vor allem die Vorhersagbarkeit, mit der ein RTOS auf ein Ereignis reagiert. Maßgebend für die höchste Latenzzeit sind Messungen im ausgelasteten Systemzustand (Worst-Case-Messung). Dabei wird das System mit einer einfachen, aber ressourcenaufwändigen Task beaufschlagt. Währenddessen wird eine zyklische Abfrage generiert. Die längste Antwortzeit über eine definierte Zeitspanne gibt an, wie gut das RTOS agiert.

Je nach Aufgabengebiet kann ein RTOS mit *weicher* oder *harter* Echtzeit arbeiten. *Harte* Echtzeit bedeutet, dass zum Zeitpunkt  $t_{krit}$  die Task abgearbeitet sein muss, ansonsten kommt es zum Fehler. *Weiche* Echtzeit soll zum Zeitpunkt  $t_{krit}$  die Task grundsätzlich abgearbeitet haben, erlaubt aber geringfügige Ausnahmen. Abbildung 3.3 weist das Verhalten *weicher* Echtzeit auf. Nur ein geringer Anteil erfolgt verspätet und wird je nach Einstellung innerhalb des RSI toleriert. Um eine möglichst gute Kommunikation gewährleisten und diese als weiteren Sicherheitsaspekt betrachten zu können, liegt der Anspruch dieser Arbeit bei der Erstellung eines RTOS, welches im geforderten Bereich *harte* Echtzeit sicherstellen kann. Für RTOS-Systeme gibt es viele Ansätze unterschiedlicher Anbieter. Das System in dieser Arbeit soll schnell implementierbar, wartungsarm und, da kostenorientiert, möglichst lizenzfrei sein. Aus diesen Gründen wurde sich für ein RTOS mit dem Betriebssystem Linux entschieden. Vertreter für RTOS-Systeme auf Linux-Basis sind RTAI, Xenomai und preempt-RT [1]. Bei diesen werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: der Dual-Kernel-Ansatz und der In-Kernel-Ansatz (vgl. Abbildung 3.6). Der Dual-Kernel-Ansatz, welcher z. B. von RTAI verwendet wird, nutzt einen zweiten Kernel, der den Linux-Kernel als eine nebenläufige, niedrig priorisierte Task laufen lässt [4]. Die RT-Anwendungen erfolgen dabei im Kernel-Space und sind mit speziellen Befehlen zu realisieren. Das beeinträchtigt die Portabilität des Programmco-

des auf andere Zielsysteme erheblich. Xenomai bietet eine Erweiterung hinsichtlich der Portabilität. Die Kommunikation erfolgt direkt aus dem User-Space und wird mittels Message-Queues (sogenannte Pipelines) auf die Kernel-Ebene transferiert. Der Umzug auf ein anderes RTOS wird mittels eines *SKINS* gesichert, der gleichzeitig auch die API-Abbildung von Xenomai darstellt. Der Nachteil von Xenomai liegt in der zwangsläufigen Verwendung von Xenomai-spezifischen Bibliotheken. Standardisierte Linux-Bibliotheken sind für RT-Anwendungen nicht verwendbar.

Der Linux-Echtzeit-Preemption-Patch PREEMPT\_RT verfolgt das Ziel, den Linux-Kernel an sich echtzeitfähig zu machen. Dies wird durch den konsequenten Einsatz von Mutexen und der Veränderung des Threaded Interrupt Handlers vom harten Interruptkontext zu einem Kernel-Thread realisiert. Durch die breitbandige Unterstützung innerhalb der Nutzungsgemeinschaft und durch die Förderung großer Unternehmen wie z. B. Google, Intel, ARM, TI u. a. [1] hat sich der Preempt\_RT als Standard in Sachen Linux-Echtzeit durchgesetzt. Auf Grundlage der oben genannten Vorteile ist ein RT-System auf Linuxba-

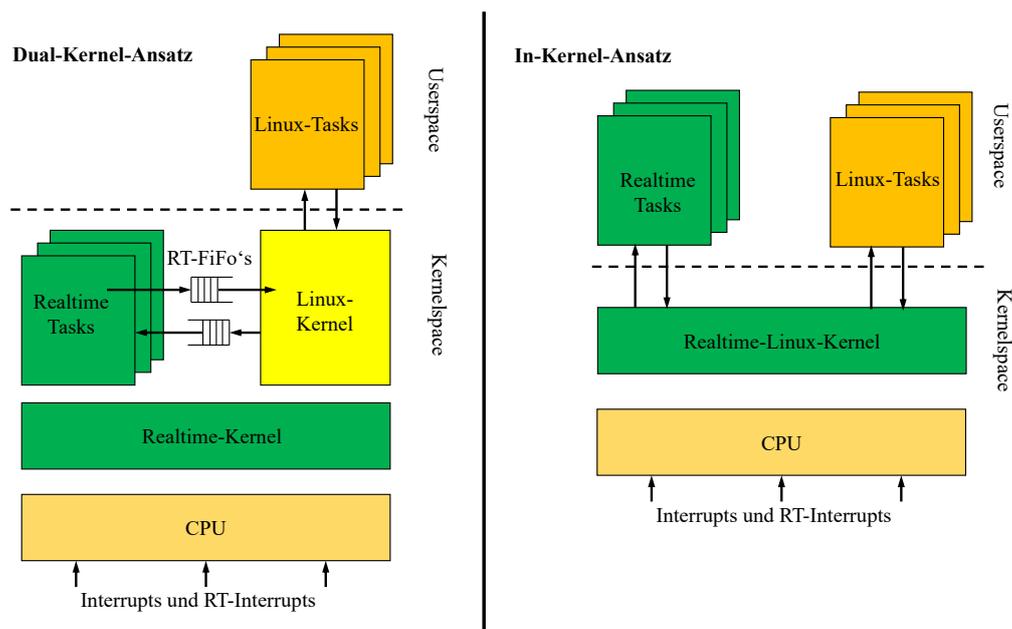


Abbildung 3.6: Vergleich/ Darstellung des Dual-Kernel und In-Kernel Ansatzes bei der Realisierung von Linux-RTOS

sis mit dem Preempt\_RT Patch erstellt worden. Dieses System verfügt über einen Intel Core I7 6700K Prozessor. Die acht Kerne laufen mit einer Taktfrequenz von  $f_{takt} = 4$  GHz. Darüber hinaus sind 8 GB RAM und eine SSD mit 500 GB Speicherplatz vor-

handen. Das genutzte Betriebssystem ist Debian 9.0 für 64-Bit-Systeme. Die Installation des RT-Kernels erfolgt über die Kommandozeile. Eine knappe Anleitung bietet [4]. Für die bestmögliche Performance gibt es mehrere mögliche Parameter und Einstellungen. So können Funktionen wie *sleepstates* oder *CPU-Frequency-Scaling* im BIOS und Kernel abgeschaltet werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Boost-Funktionen und Über-taktungsmaßnahmen dauerhaft zu aktivieren. Für sehr geringe Latenzzeiten besteht die Möglichkeit der Isolierung von Kernen. Für diese Arbeit wird evaluiert, ob der Ursprungs-Kernel (Vanilla-Version) als Variante ausreicht, um die geringe Latenzanforderung von  $f_{KRC4} = 250 \text{ Hz}$  zu realisieren. Das System wird aufgrund mangelnder Peripherie mit einem Switch der Firma *Netgear* (GS108PE) in das Gesamtsystem eingebunden. Dies hat den Vorteil, dass die Farbkamera zur Schweißbettverfolgung mittels Power over Ethernet (POE) direkt versorgt wird. Nachteilig ist die notwendige Verwendung des Kommunikationsprotokolls GigE. Dies erhöht die Last, welche auf der Peripherie des RTOS anliegt, maßgeblich.

#### 3.3.1 Validierung des zeitlichen Verhaltens

Für die Validierung des Testsystems werden vorgefertigte Skripte der *Linux-Foundation* genutzt. Die Installation der notwendigen Pakete und Dienste sowie das Ausführen erfolgt über die Kommandozeile. Die Linux-Foundation stellt eine Vielzahl an Testmöglichkeiten mit dem Test-Paket *rt-tests* zur Verfügung. Unter anderem ist die Funktion *cyclictest* für eine Aussage geeignet. Diese misst die zeitliche Differenz zwischen der geplanten Auf-wachzeit und der tatsächlichen eines Threads. Die Funktion an sich erzeugt bei einem zyklischen Aufruf eines Threads pro Kern eine Auslastung von einem Prozent. Um dau-erhaft die Worst-Case-Latenz feststellen zu können, wird empfohlen, die Messung über einen langen Zeitraum durchzuführen. Nebenbei sollten alle Aktionen ausgeführt werden, die das System zu erwarten hat oder es muss eine erhöhte Auslastung simuliert werden. Die Auslastung wurde über die Verwendung von File-Transfers und Updates generiert. Die Messung verlief über einen Zeitraum von drei Stunden. Das Resultat ist eine Worst-Case-Latenz von  $t_{wc} = 160 \mu\text{s}$ . Diese liegt deutlich unter der geforderten Latenzzeit  $t_{krit} = 4 \text{ ms}$ . Damit ist belegt, dass das System grundsätzlich die Anforderungen erfüllt.

Für die Validierung werden die ausgehenden und eingehenden Pakete gemessen. Dies wird durch die Verwendung einer Port-Mirrors erreicht, der den Datenverkehr an der physikalischen Verbindungsleitung zur KRC4 auf einen anderen, frei wählbaren Port

spiegelt. Mittels des Programms *Wireshark* sind die Datenpakete anschließend aufgenommen und ausgelesen worden. Abbildung 3.7 zeigt die Messung über einen Zeitraum von  $t_{Messung} = 50\text{ s}$ . Die längste Latenzzeit beträgt  $t_{wc} = 2,2\text{ ms}$ . Die durchschnittliche Latenzzeit beträgt  $t_{mean} = 0,6\text{ ms}$ . Damit ist belegt, dass das RTOS der harten Echtzeit gerecht wird und die KRC4-Schnittstelle bedienen kann. Eine Verbesserung der Latenzzeiten kann durch erhöhte Priorisierung und Tuning des RTOS erfolgen. Das Ein-

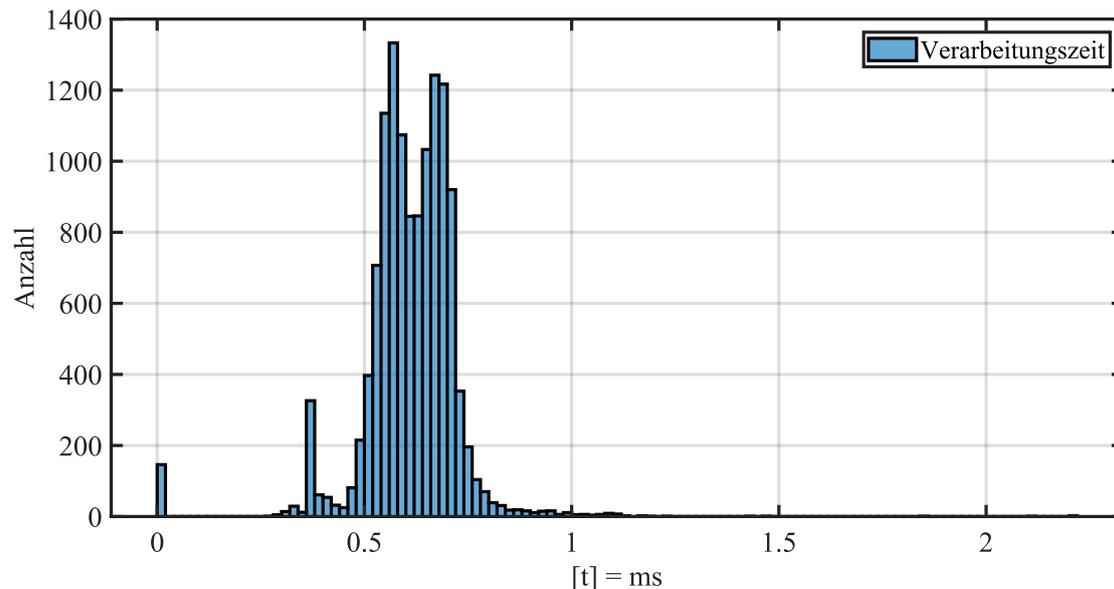


Abbildung 3.7: Darstellung der Beantwortungszeiten des UDP-Telegramms gemessen an der Ethernet Schnittstelle

binden eines solchen Systems ermöglicht eine Erweiterung des Funktionsumfangs ohne Performance-Verlust. Als zentrale Steuereinheit dient das BV-System. Über eine externe GUI sollen grundlegende Funktionen auf dem RTOS angesteuert und ausgeführt werden.

#### 3.3.2 Interface-Aufbau

Die Bedienung des RTOS erfolgt bei gestartetem Programm-Code über die Benutzeroberfläche (Abbildung 3.8). ① ermöglicht das Einstellen von zwei grundlegenden Parametern: Auflichtzeit (Exposuretime) und Verstärkung (Gain). Die Exposuretime beschreibt, wie lang die Belichtungszeit des Kamerasensors ist, welcher die Anpassung auf die Umgebungshelligkeit ermöglicht. Bei extrem hohen Helligkeiten, wie z. B. bei einem

Lichtbogen, ist eine möglichst geringe Exposuretime zu wählen, damit der Sensor nicht überbelichtet wird. Die Exposuretime wird in  $[t] = ms$  angegeben. Der Gain bestimmt, wie stark die Anzahl an eintreffenden Photonen mit dem Gainfaktor  $K$  verstärkt wird. Hierdurch ist eine Kontrast- und Bildverbesserung möglich. Bei einem hoch gewählten Gain kommt es zur nachträglichen Überbelichtung der Pixel. Bei einer Pixelauflösung von 8 Bit entspricht Weiß dem maximalen Wert von 255. Wird dieser Wert durch die Verstärkung überschritten, erscheint das angezeigte Bild vollständig in weißer Farbe. Die Erstellung einer Verbindung zur KRC4 ② erfolgt über das Bestätigen der Ankreuzbox (checkbox) RSI. Dadurch wird der Port für die Verbindung geöffnet. Über die Anzeige *fps-rsi* wird die Kommunikationsgeschwindigkeit zusätzlich visualisiert. Standardmäßig erfolgt die Prädiktion des Kalman-Filters mit jedem eintreffenden Telegramm der KRC4. Bei dem Ankreuzen *local\_KF* startet ein Timer, der die Prädiktion mit  $t_{timer} = 4 ms$  auslöst. Die berechneten Werte des Kalman-Filters werden anschließend in ③ angezeigt. Zusätzlich ist eine Aufnahme aller eingehenden und ausgehenden Daten möglich. Für die Dauer der Betätigung von *save\_Data* wird ein Textstream geöffnet, der im CSV-Format die Daten abspeichert.

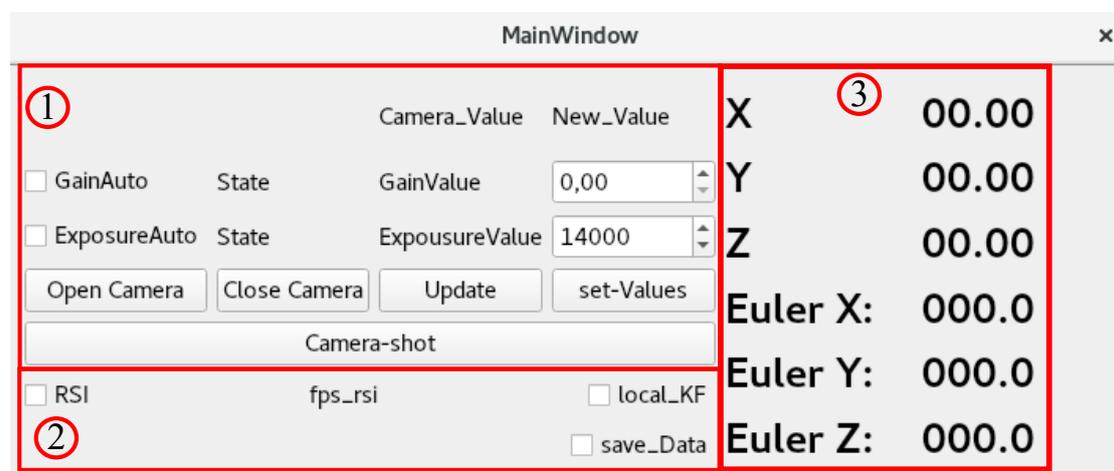


Abbildung 3.8: Das RTOS-Interfaces ermöglicht das Erstellen einer Verbindung zur KRC4, das Speichern aller eingehenden und abgehenden Daten sowie grundlegende Einstellungen der Schweißbettbeobachtung

### 3.4 Sensor Interface

Nachdem die notwendigen Funktion des Sensorsystems zur Bewegungsverfolgung des Handbrenners und der Sicherstellung einer deterministischen Abarbeitung von Anfragen erfolgte, ist weitere Sensorik für das Schweißen einer Naht oder eines Musters nötig. Dazu zählt Sensorik für die Erfassung von Eingaben des Benutzers, die Nutzung der *KUKA-IO-Schnittstelle* und des zweidimensionalen-Laserscanners. Darüber hinaus ist eine Anpassung des Sensor-Interface aus [28] zur Steuerung des Systems notwendig. Diese Änderungen sind in Abbildung 3.9 dargestellt. ④ dient der Wiederherstellung der TCP/IP-Verbindung zum RTOS, ohne das Programm neu starten zu müssen. Die Kommunikation zu dem Laser wird über die Ankreuz-Box in ① gestartet. Durch die Schaltfläche *Kalibrierung* wird der TCP des Handbrenners bestimmt und zu einem Marker referenziert. Eine Ausführliche Beschreibung des Algorithmus erfolgt in 3.6.2. Die Ebenen-Referenzierung (Kapitel 3.6) wird durch ein Betätigen der Schaltfläche in ⑥ gestartet. Die Bedienflächen (②) dienen zur Ansteuerung der Stromquelle. Hierfür ist eine Kombination von unterschiedlichen Signalerfassungssystemen in Form von digitalen Ein- und Ausgängen realisiert worden.

