

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik am  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Selbst-Kalibrierung  
roboterbasierter Koordinatenmesssysteme**

**Gregor Friedrich Richard Lux-Gruenberg**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen  
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart  
2. Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz

Die Dissertation wurde am 09.12.2019 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 29.06.2020 angenom-  
men.



# Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt den Institutsleitern, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, für die Unterstützung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen. Zudem bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die Betreuung meiner Arbeit sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Weiterhin gilt mein Dank Frau Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz, der Leiterin des Instituts für Montagetechnik der Leibniz Universität Hannover, für die Übernahme des Korreferates.

Ein wesentlicher Faktor bei der Erarbeitung meines Forschungsthemas waren die zahlreichen Diskussionen und Gespräche mit den Kolleginnen und Kollegen am *iwb*. Besonderer Dank gilt hierbei der Themengruppe Montagetechnik und Robotik für die Zusammenarbeit und den konstruktiven fachlichen und persönlichen Austausch. Besonders bedanken möchte ich mich insbesondere bei Marco Ulrich, Veit Hammerstingl, Cosima Stocker, Daria Leiber, Maximilian Busch und Lisa Heuss.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Studierenden bedanken, die mich in der Umsetzung engagiert und zuverlässig unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich dabei Martin Hutterer, Thomas Baker und Samuel Kraller.

Mein bisheriger Weg und insbesondere diese Arbeit wäre nicht ohne die Unterstützung meiner Familie und Freunde möglich gewesen. Hierfür gilt mein ganz besonderer Dank. – Gemeinsam sind wir stark.

Liebe Annabella, liebe Katharina, danke für euer Verständnis, eure Geduld und die beständige Unterstützung. – Euch ist diese Arbeit gewidmet.

Bühl, Juli 2020

*Gregor Lux-Gruenberg*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
------------------------------	------------

<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>IX</b>
--------------------------------------	-----------

Lateinische Formelzeichen . . . . .	IX
Griechische Formelzeichen . . . . .	XXIII
Mathematische Symbole . . . . .	XXVII

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
---------------------	----------

1.1 Produktionsnahe Koordinatenmesstechnik . . . . .	1
1.2 Potential und Defizit roboterbasierter Koordinatenmesssysteme	3
1.3 Kalibrierung zur Steigerung der Genauigkeit . . . . .	5
1.4 Wissenschaftssystematische Einordnung und Aufbau der Arbeit	7

<b>2 Stand der Erkenntnisse im Bereich der Kalibrierung</b>	<b>9</b>
---	----------

2.1 Einflüsse auf die Pose-Genauigkeit von seriellen kinematischen Ketten . . . . .	11
2.1.1 Mechanische Einflüsse . . . . .	11
2.1.2 Steuerungstechnische Einflüsse . . . . .	15
2.2 Parametrische Modellierung . . . . .	16
2.2.1 Kinematische Modellierung . . . . .	16
2.2.2 Modellierung nicht-geometrischer Einflussgrößen . . . .	22
2.3 Kalibrierdatenaufnahme . . . . .	23
2.3.1 Messverfahren . . . . .	25
2.3.2 Auswahlverfahren für Kalibrierkonfigurationen . . . . .	29
2.3.3 Simulationsgestützte Bahnplanung bei Industrierobotern	33
2.4 Identifikation von Kalibrierparametern . . . . .	38
2.4.1 Zielfunktional und Identifikationsverfahren . . . . .	38
2.4.2 Skalierung . . . . .	40

