

# **Konzeption und Realisierung einer sensitiven Montageaufgabe basierend auf einem Handhabungsgerät und intelligenter Sensorik für den Wickelprozess endloser Gummidichtungen**

---

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
des Doktors der Ingenieurwissenschaften  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität des Saarlandes

von

**Ali Kanso**

Saarbrücken

2021

Tag des Kolloquiums: 27.05.2021

Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Jörn Walter

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves

Vorsitz: Univ.-Prof. Dr. Christian Motz

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Paul Motzki

# Danksagung

Ich möchte vor allem meinem Doktorvater und Förderer Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller, Leiter Forschungsbereich Montagesysteme ZeMA und Lehrstuhl Montagesysteme UdS, für das entgegengebrachte Vertrauen, die fachliche Unterstützung sowie die konstruktiven Gespräche während meiner Promotionszeit danken.

Außerdem möchte ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves, dem Leiter des Instituts für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik der RWTH Aachen, für die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Ich danke meinen Kollegen am ZeMA, insbesondere der Abteilung Montageverfahren und -automatisierung, für den intensiven Austausch und die kollegiale und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Ein besonderer Dank geht an Matthias Vette-Steinkamp, Tobias Masiak, Anette Slotty, Anne Blum und Attique Bashir für die Durchsicht und inhaltliche Diskussion der Arbeit. Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen öffentlichen und industriellen Forschungspartnern des ZeMA für die gute Zusammenarbeit in zahlreichen Projekten.

Ebenfalls möchte ich meinen studentischen Hilfskräften sowie Studien- und Abschlussarbeitern für ihre Hilfe danken. Explizit genannt seien hier Aaron Braun, Stefan Marx, Marco Schneider, Jakob Metzger und Luise Ehrmantraut.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Frau Fatma Pia und meiner Familie, die immer zu mir standen und mich stets in der Arbeit an meiner Dissertation unterstützten.

Die vorliegende Arbeit ist Fatma Pia, Abdallah Adam und Bassam Noah gewidmet.

Saarbrücken, den 27.05.2021

Ali Kanso

# Kurzfassung

Immer mehr Aufgaben in der Produktion werden von Industrierobotern übernommen. Die steigende Komplexität der Produktionsprozesse und Produkte stellt den Robotereinsatz vor große Herausforderungen, sodass positionsgeregelte Robotersysteme sowie Sensorsysteme mitunter an ihre Grenzen stoßen.

Der Einsatz von kraftgesteuerten bzw. sensitiven Robotersystemen stellt eine mögliche Lösung der Problematik dar. Er verringert das Problem von Messungenauigkeiten und großen Toleranzen bei der Umsetzung von komplexeren Produktionsaufgaben und erfordert keine genaueren Informationen über die Roboterumgebung.

Bei sensitiven Robotersystemen werden mittels integrierter Drehmomentsensoren externe Kräfte bzw. Drehmomente überwacht, um die Roboterbewegungen anzupassen. Die Ermittlung der externen Kräfte sowie die moderne Regelstruktur ermöglichen außerdem ein vordefiniertes dynamisches Roboterverhalten und damit die direkte Interaktion des Roboters mit der Umgebung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methodik zur Umsetzung komplexer Montageaufgaben mithilfe eines sensitiven Robotersystems vorgestellt. Dabei werden die wesentlichen Funktionen und Methoden für den effizienten Einsatz und die effiziente Inbetriebnahme der Hauptkomponenten eines sensitiven Robotersystems entwickelt. Die Methodik wird am Beispiel der sensitiven Wickelapplikation einer endlosen Gummidichtung erprobt und validiert.

# Abstract

Industrial robots are becoming more widely used in manufacturing tasks. The increasing complexity of production processes and products poses great challenges for the use of robots, so that position-controlled robot systems and sensor systems sometimes reach their limits.

The use of force-controlled or sensitive robot systems represents a possible solution to the problem. It reduces the problem of measurement inaccuracies and large tolerances when implementing more complex production tasks and does not require more precise information about the robot environment.

In the case of sensitive robot systems, the external forces or torques are monitored by means of integrated torque sensors in order to adapt the robot movements. The determination of the external forces as well as the modern control structure also enable a predefined dynamic robot behavior and thus the direct interaction of the robot with the environment.

In this thesis a methodology for the implementation of complex assembly tasks with the help of a sensitive robot system is presented. Thereby the essential functions and methods for the efficient use and commissioning of the main components of a sensitive robot system are developed. The methodology is tested and validated on the example of the sensitive winding application of a endless rubber seal.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>IX</b>
Abkürzungen . . . . .	IX
Formelzeichen . . . . .	XI
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	3
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Stand der Technik in Forschung und Industrie</b>	<b>6</b>
2.1 Begriffe und Definitionen . . . . .	6
2.1.1 Montage . . . . .	6
2.2 Grundlagen des Wickelprozesses . . . . .	9
2.2.1 Zuordnung des Wickelprozesses . . . . .	9
2.2.2 Adaption aus der Elektroindustrie . . . . .	11
2.3 Produktbetrachtung und Szenario der sensitiven Wickelapplikation . . . . .	15
2.3.1 Analyse des Produkts . . . . .	15
2.3.2 Produktionslinie . . . . .	16
2.3.3 Aufbau des konventionellen Wickelprozesses . . . . .	17
<b>3 Grundlagen der Robotik</b>	<b>19</b>
3.1 Kinematische Betrachtung des Roboters . . . . .	20
3.1.1 Kinematische Strukturen des Industrieroboters . . . . .	20
3.1.2 Modellierung der kinematischen Kette . . . . .	22
3.1.3 Direktes kinematisches Problem . . . . .	25
3.1.4 Inverses kinematisches Problem . . . . .	26
3.1.5 Jacobimatrix . . . . .	32
3.2 Dynamische Betrachtung des Roboters . . . . .	34
3.2.1 Ableitung des dynamischen Modells des Roboters . . . . .	34
3.2.2 Direktes dynamisches Problem . . . . .	36
3.2.3 Inverses dynamisches Problem . . . . .	36
3.2.4 Regelung des seriellen Roboters . . . . .	36
3.3 Orientierung im Raum . . . . .	40

3.3.1	Euler-Winkel-Konventionen . . . . .	41
3.3.2	Quaternion . . . . .	46
3.3.3	Simulation von praktischen Anwendungen . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Konzeption einer sensitiven Roboterapplikation</b>	<b>53</b>
4.1	Analysephase . . . . .	53
4.2	Planung einer sensitiven Roboterapplikation . . . . .	54
4.2.1	Arbeitsplatzgestaltung . . . . .	55
4.2.2	Roboter . . . . .	56
4.2.3	Steuerungskonzept . . . . .	57
4.2.4	Sicherheitskonzept . . . . .	60
4.2.5	Bedienmethode . . . . .	60
4.2.6	Werkzeug . . . . .	60
4.2.7	Planung einer Messstrategie . . . . .	61
4.3	Methode zur Werkzeugentwicklung . . . . .	63
4.3.1	Das TOTE-Schema . . . . .	63
4.3.2	Der Morphologische Kasten . . . . .	65
4.4	Genauigkeitsbetrachtung eines Prozessroboters mit integrierten Kraft-/ /Momentsensoren . . . . .	66
4.4.1	Eignung des Prüfprozesses . . . . .	67
4.4.2	Analyse des Roboters . . . . .	68
4.4.3	Methodische Vorgehensweise . . . . .	69
4.4.4	Genauigkeitsbetrachtung der integrierten Sensorik . . . . .	70
4.5	Planung zur Prozessausführung . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Entwicklung einer sensitiven Roboterapplikation zur Wicklung endloser Gummi- dichtungen</b>	<b>77</b>
5.1	Entwicklung eines Wickelwerkzeugs . . . . .	77
5.2	Vermessung des Werkzeugs . . . . .	79
5.2.1	Kinematisches Vermessen . . . . .	80
5.2.2	Dynamisches Vermessen . . . . .	81
5.3	Vermessen des Laserliniensensors . . . . .	91
5.3.1	Messung der Referenzposition im Raum . . . . .	93
5.3.2	Separierbare geschlossene Lösung . . . . .	99
5.3.3	Lösung mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate . . . . .	104
5.4	Einmessen der Kinematiken . . . . .	107
5.4.1	Kalibrierung des Wickelzylinders . . . . .	109
5.4.2	Best-Fit-Methode . . . . .	110
5.5	Entwicklung eines Wickelkonzeptes . . . . .	115
5.5.1	Lineares Wickeln . . . . .	117
5.5.2	Wickeln durch Rotation . . . . .	117
5.6	Regelungstechnik . . . . .	118
5.6.1	Dreipunktregler . . . . .	120
5.7	Durchführung der Versuche . . . . .	122

---

5.7.1	Parameteridentifikation . . . . .	123
5.7.2	Anforderung an das Messsystem (Drehmoment/Kraft) . . . . .	125
5.8	Optimierung der kinematischen Konfiguration eines 7-DoF-Roboters zur genaueren Ermittlung der externen Kräfte . . . . .	133
5.8.1	Ermittlung der externen Kräfte . . . . .	133
5.8.2	Manipulierbarkeit der Kinematik . . . . .	134
5.8.3	Optimierung der Roboterkonfiguration eines 7-DoF-Roboters . . . . .	136
<b>6</b>	<b>Validierung des sensitiven Robotersystems</b>	<b>142</b>
6.1	Funktionsnachweis . . . . .	142
6.1.1	Validierung der Methode zur kinematischen Vermessung des Werkzeugs	143
6.1.2	Validierung der Methode zur dynamischen Vermessung des Werkzeugs	144
6.1.3	Validierung der Methode zur Vermessung des Laserliniensensors . . . . .	146
6.1.4	Validierung der Methode zur Einmessung der Kinematik . . . . .	147
6.1.5	Validierung des sensitiven Wickelprozesses . . . . .	148
6.1.6	Validierung der Optimierungsmethode der Roboterkonfiguration zur genaueren Ermittlung der externen Kräfte . . . . .	149
6.2	Erprobung im Gesamtsystem . . . . .	150
6.3	Beantwortung der Forschungsfrage . . . . .	152
6.4	Reflexion der Forschungsarbeit . . . . .	155
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>157</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>
	<b>Anhang</b>	<b>174</b>
A	Liste der veröffentlichten Teilergebnisse . . . . .	174
B	Betreute wissenschaftliche Abschlussarbeiten . . . . .	177



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufgaben der Montage [23] . . . . .	8
2.2	Verarbeitungsprozess der Karosseriedichtung . . . . .	10
2.3	Das Fertigungsverfahren Wickeln in der DIN 8593 Teil 5 (DIN 8593-5) als Untergruppe der DIN 8580 (DIN 8580) [28] . . . . .	11
2.4	Verfahren zur Herstellung von Spulen [28] . . . . .	12
2.5	Allgemeine Struktur des Wickelprozess [28] . . . . .	13
2.6	Einfache oder parallele Anordnung des Wickelgutes [28] . . . . .	13
2.7	Homogener oder gespreizter Lagenaufbau [28] . . . . .	14
2.8	Lagengenauer oder wilder Wicklungsaufbau [28] . . . . .	14
2.9	Darstellung einer Kreuzwicklung [30] . . . . .	14
2.10	links: Geometrie der Dichtung; rechts: ein homogenes Wickelbild der karosserie-seitigen Gummidichtung . . . . .	16
2.11	Produktion einer türseitigen Dichtung . . . . .	17
2.12	Aufbau der Wickelanlage für türseitige Dichtungen am Standort Wadern . . . . .	18
3.1	Kinematische Strukturen des Industrieroboters: seriell (links [38]), hybrid (mit-tig [39]) und parallel (rechts [40]) . . . . .	20
3.2	Kinematische Betrachtung eines Knickarmroboters [38] . . . . .	21
3.3	Kinematische Anordnung der Lokalstruktur: Winkelhand (links:[42]) und Zen-tralhand (rechts:[38]) . . . . .	22
3.4	Modellierung nach der DH-Konvention [48] . . . . .	24
3.5	Kinematische Modellierung des KUKA LBR iiwas . . . . .	25
3.6	Ein Knickarmroboter mit einer Zentralhand [38] . . . . .	27
3.7	Übersicht der Regelungsarten des seriellen Roboters [Bilderquellen: (links: [71], rechts:[72])] . . . . .	37
3.8	Blockschaltbild der modellbasierten Regelung . . . . .	38
3.9	Blockschaltbild eines hybriden Kraft-/Positionsreglers. . . . .	40
3.10	Roll-Pitch-Yaw-Konvention. . . . .	45
3.11	Simulation, die die Orientierung basierend auf RPY, XY'X" Proper Euler-Winkel-Konvention und Quaternion darstellt . . . . .	50
3.12	Simulation, die die Orientierung basierend auf RPY , XY'X" Proper Euler-Winkel-Konvention und Quaternion darstellt . . . . .	52
4.1	Vorgehensweise zur Planung von sensitiven Montagesystemen . . . . .	54
4.2	Konzept eines sensitiven Robotersystems . . . . .	55
4.3	Verschiedene Arten der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter (1:[88]), 2:[89]) . . . . .	56
4.4	Angetriebene Wickelrolle . . . . .	57

---

4.5	Steuerungskomponenten des allgemeinen Steuerungskonzepts, validiert am Beispiel einer Wickelapplikation . . . . .	58
4.6	Entwicklung einer Messstrategie . . . . .	62
4.7	Das TOTE-Schema [99] . . . . .	63
4.8	Lösungsweg, ausgehend von der Aufgabenstellung [99] . . . . .	64
4.9	Weg von der Aufgabenstellung zur Lösung [99] . . . . .	65
4.10	Roboter KUKA LBR iiwa 14 R820 mit sieben Drehmomentsensoren . . . . .	69
4.11	Vorgehensweise der Untersuchung eines Prozessroboters als Messroboter . . . . .	70
4.12	Ursachen-Wirkungs-Diagramm der Einflüsse auf das Messergebnis . . . . .	71
4.13	Linearität in Achse 2 . . . . .	73
4.14	Drehmoment in Achse 2 bei 25 Messungen mit geringen Lasten . . . . .	74
4.15	Drehmoment in Achse 2 bei 25 Messungen bei einer Last von 14 kg . . . . .	74
4.16	Planung zur Prozessdurchführung . . . . .	76
5.1	Modularer Aufbau des Wickelwerkzeugs . . . . .	77
5.2	Entwicklung des Werkzeugprototyps . . . . .	79
5.3	Aufbau des finalen Werkzeugs . . . . .	79
5.4	Roboter SmartPad mit der Applikation <i>Determining tool load data</i> . . . . .	82
5.5	Wickelwerkzeug, montiert auf dem Flansch eines Roboters mit sieben Achsen . . . . .	84
5.6	Durchführung der Referenzmessung vor der Montage des Werkzeugs . . . . .	84
5.7	Position der Schwerpunktlage des Werkzeugs nach Rotation der siebten Achse um $\alpha$ . . . . .	87
5.8	Roboterkonfigurationen zur Identifizierung der z-Koordinate des Schwerpunkts ( $J7= 0^\circ$ [CZ], $J7= -\beta^\circ$ , $J7= \beta^\circ$ ) . . . . .	88
5.9	Vogelperspektive auf das Robotermodell . . . . .	90
5.10	Ein Laserliniensensor Gocator 2330 der Firma LMI Technologies [120], der an einem seriellen Roboter montiert ist und die Basis eines Würfels misst . . . . .	92
5.11	Der beschriebene Würfel, der ein Kalibrierungstarget darstellt . . . . .	94
5.12	Hilfskoordinatensystem . . . . .	96
5.13	Schematische Beschreibung der Transformationen im System . . . . .	99
5.14	Aufbau des Wickeldemonstrators . . . . .	109
5.15	Ein Laserliniensensor Gocator 2330, der die Kante des Wickelzylinders misst . . . . .	111
5.16	Die durch die gewickelte Gummidichtung verursachte Wickelkraft . . . . .	116
5.17	Unterteilung des Wickelzylinders nach der Bewegungsart des Roboters . . . . .	117
5.18	Blockdiagramm eines geschlossenen Regelkreises . . . . .	119
5.19	Systemantwort des KUKA LBR iiwa nach Bewegungsbefehl entlang der Y-Achse (Basis-KS) . . . . .	119
5.20	Blockdiagramm des veränderten Regelkreises . . . . .	120
5.21	Resultierende Regler-Kennlinie, zusammengesetzt aus Dreipunktregler und P-Regler . . . . .	122
5.22	Versuchsaufbau Wickeldemonstrator . . . . .	123
5.23	Das durch die Wickelkraft resultierende Drehmoment auf die siebte Achse . . . . .	126
5.24	oben: Gemessenes Drehmoment entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS; unten: Ermittelte Kraft entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS . . . . .	127
5.25	Auslegung des Tiefpassfilters . . . . .	128

---

5.26	oben: Gemessenes Drehmoment entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS; unten: Ermittelte Kraft entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS . . . . .	129
5.27	oben: Gemessene Kraft entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS; unten: Kraftungenauigkeit . . . . .	130
5.28	oben: Gemessene Kraft entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS; unten: Gemessenes Drehmoment entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS . . . . .	131
5.29	Kraftverlauf entlang einer Wickelebene mit Richtungswechseln . . . . .	132
5.30	Optimierung der Roboterkonfiguration . . . . .	136
5.31	Konditionszahlverlauf entlang einer Wickelebene . . . . .	137
5.32	Minimierung der Konditionszahl . . . . .	138
6.1	CAD-Modell einer 10 kg Gewichtsscheibe, die auf dem Gewichthalter montiert ist . . . . .	144
6.2	Glättung der verrauschten Sinussignaldaten nach Drehung der siebten Achse und Messung des Drehmoments in der 2. Achse, während die 10 kg schwere Gewichtsscheibe am Gewichthalter montiert ist . . . . .	145
6.3	Experimenteller Aufbau am ZeMA zur Kalibrierung des Laserliniensensors . . . . .	146
6.4	Das resultierende Wickelbild auf der ersten Ebene . . . . .	148
6.5	Ausschnitt einer Wickelbildmessreihe mit dem Laserliniensensor . . . . .	149
6.6	Ausführung von kraftgesteuerten Bewegungen auf einem Wellenblock mit verschiedenen Konfigurationen . . . . .	150
6.7	Wickelbild der letzten Ebene, aufgenommen mit einem Laserliniensensor und verarbeitet mithilfe eines Signalverarbeitungsprogramms . . . . .	152
6.8	Der am ZeMA aufgebaute Wickeldemonstrator . . . . .	153

# Tabellenverzeichnis

3.1	DH Parameter des KUKA LBR iiwas . . . . .	25
5.1	Konfigurationen des Roboters . . . . .	85
6.1	Ergebnisse . . . . .	144

# Symbolverzeichnis

## Abkürzungen

**AIAG** Automotive Industry Action Group

**DH** Denavit-Hartenberg

**DIN** Deutsches Institut für Normung

**DMAIC** Define–Measure–Analyse–Improve–Control

**DoF** degree of freedom

**EN** Europäische Norm

**EPDM** Ethylene-Propylene-Diene-Monomer

**GM** General Motors

**GUM** Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

**HD** Hartenberg-Denavit

**HIL** Hardware in the Loop

**ISO** International Organization for Standardization

**JARA** Japan Robot Association

**KS** Koordinatensystem

**KVP** kontinuierliche Verbesserungsprozesse

**l.O.** links Oben

**LBR** Leichtbauroboter

**m.U.** mitte Unten

**MRK** Mensch-Roboter-Kollaboration

**MSA** Measurement System Analysis

**OEM** Original Equipment Manufacturer

**r.O.** rechts Oben

**RPY** Roll-Pitch-Yaw

**SaarGummi** SaarGummi Technologies International GmbH

**TCP** Tool-Center-Point

**TCP/IP** Transmission-Control-Protocol/Internet-Protocol

**TOTE** Test-Operate-Test-Exit

**VDA** Verband der Deutschen Automobilindustrie

**VDI** Verein Deutscher Ingenieure

**vergl.** vergleiche

**ZeMA** Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik

## Formelzeichen

### Lateinische Kleinbuchstaben

${}^{i-1}\underline{r}_{i,i-1}$  Ortsvektor vom Ursprung des Koordinatensystems  $i$  zum Ursprung des Koordinatensystems  $i-1$  in das Koordinatensystem  $i-1$

${}^0\underline{e}_{i-1z}$  Einheitsvektor der Z-Achse des Koordinatensystems  $i-1$  im Koordinatensystem  $0$

$a, b, c$  Parameter bei der Vermessung des Laserliniensensors

$b_{ij}$  Elemente einer Drehmatrix/Transformationsmatrix

$c(\mathbf{J}_g)$  Konditionszahl

$d, e, f$  Hilfsparameter bei der Vermessung des Laserliniensensors (Vektor-Längen)

$d_{i,i-1}$  Achslänge

$g$  Erdbeschleunigung

$\underline{g}(q)$  Vektor der Gravitationskräfte

$h$  Hebelarm

$l_{i,i-1}$  Kreuzungsabstand

$m$  Masse

$\underline{n}$  Normalenvektor

$\mathbf{p}$  beliebige Quaternion

$\underline{q}$  Drehwinkelvektor

$\mathbf{q}$  Quaternion

$\underline{q}$  Vektor der verallgemeinerten Gelenkvariablen

$q_i$  Verallgemeinerte Gelenkvariable

$\underline{\dot{q}}$  Vektor der verallgemeinerten Gelenkgeschwindigkeit

$\underline{\ddot{q}}$  Vektor der verallgemeinerten Gelenkbeschleunigung

$r$  Fehler, Abweichung

$\underline{r}$  Hebelarm

$\underline{r}_H$  Translationsvektor der homogenen Matrix  $\mathbf{H}$

$\underline{r}_v$  3D-Rotationsvektor

$\underline{u}$  Hauptachse bei einer Rotation mit Hilfe einer Quaternion

$\underline{v}$  Vektor der Bahngeschwindigkeiten

$\underline{v}_i$  Eigenvektor von  $\lambda_i$

$\underline{w}$  kartesische Pose des Roboters

$\bar{x}_g$  Mittelwert der Messwerte bei wiederholter Messung

$x_m$  Referenzwert des Merkmals  $x$

### **Lateinische Großbuchstaben**

${}^{i-1}\mathbf{D}_i$  Drehmatrix von KS  $i$  nach KS  $i-1$

**A** Transformationsmatrix zwischen zwei Flanschkoordinatensystemen bei unterschiedlichen Roboterposen

**B** Transformationsmatrix zwischen zwei Sensorkoordinatensystemen bei unterschiedlichen Roboterposen

$B_i$  Bias

$\mathbf{C}(\underline{q}, \underline{\dot{q}}) \cdot \underline{\dot{q}}$  Vektor der verallgemeinerten Kreiselkräfte

**D** diagonale Matrix der Eigenwerte in abnehmender Reihenfolge

$\underline{F}$  Gravitationskraft

$\underline{F}_{ext}$  Vektor der externen Kräfte/Drehmomente



**G** Hilfsmatrix (orthogonal)

**H** homogene Matrix

$\mathbf{I}_{3 \times 3}$  Einheitsmatrix der Größe 3x3

${}^{i-1}\mathbf{T}_i$  Transformationsmatrix vom Koordinatensystem  $i$  in das Koordinatensystem  $i-1$

$J_7$  Drehwinkel des siebten Gelenks

$\mathbf{J}_a$  analytische Jacobimatrix

$\mathbf{J}_g$  geometrische Jacobimatrix

$\underline{K}$  Vektor der ermittelten kartesischen Kräfte/Drehmomente

$K$  kinetische Energie

$L$  Lagrange'sche Funktion

$M$  Drehmoment

$M_i$  Drehmoment in der  $i$ -ten Achse

$\mathbf{M}(\underline{q})$  symmetrische und positiv definite reale Massen-Matrix, abhängig vom Vektor der verallgemeinerten Gelenkvariablen

$\mathbf{N}$  orthogonale Matrix der für die Eigenwerte ungleich Null relevanten Eigenvektoren

$\mathbf{P}$  symmetrische positive semi-definite Matrix

$P_i$  3D-Messpunkt von der Wickelrolle

$P_m$  Mittelwert aller 3D-Messpunkte von der Wickelrolle

$\mathbf{D}_H$  Drehmatrix der homogenen Matrix  $\mathbf{H}$

$\mathbf{D}_X$  Drehmatrix der homogenen Transformationsmatrix  $\mathbf{X}$

$\mathbf{S}$  Selektionsmatrix der kraft-/momentengeregelten Freiheitsgrade

$\tilde{\mathbf{S}}$  Selektionsmatrix der positionsgeregelten Freiheitsgrade

**U** orthogonale Matrix

$U$  potentielle Energie

**X** Transformationsmatrix zwischen dem Sensor-KS und dem Flansch-KS

### Griechische Kleinbuchstaben

$\alpha, \Delta\alpha$  Drehwinkel um die raumfeste  $z$ -Achse, Drehwinkeldifferenz

$\beta, \Delta\beta$  Drehwinkel um die raumfeste  $y$ -Achse, Drehwinkeldifferenz

$\delta$  Rollen-Winkel um die  $Z$ -Achse (RPY-Konvention)

$\delta_{i,i-1}$  Drehwinkel

$\delta_m$  fester Offsetwinkel

$\eta$  Nicken-Winkel um die  $Y'$ -Achse (RPY-Konvention)

$\gamma, \Delta\gamma$  Drehwinkel um die raumfeste  $x$ -Achse, Drehwinkeldifferenz

$\lambda_{gi}$  Parameter einer Geradengleichung

$\lambda_i$  Eigenwert einer Matrix

$\lambda_{i,i-1}$  Kreuzungswinkel

$\underline{\omega}$  Vektor der Kreisgeschwindigkeiten

$\underline{\tau}$  Vektor der verallgemeinerten Antriebsmomente

$\theta_v$  Winkel zwischen zwei Vektoren

$\theta$  Rotationswinkel um eine bestimmte Achse

$\vartheta$  Drehwinkel um einen 3D-Rotationsvektor

$\xi$  Gieren-Winkel um die  $X''$ -Achse (RPY-Konvention)

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Einsatzgebiete von Industrierobotern haben sich seit dem ersten Robotereinsatz der General Motors (GM) Fertigungslinie in den USA im Jahr 1961 enorm weiterentwickelt. Die Aufgaben und Anforderungen sowie die Produktvielfalt und -varianten werden immer komplexer und die Produktlebenszyklen immer kürzer [1]. Bis vor kurzem wurden Industrieroboter hauptsächlich für sich wiederholende, schwere oder gefährliche Arbeiten eingesetzt [2]. Die neue Generation von sensitiven Robotern öffnet die Tür zu zahlreichen Einsatzszenarien [3].

Die Industrieroboter sind meistens mit externen Sensoren ausgestattet, um definierte Aufgaben in der Produktion zu erfüllen. Bildverarbeitungssysteme werden in der Robotik besonders häufig eingesetzt, da sie es den Robotern ermöglichen, die Umgebung einzusehen und somit komplexe Tätigkeiten auszuführen [4]. Trotz dieser Fähigkeit kann die Leistung sichtbasierter Robotersysteme in verschiedenen Situationen beeinträchtigt werden, sodass die Bildverarbeitungssysteme allein nicht ausreichen, um die erforderlichen Aufgaben zu erfüllen. Daher erscheinen sensitive (oder kraftgesteuerte) Robotersysteme als eine alternative Lösung, um die Einsatzbereiche des Roboters zu erweitern. Bei kraftgesteuerten Roboterapplikationen werden die auf den Roboter wirkenden externen Kräfte zur Modifikation der Roboterbahn und zur Identifikation der Umgebung herangezogen. Meistens gelingt es, eine hybride Lösung aus sichtbasierten und kraftgesteuerten Robotersystemen einzusetzen [5].

Die Entwicklung und Erforschung von kraftgesteuerten Roboterapplikationen hat in den letzten drei Jahrzehnten stark zugenommen. Die Kraftsteuerung in der Robotik spielt auch eine zentrale Rolle bei der Erzielung eines robusten und vielseitigen Verhaltens von Robotersystemen in offenen und komplizierten Umgebungen, da sie eine intelligente Reaktion in unvorhergesehenen Situationen ermöglicht und die Mensch-Roboter-Interaktion verbessert [6]. Mehrere Produktionsprozesse wie z.B. Schleifen, Polieren, Entgraten und Fügen können durch

rein positionsgeregelte Applikationen nicht realisiert und werden daher durch kraftgesteuerte Roboterapplikationen umgesetzt.

Die Entwicklung und Optimierung von Produkten führt zur Notwendigkeit neuer Applikationen in der Produktion. Infolgedessen entstehen neue Prozesse, die zum Teil nicht ergonomisch sind oder nicht den Sicherheitsanforderungen entsprechen und somit der Entwicklung robotergestützter Applikationen bedürfen.

Auch die Entwicklung der neuen Generation der Gummidichtungen in der Automobilindustrie zur Abdichtung der Karosserie des Fahrzeugs erfordert die Integration neuer Wickeltechnologien in der Produktionslinie. Die entwickelte endlose Gummidichtung ist ein elastisches Strangprofil mit einer asymmetrischen Geometrie, wodurch sich sein Auf- und Abwickeln auf dem Ladungsträger schwierig gestaltet. Die Automatisierung der Wicklung solcher Komponenten in der Industrie kann durch konventionelle Wickeltechnologien und positionsgeregelte Robotersysteme nicht umgesetzt werden. Es bedarf daher kraftgeregelter Robotersysteme zur Entwicklung einer sensitiven Wickelapplikation.

Der Begriff *Sensitivität* bzw. *Empfindlichkeit* bezeichnet die Wertänderung der Ausgangsgröße eines Messgerätes in Relation zur ursächlichen Wertänderung der Eingangsgröße [7]. Ein Beispiel ist die Veränderung des Antriebsmoments (Ausgangsgröße, gemessen als elektrische Spannung) als Folge der Veränderung des Drehmoments bzw. der Kraft (Eingangsgröße).

In der Robotik werden sensitive Roboter eingesetzt, deren Programm nicht rein positionsgeregelt abläuft, sondern definierte Nachgiebigkeit zulässt [8]. Der Roboter reagiert dabei in Echtzeit auf die von einem Kraftsensor ausgehenden Informationen und ist so in der Lage, von den einprogrammierten Bahn- und Geschwindigkeitsprofilen abzuweichen [9].

Der Begriff intelligente Sensorik wird in der Literatur häufig für Sensoren verwendet, die über einfache integrierte Signalverarbeitungsmethoden Messungen und Auswertungen durchführen können [10].

Diese Arbeit beschäftigt sich stark mit der industriellen Robotik und daher werden die üblichen verwandten Terminologien und Darstellungsweisen aus der Literatur [11, 12, 13, 14, 15, 16, 6, 17, 18] in diesem Bereich verwendet.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Entwicklung einer Methodik zur Realisierung einer sensitiven Montageaufgabe basierend auf einem Roboter mit integrierten Drehmomentensensoren, externen Sensoren zur Implementierung der verschiedenen Vermessungsaufgaben und einem neuartigen Werkzeug.

Zur Umsetzung sensitiver Roboterapplikationen soll eine genaue Ermittlung der externen Kräfte/Momente mittels interner integrierter oder externer Kraft-/Momentsensoren erfolgen. Die erforderliche Genauigkeit der ermittelten Messgröße richtet sich nach den Anforderungen des Produktes und des Prozesses. Die Ausführung der Roboterbewegung im Rahmen sensitiver Aufgaben basiert auf der Rückkopplung der externen Kräfte. Daher wird ein Kraftregler zum Regeln einer gegebenen Kraft bzw. eines gegebenen Drehmoments entworfen. Die Regler-Struktur und die Toleranzen der Stellglieder hängen wiederum von Produkt und Prozess ab.

Darüber hinaus ist auch das Roboterwerkzeug ein wichtiger Bestandteil bei der Aufgabenbewältigung. Es ist daher auch die Entwicklung und Inbetriebnahme des Werkzeugs zu betrachten. Bei der Inbetriebnahme werden die kinematischen und dynamischen Größen des Werkzeugs identifiziert und zur genaueren Ausführung der Aufgabe in die Robotersteuerung eingegeben. Außerdem werden externe Sensoren zur Überwachung des Prozesses und zur Vermessung der verschiedenen Kinematiken und Merkmale benötigt. In den meisten Fällen werden Signalverarbeitungsalgorithmen erforderlich sein, um die definierten Merkmale zu identifizieren.

Aus der Zielsetzung dieser Arbeit kann folgende Forschungsfrage abgeleitet werden:

## **Wie müssen die Hauptbestandteile eines sensitiven Robotersystems zur Ausführung von sensitiven Montageaufgaben gestaltet sein?**

Die Forschungsfrage kann wiederum in folgende Forschungsthemen gegliedert werden:

- Mit welchen Modulen, z. B. Sensoren, Aktoren und Werkzeuge, muss ein Robotersystem ausgestattet sein, um sensitive Montageaufgaben auszuführen?
- Wie wird ein Werkzeug bei der Inbetriebnahme dynamisch vermessen?
- Wie werden externe Sensoren, z.B. Laserliniensensoren zur Vermessung externer Kinematiken und Merkmale, kalibriert?
- Wodurch kann eine genauere Vermessung der externen Kräfte und Drehmomente erzielt werden?
- Welche Regelstruktur ist nötig, um die Roboterbewegung zu realisieren?

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die oben erwähnte Zielsetzung wird in sieben Kapiteln abgebildet. In Kapitel 1 erfolgt eine Einführung in die Problematik. Darin werden die Problemstellung und die Zielsetzung der Arbeit beschrieben.

In Kapitel 2 werden die Begriffe der Montage aus der Literatur abgeleitet. Der Stand der Technik der Wickelapplikation in Forschung und Industrie wird präsentiert. Dabei werden die Gummiprofile und die aktuelle Produktionstechnologie betrachtet. Daraus wird der Bedarf an sensitiver Robotik abgeleitet.

In Kapitel 3 werden die Grundlagen der Robotik dargestellt. Handhabungsgeräte werden nach ihrem kinematischen Aufbau klassifiziert. Danach wird auf das kinematische und dynamische Problem des seriellen Roboters eingegangen. Es wird eine Übersicht über die Regelungsarten serieller Roboter vorgestellt. Abschließend wird ein Vergleich von praktisch

---

anwendbaren mathematischen Beschreibungen der Orientierung und Rotation im dreidimensionalen euklidischen Raum angestellt.

Die Konzeption einer sensitiven Roboterapplikation wird in Kapitel 4 präsentiert. Darin wird ausgehend von der Analysephase ein Konzept zur sensitiven Roboterapplikation abgeleitet. Darüber hinaus wird eine Methode zur Werkzeugentwicklung dargestellt und die Eignung des Prozessroboters als Messroboter untersucht. Abschließend folgt eine Gliederung der geplanten Prozessausführung.

Die in Kapitel 4 entwickelte Konzeption wird in Kapitel 5 zur Realisierung einer sensitiven Wickelapplikation einer endlosen karosserie-seitigen Gummidichtung angewandt. Dazu wird ein Werkzeug entwickelt und vermessen. Daraufhin wird ein neuartiges Verfahren zur Identifikation der dynamischen Parameter vorgestellt, gefolgt von der Einführung einer Methode zur Vermessung von 3D-Bauteilen und vordefinierten Merkmalen mittels Laserliniensensoren. Anschließend werden ein Wickelkonzept und die dazu benötigte Regelungstechnik entwickelt und beschrieben. Die Parametrierung des entwickelten Wickelprozesses erfolgt durch die durchgeführten Versuche. Abschließend wird eine Optimierung der kinematischen Konfiguration des 7-DoF-Roboters (DoF = degree of freedom) zur genaueren Ermittlung der externen Kräfte vorgenommen.

Die entwickelten Konzepte und Methoden werden praktisch durch Demonstratoren, die am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) aufgebaut sind, validiert. Die Ergebnisse werden in Kapitel 6 dargestellt.

Eine Zusammenfassung dieser Arbeit findet sich in Kapitel 7. Abschließend wird ein Ausblick auf weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gegeben.

## 2 Stand der Technik in Forschung und Industrie

Es werden im Folgenden Begriffe und Grundlagen eingeführt und erläutert, die für das Verständnis dieser Arbeit zentral sind. Anschließend werden die Grundlagen des Wickelprozesses vorgestellt. Abschließend wird der Bedarf an einem sensitiven Wickelprozess für die Gummiindustrie in der Automobilebranche abgeleitet.

### 2.1 Begriffe und Definitionen

Diese Arbeit entstand am Lehrstuhl für Montagesysteme von Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller im Rahmen des Projekts *Entwicklung eines Versuchswicklers*, das durch das Zentrale Technologieprogramm Saar gefördert wird. Die Begrifflichkeiten sind daher aus Definitionen des Lehrstuhls und der Literatur übernommen worden. Verschiedene Funktionalitäten wurden zusätzlich im Projekt *FourByThree* validiert. Das Projekt *FourByThree* erhielt Förderung durch das EU-Förderprogramm *Horizont 2020*. Weiterhin wurde die Forschung gefördert durch das europäische Interreg Projekt *Robotix-Academy*.

#### 2.1.1 Montage

Der Begriff *Montieren* bzw. *Montage* wird in den einschlägigen Normen und Richtlinien nicht einheitlich definiert [19]. Eine eindeutige begriffliche Abgrenzung fällt daher schwer. Eine mögliche Definition sieht die Gleichsetzung mit dem Begriff *Fügen* vor und ordnet Montage dem Bereich der Fertigung zu [20, 21, 22]. Auch für letzteren Begriff findet sich keine einheitliche Definition. So wird *Fertigung* teilweise als reine Teilefertigung definiert, mitunter aber auch mit dem Begriff *Produktion* gleichgesetzt und damit weiter gefasst.



Die moderne Literatur [23, 24, 25] verortet die Montage sowohl im Bereich der (Teile-) Fertigung als auch im Bereich der Produktion, was auch dem allgemeinen Sprachgebrauch von *Montage* am nächsten kommt.

In der Richtlinie 2815 vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) [21] wird unter industrieller Montage in der Produktion das Zusammensetzen von Bauteilen oder Baugruppen zu Erzeugnissen oder Baugruppen höherer Erzeugnisebenen in der Produktion definiert. Der planmäßige Zusammenbau von Einzelteilen zu Produkten und die Sicherstellung der Produktion gelten als die primären Aufgaben der Montage.

Die Montage ist somit zentrales Element der industriellen Produktion mehrteiliger Produkte [23]. Die Produkte werden im Montagesystem zusammengebaut, welches zumeist mehrere Montagestationen umfasst, die wiederum die nötigen Betriebsmittel für den Montageprozess aufweisen.

Aufgrund ihrer Stellung am Ende der Produktion bietet die Montage die letzte Möglichkeit für die Sicherung der Qualität des Produkts. Im Montageprozess werden in der Regel durch den Einsatz unterschiedlicher Bauteile und Softwares verschiedene Produktvarianten erzeugt. Da die Montage am Ende der Wertschöpfungskette liegt, ist sie mit sämtlichen Störungen und Fehlern aus vorangegangenen Arbeitsprozessen belastet. Zu den Aufgaben innerhalb des Montageprozesses zählen daher auch das Ermitteln und Ausgleichen von qualitativen Mängeln sowie von Problemen organisatorischer und terminlicher Art. Das Aufgabenfeld der Montage ist somit vielfältig und beschränkt sich nicht auf das reine Zusammenbauen bzw. Fügen von Bauteilen. Das Aufgabenspektrum der Montage hängt ab von der Größe und Komplexität des Produkts, vom Produktionsvolumen und Automatisierungsgrad sowie von der Organisationsform. Trotz dieser großen Bandbreite an Voraussetzungen für die Montage sind alle Montagesysteme auf Grundaufgaben reduzierbar. Einen ausführlichen Einblick in die verschiedenen Montageaufgaben liefern [25, 26, 24]. Müller gliedert die Aufgaben der Montage in fünf Klassen (siehe Abb. 2.1): Fügen, Handhaben, Inbetriebnahme, Hilfsprozesse und Sonderoperationen [27].

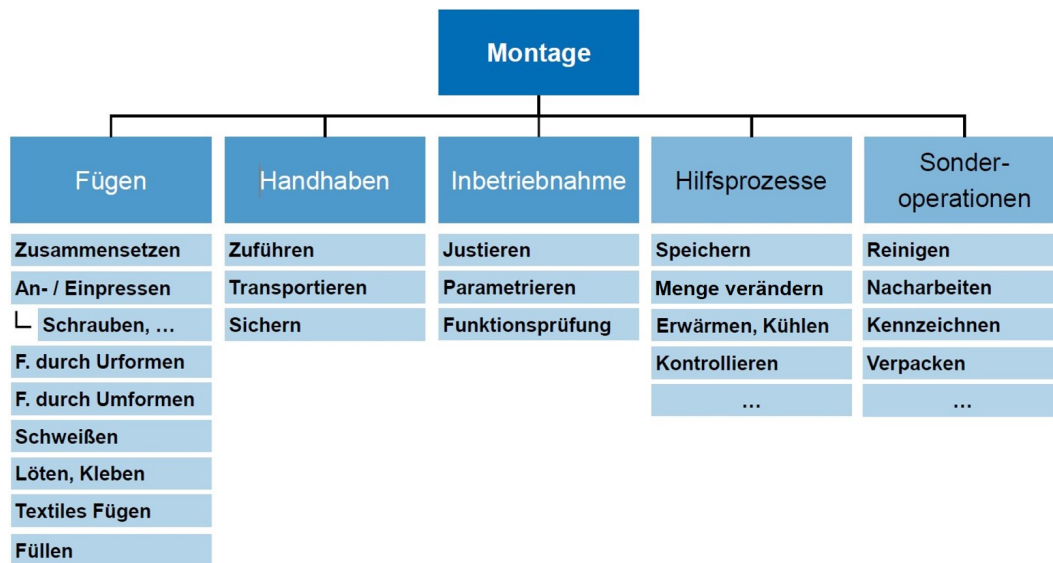


ABBILDUNG 2.1: Aufgaben der Montage [23]

**Fügen** gilt als Hauptaufgabe der Montage [24]: „Das Fügen ist das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt“ [20]. Das Schrauben und das Zusammensetzen gelten als die gängigsten Fügeverfahren. Für die Verarbeitung neuer Werkstoffe sind jedoch neue Fügeverfahren nötig.

Eine weitere zentrale Aufgabe im industriellen Montageprozess ist das **Handhaben**. Zum Prozess des Handhabens zählen das **Zuführen**, **Transportieren** und **Sichern** von Bauteilen bzw. Baugruppen. Das Sichern bzw. Entsichern ermöglicht oder verhindert Bewegungsoperationen und beeinflusst somit die Ausführung von Transport-, Zuführ- und Fügeoperationen. Durch Zuführen werden die Montageobjekte und gegebenenfalls Hilfsfügeteile am Ort der Montageoperation bereitgestellt. Die Anforderungen des jeweiligen Montageprozesses bestimmen dabei die Position und Orientierung des Objekts, die über den Ordnungszustand (OZ = Orientierungsgrad/Positionierungsgrad) definiert sind. Der Teilprozess des Transportierens bezeichnet die Bewegung von Bauteilen bzw. Baugruppen von einer Prozessstation zur nächsten.

Die **Inbetriebnahme** als dritte zentrale Aufgabe im Montageprozess ist die letzte Phase, in der die Qualität des Produkts beeinflusst und die grundlegenden, in der Produktspezifikation

erfassten Funktionen überprüft bzw. sichergestellt werden können. Zur Inbetriebnahme gehören demnach die **Funktionsprüfung**, die **Justage** und die **Parametrierung**. Als eine Möglichkeit der Funktionsprüfung sei die Methode Hardware in the Loop (HIL) [28] genannt, bei der Baugruppen bereits frühzeitig getestet bzw. kontrolliert werden, beispielsweise in der Vormontage. Auf diese Weise werden frühzeitig Fehler identifiziert, woraus eine Reduzierung der Nacharbeit und eine höhere Direktläuferquote folgt. Justieren beinhaltet die Beseitigung von Bauteiltoleranzen durch systematisches Abgleichen und Einstellen zur Gewährleistung der Produktfunktion [7]. Beim Parametrieren werden Konfigurationswerte zur Definition des Betriebsverhaltens eines Produkts in eine Steuerung eingegeben bzw. eingespeichert.

Neben den zentralen Grundaufgaben des Fügens, Handhabens und der Inbetriebnahme zählen auch **Sonderoperationen** und **Hilfsprozesse** zu den Aufgaben der Montage. Erstere sind Maßnahmen, die aber den Produktwert steigern, jedoch nicht Teil der Grundaufgaben sind. Darunter fallen beispielsweise das Kennzeichnen und Verpacken von Bauteilen. Letztere dagegen sind für die Montage notwendige Maßnahmen, die den Produktwert nicht steigern. Dazu zählen z. B. das Speichern und Kontrollieren von Bauteilen in der Produktion.

## 2.2 Grundlagen des Wickelprozesses

Das Haupteinsatzgebiet der Wickeltechnologie in der Industrie liegt im Bereich der Elektrofertigung [28]. Wickeltechnologien werden häufig für einfache Endlosprodukte wie Kabel eingesetzt. Ziel ist es, diese Technologie auf die Wicklung von karosserie-seitigen Gummidichtungen zu übertragen. Die komplexen Querschnitte des Gummiprofils und die hohen Anforderungen aufgrund ihrer Biege- und Zugfestigkeit machen das Wickeln jedoch sehr komplex.

### 2.2.1 Zuordnung des Wickelprozesses

Vor der Prozessbeschreibung ist die Einordnung des Prozesses in die Gesamtstruktur und in die eigentliche Anwendungsform erforderlich. Eine Möglichkeit wäre, das Wickeln von Gummiprofilen durch die Operation *Fügen* zu beschreiben. Der Begriff *Fügen* bezeichnet „ein auf

Dauer angelegtes Verbinden von Werkstücken von geometrisch bestimmter Form.“ Da die Gummiprofile jedoch nur zum Transport auf Metallzylinder aufgewickelt werden, ist das Wickeln in diesem Fall nicht auf Dauer angelegt. Der Wickelprozess wird daher besser durch die Operation *Handhaben* beschrieben: „Handhaben wird als das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem definiert.“ Die Profile werden in definierter Lage auf den Metallzylinder gewickelt und damit in einer vorgegebenen räumlichen Anordnung kurzzeitig gespeichert. Im Gesamtzusammenhang der Applikation kann der Wickelprozess als ein Zuführvorgang aufgefasst werden. Nach dem Aufwickeln des Endlosgummistrangs folgt ein möglicher Transportprozess, das Abwickeln und Zuschneiden des Profils sowie die Zuführung und Montage der Karosseriedichtung zum bzw. am Fahrzeug (siehe Abb. 2.2). Aus diesem Grund ist die Beschreibung des Prozesses durch die Operation *Handhaben* im Gesamtzusammenhang treffender. *Fügen* beschreibt die Herstellung eines Endprodukts, während durch den Wickelprozess lediglich ein Zwischenprodukt von kurzer Dauer erstellt wird, das schließlich am Band beim Original Equipment Manufacturer (OEM) weiterverarbeitet wird.

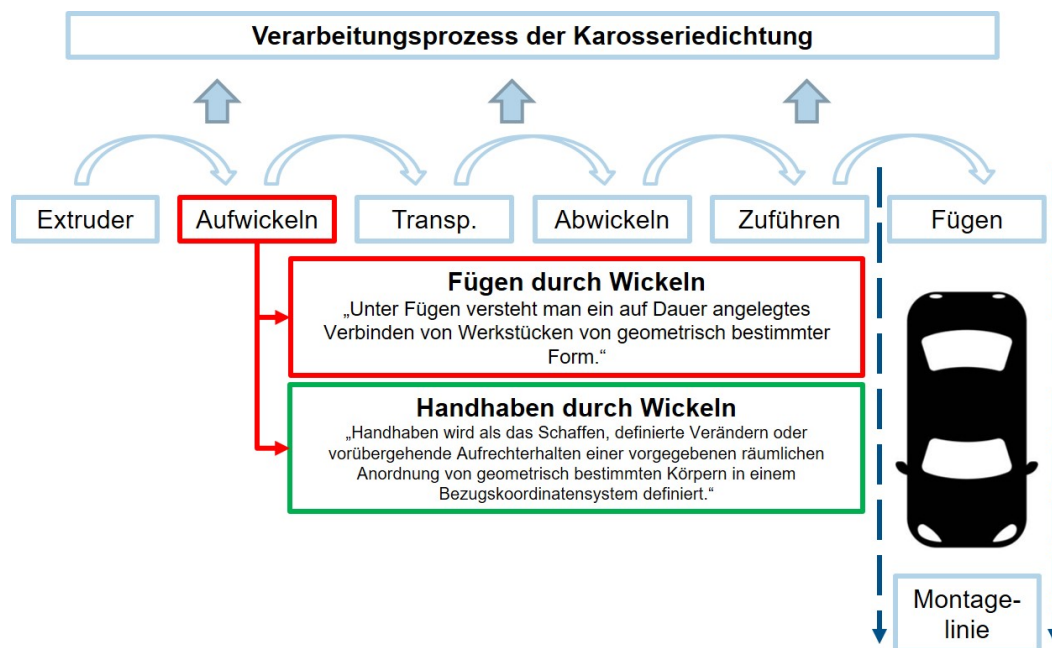


ABBILDUNG 2.2: Verarbeitungsprozess der Karosseriedichtung

## 2.2.2 Adaption aus der Elektroindustrie

Wickeltechnologien sind in der Elektroindustrie bereits weit verbreitet. Daher werden im Folgenden die gängigen Definitionen der Forschungsliteratur zu diesem Bereich betrachtet. Im Handbuch *Fügen, Handhaben und Montieren* des Hanser Verlages wird das industrielle Wickeln im Zusammenhang mit der DIN 8580 (Deutsches Institut für Normung) [29] klassifiziert und dem Bereich der Montagetechnik zugeordnet. Wickeltechnologien werden häufig bei der Spulenproduktion eingesetzt. Die Hauptarbeitsschritte der Spulenfertigung folgen aus dem grundsätzlichen Aufbau einer Spule: Paketieren des Kerns, Vorfertigen und Vorbereiten des Spulenkörpers, Wickeln der Wicklung, Isolieren und Kontaktieren. Der DIN 8580 zufolge kann das „Wickeln mit Draht“ zum Fügen durch Umformen gezählt werden und gemäß der DIN 8593 Teil 5 (DIN 8593-5) genauer definiert werden als „Fügen eines Innenteils mit einem Draht durch dessen fortlaufendes Biegen um das Innenteil“ (siehe Abb. 2.3).

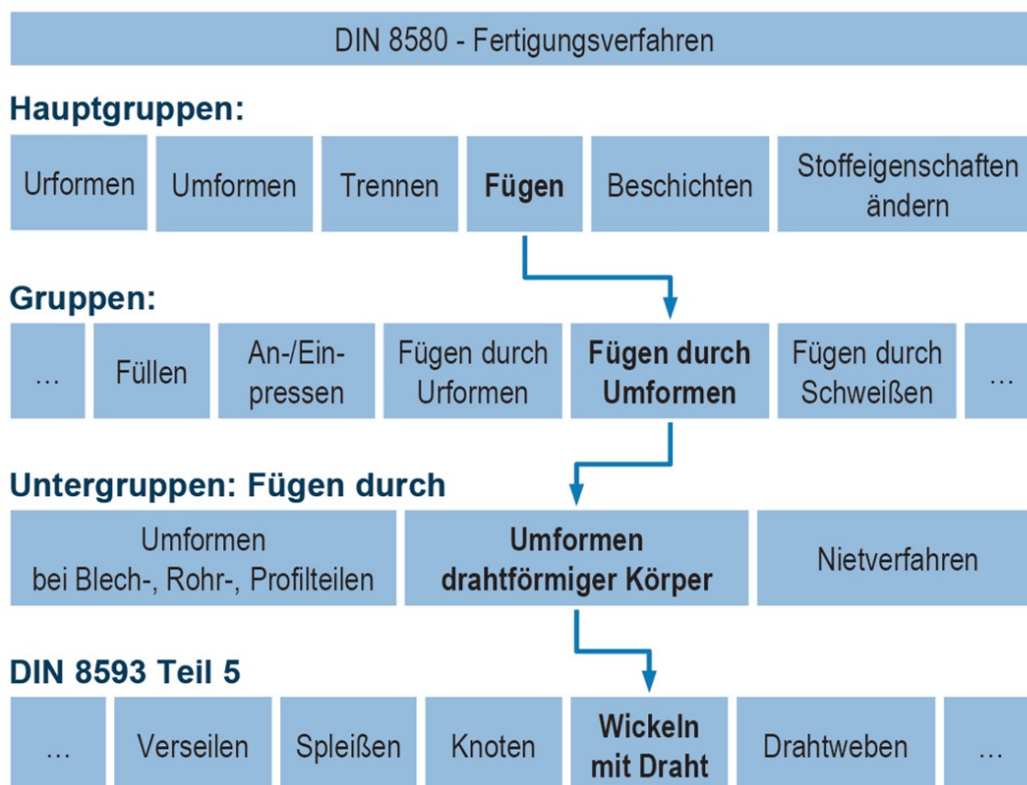


ABBILDUNG 2.3: Das Fertigungsverfahren Wickeln in der DIN 8593 Teil 5 (DIN 8593-5) als Untergruppe der DIN 8580 (DIN 8580) [28]

Wickelverfahren lassen sich in Bezug auf die Herbeiführung der für das Aufwickeln des Drahtes erforderlichen Relativbewegung differenzieren (siehe Abb. 2.4). Beim Linearwickeln überlagert die Linearbewegung des Drahtführers die Rotationsbewegung des Spulenkörpers. Für das Flyerwickeln ist eine rotierende Bewegung der Drahtführung bei ortsfestem Spulenkörper charakteristisch. Das Nadelwickeln zeichnet sich dadurch aus, dass die Drahtverlegung durch eine Hub-Schwenk-Bewegung zwischen Drahtführung und Spulenkörper erfolgt. Das Ringkernwickelverfahren mit angetriebenen und teilbaren Magazinen wird für das Bewickeln geschlossener, torusförmiger Kerne verwendet. Abhängig vom Produktionsvolumen werden für die Fertigung wickeltechnischer Produkte entweder manuell bediente Tischwickelmaschinen, Wickelhalbautomaten oder Wickelvollautomaten eingesetzt [28].

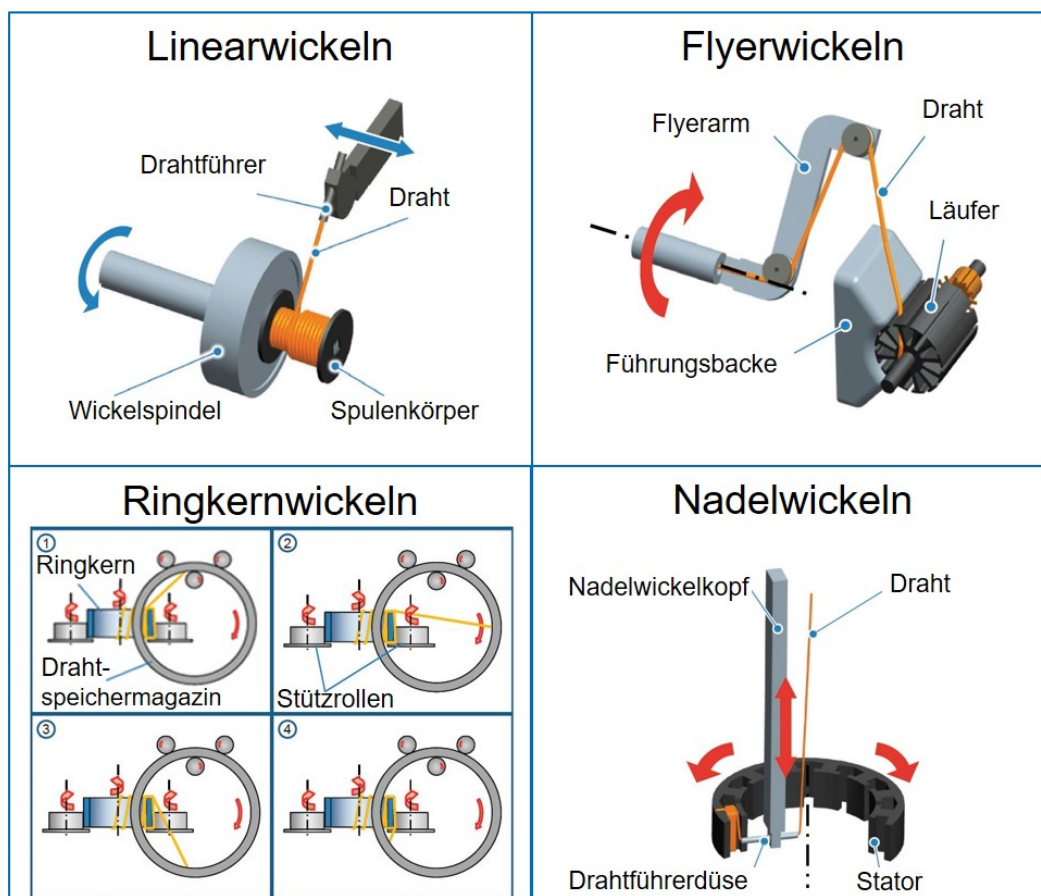


ABBILDUNG 2.4: Verfahren zur Herstellung von Spulen [28]

Im Hinblick auf das Wickeln von Gummidichtungen eignet sich das Linearwickeln am besten, da es dem geplanten Prozess am ehesten entspricht. Eine genauere Betrachtung der übrigen Verfahren Flyer-, Ringkern- und Nadelwickeln findet daher im Folgenden nicht statt. Der Ablauf

des Wickelns im industriellen Kontext kann unabhängig vom gewählten Verfahren folgendermaßen beschrieben werden (siehe Abb. 2.5).



ABBILDUNG 2.5: Allgemeine Struktur des Wickelprozess [28]

Durch Bevorratung des Wickelgutes ist die Bereitstellung des zu wickelnden Materials für die Dauer des gesamten Prozesses gesichert. Das Wickelgut gelangt durch Führungen und Umlenkungen zur Drahtbremse, die eine konstante Zugspannung gewährleistet. Schwankungen in der Zugkraft oder ein Überschuss an Material werden durch Ausgleichselemente verhindert. Die Drahtführung leitet das Wickelgut zur finalen Ablageposition weiter und platziert es auf dem rotierenden Wickelkörper. Für die Ablageart, sprich die finale Anordnung des Wickelgutes auf dem Wickelkörper, gibt es zwei Möglichkeiten: erstens das Wickeln in einfacher oder paralleler Anordnung und zweitens das Wickeln in Kreuzlage. Eine Wicklung in einfacher bzw. paralleler Anordnung ist in Abb. 2.6 zu sehen. Während beim einfachen Wickeln nur ein einzelner Materialstrang auf dem Grundkörper abgelegt wird, erfolgt die parallele Wicklung mit mehreren Materialsträngen gleichzeitig. Beim einfachen sowie beim parallelen Wickeln kann der Lagenaufbau sowohl in „homogener als auch gespreizter Form“ erfolgen (siehe Abb. 2.7) [28].