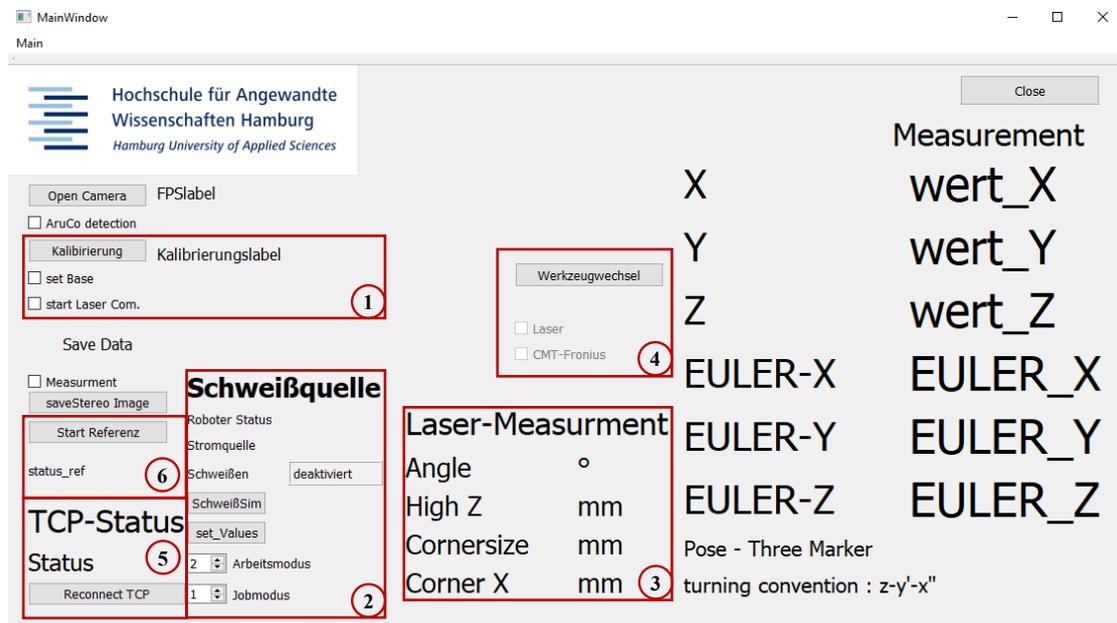


Abbildung 3.9: Erweitertes Sensor-Interface zur Ansteuerung des Gesamtsystems

### 3.4.1 I/O Schnittstellen

Die Erfassung, ob die Fachkraft den Stromkreis schließt und mit dem Schweißprozess beginnt, wird über einen Taster am Handbrenner realisiert. Der Handbrenner stellt, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, das Eingabegerät für das Sensorsystem dar. Damit die Umstellung einer geschulten Fachkraft möglichst gering gehalten wird, soll dieses Eingabegerät ein reales Handbrennerstück samt Schlauchpaket sein. Das Schlauchpaket besteht aus der Gaszuleitung, den elektrischen Leitern und dem Schweißdraht. Das Signal des Tasters wird am Ende des Schlauchpaketes abgegriffen. Die digitale Auswertung erfolgt über eine USB-Mini-I/O-Box (*Redlab1024LS*) der Firma *Meilhaus Electronic*. Diese Box verfügt über 24 digitale Ein- oder Ausgänge (vgl. Abbildung 3.10). Das Auslesen und Setzen der einzelnen Ports erfolgt durch Abfrage (Polling). Die Einbindung der USB-Box

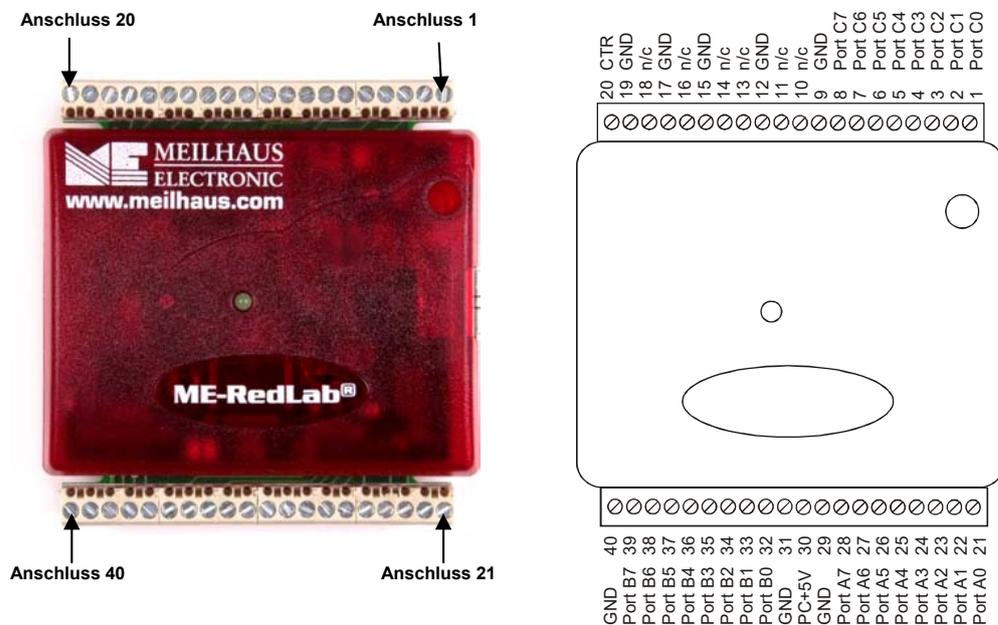


Abbildung 3.10: D-I/O-Box mit 24 schaltbaren Ports. Versorgungsspannung 24 V mit maximal 60 mA Ausgangsstrom pro Port. [17, S.13ff]

im System erfolgt als HID (Human Interface Device). Zusätzlich werden mehrere Bibliotheken mitgeliefert, die die Ansteuerung sicherstellen. Da die Ports nicht über einen internen PullUp/PullDown-Widerstand verfügen, muss dies bei der Beschaltung beachtet werden. Die Betätigung des Tasters wird in ② visualisiert und über die Datenverbindung an das RTOS übermittelt. Auf eine Anbindung über die I/O-Schnittstelle von *KUKA* wurde bewusst verzichtet, da das Sensorsystem nicht ortsgebunden durch den Stand-

ort des Manipulators sein soll. Das XML-Format ermöglicht den plattformunabhängigen Austausch von Daten. Datentypen wie Bool, Double oder Integer werden in einen String umgewandelt. Ein Telegramm besteht aus genau einem Wurzelement. Diesem Wurzelement können einzelne Unterelemente mit jeweiligen Kinderelementen angehängt werden. Sender und Empfänger senden nicht zwangsläufig die gleiche XML-Datei. Dies muss im jeweiligen System berücksichtigt werden. Abbildung 3.11 zeigt beispielhaft einer Nachricht vom BV-System zum RTOS. Es enthält ungefilterte Messwerte des Sensorsystems, Steuerwerte für die Schweißanlage (Job- und Workingmode bieten Voreinstellungen, Start beschreibt den Status des Tasters am Brenner und Sim ermöglicht ein Abfahren und Betätigen des Brenners, ohne dass der Schweißprozess gestartet wird) und boolsche Übergabewerte.

```
<Sen Type="RT">  
<translation X="0.00" Y="0.00" Z="0.00" />  
<rot_real A="0.00" B="0.00" C="0.00" />  
<rot_imag A="0.00" B="0.00" C="0.00" />  
<laser_ref X="0.00" Y="0.00" Z="0.00" A="0.00" B="0.00" C="0.00" />  
<welding jobmode = "0" start = "0" sim = "0" workmode = "0" />  
<handover tool = "0" robot_control = "0" tool_change = "0" set_lvl = "0" />  
</Sen>
```

Abbildung 3.11: Struktur des XML-Formates. Rot markiert das Wurzelement, in Grün sind die Unterelemente und in Blau die Kinder gekennzeichnet.

#### 3.4.2 Zweidimensionaler Laserscanner

Für die Referenzierung der Sensorsystemebene zur Schweißebene ist in einem ersten Schritt die Vermessung letzterer nötig. Diese muss in Lage und Abstand zum Manipulator vermessen werden. Mithilfe eines markanten Objekts sollen die parallel zur Ebene gerichteten Achsen des Endeffektors sich entlang der durch das Objekt definierten Achsen der Ebene ausrichten. Anschließend kann ein Koordinatensystem aufgespannt werden, dessen Raumachsen in die gleiche Richtung weisen, die vom Sensorsystem festgelegt ist. Gerade in Bezug auf den zweiten Punkt eignen sich reine Laser-Abstandsmessgeräte weniger, da durch die Messung eines Punktes mehrere Messungen notwendig sind. Als Lösung wird ein 2D-Laserscanner (Typ:*scanCONTROL 2610-25*) der Firma *microEpsilon* verwendet. Über eine Linienoptik wird eine Laserlinie auf das zu vermessende Objekt projiziert. Das diffus reflektierte Licht dieser Laserlinie wird über eine hochwertige Optik auf einer Sensor-Matrix abgebildet und zweidimensional ausgewertet [18]. Dadurch lassen sich neben Winkel und Entfernung auch eindeutige Strukturen erkennen.

Der genutzte Laser-Scanner wird per Ethernet-Schnittstelle angesteuert sowie ausgelesen und benötigt keine weitere Auswerteeinheit. Über die von der Firma *microEpsilon* bereitgestellten Softwaretools können verschiedene Profilauswertungen konfiguriert werden (vgl. Abbildung 3.12). In Bezug auf die Anforderungen sind wichtige, zu messende Größen der Abstand zur Ebene, Winkel, Kantendetektion und Kantenhöhe. Als Referenzierungsobjekt wird ein rechter Winkel verwendet, entlang welchem die Achsen des Roboters sich ausrichten sollen. Die Weitergabe der Messungen erfolgt anschließend über die Protokolle Modbus oder UDP. Eine Schnittstelle für den Anschluss an einer SPS ist ebenfalls vorgesehen und kann über die Output-Unit konfiguriert werden. Dies würde den Anschluss des Sensors von zwei auf eine Datenleitung verringern. Auf der linken Seite der Abbildung 3.13 können Einstellungen bezüglich der Schnittstelle getroffen werden. Die hier gewählte Variante ist eine UDP-Verbindung mit einem speziellen Port und einer festen IP-Adresse. Um Verwechslungen mit nicht systemrelevanten Teilnehmern zu vermeiden, wird der Adressbereich *172.31.2.xxx*, welcher durch die *KUKA*-Steuerung vorinitialisiert ist, für alle angeschlossenen Geräte übernommen. Das rechte Auswahlfenster ermöglicht die Variation der Anordnung innerhalb des Telegramms. Hier können Einstellungen wie Trennzeichen und Codierung festgelegt werden. Das Übersenden von Fehler-Codes ermöglicht ein systematisches Abfragen, ob die jeweilige Messung gerade einen nutzbaren Wert liefert. Auf Rechner-Seite wird der Text-Stream in seine Segmente aufgespalten und typspezifisch in eine Gleitkommadarstellung konvertiert. Diese Werte werden neben

### 3 Konzept und Integration

der Abfrage im Programmcode auch in dem Bereich ③ in Abbildung 3.9 dargestellt.

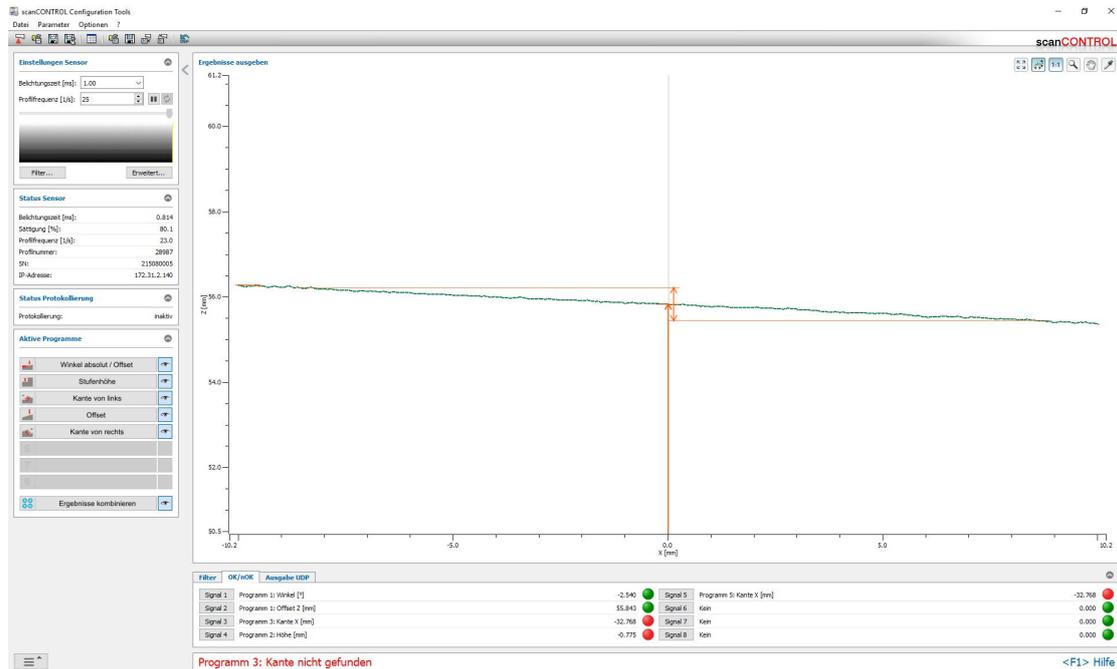


Abbildung 3.12: Darstellung der von *microEpsilon* bereitgestellten Interfaces zum Programmieren des Sensors

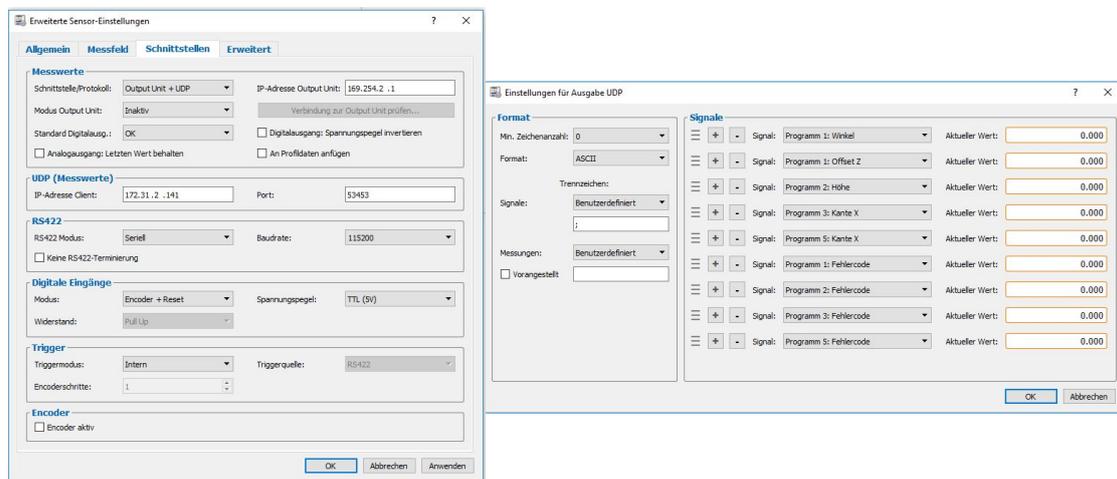


Abbildung 3.13: Optionsmenü für die Einrichtung der Schnittstelle: links: Einstellungen bezüglich der verwendeten Schnittstelle, rechts: Auflistung und Codierung des UDP-Pakets

Die Anbringung des Lasers erfolgt infolge von Testzwecken getrennt von dem Schweiß-

brenner. Die Verbindung zu dem *KUKA*-Flansch ist über ein pneumatisch betriebenes Werkzeug-Wechsel-System realisiert. Dies ermöglicht den schnellen Werkzeugwechsel am stehenden Manipulator. Der Mittelpunkt der projizierten Laserlinie liegt in der Hochachse der Halterung. Es wurde weiterhin auf genügend Abstand zum Manipulator geachtet, sodass die notwendige Verkabelung möglich ist. Der untere Überstand der Halterung soll die empfindliche Optik vor äußeren Einflüssen schützen (vgl. Abbildung 3.14).