---

<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>43</b>
3.1	Handlungsbedarf . . . . .	43
3.2	Eingrenzung . . . . .	45
3.3	Zielsetzung . . . . .	46
3.4	Hypothesen und Vorgehensweise . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Analyse und Modellierung</b>	<b>51</b>
4.1	Analyse von Einflussgrößen auf die Pose-Genauigkeit . . . . .	52
4.1.1	Analyse des mechanischen Aufbaus . . . . .	52
4.1.2	Analyse nicht-geometrischer Effekte . . . . .	57
4.1.3	Zwischenfazit aus der Analyse . . . . .	66
4.2	Anforderungen an die Modellierung . . . . .	66
4.3	Mathematisch-physikalisches Modell des Roboters . . . . .	67
4.3.1	Modellierung der Antriebselemente . . . . .	68
4.3.2	Kinematische Modellierung . . . . .	70
4.3.3	Modellierung nicht-geometrischer Effekte . . . . .	72
4.3.4	Integration in ein Gesamtmodell . . . . .	81
4.4	Gültigkeitsbetrachtung des Robotermodells . . . . .	84
4.4.1	Methode zur Gültigkeitsbetrachtung . . . . .	84
4.4.2	Genauigkeit . . . . .	85
4.4.3	Räumlicher Gültigkeitsbereich . . . . .	89
4.4.4	Zeitliche Gültigkeit . . . . .	90
4.4.5	Verallgemeinerbarkeit auf unterschiedliche Roboter . .	92
4.4.6	Fazit und Überprüfung der Hypothese . . . . .	93
<b>5</b>	<b>Datenaufnahme und Parameteridentifikation</b>	<b>95</b>
5.1	Kalibrierung mittels robotergeführtem 3D-Sensor . . . . .	96
5.1.1	Integration des 3D-Sensors in das Modell . . . . .	98
5.1.2	Formulierung der Zielfunktion . . . . .	99
5.2	Automatisierte Kalibrierdatenerfassung . . . . .	103
5.2.1	Generierung von möglichen Kalibrierkonfigurationen .	104
5.2.2	Auswahl von Kalibrierkonfigurationen . . . . .	106
5.2.3	Erzeugung eines kollisionsfreien Programmablaufs . . .	110
5.2.4	Erfassung und Speicherung der Kalibrierdaten . . . . .	116
5.3	Parameteridentifikation . . . . .	116
5.3.1	Initiale Parameterschätzung . . . . .	117

---

5.3.2	Gewichtung der Residuen und Parameterskalierung . . .	118
5.3.3	Numerische Optimierung . . . . .	121
5.4	Gültigkeitsbetrachtung der Datenerfassung und Parameteriden- tifikation . . . . .	122
5.4.1	Automatisierte Kalibrierdatenerfassung . . . . .	122
5.4.2	Parameteridentifikation . . . . .	127
5.4.3	Fazit und Überprüfung der Hypothese . . . . .	130
<b>6</b>	<b>Kompensation und Messstrategie</b>	<b>131</b>
6.1	Kompensation betriebsbedingter Einflüsse . . . . .	132
6.1.1	Analyse des betriebsbedingten Systemverhaltens . . . .	132
6.1.2	Selbst-Kompensation . . . . .	137
6.2	Integration in eine Messstrategie . . . . .	138
6.2.1	Bestimmung der aktuellen Modellabweichung . . . . .	139
6.2.2	Selbst-Kalibrierung und Selbst-Kompensation . . . . .	140
6.2.3	Messprozess . . . . .	141
6.3	Gültigkeitsbetrachtung der Kompensation . . . . .	143
6.3.1	Abhängigkeit zur Anzahl an Roboterkonfigurationen .	143
6.3.2	Kompensation während des Aufwämbetriebs . . . . .	144
6.3.3	Fazit und Überprüfung der Hypothese . . . . .	145
<b>7</b>	<b>Validierung und Evaluation</b>	<b>147</b>
7.1	Prototypische Implementierung . . . . .	147
7.1.1	Hardwaretechnische Realisierung . . . . .	147
7.1.2	Softwaretechnische Realisierung . . . . .	149
7.2	Validierung der Selbst-Kalibrierung am Prüfobjekt . . . . .	151
7.2.1	Validierung am Referenzobjekt . . . . .	151
7.2.2	Prüfobjekt Autotür . . . . .	154
7.2.3	Überprüfung der Zielerreichung . . . . .	157
7.3	Wirtschaftliche Bewertung . . . . .	158
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>165</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	165
8.2	Ausblick . . . . .	167
	<b>Literatur</b>	<b>169</b>