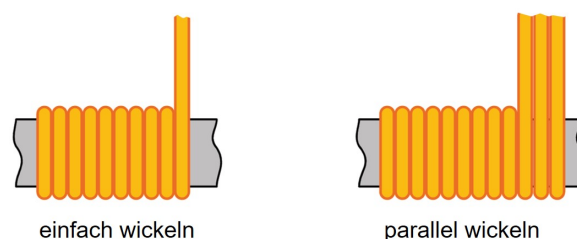


ABBILDUNG 2.6: Einfache oder parallele Anordnung des Wickelgutes [28]

Es wird eine maximale Ausnutzung des verfügbaren Wickelraums angestrebt. Daher wird das

Wickeln im homogenen Lagenaufbau als Idealbild festgelegt. Durch den geordneten Aufbau lagen genauer Wicklungen können im Vergleich zu wildgewickelten Spulen (siehe Abb. 2.8) deutlich höhere Qualitätsanforderungen eingehalten werden.

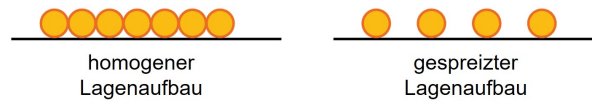


ABBILDUNG 2.7: Homogener oder gespreizter Lagenaufbau [28]

Bestehen keine besonderen Anforderungen an den Wicklungsaufbau, kann bei der Anordnung die sogenannte Wildwicklung zum Einsatz kommen. Diese Wicklungsart erlaubt das ungleichmäßige Neben- oder Übereinanderliegen der Windungen, das Entstehen von Kreuzpunkten sowie das Abrutschen von Windungen in bereits gewickelte Lagen [28].

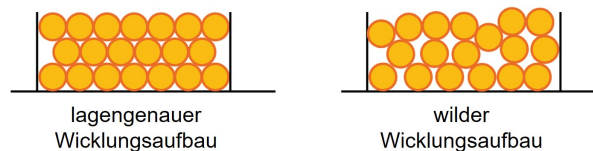


ABBILDUNG 2.8: Lagengenaue oder wilder Wicklungsaufbau [28]

Ein zur parallelen Anordnung alternatives Verfahren ist die Kreuzwicklung. Diese bezeichnet einen besonderen Lagenaufbau, der ursprünglich in der Garnindustrie eingesetzt wurde. Charakteristisch für diese Art von Wicklung ist ein gespreizter Aufbau in Form einer Schraubenwicklung (siehe Abb. 2.9) [30].



ABBILDUNG 2.9: Darstellung einer Kreuzwicklung [30]

Für den geplanten Prozess ist eine genauere Erläuterung der Kreuzwicklung nicht von Belang. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle jedoch auf sie verwiesen.



## 2.3 Produktbetrachtung und Szenario der sensitiven Wickelapplikation

Das Wickeln von endlosen Gummidichtungen ist eine komplexe Aufgabe und eignet sich somit sehr gut als Entwicklungs- und Validierungsszenario. Im Folgenden werden daher das Beispielprodukt *endlose Gummidichtung*, die vorhandene Produktionslinie und der vorhandene Wickelprozess bei der Firma SaarGummi Technologies International GmbH (SaarGummi) [31] näher beleuchtet.

### 2.3.1 Analyse des Produkts

In der Automobilindustrie dienen Gummidichtungen im Zusammenwirken mit den Türen des Fahrzeugs der Abdichtung der Karosserie vor Außeneinflüssen. Vor der neuen Generation an endlosen Gummidichtungen musste der Zulieferer das Gummiprofil für die Weiterverarbeitung in der Endmontage beim Automobilisten auf das entsprechende Längenmaß zuschneiden. Dadurch wurden die Lieferkosten enorm erhöht. Der OEM ist daher um eine Verpackungsart bemüht, die für ihn gut handhabbar ist. Die neue Generation der Gummidichtungen erlaubt eine sinnvolle Verpackungsgröße, indem der endlose Gummistrang auf einen Metallzylinder gewickelt wird. Auf diese Weise kann der Automobilist die benötigte Teilmenge für seine Endmontage nach Bedarf zuschneiden und verbauen. Voraussetzung für eine einfache Handhabung ist das ordnungsgemäße Aufwickeln der Gummidichtung auf dem Zylinder. Dabei muss darauf geachtet werden, dass das Produkt nicht unter zu großen Spannungen steht oder falsch ausgerichtet ist, um eventuelle Beschädigungen während der Lieferung zu vermeiden. Ein homogenes Wickelbild (siehe Abb. 2.7) zeichnet sich durch geringe Druckkräfte sowie lückenlose Schichten zwischen den einzelnen Wicklungen aus.

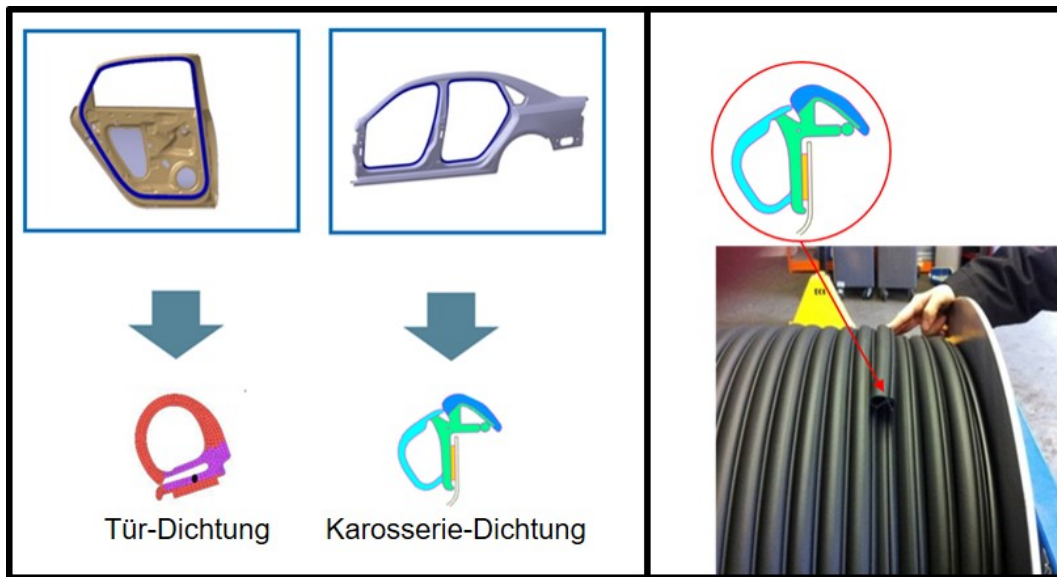


ABBILDUNG 2.10: links: Geometrie der Dichtung; rechts: ein homogenes Wickelbild der karosserieseitigen Gummidichtung

Das Zielprodukt ist eine endlose karosserieseitige Gummidichtung. Die Fertigungstoleranzen der Gummidichtungsprofile sind hoch und ihre Querschnittsgeometrie komplex. Die Wicklung der Profile ist somit sehr anspruchsvoll und kann nicht mithilfe konventioneller Systeme erfolgen. Verschiedene Komponenten konstituieren die Dichtung: Moosgummi, Solidgummi, Klebeband, Liner, Glasfaser-Faden und Lack. Das Querschnittsprofil der Dichtung weist eine asymmetrische Geometrie auf (siehe Abb. 2.10), wodurch die Wicklung erschwert wird. Die Fertigungstoleranzen des Gummiprofils liegen im Bereich von 1 mm.

### 2.3.2 Produktionslinie

Derzeit werden türseitige Endlosdichtungen produziert. Die Produktion der Dichtungen erfolgt in mehreren Stationen (siehe Abb. 2.11 rechts). Im Folgenden werden die Aufgaben der verschiedenen Stationen aufgeführt:

1. Zuführen von EPDM-Mischungen und Mischen in den Extrudern
2. Extrudieren des Profils und Einfügen des Fadens
3. Einbringen der Löcher im Extrusionswerkzeug
4. Vulkanisieren der EPDM-Mischung

5. Oberflächenaktivierung durch Gas-Flamme
6. Lackieren und Trocknen des Profils
7. Vermessen der Geometrie, Prüfen der Oberfläche und Markieren der Fehler
8. Trennen der Profile in zwei Stränge
9. Puffern des Profils (120m, 3 - 4 min)
10. Austrennen der Fehlerstelle und Verbinden der Trennstellen
11. Wickelstation: automatisiertes Wickeln der produzierten Dichtung

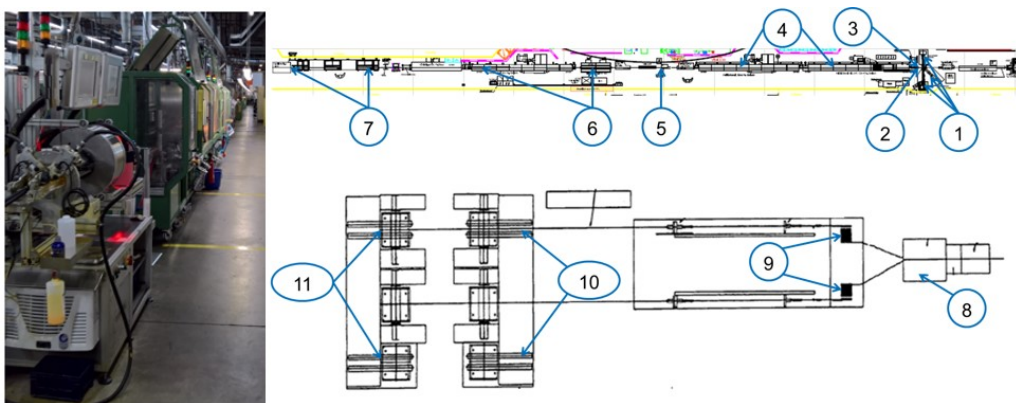


ABBILDUNG 2.11: Produktion einer türseitigen Dichtung

### 2.3.3 Aufbau des konventionellen Wickelprozesses

Die Wickelanlage funktioniert wie folgt (siehe Abb. 2.12): Das Profil wird durch einen sogenannten Tänzer geführt, welcher die Geschwindigkeit des Wickelzylinders regelt. Anschließend durchläuft das Profil ein Formelement, von dem aus es durch eine Antriebseinheit bis zum Eintreten in eine Klemmöffnung am Wickelzylinder befördert wird. Um das Startloch im Zylinder zu identifizieren, dreht sich der Wickelzylinder, während ein Lasersensor seine Oberfläche absucht. Sobald der Sensor das Loch detektiert hat, stoppt die Drehbewegung des Wickelzylinders. Dann bewegen sich Kinematik und Linearachse zur vorher geteachten Position. Die Antriebseinheit wird aktiviert, bis das Profil ins Startloch eingeführt wurde. Danach übernimmt die Rotationsbewegung des Wickelzylinders die Beförderung des Profils. Der Tänzer

gibt dabei die Drehgeschwindigkeit des Wickelzylinders vor. Die Kinematik und die Linearrachse sichern die gezielte Bewegung des Profils für die Erhaltung eines guten Wickelbildes. Die Bewegung des Profils hängt von verschiedenen Faktoren ab: der Geometrie des Gummiprofils, der Drehgeschwindigkeit des Wickelzylinders und den Abmessungen des Zylinders. Die Geschwindigkeit der linearen Achse bleibt konstant und verläuft parallel zum Normalenvektor des Zylinders. Die Drehgeschwindigkeit des Zylinders resultiert aus der Dicke des Profils und dem Radius der gewickelten Ebene. Die Konfiguration der ebenen Kinematik hängt vom Radius der gewickelten Ebene ab und wird im Verlauf einer Ebene konstant gehalten.

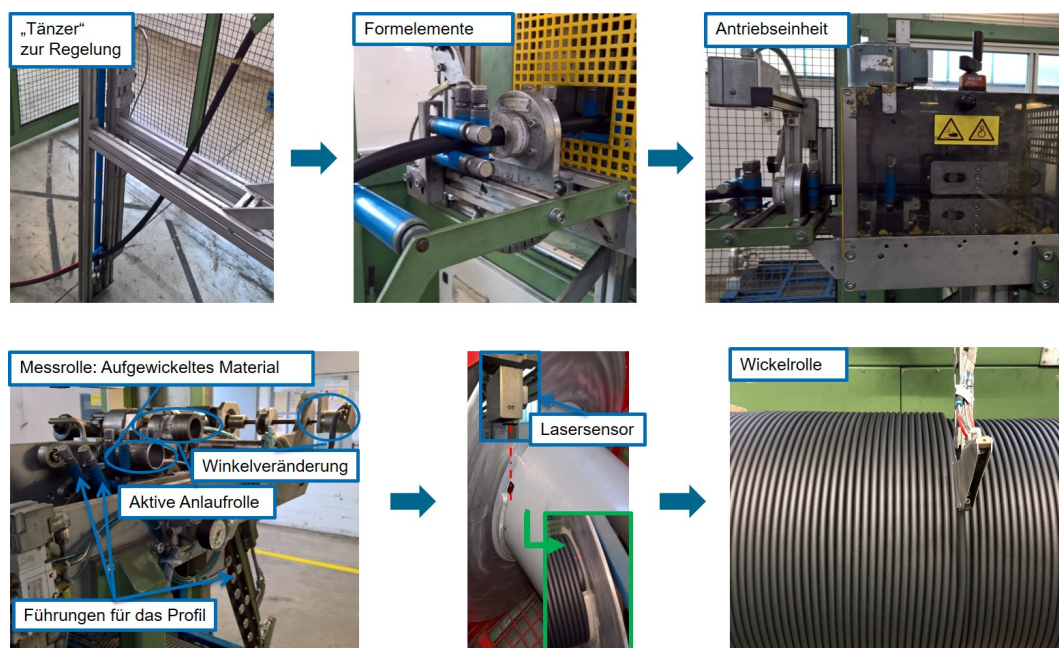


ABBILDUNG 2.12: Aufbau der Wickelanlage für türseitige Dichtungen am Standort Wadern

Die präsentierte Technologie konnte bei türseitigen Dichtungen mit symmetrischer Geometrie bereits erfolgreich eingesetzt werden. Eine direkte Übertragung auf die karosserie-seitige Dichtung ist aufgrund ihrer asymmetrischen Geometrie jedoch problematisch. Diesem Problem kann durch den Einsatz sensitiver Robotik behoben werden, indem zusätzliche Sensoren implementiert werden, die eine genaue Kraft-/Drehmomentdatenerfassung gewährleisten. Die bisherige Integration präziser Kraft-/Drehmomentsensoren ist unzureichend. Ein neuartiges Verfahren zur Verarbeitung der Messdaten ist erforderlich.

### 3 Grundlagen der Robotik

Handhabungsgeräte sind technische Einrichtungen, die menschenähnliche Bewegungen in mehreren Bewegungsachsen im Raum ausführen [32]. Handhabungsgeräte können je nach Umfang der zu ihrer Bewegung erforderlichen Steuerung untergliedert werden. Bei manuellen oder ferngesteuerten Bewegungseinrichtungen werden die Bewegungen direkt durch den Bediener vorgegeben. Die Bewegungsvorgabe bei fest programmierten Bewegungseinrichtungen erfolgt beispielsweise durch eine Kurvenscheibe. Bei frei programmierbaren Bewegungseinrichtungen können die Bewegungen hinsichtlich ihrer Abfolge und Art (Wege/Winkel) ohne mechanischen Eingriff in einfacher Weise durch Programmierung geändert werden [33, 22].

*Roboter* (abgeleitet von *robota* = Arbeit) ist eine 1920 von K. Capek geschaffene Bezeichnung für einen künstlichen Menschen, eine Puppe, die Bewegungen scheinbar selbstständig ausführt [34]. Es gibt keine einheitliche Definition von *Industrieroboter*. In der VDI-Richtlinie 2860 werden Industrieroboter wie folgt definiert: „Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar (d.h. ohne einen mechanischen Eingriff vorzugeben bzw. änderbar) und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabe- oder andere Fertigungsaufgaben ausführen“ [22]. Diese Definition weicht von denen des DIN, der Europäischen Norm (EN) und der International Organization for Standardization (ISO) 8373 [35] ab. Von der Japan Robot Association (JARA) [36] wird der Begriff *Industrieroboter* viel weiter gefasst.

## 3.1 Kinematische Betrachtung des Roboters

### 3.1.1 Kinematische Strukturen des Industrieroboters

Anhand der kinematischen Kette können Parallelroboter und Seriellroboter unterschieden werden. Während die kinematische Struktur ersterer geschlossene kinematische Ketten aufweist, besteht die kinematische Struktur letzterer aus offenen kinematischen Ketten. Eine geschlossene kinematische Kette liegt dann vor, wenn jedes Glied mit genau zwei Gelenken verbunden ist [37]. Werden offene und geschlossene kinematische Ketten kombiniert, so spricht man von hybriden kinematischen Strukturen (siehe Abb. 3.1).



ABBILDUNG 3.1: Kinematische Strukturen des Industrieroboters: seriell (links [38]), hybrid (mittig [39]) und parallel (rechts [40])

Diese Arbeit konzentriert sich auf Roboter mit serieller Kinematik. Daher wird im Folgenden nur die serielle Kinematik genauer betrachtet.

Ein im Raum frei beweglicher Körper hat den Freiheitsgrad 6. Nach der VDI-Richtlinie 2861 [41] ist der Freiheitsgrad oder degree of freedom (DoF) die Anzahl der möglichen unabhängigen Bewegungen (Verschiebungen, Drehungen) eines starren Körpers gegenüber einem Bezugssystem [32]. Bei geeigneter Gelenkanordnung kann der Effektor mit sechs Gelenkachsen den maximalen Freiheitsgrad ( $\text{DoF} = 6$ ) erreichen.

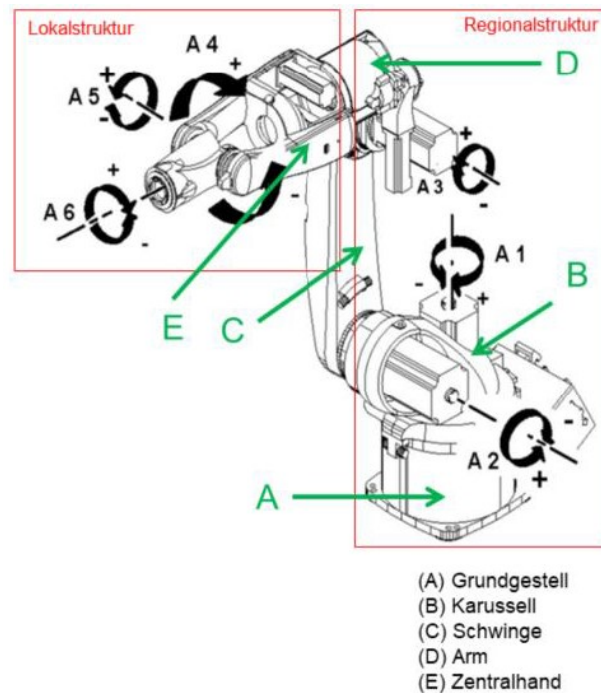


ABBILDUNG 3.2: Kinematische Betrachtung eines Knickarmroboters [38]

Die kinematische Struktur eines seriellen Roboters kann wiederum in eine Regional- und eine Lokalstruktur unterteilt werden (siehe Abb. 3.2). Die Regionalstruktur besteht aus drei Hauptachsen. Diese können sowohl Drehgelenke als auch Schubgelenke oder eine Kombination aus beiden Gelenktypen sein und dienen hauptsächlich zur Erreichung der gezielten Position im Raum. Die Lokalstruktur besteht hingegen immer aus drei Drehgelenken und ermöglicht die Einstellung der gezielten Orientierung der Roboterhand. Eine gängige Konstruktion für die Nebenachsen ist die Zentralhand. Wie in Abbildung 3.3 rechts dargestellt, schneiden sich bei dieser Bauform die Handachsen alle in einem Punkt (Handwurzelpunkt). Dies ist für die spätere inverse Kinematikberechnung entscheidend. Die Einführung von Leichtbaurobotern auf dem Markt machte eine andere Bauform der Handgelenke populär. Im Gegensatz zur Zentralhand, die zur Bewegung der Motoren auf die jeweiligen Achsen aufwendige Übertragungsgetriebe benötigt, sind Leichtbauroboter mit integrierten Servoverstärkern und Motor-Getriebe-Kombinationen ausgestattet. Da die Antriebseinheiten seriell angeordnet sind, ist aus Platzgründen der Aufbau einer Winkelhand erforderlich, deren Achsen sich nicht alle in einem Punkt schneiden (siehe Abb. 3.3 links) [19].

Zum Teil kommen auch sogenannte redundante Kinematiken, d. h. Roboter mit mehr als sechs Achsen ( $\text{DoF} > 6$ ) zum Einsatz, wenn besondere Feinbewegungen gefragt sind [32].



ABBILDUNG 3.3: Kinematische Anordnung der Lokalstruktur: Winkelhand (links:[42]) und Zentralhand (rechts:[38])

Die Firma KUKA [38] bietet ein Robotersystem mit insgesamt 7 Gelenken mit integrierten Kraft-/Momentsensoren an [43]. Ein solcher Roboter eignet sich für eine sensitive Montage, wobei die notwendige Steifigkeit durch fortgeschrittene Regelungsalgorithmen erreicht wird, die auch auf zusätzliche Sensorwerte, z.B. die Gelenkbeschleunigung, zugreifen können.

### 3.1.2 Modellierung der kinematischen Kette

Der Knickarmroboter hat in der Regel die Struktur einer offenen kinematischen Kette. Solche Geometrien lassen sich mathematisch einfach beschreiben. Für die Beschreibung der offenen kinematischen Strukturen stehen verschiedene Modelle und Konventionen zur Verfügung. Die am weitesten verbreitete Konvention ist die Denavit-Hartenberg-Konvention [44], auch bekannt als klassische DH-Konvention. Diese wurde im VDI Bericht von 1956 [45] als HD-Konvention bezeichnet. Da mehrere Autoren daraus zitiert haben, ist in der Literatur somit auch die Bezeichnung Hartenberg-Denavit-Konvention (HD) zu finden [18, 46, 47]. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch die Bezeichnung DH-Konvention verwendet.

Die DH-Konvention wurde 1955 vom amerikanischen Ingenieur und ehemaligen VDI-Mitglied Richard S. Hartenberg und dem französischen Ingenieur Jacques Denavit entwickelt. Sie modelliert einen Roboter mit vier Parametern pro Gelenkübergabe:

- Drehwinkel ( $\delta_{i,i-1}$ ):  $\delta_{i,i-1}$  ist der Drehwinkel, gemessen im mathematisch positiven Sinn (entgegen dem Uhrzeigersinn), zwischen  $x_{i-1}$  und  $x_i$  um  $z_{i-1}$ .  $\delta_i$  ist vorzeichenbehaftet.



- Achslänge ( $d_{i,i-1}$ ):  $d_{i,i-1}$  ist der kürzeste Abstand zwischen  $x_{i-1}$  und  $x_i$  um  $z_{i-1}$ .  $d_i$  ist vorzeichenbehaftet.
- Kreuzungsabstand ( $l_{i,i-1}$ ):  $l_{i,i-1}$  ist der Abstand zwischen der  $z_{i-1}$  und der  $z_i$  Achse um  $x_i$ .  $l_i$  ist immer positiv.
- Kreuzungswinkel ( $\lambda_{i,i-1}$ ):  $\lambda_{i,i-1}$  ist der Drehwinkel, gemessen im mathematisch positiven Sinn (entgegen dem Uhrzeigersinn), zwischen  $z_{i-1}$  und  $z_i$  um  $x_i$ .  $\lambda_i$  ist vorzeichenbehaftet.

Zur Beschreibung der Lage, sprich der Position und Orientierung eines Koordinatensystems in Relation zu einem Referenzsystem, werden im Normalfall sechs Parameter aufgeführt. Dass bei DH-Parametern eine geringere Anzahl angegeben wird, liegt an der festgelegten Vorgehensweise bei der Definition der Koordinatensysteme in den Gelenken, welche die Charakterisierung der Gelenkübergänge durch eine strukturell gleiche Transformation möglich macht [32, 11]. Die eigentliche DH-Transformation des Koordinatensystems  $i-1$  in das Koordinatensystem  $i$  besteht in der Ausführung folgender Einzeltransformationen hintereinander (siehe Abb. 3.4):

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \text{Rotation}(\delta_{i,i-1}, z_{i-1}) \cdot \text{Translation}(d_{i,i-1}, z_{i-1}) \cdot \text{Translation}(l_{i,i-1}, x_i) \quad (3.1)$$

$$\cdot \text{Rotation}(\lambda_{i,i-1}, x_i)$$

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{pmatrix} \cos(\delta_{i,i-1}) & -\sin(\delta_{i,i-1}) \cdot \cos(\lambda_{i,i-1}) & \sin(\delta_{i,i-1}) \cdot \sin(\lambda_{i,i-1}) & a_{i,i-1} \cdot \cos(\delta_{i,i-1}) \\ \sin(\delta_{i,i-1}) & \cos(\delta_{i,i-1}) \cdot \cos(\lambda_{i,i-1}) & -\cos(\delta_{i,i-1}) \cdot \sin(\lambda_{i,i-1}) & a_{i,i-1} \cdot \sin(\delta_{i,i-1}) \\ 0 & \sin(\lambda_{i,i-1}) & \cos(\lambda_{i,i-1}) & d_{i,i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

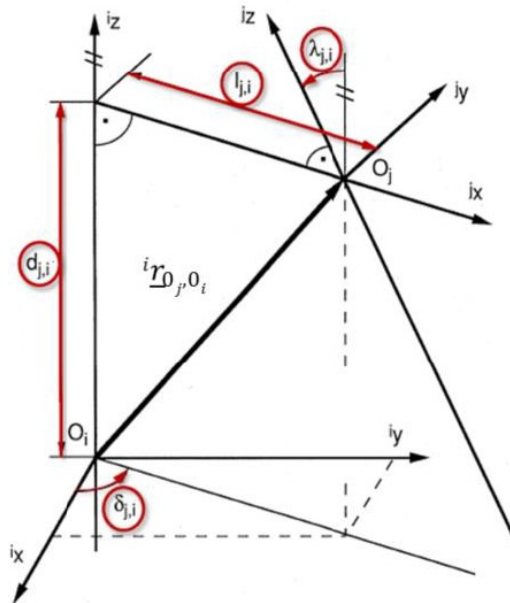


ABBILDUNG 3.4: Modellierung nach der DH-Konvention [48]

Craig hat eine neue Konvention vorgestellt, die auf der DH-Konvention basiert [11]. Diese ist bekannt als modifizierte DH-Konvention (MDH). Lipkin hat die beiden Konventionen gegenübergestellt [49].

Das vierparametrische Modell der DH-Konvention weist eine signifikante Schwäche bei der Parameteridentifikation auf. Daher sind nur Fehler im Hinblick auf Armlängen und Nulllagen der Gelenke identifizierbar [50]. Folglich wurde die DH-Konvention auf fünfparametrische [51, 52] und sechspanparametrische [53] Modelle zur Beschreibung einer offener Kette erweitert. Keines der erweiterten kinematischen Modelle bietet jedoch eindeutige Vorteile. Daher ziehen die meisten Roboterhersteller und Wissenschaftler die klassische DH-Konvention vor.

Die Modellparameter werden in die Steuerung integriert. Die Steuerung generiert die Roboterbewegung und überwacht die Pose des Endeffektors. Dadurch kann die Steuerung die Grundaufgaben der Kinematik lösen, sowohl das direkte als auch das inverse kinematische Problem.

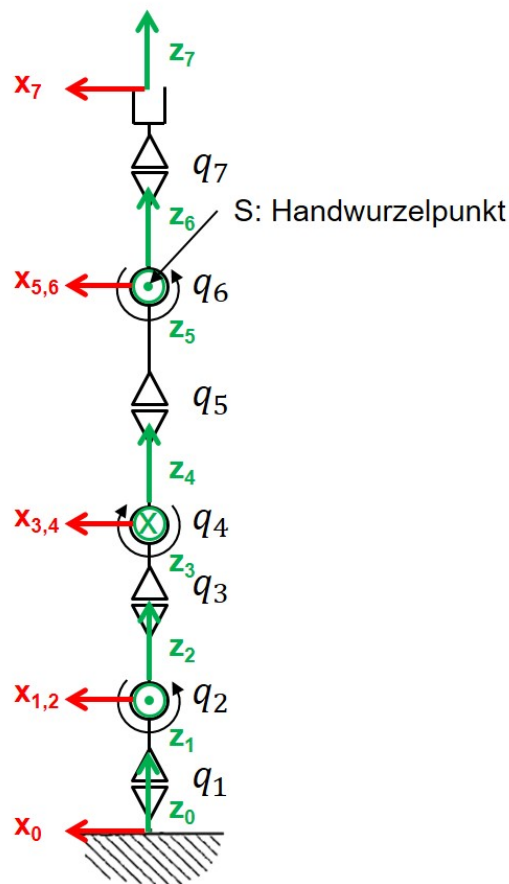


ABBILDUNG 3.5: Kinematische Modellierung des KUKA LBR iiwas

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Roboter KUKA LBR iiwa betrachtet und durch die DH-Konvention modelliert (siehe Abb. 3.5). Die DH-Parameter sind in Tabelle 3.1 gelistet.

Glied $i$	1	2	3	4	5	6	7
$\delta_{i,i-1} [^\circ]$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$
$d_{i,i-1} [m]$	0,36	0	0,42	0	0,4	0	0,126
$l_{i,i-1} [m]$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{i,i-1} [^\circ]$	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0

TABELLE 3.1: DH Parameter des KUKA LBR iiwas

### 3.1.3 Direktes kinematisches Problem

Bei der kinematischen Vorwärtsrechnung wird die Pose (Position und Orientierung) des Endeffektors basierend auf dem kinematischen Modell und der Eingabe der Gelenkvariablen berechnet. Ausgehend von einem bekannten Gelenkvariablenvektor  $\underline{q}$  der kinematischen Kette werden

die Transformationen  ${}^{i-1}\mathbf{T}_i$  von der Basis 0 bis zum Endeffektor  $f$  aufgestellt und miteinander zu der Gesamttransformationsmatrix  ${}^0\mathbf{T}_f$  verkettet [18].

$${}^0\mathbf{T}_f = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot \dots \cdot {}^{f-1}\mathbf{T}_f \quad (3.3)$$

$${}^0\mathbf{T}_f = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{D}_f & {}^0\underline{r}_f \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Die Position des Endeffektors bzgl. des Basis-KS  ${}^0\underline{r}_f$  wird aus den ersten drei Elementen des vierten Spaltenvektors der Matrix  ${}^0\mathbf{T}_f$  aufgestellt (siehe Gleichung 3.4). Die Orientierung des Endeffektor-KS bzgl. des Basis-KS wird aus dem Vergleich des Drehanteils  ${}^0\mathbf{D}_f$  der Matrix  ${}^0\mathbf{T}_f$  mit der Drehmatrix einer passenden Euler-Winkel-Konvention  $\mathbf{D}_{RPY}$  (siehe Gleichung 3.63) berechnet. Wird die Roll-Pitch-Yaw-Konvention (RPY-Konvention) verwendet, sind die Drehwinkel der Orientierung des Endeffektor-KS durch die Gleichung 3.64 zu berechnen.

### 3.1.4 Inverses kinematisches Problem

Beim inversen kinematischen Problem wird der Gelenkvariablenvektor bzw. die Roboterkonfiguration aus einer vorgegebenen Pose des Endeffektor-KS berechnet. Die Lösungen des inversen kinematischen Problems lassen sich in eine geschlossene und eine numerische Lösung einteilen [11].

#### 3.1.4.1 Geschlossene Lösung

Methoden, die geschlossene Lösungen aufweisen, können nach kurzer Berechnungszeit alle möglichen Lösungen für die Roboterkonfiguration liefern. Aus diesem Grund werden sie in der Handhabungstechnik bevorzugt eingesetzt. Diese Lösungen existieren nur für Sonderfälle und Konstruktionen für serielle Roboter wie z.B. drei aufeinanderfolgende, sich schneidende Drehachsen (Zentralhand). Bei seriellen Robotern mit sechs Freiheitsgraden werden im Allgemeinen 16 Lösungsmöglichkeiten für das inverse kinematische Problem angenommen. Die

Anzahl der möglichen Lösungen hängt von der Konstruktion des Manipulators ab [54]. Die maximale Anzahl an Lösungen für das Problem der inversen Kinematik eines Knickarmroboters mit einer Zentralhand beträgt acht [55]. Die geschlossene Lösung kann nicht in allen Fällen angewandt werden, um das inverse kinematische Problem eines seriellen Roboters mit sechs Freiheitsgraden zu lösen. Sie ist somit nicht auf einen beliebigen modularen Roboter anwendbar. Im Folgenden wird ein zugeschnittenes Berechnungsverfahren basierend auf der Trennung der kinematischen Struktur in eine Regional- und Lokalstruktur im Fall einer Zentralhand präsentiert. Ausgegangen wird von einem Roboter mit sechs Drehgelenken und einer Zentralhand (siehe Abb. 3.6).

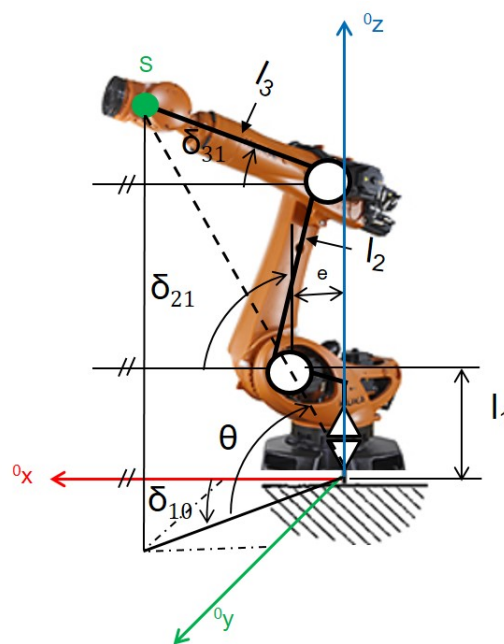


ABBILDUNG 3.6: Ein Knickarmroboter mit einer Zentralhand [38]

Der Schnittpunkt der letzten drei Achsen (Handwurzelpunkt) wird lokalisiert. Der Positionsvektor des Handwurzelpunkts  ${}^0\underline{r}_S = ({}^0x_S, {}^0y_S, {}^0z_S)^T$  wird bei der Eingabe des TCP-KS (Tool-Center-Point-KS) berechnet.

$${}^0\mathbf{T}_{TCP} = {}^0\mathbf{T}_S \cdot {}^S\mathbf{T}_{Flansch} \cdot {}^{Flansch}\mathbf{T}_{TCP} \quad (3.5)$$

$${}^0\mathbf{T}_{TCP} = {}^0\mathbf{T}_S \cdot {}^S\mathbf{T}_{TCP} \quad (3.6)$$

$$\rightarrow {}^0\mathbf{T}_S = {}^0\mathbf{T}_{TCP} \cdot {}^S\mathbf{T}_{TCP}^{-1} = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{D}_S & {}^0\underline{r}_S \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Dann werden die ersten drei Winkel ( $\delta_{1,0}$ ,  $\delta_{2,1}$  und  $\delta_{3,2}$ ) bestimmt. Der erste Winkel  $\delta_{1,0}$  hat im Allgemeinen zwei Lösungen. Diese basieren auf  ${}^0y_S$ . Wenn  ${}^0y_S$  positiv ist, dann wird die erste Lösung  $\delta_{10,1}$  wie folgt bestimmt:

$$0^\circ < \delta_{10,1} = \arctan2({}^0y_S, {}^0x_S) \leq 180^\circ \quad (3.8)$$

Die zweite Lösung der Winkel  $\delta_{10,2}$  wird dann folgendermaßen ermittelt (siehe Gleichung 3.9):

$$\delta_{10,2} = \delta_{10,1} + 180^\circ \quad (3.9)$$

Bei einem negativen  ${}^0y_S$  werden die Lösungen der Winkel  $\delta_{10}$  wie folgt berechnet:

$$180^\circ < \delta_{10,1} = \arctan2({}^0y_S, {}^0x_S) \leq 360^\circ \quad (3.10)$$

$$\delta_{10,2} = \delta_{10,1} - 180^\circ \quad (3.11)$$

Im nächsten Schritt müssen die Drehwinkel  $\delta_{2,1}$  und  $\delta_{3,2}$  bestimmt werden. Dafür muss eine Verbindungslinie, die den Ursprung des Basis-KS mit dem Handwurzelgelenk verbindet, auf die  ${}^0x^0y$  Ebene und den  ${}^0z$  Vektor projiziert werden. Die Projektion auf die  ${}^0x^0y$  Ebene liefert die folgende Lösung:

$$l \cdot \cos(\theta) = l_2 \cdot \cos(\delta_{2,1}) + l_3 \cdot \cos(\delta_{3,1}) + e \quad (3.12)$$

$$\rightarrow l \cdot \cos(\theta) - e = l_2 \cdot \cos(\delta_{2,1}) + l_3 \cdot \cos(\delta_{3,1}) \quad (3.13)$$

Dabei ist  $\delta_{3,1} = \delta_{2,1} + \delta_{3,2} - \pi$ . Die Projektion auf den  ${}^0z$  Vektor ergibt folgendes Ergebnis:

$${}^0z_S = l_1 + l_2 \cdot \sin(\delta_{2,1}) + l_3 \cdot \sin(\delta_{3,1}) \quad (3.14)$$

$$\rightarrow {}^0z_S - l_1 = l_2 \cdot \sin(\delta_{2,1}) + l_3 \cdot \sin(\delta_{3,1}) \quad (3.15)$$

Zu beachten ist, dass bei  $\delta_{10,1}$  Folgendes gilt:

$$l \cdot \cos(\theta) = \sqrt{{}^0x_S^2 + {}^0y_S^2} \quad (3.16)$$

Dagegen gilt bei  $\delta_{10,2}$ :

$$l \cdot \cos(\theta) = -\sqrt{{}^0x_5^2 + {}^0y_5^2} \quad (3.17)$$

Die Gleichungen 3.13 und 3.15 bilden ein nicht lineares Gleichungssystem der Form:

$$A = a \cdot \cos(\alpha) + b \cdot \cos(\beta) \quad (3.18)$$

$$B = a \cdot \sin(\alpha) + b \cdot \sin(\beta) \quad (3.19)$$

Der Koeffizientenvergleich der Gleichungen 3.13-3.15 und 3.18-3.19 ergibt folgende Gleichung:

$$A = l \cdot \cos(\theta) - e, B = l \cdot \cos(\theta) - e, a = l_2, b = l_3, \alpha = \delta_{2,1}, \beta = \delta_{3,1} \quad (3.20)$$

Die Auflösung der Gleichungen nach 3.18 und 3.19 jeweils nach  $b \cdot \cos(\beta)$  und  $b \cdot \sin(\beta)$  ergibt folgendes Ergebnis:

$$A - a \cdot \cos(\alpha) = b \cdot \cos(\beta) \quad (3.21)$$

$$B - a \cdot \sin(\alpha) = b \cdot \sin(\beta) \quad (3.22)$$

Das Quadrieren und Addieren der Gleichungen 3.21 und 3.22 ergibt folgende Gleichung:

$$B \cdot \sin(\alpha) + A \cdot \cos(\alpha) = C_\alpha \quad (3.23)$$

Hier ist  $C_\alpha = \frac{A^2 + B^2 - b^2 + a^2}{2a}$ . Das Einsetzen der Gleichung 3.24

$$\sin(\alpha) = \frac{2 \cdot t_\alpha}{1 + t_\alpha^2}, \cos(\alpha) = \frac{1 - t_\alpha^2}{1 + t_\alpha^2}, t_\alpha = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.24)$$

in 3.23 mittels Halbwinkelmethode ergibt eine quadratische Gleichung der folgenden Form:

$$t_\alpha^2 - \frac{2 \cdot B}{A + C_\alpha} \cdot t_\alpha + \frac{C_\alpha - A}{A + C_\alpha} \quad (3.25)$$

Das Lösen der Gleichung 3.25 führt zu zwei Ergebnissen:

$$t_{\alpha 1} = \frac{B}{A + C_{\alpha}} + \frac{\sqrt{B^2 + A^2 - C_{\alpha}^2}}{A + C_{\alpha}}; t_{\alpha 2} = \frac{B}{A + C_{\alpha}} - \frac{\sqrt{B^2 + A^2 - C_{\alpha}^2}}{A + C_{\alpha}} \quad (3.26)$$

Damit lässt sich der Winkel  $\alpha$  bzw.  $\delta_{21}$  wie folgt berechnen:

$$\alpha_1 = \arctan2(\sin(\alpha_1), \cos(\alpha_1)) = \arctan2\left(\frac{2 \cdot t_{\alpha 1}}{1 + t_{\alpha 1}^2}, \frac{1 - t_{\alpha 1}^2}{1 + t_{\alpha 1}^2}\right) \quad (3.27)$$

$$\alpha_2 = \arctan2(\sin(\alpha_2), \cos(\alpha_2)) = \arctan2\left(\frac{2 \cdot t_{\alpha 2}}{1 + t_{\alpha 2}^2}, \frac{1 - t_{\alpha 2}^2}{1 + t_{\alpha 2}^2}\right) \quad (3.28)$$

Der Winkel  $\beta$  bzw.  $\delta_{3,1}$  basiert auf dem Winkel  $\alpha$  und den Gleichungen 3.21 und 3.22.

$$\beta_1 = \arctan2(B - a \cdot \sin(\alpha_1), A - a \cdot \cos(\alpha_1)) \quad (3.29)$$

$$\beta_2 = \arctan2(B - a \cdot \sin(\alpha_2), A - a \cdot \cos(\alpha_2)) \quad (3.30)$$

Der Drehwinkel  $\delta_{32}$  wird dann folgendermaßen berechnet:

$$\delta_{32} = \delta_{31} - \delta_{21} + \pi \quad (3.31)$$

Abschließend sind die letzten drei Drehwinkel  $\delta_{43}$ ,  $\delta_{54}$  und  $\delta_{65}$  zu berechnen. Die Pose des Flansch-KS wird bei der Eingabe der Pose des TCP-KS wie folgt ermittelt:

$${}^0\mathbf{T}_{Flansch} = {}^0\mathbf{T}_{TCP} \cdot {}^{Flansch}\mathbf{T}_{TCP}^{-1} \quad (3.32)$$

Bei einem sechssachsigen Roboter wird die Transformationsmatrix  ${}^0\mathbf{T}_{Flansch}$  auf folgende Weise berechnet:

$${}^0\mathbf{T}_{Flansch} = {}^0\mathbf{T}_6 = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot \dots \cdot {}^5\mathbf{T}_6 \quad (3.33)$$



Die Transformationsmatrix  ${}^3\mathbf{T}_6$  kann daher folgendermaßen berechnet werden:

$${}^3\mathbf{T}_6 = {}^0\mathbf{T}_3^{-1} \cdot {}^0\mathbf{T}_6 = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & {}^3x_{o_6,o_3} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & {}^3y_{o_6,o_3} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & {}^3z_{o_6,o_3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^3\mathbf{D}_6 & {}^3\mathbf{r}_{o_6,o_3} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

Die Berechnung der Drehwinkel  $\delta_{4,3}$ ,  $\delta_{5,4}$  basiert auf dem Vergleich der Drehmatrix  ${}^3\mathbf{D}_6$  mit der Drehmatrix einer passenden Euler-Winkel-Konvention (z.B. ZY'Z''). Danach sind die Drehwinkel wie folgt zu bestimmen:

$$0^\circ < \delta_{54,1} = \arccos(b_{33}) \leq 180^\circ \quad (3.35)$$

$$\delta_{43,1} = \arctan2(d_{23}, d_{13}) \quad (3.36)$$

$$\delta_{65,1} = \arctan2(d_{32} - d_{31}) \quad (3.37)$$

Es existiert jedoch eine zweite Lösung der Lokalstruktur.

$$180^\circ < \delta_{54,2} = \arccos(b_{33}) \leq 360^\circ \quad (3.38)$$

$$\delta_{43,2} = \arctan2(-d_{23}, -d_{13}) \quad (3.39)$$

$$\delta_{65,2} = \arctan2(-d_{32}, d_{31}) \quad (3.40)$$

Dabei ist zu beachten, dass die in den Gleichungen 3.35-3.40 gezeigten Lösungen für die Lokalstruktur nur für den Fall gültig sind, wenn die Matrix  ${}^3\mathbf{D}_6$  für  $\delta_{4,3} = 0$ ,  $\delta_{5,4} = 0$  und  $\delta_{6,5} = 0$  gleich der Einheitsmatrix ist. Damit sind die Gelenkvariablenvektoren der acht Konfigurationen für eine gegebene Pose des Roboters bestimmt. Die vorgestellte Lösung wird in Kapitel 5.8.3.1 erweitert, um sie auf das inverse kinematische Problem eines 7 DoF-Roboters (KUKA LBR iiwa) übertragen zu können, der im Rahmen dieser Arbeit näher betrachtet wird.

### 3.1.4.2 Numerische Lösung

Iterative numerische Verfahren bieten eine allgemeine Lösung für beliebige kinematische Strukturen. Hierbei kommen das Newton-Verfahren und dessen Modifikationen [56] [57] [58]

sowie eine Reihe pseudoinverser Lösungsverfahren [59, 60, 61, 62] zum Einsatz [18]. Eine numerische Lösung wurde in [18] vorgestellt. Numerische Lösungen sind zeitaufwändig und instabil, da sie vom Anfangswert der Iteration abhängen. Daher sind sie für den Online-Einsatz kaum anwendbar. Im Rahmen dieser Arbeit werden numerische Verfahren nicht verwendet und daher im weiteren Verlauf nicht detailliert betrachtet.

### 3.1.5 Jacobimatrix

Die Jacobimatrix ist benannt nach dem deutschen Mathematiker Karl Gustav Jacob Jacobi. Sie ist auch bekannt als Funktionalmatrix, Ableitungsmatrix oder Jacobische Matrix. Im Allgemeinen erlaubt die Jacobimatrix, kleine Verschiebungen in verschiedenen Räumen in Beziehung zueinander zu setzen. Es gibt verschiedene Methoden, um die Jacobimatrix zu bestimmen. Die berechnete Jacobimatrix hängt von der Berechnungsmethode ab [63].

$f$  ist die Funktion, die den Gelenkvariablenvektor  $\underline{q}$  (n-dimensionaler Vektor) auf der kartesischen Pose  $\underline{w}$  (m-dimensionaler Vektor) des Roboters abbildet.

$$\underline{w} = \underline{f}(\underline{q}) \quad (3.41)$$

Betrachtet man die infinitesimale Bewegung der Beziehung zwischen  $\underline{w}$  und  $\underline{q}$ , dann lässt sich folgender Zusammenhang zwischen  $\delta\underline{w}$  und  $\delta\underline{q}$  ableiten:

$$\delta\underline{w} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{pmatrix} \cdot \delta\underline{q} \quad (3.42)$$

$$\delta\underline{w} = \mathbf{J}_a \cdot \delta\underline{q} \quad (3.43)$$

Die analytische Jacobimatrix kann dann wie folgt berechnet werden:

$$\mathbf{J}_a = \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{q}^T} \quad (3.44)$$

Hier ist  $n$  die Anzahl der Gelenke des Roboters und  $m$  hängt von der Konvention der Orientierungsdarstellung ab. Bei Anwendung des Quaternions zur Darstellung der Orientierung ist  $m$  gleich 7, bei Anwendung der RPY-Konvention reduziert sich  $m$  auf 6, d. h., die Dimension der analytischen Jacobimatrix hängt von der Konvention der Orientierungsdarstellung der Roboterpose ab.

Wie in Gleichung 3.44 zu erkennen ist, bezieht die analytische Jacobimatrix die entsprechenden kleinen Verschiebungen in verschiedenen Räumen aufeinander. Teilt man die beiden Seiten der Beziehung mit kleinem Zeitintervall, so erhält man die Beziehung zwischen den Geschwindigkeiten im Gelenk und im kartesischen Raum [15].

$$\underline{\dot{w}} = \mathbf{J}_a \cdot \underline{\dot{q}} \quad (3.45)$$

Es existiert aber eine eindeutige Jacobimatrix, die mit der Bewegung des Mechanismus verbunden ist. Da die kinematischen Eigenschaften eines Mechanismus unabhängig von der gewählten Konvention zur Orientierungsdarstellung sind, ist es wichtig, dass das kinematische Modell auch von der Konvention der Orientierungsdarstellung unabhängig ist. Die mit einem solchen Modell assoziierte Jacobimatrix ist eindeutig. Diese Matrix wird als die geometrische Jacobimatrix bezeichnet.

$$\begin{pmatrix} \underline{v} \\ \underline{\omega} \end{pmatrix} = \mathbf{J}_g \cdot \underline{\dot{q}} \quad (3.46)$$

Für ein Schubgelenk  $i$  wird der jeweilige Spaltenvektor der Jacobimatrix wie folgt berechnet:

$$\mathbf{J}_{g_i} = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{e}_{i-1z} \\ \underline{0} \end{pmatrix} \quad (3.47)$$

Für ein Drehgelenk  $i$  wird der jeweilige Spaltenvektor der Jacobimatrix wie folgt berechnet:

$$\mathbf{J}_{g_i} = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{e}_{i-1z} \times {}^0\mathbf{e}_{oTCP,o_{i-1}} \\ {}^0\mathbf{e}_{i-1z} \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{J}_g = (\mathbf{J}_{g_1}, \dots, \mathbf{J}_{g_m}) \quad (3.48)$$

Die geometrische Jacobimatrix wird verwendet, wenn physikalische Größen von Interesse sind.

Das Umrechnen der beiden Jacobimatrizen ist möglich bei der Umwandlung der zeitlichen Ableitung der Roll( $z, \delta$ )-Pitch( $y', \eta$ )-Yaw( $x'', \xi$ )-Winkel in die Kreisgeschwindigkeit  $\underline{\omega}$ .

$$\underline{\omega} = \begin{pmatrix} \cos(\delta) \cdot \cos(\eta) & -\sin(\delta) & 0 \\ \sin(\delta) \cdot \cos(\eta) & \cos(\delta) & 0 \\ -\sin(\eta) & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\eta} \\ \dot{\delta} \end{pmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\eta} \\ \dot{\delta} \end{pmatrix} \quad (3.49)$$

$$\rightarrow \mathbf{J}_g = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{J}_a \quad (3.50)$$

Zu beachten ist, dass der Positionsanteil (die ersten drei Elemente der Spaltenvektoren) der Jacobimatrix unverändert bleibt.

## 3.2 Dynamische Betrachtung des Roboters

Die Roboterdynamik liefert den Zusammenhang zwischen den Betätigungs- und Kontaktkräften und den daraus resultierenden Beschleunigungs- und Bewegungstrajektorien. Die dynamischen Bewegungsgleichungen bilden die Grundlage für eine Reihe von Berechnungsalgorithmen, die für die mechanische Konstruktion, Steuerung und Simulation nützlich sind.

### 3.2.1 Ableitung des dynamischen Modells des Roboters

Für die dynamische Modellierung eines fest installierten Roboters ist die Bewegungsgleichung einer Mehrkörperdynamik der folgenden Form zu betrachten [17]:

$$\mathbf{M}(\underline{q}) \cdot \underline{\ddot{q}} + \mathbf{C}(\underline{q}, \underline{\dot{q}}) \cdot \underline{\dot{q}} + \underline{g}(\underline{q}) = \underline{\tau} + \mathbf{J}_g^T \cdot \underline{F}_{ext} \quad (3.51)$$

Hier ist  $\mathbf{M}$  eine symmetrische und positiv definite reale Massen-Matrix,  $\mathbf{C}(\underline{q}, \underline{\dot{q}}) \cdot \underline{\dot{q}}$  ist der Vektor der verallgemeinerten Kreiselkräfte,  $\underline{g}(\underline{q})$  ist der Vektor der Gravitationskräfte,  $\underline{\tau}$  ist

der Vektor der verallgemeinerten Antriebsmomente und  $\underline{F}_{ext}$  ist der Vektor der externen Kräfte/Drehmomente. Für einen Roboter mit  $n$  Gelenken wird das dynamische Modell durch einen Satz von  $n$  gekoppelten nichtlinearen Differentialgleichungen zweiter Ordnung dargestellt, die die gemeinsamen Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen mit den Antriebsdrehmomenten in Beziehung setzen (siehe Gleichung 3.51).

Zur Ableitung des dynamischen Modells werden hauptsächlich zwei grundlegende Verfahren verwendet, nämlich das Lagrange-Verfahren und das Newton-Euler-Verfahren [11, 15, 16], wobei ersteres einfacher und systematischer und letzteres aus rechnerischer Sicht effizienter ist [17]. Das dritte und wohl nützlichste Verfahren von allen ist das Projected Newton-Euler-Verfahren [64, 65], dem es gelingt, die Vorteile der beiden Verfahren Newton-Euler und Lagrange zu kombinieren.

Das Lagrange-Verfahren ist ein Variationsansatz, der auf der kinetischen und potenziellen Energie des Roboters basiert. Die Lagrange-Funktion  $L$  ist definiert als die Differenz aus der kinetischen Energie  $K$  und der potentiellen Energie  $U$  des Systems [66].

$$L = K - U \quad (3.52)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial q} \right) = \underline{\tau} \quad (3.53)$$

Beim Newton-Euler-Verfahren wird jedes Glied des Manipulators einzeln behandelt. Die lineare Geschwindigkeit und die Winkelgeschwindigkeit/-beschleunigung ( $\underline{\dot{q}}/\underline{\ddot{q}}$ ) werden zuerst durch eine Vorwärtsrekursion basierend auf der Gelenkgeschwindigkeit/-beschleunigung berechnet. Im zweiten Schritt werden die Antriebskräfte und -momente durch eine Vorwärtsrekursion berechnet. Die Grundlage der Newton-Euler-Formulierung sind drei wichtige mechanische Gesetze: Das zweite und dritte Newtonsche Gesetz und der Drallsatz [67, 17].

Das Projected Newton-Euler-Verfahren kombiniert die klassische Newton-Euler-Gleichung für das dynamische Gleichgewicht in kartesischen Koordinaten mit der Einschränkung der Lagrange-Formulierung unter Verwendung der verallgemeinerten Koordinaten. Außerdem

wird das Prinzip der virtuellen Arbeit angewendet, um eine Bewegungsgleichung der reduzierten Form zu bestimmen [68].

Das dynamische Problem des Roboters kann in zwei Kategorien unterteilt werden, das direkte und das inverse dynamische Problem.

### 3.2.2 Direktes dynamisches Problem

Beim direkten dynamischen Problem wird die resultierende Bewegung ( $\underline{q}$ ,  $\underline{\dot{q}}$  und  $\underline{\ddot{q}}$ ) des Manipulators aus der Vorgabe der Antriebskräfte/-drehmomente  $\underline{\tau}$  berechnet. Dies ist nützlich für die Simulation des Manipulators. Eine der bekannten numerischen Integrationstechniken kann angewendet werden, um die Beschleunigung zu integrieren und zukünftige Positionen und Geschwindigkeiten zu berechnen [11]. Lösungen des direkten dynamischen Problems für einen seriellen Roboter sind in [69, 70] und [14] zu finden.

### 3.2.3 Inverses dynamisches Problem

Beim inversen dynamischen Problem werden die Antriebskräfte/-drehmomente  $\underline{\tau}$  aus der Spezifikation der Trajektorie ( $\underline{q}$ ,  $\underline{\dot{q}}$  und  $\underline{\ddot{q}}$ ) des Roboters berechnet.  $\tau$  wird basierend auf dem dynamischen Modell ermittelt. Die Herleitung des dynamischen Modells wird in 3.2.1 erklärt.

### 3.2.4 Regelung des seriellen Roboters

In der Robotik werden verschiedene Arten von Reglern eingesetzt (siehe Abb. 3.7). Diese sind meistens Positions- oder Kraftregler. Die Positionsregelung ist dann erforderlich, wenn ein Manipulator einer Trajektorie durch den Raum folgt. Wenn aber ein Kontakt zwischen dem Endeffektor und der Umgebung des Manipulators hergestellt wird, reicht eine reine Positionsregelung möglicherweise nicht aus [11].

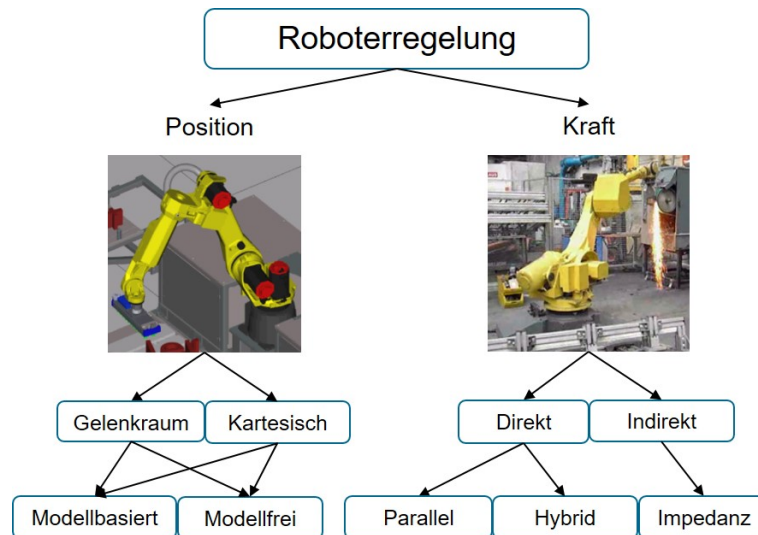


ABBILDUNG 3.7: Übersicht der Regelungsarten des seriellen Roboters [Bilderquellen: (links: [71], rechts:[72])]

### 3.2.4.1 Positionsregelung

Für die Positionsregelung wird davon ausgegangen, dass die Bezugstrajektorie in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der Gelenkpositionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen vorhanden ist. Außerdem sind hier zwei Arten der Regelung zu unterscheiden: ein modellfreier und ein modellbasierter Positionsregler. Modellfreie Regler sind einfach zu entwerfen und verlangen keine umfassenden Kenntnisse des dynamischen Modells des Roboters. Bei seriellen Robotern werden meistens Kaskadenregler mit einem PI- oder nur einem P-Anteil für die Geschwindigkeitsregelung als innere Schleife und ein P-Regler als äußere Schleife für die Positionsregelung eingesetzt [73]. Beim modellbasierten Regler ist eine höhere Leistung zu erwarten. Außerdem ist er aufwändiger zu entwerfen.