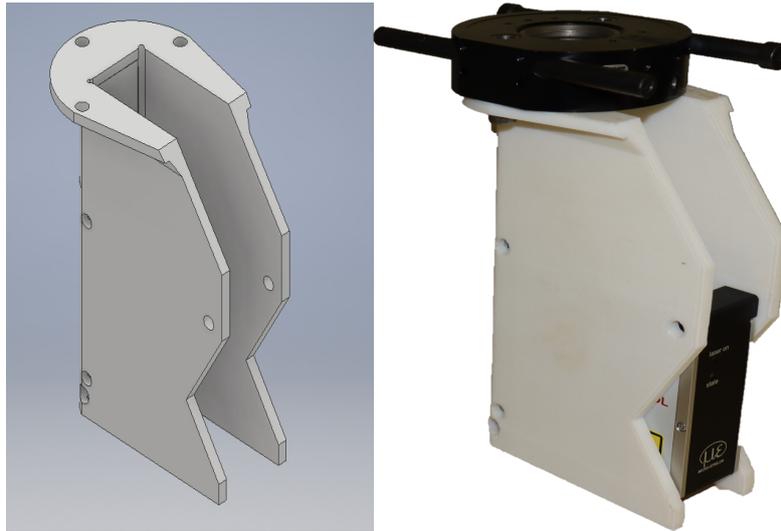


Abbildung 3.14: Laserscanner-Halterung: links: CAD-Zeichnung der Laser-Halterung  
rechts: Mit dem FDM-Verfahren hergestellte Halterung mit Werkzeug-  
halter und Scanner

#### 3.4.3 Sensorsystem

Für die Stereoskopie ist der Abstand zwischen den beiden Kameras von entscheidender Bedeutung. Erst durch dieses Wissen kann die Information über die Tiefe aus zwei Bildern berechnet werden. Um eine Kalibrierung bei jedem Systemstart zu vermeiden, wird das System mit einem starren Aufbau realisiert. In einem definierten Abstand befindet sich die Arbeitsfläche des Systems. Das visuelle Feedback wird durch einen Bildschirm an den Benutzer weitergegeben. Die Ansteuerung erfolgt dabei über das RTOS-System. Mann kann deutlich als Eingabegerät den Handbrenner mit dem angebrachten Aruco-Marker erkennen. Das Schlauchpaket ist über ein Kupplungsstück fest mit dem System verbunden. Der Arbeitsraum ist durch die Neigung der Kameras und deren Montagehöhe abhängig. Bei dem vorhandenem Aufbau beträgt der Arbeitsraum 60 cm x 40 cm x 25 cm.

Um Reflexionen in der Kunststoffscheibe zu vermeiden, ist die Oberfläche mit einer Folie mattiert worden. Sämtliche Spiegelungen werden durch die matte Oberfläche diffus in alle Raumrichtungen abgestrahlt. Die Erfassung der Marker ist nun fehlerfrei gewährleistet.

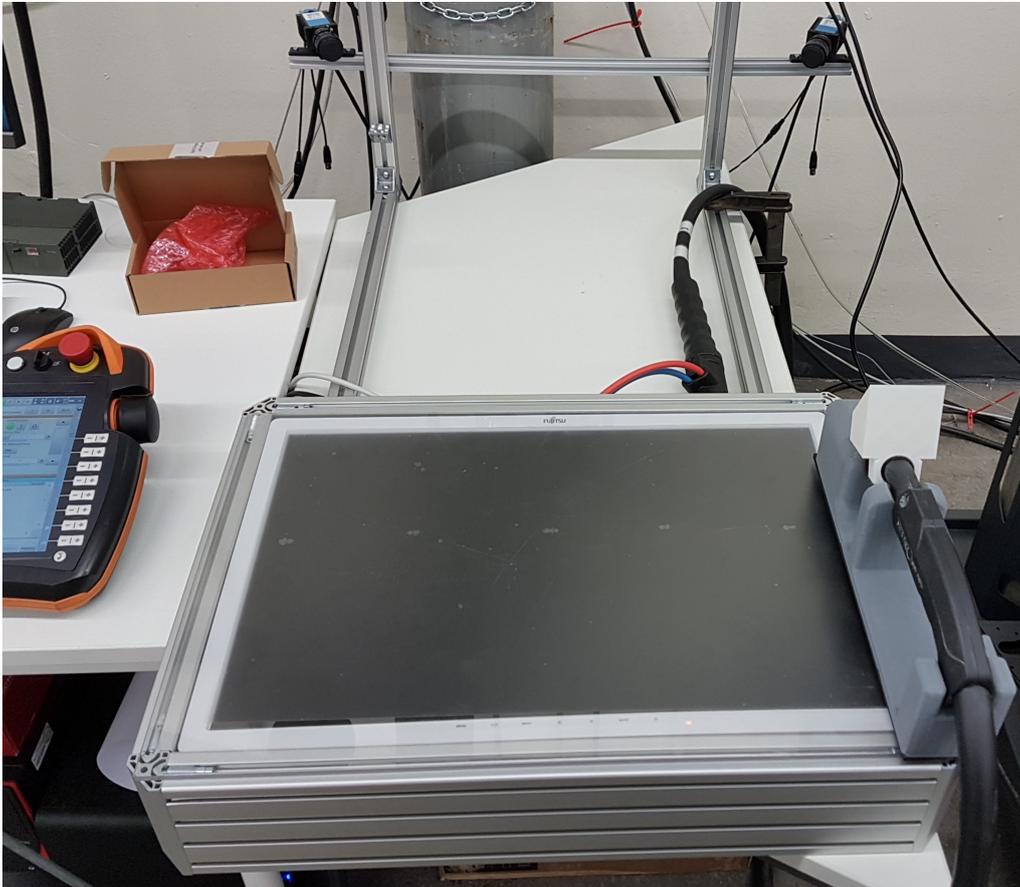


Abbildung 3.15: Aufbau des Sensorsystems mit visuellem Feedback, Brennerhalterung und steifem Kameraaufbau

### 3.5 Signalverarbeitung

Die Prädiktion der Messwerte des Sensorsystems erfolgt über einen Kalman-Filter zweiter Ordnung. Dabei wird für das Systemmodell des Kalman-Filters die Bewegungsgleichung erster Ordnung genutzt. Gleichung 3.1 zeigt die diskretisierte Systemmatrix.  $\Delta t$  beschreibt das Zeitintervall  $\Delta t = 4 \text{ ms}$ . Als Signal für die Korrektur dient die Position des bewegten Objekts. Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, werden jede translatorische Achse und die Imaginär- und Realanteile der Winkel mit je einem Kalman-Filter prädiziert.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Die in Kapitel 3.1 vorgestellte Abbildung 3.2 zeigt auf, dass die Kalman-Filterung in Bereichen mit stetiger Geschwindigkeit das Messsignal hinreichend genau prädizieren kann. In Umkehrpunkten bildet der Kalman-Filter eine Sägezahnstruktur. Dem Modell fehlt die Information über die Beschleunigung, um sich den Messungen möglichst zeitnah anzupassen. Dies führt am Manipulator in Umkehrpunkten zu wahrnehmbaren

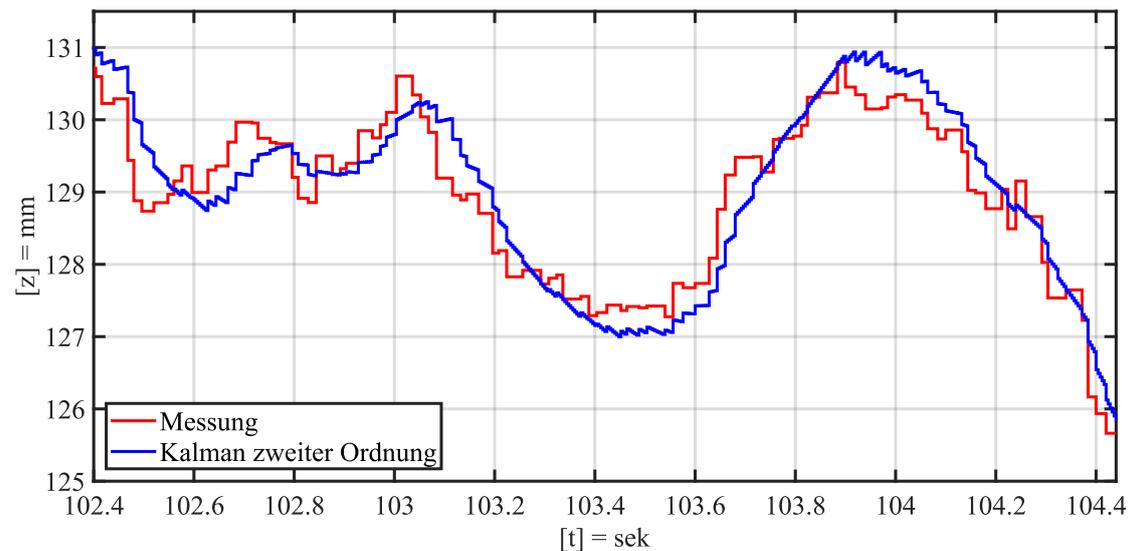


Abbildung 3.16: Prädiktion (blau) des Messsignales (rot) durch Kalman-Filter zweiter Ordnung

Vibrationen. Durch eine Filterung der Werte mit einem Tiefpass würde das Sägezahnverhalten begrenzt werden. Das würde aber zu einer erhöhten Phasenverschiebung führen. Weiterführend bleibt das Problem der Abweichung zur eigentlichen Messung bestehen.

Die Erweiterung der Systemmatrix um eine Ordnung führt zu einer Verbesserung der Prädiktion, insbesondere in den Umkehrpunkten des Messung. Die Systemmatrix ergibt sich nach Diskretisierung der Bewegungsgleichung dritter Ordnung zu Gleichung 3.2. Die Elemente der Prozess- und Rauschmatrix sind durch Simulation empirisch ermittelt worden.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Durch die Erweiterung der Systemordnung wird in Bereichen nahezu konstanter Geschwindigkeit die Prädiktion in Bezug auf die Phase verbessert (vgl. Abbildung 3.17). Zusätzlich werden die prädizierten Werte stärker durch die Messung korrigiert. Schlechter gegenüber dem Verhalten des Kalman-Filters zweiter Ordnung ist die starke Abweichung bei nahezu gleichbleibender Geschwindigkeit. Es werden zwar die Beschleunigung und die Geschwindigkeit mit dem korrekten Vorzeichen prädiziert, allerdings schwingen diese über. Eine Dämpfung des Überschwingens konnte durch Veränderung der Kreuzkopplungsterme in  $Q$  nicht zielführend erreicht werden. Das Ziel, die Prädiktion in den Umkehrpunkten stärker dem Verlauf anzugleichen, ist erreicht. Dieses gefilterte Signal weist

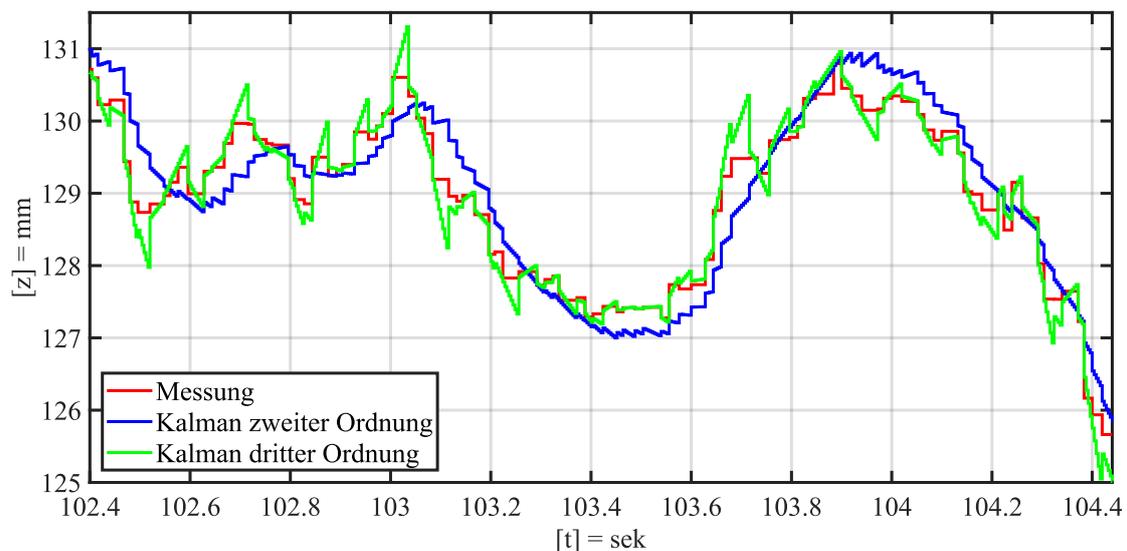


Abbildung 3.17: Prädiktion (blau) des Messsignals (rot) durch Kalman-Filter zweiter Ordnung und dritter Ordnung (grün)

ebenfalls eine Sägezahnstruktur auf und eignet sich dadurch nur bedingt für die Ansteuerung des Manipulators. Eine ideale Prädiktion soll das Quantisierungsrauschen und die darin enthaltenen Frequenzen möglichst minimieren und ein zweifach differenzierbares,

kontinuierliches Signal ermöglichen. Das PT-2-Glied ermöglicht dies durch die zweifache Integration. Hohe Frequenzen werden über die Dämpfung des PT-2-Gliedes herausgefiltert. Um die Phasenverschiebung des Signals gering zu halten, wird die Geschwindigkeit zwischen zwei Positionsaktualisierungen ermittelt und als Korrekturgröße aufgeschaltet. Die Gleichungen 3.3-3.6 beschreiben das System aus Abbildung 3.18.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ \frac{d}{dt} \{X\} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= k_1 \cdot u_1 + k_3 \cdot (u_2 - x_2) - k_2 \cdot x_2 - k_1 \cdot y \\ \Rightarrow \dot{x}_2 &= V \cdot u_1 + k_3 \cdot u_2 - (k_3 + k_2) \cdot x_2 - k_1 \cdot y \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$y = x_1 \quad (3.6)$$

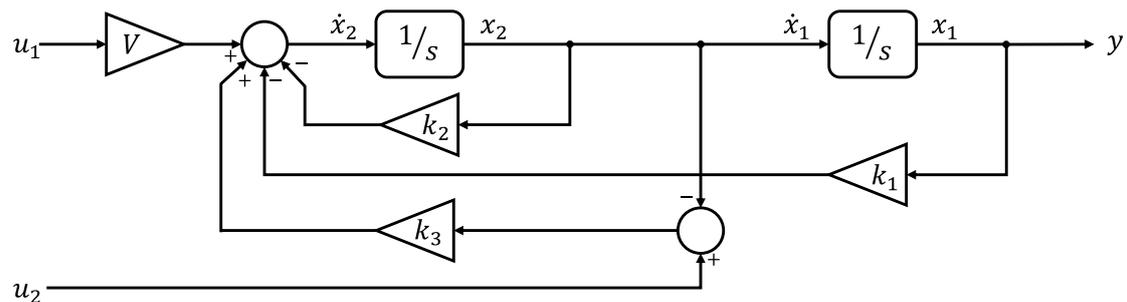


Abbildung 3.18: Signalflussdiagramm des PT-2-Gliedes mit Korrekturaufschaltung

Auf Grundlage der Sprungantwort des Eingangs  $u_1$  zu  $y$  wird für stationäre Genauigkeit der Vorfilter  $V$  zu  $V = k_1$  gewählt. Die Werte von  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  werden empirisch ermittelt. Durch Diskretisierung der Integratoren mittels der *Tustin-Formel* (auch *Trapez-Formel* genannt) können die Gleichungen 3.3-3.6 direkt angewendet werden. Dies ermöglicht eine große Portabilität der Verstärkungen aus dem simulierten, linearen, zeitinvarianten in das diskretisierte System. Abbildung 3.19 stellt das Verhalten des PT-2-Gliedes auf die Messsignale dar. Das Sägezahnverhalten ist erfolgreich unterdrückt worden. Die prädizierte Kurve liegt nahe der Messkurve des Sensorsystems. Es ist allerdings zu erkennen, dass die Prädiktion dem System nacheilt und in nur wenigen Punkten tatsächlich vorausprädiziert. Die Verschiebung beträgt bei schnellen Änderungen maximal  $t \approx 10 \text{ ms}$ . Bei geringen Änderungen ist keine Phasenverschiebung zu ermitteln. Über

den Vergleich mit den Ist-Werten der Manipulator-Pose (vgl. Abbildung 3.20) ist festgestellt worden, dass der Manipulator die vorgegebene Pose mit einer Zeitverzögerung von  $t \approx 100 \text{ ms}$  erreicht.