---

<b>Anhang</b>	<b>193</b>
A.1 Grundlagen der Koordinatenmesstechnik . . . . .	194
A.1.1 Klassifizierung von Messsystemen . . . . .	195
A.1.2 Optische Sensoren in der Koordinatenmesstechnik . . .	197
A.1.3 Registrierung von Punktwolken . . . . .	203
A.2 Grundlagen von Industrierobotern . . . . .	205
A.2.1 Bauformen . . . . .	205
A.2.2 Roboterkonfiguration und freier Konfigurationsraum .	208
A.2.3 Roboterkoordinatensysteme und deren Transformation	211
A.2.4 Genauigkeitskenngrößen . . . . .	218
A.2.5 Bewegungsarten und Programmierung . . . . .	220
A.2.6 Beschreibung der achssynchronen PTP-Bewegung . . .	223
A.3 Mathematischer Anhang . . . . .	225
A.3.1 Erweiterte inverse Winkelfunktion Arkustangens . . . .	225
A.3.2 Signumfunktion . . . . .	225
A.3.3 Parallelogrammgleichung für Vektorräume . . . . .	225
A.3.4 Dreiecksungleichung für Summen . . . . .	226
A.4 Verwendete Komponenten und Software . . . . .	227
A.4.1 Roboter . . . . .	227
A.4.2 Messtechnik . . . . .	229
A.4.3 Software . . . . .	231
A.5 Ergänzungen zur Analyse von Einflussgrößen auf die Pose-Genauigkeit . . . . .	233
A.5.1 Messung der Getriebecharakteristika an isolierten Getrie- ben . . . . .	233
A.5.2 Identifikation verschleißbedingter Einflüsse . . . . .	236
A.6 Ergänzungen zur Modellierung . . . . .	238
A.6.1 Übertragungsmatrix für einen Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen . . . . .	238
A.6.2 Beschreibung eines Biegebalkens nach Bernoulli . . . .	240
A.6.3 Gültigkeitsbetrachtung des Robotermodells bezüglich des Kalibriervolumens . . . . .	242
A.7 Ergänzungen zur Messstrategie . . . . .	244
A.7.1 Einmessmethode für das Prüfobjekt . . . . .	244

---

A.8	Ergänzungen zur softwaretechnischen Realisierung . . . . .	246
A.8.1	Benutzerschnittstelle . . . . .	246
A.8.2	Geometrische Simulation und Kollisionsdetektion . . .	247
A.8.3	Generierung von Konfigurationen und Bahnen . . . . .	249
A.8.4	Auswahl von Kalibrierkonfigurationen . . . . .	249
A.8.5	Parametrisiertes Modell . . . . .	250
A.8.6	Parameteridentifikation . . . . .	251
A.8.7	Schnittstellen zu Hardwarekomponenten . . . . .	251
A.9	Ergänzungen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung . . . . .	253



# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2D	zweidimensional(es)
3D	dreidimensional(es)
API	engl.: Application Programming Interface; Programmierschnittstelle
CAD	engl.: Computer-Aided Design, rechnergestütztes Konstruieren
COM	engl.: Component Object Model; Technik zur Interprozesskommunikation unter Microsoft Windows
DH-Konvention	Denavit-Hartenberg-Konvention
DH-Transformation	Denavit-Hartenberg-Transformation
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLL	engl.: Dynamic Link Library; dynamische Programm-bibliothek
FEM	Finite-Elemente-Methode
GAS	Gewichtsausgleichssystem
GNR-Konvention	Gier-Nick-Roll-Winkelkonvention
HM-Konvention	Hayati-Mirmirani-Konvention
HM-Transformation	Hayati-Mirmirani-Transformation
iGPS	engl.: indoor Global Positioning System
KMG	Koordinatenmessgerät
KMT	Koordinatenmesstechnik
Laser	engl.: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation; Licht-Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung
LT	Lasertracker