Ein gängiges Verfahren zur modellbasierten Regelung des Roboters basiert auf der inversen dynamischen Rechnung des Roboters. Das Verfahren ist bekannt als *inverse dynamics control* und wurde Anfang der 70er-Jahre unter dem Namen *Computed Torque Control* entwickelt. Eines der ersten Experimente mit der inversen Dynamikregelung wurde von Markiewicz [74] durchgeführt [17]. Das Verfahren zielt auf die Linearisierung und Entkopplung der Bewegungsgleichung (siehe Gleichung 3.51) des Roboters ab (siehe Abb. 3.8).

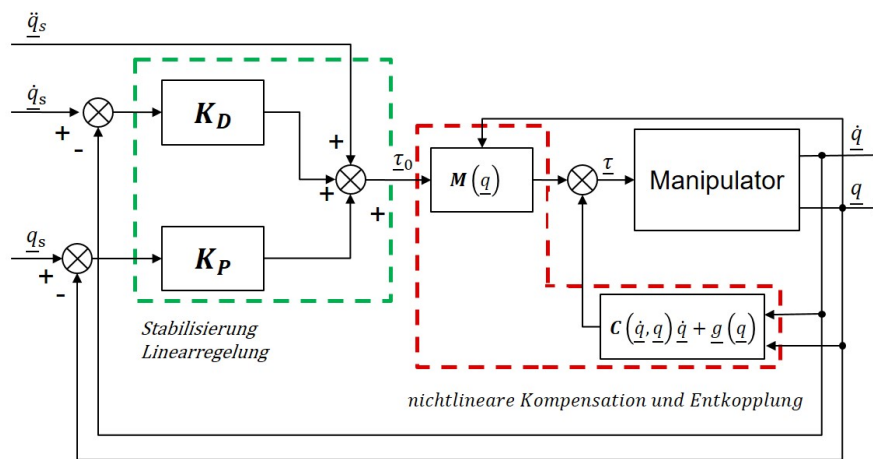


ABBILDUNG 3.8: Blockschaltbild der modellbasierten Regelung

Nichtlinearitäten wie Coriolis- und Zentrifugalterme sowie Gravitationsterme lassen sich einfach durch Addition dieser Kräfte zum Regeleingang kompensieren. Die Feedforward-Komponente wird zur Berechnung der Antriebsmomente auf der Grundlage des inversen dynamischen Modells verwendet. Ein lineares und entkoppeltes Eingangs-/Ausgangsverhältnis ist durch die innere Schleife gegeben. Der äußere Regelkreis ist erforderlich zur Stabilisierung des Gesamtsystems und die Rückkopplung basiert auf einer PD-Regelstruktur zur Berechnung der korrigierten Beschleunigung  $\tau_0$ .

### 3.2.4.2 Kraft/Drehmoment-Regelung

Die Regelung der physikalischen Interaktion zwischen einem Roboter und der Umgebung ist entscheidend für die erfolgreiche Ausführung einer Reihe von praktischen Aufgaben, bei denen der Roboter-Endeffektor ein Objekt manipulieren oder eine Operation auf einer Oberfläche durchführen muss. Typische Beispiele in der industriellen Umgebung sind Polieren, Entgraten, Bearbeiten oder Montieren [6]. Die Kraftregelung kann in zwei Kategorien unterteilt werden, die direkte und die indirekte Kraftregelung.

In der Praxis kann die direkte Interaktion des Roboters mit der Umgebung zu einer Kontaktkraft und zu einem Kontaktmoment führen. Je höher die Umgebungssteifigkeit und je schlechter die Positionsgenauigkeit des Roboters sind, desto leichter kann eine solche Situation eintreten. Dieser Nachteil kann überwunden werden, wenn ein nachgiebiges Verhalten während der Interaktion gewährleistet wird. Dies kann durch eine indirekte Kraftregelung erreicht



werden, entweder auf passive oder aktive Weise. Eine gängige Form der aktiven indirekten Kraftregelung ist der sogenannte Impedanzregler [75]. Ein impedanz- oder admittanzgeregelter Roboter wird durch ein äquivalentes Masse-Feder-Dämpfer-System mit einstellbaren Parametern beschrieben.

Anders als die indirekte Kraftregelung erfordert die direkte Kraftregelung ein explizites Modell der Interaktionsaufgabe. Der Benutzer muss also die gewünschte Bewegung sowie die gewünschte Kontaktkraft und das gewünschte Moment unter Berücksichtigung der durch die Umgebung entstehenden Einschränkungen spezifizieren. Durch die Abweichungen der Soll-Kräfte und -Momente (von den tatsächlichen Werten) werden die erforderlichen Bewegungen des Roboters ermittelt. Die direkte Kraftregelung kann ebenfalls in zwei Gruppen eingeteilt werden: hybride und parallele Kraft-/Positionsregler.

Eine weit verbreitete Strategie, die zu dieser Kategorie gehört, ist die hybride Kraft-/Positionsregelung [76, 12]. Da es nicht immer sinnvoll ist, die Kraft und das Moment in allen sechs kartesischen Freiheitsgraden zu regeln, ist eine hybride Regelung erforderlich, bei der einige Richtungen durch einen Positionsregler und die übrigen Richtungen durch einen Kraftregler gesteuert werden (siehe Abb. 3.9). Mit Hilfe einer sogenannten Selektionsmatrix  $\mathbf{S}$  werden die kraft-/momentgeregelter Achsen definiert. Dabei werden die entsprechenden Elemente auf der Hauptdiagonalen mit 1 besetzt [63] und alle anderen Elemente mit 0. Die Selektionsmatrix  $\tilde{\mathbf{S}}$  der positionsgeregelten Achsen ist wie folgt zu berechnen:

$$\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{I}_s - \mathbf{S} \quad (3.54)$$

Hier ist  $\mathbf{I}_s$  eine Einheitsmatrix mit denselben Dimensionen wie die Selektionsmatrix  $\mathbf{S}$ .

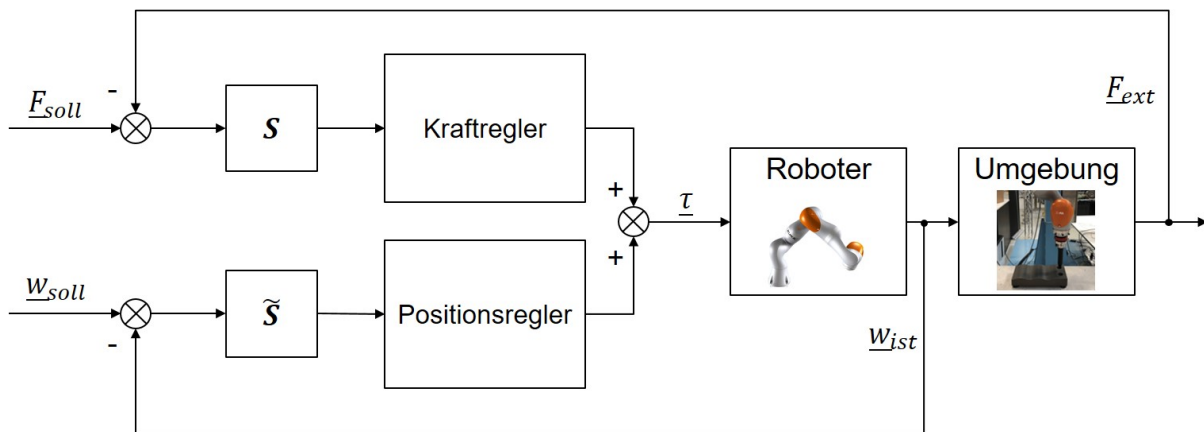


ABBILDUNG 3.9: Blockschaltbild eines hybriden Kraft-/Positionsreglers.

Beim parallelen Kraft-/Positionsregler [77, 78] wird dagegen keine Aufteilung der kartesischen Freiheitsgerade nach einer Regelgröße durchgeführt, sodass sich die beiden Regelkreise durch die Addition der Regelgröße der Kraft und des Positionsreglers überlagern [63].

### 3.3 Orientierung im Raum

In der Handhabungstechnik wird die Orientierung im dreidimensionalen euklidischen Raum für mehrere Montageaufgaben herangezogen bzw. vorgegeben. Es gibt verschiedene mathematische Methoden, um sie zu beschreiben. Euler präsentiert 24 verschiedene Konventionen, die jede Drehung im Raum durch eine Drehung um drei orthogonale Achsen beschreiben. Diese Konventionen sind singularitätsabhängig und ihr Einsatz ist auf bestimmte Anwendungen und Domänen beschränkt. Quaternionen überwinden die Nachteile dieser Konventionen. Sie sind numerisch stabil und effizient und beschreiben die Orientierung durch eine Drehung um eine einzelne Achse im Raum. In dieser Arbeit wird ein Vergleich praxisrelevanter mathematischer Beschreibungen vorgenommen.

Bei der Sichtung der Forschungsliteratur zu Rotationsmatrizen, Euler-Winkeln, Quaternionen und Rotationsvektoren wurde keine einzige Referenz zur Untersuchung der praktischen Anwendbarkeit mathematischer Konstrukte in industriellen Umsetzungen gefunden. Es wurden bislang lediglich mathematische Prinzipien in diesem Bereich untersucht und verglichen.

Ein sich frei bewegender starrer Körper im dreidimensionalen euklidischen Raum hat

sechs Freiheitsgrade [41], drei Freiheitsgrade für die Position im Raum  $(x, y, z)$  und drei Freiheitsgrade für die Orientierung  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ . Roboter mit sechs Freiheitsgraden haben die Fähigkeit, jede beliebige Orientierung im dreidimensionalen euklidischen Raum einzunehmen. Mehrere Industrieroboteranwendungen wie z.B. Schweißen, Einsetzen und Nieten erfordern spezifische Orientierungsbedingungen, um umgesetzt werden zu können.

Roboterhersteller verwenden verschiedene Konventionen, um die Orientierung des Roboterhandgelenks zu beschreiben. Die Interpolation des Orientierungsparameters zwischen zwei vordefinierten Orientierungen ist stark abhängig von der verwendeten Konvention. Das bedeutet, wenn ein bestimmter Pfad zwei unterschiedliche Orientierungen an beiden Enden aufweist, können sich bei Verwendung verschiedener Konventionen unterschiedliche Orientierungen entlang desselben ergeben, obwohl der gleiche Pfad und die gleichen Orientierungen an beiden Enden verarbeitet werden. Um dieses Problem zu diskutieren, wird ein Vergleich der verschiedenen Konventionen auf Basis von Simulationsergebnissen durchgeführt. Dabei werden die Grenzen der einzelnen Konventionen untersucht [79].

### 3.3.1 Euler-Winkel-Konventionen

Die Orientierung des Koordinatensystems relativ zu einem anderen Rahmen kann mit einer  $3 \times 3$  Rotationsmatrix ausgedrückt werden. Eine Rotation ist eine Verschiebung, bei der mindestens ein Punkt des starren Körpers in seiner Ausgangsposition bleibt und nicht alle Linien im Körper parallel zu ihren ursprünglichen Orientierungen verlaufen [6]. Physikalisch kann eine Rotation als eine Neuausrichtung eines Körpers ohne Veränderung seiner Form und Größe interpretiert werden [80]. Das bedeutet, dass eine Rotationsmatrix einen Vektor  $\underline{r} = (x, y, z)^T$  drehen kann, indem sie ihn mit der Matrix multipliziert, während die Länge des Vektors  $\underline{r}$  erhalten bleibt. Rotationsmatrizen haben neun Elemente, obwohl nur drei Parameter erforderlich sind, um eine Orientierung im Raum zu definieren. Das bedeutet, dass sechs Hilfsbeziehungen zwischen den Elementen der Matrix bestehen [6]. Diese Redundanz kann zu numerischen Problemen bei der Berechnung führen und oft den Rechenaufwand eines Algorithmus erhöhen [81]. Da Rotationsmatrizen orthogonal sind, ist die Inverse der Matrix die Transponierung der

Matrix selbst und ihre Determinante ist gleich 1. Die Rotationsmatrix hat die folgende Form:

$$D = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \quad (3.55)$$

Die Matrizen  $D_z$ ,  $D_y$  und  $D_x$  stellen die Rotationsmatrizen um die z-, y- und x-Achse dar, wobei  $\theta_z$ ,  $\theta_y$  und  $\theta_x$  die Winkel der Rotation um die oben genannten Achsen sind.

$$D_z = \begin{pmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.56)$$

$$D_y = \begin{pmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{pmatrix} \quad (3.57)$$

$$D_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{pmatrix} \quad (3.58)$$

Euler-Winkel ( $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ ) werden am häufigsten verwendet, um die Orientierung eines starren Körpers im Raum darzustellen. In diesem Fall sind sie leicht anwendbar und verständlich [82]. Eine beliebige Orientierung im Raum kann durch drei aufeinanderfolgende Rotationen um die Koordinate eines festen oder eines beweglichen Koordinatenrahmens beschrieben werden, sodass zwei aufeinanderfolgende Rotationen nicht um parallele Achsen durchgeführt werden können. Werden die oben genannten Drehungen um einen festen Koordinatenrahmen durchgeführt, werden sie daher als extrinsische Drehungen bezeichnet. Andernfalls, wenn die Rotationen um die Achsen des lokalen Rahmens durchgeführt werden, wobei letzterer nach jeder nachfolgenden Rotation geändert wird, werden diese elementaren Rotationen als innere Rotationen bezeichnet [83].

Die oben genannten Sätze von Euler-Winkeln können in zwei Klassen eingeteilt werden: Proper Euler-Winkel und Tait-Bryan-Winkel. Letztere finden sich in der Literatur auch

unter der Bezeichnung *Kardan-Winkel*.

### 3.3.1.1 Proper Euler-Winkel

Bei richtiger Einstellung des Euler-Winkels erfolgen die erste und die letzte Umdrehung um die gleiche Achse [83]. Das impliziert zwölf Sequenzen von Rotationen. Sechs davon sind intrinsisch ( $ZX'Z''$ ,  $ZY'Z''$ ,  $YZ'Y''$ ,  $YX'Y''$ ,  $XZ'X''$  und  $XY'X''$ ), wobei die Hochsätze ' und '' verwendet werden, um Achsen des lokalen Rahmens nach der ersten und zweiten Rotation anzuzeigen. Die anderen sechs Rotationen sind extrinsisch ( $ZXZ$ ,  $ZYZ$ ,  $YZY$ ,  $YZY$ ,  $YXY$ ,  $XZX$  und  $XYX$ ). Nachfolgend wird die Rotationsmatrix  $D_{ZX'Z''}$  der Rotationsfolge  $ZX'Z''$  berechnet, wobei  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  die Rotationswinkel um die z-, x'- und z''-Achse sind.

$$D_{ZX'Z''} = D(Z, \alpha) \cdot D(X', \beta) \cdot D(Z'', \gamma) \quad (3.59)$$

$$D_{ZX'Z''} = \begin{pmatrix} c_\alpha \cdot c_\gamma - s_\alpha \cdot c_\beta \cdot s_\gamma & -c_\alpha \cdot s_\gamma - s_\alpha \cdot c_\beta \cdot c_\gamma & s_\alpha \cdot s_\beta \\ s_\alpha \cdot c_\gamma + c_\alpha \cdot c_\beta \cdot s_\gamma & -s_\alpha \cdot s_\gamma + c_\alpha \cdot c_\beta \cdot c_\gamma & -c_\alpha \cdot s_\beta \\ s_\beta \cdot s_\gamma & s_\beta \cdot c_\gamma & c_\beta \end{pmatrix} \quad (3.60)$$

Dabei sind  $\cos(\alpha) = c_\alpha$ ,  $\sin(\alpha) = s_\alpha$ ,  $\cos(\beta) = c_\beta$ ,  $\sin(\beta) = s_\beta$ ,  $\cos(\gamma) = c_\gamma$  und  $\sin(\gamma) = s_\gamma$ . Wenn das Orientierungsproblem aus der entgegengesetzten Richtung gelöst wird, bedeutet dies, dass  $D_{ZX'Z''}$  die angegebene Rotationsmatrix ist und die Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  berechnet werden müssen. Das impliziert die folgende Lösung:

$$\beta = \arccos(b_{33}) \quad \alpha = \arctan2(b_{13}, -b_{23}) \quad \gamma = \arctan2(b_{31}, b_{32}) \quad (3.61)$$

$\alpha$  und  $\gamma$  sind nicht lösbar für  $\beta = n\pi$  für  $n \in \mathbb{Z}$ . Das bedeutet, dass die Proper Euler-Winkel in diesen beiden Positionen eine mathematische Singularität aufweisen. Dementsprechend kann diese Konvention von einem Roboter nicht verwendet werden, wenn er eine Orientierung von  $\beta = n\pi$  für  $n \in \mathbb{Z}$  hat. Die Funktion  $\arctan2(y,x)$  ist der Kehrwert der Tangentenfunktion, der das Vorzeichen von y und x berücksichtigt, um den Quadranten zu identifizieren, in dem der resultierende Winkel liegt.

### 3.3.1.2 Tait-Bryan-Winkel

Tait-Bryan-Winkel, auch Kardan-Winkel genannt, stellen eine Drehung um drei verschiedene Achsen dar. Die beiden verschiedenen Benennungen haben ihre Wurzeln in den Namen der Mathematiker. *Tait-Bryan* steht für Peter Guthrie Tait und George Hartley Bryan, einen aus Schottland stammenden mathematischen Physiker des 19. Jahrhunderts und einen britischen Physiker des 19. - 20. Jahrhunderts. *Kardan* geht zurück auf den italienischen Renaissance-Mathematiker Gerolamo Cardano. Diese Winkel sind in der Luft- und Raumfahrttechnik und in der Computergrafik bekannt [82]. Zwölf Rotationssequenzen sind in dieser Gruppe klassifiziert, sechs Sequenzen repräsentieren intrinsische Rotationen ( $ZY'X''$ ,  $ZX'Y''$ ,  $YZ'X''$ ,  $YX'Z''$ ,  $XZ'Y''$ ,  $XY'Z''$ ), die anderen sechs sind extrinsische Rotationen ( $ZYX$ ,  $ZXY$ ,  $YZX$ ,  $YXZ$ ,  $XZY$ ,  $XYZ$ ). Die  $ZY'X''$ -Konvention ist weit verbreitet und wird als Roll-Pitch-Yaw-Konvention (RPY-Konvention) bezeichnet. Besonders in der Luftfahrt ist sie sehr beliebt. *Roll* (Rollen), *Pitch* (Nicken) und *Yaw* (Gieren) stellen drei Winkel dar, wobei Roll die Drehung um die x-Achse ist. Die x-Achse verläuft entlang der Vorwärtsrichtung des Flugzeuges. Die karosseriefeste z-Achse ist nach oben gerichtet (siehe Abbildung: 3.10). Andere Fachliteraturen beziehen sich auf eine andere Anordnung der x-, y- und z-Achse. Aufgrund der physikalischen Klarheit der RPY-Konvention bei der Extrahierung der Drehwinkel und -achsen wird sie häufig in der Robotik verwendet. Die meisten Roboterhersteller, z.B. KUKA und Universalroboter, verwenden diese Konvention, um die Orientierung am Roboterhandgelenk des Programmierhandgerätes zu beschreiben. Manchmal wird jedoch in der Steuerung des Roboters eine andere Konvention verwendet, um die Orientierung während der Bahnplanung zu berechnen. Der Grund dafür, eine andere Konvention für den Controller zu verwenden, wird in den nächsten Kapiteln diskutiert. Die Rotationsmatrix der RPY-Konvention  $D_{RPY}$  sieht wie folgt aus:

$$D_{RPY} = D(Z, \delta) \cdot D(y', \eta) \cdot D(x'', \xi) \quad (3.62)$$

$$D_{RPY} = \begin{pmatrix} c_\delta \cdot c_\eta & c_\delta \cdot s_\eta \cdot s_\xi - s_\delta \cdot c_\xi & c_\delta \cdot s_\eta \cdot c_\xi + s_\delta \cdot s_\xi \\ s_\delta \cdot c_\eta & s_\delta \cdot s_\eta \cdot s_\xi + c_\delta \cdot c_\xi & s_\delta \cdot s_\eta \cdot c_\xi - c_\delta \cdot s_\xi \\ -s_\eta & c_\eta \cdot s_\xi & c_\eta c_\xi \end{pmatrix} \quad (3.63)$$

Dabei sind  $\cos(\delta) = c_\delta$ ,  $\sin(\delta) = s_\delta$ ,  $\cos(\eta) = c_\eta$ ,  $\sin(\eta) = s_\eta$ ,  $\cos(\xi) = c_\xi$  und  $\sin(\xi) = s_\xi$ .

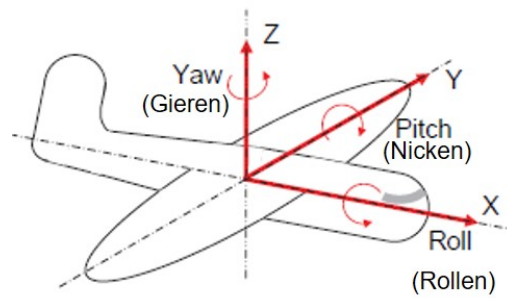


ABBILDUNG 3.10: Roll-Pitch-Yaw-Konvention.

Das umgekehrte Problem, dass die Drehwinkel  $\delta$ ,  $\eta$  und  $\xi$  aus der Rotationsmatrix extrahiert werden müssen, ist oft von Interesse. Die Lösung dieses Problems hängt von der Lösung einer Reihe von transzendenten Gleichungen ab. Das impliziert Folgendes:

$$\eta = \arcsin(-b_{31}) \quad \delta = \arctan2(b_{21}, b_{11}) \quad \xi = \arctan2(b_{32}, b_{33}) \quad (3.64)$$

$\delta$  und  $\xi$  sind nicht lösbar für  $\eta = \frac{2n-1}{2}\pi$  für  $n \in \mathbb{Z}$ . Das bedeutet, dass die Tait-Bryan-Winkel eine mathematische Singularität in diesen beiden Positionen haben. Diese Konvention kann daher nicht von einem Roboter verwendet werden, der eine Orientierung von  $\eta = \frac{2n-1}{2}\pi$  für  $n \in \mathbb{Z}$  hat.

Im vorherigen Unterabschnitt sind 24 Euler-Winkel-Konventionen aufgeführt. Zwölf von ihnen repräsentieren extrinsische Rotationen, die restlichen stellen intrinsische Rotationen dar. Dabei ist es wichtig zu wissen, dass es aufgrund der Dualität der extrinsischen Rotationssätze mit den intrinsischen Rotationen faktisch nur 12 eindeutige Parametrisierungen einer Rotationsmatrix gibt, bei denen aufeinanderfolgende Rotationen um Hauptachsen [11] verwendet werden. Die Analyse beider Rotationsfolgen  $D_{ZY'X''}$  und  $D_{XYZ}$  impliziert, dass sie zur gleichen Rotationsmatrix führen.

$$D_{ZY'X''} = D(z, \delta) \cdot D(y', \eta) \cdot D(x'', \xi) \quad (3.65)$$

$$D_{XYZ} = D(z, \delta) \cdot D(y, \eta) \cdot D(x, \xi) \quad (3.66)$$

$$\Rightarrow D_{ZY'X''} = D_{XYZ}$$

Es lässt sich ableiten, dass die mathematische Singularität der größte Nachteil der Euler-Winkel-Konvention ist. Um die Singularitäten physikalisch interpretieren zu können, wird angenommen, dass sie sich aus der Gimbal-Lock-Situation ergeben, wenn zwei Drehachsen parallel zueinander ausgerichtet sind. Physikalische und praktische Fragen dieser Konvention werden in den kommenden Kapiteln untersucht.

### 3.3.2 Quaternion

Aufgrund der oben genannten Singularitäten (siehe Gleichungen 3.61 und 3.64) sind Rotationsmatrizen numerisch instabil [84]. Eine herkömmliche Strategie zur Überwindung dieser Nachteile besteht darin, die Darstellung zu ändern, wenn sich ein Objekt einer Singularität nähert. Diese Schwächen in der Euler-Winkel-Konvention führten dazu, dass Wissenschaftler nach fortgeschrittenen Konventionen suchten, um das Orientierungsproblem zu lösen. Die Unit Quaternion bietet eine Lösung für dieses Orientierungsproblem, durch die die relevanten Funktionen der Quaternion keine Singularität aufweisen.

Die trigonometrische Form der komplexen Zahl von Rang 2 ( $c = a + ib$ ) kann durch  $c = |c|(\cos(\theta) + i\sin(\theta))$  beschrieben werden, wobei  $\theta$  eine Drehung um eine Achse darstellt, die sich aus dem Kreuzprodukt der realen und imaginären Achsen ergibt. Hamilton erweitert komplexe Zahlen auf ein Zahlensystem mit vier räumlichen Dimensionen, das *Quaternion* genannt wird, auch bekannt als *Hamilton-Quaternion*. Eine Quaternion hat einen Realteil und drei imaginäre Einheiten  $i$ ,  $j$  und  $k$ , die es ermöglichen, eine Drehung im 3D-Raum zu realisieren. William Rowan Hamilton konzipierte die Formel der Quaternion am 16. Oktober 1843 mit einem Taschenmesser auf der Seite der nahegelegenen Broom Bridge, während er mit seiner Frau am Royal Canal in Dublin ausging [85]. Eine Quaternion sei durch  $\mathbf{q}$  bezeichnet.

$$\mathbf{q} = q_0 + \underline{q}_q = q_0 + \mathbf{i} \cdot q_1 + \mathbf{j} \cdot q_2 + \mathbf{k} \cdot q_3 \quad (3.67)$$

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = -1 \quad (3.68)$$



Gemäß dem Euler-Satz kann ein starrer Körper oder Koordinatenrahmen von einer beliebigen Anfangsorientierung durch eine einzige Drehung um die Hauptachse  $\underline{u}$ , auch bekannt als Euler-Vektor [86], in eine beliebige Endorientierung überführt werden. Die Quaternion kann wie folgt definiert werden:

$$\mathbf{q} = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\underline{u} \quad (3.69)$$

Die Norm der Quaternion  $|\mathbf{q}|$  kann mit Hilfe folgender Gleichung berechnet werden:

$$|\mathbf{q}| = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} \quad (3.70)$$

Die Norm der Einheitsquaternion ist dabei gleich eins. Ist  $\mathbf{p}$  eine beliebige Quaternion, kann das Produkt  $\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}$  nach Anwendung der Formel der Quaternion reduziert werden auf:

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{q} = p_0 \cdot q_0 - \underline{p}_q \cdot \underline{q}_q + p_0 \cdot \underline{q}_q + q_0 \cdot \underline{p}_q + \underline{q}_q \times \underline{p}_q \quad (3.71)$$

Für einen beliebigen 3D-Vektor  $\underline{v} \in \mathbb{R}^3$  kann der Operator  $L_q(\underline{v}) = \mathbf{q}\underline{v}\mathbf{q}^*$  den Vektor  $\underline{v}$  geometrisch um einen Winkel  $\theta$  um  $\underline{u}$  rotieren, wobei  $\mathbf{q}^*$  das Konjugat von  $\mathbf{q}$  ist.

$$\mathbf{q}^* = q_0 - \underline{q}_q \quad (3.72)$$

Die Formulierung von  $L_q(\underline{v})$  als Matrixdrehung führt zu folgender Rotationsmatrix:

$$D_{L_q(\underline{v})} = \begin{pmatrix} 2q_0^2 - 1 + 2q_1^2 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_1q_3 + 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_0^2 - 1 + 2q_2^2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 & 2q_0^2 - 1 + 2q_3^2 \end{pmatrix} \quad (3.73)$$

Zu beachten ist, dass  $L_q(\underline{v}) = D_{L_q(\underline{v})} \cdot \underline{v}$ . Die Lösung des inversen Problems zur Ableitung der Quaternionparameter aus der Rotationsmatrix ergibt die folgenden Gleichungen:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\text{tr}(D_{L_q(\underline{v})}) - 1}{2}\right) \Rightarrow q_0 = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.74)$$

$$q_1 = \frac{D_{L_q(\underline{v})_{32}} - D_{L_q(\underline{v})_{23}}}{4q_0} \quad (3.75)$$

$$q_2 = \frac{D_{L_q(\underline{v})_{13}} - D_{L_q(\underline{v})_{31}}}{4q_0} \quad (3.76)$$

$$q_3 = \frac{D_{L_q(\underline{v})_{21}} - D_{L_q(\underline{v})_{12}}}{4q_0} \quad (3.77)$$

Für den Fall, dass  $q_0 = 0$  ist, soll aus den Diagonal-Elementen der Rotationsmatrix  $D_{L_q(\underline{v})}$  ein Quaternion-Parameter ungleich Null berechnet werden. Davon abhängig können dann die weiteren Parameter berechnet werden. Eine praktische Lösung zur Berechnung der Quaternion einer Rotationsmatrix wird in [87] vorgestellt. Obwohl Quaternionen singularitätsfrei sind, werden sie von vielen Anwendern in der Robotik-Community nicht verwendet. Im Falle vieler Anwender weisen die vier Parameter der Quaternion keine direkte physikalische Interpretation auf, während andere Konventionen wie die Euler-Winkel-Konvention eine solche besitzen. Entwickler von Handhabungstechniken bevorzugen die Euler-Winkel-Konvention jedoch immer noch.

Andererseits ist der Einsatz von Quaternionen bei Interpolation zwischen zwei vordefinierten Orientierungen von Vorteil. Diese wird im Kapitel 3.3.3 anhand einer Simulation detailliert grafisch veranschaulicht. Außerdem ist ein Anwendungsfall der Quaternionen im Rahmen dieser Dissertation zur Realisierung von Roboterbewegungen im Kapitel 5.5.2 zu finden.

### 3.3.3 Simulation von praktischen Anwendungen

Dieses Kapitel zeigt eine Simulation der Kreisbahn eines Industrieroboters. Der Roboter muss sich von der Pose A  $(x_A \ y_A \ z_A \ \theta_{x_A} \ \theta_{y_A} \ \theta_{z_A})^T$  in die Pose B  $(x_B \ y_B \ z_B \ \theta_{x_B} \ \theta_{y_B} \ \theta_{z_B})^T$  bewegen, und zwar unter der Bedingung, dass die Orientierung seines Endeffektors in Bezug auf das Objekt während seiner Bewegung erhalten bleibt. Dies kann die Schweißanwendung

eines runden Objekts demonstrieren. Mit Hilfe von Matlab wird ein Simulationsprogramm geschrieben, um die Orientierung bei der gewünschten Bewegung des Roboters zu berechnen. Das kreisförmige Objekt liegt auf der XY-Ebene. Die Orientierung von A und B ist gemäß der RPY-Konvention definiert als  $(R = 0^\circ, P = -45^\circ, R = -85^\circ)$  und  $(R = -180^\circ, P = -45^\circ, R = -85^\circ)$ , wobei A und B einander gegenüberliegen.  $N$  bezeichnet die Anzahl der Inkremente, die entlang des Pfades simuliert werden müssen. Die Orientierungsparameter für jeden Schritt werden linear interpoliert.  $\theta_{x_n}$  wird z. B. wie folgt berechnet:

$$\theta_{x_n} = \theta_{x_A} + \frac{n}{N}(\theta_{x_B} - \theta_{x_A}) \quad (3.78)$$

$n \in \mathbb{N}, n \leq N$ .  $\theta_{y_n}$  und  $\theta_{z_n}$  werden dabei analog zu  $\theta_{x_n}$  berechnet. Der Pfad wird nach RPY, XY'X'' Proper Euler-Winkel-Konvention und Quaternion simuliert (siehe Abbildung: 3.11). Der Drehwinkel der Quaternion wird analog zu den oben berechneten Orientierungsparametern linear interpoliert. Daraus ergibt sich, dass bei Verwendung von RPY und Quaternion die Orientierung entlang des Weges erhalten bleibt. Die numerische Berechnung der Orientierung bei jedem Inkrement sichert dieses Ergebnis. Dagegen wird die gewünschte Orientierung nicht erreicht, wenn die XY'X'' Proper Euler-Winkel-Konvention verwendet wird. Der Vergleich zwischen der Orientierung bei A und B zeigt, dass, da das Objekt in der XY-Ebene liegt, die Orientierung auf die Pose B durch eine Drehung um die z-Achse ab A erreicht werden kann. Die XY'X''-Konvention drückt diese Drehung durch eine Folge von Drehungen um die x-, y' und x''-Achsen aus. Die gewünschte Orientierung in diesem Inkrement wird mit dieser Konvention somit nicht erreicht.

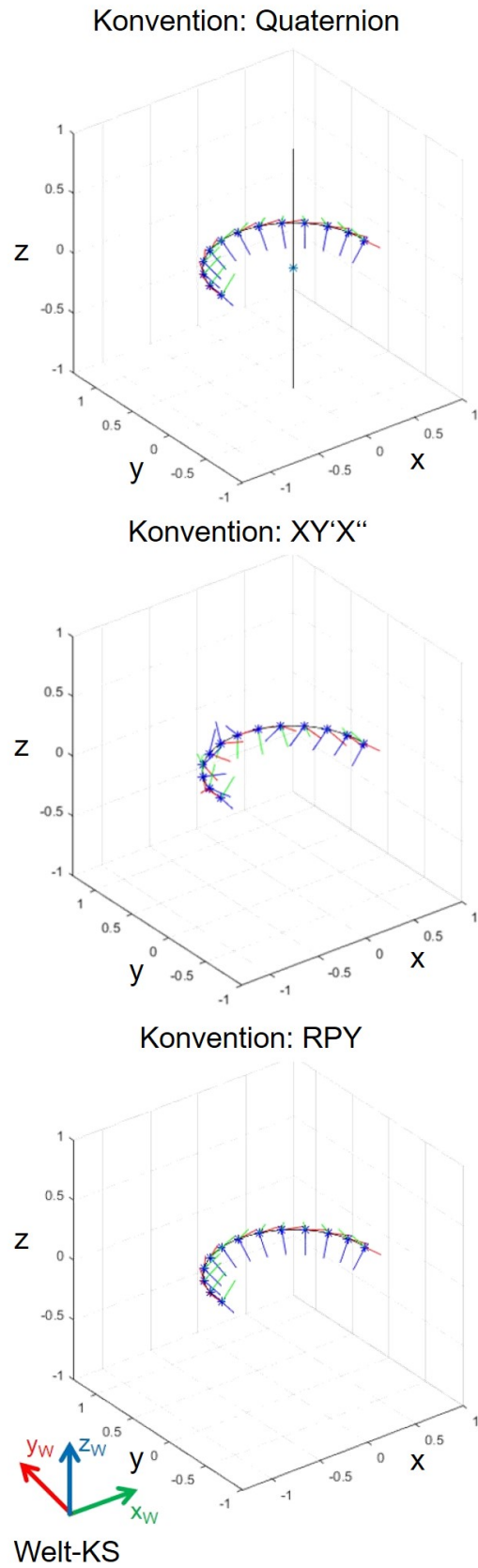


ABBILDUNG 3.11: Simulation, die die Orientierung basierend auf RPY, XY'X'' Proper Euler-Winkel-Konvention und Quaternion darstellt

Das gleiche Objekt befindet sich nun auf der YZ-Ebene und die Orientierungen sind entsprechend XY'Z'' jeweils vordefiniert als  $(\theta_{x_A} = 0^\circ, \theta_{y_B} = 45^\circ, \theta_{z_B} = 85^\circ)$  und  $(\theta_{x_B} = 180^\circ, \theta_{y_B} = 45^\circ, \theta_{z_B} = 85^\circ)$  (siehe Abbildung: 3.12). Das zeigt, dass die Orientierung bei Verwendung von RPY verloren geht, da sie hier eine Drehung um die x-Achse darstellt. Die Quaternion und die XY'Z''-Konvention bewahren die Orientierung in allen Schritten. Hieraus wird ersichtlich, dass die Euler-Winkel beim Interpolieren zwischen zwei vordefinierten Grenzen unterschiedliche Orientierungen aufweisen. Die Orientierung auf ein Objekt bleibt erhalten, wenn die Drehung entlang des Weges um die erste Drehachse der Euler-Winkel-Konvention erfolgt. Die Quaternion stellt eine allgemeine Lösung des oben genannten Problems dar, da jede Drehung im Raum mit einer Drehung um eine Achse ausgedrückt wird.

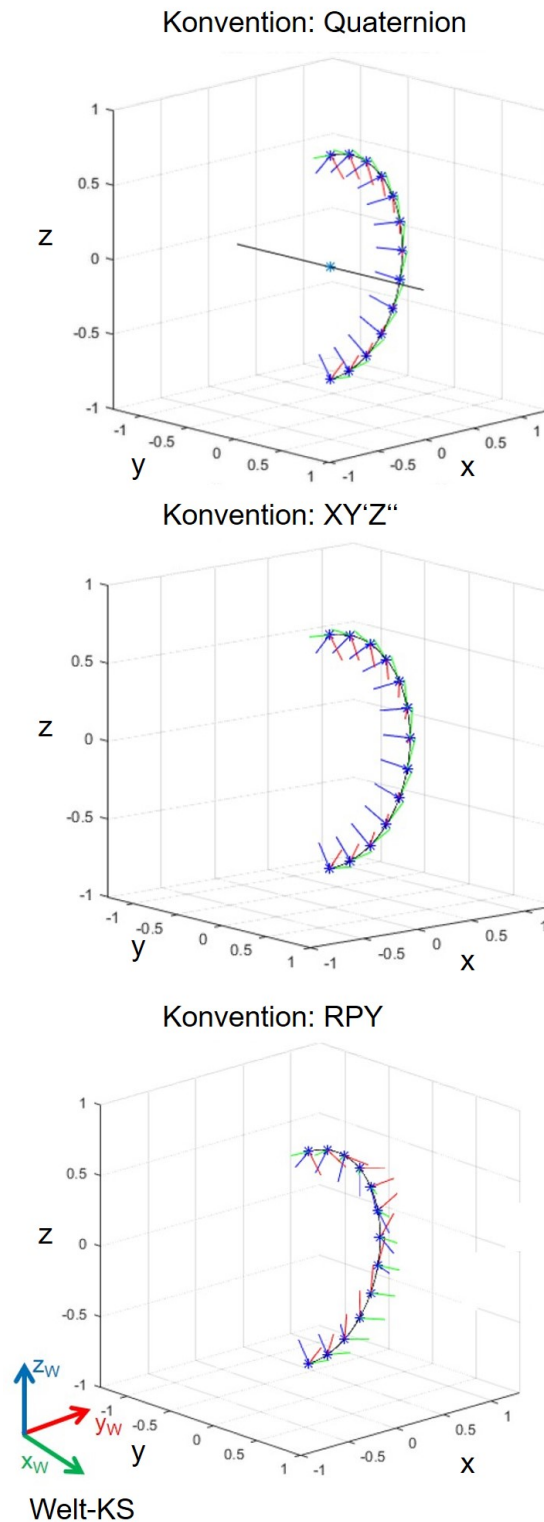


ABBILDUNG 3.12: Simulation, die die Orientierung basierend auf RPY , XY'X'' Proper Euler-Winkel-Konvention und Quaternion darstellt

# 4 Konzeption einer sensitiven Roboterapplikation

Die Planungsmethodik zur Umsetzung sensitiver Robotersysteme wird im Rahmen dieses Kapitels betrachtet. Daraus haben sich in der Vergangenheit, sei es in der Mathematik, im Ingenieurwesen oder in ganz anderen Bereichen, eine Vielzahl von Methoden zum Lösen von Problemstellungen entwickelt. In jedem Fall wird der Problemlöser daran gemessen, wie effizient und zufriedenstellend sich seine Lösung darstellt.

In der Analysephase für die Entwicklung von Montageprozessen wird die Produkt-Prozess-Betriebsmittel-Methode angewendet. Ein Konzept für die Planung einer sensitiven Roboterapplikation wird in Kapitel 4.2 vorgestellt. Dabei wird auf die sieben Hauptkomponenten eines Robotersystems eingegangen. Eine Methodik zur Werkzeugentwicklung wird in Kapitel 4.3 ausführlich erklärt. Danach wird ein Verfahren vorgestellt, um die Genauigkeit des Roboters zu untersuchen. Eine Planung zur Prozessausführung wird abschließend in Kapitel 4.5 vorgestellt.

## 4.1 Analysephase

Im Rahmen der Analysephase erfolgt aufbauend auf der Betrachtung des Produkts und dessen Wechselwirkungen im System die Auswahl des Prozesses und geeigneter Betriebsmittel. Dieser ganzheitliche Planungsansatz für die Entwicklung von Montageprozessen beachtet die Abhängigkeiten und Einflüsse zwischen dem Produkt, dem Prozess und dem Betriebsmittel. Bei der Planung eines sensitiven Montagesystems wird immer von den Anforderungen der Kunden an die Produkte ausgegangen. Die geforderten Produktmerkmale müssen mithilfe der Betriebsmittel und entsprechender Montageprozesse umgesetzt werden. Zu Beginn wird eine Produktanalyse und eine Prozessaufnahme durchgeführt, um die Rahmenbedingungen und

die Herausforderungen des Prozesses zu erfassen. Daraus können die Anforderungen an die Betriebsmittel abgeleitet werden (siehe Abb. 4.1). Dafür wurden im hier betrachteten Anwendungsfall beispielhaft manuelle Wickelversuche durchgeführt und es wurden die verschiedenen Einflussfaktoren auf den Wickelprozess identifiziert. Anschließend wurden die Anforderungen an den Wickler festgelegt und passende Betriebsmittel entworfen.

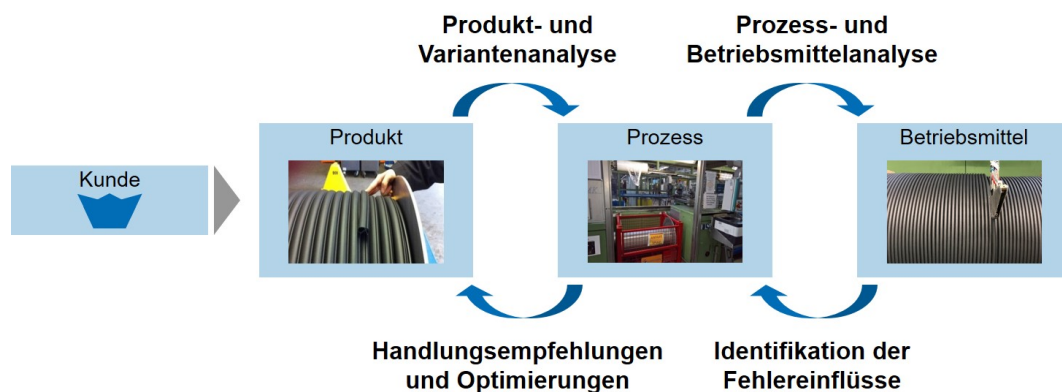


ABBILDUNG 4.1: Vorgehensweise zur Planung von sensitiven Montagesystemen

## 4.2 Planung einer sensitiven Roboterapplikation

Nach der Norm DIN 8373 besteht ein Roboter aus einem Manipulator, der die Bewegung des Roboters erzeugt, und einer Steuerung, die sowohl die Bahnplanung des Manipulators als auch die Kommunikation mit der Umgebung über verschiedene Schnittstellen ermöglicht. Zusätzlich zum Roboter beinhaltet das Robotersystem einen Endeffektor und die Peripherie, Geräte oder Sensoren, die der Roboter zur Erfüllung seiner Aufgabe benötigt, sowie alle Datenkommunikationsschnittstellen, über die der Roboter die Geräte oder Sensoren überwacht [35]. Daher wird in der Robotik das gesamte Robotersystem betrachtet, um eine Applikation zu realisieren. Die Hauptkomponenten eines sensitiven Robotersystems werden nach der Analysephase abgeleitet und zunächst einzeln erläutert.

Ein Konzept für ein sensitives Robotersystem wurde entwickelt (siehe Abb.4.2). Die Grundkomponenten dieses Systems sind ein sensitiver Roboter, ein Werkzeug, Sicherheitselemente, Messmodule und eine Steuerung. Neben oben genannten Grundelementen sind folgende Aufgaben zu lösen: das Steuerungs- und Bedienkonzept des Systems und die Arbeitsplatzgestaltung.





ABBILDUNG 4.2: Konzept eines sensitiven Robotersystems

### 4.2.1 Arbeitsplatzgestaltung

Das Konzept erfordert zwei unterschiedliche **Arbeitsplatzgestaltungen**. Dabei wird das Interaktionsszenario zwischen Roboter und Mensch betrachtet. Bezüglich der Klassifikation der Mensch-Roboter-Interaktion sind unterschiedliche Ansätze in der Literatur zu finden [88, 89, 90]. Ausgehend von den Arten der Zusammenarbeit kann eine Unterteilung in fünf Spektren abgeleitet werden (siehe Abb. 4.3): konventionell, autark/koexistent, synchronisiert, kooperativ und kollaborativ. Bei konventionellen Systemen herrscht eine strikte Trennung der Arbeitsräume von Roboter und Mensch, z.B. durch einen Schutzzaun. Im Fall eines autarken/koexistierenden Systems arbeiten Mensch und Roboter autonom ohne Schutzzaun (kein gemeinsamer Arbeitsraum). Man spricht von einem synchronisierten System, wenn sich stets nur ein Aktionspartner im gemeinsamen Arbeitsraum befindet. Bei einem kooperierenden System liegt ein gemeinsamer Arbeitsraum ohne gemeinsame Tätigkeiten vor, während bei einem kollaborierenden System in einem gemeinsamen Arbeitsraum gemeinsame Tätigkeiten stattfinden.

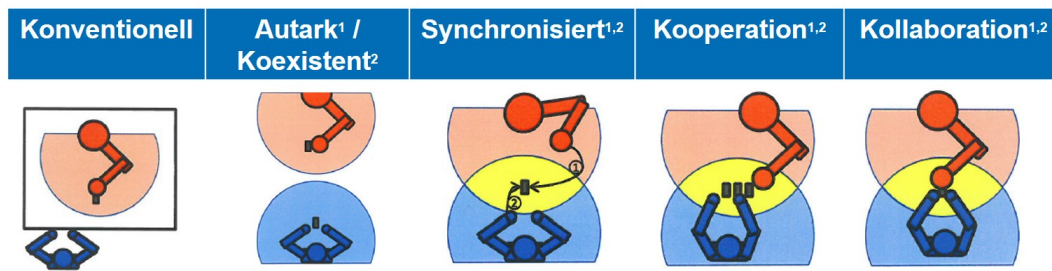


ABBILDUNG 4.3: Verschiedene Arten der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter (1:[88]), 2:[89])

Es wird zwischen dem aktiven Wickelprozess durch aktive Bewegung des Roboters und einer passiven Bewegung des Roboters durch den Eingriff des Menschen unterschieden. Dieser Bereich wird durch Sicherheitselemente beobachtet. Wenn ein Mensch bei Störungen oder Wickelfehlern, die durch die Sensorik erfasst werden, in den Arbeitsraum eintritt, wird der Roboter weichgeschaltet und kann vom Werker per Hand bewegt werden. Der Roboter geht wieder in den aktiven Bewegungsmodus über, sobald der Mitarbeiter den Arbeitsraum des Roboters verlässt und die Aktion quittiert.

## 4.2.2 Roboter

Der **Roboter** erzeugt die für die Applikation erforderliche Bewegung. Der im Rahmen der entwickelten Wickelapplikation (siehe Kapitel 5) verwendete Roboter wird im Folgenden exemplarisch vorgestellt.

Aufgrund seines großen und flexiblen Arbeitsraums wird ein Roboter mit serieller Kinematik verwendet. Hierfür wurden die verfügbaren sensitiven seriellen Roboter auf dem Markt betrachtet, um einen geeigneten Roboter für die Problemstellung zu finden. Für die Durchführung der sensitiven Wickelapplikation wurde der Roboter *KUKA LBR iiwa* [43] ausgewählt. Die Genauigkeitsbetrachtung des Roboters wird in Kapitel 4.4 erläutert.

Neben einem sensitiven Roboter ist eine angetriebene Wickelrolle notwendig, um die Wickelaufgabe zu realisieren (siehe Abb. 4.4). Eine relative Bewegung des Roboters in Abhängigkeit von der rotatorischen Bewegung der Wickelrolle ist der Grundstein des Wickelprozesses. Die Wickelrolle soll folgende Eigenschaften aufweisen:

- Einstellung der Drehparameter: Geschwindigkeit, Beschleunigung und Richtung
- Möglichkeit zum schnellen Wechseln der Ladungsträger
- Schnittstellen zum Datenaustausch mit dem Roboter



ABBILDUNG 4.4: Angetriebene Wickelrolle

Die Wickelrolle ist mit Beckhoffmodulen [91, 92, 93] ausgerüstet, um die Kommunikation mit der Robotersteuerung zu ermöglichen. Über die Sunrise Steuerung des KUKA Roboters können die Drehrichtung und die Drehgeschwindigkeit der Wickelrolle eingestellt und die notwendigen Daten der Wickelrolle abgefragt werden.

### 4.2.3 Steuerungskonzept

Es wird ein **Steuerungskonzept** vorgestellt, das die Steuerung der sensitiven Applikation beschreibt. Abbildung 4.5 beinhaltet die wichtigsten Komponenten des realisierten Steuerungskonzeptes. Im Folgenden wird die Abbildung, insbesondere die Prozesssteuerung, näher erläutert.

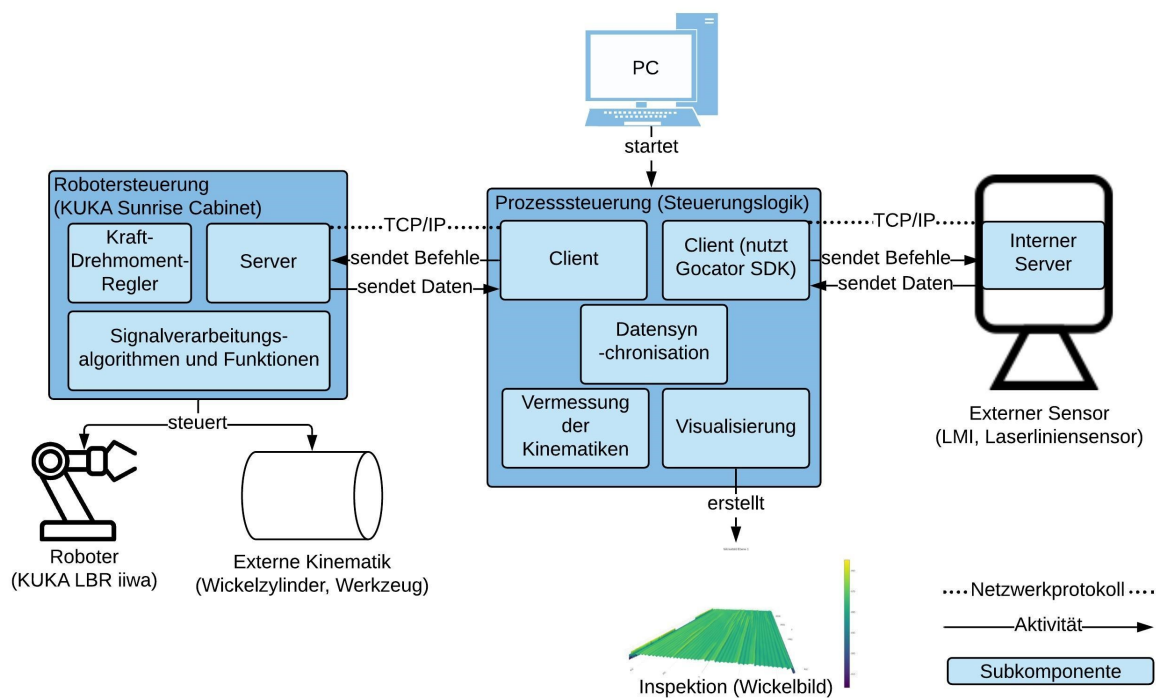


ABBILDUNG 4.5: Steuerungskomponenten des allgemeinen Steuerungskonzepts, validiert am Beispiel einer Wickelapplikation

Zentrales Element des Steuerungskonzeptes ist die Prozesssteuerung. Die Prozesssteuerung ist rein codebasiert als Programm in der Programmiersprache Python (Version 3) implementiert. Sie wird von einem PC gestartet und auf selbigem ausgeführt. Hauptaufgabe der Prozesssteuerung ist es, die gesamte Applikation zu steuern und zu überwachen. Genauer heißt das, Endgeräte wie einen Roboter, externe Kinematik und einen externen Sensor zu steuern und von diesen Endgeräten erhaltene Prozessdaten weiterzuverarbeiten für z.B. Inspektionszwecke.

Für die Kommunikation zwischen den Endgeräten und der Prozesssteuerung wird eine Server-Client-Architektur verwendet. Die Prozesssteuerung besitzt dafür Teilkomponenten, nämlich jeweils einen Client zum Senden der Befehle (Anfragen) und zum Erhalten der Daten (Antworten) von den Servern der genannten Endgeräte. Server-Client-Architekturen eignen sich gut, um die Komplexität eines Steuerungskonzepts zu verringern, da die jeweiligen Server-Client-Komponenten unabhängig voneinander implementiert werden und dadurch leicht in verschiedenen Applikationen genutzt werden können [94]. Die Verbindung zwischen Client und Server wird mittels des gängigen Netzwerkprotokolls Transmission-Control-Protocol/Internet-Protocol (TCP/IP) basierend auf Ethernet aufgebaut. Ethernet mit TCP/IP ist

hier gewählt worden, da es immer häufiger für industrielle Applikationen adaptiert wird und damit Feldbus-Technologien wie Profibus oder Sercos ersetzt [95].

Neben den Client-Komponenten besitzt die Prozesssteuerung noch weitere Komponenten. Hervorzuhebendes Merkmal aller Teilkomponenten der Prozesssteuerung ist ihre lose Kopplung. Die Teilkomponenten sind Elemente einer sogenannten komponentenbasierten Architektur. Eine komponentenbasierte Architektur hat zum Ziel, dass Komponenten in verschiedenen Applikationen ohne weitere Modifikationen wiederverwendet werden können [96].

Das oben beschriebene Steuerungskonzept wurde in der Wickelapplikation weitgehend umgesetzt (siehe Kapitel 5). Die Endgeräte sind hier der Roboter *KUKA LBR iiwa*, die externen Kinematiken *Wickelzylinder* und *Wickelwerkzeug* und der externe Sensor *LMI Laserliniensensor*. Anzumerken ist, dass der KUKA LBR iiwa, der Wickelzylinder und das Wickelwerkzeug indirekt von der Prozesssteuerung über die Robotersteuerung *KUKA Sunrise Cabinet* gesteuert werden. Daher benötigt die Prozesssteuerung nur einen Client zur Kommunikation mit der KUKA Sunrise Cabinet Steuerung und nicht jeweils einen eigenen Client für KUKA LBR iiwa, Wickelzylinder und Wickelwerkzeug. Zur Steuerung des LMI Laserliniensensors ist ein weiterer Client erforderlich.

Die beiden genannten Client-Komponenten werden beispielsweise für andere lose gekoppelte Teilkomponenten der Prozesssteuerung genutzt. Die Komponente zur Vermessung der Kinematiken steuert beispielsweise die Einmessung des Wickelzylinders über die Clients. Die Komponente zur Datensynchronisation erhält als Eingabe die durch die Clients erhaltenen Roboter- und Sensordaten und synchronisiert diese anhand der Zeitstempel jedes Datensatzes. Die Synchronisation erfolgt dann nach Beenden des Wickelprozesses. Die Komponente zur Visualisierung erhält als Eingabe die synchronisierten Daten und erstellt basierend auf diesen ein dreidimensionales Wickelbild, das wiederum zur Inspektion des Wickelprozesses genutzt wird.

#### 4.2.4 Sicherheitskonzept

Zur Absicherung der Anlage wurde ein **Sicherheitskonzept** entworfen. Dadurch sollen Kollisionen vermieden werden. Die Arbeitsbereiche der beweglichen Komponenten der Anlage, der Roboter *KUKA LBR iiwa* und die angetriebene Wickelrolle müssen durch Sicherheitskomponenten überwacht werden. Diese Komponenten können z. B. Laserscanner, Lichtvorhänge und Lichtschranken sein. Der Sicherheitskreis des Roboters muss mit den eingesetzten Sicherheitskomponenten und der Wickelrolle verbunden werden. Sobald ein Mensch in den überwachten Bereich eintritt, öffnet sich der Sicherheitskreis. Dann wird der Roboter weich geschaltet und die Wickelrolle kann nur über eine Quittiertaste durch den Anwender gesteuert werden. Der Roboter kann dann nur passiv durch den Werker bewegt werden. Diese Funktion wird eingesetzt, wenn bei der Wicklung des Wickelzylinders Fehler aufgetreten sind. Es bedarf menschlicher Interaktion, um den Fehler zu beheben oder den Wickelzylinder auszutauschen.

#### 4.2.5 Bedienmethode

Die **Bedienmethode** dient der intuitiven und einheitlichen Steuerung des gesamten Systems anhand unterschiedlicher Medien. Die Bedienmethode ist eine wichtige Komponente für den erfolgreichen Betrieb der Applikation. Unterschiedliche Anwendergruppen werden definiert: eine Entwicklergruppe und eine Bedienergruppe. Der Entwickler hat die Möglichkeit, Bahn- und Prozessparameter zu modifizieren, um auf Änderungen im Produkt oder Prozess zu reagieren. Dahingegen hat der Bediener nur beschränkten Zugang zu den Prozessdaten. Die für ihn zugelassenen Funktionen sind das Starten, Stoppen und Anhalten der Applikation. Die Funktionen können durch das Smartpad des Roboters aufgerufen werden. Diese Trennung dient dazu, Fehler oder Modifikationen durch nicht zugelassenes Personal zu vermeiden.

#### 4.2.6 Werkzeug

In den meisten Roboteranwendungen wird ein Werkzeug auf dem Roboterflansch montiert. Dies kann ein Schleifwerkzeug, ein Wickelwerkzeug, ein Schweißwerkzeug oder ein Greifer sein. Ein TCP muss am Werkzeug als mechanische Schnittstelle zwischen dem Werkzeug und

dem Arbeitsobjekt definiert sein. Die Schnittstelle wiederum wird durch die Stelle definiert, an der das vom Industrieroboter geführte Werkzeug das Arbeitsobjekt beeinflusst [97]. Daher ist die genaue Pose des TCP-KS für die Anwendung wichtig. Die Bahnparameter wie z.B. Start- und Endposition, Geschwindigkeit und Beschleunigung sind in Bezug auf den TCP zu definieren. Daher muss bei der Inbetriebnahme des Werkzeugs eine kinematische Kalibrierung des Werkzeugs durchgeführt werden. Wiest [98] erwähnt mehrere Verfahren zur kinematischen Kalibrierung des Werkzeugs. Ein Verfahren basierend auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird in Kapitel 5.2.1 erklärt. Darüber hinaus ist eine dynamische Kalibrierung des Werkzeugs wichtig, um das dynamische Verhalten des Roboters zu verbessern und das dynamische Modell des Roboters besser zu beschreiben [6]. Dies ist von großer Bedeutung für kraftkontrollierte Anwendungen. Bei der dynamischen Messung werden die Daten wie die Position des Schwerpunktes und die Masse des Werkzeugs bestimmt. Dies wird in Kapitel 5.2.2 betrachtet.