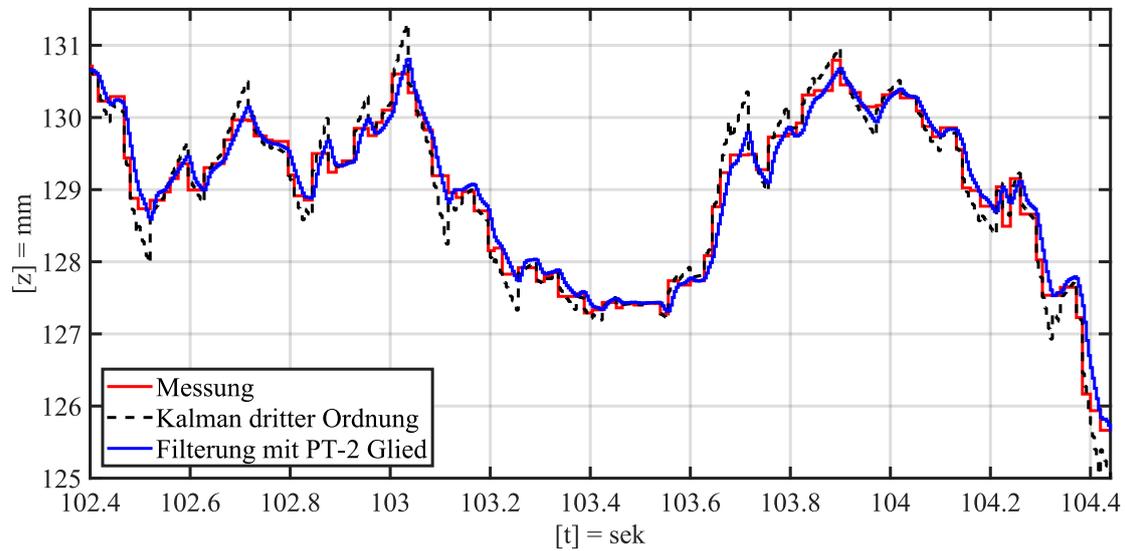


Abbildung 3.19: Realisierung einer idealen Prädiktion mittels Kalman- und PT-2-Filterung

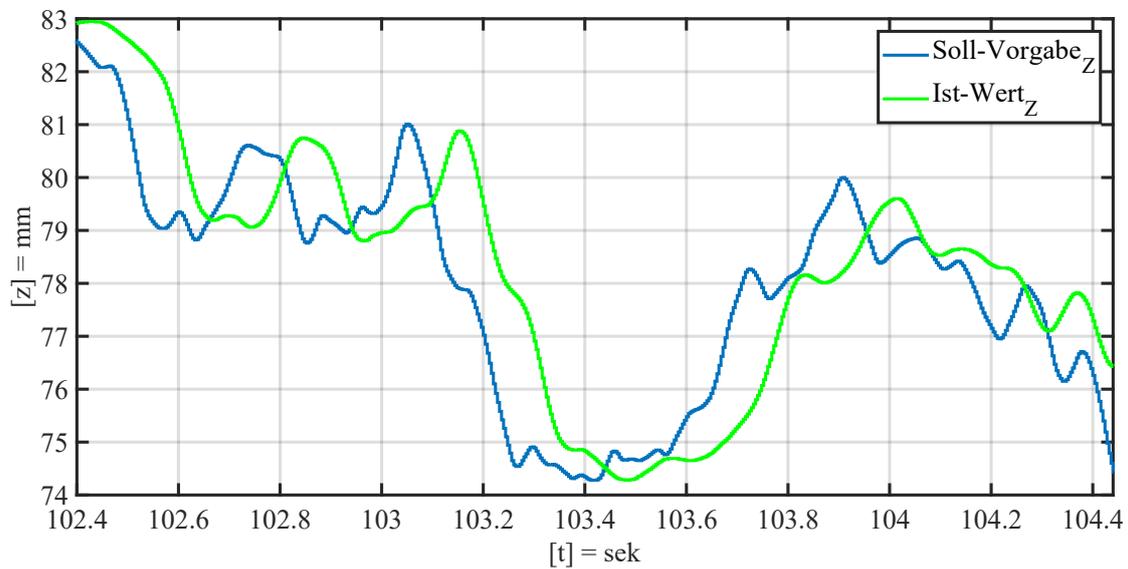


Abbildung 3.20: Vergleich des Soll-Wertes durch das Messsystem zu dem Ist-Wert der Manipulator-Pose

Diese Phasenverschiebung hat allerdings keinen spürbaren Einfluss auf das Gesamtsystem. Die Abweichung in der Ordinatenbeschriftung hat seine Ursache in der Koordinatentransformation. Durch die Verwendung unterschiedlicher Tools erfolgt die Berechnung der KUKA-Flanschstellung vor der Weitergabe der Daten. Diese Flansch-Pose wird ebenfalls als Rückgabewert empfangen. Aufgrund der hohen Dynamik des Messsystems und der Prädiktion werden die Soll-Werte mit einem PT-1 gefiltert. Dadurch werden hohe Frequenzen und scharfe Bewegungsabläufe unterdrückt, was wiederum zu einem flüssigeren Bewegungsablauf auf Seiten des Manipulators führt. Es ist zu erkennen, dass bei dynamischen Bewegungsabläufen die Endpositionen (vgl. Abbildung 3.20 bei Sekunde 103.2) des Manipulators nicht ganz den vorgeschriebenen Soll-Wert erreicht. Diese Ursache liegt einerseits in der Ausführungszeit, andererseits in einer KUKA-internen Filterung der RSI-Signale.

### 3.6 Ebenenreferenzierung

Die Referenzierung der Ebenen vom Sensorsystem und der Arbeitsebene zum Schweißgerät muss für eine detailgetreue Nachbildung der Brennerbewegung abgeglichen werden. Für die Erfassung der Arbeitsebene wird der in Kapitel 3.4.2 vorgestellte Laserscanner der Firma *MicroEpsilon* mit den definierten Einstellungen verwendet. Die Referenzierung soll mithilfe des in Abbildung 3.21 dargestellten Zustandsdiagramms erfolgen. Die Rotation um die Achsen  $A \equiv R_{(Z)}$  und  $B \equiv R_{(Y)}$  ist durch die Arbeitsebene vorgegeben und wird mit dem Laser im *III.* Schritt bestimmt. Anschließend erfolgt nach der Kantendetektion die Bestimmung der Orientierung der Hochachse und deren Ausrichtung (Schritt *VI.*)  $C \equiv R_{(X)}$ . Für die Bestimmung eines definierten Nullpunktes wird die Z-Achse

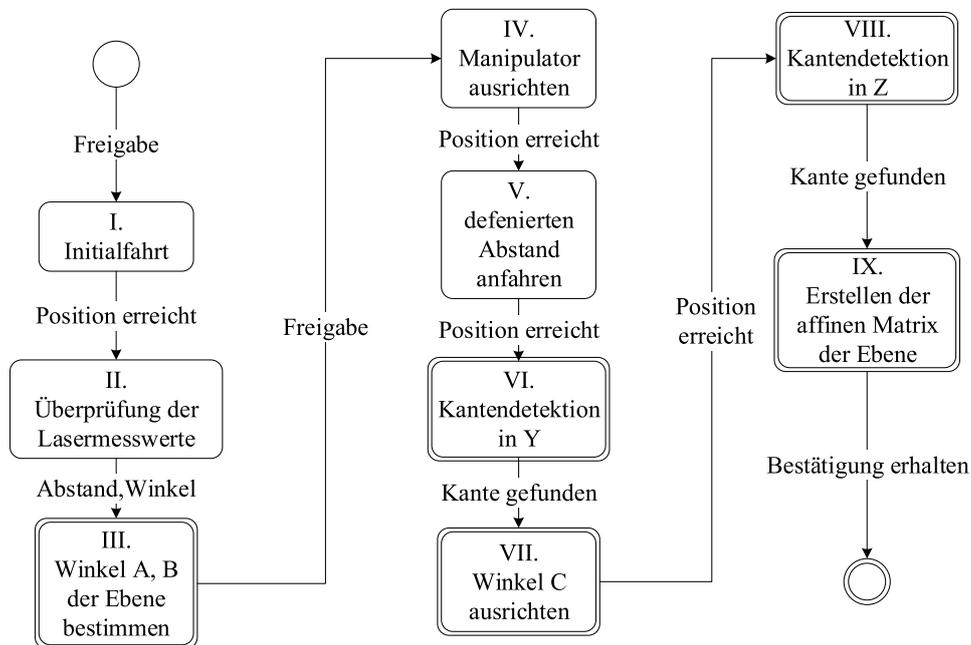


Abbildung 3.21: Zustandsdiagramm der Ebenenreferenzierung

ebenfalls referenziert (Schritt *VIII.*). Anschließend wird auf Grundlage der aktuellen Pose des TCP eine affine Matrix gebildet. Dies dient der Nullpunktbestimmung innerhalb der Arbeitsebene. Die Verwendung des *IPO-Fast-Modes* des RSI-Moduls schreibt die Nutzung des Basiskoordinatensystems vor. Deshalb ist eine Umrechnung des erstellten Ebenenkoordinatensystems zu dem Basis-Koordinatensystem des KUKAs nötig (vgl. Gleichung 3.7). Die Berechnung erfolgt analog zu Kapitel 2.4 in homogenen Koordinaten.

${}^B\mathbf{T}_E$  überführt das Koordinatensystem B in das Koordinatensystem E.

$${}^B\text{Pose} = {}^B\mathbf{T}_E \cdot {}^E\text{Pose} \quad (3.7)$$

Für die Anwendung verschiedener Werkzeuge (z.B. Laserscanner, Schweißbrenner, Bürste u.a.) ist es notwendig, die Abmaße der einzelnen Tools in Hinblick auf die Entfernung und Ausrichtung zum Werkzeughalter zu kennen. Objekte, bei denen die geometrischen Abmaße mit technischen Zeichnung vorliegen, können leicht eingebunden werden. Bei größeren Konstruktionen wie dem Schweißbrenner liegen diese Zeichnungen oft nicht vor, weshalb sich eine *KUKA-XYZ-4-Punkt-Vermessungsmethode* anbietet, welche den TCP in Bezug auf das gewählte Basis-Koordinatensystem bestimmt [13]. Hierzu wird der TCP des Werkzeuges aus vier unterschiedlichen Posen zu einem definierten Punkt angefahren. Nachfolgend berechnet die verwendete Steuerungseinheit die translatorische Verschiebung von der Basis zu dem TCP des Werkzeugs. Der für die Referenzierung benötigte Punkt wird durch eine Prüfspitze festgelegt. Anschließend muss noch die Orientierung angegeben werden. Dies kann ebenfalls mittels einer Messmethode von KUKA realisiert oder händisch eingetragen werden. Für den Erfolg dieser Messung ist ein vorangehender Abgleich der Encoder-Nullstellen der Aktoren mit der Position des mechanischen Arms durch eine Kalibrierung der Manipulator-Achsen zu empfehlen. Sollten hier Differenzen über den Verlauf der Zeit entstanden sein, kann dies zu schwerwiegenden Folgefehlern im Abfahren von Steuerbefehlen oder Anfahren von Posen kommen.

### 3.6.1 Werkzeugverwendung

Für diese Arbeit werden explizit der Schweißbrenner der Firma *Fronius* und der Laserscanner als Werkzeug eingemessen. Die Abmaße des Schweißbrenners werden mit besagter XYZ-4-Punktmethode berechnet: die des Laserscanners über die geometrischen Abmaße des Halters und des Lasers. Der TCP für die beiden Werkzeuge befindet sich jeweils in der Drahtspitze des Schweißbrenners bzw. in der Optik für den Laserstrahlen-Ausgang.

Wie in Kapitel 2.5 erwähnt, wird von dem stereoskopischen Sensorsystem eine Pose vorgegeben, die dem TCP des Werkzeugs entsprechen soll. Durch den nicht möglichen Wechsel der Werkzeugsysteme über das RSI-Modul wird der TCP des *KUKA*-Systems in die Verbindungsebene des Werkzeughalters gelegt. Die Koordinatentransformation von dem realen TCP des jeweiligen Tools zu besagten TCP von *KUKA* (in folgendem *KUKA*-Pose genannt) wird auf dem RTOS mathematisch durchgeführt.

Die Bewegung des TCP aus dem Sensorsystem wird durch Gleichung 3.7 in dem Koordinatensystem der Arbeitsebene durchgeführt. Anschließend muss von dem vorgegebenen TCP in der Arbeitsebene zur *KUKA*-Basis zurückgerechnet werden, damit der Manipulator die korrekte Position anfahren kann (vgl. Abbildung 3.22). Durch den Werkzeugwechsel innerhalb der GUI (vgl. Abbildung 3.9) wird die zu verwendende Trans-

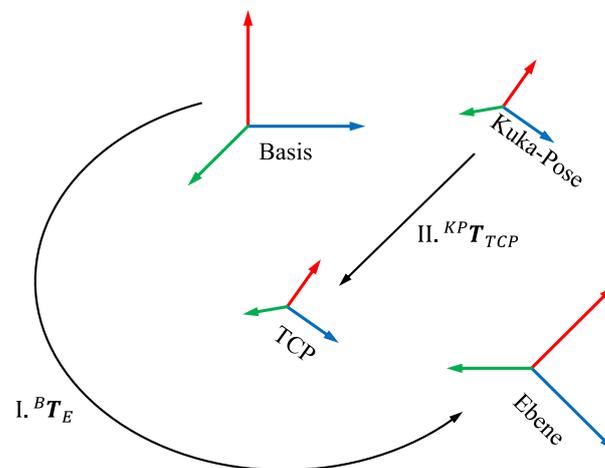


Abbildung 3.22: Zuerst wird die Position des TCP aus dem Koordinatensystem der Ebene in das Basis-Koordinatensystem des Manipulators transformiert. Anschließend erfolgt die Transformation vom TCP zur KUKA-Pose.

formationsmatrix  ${}^{KP}\mathbf{T}_{TCP}$  angegeben. Die Transformation vom TCP zur *KUKA*-Pose erfolgt über Gleichung 3.8. Zusammengefasst wird die *KUKA*-Pose durch Gleichung 3.9 bestimmt. Die Transformation der Koordinaten erfolgt im Anschluss an die Filterung der Übergabewerte.

$${}^B Kuka-Pose = {}^B Pose \cdot {}^{KP}\mathbf{T}_{TCP} \quad (3.8)$$

$${}^B Kuka-Pose = ({}^B\mathbf{T}_E \cdot {}^E Pose) \cdot {}^{KP}\mathbf{T}_{TCP} \quad (3.9)$$

#### 3.6.2 Werkzeughalter

Das stereoskopische System liefert die Position einer Pose. Durch das Speichern der Basis wird die aktuelle Pose im Koordinatensystem der Basispose berechnet. Die Pose wird durch die Verwendung von Aruco-Markern vom System erfasst. Ziel ist es in Abhängigkeit von einem solchen Marker, einen stereoskopisch nicht erfassbaren Punkt zu ermitteln und dessen Pose an das RTOS und damit an die KRC4 weiterzugeben.

Hierfür ist eine Konstruktion erforderlich, in der die Referenzierung des gesuchten Punktes zum Marker erfolgt. Das zu benutzende Eingabegerät wird durch einen Handbrenner für das MAG-Schweißen realisiert. Der zu erfassende Punkt samt Orientierung ist die Spitze des Drahtes dieses Brenners. Der Marker zur Posen-Bestimmung ist am Brennerhals befestigt. Damit der Benutzer nicht durch den Aufbau des Markers eingeschränkt wird, soll der Marker vor der Referenzierung frei dreh- und verschiebbar sein. Die Anforderung besteht folglich aus einer Halterung, die den Brenner in einer definierten Position hält. Diese Position muss mit geringsten Abweichungen dauerhaft erreichbar sein. Anschließend ist eine Kalibrierung der Koordinatensysteme nötig. Die Pose der Drahtspitze ist nach dem Setzen des Basis-Koordinatensystems über den Marker in diesem zu erfassen.

Für die Erstellung einer solchen Kalibriereinheit ist die Kenntnis über die Maße des Brenners (Modell *DIX MSZ* der Firma *Dinse*) von Bedeutung. Die genaue Position kann durch einen Konus erreicht werden, der die Schweißdüse erfasst und fixiert. Das Schlauchpaket besitzt eine hohe Torsionssteifigkeit, weshalb der Brenner gegen Verdrehung in der Halterung gesichert sein muss. Die Vermessung des Handbrenners durch ein optisches Verfahren erwies sich aufgrund der komplexen Geometrie als zielführend. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.23 dargestellt. Durch die Mattierung von glänzenden Oberflächen durch eine dünn aufgetragene Kalkschicht konnte das Vermessungsergebnis insbesondere an der Gasdüse verbessert werden. Mehrfache Aufnahmen aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln komplettieren das CAD-Modell und geben so die exakte Form digital wieder.

Mithilfe des Modells ist die Halterung, wie sie in Abbildung 3.24 abgebildet ist, entstanden. Für die Kalibrierung ist es nötig, dass die Position und Orientierung der Halterung dem System bekannt sind. Dies wird durch die Verwendung eines weiteren Markers realisiert. Das Erkennen eines weiteren Markers hat erheblichen Einfluss auf die ROI des Sensorsystems. Durch die Vergrößerung erhöht sich der Bildbereich, der für die Erkennung der Marker durchsucht werden muss. Dies senkt die Ausführungs geschwindigkeit des Bildver-



Abbildung 3.23: Durch optische Vermessungsmethoden erstellte Netzansicht für die CAD-Konstruktion

arbeitungsalgorithmus drastisch. Das Beibehalten der in [28] geforderten Geschwindigkeit wird während des Betriebs über einen Filter realisiert. Jedes Piktogramm eines Markers besitzt eine eigene Identifikationsnummer (ID). Die Marker, deren ID im Betrieb nicht relevant ist, werden von dem System ignoriert, wodurch sich die ROI auf einen Marker beschränkt. Dadurch wird die Performance des Systems sichergestellt. Abbildung 3.24 bildet den konstruierten Werkzeughalter mit dem Schweißbrenner ab. Zu erfassende Posen werden durch die Koordinatensysteme dargestellt. Für das stereoskopische System ist stellvertretend die Kamera eingezeichnet, welche das Wurzelkoordinatensystem in seinem Bildursprung mit angegebener Orientierung enthält.