Um ein Roboterwerkzeug zu entwickeln, wurde ein methodisches Vorgehen entworfen. Dieses Vorgehen ist eine Kombination aus dem rekursiven TOTE-Schema und dem morphologischen Kasten zur Ermittlung der besten Lösung (siehe Kapitel 4.3) und wird zur Entwicklung des Wickelwerkzeugs eingesetzt (siehe Kapitel 5.1).

#### **4.2.7 Planung einer Messstrategie**

Roboterapplikationen werden in der Regel nicht in idealen Umgebungen ausgeführt. Dies ist auf die Genauigkeit des Roboters und der externen Sensoren sowie auf die Umgebung zurückzuführen. In der Robotik sind daher überbestimmte Systeme, die durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate oder die Singulärwertzerlegung lösbar sind, zur Verbesserung der Genauigkeit von großem Vorteil. In Anlehnung daran wird eine Messstrategie (siehe Abb. 4.6) entwickelt, um den Messablauf im Rahmen einer Robotikanwendung zu definieren. Zunächst muss das Werkzeug vermessen werden. Danach werden die externen Sensoren in Bezug auf den Roboterflansch vermessen. Die externen Kinematiken können dann mittels externer oder interner Sensorik vermessen werden.



ABBILDUNG 4.6: Entwicklung einer Messstrategie

Im Rahmen der Inbetriebnahme oder nach einer Rekonfiguration müssen somit Grundaufgaben wie das Vermessen von Roboterwerkzeugen, -sensoren und sonstigen Objekten erfüllt werden. Hinsichtlich der Sensoren wird zwischen 3D-, 2D- und 1D-Sensoren unterschieden. Zu 3D-Sensoren zählen beispielsweise Tiefenbildkameras oder Stereokameras, welche x-, y- und z-Koordinaten bezüglich des Kamera-KS ermitteln. Dagegen liefern 2D-Sensoren wie z. B. Laserliniensensoren oder 2D-Kameras lediglich Messwerte für zwei Koordinaten. Bei Roboterapplikationen werden häufig auch 1D-Sensoren verwendet, z. B. Laserabstandssensoren. Mittels der genannten 3D-Sensoren und Signalverarbeitungsalgorithmen können die 6D-Pose-Parameter der 3D-Objekte einfach bestimmt werden.

Da 6D-Pose-Parameter mithilfe von 2D-Sensoren jedoch nicht auf direktem Weg bestimmt werden können, weil physikalische Merkmale auf der 3D-Ebene erforderlich sind, bereitet das Vermessen von Objekten mit 2D-Sensoren Schwierigkeiten. 2D-Laserliniensensoren dienen der Prozessreferenzierung und -inspektion sowie dem sensorischen Nachführen und Scannen von Bauteilen und geben 2D-Messwerte in x- und y-Richtung des Sensor-KS aus. Für die Transformation der Sensormessdaten in das Roboter-KS und damit in den dreidimensionalen Raum ist die Bestimmung der Sensorposition und -orientierung in Bezug auf das Flansch-KS des Roboters erforderlich. Dazu muss eine kinematische Gleichung in Form von Transformationsmatrizen gelöst werden. Eine intuitive Kalibrieremethode zum Vermessen eines 2D-Sensors bezüglich des Roboterflansches wird in Kapitel 5.3 vorgestellt. Die Vermessung von 1D-Sensoren erfolgt wie beim TCP allein mittels Hand-Auge-Kalibrierung sowie einer Messspitze, und zwar durch mindestens viermaliges Anfahren einer Referenz aus verschiedenen Roboterposen.

Die Arbeitsposen sind meistens im Werkstück-KS definiert. Daher stellt die Kalibrierung von



Kinematiken und Arbeitsobjekten zur Vermessung des Werkstück-KS eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Diese erfolgt durch interne Sensorik wie z.B. Kraft-/Momentsensoren oder durch die oben beschriebenen externen Sensoren, die im ersten Schritt zu vermessen sind. Ein Konzept zur Vermessung eines zylindrischen Objekts (siehe Abb. 5.14) in Bezug auf das Roboter-KS mittels einer Best-Fit-Methode wird in Kapitel 5.4 vorgestellt.

Letztendlich werden die definierten Merkmale der Arbeitsobjekte vermessen. Typische Merkmale sind Löcher, Kanten oder Konturen. Dazu wird wiederum interne bzw. externe Sensorik angewendet. Signalverarbeitungsalgorithmen sind die Bausteine für die Merkmaldektion.

## 4.3 Methode zur Werkzeugentwicklung

### 4.3.1 Das TOTE-Schema

*Trial and Error* bezeichnet ein iteratives Vorgehen, das sich aus dem menschlichen Denken heraus entwickelt hat. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass man nach dem Lösen einer Aufgabe überprüft, ob das mutmaßlich oder vermeintlich erreichte Ziel tatsächlich den Vorgaben gemäß erreicht wurde. Erkennt man dabei Verbesserungspotential, startet man einen neuen Versuch (bis das gewünschte Ergebnis erzielt wird). Dadurch entsteht ein schleifenartiges Vorgehen, das in einem Ablaufdiagramm dargestellt werden kann (siehe Abb. 4.7). Die darin verwendeten Buchstaben verweisen auf die englischen Begriffe für den Ablauf – *Test-Operate-Test-Exit* – aufgrund derer sich die Abkürzung *TOTE-Schema* durchgesetzt hat.

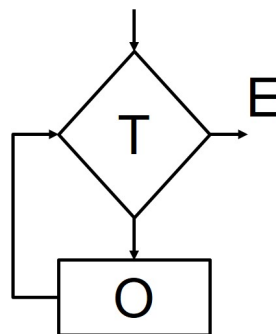


ABBILDUNG 4.7: Das TOTE-Schema [99]

In [100] wird das TOTE-Schema folgendermaßen beschrieben: Die mit *TOTE* abgekürzte Abfolge beginnt mit einer Prüfoperation (Test), die die Ausgangssituation analysiert. Daraufhin wird eine entsprechende Handlungsoperation (Operate) ausgewählt und durchgeführt. Es folgt erneut eine Prüfoperation (Test), die den Erfolg der Handlungsoperation überprüft. Ist das Ergebnis zufriedenstellend, wird der Prozess beendet (Exit). Kann das Ergebnis verbessert werden, muss die Handlungsoperation entsprechend angepasst und wiederholt werden [100]. Bei komplexeren Denkabläufen werden zahlreiche TOTE-Einheiten hintereinander durchgeführt. Alternativ werden vor einem erneuten Prüfvorgang mehrere Handlungen nacheinander in Form einer *Handlungskaskade* getätigt. Es sind daher vielfache Kombinationen und Abfolgen bei der Kopplung geistiger Prozesse möglich, die sich jedoch alle auf das Grundmuster der TOTE-Einheiten zurückführen lassen [100].

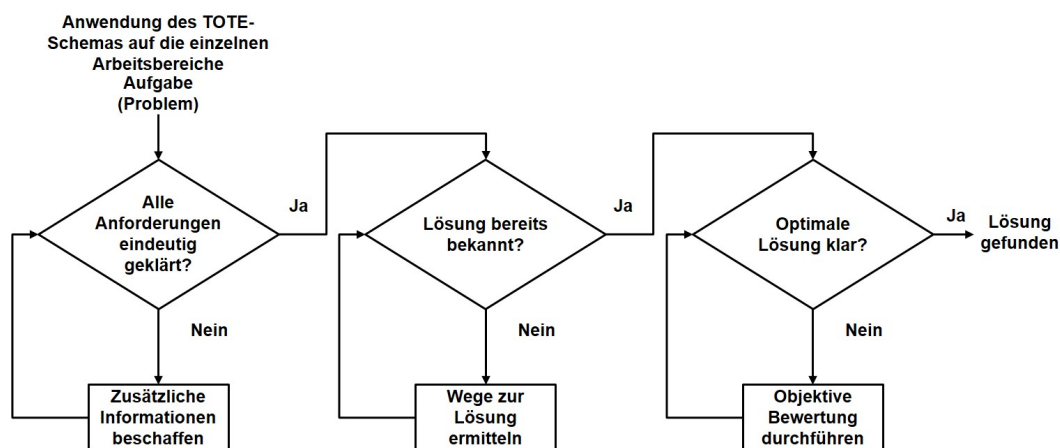


ABBILDUNG 4.8: Lösungsweg, ausgehend von der Aufgabenstellung [99]

Das in Abbildung 4.8 präsentierte TOTE-Schema kann inhaltlich erweitert werden. Zentral ist dabei die genaue Bearbeitung jedes einzelnen Schrittes, um letztlich zum optimalen Ziel zu gelangen.

Am Anfang des iterativen Zyklus, d. h. nach der Einsicht der Aufgabenstellung, steht die Frage: „Sind alle Anforderungen eindeutig geklärt?“ An dieser Stelle erfolgt die Sammlung aller zu diesem Zeitpunkt als nützlich erachteten Informationen. Nach ausführlicher Recherche bzw. Informationsbeschaffung wird die Schleife eingeleitet mit der Frage: „Ist die Lösung bereits bekannt?“ Um die optimale Lösung zu finden, müssen zunächst verschiedene Lösungswege ausgemacht werden. Die Ermittlung dieser Lösungen kann ebenfalls durch einen iterativen Zyklus erfolgen. Nach Erreichen der mutmaßlich optimalen Lösung wird

zum nächsten Abschnitt übergegangen. Der Entwickler befindet sich nun am Scheideweg seines Denkprozesses. Er muss sich an diesem Punkt die Frage stellen: „Ist dies die beste Lösung, die zu finden ist?“ Bejaht er die Frage, wird der Prozess beendet. Verneint er die Frage, entscheidet er sich für die Rekursion und beginnt die Optimierung. Dieses Vorgehen wird bis zur Erreichung des Ziels, nämlich der optimalen Lösung, wiederholt. Innerhalb der Rekursion können zur Lösungsfindung weitere methodische Verfahren zum Einsatz kommen. Eine mögliche Methode ist beispielsweise der *Morphologische Kasten*.

### 4.3.2 Der Morphologische Kasten

Der Morphologische Kasten ist eine Kreativtechnik, die auf den Schweizer F. Zwicky [101] zurückgeht und bei der ein Problem zunächst in seine elementaren Bestandteile zerlegt wird. Daraufhin werden für jedes Problemelement Lösungsmöglichkeiten bzw. Ausprägungen ermittelt. In Kombination mit elementspezifischen Lösungsmöglichkeiten wird dann das Gesamtproblem gelöst [102]. Diese systematisch heuristische Kreativitätstechnik erzeugt eine mehrdimensionale Matrix. Abbildung 4.9 zeigt einen „Morphologischen Kasten in prinzipieller Darstellung seiner Vorgehensweise zur Bildung einer Lösungsvariante“ [100].

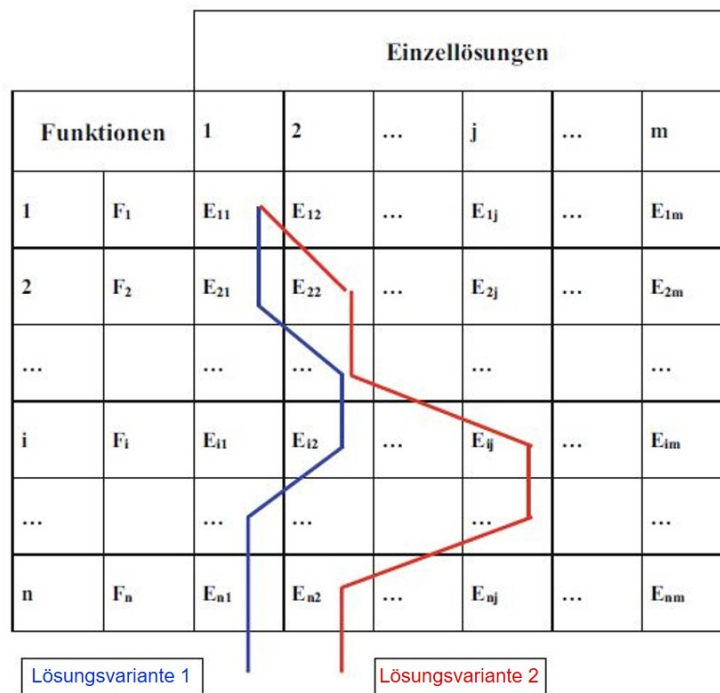


ABBILDUNG 4.9: Weg von der Aufgabenstellung zur Lösung [99]

Die Zeilen (1; 2 : : n) enthalten die Teil- oder Einzelfunktionen aus der vorher aufgestellten Funktionenstruktur als Funktionen  $F_i$ . In den einzelnen Zeilen stehen jeweils die möglichen Varianten der Elemente  $E_{ij}$ , die zur Erfüllung dieser Funktion ermittelt wurden (Wirkprinzipien, Funktionsträger), sodass eine Matrix entsteht, die in jeder Zeile mindestens ein Element aufführt.

Die Spalten (1; 2 : : m) weisen jeder Funktion  $F_i$  die jeweiligen (Einzel-)Lösungen zu [99]. Um zu einer Gesamtlösung zu kommen, kombiniert man jeweils ein Element jeder Zeile mit einem Element der folgenden Zeile. Auf diese Weise werden die genannten Lösungsvarianten erreicht, deren Anzahl sich aus zwei wesentlichen Kriterien ergibt [99]:

- Anzahl der Einzellösungen in den Zeilen
- Verträglichkeit der Elemente miteinander

## **4.4 Genauigkeitsbetrachtung eines Prozessroboters mit integrierten Kraft-/Momentsensoren**

Einige Roboter verfügen über Kraft-/Momentsensoren zur Bestimmung externer Kräfte und Momente. Die Eignung dieser Roboter zum Einsatz bei sensitiven Applikationen hängt von der Genauigkeit der ermittelten externen Kräfte/Momente und der erforderlichen Prozesskräfte und Toleranzen ab. Außerdem können diese Roboter bei ausreichender Genauigkeit zur dynamischen Vermessung (siehe Kapitel 5.2.2) eines Werkzeugs eingesetzt werden. Die Universalroboter (UR) der Serie CB sind in der Lage, die externen Belastungen der Gelenke durch Stromüberwachung zu bestimmen. Die zuletzt erschienene e-Serie der UR [42] ist mit einem sechsdimensionalen, am Flansch montierten Kraft-/Momentsensor ausgestattet. Die sechssachsigen Roboter Panda von Franka Emika [103] und HC10 von Yaskawa [104] haben einen Kraft-/Momentsensor in jeder Drehachse. Der KUKA LBR iiwa [43] besitzt einen solchen Sensor in jeder seiner sieben Achsen. Letzterer wurde aufgrund seiner Verfügbarkeit für die in dieser Arbeit durchgeführten Tests verwendet.

Die ermittelten Kräfte/Momente dienen z. B. der Inbetriebnahme von Prozessen oder der Bewertung der Qualität. Damit der Roboter als Messinstrument eingesetzt werden kann, muss zunächst die Prüfprozesseignung untersucht werden. Die Untersuchung erfolgt durch eine innovative Methode, bei der zwei bereits vorhandene Methoden unterschiedlicher Bereiche miteinander verknüpft werden, nämlich die Methode DMAIC (Define–Measure–Analyse–Improve–Control) aus dem Qualitätsmanagement zur Untersuchungsstrukturierung sowie der Eignungsnachweis von Prüfprozessen zur inhaltlichen Wissensermittlung. Ein Versuchsaufbau liefert Ergebnisse, mithilfe derer systematische und zufällige Messfehler des Roboters ermittelt werden können. Ziel ist es, die Verwendung eines Roboters mit integrierter Drehmomentsensorik als Messinstrument in der Montage zu analysieren [105].

#### 4.4.1 Eignung des Prüfprozesses

Die GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) postuliert die Existenz eines wahren Messwertes, der allerdings grundsätzlich unbekannt ist. Der Grad der Messunsicherheit gibt daher Aufschluss darüber, wie weit der ermittelte Messwert vom wahren Wert entfernt ist [106]. Dabei wird zwischen systematischen und zufälligen Messabweichungen unterschieden. Die systematische Messabweichung wird als sogenannter *Bias* bezeichnet und berechnet sich aus der Differenz (Offset) zwischen dem Referenzwert eines Normals und dem Mittelwert der gesammelten Messwerte. Die zufällige Messabweichung ist als *Standardabweichung* bekannt, welche sich aus den Wertunterschieden bei wiederholter Messung durch nicht beherrschbare Einflussfaktoren ergibt [107] [108] [109].

Um die Messunsicherheit zu bestimmen, werden standardisierte Verfahren eingesetzt, die z. B. in den Unternehmensrichtlinien von Bosch und Ford, in der Measurement System Analysis (MSA) der Automotive Industry Action Group (AIAG) und im Band 5 des Verbands der Deutschen Automobilindustrie VDA mit dem Titel *Prüfprozesseignung* beschrieben werden [107, 109]. All diese Verfahren ähneln sich hinsichtlich ihrer Vorgehensweise zur Prüfung eines Messsystems. Es werden Messungen unter realen Bedingungen gewonnen, deren Ergebnisse anschließend grafisch und numerisch analysiert und anhand derer Kennwerte

ermittelt werden, die wiederum mit vorgegebenen Grenzwerten in Beziehung gesetzt werden. Die Verfahren unterscheiden sich jedoch in der Berechnung der Kennwerte und in der Anzahl der betrachteten Einflussgrößen [110]. Besonders bekannt ist die MSA, die als Grundlage für viele Firmenrichtlinien dient. Sie wird dort jedoch durch die Berechnung der Cg- bzw. Cgk-Werte zur Untersuchung der systematischen Messabweichung ergänzt (Verfahren 1). Basis für den VDA Band 5 sind dagegen die ISO-Norm bzw. die GUM. Hier ist das Kriterium zur Bewertung eines Messsystems ein Eignungskennwert QMP (Capability Ratio Process), welcher von der doppelt erweiterten Messunsicherheit abhängig ist [110].

#### 4.4.2 Analyse des Roboters

Zunächst wurde ein passender Roboter gewählt, um die Forschungsidee zu testen und die entwickelte Verfahrensweise zu validieren.

Der Leichtbauroboter (LBR) KUKA LBR iiwa 14 R820 hat eine Traglast von 14 kg und eine Reichweite von 820 mm und ist sehr gut geeignet, um sensitive Applikationen auszuführen. Grund dafür sind spezielle interne Sensoren und Regelmechanismen. So ist er z. B. mit Winkel- und Gelenkmomentsensoren in allen Achsen versehen. Die Sensoren dienen jedoch nicht nur der Erkennung einer drohenden Kollision. Beim Greifen eines Werkstücks beispielsweise, welches eine zusätzliche Kraft darstellt und die Messungen der Gelenkmomentsensoren daher beeinflusst, vergleicht der Roboter den gemessenen Wert des Gelenkmomentsensors mit dem erwarteten externen Drehmoment für diese Achse, welches sich aus dem Robotermodell und den angegebenen Lastdaten ergibt. Die Drehmomentsensoren für den LBR iiwa 14 sind, wie in Abb. 4.10 dargestellt, unterschiedlich festgesetzt: 320 Nm in Achse 1 und 2, 176 Nm in Achse 3 und 4, 110 Nm in Achse 5 sowie 40 Nm in Achse 6 und 7. Die achsspezifische Momentengenauigkeit wird mit  $\pm 2\%$  angegeben [43].

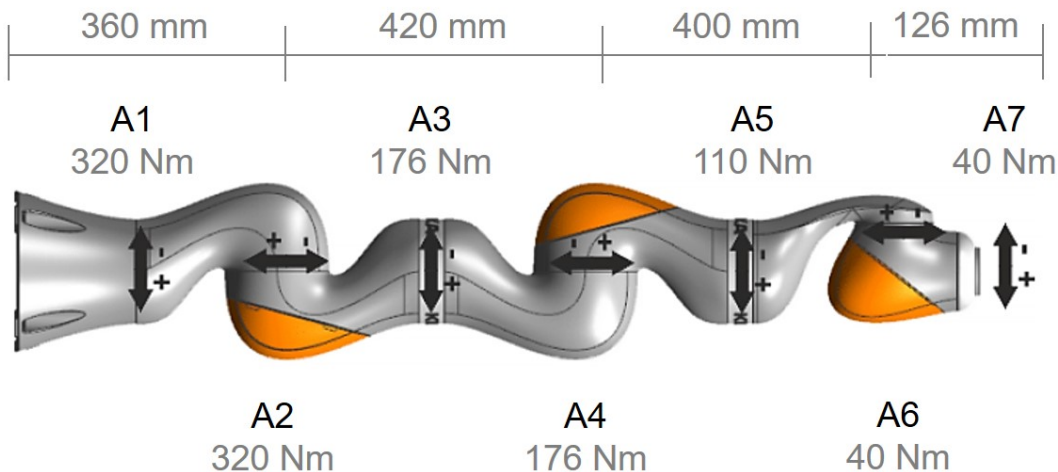


ABBILDUNG 4.10: Roboter KUKA LBR iiwa 14 R820 mit sieben Drehmomentsensoren

### 4.4.3 Methodische Vorgehensweise

Im Folgenden wird eine Methode präsentiert, mit der der Einsatz von Robotern als Messgeräte bei der Montage analysiert werden kann. Im ersten Schritt findet eine Voruntersuchung dahingehend statt, wie präzise die Drehmomente gemessen werden. Im Weiteren verknüpft das Verfahren zwei etablierte Ansätze aus der Literatur. Zum einen wird die Methode DMAIC aus dem Qualitätsmanagementansatz Six Sigma eingesetzt [111]. Diese Methode wird in der Montage, insbesondere in kontinuierlichen Verbesserungsprozessen KVP, verwendet. Die einzelnen Phasen der DMAIC-Methode (siehe Abb. 4.11) bilden den Prozessablauf der Untersuchung ab. Neu ist dabei die inhaltliche Kombination der Phasen mit den Methoden der Prüfprozesseignung. Die Verknüpfung dieser beiden Methoden gewährleistet einen fehlerfreien Untersuchungsablauf. Die entwickelte Vorgehensweise ist schematisch in Abb. 4.11 dargestellt, beginnend mit der Beschreibung der Zielstellung, den Angaben zum Messsystem sowie einer Versuchsplanung. Anschließend folgt die Messdurchführung, die Analyse der Messwerte, das Generieren von Verbesserungsideen für den Versuchsaufbau oder für spätere Applikationen, die Dokumentation sowie die Kontrolle. Die Streuung des Drehmoments und die Wiederholbarkeit in den einzelnen Achsen werden durch die Messungen am Roboter und die Analyse der gewonnenen Daten ermittelt. Dabei wird die Messunsicherheit des Roboters mit integrierten Drehmomentsensoren bestimmt. Normalerweise sind bei der Prüfprozesseignung bestimmte Toleranzangaben für ein Produktmerkmal vorgegeben. In diesem Fall existiert jedoch keine

solche Toleranzgrenze. Für ein aussagekräftiges Ergebnis werden daher die Drehmomente in den Roboterachsen gemessen, indem Messungen mit Lasten über die gesamte Nutzlast am Roboterflansch durchgeführt werden.

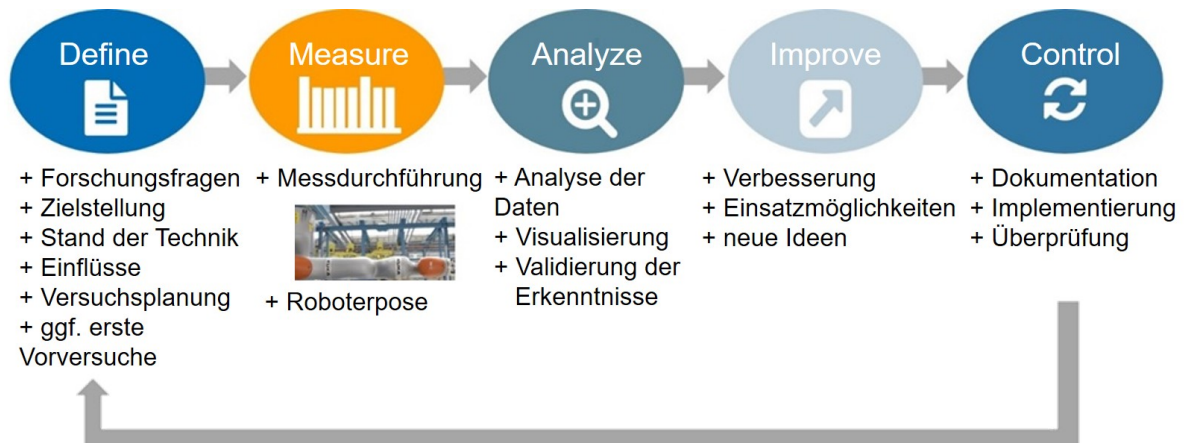


ABBILDUNG 4.11: Vorgehensweise der Untersuchung eines Prozessroboters als Messroboter

#### 4.4.4 Genauigkeitsbetrachtung der integrierten Sensorik

Die **Define-Phase** beinhaltet die Zielstellung, die Einflussmöglichkeiten auf die Messung sowie die Messplanung. Für den Versuchsaufbau werden die geringstmöglichen Einflussgrößen festgelegt. Der Einsatz von Gewichten erzeugt Drehmomente, welche anschließend erfasst und analysiert werden. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen, werden dabei verschiedene Gewichte, die die gesamte Nutzlast abdecken, am Roboterflansch befestigt, d.h. Gewichte von wenigen Gramm bis zur Nennlast. Während der Messungen erfolgt die Erfassung der Drehmomente in den einzelnen Achsen, welche daraufhin analysiert werden. Bei der Messung befindet sich die zweite Roboterachse bei 90 Grad, die Position der restlichen Achsen liegt bei 0 Grad (siehe Abb. 4.11).

Jede Messung unterliegt bestimmten Einflussfaktoren, darunter das Messsystem, die angewandte Methode, die Qualifikation des Bedieners, die Umgebung etc. All diese Faktoren werden für den Versuchsaufbau registriert [108][109]. Im Ishikawa-Diagramm in Abb. 4.12, einem Ursachen-Wirkungs-Diagramm zur systematischen Suche nach Ursachen, werden die Einflussfaktoren auf das Messsystem dargestellt [112]. Es beinhaltet verschiedene Komponenten, die Einfluss auf das Messergebnis haben können, z. B. die Messmethode, das Messgerät, die Auswertung, den Versuchsleiter, das Messobjekt sowie die Umwelt. Der Einfluss durch die



Messmethode liegt beispielsweise in der Dauer und Anzahl der Messungen und in der Messfrequenz begründet. Ebenso kann das Messergebnis durch Filter, Messwertverknüpfungen oder die Wahl der Daten einer spezifischen Roboterachse bei der Auswertung verzerrt werden. Auch Umweltfaktoren spielen eine große Rolle, z. B. Temperatur oder Schwingungen. Der Mensch wirkt sich insofern auf das Messergebnis aus, als er für die Auswahl des Roboters und die Sorgfalt bei der Durchführung verantwortlich ist. All diese Komponenten werden in der Regel als zufällige Abweichungen auf das Messergebnis aufgefasst.

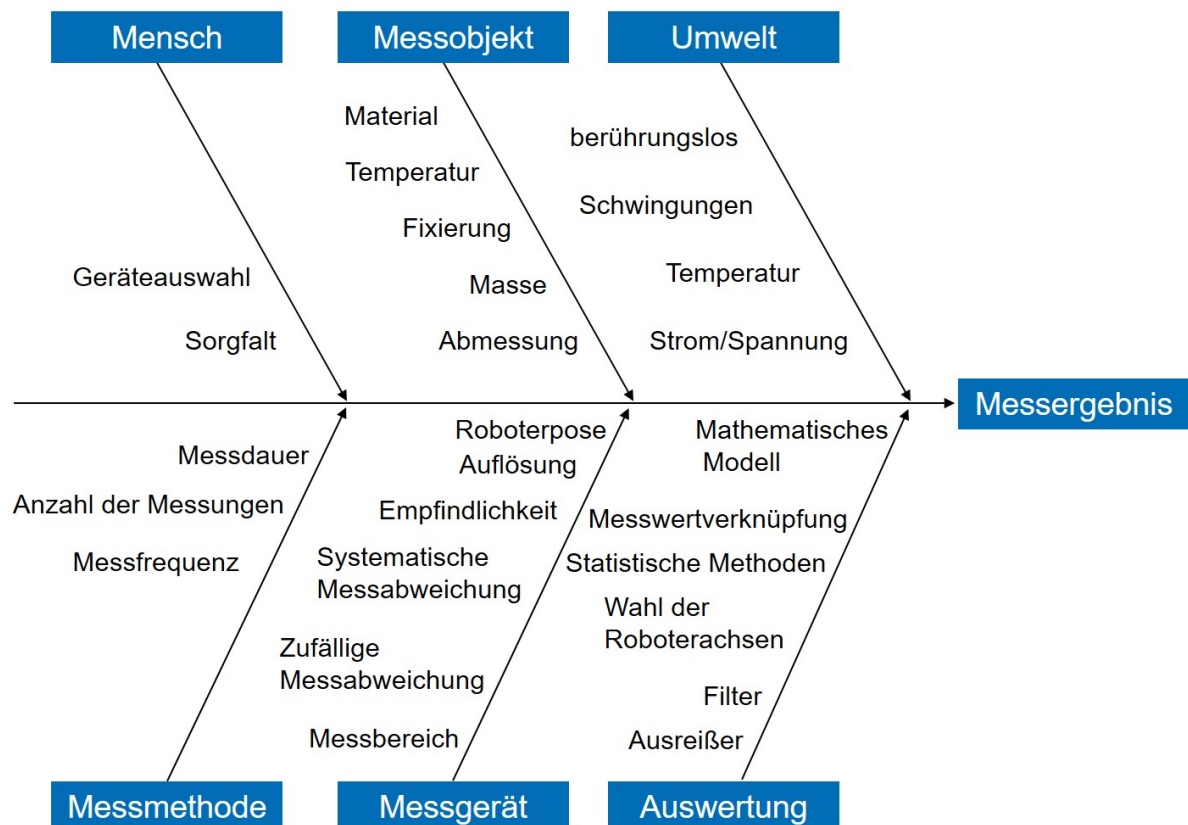


ABBILDUNG 4.12: Ursachen-Wirkungs-Diagramm der Einflüsse auf das Messergebnis

In der **Measure-Phase** wird schließlich die Messdurchführung am Roboter vorgenommen. Dabei ergibt sich das Drehmoment ( $M$ ) aus der Gravitationskraft ( $F$ ), der gewählten Last sowie der Länge des Hebelarms ( $r$ ), sprich dem Abstand zwischen Achse und Roboterflansch (Gl. 4.1).

$$M = |r \times F| \quad (4.1)$$

Zur **Analyze-Phase** gehört die Aufbereitung, Auswertung und Visualisierung der Daten zur Generierung von Wissen. Die Betrachtung der Daten zeigt, dass die Anordnung der Achsen in der gewählten Pose im Messaufbau Hebelarme auf die Achsen 2, 4 und 6 erzeugt, welche somit

als sinnvolle Messergebnisse genutzt werden können. Auf die Achsen 1, 3, 5 und 7 wirkt hingegen kaum ein messbares Drehmoment. Nachfolgend werden einige Ergebnisse vorgestellt:

- systematische Messabweichung
- zufällige Messabweichung
- Reproduzierbarkeit
- Empfindlichkeit

Als Bias wird die systematische Messabweichung bezeichnet, sprich die Differenz zwischen dem Mittelwert der Messwerte bei wiederholter Messung ( $\bar{x}_g$ ) und dem Referenzwert des Merkmals ( $x_m$ ) (Gl. 4.2).

$$B_i = |\bar{x}_g - x_m| \quad (4.2)$$

Die zweite Achse weist für sich genommen ein Drehmoment von 82,10 Nm auf. Die Belastung des Roboterflanschs mit 10 kg erzeugt ein Drehmoment von 172,89 Nm auf die zweite Achse. Die Differenz der Drehmomente beträgt somit 90,79 Nm. Der Referenzwert, der durch Multiplizieren des Hebelarms mit der Last berechnet wird, weicht davon kaum ab. Daraus ergibt sich ein Bias von 0,13 Nm. Zur Bestimmung der Linearität der Drehmomentsensoren erfolgten Messungen mit <100 g, 500 g, 1 kg, 5 kg, 10 kg und 14 kg mit der Anzahl von  $n = 25$ . Die Messungen in Abb. 4.13 bilden eine nahezu lineare Kennlinie. Messungen mit Gewichten unter 100 g zeigen einen maximalen Fehler von 15 g. Ein solch geringer systematischer Messfehler kann durch ein Offset verringert werden.

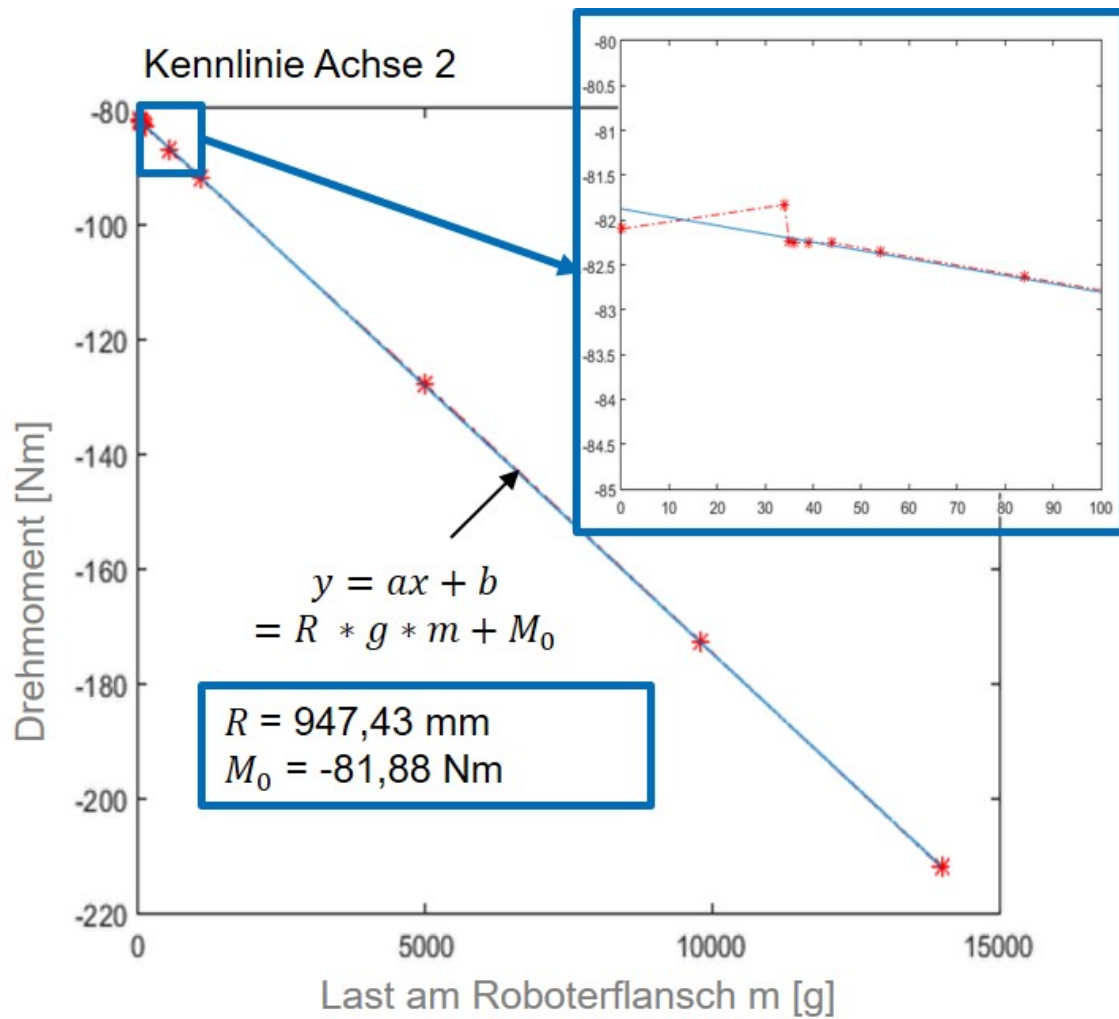


ABBILDUNG 4.13: Linearität in Achse 2

Die zufällige Messabweichung wird durch die Standardabweichung berechnet. Die Standardabweichung ist das gängigste Maß zur Quantifizierung der Streubreite von Daten um einen Mittelwert. Bei den vorliegenden Messungen liegt die Standardabweichung bei unter 0,03 Nm. In Achse 2 ohne Last am Roboterflansch besteht beispielsweise eine Standardabweichung von 0,018 Nm. Mit einer Last von 14 kg sinkt die Standardabweichung auf 0,016 Nm.

Der Begriff *Reproduzierbarkeit* bezeichnet die Variation des Mittelwertes bei Messungen [107]. Wiederholte Messungen unter denselben Bedingungen mit einer Anzahl von  $n = 25$  ergeben unterschiedliche Mittelwerte. Die maximale Drehmomentdifferenz dieser Mittelwerte liegt bei 0,10 Nm. Abb. 4.14 zeigt den Verlauf des Drehmomentes bei 25 Messungen für die Last von 14 kg. Außerdem wird deutlich, dass sich die Standardabweichung der Mittelwerte nach 25 Messungen einpendelt.



verschiedenen Faktoren abhängt. Die Standardabweichung ist gering, d. h. die Messwerte streuen nicht weit um den Mittelwert. Die systematische Messabweichung ist sehr gering. Die Messungen verschiedener Lasten ergeben eine annähernd lineare Kennlinie. In den Versuchen konnten Lasten ab 20 g ausgemacht werden.

Die **Improve-Phase** baut auf diesen Ergebnissen auf und beinhaltet die Verbesserung der Messergebnisse sowie die konkrete Einordnung der Applikation in die Montage. In der **Control-Phase** werden die bisherigen Ergebnisse dokumentiert und validiert. Für Letzteres muss die Untersuchung im spezifischen Anwendungsfall an einem Normal durchgeführt werden und es muss eine vollständige Prüfprozesseignung erfolgen. Die Validierung ist Voraussetzung für die spätere Anwendung in der Montage. Die Messabweichungen können in einem gewissen Rahmen verringert werden und damit das Messergebnis verbessern. Hierfür ist das Ishikawa-Diagramm (Abb. 4.12) aus der Define-Phase hilfreich. Darin beschriebene Einflussfaktoren lassen sich beispielsweise durch das Filtern von Daten ausräumen. Eine Methode zur Glättung der Daten bzw. zur Reduzierung der Streuung ist ein gleitender Mittelwert. Allein die Wahl einer geeigneteren Roboterachse kann das Messergebnis bereits verbessern.

Die ermittelte Genauigkeit des KUKA LBR iiwa Roboters ist vielversprechend. Damit der Roboter als Messroboter eingesetzt werden kann, muss seine Genauigkeit dem Vergleich mit der für den Messvorgang erforderlichen Genauigkeit bei der Messung der zu identifizierenden Kräfte/Momente und Massen standhalten.

## 4.5 Planung zur Prozessausführung

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Vorgehensweise zur Ausführung eines komplexen Roboterprozesses hergeleitet (siehe Abb. 4.16). Im ersten Schritt wird das Werkzeug auf dem Roboterflansch montiert. Anschließend wird der Roboter per Hand gesteuert, um den Prozess in Gang zu setzen. Das menschliche Auge wird dabei als Sensor zur Überwachung des Prozesses betrachtet. Im zweiten Schritt werden die prozessbezogenen Parameter identifiziert. Im Fall einer sensitiven Wickelapplikation sind die externen Kräfte/Momente die wichtigsten Parameter und

werden als Regelgröße definiert. Sie werden durchgängig überwacht und ihre Grenzwerte werden graphisch dargestellt. Nachfolgend werden die Genauigkeit der Parameter betrachtet und die Schaltbedingungen des Roboters definiert. Im dritten Schritt wird der Roboter basierend auf den identifizierten Parametern programmiert. Die Prozessüberwachung wird schließlich durch interne und externe Sensorik und die relevanten Signalverarbeitungsalgorithmen implementiert.



ABBILDUNG 4.16: Planung zur Prozessdurchführung

# 5 Entwicklung einer sensitiven Roboterapplikation zur Wicklung endloser Gummidichtungen

Der Bedarf an einem sensitiven Wickelprozess basierend auf einem Roboter mit integrierten Kraft-/Drehmomentsensoren wurde bereits in Kapitel 2.3 hergeleitet. Außerdem wurde die Konzeption einer sensitiven Roboterapplikation in Kapitel 4 betrachtet. Daraus werden die wesentlichen Arbeitsschritte und Methoden hergeleitet und entwickelt. Auf der Grundlage der bisher gewonnenen Erkenntnisse wird in diesem Kapitel eine sensitive Roboterapplikation für das Wickeln einer endlosen Gummidichtung entwickelt und diskutiert.

## 5.1 Entwicklung eines Wickelwerkzeugs

Das letzte Glied der kinematischen Kette, welches das Wickeln und Fördern der Karosseriedichtung ausführt, ist das Wickelwerkzeug. Es überträgt die wirkenden Kräfte bzw. Drehmomente in das Robotersystem. Die Werkzeugentwicklung hat somit die Führung und Positionierung des Endlosgummistrangs zur Bildung eines korrekten Wickelbilds auf der Wickelrolle zum Ziel. Zentral ist dabei die qualitativ beständige Reproduzierbarkeit des Wickelbildes.

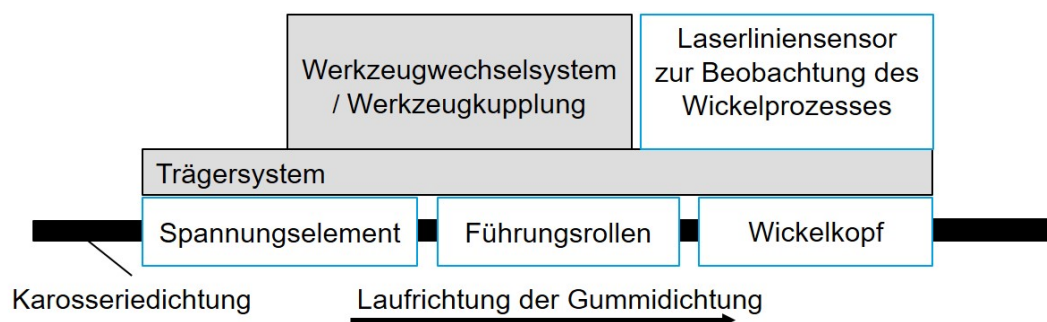


ABBILDUNG 5.1: Modularer Aufbau des Wickelwerkzeugs

Als Werkzeugbasis bzw. primäre Grundkomponente dient das Trägersystem, bestehend aus einer ausreichend steifen Grundstruktur, die die Befestigung und Anordnung der Sekundärkomponenten ermöglicht. Eine direkte Erweiterung des Trägersystems stellt die Werkzeugkupplung (auch Werkzeugwechselsystem genannt) dar, durch welche sich das Trägersystem am Roboterflansch montieren lässt, sodass Roboter und Werkzeug eine Einheit bilden. Die zur Prozessausführung erforderlichen Sekundärkomponenten des Werkzeugs sind, in Abbildung 5.1 von links nach rechts beschrieben, das Spannungselement, die Führungsrollen sowie der Wickelkopf (siehe Abb. 5.1). Zweck des Spannungselements als aktives Element des Wickelwerkzeugs ist der automatisierte Vorschub der Karosseriedichtung sowie die Regelung der Spannungszustände im Wickelwerkzeug. Es kann sowohl antreibende als auch bremsende Funktion haben. Die Führungsrollen steuern die Orientierung der Karosseriedichtung. Sie sind variabel einsetzbar und können z. B. als vorgelagerte Komponente die Spannungszustände im Spannungselement verringern und die Funktionsweise optimieren. Das letzte Glied der Förderkette ist der Wickelkopf. Dieser dient zum einen der definierten Ablage des Wickelguts und zum anderen, im Rahmen der Prozesssteuerung, der Überleitung der Prozesskräfte in das Robotersystem. Zur Qualitätssicherung wird zusätzlich ein optischer Sensor (Laserliniensensor) eingebaut, der keinen direkten Einfluss auf den Wickelprozess nimmt, sondern lediglich als Überwachungseinheit fungiert.

Im Zuge der Werkzeugentwicklung wurden fünf Prototypen erstellt, welche die unterschiedlichen Entwicklungsstadien des Forschungsprojekts darstellen. In Abbildung 5.2 ist der Entwicklungsfortschritt entlang der Projektzeitschiene zu sehen. Bei Prototyp 1 steht die Entwicklung von Profilrollenpaaren sowie die Orientierungssicherung im Fokus. Prototyp 2 stellt ein erstes Konzept zum Einsatz eines Wickelkopfes dar. Bei Prototyp 3 wird der Wickelkopf schließlich variiert und erstmals eine Spannungseinheit eingesetzt, die allerdings noch nicht aktiv ausführbar ist. Mit Prototyp 4 wird die bauliche Breite der Wickellage auf die Breite einer Wickellage reduziert und der Wickelkopf erneut variiert. Prototyp 5 dient der Realisierung der bestmöglichen Lösung, sprich der Konstruktion des finalen Wickelwerkzeugs. Zur Lösungsfindung wird das Entwicklungskonzept gemäß der Beschreibung in Kapitel 4.3 umgesetzt. Der erste Schritt beinhaltet die Entwicklung der einzelnen Komponenten mithilfe



des TOTE-Schemas, aus der im zweiten Schritt basierend auf der Erstellung eines morphologischen Kastens die beste Lösung und damit das Konzept zum finalen Werkzeug abgeleitet wird.

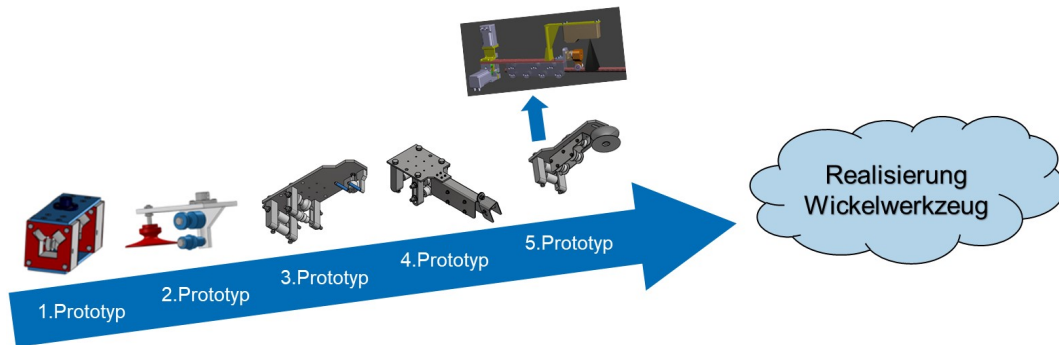


ABBILDUNG 5.2: Entwicklung des Werkzeugprototyps

Das finale Werkzeug ist in 5.3 abgebildet und weist alle zentralen Komponenten aus Abbildung 5.1 auf.

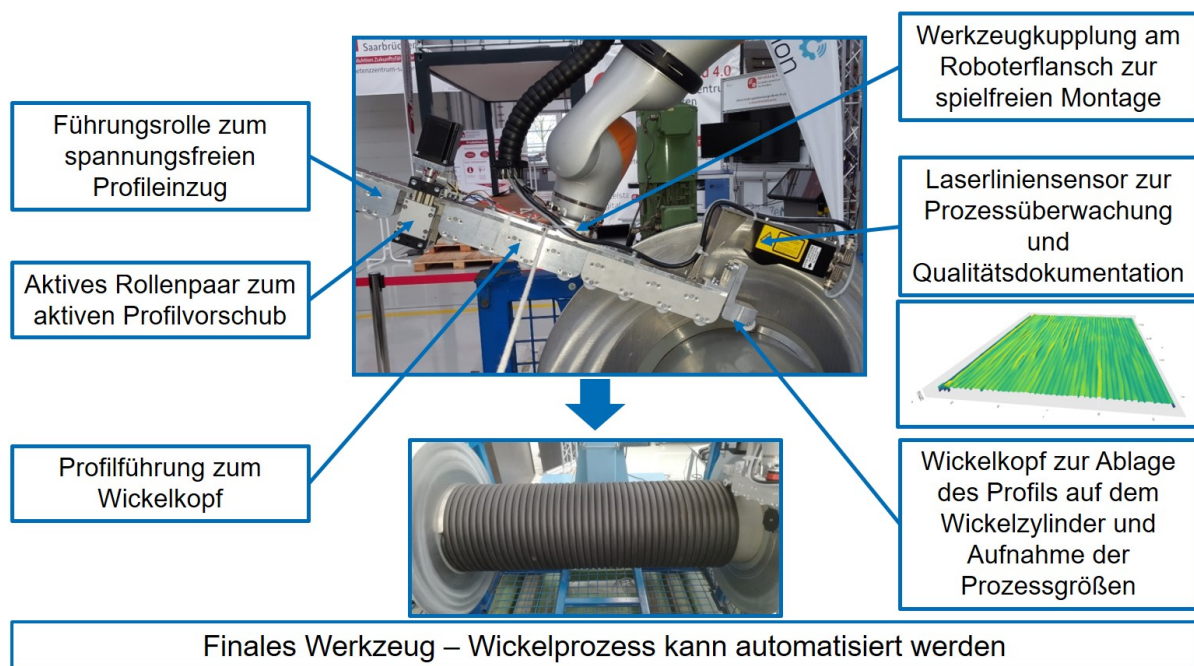


ABBILDUNG 5.3: Aufbau des finalen Werkzeugs

## 5.2 Vermessung des Werkzeugs

Um den Roboter vollständig zu modellieren und dadurch sein Verhalten zu verbessern, muss das auf dem Roboter montierte Werkzeug kinematisch und dynamisch vermessen werden. Dazu

muss ein TCP auf dem Werkzeug definiert werden, um die Masse und Schwerpunktlage des Werkzeugs zu identifizieren.

### 5.2.1 Kinematisches Vermessen

Zum Roboterwerkzeug wird mindestens ein TCP-KS definiert. Bei der kinematischen Vermessung des Werkzeugs wird die Position des TCP-KS in Bezug zum Roboterflansch-KS  ${}^{Flansch}\underline{r}_{TCP}$  identifiziert. Dann wird die Orientierung vorgegeben bzw. definiert. Das weit verbreitete Verfahren zur kinematischen Vermessung eines Werkzeugs basiert auf der Hand-Auge-Kalibrierung und einer Messspitze [113]. Das Verfahren ist auch bekannt als *4-Punkt-Methode* und ist in verschiedene Robotersteuerungen integriert. Zunächst wird die Methode detailliert betrachtet.

Eine Messspitze wird auf einem Tisch befestigt und mit dem TCP des Roboterwerkzeugs angefahren. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt. In der Regel wird empfohlen, den Vorgang viermal zu wiederholen. Die Position der Messspitze bezüglich des Roboterbasis-KS  ${}^{Basis}\underline{r}_M$  bleibt unverändert, wenn die Messspitze mit einer anderen Konfiguration des Roboters angefahren wird. Der Vektor  ${}^{Basis}\underline{r}_M$  kann wie folgt berechnet werden:

$${}^{Basis}\underline{r}_M = {}^{Basis}\mathbf{D}_{Flansch} \cdot {}^{Flansch}\underline{r}_{TCP} + {}^{Basis}\underline{r}_{Flansch} \quad (5.1)$$

Der Vektor  ${}^{Basis}\underline{r}_{Flansch}$  und die Drehmatrix  ${}^{Basis}\mathbf{D}_{Flansch}$  sind aus der Robotersteuerung zu erlesen. Die Aufstellung der Gleichung 5.1 nach dem Anfahren der Messspitze bei n verschiedenen Konfigurationen des Roboters liefert folgendes Ergebnis:

$${}^{Basis}\mathbf{D}_{Flansch_1} \cdot {}^{Flansch}\underline{r}_{TCP} - {}^{Basis}\mathbf{D}_{Flansch_2} \cdot {}^{Flansch}\underline{r}_{TCP} = {}^{Basis}\underline{r}_{Flansch_2} - {}^{Basis}\underline{r}_{Flansch_1} \quad (5.2)$$

⋮

$${}^{Basis}\mathbf{D}_{Flansch_1} \cdot {}^{Flansch}\underline{r}_{TCP} - {}^{Basis}\mathbf{D}_{Flansch_n} \cdot {}^{Flansch}\underline{r}_{TCP} = {}^{Basis}\underline{r}_{Flansch_n} - {}^{Basis}\underline{r}_{Flansch_1} \quad (5.3)$$

Das Gleichungssystem 5.2-5.3 wird in die Matrixschreibweise umgewandelt:

$$\begin{pmatrix} \text{Basis } \mathbf{D}_{Flansch_1} - \text{Basis } \mathbf{D}_{Flansch_2} \\ \vdots \\ \text{Basis } \mathbf{D}_{Flansch_1} - \text{Basis } \mathbf{D}_{Flansch_n} \end{pmatrix} \cdot \text{Flansch } \underline{\mathbf{r}}_{TCP} = \begin{pmatrix} \text{Basis } \underline{\mathbf{r}}_{Flansch_2} - \text{Basis } \underline{\mathbf{r}}_{Flansch_1} \\ \vdots \\ \text{Basis } \underline{\mathbf{r}}_{Flansch_n} - \text{Basis } \underline{\mathbf{r}}_{Flansch_1} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

$$\rightarrow \mathbf{A} \underline{\mathbf{x}} = \underline{\mathbf{b}} \quad (5.5)$$

Der Vektor  $\underline{x}$  (siehe Gleichung 5.5) bzw.  $\text{Flansch } \underline{\mathbf{r}}_{TCP}$  wird basierend auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet [114].

$$\underline{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \cdot \underline{\mathbf{b}} \quad (5.6)$$

## 5.2.2 Dynamisches Vermessen

Dynamische und kinematische Parameter des Roboterwerkzeugs sind essentiell für die Konstruktion eines präzisen Robotermodells, denn sie haben Auswirkungen auf sein Verhalten. Die Identifikation der kinematischen Parameter erfolgt durch verschiedene konventionelle Methoden. Die Identifikation der dynamischen Parameter ist hingegen komplexer und erfordert die Integration zusätzlicher Sensoren wie z. B. Kraft- oder Drehmomentsensoren. Dazu werden die statische und die dynamische Methode eingeführt. Bei der statischen Methode bewegt sich der Roboter nach vordefinierten Konfigurationen und vermeidet kontinuierliche und unvorhersehbare Bewegungen, wohingegen die dynamische Methode auf einer kontinuierlichen Rotation um eine vordefinierte Achse basiert. Ein Vergleich und eine Bewertung der verschiedenen Methoden erfolgen mithilfe eines Versuchsaufbaus.

Manche Leichtbauroboter haben integrierte Sensoren wie beispielsweise Drehmomentsensoren in den Roboterachsen. Die Sensoren erkennen Kollisionen und gewährleisten eine sichere Kooperation mit den Menschen in der Umgebung. Gleichzeitig können externe Drehmomente gemessen werden. Ein montierter Greifer verursacht zusätzliche (externe) Drehmomente in den Gelenken des Roboters. Die externen Drehmomente werden von der Robotersteuerung berechnet als Differenz zwischen Modellwert und gemessenem Wert. Masse und Schwerpunkt des Roboterwerkzeugs werden dann auf der Grundlage der externen

Drehmomente und der Konfiguration des Roboters identifiziert. Dieses Verfahren wird von vielen Roboterherstellern in die Standardanwendungen integriert. Die Praxis hat allerdings gezeigt, dass das Messergebnis eine hohe Streuung aufweist und somit unpräzise ist. Im Rahmen dieser Arbeit werden neue Methoden für die auf integrierten Drehmomentsensoren basierende Bestimmung der dynamischen Parameter des Werkzeugs entwickelt und validiert [115].

In Kapitel 4.4 wurde die Genauigkeit der Kraft-/Momentmessung des KUKA LBR iiwa betrachtet, um seine Qualifizierung für die Validierung der entwickelten Methoden zur dynamischen Vermessung eines Werkzeugs zu prüfen. Die Sunrise Steuerung des KUKA LBR iiwa hat eine Standardanwendung (*Determining tool load data*) für das dynamische Vermessen eines neuen Werkzeugs (siehe Abb. 5.4). Der Prozess läuft wie folgt ab: Der Anwender montiert das Werkzeug auf dem Roboterflansch und wählt die Anwendung für die Bestimmung der Werkzeugbelastungsdaten in den Achsen A5, A6 und A7 aus.



ABBILDUNG 5.4: Roboter SmartPad mit der Applikation *Determining tool load data*

Während der Anwendung bewegt sich Achse 6 zwischen  $-95^\circ$  und  $+95^\circ$  und Achse 7 bewegt sich von  $0^\circ$  zu  $-90^\circ$ . Achse 5 ist so positioniert, dass Achse 6 senkrecht zum Gewicht steht. Die Roboterachsen A1 bis A4 werden während der Bestimmung der Werkzeugbelastungsdaten nicht bewegt. Das Ergebnis wird dem Anwender auf dem Roboterpanel angezeigt.

Die Anwendung ist jedoch nicht in allen Szenarien einsetzbar, weil bestimmte Dimensionen des Werkzeugs die Rotation der Achsen verhindern können, z. B. das Wickelwerkzeug. Weiterhin zeigt eine Stichprobe mit einer auf dem Roboter montierten Masse von 10 kg die Messungenauigkeit. Das Ergebnis streut trotz identischer Bedingungen während der wiederholten Messvorgänge und misst beispielsweise eine Masse von 10,41 kg. Dieses Ergebnis weist auf Verbesserungspotential hin.

### **5.2.2.1 Statische Methode**

Die statische Methode bietet die Möglichkeit, die dynamischen Werte zu identifizieren ohne den Aufwand, eine komplizierte kontinuierliche Bewegung durchzuführen. Nur vordefinierte Konfigurationen werden betrachtet. Der Roboter ist häufig auf dem Boden oder an der Decke montiert. Dadurch haben Drehmomente, die durch die Gravitationskraft und das jeweilige Gewicht des Manipulators und Werkzeugs entstanden sind, theoretisch keinen Hebelarm zur ersten Achse bzw. zum Drehmomentsensor. Demnach werden die Daten des Drehmomentsensors, der in der zweiten Achse montiert ist, betrachtet, um einen längeren Hebelarm zu bilden und damit geringeres Gewicht zu detektieren.