Für die weitere Verarbeitung der Eingabedaten ist die Pose des TCP in Bezug auf den verwendeten Marker des Handstückes notwendig. Der benötigte Sachverhalt ist mittels der Transformationsmatrix  ${}^M\mathbf{T}_T$  beschrieben. Dem stereoskopischen Sensorsystem sind die durch die Piktogramme gekennzeichneten Flächen in ihrer Lage und Orientierung bekannt. Beschrieben werden diese Posen durch  ${}^K\mathbf{T}_H$  (Kamera zur Halterung) und  ${}^K\mathbf{T}_M$  (Kamera zu Marker). Für die Berechnung von  ${}^M\mathbf{T}_T$  wird in einem ersten Schritt bestimmt, wie weit entfernt der TCP von der Kamera ist. Dafür ist die Angabe der geometrischen Maße von dem Aruco-Marker zur Halterung unerlässlich. Die affine Transformationsmatrix  ${}^H\mathbf{T}_T$  wird unter Zuhilfenahme der Abmaße aus der CAD-Zeichnung händisch gebildet (vgl. Gleichung 3.10).

$${}^K\mathbf{T}_T = {}^K\mathbf{T}_H \cdot {}^H\mathbf{T}_T \quad (3.10)$$

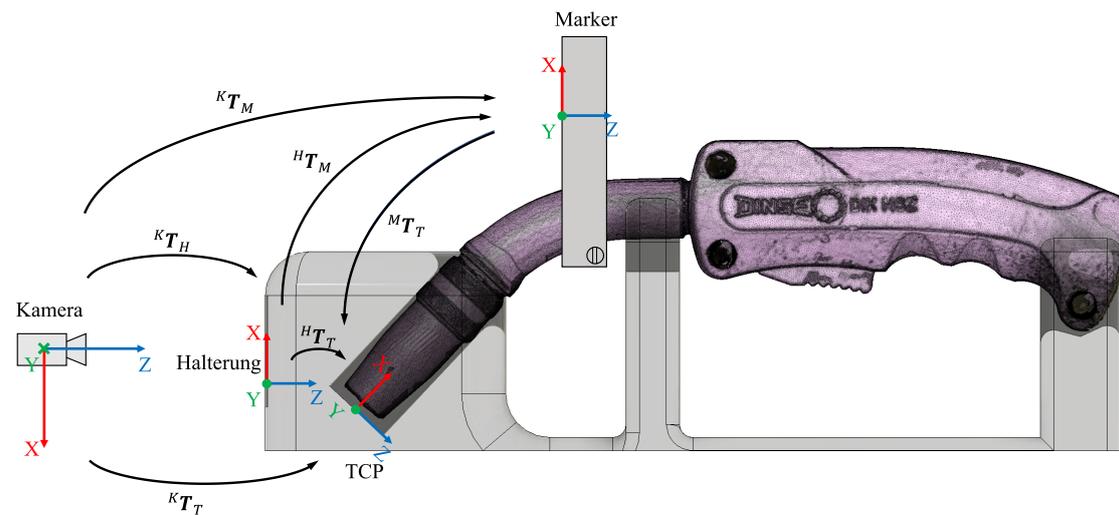


Abbildung 3.24: Darstellung zur Erstellung der kinematischen Kette am Eingabegerät

Durch geschicktes Rückrechnen über die Kamera ist die Pose des TCP im Koordinatensystem des Markers eindeutig bestimmbar. Mathematisch erfolgt dies über die Inverse von  ${}^K\mathbf{T}_T$  (vgl. Gleichung 3.11).

$${}^T\mathbf{T}_M = {}^M\mathbf{T}_T^{-1} = {}^K\mathbf{T}_T^{-1} \cdot {}^K\mathbf{T}_M \quad (3.11)$$

Nach Berechnung der Pose des TCP muss sie noch in das System integriert werden, sodass diese als Systemeingang für das RTOS genutzt werden kann. Gleichung 3.12 stellt das Bezugskordinatensystem auf. Die Orientierung und Position des TCP wird in Bezug auf das Kamerasystem festgelegt.

$${}^{base}Marker = Marker \cdot {}^M\mathbf{T}_T \text{ mit } Marker \equiv {}^K\mathbf{T}_M \quad (3.12)$$

Für die Bestimmung des TCP in Bezug auf das neu gesetzte Basis-Koordinatensystem muss die Differenztransformation von der Basis zur neuen Pose des Markers berechnet werden. Hierfür wird Gleichung 3.12 um die Inverse der Markerbasis ( $Marker_{base}$ ) erweitert (vgl. Gleichung 3.13).

$$TCP = {}^{base}Marker^{-1} \cdot Marker \cdot {}^M\mathbf{T}_T \quad (3.13)$$

Mit Gleichung 3.13 ist die Übermittlung des TCP an das RTOS-System möglich. Um mögliche Testfälle oder andere Systeme nutzen zu können, sind geringfügige Anpassungen der Gleichungen notwendig.

### Implementierung der Ebenenreferenzierung

Für die Implementierung der Ebenenreferenzierung wird das Konstrukt eines Zustandsautomaten verwendet. Dadurch werden definierte Zustände vorgeben, die durch Erfüllen von Bedingungen (Transitionen) in einen nächsten, definierten Zustand übergehen. Dies ermöglicht eine gesteuerte Abfolge von Aktionen und verhindert bei korrekter Implementierung nicht-definierte Zustände und damit nicht-korrekte Bewegungen des Manipulators.

Die Umsetzung erfolgt auf der Bildverarbeitungseinheit (BV-Einheit). Die Kommunikation zwischen dem Laser und der BV-Einheit ist durch eine Ethernetschnittstelle gewährleistet. Die Kommunikation wird durch das XML-Telegramm durchgeführt. Hier wird neben der gesteuerten Pose eine Variable zum Umschalten der Werte mitgeliefert. Weiterhin erfolgt die Kommunikation nur, wenn eine Pose aus dem Stereoskopiesystems ermittelt werden konnte. Damit eventuelle Veränderungen im Kalman-Filter korrekt erfasst werden, läuft dieser während der Referenzierung in seiner Funktion auf dem RTOS weiter. Dies verhindert Stabilitätsprobleme.

Die Initialfahrt erfolgt zu einem, vom Anwender festgelegten, Punkt. Vom Mittelpunkt der Laserlinie ausgehend muss sich das Referenzierungsobjekt in einem Bereich von  $-50\text{ mm} < s < 50\text{ mm}$  befinden. Zusätzlich ist eine nahezu ebene Oberfläche wünschenswert. Ist der Punkt angefahren, erfolgt eine Kontrolle, ob der zweidimensionale Laserscanner Abstand und Winkel erfassen kann. Befinden sich diese innerhalb der definierten Grenzen, erfolgt die Richtung zur Ebene nach Abbildung 3.25. Die Winkel, die die Ebene bestimmen, werden nacheinander erfasst. Anschließend wird der Manipulator um seine Fehlstellung korrigiert. Um nun im Werkzeugkoordinatensystem verfahren zu können, ist eine affine Transformation (vgl. Gleichung 3.7) zu bilden. Dies ermöglicht das Anfahren eines definierten Abstands des Werkzeuges, ohne dass eine Punktverschiebung in Y und Z vorliegt. Für die Kantendetektion erfolgt der Zustandsautomat nach Abbildung



Abbildung 3.25: Zustandsautomat für Winkelbestimmung in A und B

3.26. Der Manipulator wird in Millimeter-Schritten in Y verfahren. Nach jedem Verfahren wird überprüft, ob die Position erreicht ist. Erst im Anschluss daran werden die Abfragen

ausgewertet. Sobald eine Kante detektiert wird, ist eine Verringerung der Bewegungsgeschwindigkeit des Manipulators zielführend. Dies ermöglicht bei der hohen Auflösung des Sensors ein nahezu exaktes Anfahren des Mittelpunkts der Laserlinie. Sollte keine Kante gefunden werden, bricht der Vorgang der Ebenenreferenzierung mit entsprechender Fehlermeldung ab. Bei erfolgreicher Kantendetektion ist die Orientierung der Hochachse

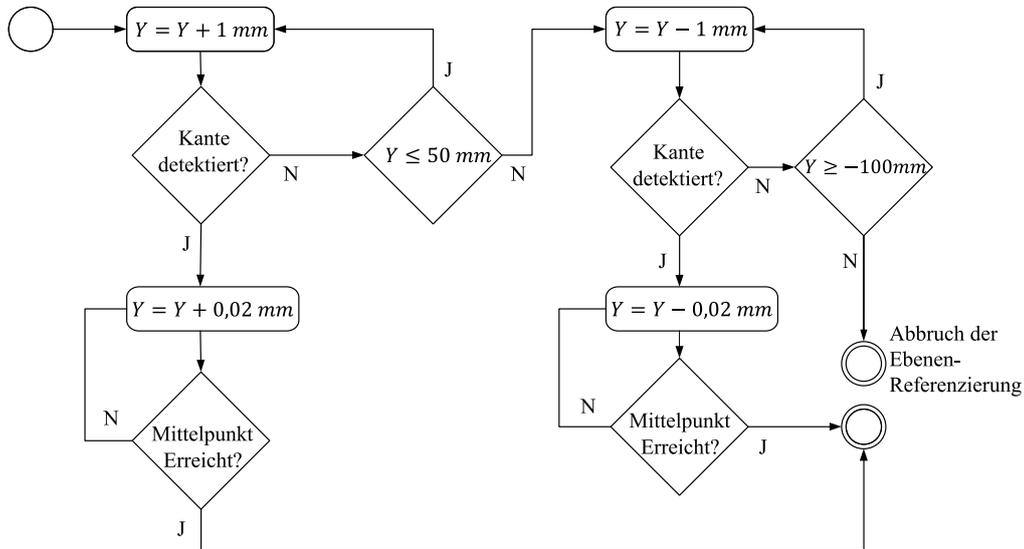


Abbildung 3.26: Zustandsautomat zur Kantendetektion des Referenzierungsobjektes

zu bestimmen. Dies wird durch die Trigonometrie erreicht. Durch Verfahren des Laserscanners in Y-Richtung des Werkzeugs spannt sich ein rechtwinkliges Dreieck wie in Abbildung 3.27 auf. Die Längen der Ankathete ( $b$ ) und der Gegenkathete ( $a$ ) werden

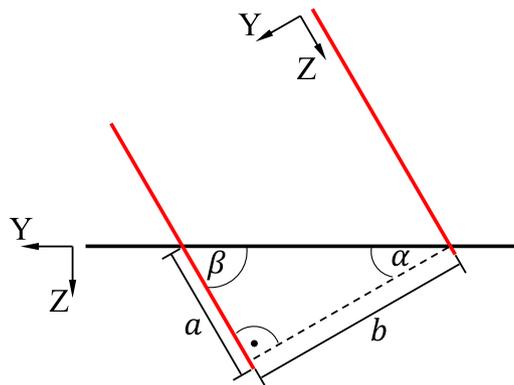


Abbildung 3.27: Bestimmung des Winkels C in Bezug auf die Ebene. Die rote Linie simuliert die vom Laserscanner projizierte Linie

durch den Verfahrensweg des Manipulators in Y-Richtung erfasst ( $b$ ), bzw. durch den Laserscanner vermessen ( $a$ ). Der Winkel  $\alpha$  ist der Korrekturwinkel, um den die Hochachse anschließend gedreht wird. Auf der Grundlage, dass alle Winkel eines Dreiecks in der Summe  $180^\circ$  ergeben, lässt sich  $\alpha$  mit Gleichung 3.14 bestimmen.

$$\alpha = 90 - \beta \quad (3.14)$$

Der Winkel  $\beta$  kann durch den Kotangens der Ankathete zur Gegenkathete bestimmt werden. Sollte sich das rechtwinklige Dreieck zur anderen Seite als in Abbildung 3.27 aufspannen, kehrt sich die Subtraktion in eine Addition um.

$$\alpha = 90 - \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.15)$$

Nach erfolgreicher Korrektur der Hochachse wird das Tool um  $C+ = 90^\circ$  gedreht und die zweite Kante wird nach Abbildung 3.26 gesucht. Wird diese gefunden, erfolgt das Anfahren des Mittelpunkts zwischen beiden Kanten. Wird die zweite Kante nicht gefunden, bricht die Ebenenreferenzierung mit einer entsprechenden Fehlermeldung ab. Das Koordinatensystem der Arbeitsebene wird in diesem Punkt aufgespannt. Das Verfahren innerhalb dieses Koordinatensystems wird durch Gleichung 3.7 realisiert.

#### 3.6.3 Validierung der Ebenenreferenzierung

Für die Validierung der Ebenenreferenzierung wird das gesamte System in Betrieb genommen. Dadurch wird zusätzlich die Prozesskette in Ihrer Funktion validiert. Für die Validierung der Ebene wird von dem Sensorsystem eine fest definierte Form erstellt und genutzt. In Abbildung 3.28 dargestellt, ist diese mit dem FDM-Verfahren erstellt und unterliegt dessen Genauigkeiten. Zur Verringerung der Messungenauigkeiten der Stereoskopie wird die Belichtung der Marker durch ein zusätzliches Leuchtmittel verbessert. Die Marker der Halterung und des Schweißbrenners werden während der Validierung verdeckt. Die Figur in der Ebene ist ein rechtwinkliges Dreieck mit definierten Winkeln zur anschließenden Kontrolle. Damit keine Verschiebungen des Rahmens im Raum auftreten können, muss der Rahmen fixiert sein. Zusätzlich zu dem Rahmen ist eine Vor-



Abbildung 3.28: Darstellung der Nutzung des Validierungsobjektes auf dem Aufbau des Sensorsystems

richtung konstruiert worden, die an dem Werkzeughalter für den Laserscanner den Stift hält. Wenn dieser bei der Validierungsfahrt eine kontinuierliche Linie zeichnet, ohne dass die filigrane Stiftspitze in Mitleidenschaft gezogen wird, ist die Ebenenreferenzierung erfolgreich in das System implementiert. Dazu wird ein Zeichenmedium auf einer möglichst ebenen Fläche angebracht und der Initialpunkt für die Referenzfahrt eingelernt. Nachfolgend wird die Referenzierung durchgeführt. Im Anschluss wird ein Stift an der Halterung des Laserscanners angebracht, sodass er ein Papier berührt. Der Manipulator

zeichnet mit dem Stift die erzeugte Bewegung im Sensorsystem nach. Es wird erwartet, dass die Abmaße des Dreiecks (Winkel, Länge der Linien) eingehalten werden und keine räumliche Verzerrung durch die Koordinatentransformation entsteht. Ferner ist die Spitze des Filzstifts unbeschadet. Das Ergebnis der Validierung und der Versuchsaufbau auf Manipulator-Seite sind in Abbildung 3.29 zu sehen. Die Validierung wurde zum Vergleich zweimal ausgeführt, wobei die Ebene horizontal per Hand verschoben worden ist. Die Länge der Linien sowie die Winkel sind nachgemessen worden und entsprechen exakt den Werten des definiert abgefahrenen Dreiecks. Damit ist sichergestellt, dass die Koordinatentransformation korrekt implementiert ist. Die Linien an sich sind nicht exakt

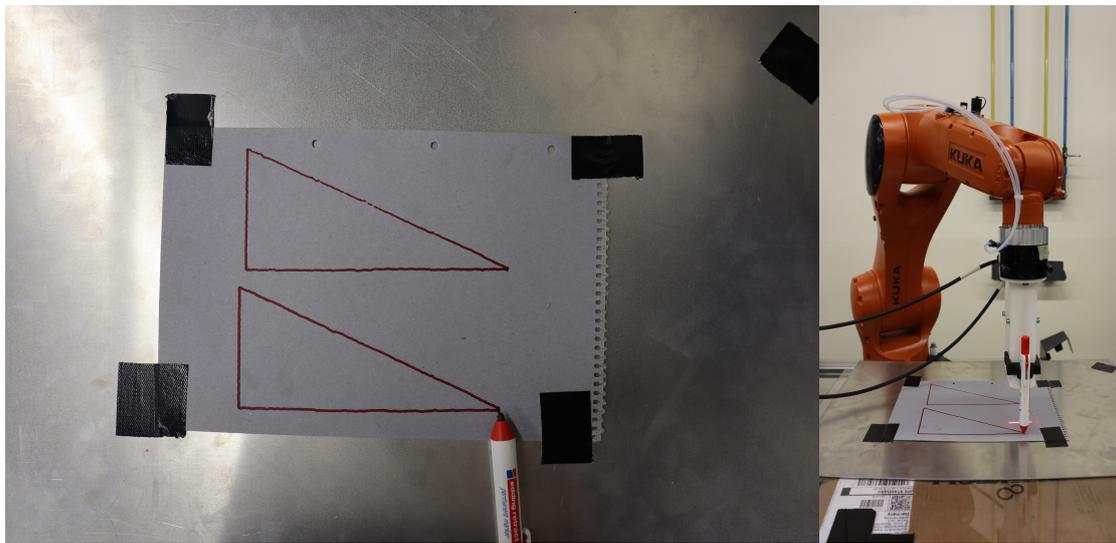


Abbildung 3.29: Bestimmung des Winkels C in Bezug auf die Ebene

gerade vom Manipulator nachgeführt worden. Dies kann diverse Ursachen haben. Das Verfahren des Validierungsmarkers erfolgte per Hand. Bei nicht idealer Oberflächenrauigkeit der matten Folie kann es zu leichten Verschiebungen und Sprüngen kommen, die von dem Sensorsystem als solche erfasst und an den Manipulator weitergegeben werden. Dafür spricht der markante Knick in den Hypotenusen im oberen linken Drittel. An dieser Stelle befand sich auf der Oberfläche des Sensorsystems ein Luftbläschen in der Schutzfolie, welches das gleichmäßige Gleiten beeinträchtigte. Abhilfe würde ein linear geführtes System bringen. Eine weitere Fehlerursache kann in der Messungenauigkeit des Sensorsystems liegen. Selbst kleine Änderungen werden vom Manipulator ausgeführt. Dabei kann es bei nicht exakt eingestellten Reglern und Filtern zum Überschwingen der Position kommen. *KUKA* hat hierfür ein dynamisches Modell des Roboters in der KRC4 hinterlegt. Dieses wird allerdings bei der Verwendung des RSI-Moduls nicht verwendet.

Die Abweichungen des höher gelegenen Dreiecks im Bild innerhalb der Hypotenuse zeugen davon, dass der Stift keinen Kontakt zur Zeichenebene während des Versuchs besaß. Auch dies lässt sich auf das nicht ideale Verschieben des Markers zurückführen. Abschließend kann gesagt werden, dass die Ebenenreferenzierung durchgeführt werden konnte und die Prozesskette erfolgreich in Betrieb genommen wurde.