Das Werkzeug wird auf dem Roboterflansch montiert und als Massepunkt betrachtet (siehe Abb. 5.5). Der Sensor liefert die ausgeübten Drehmomente auf die zweite Achse. Das montierte Werkzeug übt ein externes Drehmoment auf den Sensor aus. Um das externe Drehmoment zu bestimmen und es vom eigenen Gewicht des Roboters zu unterscheiden, ist ein präziseres Modell des Manipulators notwendig. Zudem ist es schwer, die Verkabelung und die externen Elemente, die am Manipulator montiert sind, zu modellieren. Es ist daher erforderlich, vor der Montage des Werkzeugs am Roboterflansch eine Referenzmessung durchzuführen (siehe Abb. 5.6).



Das vom Werkzeug resultierende Drehmoment ist dann bekannt. Die Masse und die Schwerpunktlage des Werkzeugs und somit auch der Hebelarm sind jedoch unbekannt. Dadurch entsteht ein unterbestimmtes Gleichungssystem, welches mathematisch nicht lösbar ist. Es erfolgen daher verschiedene Messungen mit vorbestimmten Konfigurationen des Roboters.

**Bestimmung der y-Koordinate der Schwerpunktlage des Werkzeugs** Es wurde eine Konfiguration CY (siehe Tabelle 5.1) des Roboters gewählt, bei der die y-Achse des Flansch-KS parallel zur x-Achse des Basis-KS ausgerichtet ist (siehe Abb. 5.5). Folglich ist der Hebelarm die Differenz der x-Koordinate des Flansch-KS und der y-Koordinate der Schwerpunktlage des Werkzeugs in Relation zum Flansch-KS.

Gelenk	J1	J2	3	J4	J5	J6	J7
<b>CY Konfiguration [°]</b>	<b>0</b>	<b>90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>90</b>	<b>-90</b>
<b>CZ Konfiguration [°]</b>	<b>0</b>	<b>90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

TABELLE 5.1: Konfigurationen des Roboters

Das externe Drehmoment ergibt sich aus der Multiplikation des Hebelarms mit der Masse ( $M$ ) des Werkzeugs und der Erdbeschleunigung ( $g$ ).

$$M_{2E1} = ({}^{Basis}x_{Flange} - {}^{Flange}y_s) \cdot M \cdot g \quad (5.8)$$

Der Parameter  ${}^{Basis}x_{Flange}$  ist aus der Steuerung zu erlesen, wohingegen die Parameter  $M$  und  ${}^{Flange}y_s$  unbekannt sind und identifiziert werden müssen. Das Drehmoment muss daher mithilfe einer anderen Konfiguration gemessen werden, bei welcher sich die siebte Achse um  $180^\circ$  ( $J7 = 90^\circ$ ) dreht. Das resultierende Drehmoment wird dann wie folgt berechnet:

$$M_{2E2} = ({}^{Basis}x_{Flange} + {}^{Flange}y_s) \cdot M \cdot g \quad (5.9)$$

Es ergibt sich ein bestimmtes Gleichungssystem aus zwei Gleichungen (siehe Gleichungen 5.8 und 5.9) und zwei Unbekannten. Das System ist lösbar durch die Addition der Gleichungen 5.8 und 5.9.

$$M_{2E1} + M_{2E2} = 2 \cdot {}^{Basis}x_{Flange} \cdot M \cdot g \quad (5.10)$$

Die Masse  $M$  des Werkzeugs wird dann wie folgt bestimmt:

$$M = \frac{M_{2E1} + M_{2E2}}{2 \cdot {}^{Basis}x_{Flange} \cdot g} \quad (5.11)$$

Die y-Koordinaten der Schwerpunktlage des Werkzeugs werden dann durch die Ersetzung der Gleichung 5.11 mit der Gleichung 5.8 oder 5.9 ermittelt.

**Bestimmung der x-Koordinate der Schwerpunktlage** Die Bestimmung der x-Koordinate erfolgt analog zur Identifikation der y-Koordinate. Die Konfiguration des Roboters ist so eingestellt, dass die x-Achse des Flansch-KS parallel zur x-Achse des Basis-KS liegt und der Hebelarm sich aus der Addition oder Differenz der beiden Koordinaten ergibt. Dafür muss die Konfiguration CY bis zur siebten Achse übernommen werden. Der siebte Hebelarm liegt bei  $0^\circ$ , wenn er sich aus der Addition der beiden Koordinaten (siehe Gleichung 5.12) errechnet und bei  $-180^\circ$ , wenn er durch die Differenz der beiden Koordinaten (siehe Gleichung 5.13) bestimmt wird.

$$M_{2EX1} = ({}^{Basis}x_{Flange} - {}^{Flange}x_s) \cdot M \cdot g \quad (5.12)$$

$$M_{2EX2} = ({}^{Basis}x_{Flange} + {}^{Flange}x_s) \cdot M \cdot g \quad (5.13)$$

Die oben erwähnten Konfigurationen können wegen Achslimitierung nicht erreicht werden, da die siebte Achse auf  $\pm 175^\circ$  limitiert ist. Daher werden zwei Konfigurationen in der Nähe der oben genannten Posen abgeleitet. Die siebte Achse nimmt dann die Werte  $6^\circ$  und  $-174^\circ$  an. Daraus resultiert folgendes Gleichungssystem:

$$M_{2EX1} = ({}^{Basis}x_{Flange} - h) \cdot M \cdot g \quad (5.14)$$

$$M_{2EX2} = ({}^{Basis}x_{Flange} + h) \cdot M \cdot g \quad (5.15)$$

Durch die Auflösung der Gleichungen 5.14 und 5.15 werden der Hebelarm  $h$  (siehe Abb. 5.7) und  $M$  identifiziert. Der Hebelarm ( ${}^{Basis}x_s = h$ ) ist von der x- und y-Koordinate des Schwerpunktes bezüglich des Flansch-KS und des Drehwinkels  $\alpha$  abhängig (siehe Gleichung 5.16).



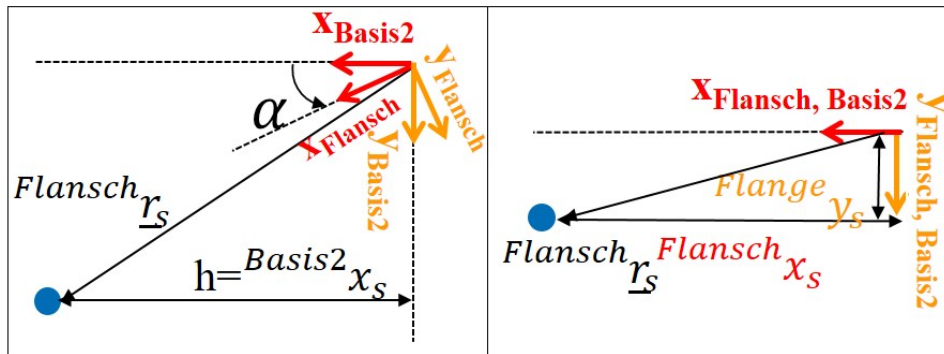


ABBILDUNG 5.7: Position der Schwerpunktlage des Werkzeugs nach Rotation der siebten Achse um  $\alpha$ .

$$Basis2_{x_s} = Flange_{x_s} \cdot \cos(\alpha) - Flange_{y_s} \cdot \sin(\alpha) \quad (5.16)$$

Das Basis-KS 2 ist parallel zum Basis-KS definiert und hat den Ausgangspunkt des Flansch-KS. Als erstes wird die y-Koordinate der Schwerpunktlage bestimmt. Zweitens werden der Hebelarm  $h$  und anschließend die x-Koordinate bestimmt. Da die y-Koordinate mit  $\sin(\alpha)$  skaliert ist, ist der Drehwinkel  $\alpha$  so klein wie möglich zu wählen, um den Einfluss der Ungenauigkeit bei der Bestimmung der y-Koordinate zu reduzieren.

**Bestimmung der z-Koordinate der Schwerpunktlage** Nachdem die x- und y- Koordinaten ermittelt sind, ist eine Konfiguration CZ für die Identifikation der z-Koordinaten zu bestimmen. Die Voraussetzung ist, dass die z-Koordinate einen Hebelarm zur zweiten Achse bildet. Die Konfiguration CY wird bis auf die sechste und siebte Achse übernommen, welche dann auf  $0^\circ$  eingestellt werden. Damit lässt sich das externe Drehmoment an der zweiten Achse wie folgt bestimmen:

$$M_{2EZ0} = ({}^{Basis}x_{Flange} + {}^{Flange}z_s) \cdot M \cdot g \quad (5.17)$$

Die Gleichung 5.17 hat wiederum zwei Unbekannte ( ${}^{Flange}z_s$  und  $M$ ). Die einfachste Lösung wäre, die sechste Achse auf  $180^\circ$  einzustellen und die Messung des Drehmomentsensors der zweiten Achse auszuwerten. Das Drehmoment lässt sich dann folgendermaßen berechnen:

$$M_{2EZ180} = ({}^{Basis}x_{Flange} - {}^{Flange}z_s) \cdot M \cdot g \quad (5.18)$$

Dadurch entsteht ein bestimmtes Gleichungssystem. Diese Lösung ist jedoch aufgrund der Konstruktion des Roboters unmöglich, da der Bewegungsspielraum der sechsten Achse auf  $\pm 120^\circ$  beschränkt ist. Eine alternative Lösung ist, die sechste Achse um  $\beta = 45^\circ$  zu drehen (siehe Abb. 5.8) und eine Messung durchzuführen. Dadurch lässt sich das externe Drehmoment wie folgt bestimmen:

$$M_{2EZ45} = \left( R + \frac{R2}{\cos(\theta)} \cdot \cos(\beta - \theta) \right) \cdot M \cdot g \quad (5.19)$$

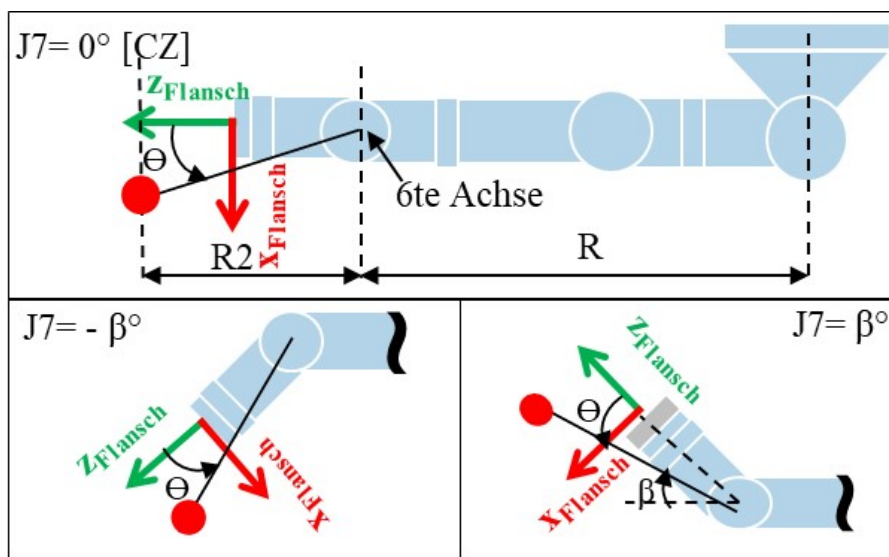


ABBILDUNG 5.8: Roboterkonfigurationen zur Identifizierung der z-Koordinate des Schwerpunkts ( $J7 = 0^\circ$  [CZ],  $J7 = -\beta^\circ$ ,  $J7 = \beta^\circ$ )

Unter Berücksichtigung der Gleichungen 5.17 und 5.21 entsteht ein unterbestimmtes Gleichungssystem von zwei Gleichungen und drei Unbekannten, wobei  $\theta$  ein fester und von der x- und z-Koordinate der Schwerpunktlage abhängiger Winkel ist.  $R$  ist aus dem Datenblatt zu erlesen und  $R2 = {}^{Flange} z_s + 128\text{mm}$ . Es bedarf daher einer dritten Gleichung. Diese ergibt sich durch Einstellen der sechsten Achse auf  $-45^\circ$ .

$$M_{2EZ-45} = \left( R + \frac{R2}{\cos(\theta)} \cdot \cos(-\beta - \theta) \right) \cdot M \cdot g \quad (5.20)$$

Die Gleichungen 5.19 und 5.20 können in folgende Gleichungen umgewandelt werden:

$$M_{2EZ45} = \left( R + R2 \cdot \cos(\beta) + R2 \cdot \sin(\beta) \cdot \tan(\theta) \right) \cdot M \cdot g \quad (5.21)$$

$$M_{2EZ-45} = (R + R2 \cdot \cos(\beta) - R2 \cdot \sin(\beta) \cdot \tan(\theta)) \cdot M \cdot g \quad (5.22)$$

Der Winkel  $\theta$  kann durch die Addition der Gleichungen 5.21 und 5.22 eliminiert werden:

$$M_{2EZ-45} + M_{2EZ45} = (2R + 2R2 \cdot \cos(\beta)) \cdot M \cdot g \quad (5.23)$$

Die Gleichungen 5.17 und 5.23 bilden ein bestimmtes Gleichungssystem von zwei Unbekannten und zwei Gleichungen. Dadurch können M und die z-Koordinate bestimmt werden.

### 5.2.2.2 Dynamische Methode

Die oben beschriebenen dynamischen Daten können auch mit Hilfe der dynamischen Methode identifiziert werden. Bei der dynamischen Methode können die x- und y-Koordinaten nach einer Bewegung um die siebte Achse identifiziert werden. Die z-Koordinaten werden nach einer Bewegung um die sechste Achse identifiziert. Die Voraussetzung ist wie bei statischen Messungen, dass zuerst eine Referenzmessung ohne Werkzeug durchgeführt wird, da kein genaueres Modell vom Manipulator und darauf montierten Elementen vorhanden ist. Bei der dynamischen Messung wurde der gesamte Bewegungsbereich des Gelenks betrachtet, nicht nur zwei Konfigurationen, und es konnten nach einer Bewegung sowohl die x-Koordinate als auch die y-Koordinate bestimmt werden.

**Bestimmung der x- und y-Koordinate der Schwerpunktlage** Die Konfiguration CY wurde bis auf die siebte Achse übernommen, diese wurde als Variable gesetzt und zwischen  $-175^\circ$  und  $175^\circ$  variiert. Das Drehmoment auf die zweite Achse wurde während der Bewegung gemessen und gespeichert. Bei der Referenzmessung wurde das auf die zweite Achse resultierende Drehmoment wie folgt berechnet:

$$M_{2dr} = M0 + (R + r_m \cdot \sin(J7 + \delta_m)) \cdot m \cdot g \quad (5.24)$$

Dabei ist  $M0$  das Drehmoment, das aus der statischen Masse des Manipulators und der darauf montierten Elemente resultiert. Die Masse  $m$  ist die bewegliche Masse, sobald der Roboter seine siebte Achse bewegt. Der Drehwinkel des siebten Gelenks wird mit  $J7$  [radian] bezeichnet

und  $\delta_m$  ist ein fester Offsetwinkel. Der Offsetwinkel hängt von der x- und y-Koordinate der Schwerpunktlage ab. Die Bewegung und die Messungen werden nach der Montage des Werkzeugs wiederholt. Dadurch lässt sich das Drehmoment (siehe Abb. 5.9) wie folgt berechnen:

$$M_{2dt} = M0 + (R + r \cdot \sin(J7 + \delta)) \cdot (m + M) \cdot g \quad (5.25)$$

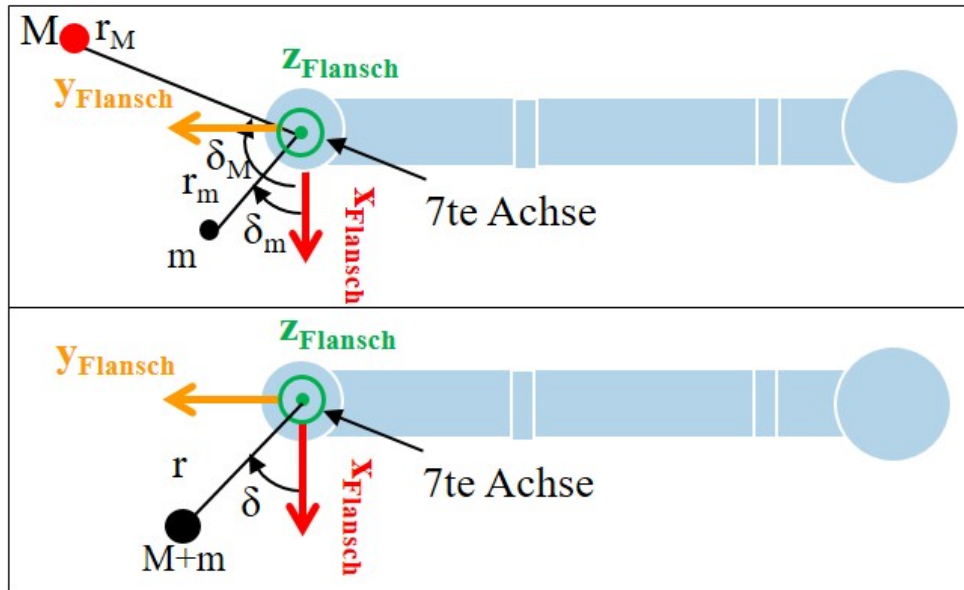


ABBILDUNG 5.9: Vogelperspektive auf das Robotermodell

Das resultierende Drehmoment lässt sich auch aus der Subtraktion der beiden Gleichungen 5.25 und 5.24 berechnen und sollte die folgende Form haben:

$$M_{2dM} = (R + r_M \cdot \sin(J7 + \delta_M)) \cdot (M) \cdot g \quad (5.26)$$

Die Subtraktion der beiden Gleichungen liefert folgende Gleichung:

$$M_{2dt} - M_{2dr} = a + b \cdot \sin(J7 + c) \quad (5.27)$$

Daraus sind  $a$ ,  $b$  und  $c$  bekannt. Die Masse  $M$  sowie die x- und y-Koordinaten sind folgendermaßen zu berechnen:

$$M = \frac{a}{R2 \cdot g}; r_M = \frac{b}{M \cdot g} \quad (5.28)$$

$$x = r_M \cdot \cos(\delta_M); y = r_M \cdot \sin(\delta_M) \quad (5.29)$$

**Bestimmung der z-Koordinate der Schwerpunktlage** Die z-Koordinate wird analog zur x- und y-Koordinate bestimmt. Hier wird die Konfiguration CZ verwendet und die sechste Achse wird als Variable gesetzt. Diese variiert zwischen  $-120^\circ$  und  $120^\circ$ . Das durch das Werkzeug resultierende Drehmoment lässt sich wie folgt berechnen:

$$M_{2dzM} = (R + r_{Mz} \cdot \cos(J7 + \delta_{Mz})) \cdot (M) \cdot g \quad (5.30)$$

Die Bestimmung der Masse  $M$  und der z-Koordinate erfolgt wie im letzten Kapitel durch den Koeffizientenvergleich der theoretischen Daten und der gemessenen Daten.

### 5.3 Vermessen des Laserliniensensors

Die Bestimmung der Position und Orientierung eines auf einem Roboterflansch montierten 3D-Sensors wurde von mehreren Wissenschaftlern untersucht [116, 117, 118, 119]. 3D-Sensoren sind meist Stereokameras, die x-, y- und z-Koordinaten in Bezug auf das Kamera-KS liefern. Mit diesen Sensoren ist es einfach, die 6D-Positionsparameter eines Objekts mit Hilfe eines Signalverarbeitungsalgorithmus zu erkennen, da die 3D-Messwerte einen großen Messbereich abdecken. Das kinematische Problem der Kalibrierung des Robotersensors führt zu einer homogenen Transformationsgleichung der Form  $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$ , wobei  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{X}$  und  $\mathbf{B}$   $4 \times 4$  homogene Matrizen folgender Form sind:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{D}_H & \underline{r}_H \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (5.31)$$

Dabei sind  $\mathbf{D}_H$  und  $\underline{r}_H$  jeweils die Rotationsmatrix und der Translationsvektor der homogenen Matrix  $\mathbf{H}$ .  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$  stellen jeweils die Transformationsmatrizen zwischen dem aktuellen Flansch-KS und dem initialen Sensor-KS in Bezug auf das initiale Flansch-KS und das Sensor-KS dar, bevor der Roboterflansch bewegt wird.  $\mathbf{X}$  ist die Transformationsmatrix zwischen dem Sensor-KS und dem Flansch-KS, also die Matrix, die für die Kalibrierung des Sensors bestimmt werden muss (siehe Abbildung: 5.10).

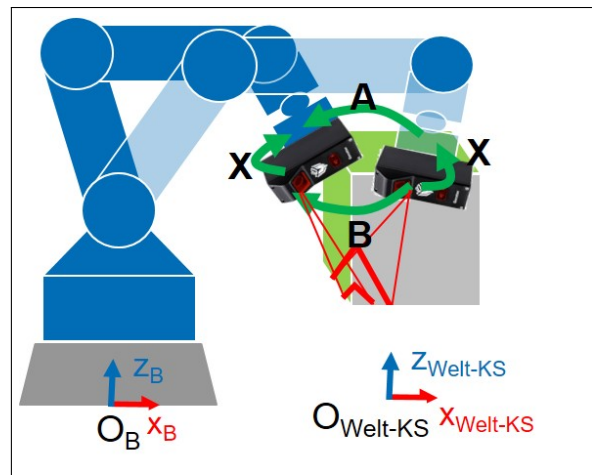


ABBILDUNG 5.10: Ein Laserliniensensor Gocator 2330 der Firma LMI Technologies [120], der an einem seriellen Roboter montiert ist und die Basis eines Würfels misst

Shiu und Ahmad führten eine geschlossene Methode ein, um das System  $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$  [116] zu lösen. Die Lösung hat einen Translations- und einen Rotationsfreiheitsgrad, solange die Rotation auf  $\mathbf{A}$  weder 0 noch  $\pi$  Radiant beträgt. Für ein eindeutiges  $\mathbf{X}$  unter der Annahme, dass bei der Messung kein Rauschen vorhanden ist, sind zwei Roboterbewegungen unerlässlich, sodass ein System aus zwei Gleichungen gebildet wird:

$$\mathbf{A}_1\mathbf{X} = \mathbf{XB}_1 \quad (5.32)$$

$$\mathbf{A}_2\mathbf{X} = \mathbf{XB}_2 \quad (5.33)$$

Park und Martin nutzen die Lie-Theorie, um eine exakte geschlossene Lösung und eine geschlossene Lösung basierend auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate unter der Annahme des Auftretens von Rauschen abzuleiten [118]. Das Einsetzen der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ist praktischer, da  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$  oft verrauschte Daten enthalten. Sie sind abhängig vom Messsystem und von der kinematischen Kette des Roboters. Beide Systeme haben ihre Genauigkeitsgrenzen. Ein praktischer Ansatz ist, dass der auf dem Roboter montierte Laserliniensensor den Würfel in  $n$  verschiedenen Posen vermisst. Auf diese Weise wird ein System

von  $n$ -Gleichungen abgeleitet:

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{X} = \mathbf{X} \mathbf{B}_1 \tag{5.34}$$

$$\mathbf{A}_2 \mathbf{X} = \mathbf{X} \mathbf{B}_2 \tag{5.35}$$

⋮

$$\mathbf{A}_n \mathbf{X} = \mathbf{X} \mathbf{B}_n \tag{5.36}$$

Shah et al. geben einen Überblick über verschiedene Methoden zur Lösung des Systems  $\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{X}\mathbf{B}$  [119]. Die Lösungen lassen sich in verschiedene Gruppen einteilen: separierbare geschlossene Lösungen, gleichzeitige geschlossene Lösungen und iterative Lösungen. Eine separierbare geschlossene Lösung bedeutet, dass die Orientierungsparameter der Matrix  $\mathbf{X}$  getrennt von den Positionsparametern gelöst werden. Chou und Kamel lösen das Kalibrierproblem, indem sie Quaternionen verwenden [117]. Die 6D-Position eines Referenz- oder Kalibrierungstargets wird mit einem Laserliniensensor gemessen, der 2D-Messdaten ( $x$  und  $z$ ) liefert, während sich der Roboter im statischen Zustand befindet und nicht auf das Roboterhandgelenk kalibriert ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methodik zur Messung der 6D-Pose eines Würfels vorgestellt, der als Kalibrierungstarget fungiert [121]. Es wird eine teilbare geschlossene Lösung erläutert, die auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate basiert.

### 5.3.1 Messung der Referenzposition im Raum

Der Laserliniensensor erfasst den Objektabstand entlang einer projizierten Laserlinie. Daher sind die gesammelten Daten zweidimensional. Zur Erzeugung von 3D-Scans werden aus der Bewegung in kurzer Zeitreihenfolge zahlreiche Scanlinien erzeugt, die dann in ein gemeinsames Messkoordinatensystem umgewandelt werden müssen. Daher ist die Pose des Sensor-KS zum Zeitpunkt der Aufnahme der  $i$ -ten Scanlinie im Zeitschritt  $t_i$  wesentlich.

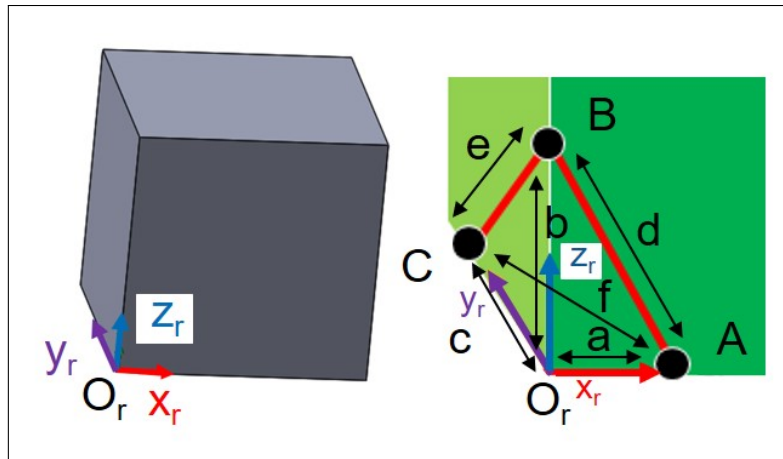


ABBILDUNG 5.11: Der beschriebene Würfel, der ein Kalibrierungstarget darstellt

Um 6D-dimensionale Parameter mit dem Laserliniensensor zu messen, müssen physikalische Randbedingungen erfüllt sein. Ein Würfel ist als Kalibrierungstarget konzipiert, um den Sensor zu vermessen (siehe Abbildung: 5.11). Der Würfel ist mit hoher Genauigkeit so konstruiert, dass die Kanten senkrecht zueinander stehen. Sie repräsentieren die physikalischen Randbedingungen für die Messung eines 6D-Frames. Eine vordefinierte Ecke des Würfels stellt das Bezugskordinatensystem dar, da die drei senkrecht zueinanderstehenden Kanten des Würfels ein Koordinatensystem bilden. Jede Kante entspricht somit einer Achse des Referenzkoordinatensystems  $x_r$ ,  $y_r$  und  $z_r$ . Ziel ist es, das Bezugskordinatensystem in Relation zum Sensorkoordinatensystem zu messen. Die Idee ist, den Sensor schräg zur Ecke des Würfels zu positionieren. Der Sensor projiziert dann eine Laserlinie auf den Würfel. Die drei Punkte  $A$ ,  $B$  und  $C$  (siehe Abbildung: 5.11) sind wichtig, da sie auf den drei Koordinatenachsen  $x_r$ ,  $z_r$  und  $y_r$  liegen. Ein Signalprozessalgorithmus ist erforderlich, um die Koordinaten der Punkte  $A$ ,  $B$  und  $C$  in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem zu bestimmen. Die projizierte Linie kann in mehrere Segmente mit unterschiedlichen Neigungen unterteilt werden. Die Gleichung für jedes Segment wird nach einem Best-Fit-Verfahren berechnet. Die Punkte ( $A$ ,  $B$  und  $C$  der Linie werden dann an den Schnittpunkten der verschiedenen Segmente berechnet. Die Koordinaten der Punkte  $A$ ,  $B$  und  $C$  in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem sind:

$$s_{\underline{r}_A} = \begin{pmatrix} s_{x_A} \\ 0 \\ s_{z_A} \end{pmatrix}; s_{\underline{r}_B} = \begin{pmatrix} s_{x_B} \\ 0 \\ s_{z_B} \end{pmatrix}; s_{\underline{r}_C} = \begin{pmatrix} s_{x_C} \\ 0 \\ s_{z_C} \end{pmatrix} \quad (5.37)$$



Die allgemeine Form der Koordinaten der Punkte in Bezug auf das Referenz-KS ist eindeutig, da die Punkte auf der Koordinatenachse liegen (siehe Abbildung 5.11).

$${}^r r_A = \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; {}^r r_B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{pmatrix}; {}^r r_C = \begin{pmatrix} 0 \\ c \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.38)$$

Die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  werden für die Berechnung der oben genannten Koordinaten benötigt. Die Parameter  $d$ ,  $e$  und  $f$  werden als Länge der Vektoren  ${}^S r_{BA}$ ,  ${}^S r_{CB}$  und  ${}^S r_{CA}$  berechnet.

$$d = \|{}^S r_A - {}^S r_B\| \quad (5.39)$$

$$e = \|{}^S r_B - {}^S r_C\| \quad (5.40)$$

$$f = \|{}^S r_A - {}^S r_C\| \quad (5.41)$$

Ein System aus drei Gleichungen und drei Unbekannten wird mit dem pythagoräischen Satz der rechtwinkligen Dreiecke aufgebaut:

$$d^2 = a^2 + b^2 \quad (5.42)$$

$$a^2 = f^2 - c^2 \quad (5.43)$$

$$b^2 = e^2 - c^2 \quad (5.44)$$

$a$  und  $b$  aus den Gleichungen 5.43 und 5.44 werden in Gleichung 5.42 eingesetzt.

$$d^2 = f^2 + e^2 - 2c^2 \quad (5.45)$$

$$\rightarrow c = \sqrt{\frac{f^2 + e^2 - d^2}{2}} \quad (5.46)$$

$c$  wird in die Gleichungen 5.43 und 5.44 eingesetzt, um  $a$  und  $b$  zu bestimmen.

$$\rightarrow a = \sqrt{\frac{d^2 + f^2 - e^2}{2}} \quad (5.47)$$

$$\rightarrow b = \sqrt{\frac{d^2 + e^2 - f^2}{2}} \quad (5.48)$$

Die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  sind positiv, da die Punkte  $A$ ,  $B$  und  $C$  auf der positiven Seite der

Koordinatenachsen liegen (siehe Abbildung: 5.11). Drei Punkte auf den Koordinatenachsen des Referenzkoordinatensystems reichen nicht aus, um die Transformation vom Referenzkoordinatensystem zum Sensorkoordinatensystem  ${}^S\mathbf{T}_r$  zu bestimmen. Der Ursprung des Bezugskoordinatensystems in Relation zum Sensorkoordinatensystem  ${}^S r_{O_r}$  ist also bis auf weiteres unbekannt.

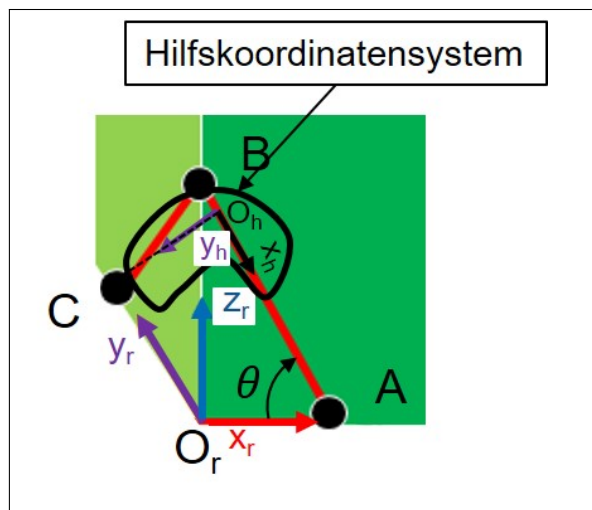


ABBILDUNG 5.12: Hilfskoordinatensystem

Es wird ein Hilfskoordinatensystem definiert, um die Transformation  ${}^S\mathbf{T}_r$  zu berechnen (siehe Abbildung: 5.12). Die x-Achse des Hilfskoordinatensystems ist der Einheitsvektor von  ${}^S r_{BA}$ :

$$\rightarrow {}^S \underline{e}_{hx} = \frac{{}^S r_{BA}}{\|{}^S r_{BA}\|} \quad (5.49)$$

Der Punkt C  ${}^S r_C$  liegt auf der y-Achse des Hilfskoordinatensystems  ${}^S \underline{e}_{hy}$ . Es wird ein Hilfsvektor definiert:

$$\rightarrow {}^S \underline{e}_{BC_h} = \frac{{}^S r_{BC}}{\|{}^S r_{BC}\|} \quad (5.50)$$

Damit ist die z-Achse des Hilfskoordinatensystems  ${}^S \underline{e}_{hz}$  definiert als:

$$\rightarrow {}^S \underline{e}_{hz} = {}^S \underline{e}_{hx} \times {}^S \underline{e}_{BC_h} \quad (5.51)$$

Der Vektor  ${}^S\underline{e}_{h_y}$  wird mit der Rechte-Hand-Regel berechnet:

$$\rightarrow {}^S\underline{e}_{h_y} = {}^S\underline{e}_{h_z} \times {}^S\underline{e}_{h_x} \quad (5.52)$$

Die Position des Ursprungs im Hilfskoordinatensystem  ${}^S\underline{r}_{O_h}$  muss noch ermittelt werden, um das Koordinatensystem vollständig zu definieren. Der Ursprung  ${}^S\underline{r}_{O_h}$  ist der Schnittpunkt der beiden Linien  $g_1$  und  $g_2$ . Die Vektoren  ${}^S\underline{e}_{h_x}$  und  ${}^S\underline{e}_{h_y}$  sind die Einheitenvektoren von  $g_1$  bzw.  $g_2$ . Dabei geht  $g_1$  durch den Punkt B und  $g_2$  durch den Punkt C. Dies impliziert die folgenden Gleichungen:

$$g_1 : {}^S\underline{r}_{O_h} = {}^S\underline{r}_B + \lambda_{g1} \cdot {}^S\underline{e}_{h_x} \quad (5.53)$$

$$g_2 : {}^S\underline{r}_{O_h} = {}^S\underline{r}_C + \lambda_{g2} \cdot {}^S\underline{e}_{h_y} \quad (5.54)$$

$$\Rightarrow {}^S\underline{r}_B + \lambda_{g1} \cdot {}^S\underline{e}_{h_x} = {}^S\underline{r}_C + \lambda_{g2} \cdot {}^S\underline{e}_{h_y} \quad (5.55)$$

$\lambda_{g1}$  und  $\lambda_{g2}$  sind Variablen, die für reelle Zahlen stehen. Die Erweiterung der letzten beiden Gleichungen in x-, y- und z-Teilen schafft ein System aus drei Gleichungen und zwei Unbekannten. Die Lösung dieses Systems führt zu folgender Berechnung von  $\lambda_{g1}$  und  $\lambda_{g2}$ :

$$\lambda_{g1} = \frac{({}^S y_C - {}^S y_B) \cdot {}^S x_{h_x} + ({}^S x_B - {}^S y_C) \cdot {}^S y_{h_x}}{{}^S x_{h_y} \cdot {}^S y_{h_x} + {}^S y_{h_y} \cdot {}^S x_{h_x}} \quad (5.56)$$

$$\lambda_{g2} = \frac{({}^S x_C - {}^S x_B) \cdot {}^S z_{h_y} + ({}^S z_B - {}^S z_C) \cdot {}^S x_{h_y}}{{}^S x_{h_x} \cdot {}^S z_{h_y} + {}^S z_{h_x} \cdot {}^S x_{h_y}} \quad (5.57)$$

Die Nenner der letzten beiden Gleichungen werden berechnet. Die  $\lambda$ , die sich auf die Nenner ungleich Null beziehen, werden in die Gleichung der entsprechenden Zeile ( $g_1$  oder  $g_2$ ) eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird  $\lambda_{g2}$  betrachtet. Dieses wird nach der Berechnung durch die Gleichung  $g_2$  (siehe Gleichung 5.54) ersetzt, um  ${}^S\underline{r}_{O_h}$  zu ermitteln. Damit wird das Hilfskoordinatensystem in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem  ${}^S\mathbf{T}_h$  vollständig bestimmt.

$${}^S\mathbf{T}_h = \begin{pmatrix} {}^S\underline{e}_{h_x} & {}^S\underline{e}_{h_y} & {}^S\underline{e}_{h_z} & {}^S\underline{r}_{O_h} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.58)$$

Die Transformation vom Hilfskoordinatensystem zum Referenz-KS  ${}^r\mathbf{T}_h$  ist erforderlich, um  ${}^S\mathbf{T}_r$  zu berechnen.  $\theta_v$  sei der Winkel zwischen den Vektoren  ${}^S\underline{r}_{AB}$  und  ${}^S\underline{r}_{AO_r}$ .

$$\rightarrow \theta_v = \arctan2(b, a) \quad (5.59)$$

$\arctan2(y, x)$  ist dabei der Kehrwert der Tangensfunktion, die das Vorzeichen von  $y$  und  $x$  berücksichtigt, um den Quadranten zu identifizieren, in dem der resultierende Winkel liegt. Die Position des Ursprungs des Hilfskoordinatensystems relativ zum Bezugskordinatensystem  ${}^r\underline{r}_{O_h}$  wird dann wie folgt berechnet:

$${}^r\underline{r}_{O_h} = \begin{pmatrix} a - \|{}^S\underline{r}_{O_hA}\| \cdot \cos(\theta_v) \\ 0 \\ \|{}^S\underline{r}_{O_hA}\| \cdot \sin(\theta_v) \end{pmatrix} \quad (5.60)$$

Dann können  ${}^r\underline{e}_{h_x}$ ,  ${}^r\underline{e}_{h_y}$  und  ${}^r\underline{e}_{h_z}$  folgendermaßen berechnet werden:

$${}^r\underline{e}_{h_x} = \frac{{}^r\underline{r}_A - {}^r\underline{r}_{O_h}}{\|{}^r\underline{r}_A - {}^r\underline{r}_{O_h}\|} \quad (5.61)$$

$${}^r\underline{e}_{h_y} = \frac{{}^r\underline{r}_C - {}^r\underline{r}_{O_h}}{\|{}^r\underline{r}_C - {}^r\underline{r}_{O_h}\|} \quad (5.62)$$

$$\rightarrow {}^r\underline{e}_{h_z} = {}^r\underline{e}_{h_x} \times {}^r\underline{e}_{h_y} \quad (5.63)$$

Folglich wird  ${}^r\mathbf{T}_h$  vollständig berechnet:

$${}^r\mathbf{T}_h = \begin{pmatrix} {}^r\underline{e}_{h_x} & {}^r\underline{e}_{h_y} & {}^r\underline{e}_{h_z} & {}^r\underline{r}_{O_h} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.64)$$

Die gewünschte Transformation vom Referenz-KS zum Laserliniensensor-KS wird dann folgendermaßen berechnet:

$${}^S\mathbf{T}_r = {}^S\mathbf{T}_h \cdot {}^h\mathbf{T}_r \quad (5.65)$$

$${}^S\mathbf{T}_r = {}^S\mathbf{T}_h \cdot ({}^r\mathbf{T}_h)^{-1} \quad (5.66)$$

Die Kalibriermatrix des Sensors auf dem Roboterflansch wird durch  ${}^F\mathbf{T}_S$  dargestellt. Die Transformation  ${}^F\mathbf{T}_r$  kann mit Hilfe anderer hochtechnologischer präziser Messsysteme, z.B. Laser Trackern, gemessen werden. Die Kalibriermatrix wird dann wie folgt berechnet:

$${}^F\mathbf{T}_S = {}^F\mathbf{T}_r \cdot ({}^S\mathbf{T}_r)^{-1} \quad (5.67)$$

Aufgrund der hohen Kosten solcher Messsysteme sind sie nicht für jeden Anwender verfügbar. Daher ist diese Lösung nicht praktikabel und es besteht der Bedarf, eine funktionellere Lösung ohne den Einsatz von High-Tech-Messsystemen zu finden. Eine Methodik, die auf der geschlossenen Lösung basiert, wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

### 5.3.2 Separierbare geschlossene Lösung

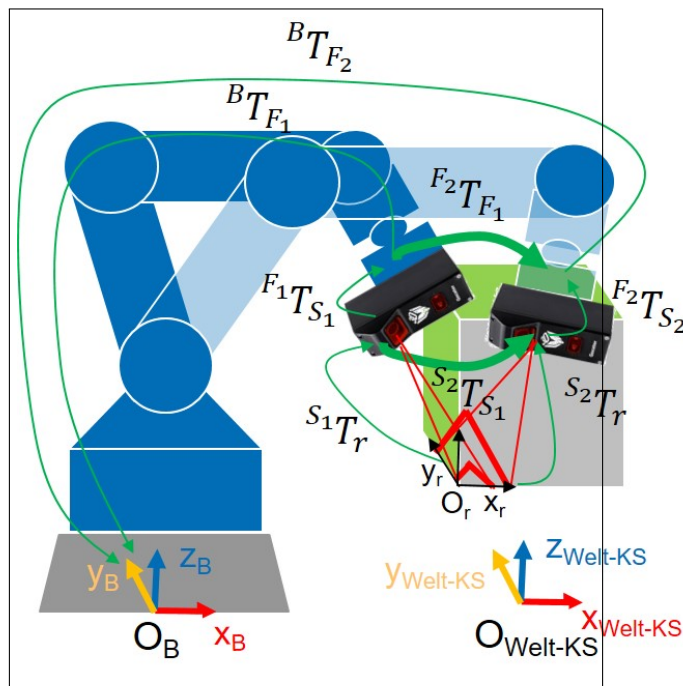


ABBILDUNG 5.13: Schematische Beschreibung der Transformationen im System

Die Pose der Sollstellung ist in Bezug auf das Flansch-KS unbekannt. Daher muss ein Gleichungssystem aufgebaut werden, um die Kalibriermatrix zu berechnen. Die Pose des Würfels wird mit dem Laserliniensensor im statischen Zustand gemessen, nachdem der Sensor in verschiedene Posen gebracht wurde. Die Transformationsmatrix  ${}^F\mathbf{T}_r$  wird entsprechend den

Angaben im vorherigen Kapitel berechnet. Die Pose des Würfels in Bezug auf das Roboter-Basiskoordinatensystem  ${}^B\mathbf{T}_r$  ist konstant, während der Roboterflansch von einer Pose zur anderen bewegt wird. Unter der Annahme, dass bei der Sensormessung kein Rauschen vorhanden ist, haben die konstruierten Würfelkanten einen Winkel von  $90^\circ$  Grad zueinander und die Pose des Roboterflansches in Bezug auf das Roboter-Basiskoordinatensystem  ${}^B\mathbf{T}_F$  ist exakt. Dann kann das Problem nach dem Ändern der Pose des Sensors mathematisch ausgedrückt werden durch (siehe Abbildung: 5.13):

$${}^B\mathbf{T}_r = {}^B\mathbf{T}_r \quad (5.68)$$

$${}^B\mathbf{T}_{F_1} \cdot {}^{F_1}\mathbf{T}_{S_1} \cdot {}^{S_1}\mathbf{T}_r = {}^B\mathbf{T}_{F_2} \cdot {}^{F_2}\mathbf{T}_{S_2} \cdot {}^{S_2}\mathbf{T}_r \quad (5.69)$$

Die Sensorposition ist auch in Bezug auf den Flansch konstant, während sich der Flansch bewegt.

$$\rightarrow {}^{F_1}\mathbf{T}_{S_1} = {}^{F_2}\mathbf{T}_{S_2} = \mathbf{X} \quad (5.70)$$

Das Einsetzen der Gleichung 5.70 in Gleichung 5.69 ergibt Folgendes:

$${}^B\mathbf{T}_{F_1} \cdot \mathbf{X} \cdot {}^{S_1}\mathbf{T}_r = {}^B\mathbf{T}_{F_2} \cdot \mathbf{X} \cdot {}^{S_2}\mathbf{T}_r \quad (5.71)$$

Es folgt das Multiplizieren der Gleichung 5.71 mit  ${}^{F_2}\mathbf{T}_B$  und  ${}^r\mathbf{T}_{S_1}$  auf der linken bzw. rechten Seite.

$${}^{F_2}\mathbf{T}_B \cdot {}^B\mathbf{T}_{F_1} \cdot \mathbf{X} \cdot {}^{S_1}\mathbf{T}_r \cdot {}^r\mathbf{T}_{S_1} = {}^{F_2}\mathbf{T}_B \cdot {}^B\mathbf{T}_{F_2} \cdot \mathbf{X} \cdot {}^{S_2}\mathbf{T}_r \cdot {}^r\mathbf{T}_{S_1} \quad (5.72)$$

$${}^{F_2}\mathbf{T}_{F_1} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{X} \cdot {}^{S_2}\mathbf{T}_{S_1} \quad (5.73)$$

${}^{F_2}\mathbf{T}_{F_1}$  und  ${}^{S_2}\mathbf{T}_{S_1}$  seien durch  $\mathbf{A}$  bzw.  $\mathbf{B}$  gekennzeichnet. Das Problem der Sensorkalibrierung kann durch eine Gleichung dargestellt werden:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{X}\mathbf{B} \quad (5.74)$$

Die Matrizen  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  und  $\mathbf{X}$  werden durch eine Rotationsmatrix und einen Translationsvektor repräsentiert. Das Kalibrierproblem wird in ein Translations- und Orientierungsproblem unterteilt, so dass jede Komponente separat gelöst wird.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{D}_A & \underline{r}_A \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{D}_X & \underline{r}_X \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{D}_X & \underline{r}_X \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{D}_B & \underline{r}_B \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (5.75)$$

Die Multiplikation der Matrizen auf der linken und rechten Seite führt zu den folgenden Gleichungen:

- Orientierungskomponente

$$\mathbf{D}_A \cdot \mathbf{D}_X = \mathbf{D}_X \cdot \mathbf{D}_B \quad (5.76)$$

- Translatorische Komponente

$$\mathbf{D}_A \cdot \underline{r}_X + \underline{r}_A = \mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_B + \underline{r}_X \quad (5.77)$$

Die oben genannten Probleme werden separat gelöst. Zunächst wird die Orientierungskomponente betrachtet, um  $\mathbf{D}_X$  zu bestimmen.  $\mathbf{D}_X$  wird dann in Gleichung 5.77 eingesetzt, um  $\underline{r}_X$  zu ermitteln.

### 5.3.2.1 Orientierungskomponente

Ziel ist es, die Rotationsmatrix  $\mathbf{D}_X$  der homogenen Transformationsmatrix  $\mathbf{X}$  zu berechnen. Der Lösungsansatz basiert auf der Exponentialdarstellung der Drehmatrix. Basierend auf dem Euler-Satz kann jede Rotation oder Rotationsmatrix  $\mathbf{D}$  durch die Drehachse  $\underline{u}$  und einen Drehwinkel  $\vartheta$  um sie herum ausgedrückt werden. Eine kompakte Beschreibung der Drehachse und des Drehwinkels erfolgt durch einen 3D-Rotationsvektor  $\underline{r}_v$ . Die Richtung dieses Vektors entspricht der Drehachse und seine Größe in Bogenmaß dem Drehwinkel. Der Drehwinkel, die

Achse und der Vektor können wie folgt berechnet werden:

$$\vartheta = \arccos\left(\frac{\text{tr}(\mathbf{D}) - 1}{2}\right) \quad (5.78)$$

$$Sk(\underline{u}) = \frac{\mathbf{D} - \mathbf{D}^T}{2\sin(\vartheta)} \quad (5.79)$$

$$\underline{r}_v = \vartheta \cdot \underline{u} \quad (5.80)$$

Die Rotationsmatrix  $\mathbf{D}$  kann in exponentieller Form als Funktion des Rotationsvektors  $\underline{r}_v$  ausgedrückt werden [122][123]:

$$\mathbf{D} = \exp(Sk(\underline{r}_v)) \quad (5.81)$$

Dabei ist  $Sk(\underline{r}_v)$  die schiefsymmetrische Matrix des Rotationsvektors. Eine schiefsymmetrische Matrix ist eine quadratische Matrix und identisch mit dem Negativen ihrer Transponierten. Die schiefsymmetrische Matrix des Vektors  $\underline{r}_v$  ist gleich:

$$Sk(\underline{r}_v) = \begin{pmatrix} 0 & -z_{r_v} & y_{r_v} \\ z_{r_v} & 0 & -x_{r_v} \\ -y_{r_v} & x_{r_v} & 0 \end{pmatrix} \quad (5.82)$$

Damit ist der Logarithmus der Rotationsmatrix  $\mathbf{D}$  gleich der schiefsymmetrischen Matrix des Rotationsvektors  $\underline{r}_v$ :

$$\log(\mathbf{D}) = \log(\exp(Sk(\underline{r}_v))) = Sk(\underline{r}_v) \quad (5.83)$$

$$\rightarrow \log(\mathbf{D}) = \vartheta \cdot \frac{\mathbf{D} - \mathbf{D}^T}{2\sin(\vartheta)} \quad (5.84)$$

Die Multiplikation der Gleichung 5.76 von rechts mit  $\mathbf{D}_X^T$  auf beiden Seiten impliziert:

$$\mathbf{D}_A = \mathbf{D}_X \cdot \mathbf{D}_B \cdot \mathbf{D}_X^T \quad (5.85)$$

$\underline{r}_{vA}$  und  $\underline{r}_{vB}$  seien die Rotationsvektoren von  $\mathbf{D}_A$  und  $\mathbf{D}_B$ . Die Schreibung der Gleichung 5.85 in exponentieller Form und die Anwendung der Identität  $\exp(\mathbf{D}_X \cdot Sk(\underline{r}_{vB}) \cdot \mathbf{D}_X^T) = \mathbf{D}_X \cdot \mathbf{D}_B \cdot \mathbf{D}_X^T$



[124] ergeben:

$$\exp(\text{Sk}(\underline{r}_{v_A})) = \exp(\mathbf{D}_X \cdot \text{Sk}(\underline{r}_{v_B}) \cdot \mathbf{D}_X^T) \quad (5.86)$$

Nach der Anwendung der Identität  $\mathbf{D}_X \cdot \text{Sk}(\underline{r}_{v_B}) \cdot \mathbf{D}_X^T = \text{Sk}(\mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{v_B})$  [125] kann das Orientierungsproblem folgendermaßen formuliert werden:

$$\exp(\text{Sk}(\underline{r}_{v_A})) = \exp(\text{Sk}(\mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{v_B})) \quad (5.87)$$

Die Logarithmen der linken und rechten Seite implizieren Folgendes:

$$\text{Sk}(\underline{r}_{v_A}) = \text{Sk}(\mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{v_B}) \quad (5.88)$$

$$\rightarrow \underline{r}_{v_A} = \mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{v_B} \quad (5.89)$$

Gleichung 5.89 hat genau dann eine Lösung, wenn  $\|\underline{r}_{v_A}\|$  gleich  $\|\underline{r}_{v_B}\|$ , weil  $\mathbf{D}_X$  eine orthogonale Matrix ist, was bedeutet, dass ihre Determinante gleich 1 ist.

### 5.3.2.2 Translatorische Komponente

Das Translationsproblem ist lösbar nach Einsetzen von  $\mathbf{D}_X$  in Gleichung 5.77 und Auflösen der Gleichung nach  $\underline{r}_X$ .

$$(\underline{r}_A - \mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_B) = (\mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{D}_X) \cdot \underline{r}_X \quad (5.90)$$

Dabei ist  $\mathbf{C} = (\mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{D}_X)$  und  $\underline{d} = (\underline{r}_A - \mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_B)$ , wobei  $\mathbf{I}_{3 \times 3}$  eine  $3 \times 3$  Identitätsmatrix ist.

$$\rightarrow \mathbf{C} \cdot \underline{r}_X = \underline{d} \quad (5.91)$$

Die Parameter  $\mathbf{C}$  und  $\underline{d}$  sind bekannt.

### 5.3.3 Lösung mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Die oben genannten Annahmen sind nicht vollständig gültig. Dies ist auf die Toleranzabweichungen bei der Konstruktion des Würfels und die Ungenauigkeit der kinematischen Kette des Roboters sowie auf das Rauschen bei der Messung des Würfels mit dem Laserliniensensor zurückzuführen. Es ist eine kleinste Fehlerquadrate-Lösung erforderlich, um den Fehler in der Kalibriermatrix des Sensors zu minimieren. Nach mehreren Bewegungen des Roboters werden mehrere Messungen mit unterschiedlichen Sensorpositionen gesammelt. Ein Satz von Messdaten wird mit verschiedenen Sensorpositionen nach  $n$  Bewegungen des Roboters gesammelt. Das Problem wird erneut in ein Orientierungsproblem und ein Translationsproblem unterteilt.

#### 5.3.3.1 Orientierungskomponente

Die oben für das Orientierungsproblem berechnete Lösung wird  $n$  mal angewendet.

$$r_{vA1} = \mathbf{D}_X \cdot r_{vB1} \quad (5.92)$$

$$r_{vA2} = \mathbf{D}_X \cdot r_{vB2} \quad (5.93)$$

$$\vdots \quad (5.94)$$

$$r_{vAn} = \mathbf{D}_X \cdot r_{vBn} \quad (5.95)$$

$\mathbf{D}_X$  kann durch Lösen der folgenden Minimierungsgleichung bestimmt werden [126][127]:

$$\min_{\mathbf{D}_X} \left( \sum_{i=1}^n \|\mathbf{D}_X \cdot r_{vBi} - r_{vAi}\|^2 \right) \quad (5.96)$$

Dazu müssen die folgenden Definitionen berücksichtigt werden:

$$\mathbf{A}_l = (r_{vA1}, r_{vA2}, \dots, r_{vAn}) \quad (5.97)$$

$$\mathbf{B}_l = (r_{vB1}, r_{vB2}, \dots, r_{vBn}) \quad (5.98)$$

Der Term  $\sum_{i=1}^n \|\mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{v_{Bi}} - \underline{r}_{v_{Ai}}\|^2$  kann durch  $tr\left(\left(\mathbf{D}_X \cdot \mathbf{B}_l - \mathbf{A}_l\right)^T \cdot \left(\mathbf{D}_X \cdot \mathbf{B}_l - \mathbf{A}_l\right)\right)$  ausgedrückt werden. Erweitert man letzteres, ergibt sich:

$$\begin{aligned} & tr\left(\left(\mathbf{D}_X \cdot \mathbf{B}_l - \mathbf{A}_l\right)^T \cdot \left(\mathbf{D}_X \cdot \mathbf{B}_l - \mathbf{A}_l\right)\right) \\ &= tr(\mathbf{B}_l^T \cdot \mathbf{B}_l) - tr(\mathbf{A}_l^T \cdot \mathbf{D}_X \cdot \mathbf{B}_l) + tr(\mathbf{A}_l^T \cdot \mathbf{A}_l) \end{aligned} \quad (5.99)$$

Das vorstehend erwähnte Minimierungsproblem ist lösbar, wenn  $tr(\mathbf{A}_l^T \cdot \mathbf{D}_X \cdot \mathbf{B}_l)$  maximiert ist, da  $tr(\mathbf{B}_l^T \cdot \mathbf{B}_l)$  und  $tr(\mathbf{A}_l^T \cdot \mathbf{A}_l)$  konstant und unabhängig von  $\mathbf{D}_X$  sind.

$$tr(\mathbf{A}_l^T \cdot \mathbf{D}_X \cdot \mathbf{B}_l) = tr(\mathbf{D}_X \cdot \mathbf{B}_l \cdot \mathbf{A}_l^T) \quad (5.100)$$

**T** sei  $\mathbf{B}_l \cdot \mathbf{A}_l^T$ .

$$\rightarrow tr(\mathbf{D}_X \cdot \mathbf{B}_l \cdot \mathbf{A}_l^T) = tr(\mathbf{D}_X \cdot \mathbf{T}) \quad (5.101)$$

Die Durchführung einer polaren Zerlegung von **T** führt zu folgender Gleichung:

$$\mathbf{T} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{P} \quad (5.102)$$

Dabei ist **U** eine orthogonale Matrix und **P** eine symmetrische positive semi-definite Matrix. **P** kann durch  $\mathbf{P} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{N}^T$  ausgedrückt werden, wobei **D** eine diagonale Matrix der Eigenwerte in abnehmender Reihenfolge und **N** die orthogonale Matrix der für die Eigenwerte ungleich Null relevanten Eigenvektoren ist.

$$\rightarrow tr(\mathbf{D}_X \cdot \mathbf{T}) = tr(\mathbf{D}_X \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{N}^T) \quad (5.103)$$

Die Reformulierung der obigen Gleichung und die Definition von  $\mathbf{G} = \mathbf{N}^T \cdot \mathbf{D}_X \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{N}$  ergeben Folgendes:

$$\begin{aligned} \rightarrow tr(\mathbf{D}_X \cdot \mathbf{T}) &= tr(\mathbf{N}^T \cdot \mathbf{D}_X \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{D}) \\ &\rightarrow tr(\mathbf{G} \cdot \mathbf{D}) = \sum_{i=1}^3 d_i \cdot g_{i,i} \end{aligned} \quad (5.104)$$

Wie bereits erwähnt, ist  $\mathbf{P}$  eine symmetrische positive semi-definite Matrix. Damit sind  $d_1$ ,  $d_2$  und  $d_3$  nicht-negative Parameter, da sie in absteigender Reihenfolge angeordnet sind.  $tr(\mathbf{G} \cdot \mathbf{D})$  wird dann maximiert, wenn die Diagonale von  $\mathbf{G}$  ihr Maximum erreicht. Da  $\mathbf{G}$  eine orthogonale Matrix ist, variieren die Werte der Elemente von  $\mathbf{G}$  zwischen -1 und 1. Um das Maximierungsproblem von  $tr(\mathbf{G} \cdot \mathbf{D})$  zu lösen, wird  $g_{i,j}$  auf 1 gesetzt, wenn  $i$  und  $j$  identisch sind und auf 0, wenn  $i$  und  $j$  unterschiedlich sind. Daher wird die Determinante von  $\mathbf{G}$  wie folgt berechnet:

$$\det(\mathbf{G}) = \det(\mathbf{N})^2 \cdot \det(\mathbf{D}_X) \cdot \det(\mathbf{U}) \quad (5.105)$$

Wenn  $\det(\mathbf{U}) = -1$ , dann  $g_{3,3} = -1$ .

$$\rightarrow \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{2 \times 2} & \underline{0} \\ \underline{0}^T & -1 \end{pmatrix} \quad (5.106)$$

Wenn  $\det(\mathbf{U}) = 1$ , dann  $g_{3,3} = 1$ .

$$\rightarrow \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{2 \times 2} & \underline{0} \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (5.107)$$

Dann wird  $\mathbf{D}_X$  wie folgt berechnet:

$$\mathbf{D}_X = \mathbf{N} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{N}^T \cdot \mathbf{U}^T \quad (5.108)$$

### 5.3.3.2 Translatorische Komponente

Das Translationsproblem wird wie in Kapitel 5.3.2.2 gelöst. Gleichung 5.90 wird auf ein System von  $n$ -Gleichungen erweitert. Aufgrund des Rauschens bzw. der Ungenauigkeiten muss das System durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate gelöst werden.

$$(\underline{r}_{A_1} - \mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{B_1}) = (\mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{D}_{A_1}) \cdot \underline{r}_X \quad (5.109)$$

$$(\underline{r}_{A_2} - \mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{B_2}) = (\mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{D}_{A_2}) \cdot \underline{r}_X \quad (5.110)$$

$$\vdots \quad (5.111)$$

$$(\underline{r}_{A_n} - \mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{B_n}) = (\mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{D}_{A_n}) \cdot \underline{r}_X \quad (5.112)$$

Die Matrix  $\mathbf{C}_l$  und der Vektor  $\underline{d}_l$  sind folgendermaßen definiert:

$$\mathbf{C}_l = \left( (\mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{D}_{A_1})^T, (\mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{D}_{A_2})^T, \dots, (\mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{D}_{A_n})^T \right)^T \quad (5.113)$$

$$\underline{d}_l = \left( (\underline{r}_{A_1} - \mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{B_{A_1}})^T, (\underline{r}_{A_1} - \mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{B_{A_1}})^T, \dots, (\underline{r}_{A_1} - \mathbf{D}_X \cdot \underline{r}_{B_1})^T \right)^T \quad (5.114)$$

$\mathbf{C}_l$  und  $\underline{d}_l$  haben bekannte Parameter nach Ersetzung von  $\mathbf{D}_X$ . Letzteres wird durch Lösen des Orientierungsproblems berechnet, wie in Kapitel 5.3.3.1 erläutert.