#### 3.6.4 Integration der Schweißbettbeobachtung

Die visuelle Schweißbettbeobachtung ist für das ferngesteuerte Schweißen von großer Bedeutung. Erst dadurch ist es möglich, dass der Anwender auf das individuelle Verhalten des Lichtbogens reagieren und die Parameter der Stromquelle anpassen kann. Hierzu ist in Kapitel 3.2 eine Beobachtung durch eine Farbkamera vorgestellt worden. Dazu wird ein bildgebender Sensor *DFK 33GP2000e* der Firma *The Imaging Source (TIS)* verwendet. Diese Kamera bietet neben einer hohen Auflösung (2,3 MP bei max 50 fps) eine GigE-Schnittstelle. Die Ansteuerung der Kamera soll über das RTOS erfolgen. Das GUI hierfür wurde bereits in Kapitel 3.3.2 vorgestellt. Die Ansteuerung erfolgt über eine von TIS bereitgestellte C++-Bibliothek und deren Abhängigkeiten auf Linux. Da durch die Kamera der Switch und damit auch die Ethernet-Schnittstelle am RTOS selbst nahezu ausgelastet sind, ist hier eine Erweiterung der Netzwerkkarten im Anschluss an die Arbeit geplant und notwendig.

Für die Betrachtung eines möglichst großen Bereiches soll die Kamera an dem Endeffektor des Manipulators angebracht werden. Hierfür ist eine Halterung entwickelt worden, die möglichst steif mit dem Werkzeug am Manipulator verbunden ist. Dies hat den Vorteil, dass sämtliche Vibrationen oder Schwingungen ebenfalls auf die Kamera als auch das Werkzeug selbst wirken und somit das Bild nicht verwackelt erscheint. Abbildung 3.30 zeigt die Integration am Roboter. Die Herstellung der Halterung durch das

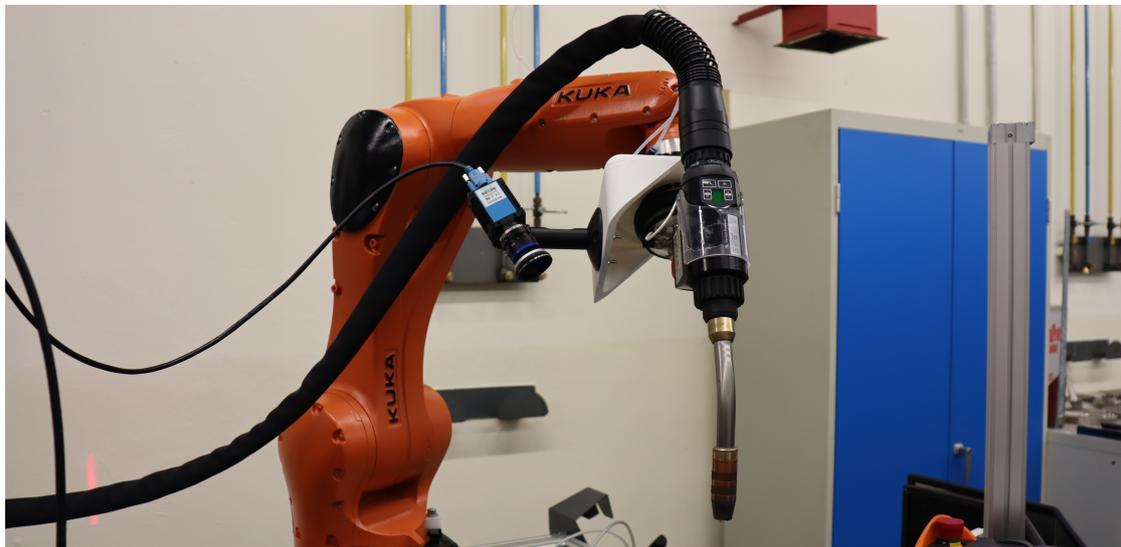


Abbildung 3.30: Schweißbettbeobachtung mittels einer Farbkamera

FDM-Verfahren ermöglicht eine möglichst leichte Konstruktion. Dies ist wichtig, damit der Manipulator am Endeffektor nicht überlastet, und folglich kein Fehler der Steuerung ausgelöst wird. Für die Betrachtung des Schweißbades ist zudem eine entsprechende Einstellung der Belichtungszeit und des Gains nötig. Erst dadurch ist es möglich, dass die Sensorfläche nicht überbelichtet ist und ein Bild entstehen kann. Um an dieser Stelle ein größeres Spektrum an Einstellmöglichkeiten zu besitzen und zusätzlich die Linse der Kamera vor Spritzern und Rauch zu schützen, wird ein doppelter Polfilter benutzt. Polfilter dienen zur Erfassung gerichteten Lichtes von einem Objekt. Durch das Verdrehen der Polfilter zueinander wird der Anteil des gerichteten Lichts geringer. Dies ermöglicht eine Verdunkelung des Schweißbades, ohne dass Farben oder Konturen beeinflusst werden.

Der Nachteil besteht darin, dass ein Teil der Beobachtung durch den Brennerhals verdeckt ist und während des Vorgangs des Schweißens nicht mehr korrigiert werden kann. Hier bietet sich die Erfassung mittels einer zweiten Kamera an. Dies würde auch eine neue Bestimmung der Orientierung der Ebene ermöglichen. Auch sind Lösungen mittels verfahrbarer Kamerasysteme denkbar.

#### 3.6.5 Integration des Schweißsystems

Die Stromquelle ist aufgrund der Erzeugung der benötigten Ströme und Spannungen an den Ort des Manipulators gebunden. Aus diesem Grund wird für die Ansteuerung die *KUKA*-eigene I/O-Schnittstelle verwendet. Realisiert ist diese durch eine SPS der Firma *Beckhoff*. Die verwendete Stromquelle von der Firma *Fronius* ermöglicht über ein zusätzliches Modul (*RI IO Pro/i*) die Buswandlung des firmeneigenen Protokolls in digitale Signale. Das Auslesen und Setzen dieser Signale erfolgt über das RSI-Modul von *KUKA* (siehe Kapitel 2.5).

Die Stromquelle verfügt neben direkten Einstellungen für Strom und Spannung auch über die Möglichkeit, Profile zu erstellen und zu nutzen. Diese werden in dem sogenannten *Workingmode* abgelegt. Die Auswahl erfolgt über die GUI der BV-Einheit. Für die Übertragung der Integerzahl muss diese binär codiert und auf die einzelnen digitalen Ausgänge der SPS gesetzt werden. Die Codierung erfolgt auf dem RTOS-System. Mittels des in Abbildung 2.11 vorgestellten RSI-Aufbaus werden diese angesteuert.

### 3.7 Sicherheitskonzept

Durch die Verwendung einer Maschine (Manipulator), welche sich frei im Raum bewegen und ernsthafte Verletzungen verursachen kann, ist eine Gefährdung von vornherein zu berücksichtigen. Erst dadurch kann der Umgang mit dem System möglichst unfallfrei gewährleistet werden. Es sind Aspekte der Schweißsicherheit und der Manipulatorbewegung an sich zu beachten. Ebenfalls ist der Schutz der verwendeten Werkzeuge vor einer Zerstörung zu berücksichtigen.

Das Konzept soll zweistufig aufgebaut sein. Eine Sicherheitsbox soll mittels der Software auf dem RTOS realisiert werden. Diese begrenzt die Ausgabe des Arbeitsraums durch festgelegte Grenzen. Dabei bildet das gesetzte Basiskoordinatensystem den Ursprung dieser Sicherheitsbox. In positiver Achsrichtung spannt sich ein Kasten auf, der ein Volumen von 40 x 40 x 20 cm hat. Posen außerhalb dieser Grenzen werden intern so verändert, dass diese die entsprechenden Begrenzungen nicht überschreiten. Dies beschränkt das laufende System in seinem Aktionsbereich. Das Abfragen und eventuelle Setzen der Grenzen erfolgt als letzte Instanz auf dem RTOS, bevor die Werte durch die Koordinatentransformation gewandelt und an die KRC4 weitergeben werden.

Sollten bei der Umwandlung Fehler entstehen, bietet das RSI ebenfalls die Möglichkeit, einen Bewegungsraum zu definieren. Dies erfolgt über die Blöcke *POSCORR1* und *POSCORRMON1* in Abbildung 2.11. Eine Anpassung der Grenzen und des Aktionsraums ist aufgrund des verwendeten Schweißwerkzeugs notwendig. Die Manipulator-Steuerung erhält vom RTOS die Vorgabe, wo sich die Pose des Werkzeughalters befindet. Das größte verwendete Tool ist hierbei der Schweißbrenner. Damit der TCP im Arbeitsbereich des Sensor-Systems arbeiten kann, muss der Aktionsbereich des Manipulators entsprechend vergrößert werden. Der Aktionsradius hat sich in einem ersten Schritt auf circa 60 x 60 x 60 cm vergrößert.

Ein weiterer Schutzfaktor ist die Kommunikation zwischen dem RTOS und der Manipulatorsteuerung. Sofern diese zur Laufzeit abbricht, wird die Steuerung in einen Fehlerzustand gesetzt und stoppt den Manipulator. Der Arbeitsraum des Manipulators wird durch einen Schweißstisch abgegrenzt. Dieser ist brandsicher und verfügt über einen Sichtschutz. Der Manipulator ist fest mit dem Tisch verbunden, somit ist der Aktionsradius des Roboters vor nicht sachgemäßem Umgang oder Aufenthalt geschützt. Die Grenzen innerhalb des RSI sind so gesetzt, dass der Tisch nicht als Hindernis für den Manipulator agieren

kann. Sollte es dennoch zur Kollision kommen, greift das Sicherheitskonzept der Fronius-Schweißbrenner-Halterung. Diese besteht aus einem Faltschalldämpfer und einer Magnetplatte. Übersteigt die Hebelkraft die Anziehungskraft des Magnets, wird die Verbindung gelöst. Der Faltschalldämpfer dient dem weiteren Transport des Schweißbrenners, sodass dieser in einer sicheren Position wieder korrekt angebracht werden kann. Eine Überwachung der Sicherheitsstelle von Fronius ist über einen Hall-Sensor möglich.

Schnelle Bewegungen des Manipulators werden durch eine Limit-Funktion verhindert. Sobald die geforderte Bewegung des Sensorsystems einen gewissen Grenzwert übersteigt, wird die Bewegung künstlich verlangsamt und iterativ ausgeführt. Dies sorgt dafür, dass der Manipulator mit einer fest definierten, maximalen Geschwindigkeit verfährt und somit schwerwiegende Beschädigungen verhindert werden. Zudem führen große Sprünge in der Beschleunigung zur Überlastung der Aktoren, was wiederum zum Fehlerfall des Manipulators führt. Andernfalls ist es möglich, dass der Manipulator sich im extremen Fall mit  $v = 2 \frac{m}{s}$  bewegt. Solch ein Fall könnte unter anderem dadurch auftreten, dass der Benutzer eine unbewusste Bewegung durchführt, der Marker nicht erkannt wird und das RTOS die letzte ruckartige Bewegung für seine Prädiktion verwendet.

#### 3.7.1 Validierung des Sicherheitskonzeptes

Die Validierung des Sicherheitskonzeptes erfolgt mittels Vorgaben außerhalb der Sicherheitsboxen. Um die Bewegung möglichst klein zu halten, werden die entsprechenden Grenzwerte innerhalb des RSI-Moduls und der softwareseitigen Sicherheitsbox entsprechend verringert. Das RSI-Modul erlaubt nun einen Verfahrweg des Endeffektors in einem  $30 \times 30 \times 30$  mm großen Bereich. In der Mitte dieses Bereiches befindet sich der Startpunkt. Die softwareseitige Sicherheitsbox ist etwas kleiner dimensioniert und so verschoben, dass die Bereiche sich in den drei translatorischen Achsen im Raum überlappen. Die Winkel sind entsprechend des Konzepts der gegenseitigen Überschneidung ebenfalls angepasst worden. Zusätzlich ist die Funktion des POSCORR-Objektes innerhalb des RSI in Bezug auf den maximalen Rotationswinkel verändert worden. Die Validierung soll erbringen, was bei Überschreitung der maximal zulässigen Verdrehung der Endeffektor-Pose geschieht.

Abbildung 3.31 zeigt das Verhalten der beiden Safety-Boxen stellvertretend für alle Koordinaten der Pose. Die Überlappung der translatorischen Bewegungsräume lässt sich

gut in dem Verhalten der Trajektorien erkennen. In dem Zeitintervall [2 sek-6 sek] wird das Gesamtsystem durch den vorgeschriebenen Sicherheitsraum der Software begrenzt. Der Manipulator sowie die Vorgabe überschreiten diesen Bereich nicht. Im Zeitintervall [7 sek-13 sek] stößt das Gesamtsystem an die definierten Grenzen des RSI-Moduls. Trotz erhöhtem Soll-Wert führt der Manipulator die Bewegung nur bis zu dem definierten Limit von 15 mm aus. Darüber hinausgehende Soll-Werte werden ignoriert. Dieser Versuch

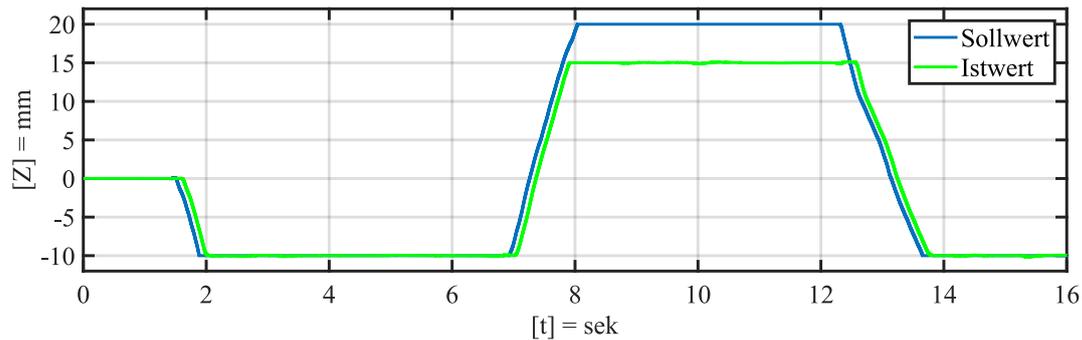


Abbildung 3.31: Für alle Koordinaten beispielhafte Messung

ist in allen Koordinaten durchgeführt worden und zeigt stets das gleiche Ergebnis. Jeweils eine der Sicherheitsboxen ist im Anschlag betrieben worden. Eine Überschreitung der gesetzten Grenzen war zu keiner Zeit möglich. Auffällig ist die Einstellung zu dem maximalen Winkel. Sobald die Summe der eulerschen Winkel diesen Wert im *POSS-CORR*-Objekt innerhalb des RSI-Moduls überschreitet, löst das Objekt aus und setzt die Ansteuerung für den Manipulator in einen Stopp-Zustand. Erst durch Quittieren der Fehlermeldung und Neustart des RSI-Moduls ist das System wieder arbeitsfähig. Analog dazu verhält sich die Einstellung der maximalen translatorischen Bewegung.

Mit der Vorgabe zweier Sicherheitsräume ist die Beschaffenheit eines redundanten Sicherheitskonzepts validiert. Möglicherweise eignet sich eine dritte Beschränkung auf dem Sensorsystem. Diese würde Sensorwerte oberhalb eines bestimmten Bereiches nicht an das RTOS weitergeben und somit auch die Prädiktion nicht weiter beeinträchtigen.

## 4 Validierung der Mensch-Roboter-Interaktion

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die funktionsfähige Inbetriebnahme des Gesamtsystems. Dies umfasst die Erstellung einer Naht per Fernzugriff durch ein Sensorsystem und den Manipulator. Dabei werden mehrere Aspekte untersucht. Abschnitt 4.1 stellt den Versuchsaufbau und das Experiment zur Validierung des Systems dar. Nachfolgend wird in Abschnitt 4.2 die Implementierung des Kalman-Filters und dessen Performance sowie die nachträgliche Filterung und Ausführung des Manipulators untersucht. Abschließend wird das Ergebnis des Experiments betrachtet. Sämtliche Betrachtungen dienen der Bestätigung des Konzepts für das robotergestützte Schweißen. Dies bedeutet, dass eine exakte, regelungstechnische Auslegung und Anpassung der Filterstrukturen noch möglich sind und eventuell für den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden müssen.