Das Translationsproblem kann nun folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\mathbf{C}_l \cdot \underline{r}_X = \underline{d}_l \quad (5.115)$$

Es gilt zu beachten, dass die Matrix  $\mathbf{C}_l$  keine quadratische Matrix ist. Sie hat mehr Zeilen als Spalten. Daher wird die Gleichung 5.115 durch Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gelöst.

$$\underline{r}_X = (\mathbf{C}_l^T \cdot \mathbf{C}_l)^{-1} \cdot \mathbf{C}_l^T \cdot \underline{d}_l \quad (5.116)$$

Wenn die Matrix  $\mathbf{C}_l$  einen Spaltenrang verliert, dann ist die Methode der kleinsten Fehlerquadrate nicht mehr geeignet für die Berechnung des Umkehrwerts von  $\mathbf{C}_l$ . Daher muss die Pseudoinverse von  $\mathbf{C}_l$  basierend auf der Singulärwertzerlegung berechnet werden, um die Gleichung 5.116 in Bezug auf  $\underline{r}_X$  zu lösen.

## 5.4 Einmessen der Kinematiken

Industrieroboter sind oft mit externen Sensoren ausgestattet, die bei der Erfüllung der erforderlichen Produktionsaufgaben mitwirken. Zu diesen Sensoren zählen beispielsweise optische, taktile oder Kraft-/Drehmomentsensoren. Je nach Sensor kann der Messbereich einen ein-, zwei- oder dreidimensionalen Raum abdecken. Laserliniensensoren werden häufig zur Inspektion und Kalibrierung von 3D-Objekten eingesetzt. Die Implementierung einer intuitiven

Kalibriermethode solcher Sensoren auf dem Roboterflansch ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Der Grund dafür ist, dass Roboteranwendungen und -messungen in der Regel unter Einwirken von Rauschen durchgeführt werden. Daher werden Best-Fit-Methoden oder Filter eingesetzt, um einen effektiven Einsatz der Sensoren zu gewährleisten. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Konzept der Kalibrierung von Laserliniensensoren zur Vermessung zylindrischer Bauteile nach dem Best-Fit-Verfahren. Darüber hinaus wird ein modulares Steuerungssystem für die Konfiguration und den Betrieb der Station mit einer Vielzahl von Schnittstellen diskutiert.

Ein Robotersystem beinhaltet einen Manipulator, eine Steuerung, einen Endeffektor und zusätzliche prozessspezifische Sensoren oder Prozesswerkzeuge zur Erfüllung der Produktionsaufgabe. Damit diese Peripheriegeräte jedoch von der Robotersteuerung überwacht werden können, sind Datenkommunikationsschnittstellen erforderlich. Diese Schnittstellen werden insbesondere für den Informationsaustausch und den Betrieb der Geräte und Sensoren verwendet [35].

Die Kalibrierung von externen Werkzeugen, Sensoren und Arbeitsobjekten ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept zur Vermessung eines zylindrischen Objekts (siehe Abbildung: 5.14) in Bezug auf das Roboter-KS mittels einer Best-Fit-Methode vorgestellt [128]. Dieses Konzept basiert auf der bestmöglichen Anpassung eines Kreises und einer Linie im 3D-Raum. Dazu wird ein Laserliniensensor am Roboterflansch montiert, der die Messung durchführt. Anschließend wird ein Verfahren zur Kalibrierung des Lasersensors in Bezug auf den Roboterflansch unter Verwendung einer geschlossenen Lösung mit kleinsten Fehlerquadraten vorgestellt. Daher müssen die Position und Orientierung des Sensorkoordinatensystems in Bezug auf das Flansch-KS durch Lösen einer kinematischen Gleichung in Form von Transformationsmatrizen bestimmt werden. Dies ermöglicht die Transformation der Messwerte in das Roboterkoordinatensystem und erweitert somit die 2D-Messwerte zu 3D-Koordinaten. Die Lösung der genannten Probleme ist für die Realisierung verschiedener Roboteranwendungen unerlässlich. Module wie ein Sensor oder das Robotersystem sind nicht in der Lage, selbstständig miteinander zu kommunizieren, d. h. jeder Teilnehmer der Anwendung muss mit Services ausgestattet werden. Durch die Implementierung eines modularen Steuerungssystems zur Konfiguration und Bedienung der Roboterstation

können Anpassungen an neue Variationen vorgenommen, die Kommunikation zwischen den Systemvarianten gewährleistet und Interfaces für die zukünftige Implementierung realisiert werden.

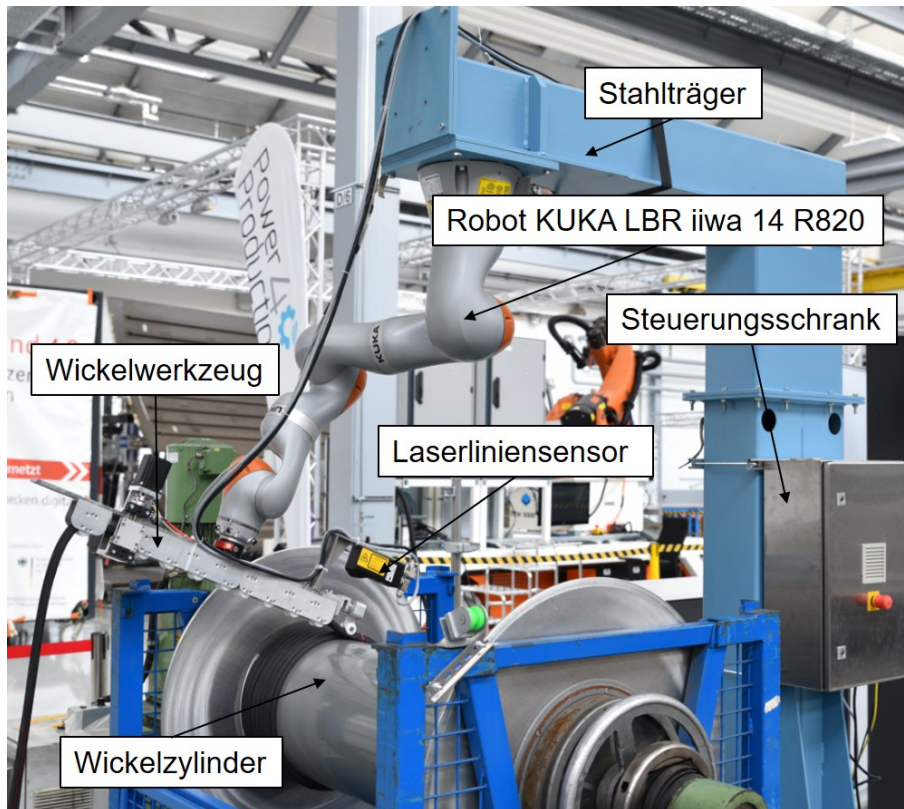


ABBILDUNG 5.14: Aufbau des Wickeldemonstrators

### 5.4.1 Kalibrierung des Wickelzylinders

Die Kalibrierung von Arbeitsobjekten ist von zentraler Bedeutung für die Realisierung der Roboteranwendungen. Der Laser-Liniensensor dient zur Kalibrierung des zylindrischen Arbeitsobjekts, das durch einen Kreis und eine Länge in 3D modelliert werden kann. Ein modulares Konzept wird entwickelt, um den Betrieb der Station zu gewährleisten und die Kommunikation zwischen den verschiedenen Modulen, dem Roboter, dem Sensor und der Produktionsanlage zu erleichtern. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Mess- und Kalibrierkonzept des zylindrischen Arbeitsobjekts in Bezug auf den Roboter. Darüber hinaus wird ein modulares Steuerungskonzept für die Konfiguration und den Betrieb der Roboterstation eingeführt. Die Umsetzbarkeit der entwickelten Konzepte wird durch die sensitive Wickelapplikation getestet (siehe

Abbildung: 5.14). Serielle Kinematik ist oft die zentrale Komponente in einer automatisierten Wickelapplikation [28]. Die Eckpfeiler dieser Station sind ein sensitiver Roboter, ein Wickelwerkzeug, ein Laserliniensensor und ein Wickelzylinder. Die Entwicklung sensibler Wicklungsanwendungen ermöglicht das Wickeln von geometrisch komplexen Gummidichtungen auch bei hohen Fertigungstoleranzen. Diese Technologie wird im Folgenden kurz beschrieben. Die Drehung des Wickelzylinders erfolgt durch die Sunrise-Steuerung des KUKA-Roboters. Das Gummiprofil durchläuft ein Werkzeug, das am Roboterflansch montiert ist. Der Roboter hält den Gummi in einer vordefinierten Position, während sich der Zylinder dreht. Sobald eine vollständige Drehung erreicht ist, neigt der Gummi dazu, sich zur ungewickelten Seite des Zylinders zu bewegen. Der Roboter erfasst die vom Gummi verursachten Kräfte und Momente und bewegt ihn zur ungewickelten Seite des Zylinders. Die Robotereinstellung wird auf der Grundlage einer entwickelten Regelung nach Verarbeitung der Kraft-/Drehmomentdaten berechnet. Dann bewegt sich der Roboter auf einer parallelen Linie zum Zylinder-Normalenvektor. Nach dem vollständigen Aufwickeln einer Schicht ändert sich der Abstand zwischen dem Roboterwerkzeug und der Oberfläche des Zylinders.

### 5.4.2 Best-Fit-Methode

Der Wickelzylinder ist zunächst grob zum Roboter positioniert. Anschließend wird er genau vermessen. Ein Zylinder ist mathematisch durch eine Länge und einen Kreis definiert. Letzterer wird im 3D-Raum durch einen Mittelpunkt, einen Radius und einen Normalenvektor positioniert und orientiert. Der Kalibrierfehler des Sensors, die Fertigungstoleranzen des Zylinders und die Roboter Genauigkeit führen dazu, dass der Kreis überbestimmt interpoliert werden muss. Das bedeutet, dass für die Messung des Kreises mindestens vier Positionen erforderlich sind. Die Punkte werden vom Laserliniensensor gemessen.  ${}^s\mathbf{T}_p$  sei die Transformation der gemessenen Position in Bezug auf das Sensor-KS und  ${}^F\mathbf{T}_s = \mathbf{X}$  die Kalibriermatrix des Sensors. Anschließend werden die 2D-Messdaten der Position in den 3D-Raum transformiert, indem  ${}^s\mathbf{T}_p$  mit der Transformationsmatrix  ${}^F\mathbf{T}_s$  multipliziert wird.



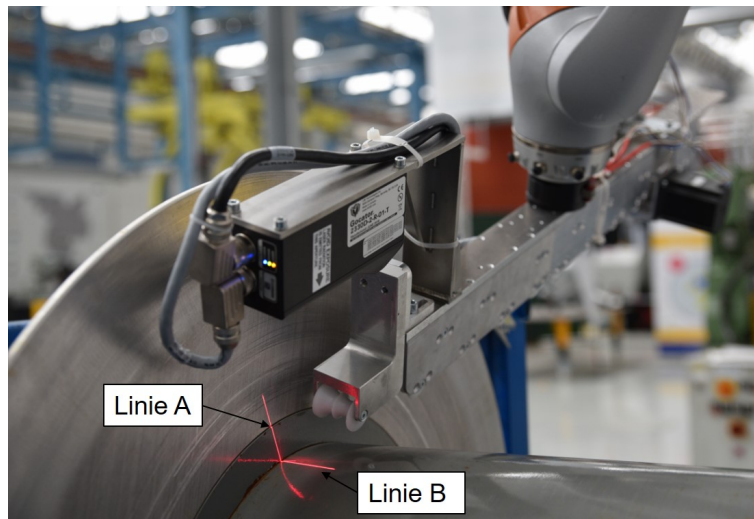


ABBILDUNG 5.15: Ein Laserliniensensor Gocator 2330, der die Kante des Wickelzylinders misst

Der Roboter bewegt sich zu einem der beiden Enden des Zylinders. Der Sensor überwacht die Oberfläche und sendet ein Signal an den Roboter, sobald eine Kante erkannt wird. Danach stoppt der Roboter die Bewegung. Der Sensor misst die Kante, während sich der Roboter im statischen Zustand befindet. Dieser Vorgang wird mindestens viermal wiederholt, jedoch mit unterschiedlichen Roboterposen. Der Laserliniensensor projiziert mehrere hundert Punkte auf die Oberfläche des Zylinders. Die Kante ist definiert als der Schnittpunkt zweier Linien, A und B (siehe Abbildung: 5.15). Die Linien werden mit der im Folgenden beschriebenen Methode der kleinsten Fehlerquadrate interpoliert. Der Kreis wird nach dem Sammeln der Messdaten der Kanten angepasst. Der Roboter bewegt sich dann in die entgegengesetzte Richtung und stoppt, sobald die zweite Kante erkannt wird. Dann wird die Länge des Zylinders bestimmt.

#### 5.4.2.1 Kreisanpassungsalgorithmus

Nach der Messung von mindestens vier Punkten wird ein Kreis angepasst. Die Anpassungsmethode kann in drei Schritte unterteilt werden. Zuerst muss die den 3D-Messpunkten  $(P_1, P_2, \dots, P_n)$  am nächsten liegende Ebene mit Hilfe der Einzelwertzerlegung angepasst werden. Dabei sei  $P_m$  ein Punkt auf dieser Ebene und  $\mathbf{A}$  eine  $n \times 3$  Matrix, die wie folgt definiert ist:  $\mathbf{A} = (P_1 - P_m, P_2 - P_m, \dots, P_n - P_m)^T$ , wobei  $P_m = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{n}$  der Mittelwert aller gemessenen Punkte ist. Der Normalenvektor  $\underline{n}$  kann durch Lösen der Gleichung 5.117 bestimmt werden.

Letzteres zielt darauf ab, den Fehler  $r$  durch Singulärwertzerlegung zu minimieren.

$$r = \min_{\substack{\mathbf{n} \in \mathbb{R}^3; \|\mathbf{n}\|=1}} \|\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}\|^2 \stackrel{!}{=} MIN \quad (5.117)$$

Die Einzelwertzerlegung von  $\mathbf{A}$  wird berechnet als  $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ .  $\mathbf{B} = \mathbf{A}^T\mathbf{A}$  sei eine quadratische Matrix. Die Eigenwerte von  $\mathbf{B}$  sind in der Reihenfolge  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$  numeriert. Diese haben nicht-negative Werte, da  $\mathbf{B}$  positiv definit ist. Die Eigenvektoren von  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  und  $\lambda_3$  sind jeweils  $\underline{v}_1$ ,  $\underline{v}_2$  und  $\underline{v}_3$ . Damit ist  $\mathbf{V} = (\underline{v}_1, \underline{v}_2, \underline{v}_3)$  eine orthogonale Matrix der Eigenvektoren. Die Einzelwerte der Matrix  $\mathbf{A}$  werden durch  $s_i = \sqrt{\lambda_i}$  berechnet. Die Matrix  $\mathbf{S} = s_{ij}$  ist eine diagonale Matrix. Wenn  $i \neq j$ , dann  $s_{ij} = 0$ , ansonsten  $s_{ij} = s_i$ , während  $i, j = 1, 2$  und  $3$ . Die orthogonale Matrix  $\mathbf{U}$  ist definiert als  $\mathbf{U} = (\underline{u}_1, \underline{u}_2, \underline{u}_3)$ , wobei  $\underline{u}_i = \frac{\mathbf{A}\underline{v}_i}{s_i}$ .

$$\begin{aligned} \rightarrow \|\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}\|^2 &= \|\mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{n}\|^2 = \|\mathbf{S}\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{n}\|^2 = \|\mathbf{S}\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{n}\|^2 = \|\mathbf{S} \cdot \underline{b}\|^2 \\ &\quad \|\mathbf{U}\|^2=1 \quad \underline{b}=\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \quad (5.118)$$

$$= \lambda_1(b_1^2) + \lambda_2(b_2^2) + \lambda_3(b_3^2)$$

Die Gleichung 5.117 wird minimiert, wenn  $\underline{b} = (0 \ 0 \ 1)^T$ , da  $\lambda_3$  der kleinste Eigenwert ist und  $\|\underline{b}\|^2 = 1$ . Daher wird  $\underline{n}$  berechnet als:

$$\underline{n} = \mathbf{V} \cdot (0 \ 0 \ 1)^T \quad (5.119)$$

Dann werden die gemessenen Punkte auf die montierte 2D-Ebene projiziert. Der projizierte Vektor des Vektors  ${}^{Welt}r_{p,p_m} = {}^{Welt}r_p - {}^{Welt}r_{p_m}$  in der 2D-Ebene wird durch  ${}^{Welt}r_{pproj}$  dargestellt:

$${}^{Welt}r_{pproj} = {}^{Welt}r_{p,p_m} - ({}^{Welt}r_{p,p_m}^T \cdot \underline{n}) \cdot \underline{n} \quad (5.120)$$

Dabei ist  ${}^{Welt}r_p$  der Vektor des gemessenen Punktes P und  ${}^{Welt}r_{p_m} = P_m$ . Es muss die Transformationsmatrix zwischen dem Welt-KS und dem Koordinatensystem der 2D-Ebene bestimmt

werden, wobei  $P_m$  und  $\underline{n}$  jeweils das Zentrum und die Z-Achse des letzteren darstellen. Quaternionen werden zur Umsetzung der oben genannten Transformation verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass der Drehwinkel zwischen den beiden Z-Achsen der Welt und dem 2D-Ebenenkoordinatensystem der Drehwinkel zwischen den beiden Koordinatensystemen ist, da die Orientierung des Kreises durch seinen Normalenvektor definiert ist. Der Drehwinkel  $\theta$  und der Drehwinkelvektor  $\underline{q}$  werden dann wie folgt berechnet:

$$\theta = \cos^{-1}((0\ 0\ 1) \cdot \underline{n}) \quad (5.121)$$

$$\underline{q} = \frac{\underline{n} \times (0\ 0\ 1)^T}{\|\underline{n} \times (0\ 0\ 1)^T\|^2} \quad (5.122)$$

$(0\ 0\ 0\ 1)^T$  stellt die Z-Achse des Welt-KS dar. Das Quaternion  $\mathbf{q}$  ist dann definiert als:  $\mathbf{q} = \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \underline{q}\right)^T$ . Das Quaternion  $\mathbf{q}$  wird schließlich in die Rotationsmatrix  ${}^{2D}\mathbf{D}_{Welt}$  [85] umgewandelt. Die Transformation der projizierten Punkte  ${}^{Welt}\underline{r}_{pproj}$  in die 2D-Ebene wird dann berechnet durch:

$${}^{2D}\underline{r}_{pproj} = {}^{2D}\mathbf{D}_{Welt} \cdot {}^{Welt}\underline{r}_{pproj} = (x_c\ y_c\ 0)^T \quad (5.123)$$

Das Problem der Kreisanpassung wird auf ein 2D-Problem reduziert und wie folgt beschrieben:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2 \quad (5.124)$$

$$2(x_c)x + 2(y_c)y + (R^2 - x_c^2 - y_c^2) = x^2 + y^2 \quad (5.125)$$

$$c_0x + c_1y + c_2 = x^2 + y^2 \quad (5.126)$$

$x$  und  $y$  bilden dabei die 2D-Koordinaten des Kreises,  $x_c$  und  $y_c$  sind die Koordinaten des Kreismittelpunktes und  $R$  ist der Radius des Kreises. Die Transformation des 3D-Punktes in eine 2D-Ebene führt zu folgendem System:

$$\mathbf{A}_{2D} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{pmatrix}; \underline{b} = \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 \end{pmatrix}; \underline{c} = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \quad (5.127)$$

$$\mathbf{A}_{2D} \cdot \underline{c} = \underline{b} \quad (5.128)$$

Die Gleichung 5.128 wird mit der kleinsten Fehlerquadratschätzung gelöst:

$$\underline{c} = (\mathbf{A}_{2D}^T \cdot \mathbf{A}_{2D})^{-1} \cdot \mathbf{A}_{2D}^T \cdot \underline{b} \quad (5.129)$$

$$x_c = \frac{c_0}{2}; y_c = \frac{c_1}{2}; R = \sqrt{c_2^2 + x_c^2 + y_c^2} \quad (5.130)$$

Die Transformationsmatrix vom 2D-Ebenenkoordinatensystem zum Welt-KS wird wie folgt berechnet:

$${}^{Welt}\mathbf{T}_{2D} = \begin{pmatrix} {}^{2D}\mathbf{D}_{Welt}^T & {}^{Welt}\underline{r}_{p_m} \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (5.131)$$

Anschließend werden die Koordinaten des Kreismittelpunktes wieder in den 3D-Raum transformiert und im Roboter-Basis-KS dargestellt:

$${}^{Welt}\underline{r}_{center_{2D}} = {}^{Welt}\mathbf{T}_{2D} \cdot (x_c \ y_c \ 0 \ 1)^T \quad (5.132)$$

### 5.4.2.2 Linienanpassungsalgorithmus

Der Laserliniensensor projiziert eine Reihe von Punkten auf die Oberfläche des Zylinders. Die Projektlinie ist in zwei Linien unterteilt, Linie A und Linie B (siehe Abbildung: 5.15). Diese Linien werden nach dem Best-Fit-Verfahren aus einer Menge von Punkten interpoliert, da die Messdaten nicht genau auf beiden Geraden liegen. Dies hängt von der Fertigungsgenauigkeit des Zylinders und der Genauigkeit des Sensors ab. Die Best-Fit-Methode wird analog zur Kreisform implementiert. Der Mittelwert  $P_m = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{n}$  aller gemessenen Punkte wird bestimmt und als Punkt auf der interpolierten Linie angenommen. Der Normalenvektor der interpolierten Linie ist zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird die Matrix  $\mathbf{A} = (P_1 - P_m, P_2 - P_m, \dots, P_n - P_m)^T$  konstruiert. Der Normalenvektor  $\underline{n}$  kann durch Lösen der Gleichung 5.133 bestimmt werden. Letzteres zielt darauf ab, den Fehler  $r$  durch Singulärwertzerlegung zu maximieren.

$$r = \max_{\substack{\underline{n} \in \mathbb{R}^3; \|\underline{n}\|=1}} \|\mathbf{A} \cdot \underline{n}\|^2 \stackrel{!}{=} MAX \quad (5.133)$$

$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$  ist die Einzelwertzerlegung von  $A$ . Daher wird  $\underline{n}$  analog zum Normalenvektor des Kreises berechnet (siehe Kapitel: [5.4.2.1](#)):

$$\underline{n} = \mathbf{V} \cdot (1 \ 0 \ 0)^T \quad (5.134)$$

## 5.5 Entwicklung eines Wickelkonzeptes

Es wird ein sensitives Wickelkonzept für die oben beschriebene endlose Gummidichtung (siehe Kapitel [2.3.1](#)) basierend auf einem seriellen Roboter mit integrierten Drehmomentsensoren (LBR iiwa) entwickelt.

Während des Wickelprozesses nimmt das Wickelwerkzeug stets wie in [Abbildung 5.16](#) eine Position und Orientierung über dem Wickelzylinder ein. Bei Rotation des Wickelzylinders und Stillstand des Roboters bzw. Werkzeugs werden die letzten beiden Wicklungen der Gummidichtung aneinandergedrückt. Hierdurch baut sich zwischen Werkzeug und Profil eine Wickelkraft auf, welche als Kraftvektor im Flansch-KS ausgedrückt werden kann. Auf Grund des Hebelarms zwischen der Achse der Führungsrolle und dem Flansch-KS verursacht diese Kraft auch ein Drehmoment. Die geübte Wickelkraft ist parallel zur Drehachse des Wickelzylinders ausgerichtet (Z-Achse des Wickelzylinder-KS).

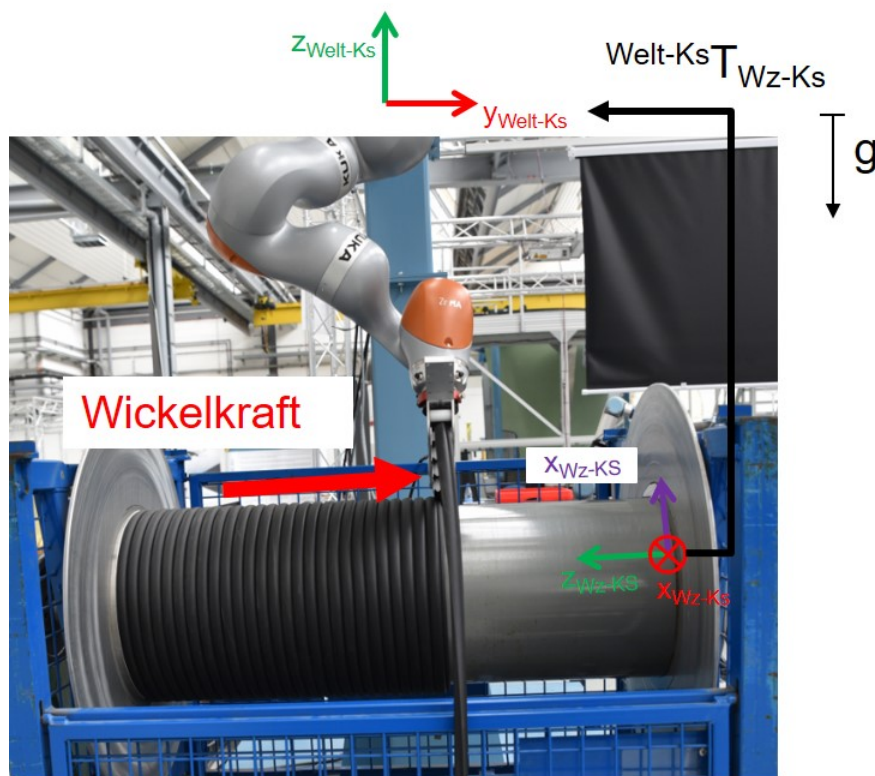


ABBILDUNG 5.16: Die durch die gewickelte Gummidichtung verursachte Wickelkraft

Die Kraftermittlung durch KUKA LBR iiwa setzt sich aus den gemessenen Drehmomenten aller sieben Achsen zusammen, wodurch sich die Messunsicherheit gegenüber den einzelnen Drehmomentmessungen deutlich erhöht. Die Analyse der Roboterkonfiguration und des Versuchsaufbaus führt zu der Schlussfolgerung, dass die siebte Achse immer einen Hebelarm in Bezug auf die Reaktionsposition der ausgeübten Kraft aufweist. Somit werden die Messdaten des in der siebten Achse (M7) integrierten Drehmomentsensors als Regelgröße für den entworfenen Regler betrachtet. Der entworfen externe Kraftregler berechnet den Versatz der Roboterpose, um das gewünschte Drehmoment oder Drehmomentintervall und dadurch die gewünschte Wickelkraft bzw. das gewünschte Wickelkraftintervall zu erreichen. Der Versatz der Roboterposition wird somit als Steuereingang der Steuerung betrachtet.

Ein Vergleich zwischen der Kraftermittlung und der Drehmomentmessung bezüglich ihrer Genauigkeit wird in Kapitel 5.7.2 durchgeführt, um die geeignete Regelgröße für den Wickelprozess abzuleiten. Die Reglerstruktur wird anschließend in Kapitel 5.6 betrachtet.

Beim Wickeln einer kompletten Ebene auf dem Wickelzylinder muss auf zwei Bewegungsarten

des Roboters zurückgegriffen werden (siehe Abb. 5.17). Am Rand des Wickelzylinders muss das Werkzeug auf Grund seines Abmaßes gedreht werden zur Vermeidung der Bildung von Luftspalten (siehe Kapitel 5.5.2). Dazwischen erfolgt das Aufwickeln des Profils mit einer rein linearen Bewegung des Flansches bzw. des Werkzeugs.

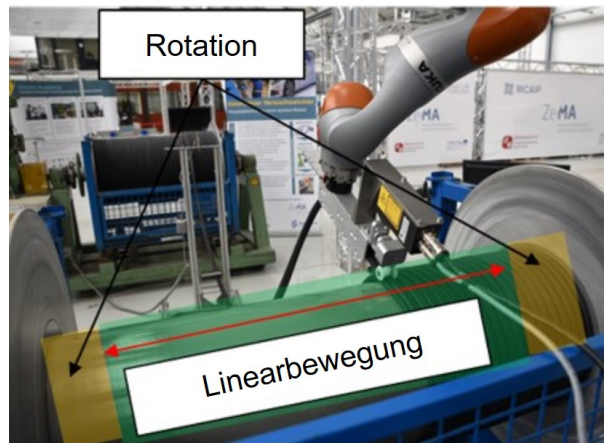


ABBILDUNG 5.17: Unterteilung des Wickelzylinders nach der Bewegungsart des Roboters

### 5.5.1 Lineares Wickeln

Das in Kapitel 2.2.2 erklärte Linearwickel-Verfahren wird adaptiert, um die Gummidichtung entlang des Wickelzylinders und außerhalb des Randbereichs zu wickeln. Der Roboterflansch bewegt sich dann linear entlang der Z-Achse des Wickelzylinder-KS (siehe Kapitel 5.5.1). Das Flansch-KS behält dabei immer die gleiche Orientierung.

### 5.5.2 Wickeln durch Rotation

Das Werkzeug muss wie oben beschrieben an den Rändern des Zylinders gekippt werden. Dies erfolgt allein durch die Änderung der Orientierung des Flansch-KS in Bezug auf das Roboterbasis-KS. Das Flansch-KS behält somit seine Position beim Wickeln bei. Die Position des TCP-KS des Wickelwerkzeugs wird hingegen durch Änderung der Orientierung des Flansch-KS angepasst. Es werden zwei verschiedene Posen des Flansch-KS definiert. Die Orientierungskoordinaten des Posenvektors wechseln von einer Pose zur anderen, während die translatorischen Koordinaten identisch bleiben. Die Anfangsorientierung und die gewünschte Orientierung an der Übergangsstelle zwischen Rotation und Linearwicklung werden definiert.

Die anfänglich vordefinierte Orientierung der Roboterhand wird durch den Roboter angepasst, um die gewünschte Orientierung zu erzielen. Die Robotersteuerung vollzieht die Orientierung der Roboterhand unter Verwendung der Euler-Winkel-Konvention, insbesondere der Roll-Pitch-Yaw-Konvention (siehe Kapitel 3.3). Diese Winkel sind in der Luft- und Raumfahrttechnik und in der Computergrafik bekannt [82]. Die genannten Konventionen sind jedoch numerisch instabil [84] und ungünstig für die Praxis [79].

Die Interpolation zwischen den beiden vordefinierten Posen führt zu einem unerwarteten Pfad, wenn die Roll-Pitch-Yaw-Konvention verwendet wird. Daher muss die Interpolation durch das Quaternion durchgeführt werden, sodass die Drehung durch eine Drehung um nur eine Achse im Raum beschrieben wird. Es wird ein Programm entwickelt und in die Robotersteuerung implementiert, um zuerst die Roll-Pitch-Yaw-Winkel in die Quaternionenparameter umzuwandeln und dann die Quaternionenparameter wieder in die Roll-Pitch-Yaw-Winkel umzuwandeln. Als Drittes wird die Roboterbewegung umgesetzt.

## 5.6 Regelungstechnik

Mit der Regelungstechnik wurde versucht, die komplexe Wickelaufgabe über einen einfachen geschlossenen Regelkreis, wie in Abbildung 5.18 dargestellt, zu lösen. Die Regelstrecke ist dabei durch den Teil der Anlage gegeben, an dem die Regeleinrichtung auf eine zu regelnde physikalische Größe (die Regelgröße) einwirkt [129]. Im hier vorliegenden Fall bildet sich die Regelgröße aus den Kontaktkräften zwischen den beiden letzten Windungen der Gummidichtung. Beim Stellglied im Regelkreis handelt es sich um ein technisches System, welches durch Änderung seiner Ausgangsgröße(n) die Regelstrecke und somit die Regelgröße beeinflusst. Diese Funktion übernimmt hier der KUKA LBR iiwa. Durch die Bewegung des Roboter-Flansches bzw. -TCP parallel zur Z-Achse des Rollen-KS kann auf die Kraft zwischen den beiden letzten Windungen Einfluss genommen werden. Die Roboterpose ist somit die Stellgröße für den Regelprozess. Als Messsystem fungiert ebenfalls der KUKA LBR iiwa, der in der Lage ist, sowohl die Drehmomente in seinen sieben Achsen als auch die am Flansch bzw. TCP angreifenden Kräfte in einem beliebigen Anwender-KS zu messen und auszugeben. Grundsätzlich ist deshalb eine Regelung anhand der Drehmomente und der Kräfte möglich.



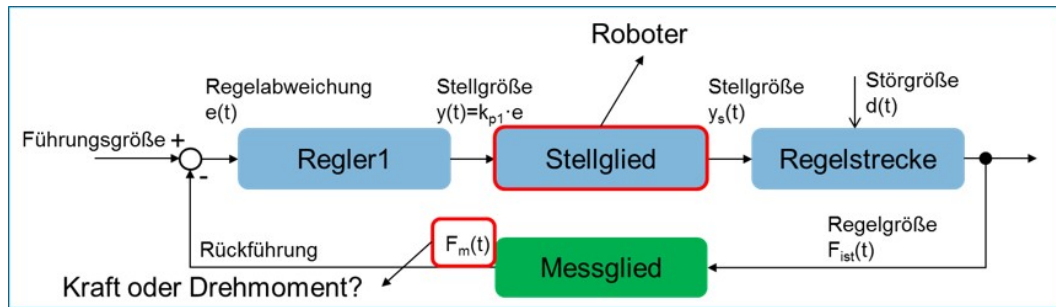


ABBILDUNG 5.18: Blockdiagramm eines geschlossenen Regelkreises

Ziel des Reglers ist, einen bestimmten Kraftverlauf am Roboter-TCP zu erzeugen. Der absolute Kraftwert entlang der Drehachse des Wickelzylinders soll zwischen 1 und 3 N liegen. Dafür wird die externe Kraft am Roboter gemessen und mit der Führungsgröße verglichen, um die Regelabweichung zu bestimmen. Basierend auf der ermittelten Regelabweichung wird der Roboter als Stellglied seine Pose anpassen, um den vorgegebenen Kraftverlauf zu erreichen. Das Rotieren des Wickelzylinders verursacht dabei eine permanente Veränderung der gemessenen Kraft und kann daher als Störung auf dem Regelkreis betrachtet werden. Der KUKA LBR iiwa bildet das Stellglied und enthält zur Positionsregelung einen eigenen Regelkreis, welcher wie in Abb. 5.19 zu sehen, mindestens ein  $PT_2$ -Verhalten aufweist.

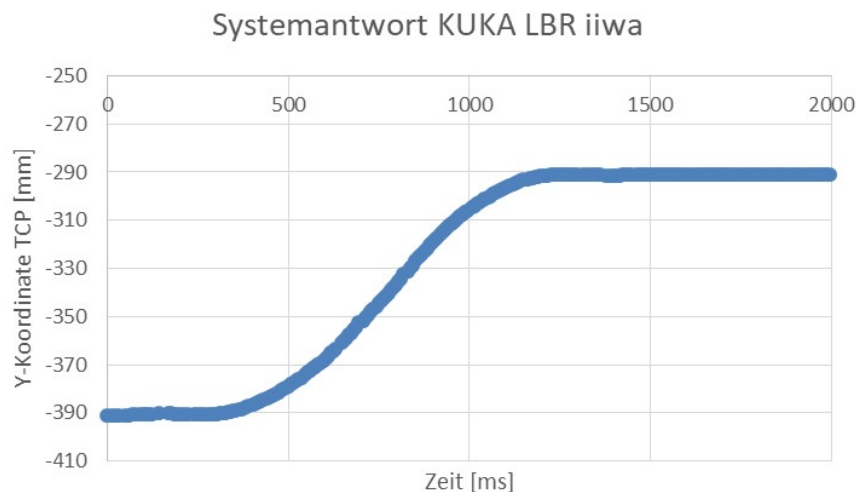


ABBILDUNG 5.19: Systemantwort des KUKA LBR iiwa nach Bewegungsbefehl entlang der Y-Achse (Basis-KS)

Da beim Wickelprozess aber der Einfluss von Störungen maßgeblich und das genaue Erreichen der Führungsgröße irrelevant ist, entschied man sich zunächst dafür, mit einem einfachen P-Regler zu starten und diesen dann bei Bedarf zu erweitern oder zu modifizieren. Erste Versuche damit zeigten jedoch schon früh, dass der Wickelprozess mit nur einem einfachen P-Regler

nicht stabil funktioniert. Dieses Verhalten ist auf die stark verrauschten Messdaten zurück zu führen. Der P-Regler wurde deshalb mit einem Dreipunktregler gekoppelt.

### 5.6.1 Dreipunktregler

Dreipunktregler kommen häufig bei einer Temperaturregelung zum Einsatz, finden aber auch Anwendung im Bereich der Stellantriebe. Hier dienen sie zum Umschalten zwischen Rechts- und Linkslauf [130]. Von Vorteil erweist sich ein solcher Regler ebenfalls bei Prozessen, bei denen die Regelgröße auf Grund von Störungen um den Sollwert (Führungsgröße) mit einem Rauschen belegt ist [130]. Diese Eigenschaft sollte auch den vorliegenden Wickelprozess stabilisieren, der durch das Drehen der Wickelrolle permanent mit Störungen behaftet ist. Die resultierende Kennlinie des neuen Reglers ergibt sich dabei aus der Multiplikation der Kennlinie des Dreipunktreglers mit der des P-Reglers (siehe Abb. 5.21).

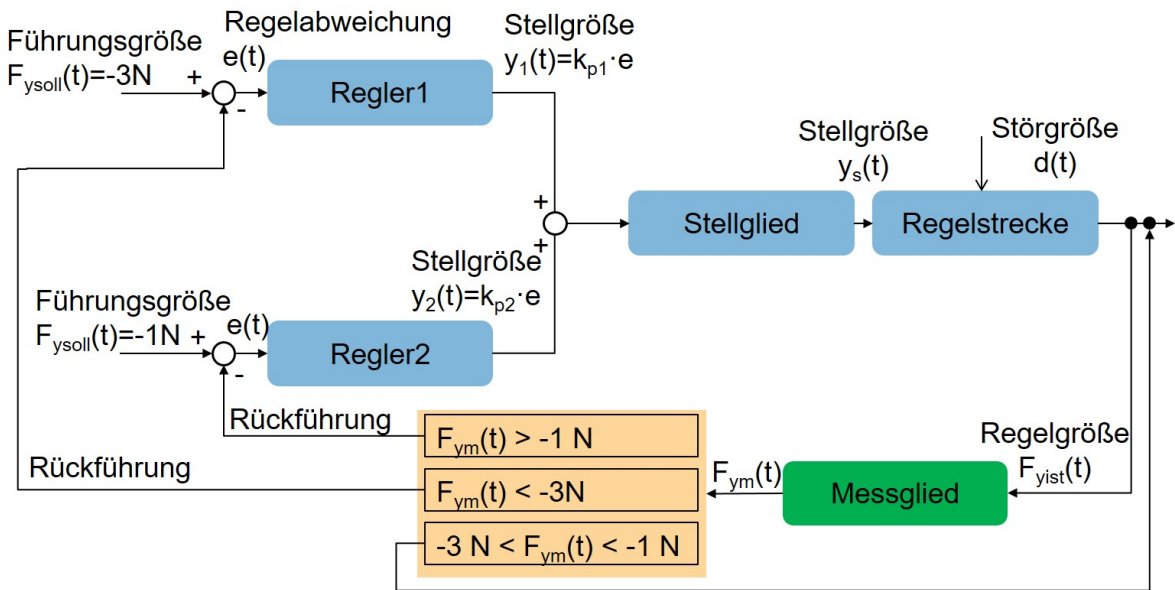


ABBILDUNG 5.20: Blockdiagramm des veränderten Regelkreises

Die dabei entstehende Totzone, auch *Kontaktabstand* genannt [131], um den Mittelpunkt (Sollwert) der Kennlinie dient dazu, die Ansprechschwelle des Reglers anzuheben. Dadurch soll verhindert werden, dass während der Wickelversuche der Istwert zwischen den zwei Proportionalbereichen P1 und P2 hin und her springt [131] oder Störeinflüsse und Messunsicherheiten den Regelprozess aufschwingen lassen. Der so beschriebene Regler kann deshalb auch, wie in Abbildung 5.20 zu sehen, als zwei unabhängig voneinander arbeitende Regler verstanden und dargestellt werden. Regler 1 steuert so zum Beispiel die Roboterbewegung zum

Abbau der Wickelkräfte, wohingegen Regler 2 zum Aufbau der Wickelkräfte zuständig ist. Ein Aufschwingen des Prozesses wird zudem durch die im Dreipunktregler enthaltenen Hysteresen (siehe Abb. 5.21) verhindert. Diese werden prinzipiell gegen den Uhrzeigersinn durchlaufen. Steigt die Wickelkraft (siehe Kapitel 5.5) über den Grenzwert an, so gibt der Regler eine Korrektur der Werkzeugposition bzw. -orientierung aus. Dadurch sinkt die Wickelkraft wieder ab. Dabei wird (entsprechend der Breite der Hysterese) auch etwas unterhalb des Grenzwerts eine neue Stellgröße berechnet und ausgegeben (der Regler ist weiterhin aktiv), um weiterhin die Wickelkräfte zu reduzieren. Durch diese Maßnahme soll verhindert werden, dass sich der Regelprozess immer nur knapp um den Grenzwert bewegt und es so, z. B. auch auf Grund der Messunsicherheit, zu einem ständigen An- und Ausschalten des Reglers kommt. Dies hätte wiederum zur Folge, dass der Roboter im Wechsel ständig beschleunigt und wieder abbremst. In diesem instabilen Zustand würde sich die Messunsicherheit zusätzlich erhöhen und damit den Regelprozess verschlechtern. Grundsätzlich erfolgt die Korrektur der Werkzeugpose zum Abbau von Wickelkräften proportional zum P-Anteil P1 (siehe Abb. 5.20).

Der hier beschriebene Prozess funktioniert aber auch für die umgekehrte Richtung. Werden die Wickelkräfte zu klein, so berechnet der Regler anhand des P-Anteils P2 ( $<0$ ) eine Korrektur der Werkzeugpose. Dadurch wird die aktuelle Windung wieder stärker an die letzte Windung gedrückt, wodurch die Wickelkräfte wieder ansteigen.

Betragsmäßig ist P1 dabei deutlich größer als P2. Das liegt daran, dass die Störgröße (Drehen der Rolle, Aufwickeln des Gummis) immer nur einseitig auftritt und sich dadurch die Wickelkraft stetig erhöht. Der Regler muss deshalb zum Abbau der Wickelkräfte schneller reagieren als zu deren Aufbau, was einen größeren P-Anteil erfordert.

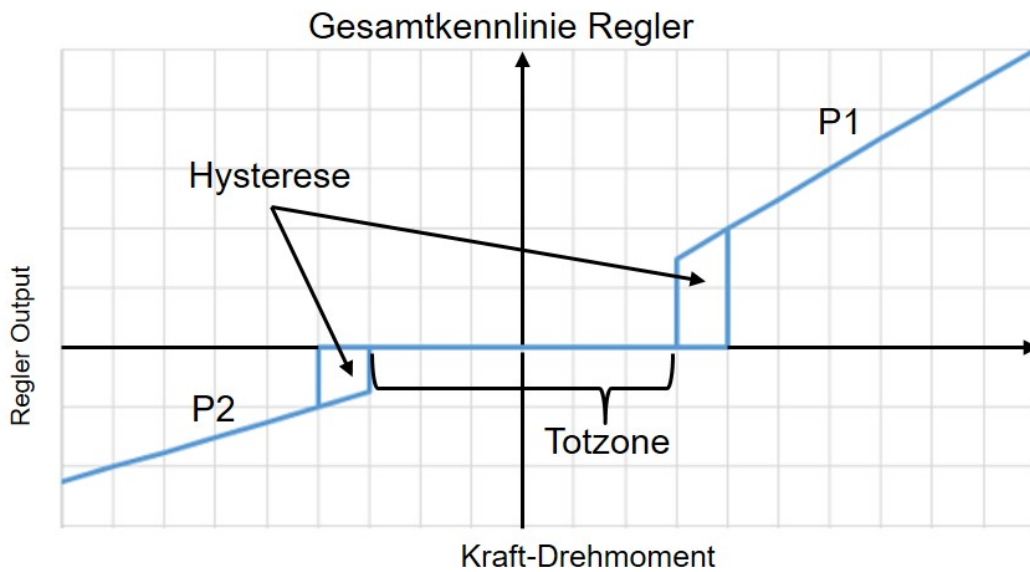


ABBILDUNG 5.21: Resultierende Regler-Kennlinie, zusammengesetzt aus Dreipunktregler und P-Regler

## 5.7 Durchführung der Versuche

Zum Durchführen der Wickelversuche wurde der in Abbildung 5.22 abgebildete Versuchsaufbau eingerichtet. Der KUKA LBR iiwa hängt dabei kopfüber an einem L-förmigen Stahlträger über der Wickelrolle. Die Wickelrolle wird bezüglich des Roboters wie in Kapitel 5.4 beschrieben vermessen. Als Ersatz für den Herstellungsprozess wird die Gummidichtung von einer zweiten Rolle abgewickelt. Ein Tänzer zwischen den beiden Rollen dient dabei der Synchronisation der Rotationsgeschwindigkeiten. Dieser Vorgang war jedoch bei hohen Drehzahlen der Rollen sehr schwingungsbehaftet, was zur Folge hatte, dass der Gummi im Wechsel sehr stark zwischen den Rollen gespannt wurde und anschließend wieder entlastet durchhing. Die dabei entstehenden wechselnden Kräfte auf den Roboter bilden eine weitere Störgröße im Wickelprozess und sollten deshalb so gut es geht vermieden werden. Hierzu wurde der Gummi vom Boden vor der Rolle aufgewickelt (siehe Abb. 5.22).

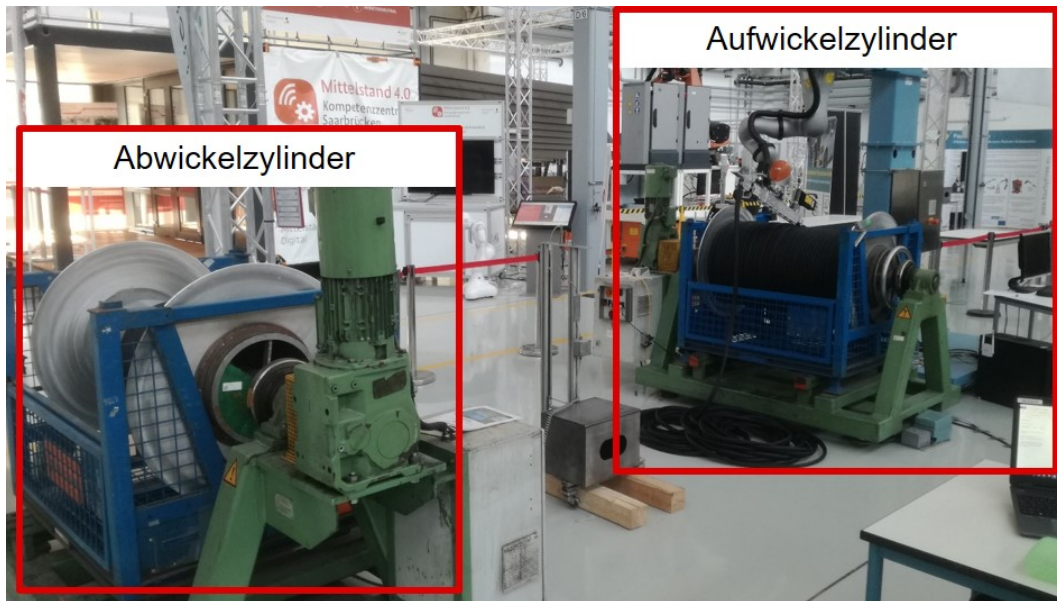


ABBILDUNG 5.22: Versuchsaufbau Wickeldemonstrator

### 5.7.1 Parameteridentifikation

Zu Beginn der Versuchsreihe wurden die auf den Flansch wirkenden Kräfte parallel zur Z-Achse des Wickelzylinder-KS als Messgröße des Regelkreises erfasst. Um einen Anhaltswert für die Führungsgröße zu erhalten, wurden zunächst manuelle Wickelversuche durchgeführt. Mit dem Roboterbedienpanel wurde der Roboter bei laufender Wickelrolle händisch geführt mit dem Ziel, ein gleichmäßiges Wickelbild zu erhalten. Gleichzeitig wurden die auf den Roboter wirkenden Kräfte aufgezeichnet. Eine Analyse des Kraftverlaufs entlang der Z-Achse des Wickelzylinder-KS erbrachte den Schätzwert für die Führungsgröße von 2N. Die ermittelte Kraft führte zu einem instabilen Regelkreis und dadurch zu einem inhomogenen Wickelbild. Außerdem wurde ein Vergleich zwischen der ermittelten Kraft und dem an der jeweiligen Achse gemessenen Drehmoment in Kapitel 5.7.2 durchgeführt.

Bei der Identifikation des P-Anteils wurde eine empirische Einstellmethode gewählt. Dabei wurde mit einer Verstärkung von 1 gestartet, welche dann in Schrittweiten erhöht wurde. Mit jedem neuen P-Anteil wurden mehrere Wickelversuche durchgeführt und jeweils das Wickelbild beobachtet. Dabei galt es, vor allem auf zwei Auffälligkeiten zu achten, welche ein schlechtes Wickelbild charakterisieren:

1. Die Gummidichtung kippt: Während des Wickelns der aktuellen Windung legt sich die Dichtung leicht auf die vorherige Windung auf und wird dadurch um seine Längsachse tordiert bzw. rotiert. Dieses Fehlerbild kann ein Anzeichen dafür sein, dass die Verstärkung im P-Regler zu gering ist.
2. Zu große Abstände zwischen zwei Windungen: Zwischen zwei Windungen besteht kein Kontakt mehr und ein Spalt wird sichtbar. Dieses Fehlerbild kann ein Anzeichen dafür sein, dass die Verstärkung im P-Regler zu groß gewählt wurde.

Ein optimaler Verstärkungsfaktor liegt somit zwischen zwei Iterationsschritten, bei denen es noch zu den oben erwähnten Fehlerbildern kommt. An der unteren Grenze tritt Fehlerbild 1 auf, an der oberen Fehlerbild 2. Um nun einen genaueren Wert zu erhalten, wurde anschließend mithilfe desselben Vorgehens innerhalb dieser Grenzen mit kleineren Schrittweiten experimentiert.

Darüber hinaus galt es, die Totzone bzw. den Kontaktabstand zwischen den zwei Proportional-Anteilen und die Breite der Hysteresen festzulegen. Der Kontaktabstand konnte dabei, ähnlich dem P-Anteil, experimentell festgestellt werden. Ohne Totzone und bei stehender Wickelrolle schwingt der Roboter, wie bereits in Kapitel 5.6.1 erwähnt, um seine Ruhelage. Die Totzone wurde deshalb schrittweise um  $\pm 0,1$  N erhöht, bis kein Schwingen mehr festgestellt werden konnte. Anschließend galt es, diesen Wert in Wickelversuchen mit drehender Rolle zu validieren. Bei zu großer Totzone kann es nämlich zum oben beschriebenen Fehlerbild 1 kommen, bei dem der Gummi kippt. Der Roboter reagiert dabei zu spät auf eine ansteigende Wickelkraft, da die Ansprechschwelle des Reglers mit Hilfe der Totzone angehoben wurde. Aus den Versuchen konnte so ein Wert für den Kontaktabstand von  $\pm 1$  N um die Führungsgröße von 2 N ermittelt werden. Die Breite der Hysterese wurde initial auf 0,1 N eingestellt. Dieser Parameter erwies sich mit Voranschreiten der Versuchsreihe als nicht besonders relevant.

Für die Wickelversuche stand Gummiprofil für insgesamt sieben Lagen zur Verfügung. Da mit jeder weiteren Ebene der Durchmesser und somit auch der Umfang, um den gewickelt wird, steigt, sinkt die Steigung der Wicklung mit jeder weiteren Lage. Bei konstanter Zuführgeschwindigkeit des Gummis kann mit jeder Lage die Drehzahl der Wickelrolle etwas verringert werden, ohne dass die Bahngeschwindigkeit auf der Wickelrolle abnimmt. Sinkende

Steigung und gleichbleibende Bahngeschwindigkeit führen dazu, dass die Störeinflüsse auf den Regelprozess geringer werden. Folglich ist auch der P-Anteil zum Abbau der Wickelkräfte mit jeder weiteren Lage etwas zu verringern. Dieser Zusammenhang zeigte sich letztendlich auch in den Wickelversuchen, bei denen man die Verstärkung um 7 für die erste Lage und auf 4 für die siebte absenken musste, um keine Lücken im Wickelbild zu erhalten. Grundsätzlich mussten alle Parameter für die sieben Ebenen individuell angepasst werden.

### **5.7.2 Anforderung an das Messsystem (Drehmoment/Kraft)**

Eine sensitive Wickelapplikation erfordert eine präzise Erfassung der äußeren Kraft bzw. des äußeren Drehmoments. Der Roboter als Bestandteil des Prozesses wird als Stellglied des Regelkreises betrachtet. Die Überwachung der äußeren Kraft bzw. des äußeren Drehmoments wird durch die im LBR iiwa integrierten Drehmomentsensoren durchgeführt. Diese Sensoren sind in die Gelenke des Roboters integriert. Die Untersuchung des LBR iiwa als Messroboter im Montageprozess zur Erfassung von äußeren Kräften und Drehmomenten ist in Kapitel 4.4 dargestellt. Das gewickelte Gummiprofil bewirkt eine Wickelkraft entlang der Drehachse des Wickelzylinders. Daraus resultiert ein Drehmoment um die siebte Achse des Roboters, das vom integrierten Drehmomentsensor erfasst werden kann. Die resultierende Kraft in Bezug auf das Flansch-KS wird dann in der KUKA Steuerung basierend auf der Drehmomentmessung an der siebten Achse bestimmt (siehe Abb. 5.23). Dies sind modellbasierte Berechnungen, bei denen im ersten Schritt die Sensordaten gefiltert werden. Die Drehmomentmessdaten hingegen werden als ungefilterte Rohdaten zur Verfügung gestellt.

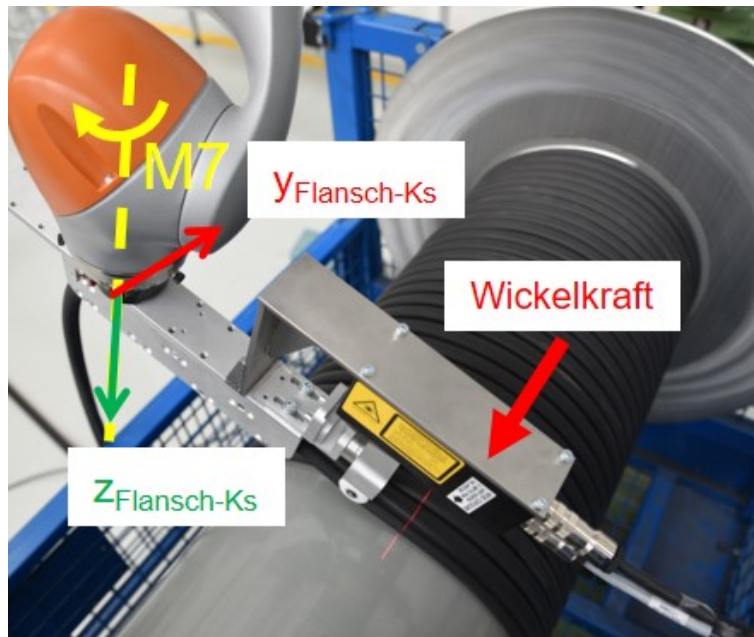


ABBILDUNG 5.23: Das durch die Wickelkraft resultierende Drehmoment auf die siebte Achse

Die ersten Wickelversuche wurden mit den am Flansch wirkenden Kräften parallel zur Z-Achse des Wickelzylinder-KS als Messgröße durchgeführt. Bei einer Drehgeschwindigkeit der Rolle von maximal 0,6 Umdrehungen pro Sekunde zeigte sich das Potenzial des Wickeldemonstrators. Abschnittsweise schaffte es der Roboter, ein nahezu perfektes Wickelbild zu erzeugen. Immer wieder kam es jedoch zum Auftreten der beiden oben beschriebenen Fehlerbilder, vor allem, wenn versucht wurde, eine ganze Ebene zu wickeln. Daher werden zunächst die Kraftermittlung und die Drehmomentmessungen detailliert betrachtet.

Der Roboter bewegt sich zunächst linear von der linken Seite des Wickelzylinders zur rechten Seite. Dieser Weg liegt entlang der Drehachse des Wickelzylinders und zeigt einen möglichen Prozessweg. Für diesen dynamischen Fall werden die gemessenen Drehmomente und die ermittelten Kräfte in Abhängigkeit von der Roboterposition aufgezeichnet. Das Ergebnis ist in Abb. 5.24 dargestellt. Es zeigt, dass die gemessenen Drehmomentwerte verrauscht sind. Die Werte der Kräfte sind deutlich weniger verrauscht, aber sie zeigen Spitzen in bestimmten Posen (siehe Abb. 5.24). Die beiden Datensätze (Kräfte und Momente) sind entlang der Bahn nicht konstant und hängen von der Roboterposition ab. Das bedeutet, dass die experimentell ermittelte Führungsgröße von 3N nicht für die gesamte Ebene zutrifft. Es bedarf daher eines Tiefpassfilters zur Glättung der verrauschten gemessenen Drehmomente und einer Lookup-Tabelle, um die Instabilität der gewonnenen Daten auszugleichen. Diese



beinhalten den Kraftverlauf parallel zur Z-Achse entlang der Rolle ohne äußere Kräfte für beide Bewegungsrichtungen. Im Prozess wird dann von der jeweils an einer Position gemessenen Gesamtkraft, abhängig von der aktuellen Bewegungsrichtung, der entsprechende Wert aus den Offset-Dateien subtrahiert. Für jede Position entlang einer Wickelebene sollte so die Trennung von Prozesskräften und Kräften, die durch nicht modellierte Elemente und die Bewegung des Roboters erzeugt wurden, erfolgen. Diese Maßnahme führte zur Verbesserung des Wickelbildes entlang der Ebene.

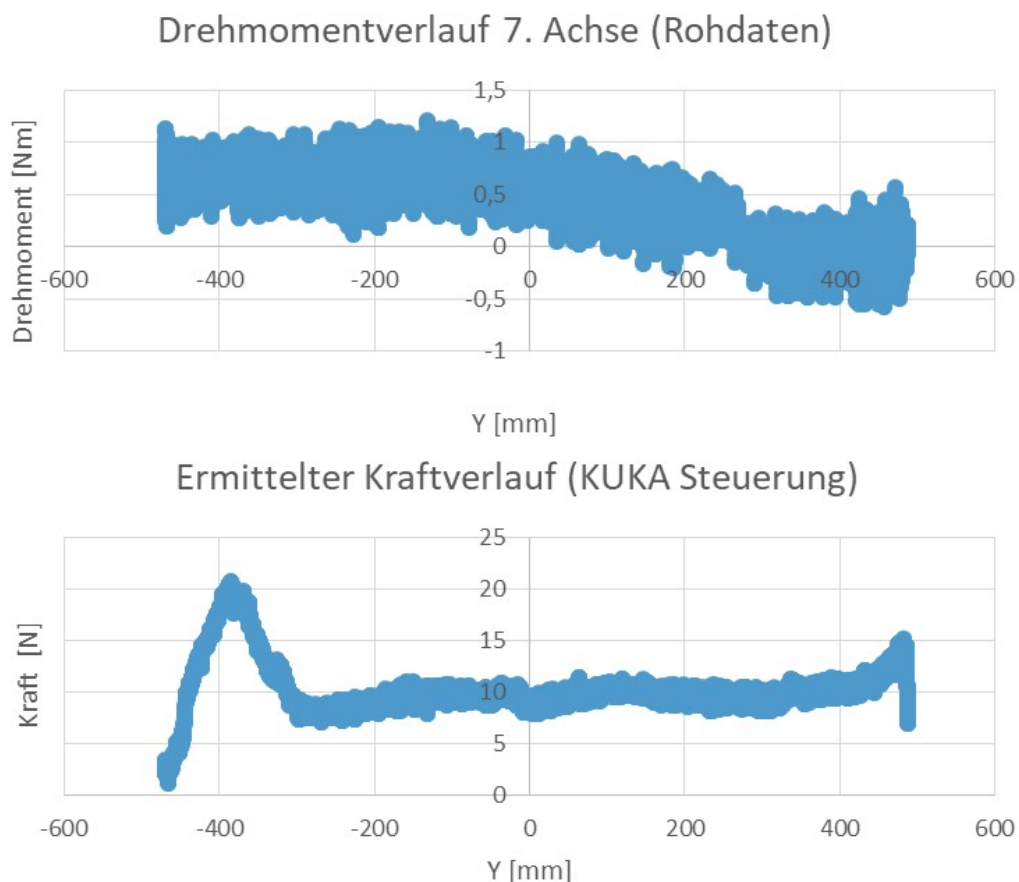


ABBILDUNG 5.24: oben: Gemessenes Drehmoment entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS; unten: Ermittelte Kraft entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS

Ein Butterworth-Filter [132], Tiefpassfilter 2. Ordnung, wird zur Glättung der Daten eingesetzt. Der Filter ist in Java geschrieben und in die Sunrise-Steuerung integriert, um die Messdaten zu filtern. Die daraus resultierende geglättete Messkurve ist in Abb. 5.25 dargestellt.

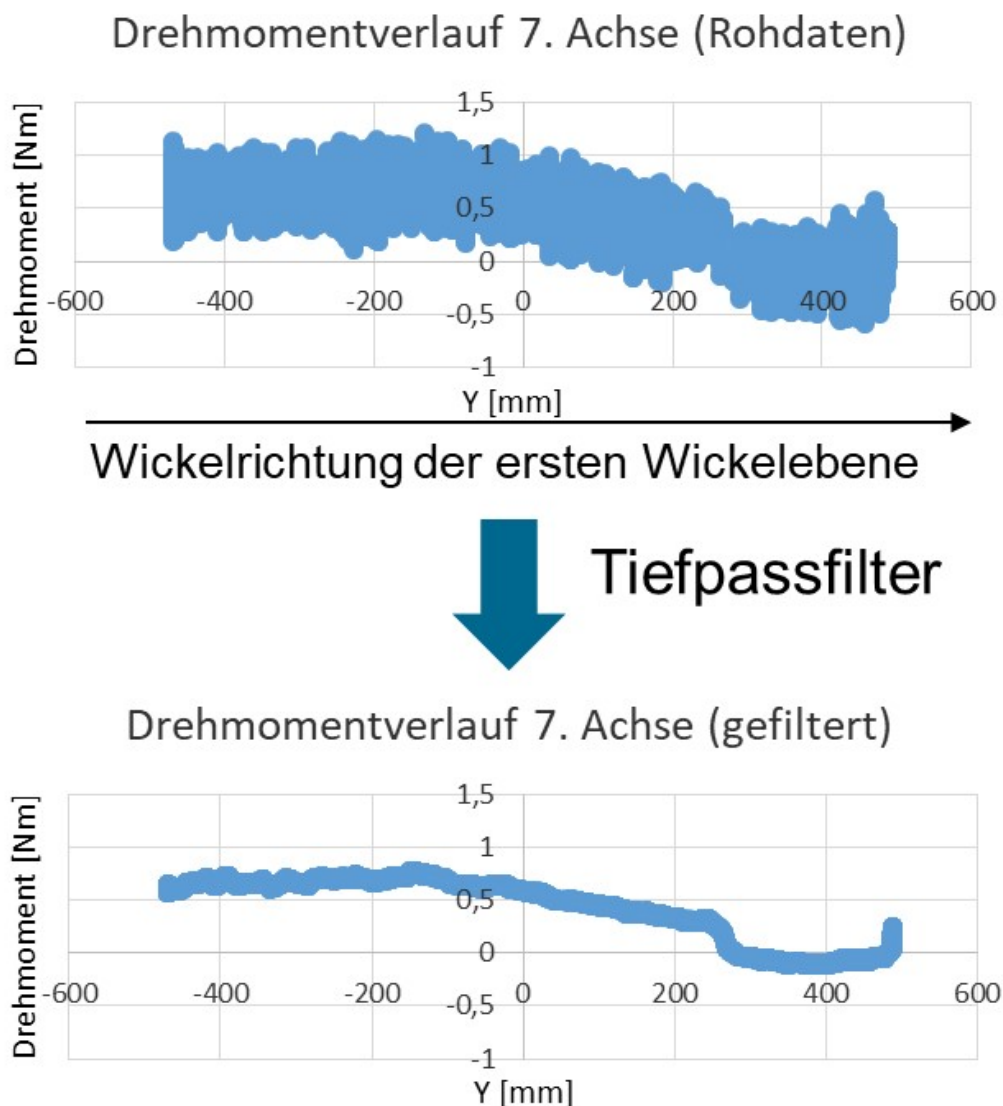


ABBILDUNG 5.25: Auslegung des Tiefpassfilters

Um die Reproduzierbarkeit der Datensätze in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung zu überprüfen, bewegt sich der Roboter auf dem gleichen Weg wie zuvor, jedoch in die entgegengesetzte Richtung. Die Datensätze der beiden Bewegungen werden in Bezug auf ihre Roboterposition verglichen (siehe Abb. 5.26). Die Drehmomentmessdaten werden zuerst gefiltert. Die Abbildung 5.26 zeigt, dass die ermittelten Kurven horizontal gespiegelt werden. Dies wiederum bedeutet, dass die Bewegungsrichtung bei der Betrachtung der äußeren Kräfte/Drehmomente berücksichtigt werden muss.

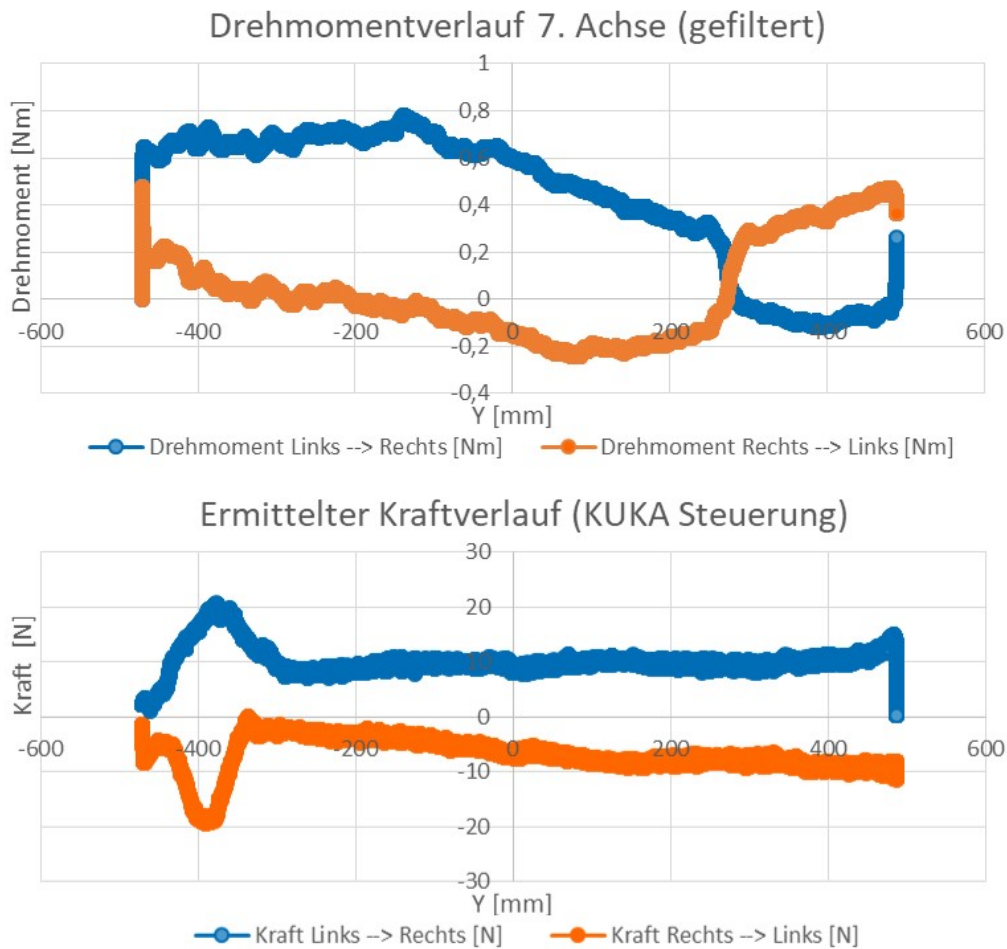


ABBILDUNG 5.26: oben: Gemessenes Drehmoment entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS; unten: Ermittelte Kraft entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS

Weiterhin sind die Gipfelpunkte der Kräfte zu berücksichtigen. Zusätzlich wird die Streuung der ermittelten Daten überwacht und grafisch dargestellt. Die grafische Darstellung zeigt, dass die Streuung an den Peaks sehr groß ist (bis zu 14 N) (siehe Abb. 5.27). In dieser Pose befindet sich der Roboter in der Nähe einer Singularität, die für die Ungenauigkeiten der Kraftermittlung verantwortlich ist. Die Berechnung der Kräfte basiert auf dem kinematischen und dynamischen Modell des Roboters. Daher beeinflussen die Singularitäten die Genauigkeit der oben genannten Berechnungen. Eine Methode zur kinematischen Optimierung der Roboterkonfiguration zur genaueren Ermittlung der Kräfte wird in Kapitel 5.8 vorgestellt.

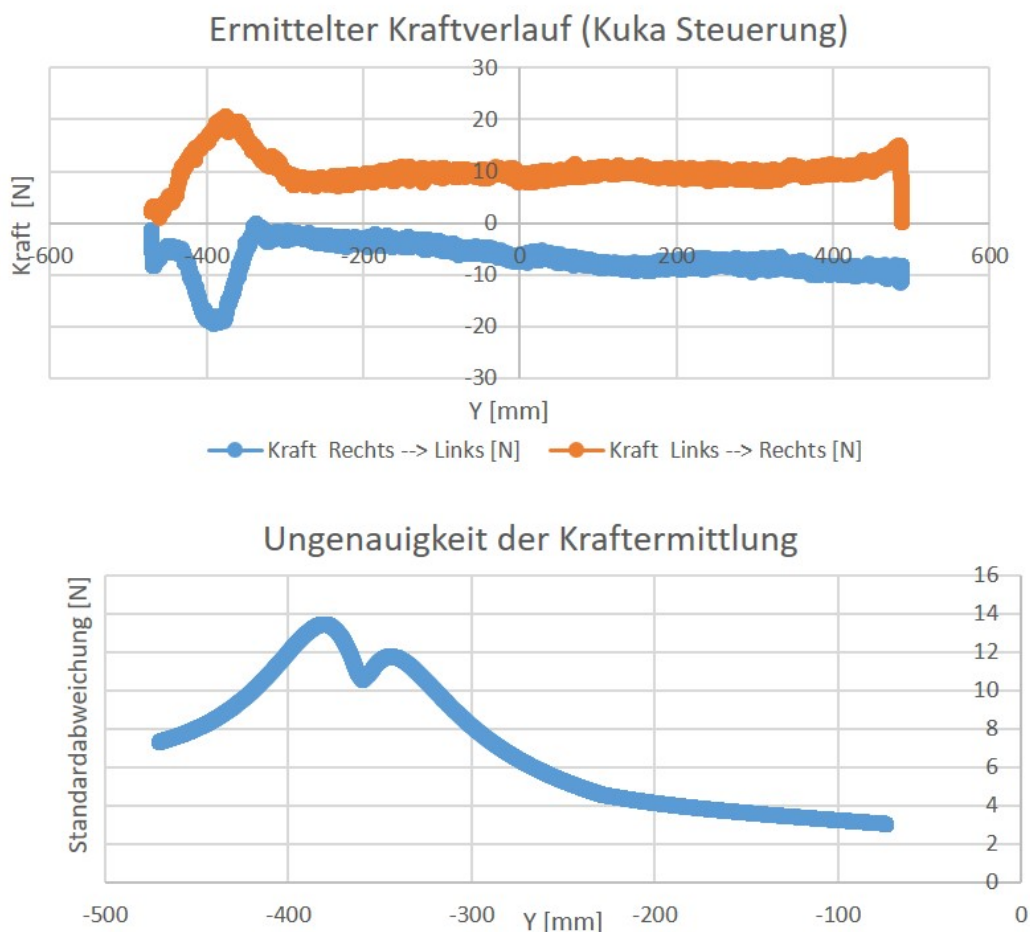


ABBILDUNG 5.27: oben: Gemessene Kraft entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS; unten: Kraftungenauigkeit

Die Genauigkeit der ermittelten Daten wird ebenfalls berücksichtigt. Zu diesem Zweck wird eine Masse mittels eines Seils über eine Umlenkrolle auf dem Werkzeug befestigt. Der Roboter bewegt sich wieder auf dem vorherigen Weg. Die Kräfte und Momente werden ermittelt und mit den bisherigen Messungen zur Roboterposition verglichen. Zur Bestimmung der äußeren Lasten wird eine Differenz gebildet. Die Differenzkurve ist bei der Drehmomentmessung konstant. Im Gegensatz dazu nimmt die Differenz der Kräfte bis in die Nähe der Singularitäten ab (siehe Abb. 5.28). Die Drehmomentmessungen sind somit stabiler.

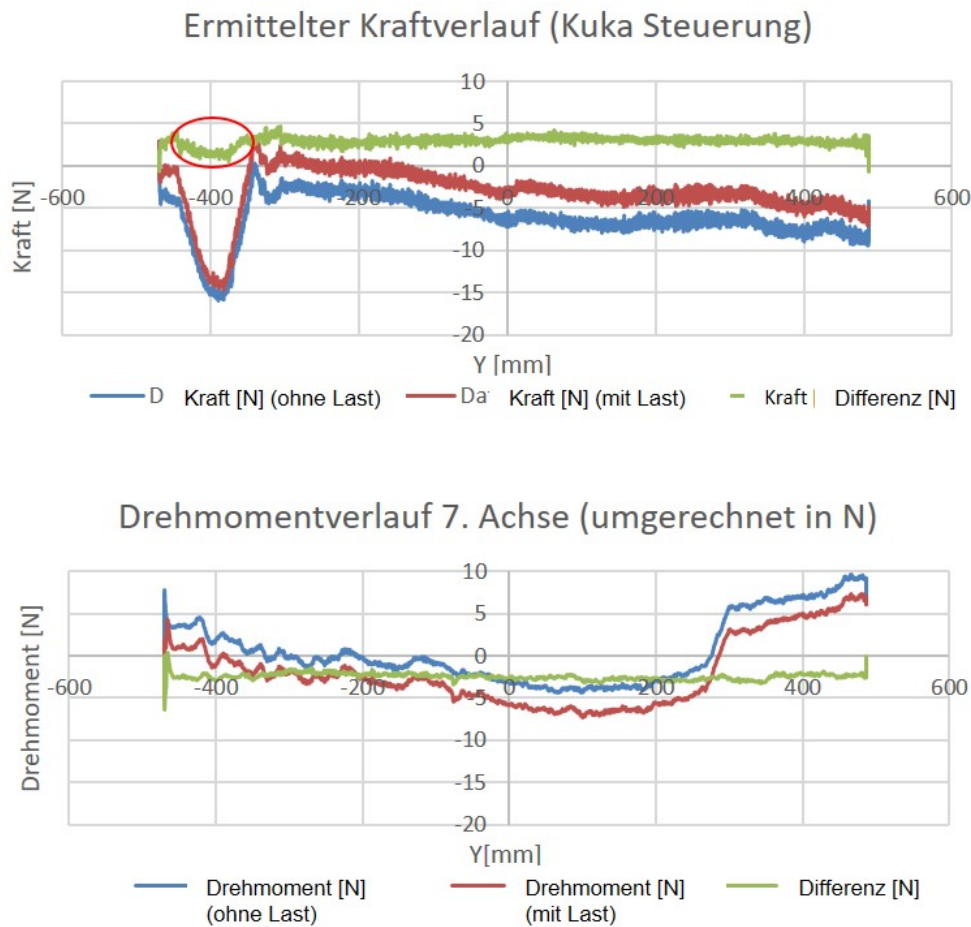


ABBILDUNG 5.28: oben: Gemessene Kraft entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS; unten: Gemessenes Drehmoment entlang der y-Achse des Roboterbasis-KS

Beim Wickeln mit der Kraft als Messgröße zeigten sich zwei weitere Probleme:

1. Der Roboter schwingt ohne Einwirkung von Prozesskräften um seine Ruhelage.
2. Bei Richtungswechseln verfällt der Roboter ebenfalls in einen instabilen Zustand.

Das erste Problem ist auf die Streuung der ermittelten Kräfte, die von der Streuung der sieben Drehmomentsensoren und der Jacobimatrix abhängig sind, zurückzuführen. Folglich beinhalten die Kraftwerte auch die Messunsicherheit von sieben Drehmomentsensoren, wohingegen die Regelung mit Hilfe des Drehmoments in der siebten Achse nur eine Messunsicherheit enthält.

Als Ursache für das zweite Problem kann der zu große Offset zwischen den ermittelten Kraftverläufen der beiden Bewegungsrichtungen ausgemacht werden (siehe Abb. 5.29).

Bewegt sich der Roboter in Abbildung 5.29 in die positive Z-Richtung des Wickelzylinder-KS, so nimmt die Kraft negative Werte an. Erfolgt nun ein Richtungswechsel in der Bewegung, so steigt die gemessene Kraft sprunghaft um bis zu 60 N an. Die Führungsgröße des Reglers wurde hingegen für die Bewegung in die positive Z-Richtung des Wickelzylinder-KS eingestellt. Folglich ergibt sich für den Regler eine sehr große Regelabweichung und der Roboter reagiert mit einer viel zu großen Korrekturbewegung. Dadurch gerät der Roboter in einen instabilen Zustand.

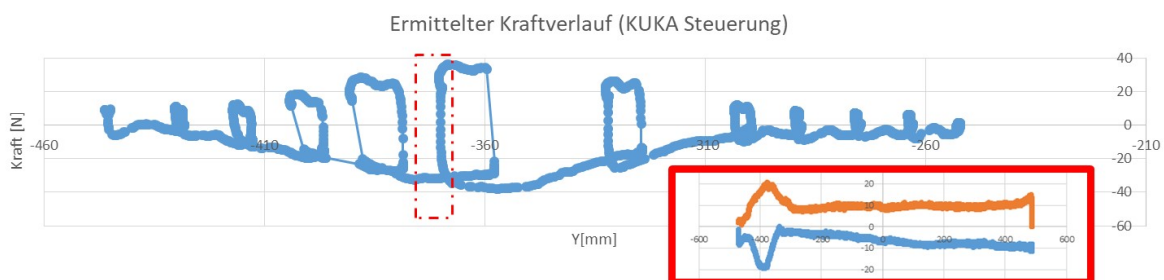


ABBILDUNG 5.29: Kraftverlauf entlang einer Wickelebene mit Richtungswechseln

Um die Messgenauigkeit im Regelkreis zu erhöhen erfolgte in der Versuchsphase eine Umstellung von der Messung der Kräfte parallel zur Z-Achse des Wickelzylinder-KS auf die gemessenen Drehmomente in der siebten Achse, die durch Tiefpassfilter bereinigt sind. Die Wickelkraft wurde schließlich durch die Multiplikation des Drehmoments mit dem Hebelarm ermittelt. Dadurch wurden die oben beschriebenen Probleme gelöst.

## 5.8 Optimierung der kinematischen Konfiguration eines 7-DoF-Roboters zur genaueren Ermittlung der externen Kräfte

### 5.8.1 Ermittlung der externen Kräfte

Wie in Kapitel 3.1.5 vorgestellt, beschreibt die Jacobimatrix  $\mathbf{J}_g$  in der Handhabungstechnik die Abbildung von Gelenkgeschwindigkeiten auf die kartesische Geschwindigkeit des TCP.

$$\underline{\dot{w}} = \mathbf{J}_g \cdot \underline{\dot{q}} \quad (5.135)$$

$$\rightarrow \underline{\dot{q}} = \mathbf{J}_g^{-1} \cdot \underline{\dot{w}} \quad (5.136)$$

Die Betrachtung des Prinzips der virtuellen Arbeit für eine kleine Verschiebung am TCP  $\delta \underline{w}$  und an den Gelenkwinkeln  $\delta \underline{q}$  liefert folgende Gleichung:

$$\underline{K}^T \cdot \delta \underline{w} = \underline{\tau}^T \cdot \delta \underline{q} \quad (5.137)$$

Dabei sind  $\underline{K}$  und  $\underline{\tau}$  jeweils ein  $6 \times 1$  Vektor der ermittelten kartesischen Kräfte/Drehmomente am TCP-KS bzgl. des Roboterbasis-KS und ein  $6 \times 1$  Vektor der Drehmomente an den Gelenken.

Das Einsetzen der Gl. 5.136 in 5.137 ergibt Folgendes:

$$\underline{K}^T \cdot \delta \underline{w} = \underline{\tau}^T \cdot \mathbf{J}_g^{-1} \cdot \delta \underline{w} \quad (5.138)$$

$$\rightarrow \underline{K}^T = \underline{\tau}^T \cdot \mathbf{J}_g^{-1} \quad (5.139)$$

$$\rightarrow \underline{\tau} = \mathbf{J}_g^T \cdot \underline{K} \quad (5.140)$$

$$\rightarrow \underline{K} = \mathbf{J}_g^{-T} \cdot \underline{\tau} \quad (5.141)$$

Wie oben erwähnt besitzt der Roboter KUKA LBR iiwa Drehmomentsensoren in jeder Drehachse. Daher werden die Drehmomente  $\underline{\tau}$  durch die Sensoren gemessen und die Kräfte/Momente  $\underline{K}$  am TCP-KS werden wie in Gl. 5.141 ermittelt. Die externen Drehmomente  $\underline{\tau}_e$  werden dann durch die Subtraktion der Gravitationsmomente von den gemessenen Momenten errechnet [133]. Die Genauigkeit der Berechnung der Gravitationsmomente hängt vom dynamischen und kinematischen Modell des Roboters und der darauf montierten Werkzeuge und Elemente ab. Die externen Kräfte/Momente  $\underline{K}_e$  am TCP-KS können wie folgt berechnet werden:

$$\rightarrow \underline{K}_e = \mathbf{J}_g^{-T} \cdot \underline{\tau}_e \quad (5.142)$$

### 5.8.2 Manipulierbarkeit der Kinematik

Roboter verlieren an den sogenannten Singularitäten effektiv einen oder mehrere Freiheitsgrade, so dass bestimmte Aufgaben an dieser Stelle möglicherweise nicht ausgeführt werden können. Außerdem können Aktionen des Roboters in der Nähe von Singularitäten schlecht konditioniert sein. Der Roboter kann gewissermaßen Bewegungen und Kräfte gleichmäßig in alle Richtungen ausführen bzw. ausüben, je weiter er von Singularitäten entfernt ist. Zur Quantifizierung dieses Effekts wurden mehrere Kennzahlen vorgeschlagen. Die Analyse und Optimierung solcher Kennzahlen zur Konstruktionszeit könnte zu einem Manipulator-Design mit einem maximal großen, gut konditionierten Arbeitsraum des Arbeitsbereichs führen [11]. Singuläre Konfigurationen sind definiert, sobald die Determinante der Jacobimatrix gleich Null ist. Es ist daher sinnvoll, die Determinante der Jacobimatrix als eine Kennzahl zu verwenden, um die Manipulierbarkeit der Kinematik zu quantifizieren. Diese Kennzahl (siehe Gleichung 5.143) wurde auch in [134] vorgeschlagen.

$$\kappa = \sqrt{\det(\mathbf{J}_g \cdot \mathbf{J}_g^T)} = |\det(\mathbf{J}_g)| \quad (5.143)$$

Bei einem guten Manipulator-Design sind große Bereiche des Arbeitsbereichs durch hohe Werte von  $\kappa$  gekennzeichnet.

In der Literatur findet man Vorschläge zu Manipulierbarkeitsmessungen, die auf Beschleunigungsanalysen oder Kraftanwendungsfähigkeiten basieren [11]. Weitere Kennzahlen



zur Quantifizierung der Manipulierbarkeit der Kinematik sind in [135] zu finden. Eine Methode basierend auf der Messung der Konditionszahl der geometrischen Jacobimatrix  $\mathbf{J}_g$  wurde in [13] vorgestellt.

$$c(\mathbf{J}_g) = \|\mathbf{J}_g\| \cdot \|\mathbf{J}_g^{-1}\| \quad (5.144)$$

Dabei ist  $\|\mathbf{J}_g\|$  die Norm der Jacobimatrix. Des Weiteren werden in der Literatur verschiedene Ansätze zur Berechnung der Matrixnorm aufgeführt. Die Konditionszahl ist somit von der Wahl der Matrixnorm abhängig. Die am meisten verwendeten Matrixnormen sind die 2-Norm und die Frobenius-Norm [136]. Die 2-Norm ist definiert als die Quadratwurzel des größten Eigenwertes der Matrix  $\mathbf{J}_g \cdot \mathbf{J}_g^T$ . Die Konditionszahl der Jacobimatrix  $\mathbf{J}_g$  ist definiert als das Ratio zwischen dem größten  $\lambda_{max}$  und dem kleinsten  $\lambda_{min}$  Eigenwert der Matrix  $\mathbf{J}_g \cdot \mathbf{J}_g^T$ . Dadurch lässt sich die Konditionszahl wie folgt berechnen:

$$c(\mathbf{J}_g) = \sqrt{\frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (5.145)$$

Hier sind die Parameter  $\sigma_{max}$  und  $\sigma_{min}$  jeweils der größte und kleinste Singulärwert der Matrix  $\mathbf{J}_g \cdot \mathbf{J}_g^T$ .

Die Frobenius-Norm der Matrix  $\mathbf{J}_g$  ist definiert als  $\sqrt{tr(\mathbf{J}_g \cdot \mathbf{J}_g^T)}$ .

In den oben beschriebenen Fällen ist der kleinstmögliche Wert der Konditionszahl gleich 1. In diesem Fall ist die Matrix isotrop und man spricht von einem isotropen Verhalten des Roboters [137]. Dadurch werden die Fehler in den Drehmomenten der Gelenke eins zu eins in den Kraftvektor am TCP-KS übertragen.

Außerdem kann die Konditionszahl als Messwert für die Genauigkeit interpretiert werden, mit dem der Mechanismus aus den Eingangsdrehmomenten der Gelenke die gezielten Ausgangskräfte und -momente am Endeffektor generiert [138][135]. Um die Genauigkeit der ermittelten Kräfte am TCP-KS zu erhöhen, ist es zweckmäßig, die Konfiguration einer Kinematik mit einer geringen Konditionszahl zu verwenden.

### 5.8.3 Optimierung der Roboterkonfiguration eines 7-DoF-Roboters

Der Kraftverlauf, der in Kapitel 5.7.2 beschrieben wurde, wird im Folgenden analysiert. Der Verlauf in Abbildung 5.27 zeigt in beide Richtungen ein Kraftpeak an einer bestimmten Roboterpose.

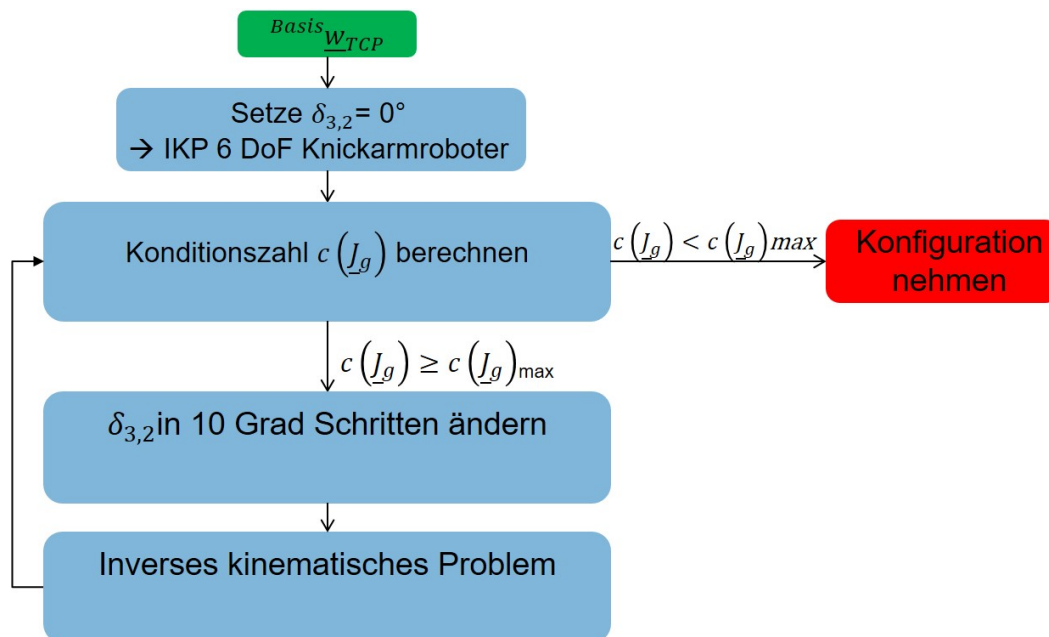


ABBILDUNG 5.30: Optimierung der Roboterkonfiguration

Für die weitere Analyse wird die Kraft der Bewegungsrichtung von links nach rechts verwendet. Die Konditionszahl der Jacobimatrix wird daher entlang der Bahn wie in Gleichung 5.145 berechnet und graphisch in Abbildung 5.31 visualisiert. Diese zeigt, dass der Konditionszahlverlauf und der Kraftverlauf ihre Peaks an derselben Position erreichen. Die Ungenauigkeit der ermittelten Kraft ist auf die schlechte Konditionierung der Roboterkinematik bzw. -konfiguration zurückzuführen.

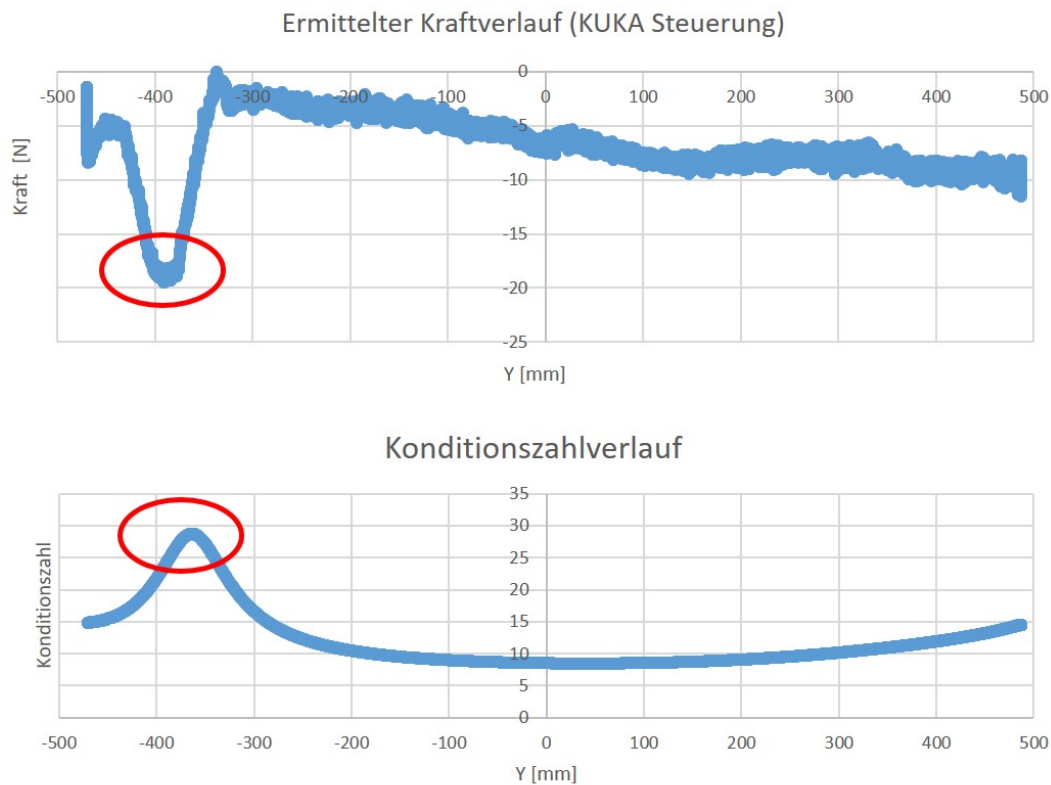


ABBILDUNG 5.31: Konditionszahlverlauf entlang einer Wickelebene

Der Roboter KUKA LBR iiwa hat sieben Gelenke und ist dadurch kinematisch unterbestimmt. Er kann somit jede Pose im Raum mit vielen verschiedenen Konfigurationen erreichen. Der KUKA LBR iiwa hat sieben Gelenke und die Konfiguration ist vom dritten Gelenkwinkel abhängig. Indem der dritte Gelenkwinkel  $\delta_{3,2}$  vorgegeben wird, werden die restlichen Gelenkwinkel basierend auf der Eingabe bestimmt.

Ein Optimierungsprozess zur Verbesserung der Genauigkeit der ermittelten Kräfte wurde entwickelt, basierend auf der Minimierung der Konditionszahl (siehe Abb. 5.30).

Die Roboterpose  $^{Basis}w_{TCP}$  wird dabei zuerst festgelegt. Der dritte Gelenkwinkel wird auf 0 gesetzt. Dadurch kann der Roboter als Knickarmroboter mit sechs Freiheitsgraden behandelt werden. Das Inverse kinematische Problem wird wie in Kapitel 3.1.4 berechnet. Die Konditionszahl wird mit der Gleichung 5.145 berechnet und mit einer vordefinierten Obergrenze der Konditionszahl  $c(\mathbf{J}_g)_{max}$  verglichen. Diese wird als Abbruchkriterium festgelegt. Wird dieses Kriterium nicht erfüllt, dann wird der Gelenkwinkel  $\delta_{3,2}$  um  $10^\circ$  variiert und eine neue Konfiguration wird basierend auf dem inversen kinematischen Modell des KUKA

LBR iiwa berechnet (siehe Kapitel 5.8.3.1). Die Konditionszahl wird erneut ermittelt und mit dem Abbruchkriterium verglichen. Der Bewegungsbereich des Gelenkwinkels  $\delta_{3,2}$  liegt bei  $\pm 170^\circ$ . Wird das Abbruchkriterium im Bewegungsbereich des Gelenkwinkels  $\delta_{3,2}$  nicht erfüllt, dann wird der Winkel mit der geringsten Konditionszahl verwendet. Ein Beispiel für den Konditionszahlverlauf bei der Änderung des Gelenkwinkels  $\delta_{3,2}$  findet sich in Abbildung 5.32.

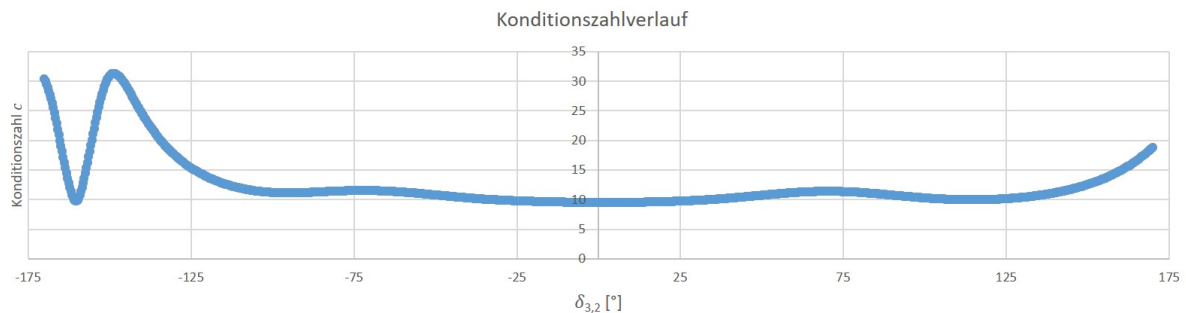


ABBILDUNG 5.32: Minimierung der Konditionszahl

### 5.8.3.1 Geschlossene Lösung der inversen Kinematik eines 7-DoF-Roboters

Mehrere Ansätze zur analytischen Lösung des inversen kinematischen Problems eines sieben DoF-Roboters sind in der Literatur zu finden [2]. Eine analytische Lösung wird in [139] präsentiert. Das Verfahren basiert auf der Erkenntnis, dass diese Art von redundantem Arm in eine Reihe von Roll- und Pitch-Gelenkwinkeln unterteilt werden kann. Es ist grundsätzlich möglich, diese beiden Arten von Gelenken in einem Kugelgelenk zu fusionieren, ohne die Kinematik zu verändern. Außerdem bleibt das siebte Drehgelenk unverändert. Ein anderes Verfahren, basierend auf einer weiteren Dekomposition des 7-DoF-Roboters, wird in [140] vorgestellt. Bei diesem Verfahren ergibt die Fusion der ersten drei und der letzten drei Gelenke jeweils ein 3-DoF-Schulter-Kugelgelenk und ein 3-DoF-Handkugelgelenk. Das vierte Drehgelenk der kinematischen Kette wird dann unverändert übernommen und als Ellbogen bezeichnet.

Diese Methoden wurden in [141] und [142] weiter untersucht. Die Methoden werden in [143] angewandt, um die natürlichen Bewegungen eines menschlichen Arms mit einem redundanten Roboterarm nachzubilden, indem ein gemessener äquivalenter Redundanzwinkel angewendet wird. Die gleiche Methode wird in [144] für einen 7-DoF-Roboter verwendet, der im Weltraum eingesetzt wird.



$$\rightarrow \text{Basis } \mathbf{T}_S = \begin{pmatrix} & \text{Basis } x_S \\ \text{Basis } \mathbf{D}_S & \text{Basis } y_S \\ & \text{Basis } z_S \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (5.149)$$

Ein Vergleich des Positionsanteils der Matrizen in den Gleichungen 5.147 und 5.149 liefert das folgende Gleichungssystem:

$$a_x(s_2, c_2) \cdot c_1 + b_x \cdot s_1 = \text{Basis } x_S \quad (5.150)$$

$$a_y \cdot c_1 + b_y(s_2, c_2) \cdot s_1 = \text{Basis } y_S \quad (5.151)$$

$$a_z \cdot c_2 + b_z \cdot s_2 = \text{Basis } z_S - d_{1,0} \quad (5.152)$$

Die Gleichung 5.152 ist analog zur Gleichung 3.23 zu lösen. Dadurch entstehen zwei Lösungen für  $\delta_{2,1}$ .

$$\delta_{2,1} = \arctan2 \left( \frac{2 \cdot t_{\delta_{2,11}}}{1 + t_{\delta_{2,11}}^2}, \frac{1 - t_{\delta_{2,11}}^2}{1 + t_{\delta_{2,11}}^2} \right); \quad \delta_{2,12} = \arctan2 \left( \frac{2 \cdot t_{\delta_{2,12}}}{1 + t_{\delta_{2,12}}^2}, \frac{1 - t_{\delta_{2,12}}^2}{1 + t_{\delta_{2,12}}^2} \right) \quad (5.153)$$

Hier sind  $t_{\delta_{2,11}}$  und  $t_{\delta_{2,12}}$  wie folgt definiert:

$$t_{\delta_{2,11}} = \frac{b_z}{a_z + (\text{Basis } z_S - d_{1,0})} + \frac{\sqrt{a_z^2 + b_z^2 - (\text{Basis } z_S - d_{1,0})^2}}{a_z + (\text{Basis } z_S - d_{1,0})}; \quad (5.154)$$

$$t_{\delta_{2,12}} = \frac{b_z}{a_z + (\text{Basis } z_S - d_{1,0})} - \frac{\sqrt{a_z^2 + b_z^2 - (\text{Basis } z_S - d_{1,0})^2}}{a_z + (\text{Basis } z_S - d_{1,0})} \quad (5.155)$$

Dadurch lassen sich  $s_2$  und  $c_2$  berechnen und werden jeweils in  $a_x(s_2, c_2)$  und  $b_y(s_2, c_2)$  (siehe Gleichungen 5.150 und 5.151) eingesetzt. Somit können  $s_1$  und  $c_1$  aus dem Gleichungssystem der Gl. 5.150 und 5.151 wie folgt berechnet werden:

$$s_1 = \frac{a_y \cdot c_x - a_x \cdot c_y}{a_y \cdot b_x - a_x \cdot b_y}; \quad c_1 = \frac{b_y \cdot c_x - b_x \cdot c_y}{b_y \cdot a_x - b_x \cdot y_y} \quad (5.156)$$

Der Drehwinkel  $\delta_{1,0}$  kann dann folgendermaßen bestimmt werden:

$$\delta_{1,0} = \arctan2(s_1, c_2) \quad (5.157)$$

Es entstehen somit für  $\delta_{1,0}$  insgesamt zwei Lösungen in Abhängigkeit vom Drehwinkel  $\delta_{2,1}$ .

Die letzten drei Drehwinkel ( $\delta_{4,5}$ ,  $\delta_{5,6}$  und  $\delta_{6,7}$ ) können wiederum, wie in Kapitel 3.1.4 erklärt, durch einen Vergleich mit einer geeigneten Euler-Winkel-Konvention (ZY'Z'') errechnet werden.

# 6 Validierung des sensitiven Robotersystems

Zur Validierung der zuvor erwähnten Konzepte und Methoden wurden im Rahmen der in Kapitel 2.1 genannten Projekte *Entwicklung eines Versuchswicklers* und *FourByThree* zwei Demonstratoren entwickelt: einer für eine sensitive Wickelapplikation in der Automobilebranche, der andere für eine Nietanwendung in der Flugzeugstrukturmontage [145] (siehe Abb. 6.3). Die Validierung betrifft die Methoden zur Kalibrierung des Laserliniensensors, die Vermessung des Werkzeugs und die Einmessung der Kinematiken bzw. Merkmale anhand der Demonstratoren. Außerdem werden die Methoden zur Entwicklung eines Wickelwerkzeugs und zur Realisierung eines sensitiven Wickelprozesses mithilfe des Demonstrators zur Umsetzung einer Wickelapplikation (siehe Abb. 5.14) validiert. Die Validierung der Optimierungsmethode der Roboterkonfiguration zur genaueren Ermittlung der externen Kräfte erfolgt durch einen einfachen Versuchsaufbau.

## 6.1 Funktionsnachweis

Es wurde ein Demonstrator entwickelt, um den Herstellungsprozess des Gummiprofils zu simulieren und den entwickelten Wickelprozess zu realisieren. Abbildung 5.22 zeigt den Versuchsaufbau, der wie folgt beschrieben werden kann: Der KUKA LBR iiwa hängt kopfüber an einem L-förmigen Stahlträger, der über dem Wickelzylinder angebracht ist. Eine genauere Beschreibung des Robotersystems des Demonstrators findet sich in Abbildung 5.14. Als Ersatz für den Herstellungsprozess wird die Gummidichtung von einem zweiten Wickelzylinder abgewickelt. Ein Tänzer zwischen den beiden Walzen dient zur Synchronisation der Drehgeschwindigkeiten der beiden Zylinder. Um die Prozessparameter zu ermitteln und das System zu validieren, werden Wickelversuche durchgeführt. Das Wicklungsbild wird von einem 2D-Laserliniensensor aufgenommen (siehe Abb. 6.7).



Im Rahmen des Demonstrators zur Entwicklung eines kollaborativen Nietprozesses werden ein Nietwerkzeug sowie ein Laserliniensensor auf einem UR10 Roboter montiert (siehe Abb. 6.3). Die Nietlöcher müssen mit dem Laserliniensensor vermessen werden. Die Methoden zur Vermessung des Laserliniensensors, der externen Merkmale und des Werkzeugs werden als zweites Validierungsszenario betrachtet.

### **6.1.1 Validierung der Methode zur kinematischen Vermessung des Werkzeugs**

Das in Kapitel 5.2.1 beschriebene Verfahren zur kinematischen Vermessung eines Werkzeugs wird anhand zweier Demonstratoren validiert.

Das im Rahmen des Demonstrators zur Entwicklung einer Nietanwendung in der Flugzeugstrukturmontage entwickelte Nietwerkzeug (siehe Abb. 6.3) wird auf dem Flansch eines UR10 Roboters vermessen. Dazu fährt ein am Roboterflansch montiertes Werkzeug eine Referenzspitze mit sechs verschiedenen Orientierungen. Die Vermessungsgenauigkeit liegt bei  $0,9\text{ mm}$ .

Das Wickelwerkzeug wird auf dem Flansch des Roboters KUKA LBR iiwa (siehe Abb. 5.15) vermessen, der mit einer Referenzspitze mit vier verschiedenen Orientierungen versehen ist. Hier liegt die Messgenauigkeit bei  $0,8\text{ mm}$ . Die kinematischen Parameter werden zeitgleich, also mit der 4-Punkte-Methode der KUKA-Steuerung, ermittelt und mit den erzielten Ergebnissen der entwickelten Methode verglichen. Dadurch sind die kinematischen Parameter bei beiden Methoden gleich.

Die entwickelte Methode bietet eine Universallösung zur Bestimmung der kinematischen Parameter abhängig vom Roboterhersteller. Eine höhere Anzahl von Messungen kann vorgenommen werden, um die Messgenauigkeit zu erhöhen und die Konvergenz des Verfahrens zu beweisen.

## 6.1.2 Validierung der Methode zur dynamischen Vermessung des Werkzeugs

Die statische und die dynamische Methode zur Vermessung des Werkzeugs werden mithilfe eines Versuchs validiert, bei dem ein Gewichtshalter konstruiert wird, der auf dem Roboterflansch montiert wird (siehe Abb. 6.1). Auf diesem können wiederum Gewichtsscheiben montiert werden. Die Referenzmessung erfolgt nach der Montage des Gewichthalters. Die Gewichtsscheiben werden somit erst nach der Referenzmessung montiert. Zuerst wird eine 10 kg Gewichtsscheibe mit einer externen Kraftmessdose gemessen, um die reale Masse zu ermitteln. Diese Gewichtsscheibe wird danach auf dem Gewichtshalter montiert. Die Masse der Gewichtsscheibe wird dann nach der statischen und der dynamischen Methode gemessen und mit dem realen Wert verglichen, um Messfehler zu detektieren.

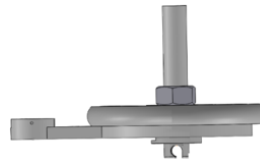


ABBILDUNG 6.1: CAD-Modell einer 10 kg Gewichtsscheibe, die auf dem Gewichtshalter montiert ist

**Statische Methode** Die oben beschriebene Messstrategie wird angewandt, um die Masse der Gewichtsscheibe zu ermitteln. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.1 dokumentiert.

Methode	statische Methode			dynamische Methode	
	x	y	z	x, y	z
Koordinate der Schwerpunktlage					
Messfehler [g]	11	5	6,1	30	22
Messfehler [mm]	0,9	0,4	0,4	2,5	1,8

TABELLE 6.1: Ergebnisse

Um Zeitaufwand bei der Messung zu sparen, wird die Masse bei der Bestimmung der y-Koordinate ermittelt. Bei der Bestimmung der x- und z-Koordinate wird auf die Identifikation der Masse verzichtet. Zur Bestimmung der x- und z-Koordinate ist daher jeweils nur eine Messung durchzuführen. Die x- und z-Koordinate werden dann jeweils durch Auflösen der Gleichungen 5.12 und 5.17 nach x und z bestimmt. Der Vermessungsfehler ändert sich dadurch nur um einige Gramm.

**Dynamische Methode** Wegen der Ungenauigkeiten der Roboterkinematik und der Drehmomentsensoren werden bei der dynamischen Messung verrauschte Sinus- und Cosinus-Signale gemessen (siehe Abb. 6.2). Das verrauschte Signal wird mit einer Best-Fit-Methode mittels Matlab (siehe Abb. 6.2) verarbeitet [146]. Danach werden die Daten, wie in Kapitel 5.2.2.2 beschrieben, ausgewertet. Die Vermessungsfehler der Masse sind in Tabelle 6.1 dokumentiert.

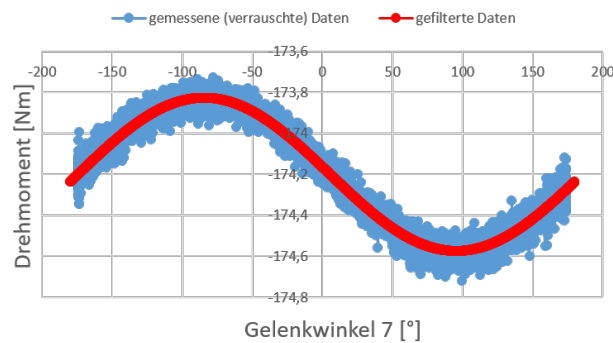


ABBILDUNG 6.2: Glättung der verrauschten Sinussignaldaten nach Drehung der siebten Achse und Messung des Drehmoments in der 2. Achse, während die 10 kg schwere Gewichtsscheibe am Gewichthalter montiert ist

Unterschiedliche Methoden wurden zur dynamischen Parameteridentifikation durch den Roboter mit integrierten Drehmomentsensoren vorgestellt. In einem ersten Schritt wurde die Messunsicherheit des Roboters untersucht, und zwar hinsichtlich systematischer und zufälliger Fehler, Reproduzierbarkeit und Empfindlichkeit. Diese Untersuchung diente als Grundlage für die Entwicklung der dynamischen und statischen Methode.

Die dynamische Methode stößt bei der Kalibrierung von Werkzeugen mit speziellen Geometrien an ihre Grenzen und kann nicht in allen Szenarien eingesetzt werden. Im Vergleich dazu ist die statische Methode einfach umzusetzen und erfordert keine kontinuierlichen Bewegungen. Mit dieser Methode können somit Werkzeuge mit Sondergeometrien vermessen werden. Sie ist daher sehr vielversprechend und kann in den verschiedenen Szenarien eingesetzt werden.

Die Referenzmessung dient der Verbesserung der Genauigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Methoden. Die Genauigkeit liegt dabei im zweistelligen Gramm-Bereich. Eine kinematische Kalibrierung des Roboters, sprich die Identifizierung der realen Robotermaße, kann die Genauigkeit des entwickelten Verfahrens noch erhöhen. Das Verfahren kann auch auf andere Roboter, z.B. den MOTOMAN HC 10, übertragen werden.

### 6.1.3 Validierung der Methode zur Vermessung des Laserliniensensors

Um die in Kapitel 5.3 genannte Methode zu validieren, wurde ein Versuchsaufbau zur Durchführung der Messung in einer Demonstratorumgebung mit industriellen Instrumenten entwickelt.

Bei diesem Versuch wird ein Laserliniensensor Gocator 2330 der Firma LMI Technologies [120] auf dem Serienroboter UR10 der Firma Universal Robots [42] montiert. Ein Würfel als Kalibrierungstarget wird präzise konstruiert. Der Sensor beginnt mit der statischen Messung der Pose des Würfels mit Hilfe des in Kapitel 5.3 beschriebenen Algorithmus. Der Roboter führt dann drei Bewegungen aus. Die Pose des Würfels wird vom Sensor nach jeder Bewegung statisch gemessen. Die Pose des Roboterflanschs  ${}^B\mathbf{T}_F$  wird aufgezeichnet, während der Würfel gemessen wird (siehe Abbildung: 6.3). Sie wird aus der Steuerung des Roboters übernommen.

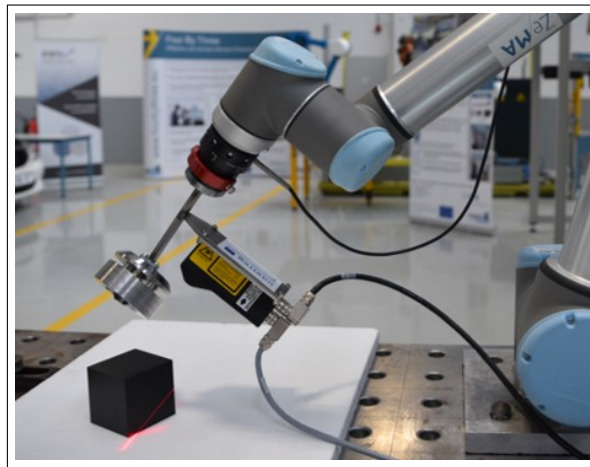


ABBILDUNG 6.3: Experimenteller Aufbau am ZeMA zur Kalibrierung des Laserliniensensors

Aus den gewonnenen Informationen wird dann die Kalibriermatrix des Sensors mithilfe einer Kleinste-Fehlerquadrate-Lösung berechnet. Der Kalibrierungsfehler der Sensorposition beträgt  $0,3 \text{ mm}$  und der Orientierungsfehler  $0,05^\circ$ . Die Genauigkeit der Kalibrierung in Bezug auf die verwendeten Elemente ist hoch. Die Posengenauigkeit des UR10 liegt im Bereich weniger Millimeter [147], wobei die Wiederholgenauigkeit mit  $0,1 \text{ mm}$  angegeben wird. Weitere Genauigkeiten können durch die Analyse jeder Systemkomponente ermittelt werden. Eine Genauigkeitsbetrachtung der kinematischen Kette eines seriellen Roboters wurde in [147] vorgestellt. Durch die Identifikation der kinematischen Parameter wurde die

Positionsgenauigkeit verbessert.

Es wurde eine Methodik zur Kalibrierung eines Laserliniensensors in Bezug auf den Flansch eines seriellen Roboters entwickelt. Die erzielten Ergebnisse sind vielversprechend und ausreichend für den Einsatz in mehreren industriellen Anwendungen. Die Rechenzeit liegt im Bereich von wenigen Hundertstelsekunden bei der Verwendung von Matlab. Eine Verbesserung der Kalibrierengenauigkeit kann durch eine Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit des Würfels erreicht werden, welcher im Mittelpunkt der vorgestellten Methode steht. Die Kalibrierung der Roboter-Kinematikkette durch die Identifizierung ihrer kinematischen Parameter verbessert die Posengenauigkeit des Roboters [148].

#### 6.1.4 Validierung der Methode zur Einmessung der Kinematik

Die Vermessung des Wickelzylinders wird nach der Kalibrierung des Sensors durchgeführt, um die Methode zur Kalibrierung von externen Kinematiken (siehe Kapitel 5.4) zu validieren. Der Zylinder wird grob positioniert. Der Roboter misst vier Kanten an einem der beiden Enden des Zylinders (siehe Abb. 5.15). Er bewegt sich in die andere Richtung, um eine Kante am anderen Ende zu erfassen und so die Länge des Zylinders zu ermitteln. Die Kanten werden nach dem Einpassen der Linie auf den projizierten Punkt des Sensors erfasst. Die Positionen der Kanten sind die Eingaben für die Funktion der Kreisanpassung. Ursprung, Radius und Normalenvektor des Kreises werden erkannt. Die Messfehler von Ursprung, Radius und Länge betragen jeweils  $1,2 \text{ mm}$  ( $\Delta$ Ursprung),  $0,9 \text{ mm}$  ( $\Delta$ Radius) und  $1,3 \text{ mm}$  ( $\Delta$ Länge). Die erreichten Genauigkeiten sind ausreichend präzise für die Prozessdurchführung.

Die erzielten Ergebnisse sind vielversprechend für den Einsatz in mehreren industriellen Anwendungsbereichen. Die Best-Fit-Methode für die Linie und den Kreis liefert hochpräzise Werte. Die Genauigkeit der Messung des Wickelzylinders hängt stark von der Kalibrierung des Sensors und der Geometrie des Zylinders ab.

### 6.1.5 Validierung des sensitiven Wickelprozesses

Nach der Vermessung des entwickelten Wickelwerkzeugs und des Laserliniensensors wird der Wickelzylinder vermessen. Die ermittelten Daten werden an die Robotersteuerung weitergeleitet. Danach wird der sensitive Wickelprozess wie in Kapitel 5.5 validiert.