### 4.1 Versuchsaufbau

Zur Validierung wird das Gesamtsystem in Betrieb genommen. Das beinhaltet die Steuerung der Stromquelle über die Fronius als auch das Starten und Stoppen des Manipulators. Die essenziellen Komponenten sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Der Benutzer kann über die GUI und das Handstück mit dem System agieren. Das Sensorsystem bestimmt auf Grundlage der Kamerabilder die Pose des Schweißbrenners. Die Erfassung, ob der Schweißvorgang durchgeführt werden soll, erfolgt durch das wiederholte Abfragen des Meilhaus-I/O-Geräts und damit des Tasters am Handstück. Die Informationen über die Pose, den Status der I/O's sowie die getroffenen Eingaben des Benutzers werden an das RTOS-System weitergegeben. Dieses stellt die Schnittstelle von Sensorsystem und *KUKA*-Steuerung dar. Neben der Prädiktion wird zusätzlich die Übertragung der Schweißbeobachtungskamera durchgeführt. Die finalen Werte werden der *KUKA*-Steuerung über das RSI-Modul übergeben. Die Kommunikation mit der Stromquelle erfolgt über die von

KUKA bereitgestellte I/O-Schnittstelle. Die Information über die relevanten Ein- und Ausgänge wird anschließend an das System zurückgegeben. Durch die Nutzung des Sys-

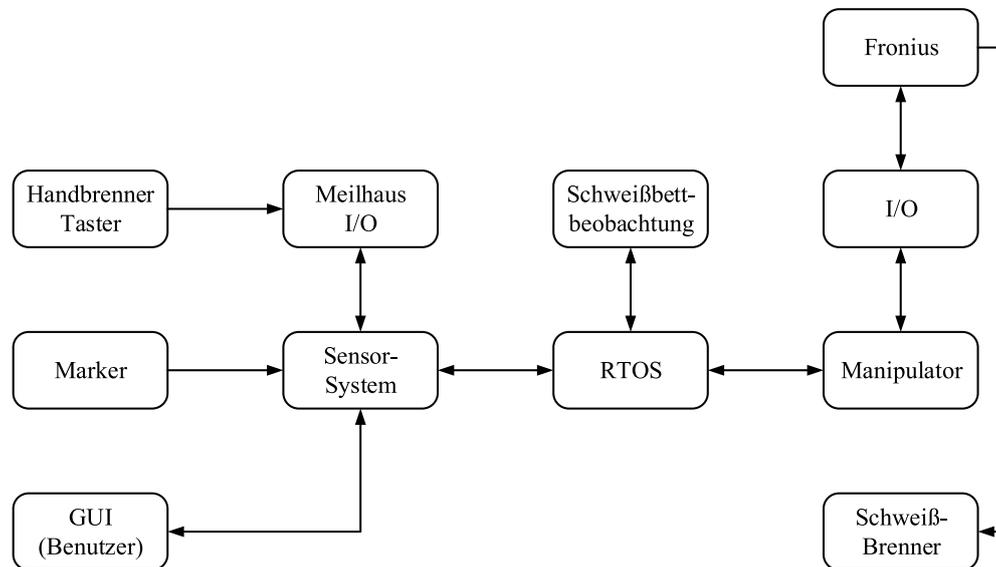


Abbildung 4.1: Prozesskette des Systems unter Berücksichtigung der essenziellen Komponenten

tems kann der Benutzer eine ergonomische Körperhaltung für den Schweißvorgang einnehmen und die Einrichtung des Systems durchführen. Dies beinhaltet das Referenzieren der TCP's und die Grundeinstellungen der Stromquelle. Anschließend wird separat das RSI-Modul aktiviert und die Ebenenreferenzierung wird durchgeführt. Zuletzt wird die Funktion des Toolwechsels überprüft. Dabei soll der Manipulator eine definierte Position anfahren, bei der der Benutzer das Tool per Hand am Roboter wechselt. Erst bei erneuter Freigabe des Kommandos folgt der Roboterarm wieder den Vorgaben des Systems. Dem Benutzer ist eine Vorlage mit aussagekräftigen Konturen als Bearbeitungsobjekt vorgelegt. Abbildung 4.2 zeigt das Remote-Schweißen während des Prozesses auf Anwenderseite. Die Fachkraft fährt einen Schriftzug mit dem Eingabegerät nach. Der Schriftzug ist so gewählt, dass er mehrere Stop- und Start-Punkte aufweist sowie runde Formen. Die diskontinuierliche Schweißbewegung wird vom Manipulator erfasst und durchgeführt.

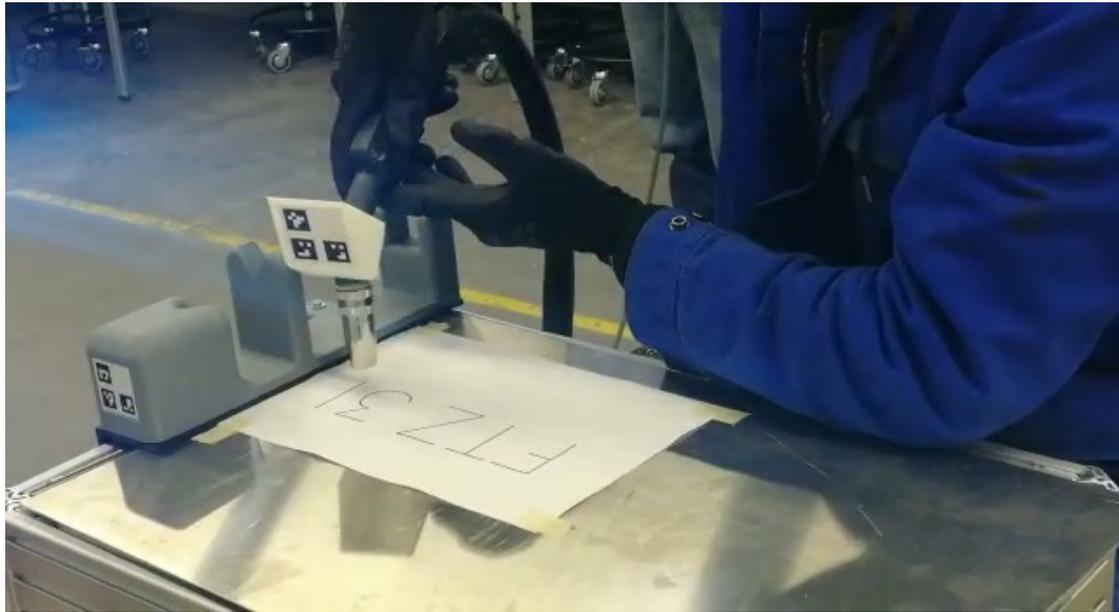


Abbildung 4.2: Erfassung der Position des Brenners über die Posen der Marker. Unterhalb ist das Validierungsmuster vorgedruckt

### 4.2 Signalfilterung des Sensorsystems

Während des Prozesses sind sämtliche relevante Daten über das RTOS-System zum Zeitpunkt jedes *KUKA*-Telegramms mitgeschrieben worden. Diese Daten beinhalten die Erfassung der Pose aus dem Sensorsystem, die Filterung durch den Kalman-Filter und das  $PT_2$ -Glied. Die Werte der anschließenden Koordinatentransformation sowie dessen zusätzliche Filterung sind ebenfalls mit aufgezeichnet worden. Die Information, in welcher Lage der Manipulator sich befindet, wird durch die KRC4 an das RTOS gesendet und ist im Datensatz enthalten. Dieser ist in den folgenden Abbildungen 4.3, 4.4 in dem Zeitintervall von  $t = [82 \text{ s}, 83 \text{ s}]$  dargestellt. Es sind jeweils die drei translatorischen und die drei rotatorischen Elemente der Pose als Grundmessung und die anschließenden Filterstufen aufgezeigt. Die Umwandlung aus einem stark diskretisierten in ein möglichst kontinuierliches Signal ist erfolgreich implementiert worden. Der Vergleich der Trajektorien der  $PT_2$ -Filterung (rot) mit denen der Messung (blau) zeigt auf, dass die Prädiktion zwischen den einzelnen Abtastschritten der Messung zum Teil erfolgt und nahezu keine Phasenverschiebung vorhanden ist. Die starke Abweichung in den Umkehrpunkten ist durch die Erhöhung der Systemordnung des genutzten Zustandsmodells im Kalman-Filter erfolgreich verringert. Das zum Teil (vgl. Rotation B in Abbildung 4.3)

starke Sägezahnverhalten des Kalman-Filters wird durch das PT-2 ebenfalls geglättet und führt zu keinen Beeinträchtigungen. Wie der Manipulator auf die Soll-Werte des

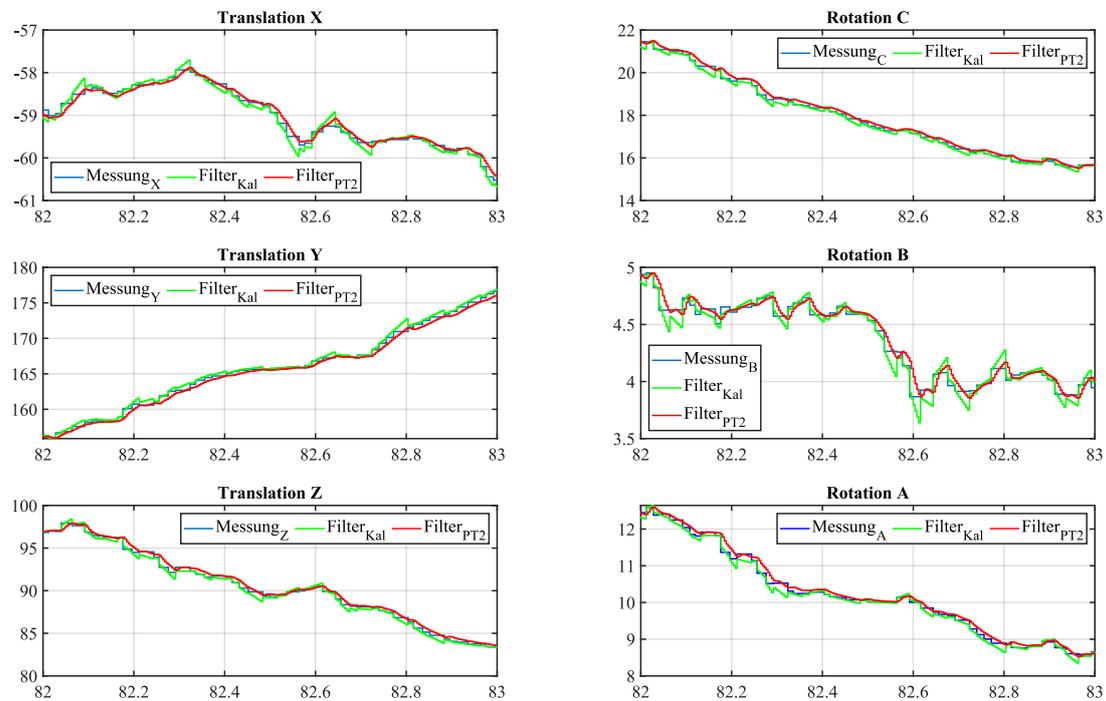


Abbildung 4.3: Messung des Sensorsystems und anschließende Prädiktion und Filterung der Werte

Datenverarbeitungs-Systems regiert, wird in Abbildung 4.4 gezeigt. Um die Übersicht zu steigern, werden repräsentativ die Translation der Z-Achse und die Betrachtung der Winkeländerung von  $B = R(Y)$  dargestellt. Innerhalb der translatorischen Bewegungsrichtungen ist eine Phasenverschiebung von  $t_{versatz} \approx 100 \text{ ms}$  zu erkennen. Die Bewegung

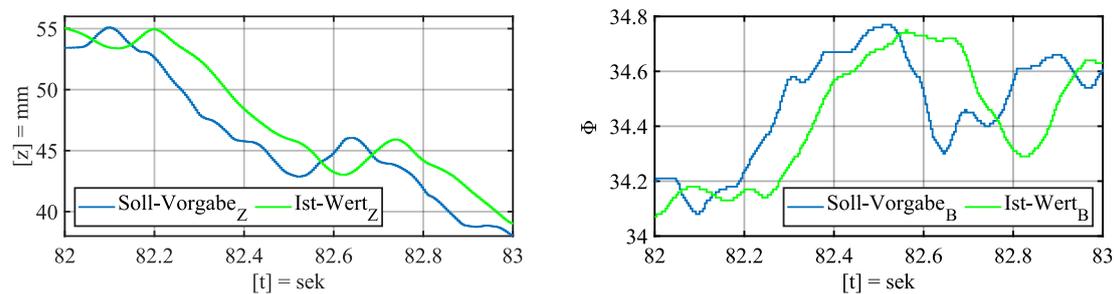


Abbildung 4.4: Soll- und Ist-Wert-Vergleich einer Rotation und einer Translation des Manipulators

selbst wird nahezu komplett ausgeführt. Es gibt nur geringfügige Abweichungen. Diese sind in der Betrachtung der Rotation um  $B$  deutlich höher. An der kritischen Stelle von  $t = 82.4 \text{ s}$  beträgt die Phasenverschiebung  $t_{\text{versatz}} \approx 180 \text{ ms}$ . Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Ist-Werte des Manipulators nicht vollständig die Soll-Werte erreichen. Die Verschiebung in der Ordinate zu den Filterwerten erfolgt durch die anschließende Koordinatentransformation. Diese rechnet den TCP des Sensorsystems auf die Stellung des Endeffektors im Schweißsystem zurück. Ein entsprechend dimensionierter Tiefpass verhindert ein numerisches Rauschen.

Diese Phasenverschiebung wird hauptsächlich durch die im RSI implementierten Tiefpassfilter verursacht. Der Einsatz dieser Filter diente der Rauschunterdrückung durch den Kalman-Filter zweiter Ordnung. Die Aufbereitung des Signals macht diese Filterstrukturen aufgrund der Signalgüte hinfällig. Weitere Untersuchungen sind mittels Sprungantworten realisiert worden (vgl. Abbildung A.1 und A.2 im Anhang). Der Marker ist dabei auf einem Korpus mit definierten Flächen montiert und mit diesem bewegt worden. Angaben zur Genauigkeit des Sensorsystems sind in [28] zu finden. Die Abbildungen zeigen auf, dass das Sensorsystem und die einhergehende Filterung eine deutlich geringere bis gar keine Phasenverschiebung aufweisen. Die in Kapitel 3.7 beschriebenen Filter zur Begrenzung der maximalen Geschwindigkeit sorgen für eine Verzerrung der Manipulatorbewegung bei großen Distanzen. Durch das Entfernen der Filter auf dem RSI ist die Phasenverschiebung zwischen Soll- und Ist-Werten deutlich verringert worden. So beträgt die Phasenverschiebung zum Manipulator bei großen Bewegungen  $t_{\text{versatz}} \approx 30 \text{ ms}$  statt  $t_{\text{versatz}} \approx 180 \text{ ms}$ . Die restliche Phasenverschiebung entsteht durch die Ansteuerung der Aktoren und deren Zeitkonstanten. Das Bewegungsverhalten des TCP in einer ruhenden Lage ist von der Änderung innerhalb des RSI unverändert geblieben. Eine weitere Maßnahme zur Verringerung der Phasenverschiebung ist die Anpassung der Regelparameter der einzelnen Achsen.

Das Ergebnis der Validierung wird in Abbildung 4.5 dargestellt. Geschweißt wurde mit dem CMT-Verfahren. Eine exakte Überprüfung der Maßhaltigkeit ist nicht durchführbar, da die Kontur von Hand erzeugt worden ist. Durch den Vergleich der Vorlage und des Erzeugnisses kann allerdings belegt werden, dass der Funktionsumfang des Systems gegeben ist. Die Größe der geschweißten Buchstaben entspricht denen der genutzten Vorlage. Während der Versuchsdurchführung konnte die Fachkraft nur auf ein akustisches Feedback zurückgreifen. Die Ursache liegt darin, dass eine erneute Überprüfung der Ebenreferenzierung erreicht werden sollte. Die Fachkraft startet mit einem festgelegtem

Abstand und hält diesen möglichst genau bei. In Abbildung 4.3 ist eine Veränderung von  $x = x \pm 1$  zu erkennen. Ohne das visuelle Feedback ist die Fachkraft gezwungen sich nur auf die Brennerhaltung zu konzentrieren.

Das Endergebnis hat keinerlei durch das System hervorgerufene Beeinträchtigungen aufzuweisen. Es ist gut zu erkennen, wie die Anknüpfungspunkte der einzelnen Striche nahezu ideal ausgeführt worden sind. Die Naht an sich zeugt von einem gutem Schweißergebnis.



Abbildung 4.5: Schweißergebnis einer komplexen Struktur während des Validierungsexperiments zur Roboter-Mensch-Interaktion

### 4.3 Überprüfung der Zielerreichung

Diese Arbeit befasst sich mit der Erweiterung eines Sensorsystems und der Inbetriebnahme der Mensch-Roboter-Interaktion beim Schweißen. Dazu sind die Software erweitert, der physische Aufbau vervollständigt und die fehlenden Aspekte eingebunden und in Betrieb genommen worden. Eines der zentralen vier Elemente aus Kapitel 3.1 ist die Lösung des Timing-Problems. Dies ist durch das Hinzufügen eines kostengünstigen und zuverlässigen RTOS realisiert. Es muss allerdings noch in seinen Kommunikationsschnittstellen erweitert werden. Die Nutzung einer GigE-Kamera in Verbindung mit einer zeitkritischen Kommunikation führt dazu, dass die jetzige Schnittstelle voll ausgelastet ist. Das RTOS empfängt dadurch die entsprechenden Datenpakete zu spät und es kann zum Ausfall des Gesamtsystems kommen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Erfassung der Arbeitsebene im Arbeitsraum des Manipulators und die Referenzierung zur Arbeitsebene des Sensorsystems. Die mathematische Berechnung dazu erfolgt im Kapitel 3.6. Hier wird mithilfe eines zweidimensionalen Lasersensors die Ebene erfasst und in ihrer Orientierung vermessen. Durch das Erstellen einer Transformationsmatrix in homogenen Koordinaten, welche die Ebene in Bezug auf das Basis-Koordinatensystem des Roboters beschreibt, ist die Berechnung und damit das Verfahren in den Achsen der Ebene ermöglicht.

Die Referenzierung der TCPs (des Werkzeugs vom Manipulator und von dem Eingabegerät) erfolgt über ein ähnliches Schema. Die Vermessung der unterschiedlichen Werkzeuge am Manipulator ist durch deren Konstruktionsunterlagen bzw. durch die XYZ-4-Punkt-Vermessungsmethode von *KUKA* erfolgt. Die Transformation vom Basis-Koordinatensystem zum TCP ist über homogene Koordinaten auf den RTOS gespeichert. Je nach Auswahl des Anwenders kann das entsprechende Werkzeug gewählt werden. Die Vermessung des Eingabegeräts ist auf Grundlage des verschiebbaren Markers bei jeder Verwendung erneut durchzuführen. Durch ein in Kapitel 3.6.2 vorgestelltes Konzept ist dieses Problem gelöst und anwendbar.

Die Verringerung des Quantisierungsrauschens der diskontinuierlichen Messung sowie die Prädiktion der Roboterbewegung zwischen den Aktualisierungsintervallen sind für die Nutzung einer Roboter-Mensch-Interaktion von entscheidender Bedeutung. Erst dadurch ist eine kontinuierliche Bewegung des Manipulators mit der geforderten Abtastzeit

von  $t = 4$  ms möglich. Die Verwendung eines Kalman-Filters für die Prädiktion in Verbindung mit weiteren Filtern zur Sicherstellung eines genauen und phasentreuen Messsignals zeigt gute Ergebnisse.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Ausarbeitung und Erweiterung der Arbeit von [28] erfolgreich durchgeführt werden konnte. Als Validierung des Systems ist eine komplexe Form als Auftragsschweißnaht erstellt und bewertet worden. Das System kann mit entsprechendem Tuning der Regelparameter der Manipulator-Aktoren und konzeptionellen Veränderungen des Datenverarbeitungssystems verbessert und industrietauglich weiterentwickelt werden.

## 5 Zusammenfassung

Diese Ausarbeitung beschäftigte sich mit der Erstellung eines Gesamtsystems zur Mensch-Roboter-Interaktion beim Schweißen. Dabei sollte der Benutzer durch ein Eingabegerät eine Trajektorie für das durchführen einer Schweißnaht vorgeben. Der Manipulator sollte diese in Echtzeit nachverfolgen und den Schweißprozess durchführen. Dabei wurden dem Benutzer entsprechende Rückmeldungen (akustisch und visuell) zur Verfügung gestellt. Das Ziel war die Erfassung und Nutzung von Erfahrungen etablierter Fachkräfte, ohne diese durch körperlichen Gefahren und Belastungen zu gefährden.

Zur Erstellung wurde auf die vorangegangene Arbeit von P. Zuther [28] aufgebaut. Dieser entwarf ein Posenerfassungssystem durch die Stereoskopie und die Verwendung robuster Marker. Darüber hinaus ist die Prozesskette zur Steuerung des verwendeten Manipulators erstellt worden. Die Tätigkeiten dieser Arbeit beschäftigten sich mit der Erstellung eines echtzeitfähigen Systems zur Behebung der zeitkritischen Problematik, der Referenzierung der Sensorebene zur Arbeitsebene des Manipulators, der korrekten Bewegung des tatsächlichen Schweißbrenners am Manipulator in Referenz auf das Eingabegerät des Nutzers, der Einbindung der nötigen Hardware-Komponenten, der Berücksichtigung eines Sicherheitskonzeptes, der Kommunikation zur Stromquelle sowie dem Aufbau eines portablen und steifen Sensorsystems sowie der Durchführung der Validierungen.

Der abschließende Versuch validierte die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems. Die Erstellung einer komplexen Geometrie innerhalb einer Ebene bestätigte die verwendete Ebenenreferenzierung sowie die Transformation der Koordinatensysteme innerhalb des Gesamtsystems. Des Weiteren wurde die Kommunikation zu den externen Komponenten sowie die Kommunikation der einzelnen Komponenten untereinander dargestellt.

## 5.1 Ausblick

Diese Arbeit liefert wichtige Bausteine, an denen zukünftig weitergearbeitet werden kann. Nach der Validierung des Gesamtsystems gilt es, die einzelnen Komponenten zu verbessern und auch ergonomische Aspekte in Betracht zu ziehen. Im Detail sind folgende Teilpakete möglich: die Erstellung eines ergonomischen Eingabegeräts (z. B. ein Stift), statt eines Handbrenners sowie der dazu notwendigen Peripherie. Hierdurch könnte eine deutlich schonendere Körperhaltung eingenommen werden. So wären auch weitere Funktionen zu implementieren wie eine Pause-Taste zum Ab- und Ansetzen. Hierfür müssten mit den entsprechenden Benutzern Evaluationsgespräche geführt werden. Erst darauf aufbauend kann das optimale Gesamtsystem erstellt werden. Auch eine Ebenenreferenzierung über ein stereoskopisches Verfahren wäre denkbar und ist, um unnötige Bewegungen mit dem Brenner zu vermeiden, erstrebenswert. Ein wichtiger Punkt ist außerdem die Einbindung eines automatisierten Werkzeugwechsels. Dadurch wäre der Benutzer nicht mehr dazu verpflichtet vor Ort den Werkzeugwechsel am laufenden Manipulator durchzuführen. Ein weiterer Vorteil wäre die Integration anderer Schweißverfahren. In Zukunft sollte dieses Projekt auf das Verfahren des E-Handschweißens umgerüstet werden. Hierfür müssten eine Elektrodenhalterung für den Roboter, ein Konzept für das Entfernen der Schlacke und das Reinigen der Naht entwickelt werden.

Die Bewegung einer Fachkraft beim Schweißen ist begrenzt durch die Länge der Arme und der Zwangshaltung, in der sie sich befindet. Die kritischen Punkte sind die, wo die Fachkraft den Vorgang des Schweißens unterbricht und neu ansetzt. Die Bereitstellung der Kontinuität verfolgt das Ziel, dass der Manipulator für die Zeit des Umsetzens per Prädiktion die Naht fortführt und erst beim Einsetzen der Fachkraft neu beginnt. Ansätze könnten sein, dass die Fachkraft nur noch Höhe und Winkel hält und über ein taktilen Sensor die Geschwindigkeit vorgibt. Eine zweite Möglichkeit wäre die Prädiktion der Schweißbewegung aus der Aufzeichnung von Daten der vorangegangenen Sekunden.

Des Weiteren ist die Schweißbad-Beobachtung von zentraler Bedeutung. Durch die Aufnahme und das Erkennen können Rückschlüsse auf das Verfahren gezogen und eine entsprechende Datenbank geschaffen werden. Die Unterstützung des Benutzers beim Schweißen ist ebenfalls zu bedenken. Wie viel Eingriff auf das Gesamtsystem ist für die Fachkraft zulässig und wird sie lediglich auf ihre Fehler verwiesen oder werden diese schon korrigiert, bevor sie selbst reagiert?

# Literaturverzeichnis

- [1] ALTENBERG, Jan: Echtzeit mit Linux. In: *embedded-software engineer* (2019), April
- [2] BEYERER, Jürgen ; LEÓN, Fernando P. ; FRESE, Christian: *Automatische Sichtprüfung*. Springer-Verlag GmbH, 2016. – ISBN 978-3-662-47785-4
- [3] CRAIG, John J.: *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson, 2017. – ISBN 978-0133489798
- [4] FREITAG, Ralf: Zeitnah. In: *Linux-Magazin* (2017), März
- [5] HUNT, Mark L.: *System and method for performing remote welding operations on an apparatus*. 2012
- [6] INSTITUT, Fraunhofer: HMI 2017: Roboter lernen Sehen. In: *Pressemiteilung* (2017)
- [7] KESSLER, Darrel: Tesla's Gigafactory. In: *ATEA Journal Vol.45 No.1* (2017)
- [8] KG, WEKA MEDIA GmbH & C.: *Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie*. Römerstraße 4, D-86438 Kissing: Fronius International GmbH (Veranst.), März 2013
- [9] KIM, Pir-yong ; HUH, Lynn: *Kalman Filter for Beginners: with MATLAB Examples*. A-JIN, 2011. – ISBN 146-3-648-359
- [10] KUKA Deutschland GmbH (Veranst.): *KR C2 /KR C3 Programmierhandbuch*. V0.0. Februar 2005
- [11] KUKA Deutschland GmbH (Veranst.): *KR C4 compact*. Spez KR C4 compact V10. März 2018
- [12] KUKA Roboter GmbH (Veranst.): *KUKA RobotSensorInterface 3.3*. KST RSI 3.3 V5. September 2016
- [13] KUKA Roboter GmbH (Veranst.): *KUKA System Software 8.3*. KSS 8.3 SI V5. April 2016

- [14] LIU, YuKang ; ZHANG, YuMing: Control of human arm movement in machine-human cooperative welding process. In: *Control Engineering Practice* 32 (2014), S. 161–171
- [15] LIU, YuKang ; ZHANG, YuMing: Toward welding robot with human knowledge: A remotely-controlled approach. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 12 (2014), Nr. 2, S. 769–774
- [16] LORENZ, Heinz: Reales schweißen mit Augmented-Reality verbinden. In: *blechnet* (2018), Februar. – URL <https://www.blechnet.com/reales-schweissen-mit-augmented-reality-verbinden-a-682273/>
- [17] Meilhaus Electronic (Veranst.): *RedLab 1024LS Digitales USB-E/A-Modul*. 1.5D. April 2014
- [18] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG (Veranst.): *Betriebsanleitung scanCONTROL 26xx*
- [19] NISCHWITZ, Alfred ; FISCHER, Max ; HABERÄCKER, Peter ; SOCHER, Gudrun: *Computergrafik und Bildverarbeitung*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – ISBN 978-3-8348-1712-9
- [20] REINER MARCHTHALER, Sebastian D.: *Kalman-Filter*. Gabler, Betriebswirt.-Vlg, 2017. – ISBN 978-3-658-16727-1
- [21] STEFAN BAUER, Dr.rer. nat.: Optische Strahlenbelastung beim Schweißen - Erfassung und Bewertung. In: *Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin* (2017)
- [22] TICHY, Gunther: Fachkräftemangel–Ein europäisches Problem. In: *Migration* (2018)
- [23] UNFALLVERSICHERUNG, DGUV D. gesetzliche: Lichtbogenschweißen. In: *DGUV Information 209-010* (2017)
- [24] VOLKMAR SCHULER, Jürgen T.: *Praxiswissen Schweißtechnik*. Springer Vieweg, 2019. – ISBN 978-3-658-24266-4
- [25] WENDEL, Jan: *Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation*. Oldenburg Verlag, 2007. – ISBN 3486581600
- [26] WOERNLE, Christoph: *Mehrkörpersysteme*. Springer-Verlag GmbH, 2017. – ISBN 978-3-662-46686-5

- [27] WÜST, Prof. Dr. K.: *Skriptum: Grundlagen der Robotik*. Technische Hochschule Mittelhessen, Campus Gießen, Juni 2018. – URL <https://homepages.thm.de/~hg6458/Robotik/Robotik.pdf>. – Heruntergeladen am 26.09.2019
- [28] ZUTHER, Patrick: *Integration einer sensorgeführten Robotersteuerung*. 2019. – PPN: 1681530694

# A Anhang

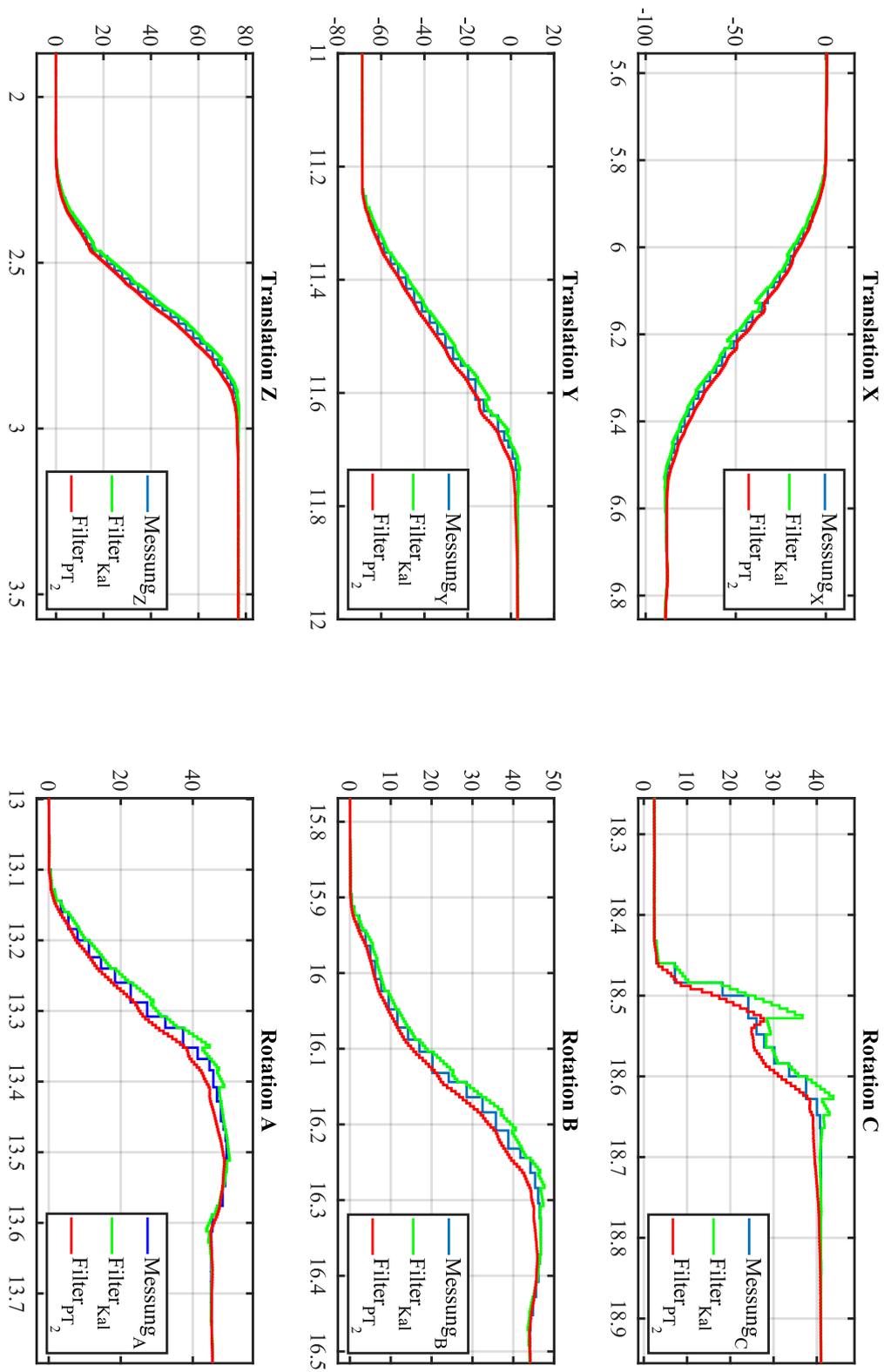


Abbildung A.1: Sprungantwortaufnahmen des Sensorsystems mit anschließender Filterung

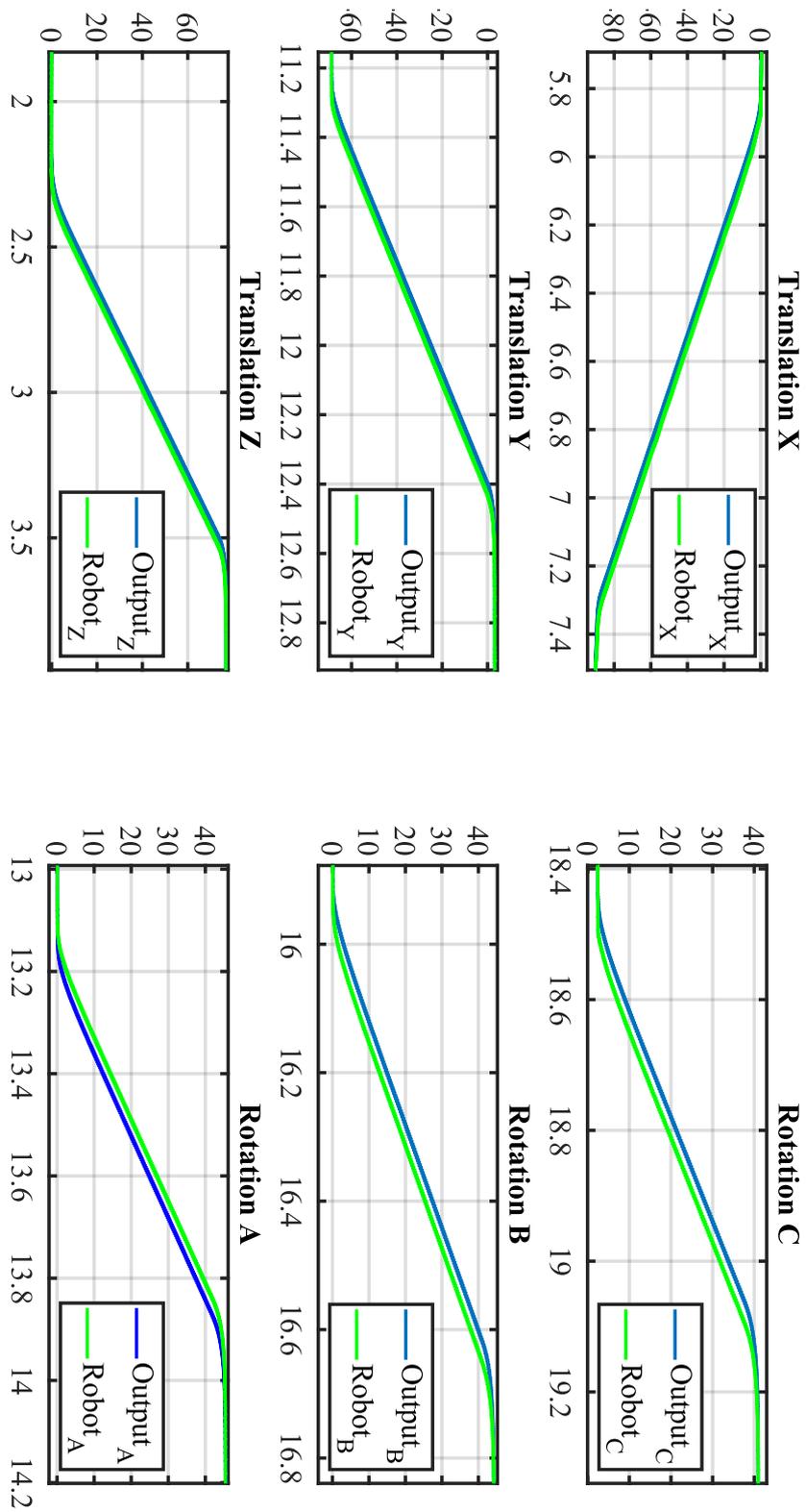


Abbildung A.2: Ist- und Sollwert Vergleich des Manipulators

## **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