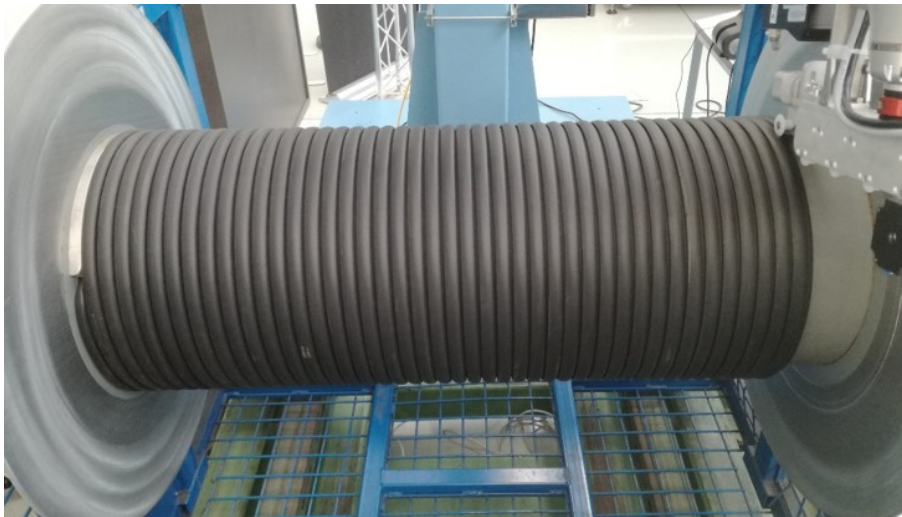


ABBILDUNG 6.4: Das resultierende Wickelbild auf der ersten Ebene

Das Wickeln der ersten Ebene mit der Drehmomentmessung als Führungsgröße zeigt ein gutes Wickelbild (siehe 6.4) und bessere Ergebnisse als das Wickeln mit der ermittelten Kraft als Führungsgröße.

Danach wird das Konzept auf die höheren Ebenen übertragen. Auf den höheren Ebenen reduziert sich die Drehgeschwindigkeit des Wickelzylinders und die Steifigkeit der Umgebung unter der zu wickelnden Lage verändert sich. Deshalb müssen die Regelparameter für jede Ebene gesondert identifiziert werden. Außerdem muss für jede Ebene eine Referenzmessung der Drehmomente durchgeführt werden. Anhand der verfügbaren Materialien kann das Wickelkonzept bis zur siebten Lage validiert werden.

Die Qualität des Wickelprozesses kann anhand des Wickelbildes beurteilt werden. Größere Lücken und Überlappungen sollten vermieden werden. Das Wickelbild wird mit Hilfe eines Laserliniensensors aufgenommen, so dass zu einem bestimmten Zeitpunkt 2D-Lasermesswerte erfasst werden.

Die Translationsgeschwindigkeit des Profils wird anhand der Wickelgeschwindigkeit und des Wickelradius bestimmt. Die Wickelgeschwindigkeit kann von der Robotersteuerung überwacht werden. Der Wickelradius wird aus dem kürzesten Abstand zwischen der Position des TCP und der Achse des gemessenen Wickelzylinders berechnet. Die bereits gewickelte Länge des Profils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen wird durch Multiplikation der Translationsgeschwindigkeit mit der Zeitdifferenz der Messungen ermittelt. So können die 2D-Messwerte auf den 3D-Raum (siehe Abb. 6.5) erweitert und das Wickelbild im 3D-Raum visualisiert und analysiert werden.

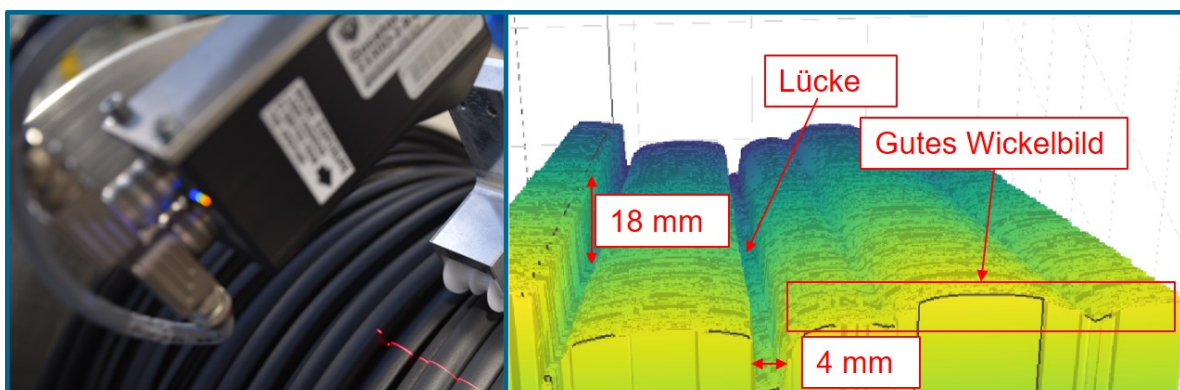


ABBILDUNG 6.5: Ausschnitt einer Wickelbildmessreihe mit dem Laserliniensensor

### 6.1.6 Validierung der Optimierungsmethode der Roboterkonfiguration zur genaueren Ermittlung der externen Kräfte

Die in Kapitel 5.8 vorgestellte Optimierung der Roboterkonfiguration wird nun anhand einer beispielhaften Applikation validiert. Dabei bewegt sich der Roboter, wie in Abbildung 6.6 zu sehen, von Punkt *A* nach Punkt *B*, während der TCP eines Demowerkzeugs dauerhaft in Kontakt mit dem Wellenblock steht und folglich dessen Oberflächenprofil nachfährt. In diesem Fall sollte die vom Roboter auf den Wellenblock beaufschlagte Kraft, die am TCP im TCP-KS gemessen wird, in z-Richtung des Wellenblock-KS ( ${}^{Wb-KS}_z$ ) 40 N betragen.

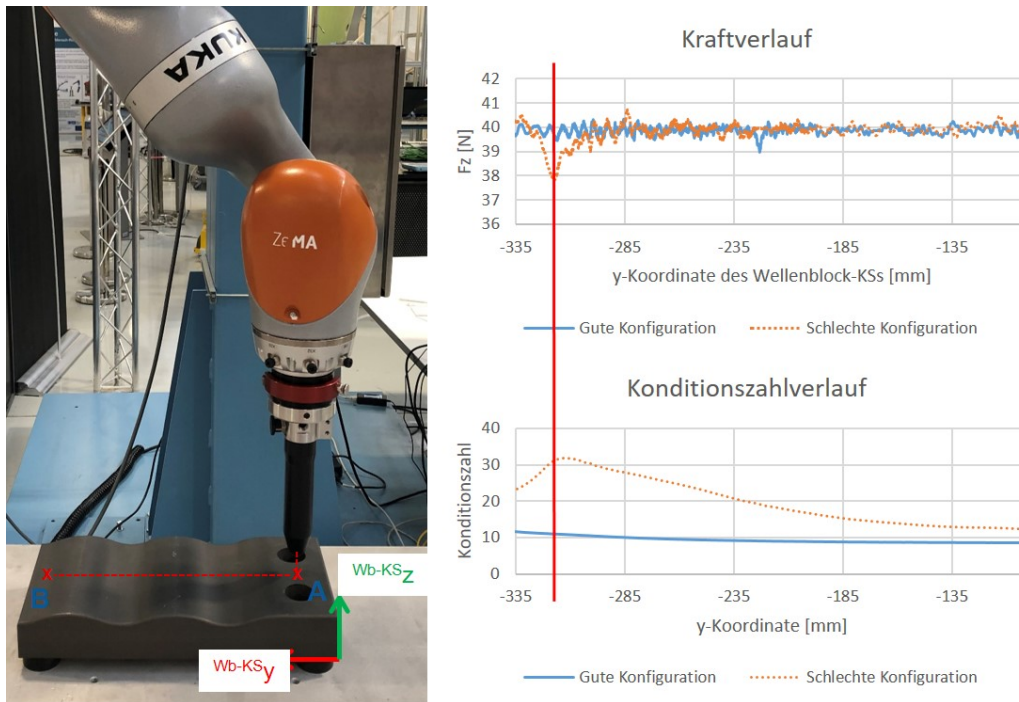


ABBILDUNG 6.6: Ausführung von kraftgesteuerten Bewegungen auf einem Wellenblock mit verschiedenen Konfigurationen

In den beiden Diagrammen sind je zwei Kurven zu sehen. Die blaue (durchgezogene) stellt jeweils die gute Konfiguration und die orangene (gestrichelte) jeweils die schlechte Konfiguration dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass es an einer Stelle bei der schlechten Konfiguration zu einem Einbruch der Kraft um 2 N kommt. Dies spiegelt sich im Verlauf der Konditionszahl wider. Basierend auf dem in Abb. 5.30 gezeigten Optimierungsprozess zur Verbesserung der Genauigkeit der ermittelten Kräfte wurde durch Adaption des Gelenkwinkels  $\delta_{3,2}$  eine Konfiguration mit minimaler Konditionierungszahl gefunden. Wie den Diagrammen zu entnehmen ist, weist die gute Konfiguration aufgrund der verbesserten Kondition keinen Krafteinbruch auf. Somit kann durch den erwähnten Optimierungsprozess eine kraftgeführte Bewegung bei einer genaueren Kraftermittlung durchgeführt werden.

## 6.2 Erprobung im Gesamtsystem

Die verschiedenen Methoden und Konzepte zur Entwicklung eines sensitiven Robotersystems wurden im ersten Schritt als Einzelmodule betrachtet. Daher wurden jede Methode und jedes Modul in Bezug auf die verlangte Funktion geprüft. Um das gesamte Konzept zu validieren, wurden die Module anhand eines entwickelten Demonstrators in ein gemeinsames System



integriert. Dieses System wurde anschließend wiederum einer Funktionsprüfung unterzogen.

Basierend auf der in Kapitel 4.2.7 entwickelten Messstrategie (siehe Abb. 4.6) wurde im ersten Schritt das entwickelte Werkzeug kinematisch und dynamisch vermessen. Dieses Vorgehen wurde in Kapitel 6.1.2 validiert. Im zweiten Schritt wurde der auf dem Werkzeug montierte Laserliniensensor bzgl. des Roboterflanschs vermessen. Die Validierung dieser Methode findet sich in Kapitel 6.1.3. Im dritten Schritt wurden die externen Kinematiken mit dem Laserliniensensor vermessen. Die Vermessung des Wickelzylinders im Rahmen des aufgebauten Demonstrators diente der Validierung der entwickelten Methodik (siehe Kapitel 6.1.4). Abschließend wurden differierende Merkmale ermittelt. Im Rahmen des entwickelten Demonstrators wurde das Wickelbild mittels Laserliniensensor und Signalverarbeitungsmethoden abgeleitet.

Die Planung zur Ausführung des Wickelprozesses wurde wie in Kapitel 4.5 beschrieben umgesetzt. Nach dem händischen Verfahren des Roboters zur Validierung des Wickelwerkzeugs im Hinblick auf die grundsätzliche Anwendbarkeit wurde die Eignung des eingesetzten Prozessroboters als Messroboter zur Durchführung der Messaufgaben in der Applikation in Kapitel 4.4 betrachtet und bestätigt. Der Roboter kann somit verwendet werden, um die Prozessparameter zu identifizieren. Das in Kapitel 5.5 entwickelte Wickelkonzept wurde in Kapitel 6.1.5 validiert. Abschließend wurde die Inspektionsaufgabe durchgeführt.

Die verschiedenen Module des Demonstrators wurden anhand des entwickelten Steuerungskonzepts (siehe Kapitel 4.2.3) miteinander vernetzt, um die Kommunikation zwischen ihnen zu ermöglichen und die Module zu steuern.

Das abgebildete Wickelbild (siehe Abb. 6.7) zeigt das Ergebnis nach der Verkettung der Messdaten des Sensors mit der Roboterpose und der Drehgeschwindigkeit des Wickelzylinders. Da aufgrund des begrenzten Messbereichs des Laserliniensensors nur ein Ausschnitt des Gummiprofils im statischen Zustand erfasst werden kann, ist es notwendig, die Messdaten entlang des Wickelzylinders zu erfassen. Dazu wurden die Daten während des Wickelprozesses

aus dem Sensor-KS in das Roboterbasis-KS transformiert. Grundvoraussetzung für die Datentransformation ist eine Vermessung des Sensors in Bezug auf das Roboterflansch-KS, wie in Kapitel 5.3 beschrieben. Das Wickelbild der unterschiedlichen Ebenen jedes Wickelzylinders wurde dokumentiert (siehe Abb. 6.7). Die Wickelfehler wurden lokalisiert und quantifiziert.

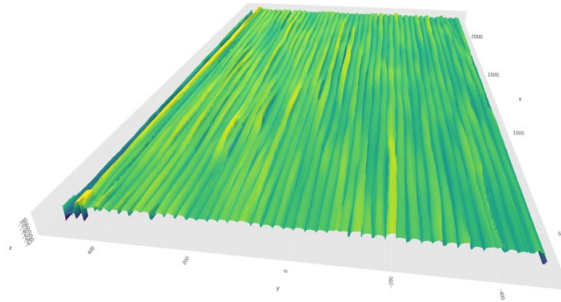


ABBILDUNG 6.7: Wickelbild der letzten Ebene, aufgenommen mit einem Laserliniensensor und verarbeitet mithilfe eines Signalverarbeitungsprogramms

Die grundsätzliche Wickelbarkeit eines komplexen Kantenschutzprofils basierend auf einer sensitiven Wickelapplikation wurde nachgewiesen durch die Kopplung der verschiedenen entwickelten Methoden und Module zu einem Gesamtsystem. Die erreichten Ergebnisse wurden in Form eines Wickelbilds visualisiert.

### 6.3 Beantwortung der Forschungsfrage

Der Bedarf an einem sensitiven Robotersystem zur Umsetzung sensitiver Wickelapplikationen wurde bereits in der Einleitung aufgezeigt. Die Bildung eines solchen Robotersystems wird aus der übergeordneten Forschungsfrage abgeleitet: **Wie müssen die Hauptbestandteile eines sensitiven Robotersystems zur Ausführung von sensitiven Montageaufgaben gestaltet sein?**

Sensitive Roboterapplikationen können in der Industrie verschiedene Aufgaben bei einer direkten Interaktion des Roboters mit der Umgebung abdecken. Dadurch können immer mehr Applikationen automatisiert werden, was den Weg zur Produktion neuer Produkte oder zur Optimierung vorhandener Produkte erleichtert.

Dass sensitive Wickelapplikationen die Wicklung einer endlosen Gummidichtung mit komplexer Geometrie realisieren können, wurde anhand des aufgebauten Demonstrators (siehe Abb. 6.8) nachgewiesen bzw. validiert. Die Grundsteine des sensitiven Robotersystems, sprich die effiziente Inbetriebnahme der externen Module, der effiziente Einsatz der integrierten Sensorik und die methodische Planung zur Prozessausführung, wurden im Rahmen dieser Arbeit ausführlich betrachtet.

**Effiziente Inbetriebnahme der externen Module** Externe Module werden oft am Roboterflansch montiert, um die Fähigkeiten des Roboters zu erweitern und dadurch die Umgebung genauer erfassen und beschreiben zu können.



ABBILDUNG 6.8: Der am ZeMA aufgebaute Wickeldemonstrator

Die Inbetriebnahme der externen Module ist eine Voraussetzung für die Implementierung der verlangten Funktionen. Die externen Module werden kinematisch und dynamisch vermessen, um das robotische System vollständig zu modellieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methode zur Identifikation der dynamischen Parameter eines Werkzeugs entwickelt und validiert. Auf der kinematischen Ebene wurden externe Sensoren und Werkzeuge bzgl. des

Roboterflanschs basierend auf überbestimmten mathematischen Gleichungssystemen und einem Best-Fit-Verfahren vermessen, um die Ungenauigkeiten der Messsysteme und der Umgebung auszugleichen.

Zudem sollen die externen Module, z.B. externe Sensoren und Kinematiken, bei der Inbetriebnahme in das Steuerungssystem integriert werden, um die Kommunikation und Synchronisation der verschiedenen Module miteinander zu ermöglichen. Dies erfolgte durch ein entwickeltes Steuerungskonzept mit einer komponentenbasierten Architektur.

**Effizienter Einsatz der Integrierten Sensorik** Die Erfassung von externen Kräften/Drehmomenten ist eine wesentliche Aufgabe bei kraftgesteuerten Applikationen. Moderne MRK-fähige Robotersysteme besitzen integrierte Kraft-/Drehmomentsensoren in Gelenken, Flansch oder Roboterbasis, um Kollisionen zu detektieren und dadurch externe Kräfte/Drehmomente zu erfassen.

Integrierte Sensoren haben gegenüber externen Sensoren für die Anwenderseite einen großen Vorteil bei der Inbetriebnahme. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Untersuchung zum effizienten Einsatz der integrierten Sensoren durchgeführt. Dadurch wurde z.B. bei integrierten Sensoren in den Gelenken festgelegt, welches Sensorgelenk für den verlangten Prozess betrachtet werden muss. Die Genauigkeit der Sensoren wurde mit Hilfe von Signalverarbeitungsalgorithmen und Referenzmessungen betrachtet und verbessert.

**Methodische Planung zur Prozessausführung** Eine Methode zur Planung und Ausführung von sensitiven Roboterapplikationen wurde vorgestellt. Nach der Inbetriebnahme der externen Module und der Untersuchung des Roboters im Hinblick auf die verlangten Funktionen wurden das Werkzeug validiert und die Prozessparameter identifiziert.

Basierend auf dem Produkt und den Prozessanforderungen wurde die Regelstruktur des Roboters für die Bewegungsausführung während des Prozesses bestimmt. Abschließend wurde ein Konzept realisiert, um den Prozess zu überwachen und die Qualität zu prüfen.

## 6.4 Reflexion der Forschungsarbeit

Vor der Zusammenfassung und dem Ausblick soll nun kurz eine kritische Reflexion der Forschungsarbeit erfolgen. Die hier dargestellten Methoden und Konzepte des sensitiven Robotersystems sind für die Durchführung sensitiver Montageaufgaben geeignet. Der entwickelte Demonstrator basiert auf industrietauglichen Komponenten und hat dadurch einen engen Praxisbezug. Die erzielten Ergebnisse und das erworbene Know-How können somit in der Industrie Anwendung finden.

Das entwickelte Konzept weist wie die meisten Forschungsarbeiten und Neuentwicklungen noch ein gewisses Verbesserungspotenzial auf. Die wesentlichen Aspekte werden nachfolgend dargestellt.

**Mensch-Roboter-Kollaboration** In der vorliegenden Arbeit wurde die konventionelle Zusammenarbeit von Mensch und Roboter zugrunde gelegt, bei der eine strikte Trennung der Arbeitsräume des Roboters und des Menschen durch einen Schutzzaun oder durch Sensorik besteht. Dadurch ist die Fähigkeit der Anlage begrenzt und das System entbehrt der Art Flexibilität, die den Menschen auszeichnet.

Eine Erweiterung des Systems zu einem MRK-fähigen System, das die hohe Flexibilität des Menschen mit der Genauigkeit und Produktivität eines Roboters kombiniert, erhöht die Produktivität, Flexibilität und die Effizienz des Robotersystems. Dadurch können komplexe Aufgaben mit höheren Anforderungen automatisiert bzw. teilautomatisiert werden.

Um das vorhandene System zu einem MRK-fähigen System zu erweitern und um alle Komponenten abzusichern und benutzerfreundlich zu gestalten, muss auch das Sicherheitskonzept erweitert werden. Abschließend ist eine Zertifizierung des Systems nach MRK-Restriktionen basierend auf einer Risikobeurteilung durchzuführen.

**Zusätzliche Applikationen** Das entwickelte System wurde im Rahmen einer sensitiven Wickelapplikation validiert. Dabei führt der Roboter eine lineare bzw. rotatorische Bewegung

entlang einer vordefinierten Achse durch. Eine Erweiterung des Systems ermöglicht es, auch andere Applikationen im industriellen Umfeld zu automatisieren, z. B. Prozesse, die eine direkte Interaktion zwischen Roboter und Umgebung verlangen wie die Bearbeitung von Freiform-Oberflächen, insbesondere in der Keramik- und Gussindustrie und beim sensitiven Fügen. Dafür müssen die eingesetzte Mess- und Regelungstechnik im Hinblick auf die neuen Anforderungen untersucht werden.

Der hier verwendete Laserliniensensor wird im Rahmen des Prozesses zur Vermessung und Inspektion eingesetzt. Zur Lösung anderer Aufgaben können andere Sensoren, z. B. 2D-Kameras oder Stereo-Kameras, besser geeignet sein, um die Vermessung oder Inspektion durchzuführen. Welche Sensoren geeignet sind, hängt von den erforderlichen Genauigkeiten, dem zu messenden Medium, der Wirtschaftlichkeit und dem Zeitaufwand zur Verarbeitung der Messaufgabe ab. Die Kompatibilität der hier entwickelten Methoden zur Vermessung von externen Sensoren und Kinematiken mit den zuvor erwähnten Sensoren muss geprüft werden. In kritischen Fällen ist eine Optimierung notwendig.

Mit Kraft-/Momentsensoren, die im Gelenk eines MRK-fähigen Roboters integriert sind, wurden im Rahmen dieser Arbeit externe Kräfte/Drehmomente ermittelt. Demgegenüber können konventionelle Roboter mit externen Kraft-/Momentsensoren zur Ermittlung der externen Kräfte/Drehmomente ausgestattet werden. Ein Vergleich der beiden Ansätze zur Kraftermittlung ermöglicht einen effizienten Einsatz der sensitiven Robotik und die Umsetzung weiterer Applikationen, die von MRK-fähigen Robotersystemen nicht realisierbar sind.

Die hier angewandte Regelungstechnik basiert auf einer einfachen Regelstruktur. Diese kann bei der Lösung komplexerer Aufgaben an ihre Grenzen stoßen. Es sind daher ggf. komplexere Regelstrukturen notwendig. Die Anforderungen an die Regelungstechnik sind aus einer genauen Betrachtung des Produkts und des Prozesses abzuleiten.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

**Zusammenfassung** Sensitive Robotersysteme können die Einsatzgebiete der Industrieroboter erweitern. Durch sie können Applikationen umgesetzt werden, die durch positionsgeregelte Robotersysteme und Bildverarbeitungssysteme nicht realisierbar sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein sensitives Robotersystem erforscht und entworfen.

Das entwickelte Robotersystem wurde anhand eines Demonstrators zur Realisierung einer sensitiven Wickelapplikation validiert. Dadurch konnte die grundsätzliche Wickelbarkeit eines komplexen Kantenschutzprofils nachgewiesen werden.

Außerdem wurde ein neuartiges Wickelwerkzeug entwickelt. Im ersten Schritt wurden die kinematischen und dynamischen Parameter des Werkzeugs mit Hilfe der entwickelten Methoden identifiziert. Die Ergebnisse der dynamischen Vermessung wurden mit denen herkömmlicher Methoden verglichen. Dabei konnte eine Verbesserung der Genauigkeit nachgewiesen werden. Im zweiten Schritt wurden externe Sensoren auf dem Roboterflansch basierend auf einer geschlossenen Lösung mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate vermessen. Im dritten Schritt wurde die externe Kinematik durch Lösen eines überbestimmten Systems vermessen. Abschließend erfolgte die Vermessung der definierten Merkmale. Die zuvor dargestellten Schritte der Messstrategie wurden in verschiedenen Szenarien validiert und können auf andere Applikationen übertragen werden.

Die Planung zur Ausführung des sensitiven Wickelprozesses wurde in Kapitel [4.5](#) vorgestellt. Dabei wurde die benötigte Mess- und Regelungstechnik betrachtet. Die Prozessparameter wurden durch experimentelle Versuche am Demonstrator identifiziert.

Es wurde ein Verfahren zur Optimierung der Roboterkonfiguration zur genaueren Ermittlung der externen Kräfte/Drehmomente entwickelt und validiert. Dieses Verfahren kann auch bei anderen Roboterapplikationen eingesetzt werden.

Das Steuerungssystem ermöglicht eine einfache Integration verschiedenster Soft- und Hardwaremodule wie Kinematik oder Sensoren zur intelligenten und intuitiven Konfiguration einzelner Dienste oder der gesamten Station. Die Unabhängigkeit der Plattform und die Unterstützung durch verschiedene Programmiersprachen machen das System mit fast allen Geräten kompatibel.

**Ausblick** Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Robotersystem ist auf seinem aktuellen Stand fähig, sensitive Wickelprozesse von endlosen Gummidichtungen mit komplexem Querschnitt auf einem rotierenden Wickelzylinder umzusetzen. Es bedarf weiterer Funktionen und Methoden, um das vorhandene Konzept auf andere Anwendungen und Branchen übertragen zu können.

Die Automatisierung der Verarbeitungsprozesse von Oberflächen, z.B. in der Keramik und Automobilindustrie, verlangt häufig einen direkten Kontakt des Roboters mit der Umgebung. Außerdem ist meistens ein vordefiniertes Profil der Prozesskräfte/-momente vorgegeben. Die genannten Prozesse sind durch sensitive Roboterapplikationen realisierbar. Verschiedene Methoden und Funktionen des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepts können auf diese Prozesse übertragen werden. Aus der Analyse des Produkts und des Prozesses können die Anforderungen an das benötigte System abgeleitet werden. Daraus ergeben sich wiederum notwendige Modifikationen und Verbesserungen am vorhandenen Konzept.

Sensitive Robotik kann zudem bei Inspektionsaufgaben eingesetzt werden. Ein möglicher Anwendungsfall ist die Schweißpunktprüfung beim Rohbau in der Automobilindustrie. Dafür muss das Messwerkzeug in einen direkten Kontakt mit dem Bauteil bei einer vordefinierten räumlichen Anordnung gebracht werden. Die Definition eines Kontaktkraft-Profiles ist notwendig, um Beschädigungen des Bauteils und des Werkzeugs zu vermeiden.

Weitere Forschungsarbeiten werden sich darauf konzentrieren, die Anwendungsgebiete der sensitiven Robotik zu erweitern und die zuvor beschriebenen Prozesse und Aufgaben umzusetzen.



# Literaturverzeichnis

- [1] R. Müller, M. Vette, T. Masiak, and A. Kanso. *Methodik zur Auslegung eines rekonfigurierbaren Robotersystems für moderne Applikationsszenarien. Vierte IFToMM D-A-CH Konferenz 2018: 15./16. Februar 2018, EPFL Lausanne*, 2018, 2018.
- [2] D. Busson, R. Bearee, and A. Olabi. *Task-oriented rigidity optimization for 7 DOF redundant manipulators. IFAC-PapersOnLine*, 50(1):14588–14593, 2017.
- [3] A. Cherubini, R. Passama, A. Crosnier, A. Lasnier, and P. Fraisse. *Collaborative manufacturing with physical human–robot interaction. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 40:1–13, 2016.
- [4] I. F. J. Ghalyan. *Force-Controlled Robotic Assembly Processes of Rigid and Flexible Objects. Springer International Publishing. ISBN:978-3-319-39184-7*, 2016.
- [5] G. Morel, E. Malis, and S. Boudet. *Impedance based combination of visual and force control. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. ISBN 0-7803-4300-X*, pages 1743–1748, May 1998.
- [6] B. Siciliano and O. Khatib. *Handbook of Robotics. Springer Berlin Heidelberg. ISBN:978-3-540-23957-4*, 2008.
- [7] DIN 1319. *DIN 1319-1:1995-01, Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe. Beuth Verlag GmbH*.
- [8] T. Böhler. *Sensitive Roboter unterstützen die Logistik.* URL: <https://www.produktion.de/technik/sensitive-roboter-unterstuetzen-die-logistik-101.html>, zuletzt geprüft 16.11.2019.
- [9] ABB Automation GmbH. *Intelligente Roboter durch Kraft-Moment-Sensorik.* <http://www.abb.com/cawp/seitp202/4c7031b29b29ff59c1257c67004b283e.aspx>, zuletzt geprüft 16.11.2019.

- 
- [10] T. Elbel. *Mikrosensorik: Eine Einführung in Technologie und physikalische Wirkungsprinzipien von Mikrosensoren*. Vieweg+Teubner Verlag. ISBN:978-3-528-03377-4, pages 1–2, 1996.
- [11] J. J. Craig. *Introduction to robotics: Mechanics and control*. Pearson/Prentice Hall. ISBN:0201543613, 2005.
- [12] M. H. Raibert and J. J. Craig. *Hybrid Position/Force Control of Manipulators*. ISSN:0022-0434. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 103(2):126–133, 1981.
- [13] J. K. Salisbury and J. J. Craig. *Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues*. ISSN: 0278-3649. *The International Journal of Robotics Research*, 1(1):4–17, 1982.
- [14] W. Khalil. *Dynamic Modeling of Robots Using Newton-Euler Formulation, Lecture Notes in Electrical Engineering*. ISBN:978-3-642-19538-9. Springer Berlin Heidelberg, 89:3–20, 2011.
- [15] W. Khalil and E. Dombre. *Modeling, identification & control of robots*. ISBN:9781903996669. Kogan Page Science London and Sterling, VA, 2004.
- [16] J. Angeles. *Fundamentals of robotic mechanical systems: Theory, methods, and algorithms*. ISBN:9783319018515. Springer, 2014.
- [17] C. C. Wit, B. Siciliano, and G. Bastin. *Theory of Robot Control*. ISBN:9781447115038. Springer London, 1996.
- [18] R. Müller. *Verbesserung des kinematischen und dynamischen Bewegungsverhaltens von Handhabungsgeräten mit geschlossenen kinematischen Teilketten: Parameteridentifikation, Bahnplanung und Bahnoptimierung, Verformungskompensation*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1996.
- [19] M. Vette-Steinkamp. *Rekonfigurierbares Robotersystem für die Montage von flächigen Flugzeugstrukturbauteilen*. ISBN:978-3-8440-6005-8. RWTH Aachen and Shaker Verlag GmbH, 2018.
- [20] DIN 8593. *Fertigungsverfahren Fügen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Berlin, 1985.

- 
- [21] VDI 2815. *Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung - Einführung, Grundlagen: Terms of production engineering and control; introduction, base register.* Verein Deutscher Ingenieure VDI Berlin, 2815, 1978.
- [22] VDI 2860. *Assembly and handling-handling functions, handling units; terminology, definitions and symbols.* VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, 1990.
- [23] Feldhusen J. and Grote K. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.* ISBN:9783642295683. Springer Vieweg Berlin and Heidelberg, 2013.
- [24] B. Lotter and H. Wiendahl. *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis ; mit 16 Tabellen.* ISBN:978-3-540-36669-0. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [25] T. Petersen. *Organisationsformen der Montage: Theoretische Grundlagen, Organisationsprinzipien und Gestaltungsansatz: Zugl.: Rostock, Univ., Diss., 2005.* ISBN:3832242082. Shaker Aachen, 2005.
- [26] G. Seliger. *Montage und Demontage.* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, pages 96–102, 2005.
- [27] Rainer M. *Montagegerecht.* In: Feldhusen, J. and Grote, K. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.* ISBN:9783642295683. Springer Vieweg, pages 702–725, 2013.
- [28] G. Spur. *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren, Edition Handbuch der Fertigungstechnik.* ISBN:978-3-446-42827-0. Hanser München, Hrsg. von Günter Spur ; 5, 2014.
- [29] DIN 8580. *DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.* Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [30] J. Hagedorn, F. Sell-Le Blanc, and J. Fleischer. *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren: Ein Beitrag zur Energieeffizienz.* ISBN:978-3-662-49209-3. 2016.

- 
- [31] SaarGummi Technologies International GmbH. <https://www.saargummi.com/>, zuletzt geprüft 21.01.2020.
- [32] W. Weber. *Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung ; mit 33 Übungsaufgaben sowie einer begleitenden Internetseite. ISBN:9783446410312. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl. München, 2009.*
- [33] M. Schopen. *Die Auswahl von Handhabungsgeräten aufgrund der charakteristischen Merkmale ihrer kinematischen Strukturen. ISBN:3181427020. Dissertation, RWTH Aachen, 1986 und VDI-Verl., 127, 1987.*
- [34] A. von Gleich. *Bionik: Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?. ISBN:3519161958. 2001.*
- [35] DIN EN ISO. *8373: Industrieroboter-Wörterbuch (ISO 8373: 1994). 1996.*
- [36] JARA. *Japan Robot Association. https://www.jara.jp/en/*, zuletzt geprüft 27.12.2019.
- [37] M. Helm. *Durchschlagende Mechanismen für Parallelroboter. ISBN:3802786718. Dissertation, Braunschweig, Techn. Univ., 2003 und Vulkan-Verl., 2003.*
- [38] KUKA AG. *Kuka roboter. https://www.kuka.com/de-de*, zuletzt geprüft 27.12.2019.
- [39] Yaskawa. *Industrial Robots. https://www.motoman.com/products/robots/industrial*, zuletzt geprüft 27.12.2019.
- [40] FANUC. *FANUC Product Brochures | FANUC America. https://www.fanucamerica.com/news-resources/fanuc-product-brochures*, zuletzt geprüft 27.12.2019.
- [41] VDI-Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren. *VDI 2861 Blatt 1: Montage-und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Achsbezeichnungen. VDI Rechtlinie Düsseldorf, 1988.*
- [42] Universal Robots. *Collaborative robotic automation | Cobots from Universal Robots. https://www.universal-robots.com/*, zuletzt geprüft 15.11.2019.
- [43] KUKA AG. *KUKA LBR iiwa. https://www.kuka.com/de-de/produkteleistungen/robotersysteme/industrieroboter/lbr-iiwa*, zuletzt geprüft 09.10.2019.

- 
- [44] R. S. Hartenberg and J. Denavit. *A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices*. *Journal of applied mechanics*, 77(2):215–221, 1955.
- [45] R. S. Hartenberg. *Die Darstellung und Handhabung der niederen Elementenpaare in einer auf Matrizenrechnung gegruendeten Zeichensprache*. *VDI-Berichte*, 12:145–155, 1956.
- [46] M. Weck. *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme: Automatisierung von Maschinen und Anlagen*. ISBN:9783662109250. Springer, 2001.
- [47] H. Kerle, B. Corves, and M. Hüsing. *Getriebetechnik: Grundlagen, Entwicklung und Anwendung ungleichmäßig übersetzender Getriebe*. ISBN:9783834809612. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2012.
- [48] B. Corves and R. Müller. *Kinematik, Dynamik und Anwendungen in der Robotik: Vorlesungsskript*. ZeMA gGmbH und IGMR RWTH Aachen, 2015.
- [49] H. Lipkin. *A Note on Denavit-Hartenberg Notation in Robotics*. ISBN:0-7918-4744-6. ASME New York, NY, pages 921–926, 2005.
- [50] K. Schröer. *Kinematische Modellierung für die Roboterkalibration*. ISBN:978-3-642-79763-7. Springer Berlin Heidelberg, pages 199–214, 1995.
- [51] W. Veitschegger and C. Wu. *Robot accuracy analysis based on kinematics*. ISSN: 0882-4967. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(3):171–179, 1986.
- [52] S. Hayati. *Robot arm geometric link parameter estimation*. pages 1477–1483, 1983.
- [53] H. Stone and A. Sanderson. *A prototype arm signature identification system*. *Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 175–182, March 1987.
- [54] A. Angerer, M. Pfurner, M. Brandstötter, and M. Hofbaur. *Modulare serielle Roboter*. ISSN: 0932-383X. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 130(2):48–53, 2013.
- [55] M. Wenz. *Automatische Konfiguration der Bewegungssteuerung von Industrierobotern*. ISBN:9783832520571. *Dissertation, Karlsruhe, Univ., 2008 und Logos-Verl. Berlin, 2008*.

- 
- [56] B. Corves. *Simulation des kinematischen und dynamischen Verhaltens von Handhabungsgeräten mit geschlossenen kinematischen Teilketten*. ISBN:3181471186. Dissertation, RWTH Aachen, 1989 und VDI-Verl., 71, 1989.
- [57] A. Tauber. *Ein Verfahren zur Lösung der allgemeinen Rücktransformation unter Berücksichtigung von Randbedingungen*. *Robotersysteme, Band 5*, 5(3):133–140, 1989.
- [58] M. Vukobratović and M. Kirčanski. *Kinematics and Trajectory Synthesis of Manipulation Robots*. ISBN:9783642821974. Springer Berlin Heidelberg, 3, 1986.
- [59] M. V. Kircanski and M. Dj. Boric. *Symbolic Singular Value Decomposition for a PUMA Robot and Its Application to a Robot Operation Near Singularities*. ISSN: 0278-3649. *The International Journal of Robotics Research*, 12(5):460–472, 1993.
- [60] T.S. Liu and S.Y. Tsay. *Singularity of robotic kinematics: A differential motion approach*. ISSN: 0094114X. *Mechanism and Machine Theory*, 25(4):439–448, 1990.
- [61] M. Pourazady and L. Ho. *Collision avoidance control of redundant manipulators*. ISSN: 0094114X. *Mechanism and Machine Theory*, 26(6):603–611, 1991.
- [62] M. J. Tsai and Y. H. Chiou. *Manipulability of manipulators*. ISSN: 0094114X. *Mechanism and Machine Theory*, 25(5):575–585, 1990.
- [63] A. Winkler. *Ein Beitrag zur kraftbasierten Mensch-Roboter-Interaktion*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2006.
- [64] C. Glocker. *Set-Valued Force Laws: Dynamics of Non-Smooth Systems*. ISBN:9783642535956. 1, 2001.
- [65] M. Hutter. *StarlETH & Co.: Design and control of legged robots with compliant actuation*. Dissertation, ETH Zurich, 2013.
- [66] W. H. Westphal. *Physikalisches Wörterbuch: Zwei Teile in Einem Band*. ISBN:9783662127070. Springer Berlin Heidelberg, 1952.
- [67] H. Liu, N. Kubota, X. Zhu, R. Dillmann, and D. Zhou. *Intelligent robotics and applications*. ISBN:9783319228730. 8th international conference, ICIRA 2015, Portsmouth, UK, August 24 - 27, 2015; proceedings. Springer, 9246, 2015.

- 
- [68] M. Hutter, R. Siegwart, and T. Stastny. *Robot Dynamics*. Institute of Robotics and Intelligent Systems, ETH Zurich. <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/robotics-n-intelligent-systems/rsl-dam/documents/RobotDynamics2016/script-dynamics.pdf>, zuletzt geprüft: 31.12.2019.
- [69] M. Vukobratović and V. Potkonjak. *Dynamics of Manipulation Robots: Theory and Application*. ISBN:9783642818561. Springer Berlin and Heidelberg, 1, 1982.
- [70] M. W. Walker and D. E. Orin. *Efficient dynamic computer simulation of robotic mechanisms*. ASME, *J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, pages 205–211, 1982.
- [71] Staedler Automation AG. Intelligente 3d-robotersimulation für konzeption/engineering. <https://www.staedler-automation.ch/intelligente-3d-robotersimulation/robotik/>, zuletzt geprüft 21.02.2020, 2/21/2020.
- [72] SM-STAHL. *Royboteranlagen für Schleifen, Polieren, Entgraten, Scotchen, Handling*. <http://www.sm-stahl.de/zusatz-seiten/roboteranlagen.html>, zuletzt geprüft 21.02.2020, 2017.
- [73] A. Albu-Schäffer. *Regelung von Robotern mit elastischen Gelenken am Beispiel der DLR-Leichtbauarme*. Dissertation, Technische Universität München, 2002.
- [74] B. R. Markiewicz. *Analysis of the Computer Torque Drive Method and Comparison with Conventional Position Servo for a Computer-Controlled Manipulator*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, United States, pages 33–601, 1973.
- [75] N. Hogan. *Impedance Control: An Approach to Manipulation*. pages 304–313, 1984.
- [76] m. T. Mason. *Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators*. ISSN: 0018-9472. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 11(6):418–432, 1981.
- [77] S. Chiaverini and L. Sciavicco. *Force/Position Control of Manipulators in Task Space with Dominance in Force*. ISSN: 14746670. *IFAC Proceedings Volumes*, 21(16):137–143, 1988.

- 
- [78] S. Chiaverini, B. Siciliano, and L. Villani. *Parallel force/position control schemes with experiments on an industrial robot manipulator*. ISSN: 14746670. *IFAC Proceedings Volumes*, 29(1):25–30, 1996.
- [79] R. Müller, M. Vette, and A. Kanso. *Comparison of practically applicable mathematical descriptions of orientation and rotation in the three-dimensional Euclidean space*. ISBN:978-3-662-56713-5. *Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter Springer Berlin Heidelberg*, pages 123–130, 2018.
- [80] R. M. Brannon. *A review of useful theorems involving proper orthogonal matrices referenced to three dimensional physical space*. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2002.
- [81] J. Funda, R. H. Taylor, and R. P. Paul. *On homogeneous transforms, quaternions, and computational efficiency*. ISSN:1042296X. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(3):382–388, 1990.
- [82] J. Diebel. *Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors*. Technical report, Stanford University, 58(15-16):1–35, 2006.
- [83] J. Z. Vidaković, M. P. Lazarević, V. M. Kvrđić, Z. Z. Dančuo, and G. Z. Ferenc. *Advanced quaternion forward kinematics algorithm including overview of different methods for robot kinematics*. ISSN: 1451-2092. *FME Transaction*, 42(3):189–199, 2014.
- [84] P. I. Corke. *Robotics, vision and control: Fundamental algorithms in MATLAB*. ISBN:9783319544137. Springer, 118, 2017.
- [85] J. B. Kuipers. *Quaternions and rotation sequences: A primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality*. ISBN:0691102988. 2002.
- [86] C. Tomasi. *Vector representation of rotations*. *Computer Science 527 Course Notes, Duke University*, 2013. <https://www.cs.duke.edu/courses/fall13/compsci527/notes/rodrigues.pdf>, zuletzt geprüft 09.10.2019.
- [87] I. Y. Bar-Itzhack. *New Method for Extracting the Quaternion from a Rotation Matrix*. ISSN:0731-5090. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 23(6):1085–1087, 2000.



- 
- [88] S. Thiemermann. *Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter*. ISBN:3-936947-50-3. Dissertation, Universität Stuttgart, 2005 und Jost-Jetter Heimsheim, 411, 2005.
- [89] W. Bauer, M. Bender, M. Braun, P. Rally, and O. S. *Leichtbauroboter in der manuellen Montage—einfach einfach anfangen, Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen*. Fraunhofer IAO Stuttgart, pages 1–63, 2016.
- [90] R. Spillner. *Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion*. ISBN: 978-3-8316-4450-6. 296, 2015.
- [91] *BECKHOFF New Automation Technology*. <https://www.beckhoff.de/EK1100/>, zuletzt geprüft 09.10.2019.
- [92] *BECKHOFF New Automation Technology*. <https://www.beckhoff.de/EL4001/>, zuletzt geprüft 09.10.2019.
- [93] *BECKHOFF New Automation Technology*. <https://www.beckhoff.de/EL2612/>, zuletzt geprüft 09.10.2019.
- [94] Y. P. Luh, S. Chiou, and J. Chang. *Design of distributed control system software using client-server architecture*. ISBN:0-7803-3104-4. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT'96)*, pages 348–350, 1996.
- [95] J. Sommer, S. Gunreben, F. Feller, M. Kohn, A. Mifdaoui, D. Sass, and J. Scharf. *Ethernet – A Survey on its Fields of Application*. ISSN:1553-877X. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 12(2):263–284, 2010.
- [96] V. Vyatkin. *Software Engineering in Industrial Automation: State-of-the-Art Review*. ISSN:1551-3203. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(3):1234–1249, 2013.
- [97] VDI-Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren. *2861 Blatt 2: Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter Einsatzspezifische Kenngrößen*, 1988.
- [98] U. Wiest. *Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern*. ISBN:3-8265-8609-3. Dissertation, Karlsruhe, Univ., 2001 und Shaker Aachen, 2001.

- 
- [99] P. Naefe. *Methodisches Konstruieren*. ISBN: 978-3-658-22635-0. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [100] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K. Grote. *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung*. ISBN:978-3-540-34060-7. Springer Berlin and Heidelberg, 2007.
- [101] F. Zwicky. *Morphologische Forschung: Wesen und Wandel materieller und geistiger struktureller Zusammenhänge*. ISBN:3855460388. Baeschlin, 4, 1989.
- [102] C. Schawel. *Top 100 Management Tools*. ISBN: 978-3-8349-6605-6. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2011.
- [103] FRANKA. *FRANKA EMIKA*. <https://www.franka.de/>, zuletzt geprüft 27.03.2020.
- [104] Yaskawa Europe GmbH. *MOTOMAN HC 10 Manual*. <https://www.yaskawa.eu.com/de/produkte/robotertechnik/motoman-roboter/seriendetail/serie/hc10/>, zuletzt geprüft 14.01.2020, 28.08.2019.
- [105] A. Blum, R. Müller, M. Scholer, and A. Kanso. *P3.6 Untersuchung eines Prozessroboters als Messroboter in der Montage*. ISBN:978-3-9819376-0-2. AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, 2019.
- [106] BIPM, IEC and IFCC, ILAC and ISO, IUPAC and IUPAP, OIML. *Evaluation of measurement data—An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents*. Joint Committee for Guides in Metrology. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM)104, 2009.
- [107] Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation. *Measurement systems analysis: Reference Manual*. ISBN:978-1-60-534211-5. Automotive Industry Action Group Southfield, Mich., 2010.
- [108] P. De Bièvre. *The 2007 International Vocabulary of Metrology (VIM), JCGM 200:2008 [ISO/IEC Guide 99]: Meeting the need for intercontinentally understood concepts and their associated intercontinentally agreed terms*. ISSN:0009-9120. *Clinical Biochemistry*, pages 246–248, 2009.

- 
- [109] Verband der deutschen Automobilindustrie e. V. *Prüfprozesseignung: Eignung von Messsystemen; Eignung von Mess- und Prüfprozessen; Erweiterte Messunsicherheit; Konformitätsbewertung. Verband der Automobilindustrie Qualitäts Management-Center Berlin, 5, 2011.*
- [110] E. Dietrich. *Vergleichen von MSA und VDA Band 5 QZ 1 (2011) 56: Wo liegen Unterschiede? QZ, Jahrgang 56(6), pages 30–34, 2011.*
- [111] M. L. George, D. Rowlands, M. Price, and J. Maxey. *Das Lean Six Sigma Toolarticle: Mehr als 100 Werkzeuge zur Verbesserung der Prozessgeschwindigkeit und -qualität. ISBN: 978-3-8006-4852-8. Verlag Franz Vahlen, 2016.*
- [112] W. Geiger and W. Kotte. *Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme, Perspektiven. ISBN: 978-3-8348-9429-8. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008.*
- [113] R. Müller, M. Vette-Steinkamp, T. Masiak, and A. Kanso. *Kalibriermethode für einen zwei-dimensionalen Laserliniensensor als Grundlage für robotergestützte Anwendungen. ISBN:978-3-945437-05-6. Fachtagung Mechatronik 2019, pages 197–202, 2019.*
- [114] W. Gröbner and P. Lesky. *Mathematische Methoden der Physik. Bibliographisches Institut Mannheim, 1, 1964.*
- [115] R. Müller, M. Scholer, A. Blum, and A. Kanso. *Identification of the Dynamic Parameters of a Robotic Tool Based on Integrated Torque Sensors. 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), pages 1–6, 2019.*
- [116] Y. C. Shiu and S. Ahmad. *Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form  $AX=XB$ . ISSN:1042296X. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 5(1):16–29, 1989.*
- [117] J. C. K. Chou and M. Kamel. *Finding the Position and Orientation of a Sensor on a Robot Manipulator Using Quaternions. ISSN:0278-3649. The International Journal of Robotics Research, 10(3):240–254, 1991.*

- 
- [118] F. C. Park and B. J. Martin. *Robot sensor calibration: solving  $AX=XB$  on the Euclidean group*. ISSN:1042296X. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10(5):717–721, 1994.
- [119] M. Shah, R. D. Eastman, and T. Hong. *An overview of robot-sensor calibration methods for evaluation of perception systems*. ISBN:9781450311267. ACM New York, NY, pages 15–20, 2012.
- [120] LMI Technologies. *The Global Leader in 3D Scanning and Inspection | LMI Technologies*. <https://lmi3d.com/>, , zuletzt geprüft 15.11.2019, 14.11.2019.
- [121] R. Müller, Vette-Steinkamp, and A. Kanso. *Position and orientation calibration of a 2D laser line sensor using closed-form least-squares solution*. ISSN:2405-8963. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13):689–694, 2019.
- [122] G. Gallego and A. Yezzi. *A Compact Formula for the Derivative of a 3-D Rotation in Exponential Coordinates*. ISSN:0924-9907. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 51(3):378–384, 2015.
- [123] M. Marcus. *Basic theorems in matrix theory*. National Bureau of Standards, *Applied Mathematics Series*, 57, 1960.
- [124] D. Eberly. *Constructing Rotation Matrices Using Power Series*. Geometric Tools LLC, 2007.
- [125] D. Condurache and A. Burlacu. *Orthogonal dual tensor method for solving the  $A X = X B$  sensor calibration problem*. ISSN:0094114X. *Mechanism and Machine Theory*, 104:382–404, 2016.
- [126] S. Spital, D. L. Lansing, and H. E. Fettis. *Problem 65-2*. *SIAM Review*, 8(3):386–388, 1966.
- [127] J. L. Farrell, J. C. Stuelpnagel, R. H. Wessner, J. R. Velman, and J. E. Brook. *A Least Squares Estimate of Satellite Attitude (Grace Wahba)*. *SIAM Review*, 8(3):384–386, 1966.

- 
- [128] R. Müller, M. Vette-Steinkamp, M. Tobias, and A. Kanso. *Best-fit method for the calibration of 3D objects using a laser line sensor mounted on the flange of an articulated robot*. ISBN:978-3-662-59317-2. *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter Springer Berlin Heidelberg*, pages 207–216, 2019.
- [129] S. Zacher and M. Reuter. *Regelungstechnik für Ingenieure: Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen*. ISBN:9783658176310. Springer Vieweg Wiesbaden, 2017.
- [130] Samsom AG. *Regler und Regelstrecken*. <https://www.samsongroup.com/document/l102de.pdf>, zuletzt geprüft 29.11.2019.
- [131] M. Schleicher. *Regelungstechnik für den Praktiker*. ISBN:978-3-935742-00-9. JUMO GmbH, 2014.
- [132] E. K. Subin, S. Renuka, and C. Krishna. *Java implementation of low pass Butterworth filter for biomedical applications*. ISSN:0975-9646. 7(5):2287–2289, 2016.
- [133] A. Winkler and J. Suchý. *Force-guided motions of a 6-d.o.f. industrial robot with a joint space approach*. ISSN: 0169-1864. *Advanced Robotics*, 20(9):1067–1084, 2006.
- [134] T. Yoshikawa. *Manipulability of Robotic Mechanisms*. ISSN:0278-3649. *The International Journal of Robotics Research*, 4(2):3–9, 1985.
- [135] A. Sanagoo. *Eine neuartige Roboterkinematik für die laparoskopische Single-Port Chirurgie*. ISBN:9783839608630. *Dissertation, Stuttgart, Univ., 2015 (Nicht für den Austausch) und Fraunhofer-Verl. Stuttgart*, 43, 2015.
- [136] J. P. Merlet. *Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots*. ISSN:0007-8506. *Journal of Mechanical Design*, 128(1):199–206, 2006.
- [137] F. Ranjbaran, J. Angeles, and A. Kecskemethy. *On the kinematic conditioning of robotic manipulators*. ISBN:0-7803-2988-0. *Proceedings 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3167–3172, April 1996.
- [138] Frank C. Park and R. W. Brockett. *Kinematic Dexterity of Robotic Mechanisms*. ISSN:0278-3649. *The International Journal of Robotics Research*, 13(1):1–15, 1994.

- 
- [139] P. Dahm and F. Joublin. *Closed form solution for the inverse kinematics of a redundant robot arm*. ISSN:0943-2752. Ruhr-Univ., Inst. für Neuroinformatik, 1997.
- [140] D. Tolani, A. Goswami, and N. I. Badler. *Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs*. ISSN:1524-0703. *Graphical models*, 62(5):353–388, 2000.
- [141] H. Moradi and S. Lee. *Joint Limit Analysis and Elbow Movement Minimization for Redundant Manipulators Using Closed Form Method*. ISBN:978-3-540-28227-3. *International Conference on Intelligent Computing Springer Berlin, Heidelberg*, 3645:423–432, 2005.
- [142] M. Shimizu, H. Kakuya, W.-K. Yoon, K. Kitagaki, and K. Kosuge. *Analytical Inverse Kinematic Computation for 7-DOF Redundant Manipulators With Joint Limits and Its Application to Redundancy Resolution*. ISSN:1552-3098. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(5):1131–1142, 2008.
- [143] Y. Wang and P. Artemiadis. *Closed-Form Inverse Kinematic Solution for Anthropomorphic Motion in Redundant Robot Arms*. *Advances in Robotics & Automation*, 02(03), 2013.
- [144] D. Zhou, L. Ji, Q. Zhang, and X. Wei. *Practical analytical inverse kinematic approach for 7-DOF space manipulators with joint and attitude limits*. ISSN:1861-2776. *Intelligent Service Robotics*, 8(4):215–224, 2015.
- [145] T. Masiak. *Entwicklung eines Mensch-Roboter-kollaborationsfähigen Nietprozesses unter Verwendung von KI Algorithmen und Blockchain-Technologien: Unter Randbedingungen der Flugzeugstrukturmontage*. ZeMA gGmbH - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik und Universität des Saarlandes, 2021.
- [146] R. D. S. Brum, J. V. d. A. Ramalho, L. A. O. Rocha, L. A. Isoldi, and E. D. Dos Santos. *A Matlab code to fit periodic data*. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, 7(2), 2015.

- 
- [147] R. Müller, M. Vette-Steinkamp, and A. Kanso. *A concept for construction of an adaptive reconfigurable robot manipulator to fit modern application scenarios*. ISBN:978-3-8440-5502-3. *Robotix-Academy Conference for Industrial Robotics (RACIR) 2017* Shaker Verlag Aachen, pages 46–64, 2017.
- [148] R. Müller, M. Vette, A. Geenen, T. Masiak, and A. Kanso. *Methodology for design of mechatronic robotic manipulators based on suitability for modern application scenarios*. ISSN:24058963. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):12727–12733, 2017.

# Anhang

## A Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

R. Müller, M. Vette-Steinkamp and A. Kanso: Development of a Sensitive Winding Application Based on a Serial Robot and Integrated Torque Sensors. 9th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar, IPAS 2020, Virtual Event, December 14–15, 2020. Springer International Publishing, 2021. A. Blum, R. Müller, M. Scholer, and A. Kanso (Hg.): P3.6 Untersuchung eines Prozessroboters als Messroboter in der Montage. ISBN:978-3-9819376-0-2. AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, 2019.

A. Kanso, A. Blum, M. Scholer and R. Müller: Identification of the Dynamic Parameters of a Robotic Tool Based on Integrated Torque Sensors. In: 23rd International Conference on Mechatronics Technology. 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), pages 1–6, 2019.

R. Müller, M. Vette-Steinkamp, A. Kanso and T. Masiak: Collaboration in a Hybrid Team of Human and Robot for Improving Working Conditions in an Aircraft Riveting Process. SAE Technical Paper Series. AeroTech Americas, MAR. 26, 2019.

R. Müller, M. Vette-Steinkamp, T. Masiak and A. Kanso: Best-fit method for the calibration of 3D objects using a laser line sensor mounted on the flange of an articulated robot. ISBN:978-3-662-59317-2. Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter Springer Berlin Heidelberg, pages 207–216, 2019.

R. Müller, M. Vette-Steinkamp, T. Masiak and A. Kanso: Measurement method of a two-dimensional laser line sensor as a basis for robot-assisted applications. ISBN:978-3-945437-05-6. Fachtagung Mechatronik 2019, pages 197–202, 2019.



---

R. Müller, M. Vette-Steinkamp and A. Kanso: Position and orientation calibration of a 2D laser line sensor using closed-form least-squares solution. ISSN:2405-8963. IFACPaper-sOnLine, 52(13):689–694, 2019.

R. Müller, M. Vette-Steinkamp, L. Hörauf, A. Kanso and J. Koch: The Assist-By-X system: Calibration and application of a modular production equipment for visual assistance. 7th CIRP Global Web Conference, Towards shifted production value stream patterns inference of data, models and technology, 2018.

R. Müller, M. Vette-Steinkamp, A. Geenen, A. Kanso and T. Masiak: Development of a Human-Robot-Collaboration System using the Example of a Riveting Process in Aircraft Assembly. Journal of Robotics and Automation, S. 69–77, 2018.

R. Müller, M. Vette-Steinkamp and A. Kanso: Comparison of practically applicable mathematical descriptions of orientation and rotation in the three-dimensional Euclidean space. ISBN:978-3-662-56713-5. Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung IndustrieroboterSpringer Berlin Heidelberg, pages 123–130, 2018.

R. Müller, M. Vette-Steinkamp, T. Masiak and A. Kanso: Methodik zur Auslegung eines rekonfigurierbaren Robotersystems für moderne Applikationsszenarien. Vierte IFToMM D-A-CH Konferenz 2018: 15./16. Februar 2018, EPFL Lausanne, 2018, 2018.

R. Müller, M. Vette-Steinkamp, A. Kanso and A. Braun: Suitability test of the sensitive robot in a winding application for endless rubber profiles. Robotix-Academy Conference for Industrial Robotics (RACIR) 2018. 1. Auflage. Herzogenrath: Shaker (Berichte aus der Robotik), S. 28–34, 2018.

R. Müller, M. Vette-Steinkamp, A. Geenen, T. Masiak and A. Kanso: Methodology for design of mechatronic robotic manipulators based on suitability for modern application scenarios. ISSN:24058963. IFAC-PapersOnLine, 50(1):12727–12733, 2017.

R. Müller, M. Vette-Steinkamp and A. Kanso: A concept for construction of an adaptive reconfigurable robot manipulator to fit modern application scenarios. Robotix-Academy Conference for Industrial Robotics (RACIR) 2017. Aachen: Shaker Verlag (Berichte aus der Robotik), S. 46–64, 2017.

## **B Betreute wissenschaftliche Abschlussarbeiten**

Aaron Braun: Entwicklung eines Wickelwerkzeugs zur Realisierung eines sensitiven Wickelprozesses. Universität des Saarlandes, ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, Eschberger Weg 46, Gewerbepark, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland, 2020.

Marco Schneider: Optimierung der Konfiguration eines Knickarmroboters zur Realisierung von Kraftgesteuerten Applikationen. Universität des Saarlandes, ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, Eschberger Weg 46, Gewerbepark, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland, 2020.

Stefan Marx: Intelligente Bahnplanung in der Robotik basierend auf Sensorik und künstlicher Intelligenz. Universität des Saarlandes, ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, Eschberger Weg 46, Gewerbepark, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland, 2021.