---

Abkürzung	Bedeutung
OMPL	engl.: Open Motion Planning Library; Softwarebibliothek für die Bahnplanung bei Robotern (SUCAN et al. 2012)
POE	engl.: product of exponentials; Mathematische Beschreibung von kinematischen Ketten mittels dem Produkt von Exponentialfunktionen
PRM	engl.: Probabilistic Roadmap Method; probabilistische Landkartenmethode
PTP	engl.: Point-to-Point; schnellste Bewegungsart bei einem Industrieroboter
ROS	engl.: Robot Operating System; Software-Framework für Roboter, koordiniert von Open Source Robotics Foundation
RSI	engl.: Robot Sensor Interface; Roboter-Sensor-Schnittstelle der <i>KUKA Roboter GmbH</i>
SCARA	engl. Selectively Compliant Arm for Robotic Assembly; Horizontal-Knickarmroboter
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STL-Format	Stereolithographie-Format
TCP	engl.: Tool Center Point; Werkzeugmittelpunkt; Charakteristischer Punkt des Roboterwerkzeugs
UDP	engl.: User Datagram Protocol; Netzwerkprotokoll
VW-Konvention	Veitschegger-Wu-Konvention
VW-Transformation	Veitschegger-Wu-Transformation
WPF	engl.: Windows Presentation Foundation; Grafik-Framework und Fenstersystem des .NET Frameworks von Microsoft
XML	engl.: Extensible Markup Language; Erweiterbare Auszeichnungssprache

---

# Verzeichnis der Formelzeichen

## Lateinische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
$a_i$	m	Translationsparameter in $\hat{x}_i$ -Richtung der Denavit-Hartenberg-Transformation zur Beschreibung des Koordinatensystems $K_i$ in Bezug auf das Koordinatensystem $K_{i-1}$
$a_{ij}$	°	Matrixeintrag der $i$ -ten Zeile und $j$ -ten Spalte der Übertragungsmatrix des Antriebstrangs eines Roboters
$A, B, C$	°	Eulerwinkel nach Z-Y'-X''-Konvention
$\mathbf{A}$	–	Übertragungsmatrix des Antriebstrangs eines Roboters
$A_{sys}$	m <sup>2</sup>	Flächenbedarf je System
$A(\vec{\theta})$	–	Menge der Punkte, welche durch die Roboter-geometrie in der Konfiguration $\vec{\theta}$ im Arbeitsraum eingenommen werden
$A_{i,j}$	–	Menge der Punkte, welche durch die Roboter-geometrie während der achssynchronen PTP-Bewegung $\vec{\theta}_{i \rightarrow j}(t)$ im Arbeitsraum eingenommen werden
$b$	–	Skalierungsparameter der Dichtefunktion der Gammaverteilung
$b_{ext}$	–	Anzahl der erfassten Freiheitsgrade der End-effektorpose durch ein externes Messsystem
$C_{sys}$	$\frac{1}{a}$	Maximale Systemkapazität; maximal erfassbare Anzahl an Merkmalen pro Jahr

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$C$	–	Konfigurationsraum eines Roboters; Menge aller möglichen Gelenkwinkelkonfigurationen $\vec{\theta}$ eines Roboters
$C_{frei}$	–	Kollisionsfreier Konfigurationsraum eines Roboters; Menge aller möglichen Gelenkwinkelkonfigurationen $\vec{\theta}$ eines Roboters, bei denen keine Kollision mit einem Hindernis $O, i$ des Arbeitsraums auftritt
$C_\phi$	–	Gesamtheit aller möglichen Motorwinkelkonfigurationen $\vec{\phi}$ eines Roboters
$C_{O,i}$	–	Kollisionsbehafteter Konfigurationsraum eines Roboters; Menge der Gelenkwinkelkonfigurationen $\vec{\theta}$ eines Roboters, bei denen eine Kollision mit dem Hindernis $i$ auftritt
$\Delta d_{axial,j}$	m	Axiale Verschiebung des Lasertrackerreflektors in der $j$ -ten Gelenkstellung des $i$ -ten Robotergelenks
$d_c$	m	Kartesischer Mindestabstand bei der simulationsgestützten Detektion von Kollisionen
$d_G(v)$	–	Grad eines Knotens $v$ ; Anzahl an Kanten an einem Knoten $v$
$d_i$	m	Translationsparameter in $\hat{z}_{i-1}$ -Richtung der Denavit-Hartenberg-Transformation zur Beschreibung des Koordinatensystems $K_i$ in Bezug auf das Koordinatensystem $K_{i-1}$
$D_i$	$\frac{\text{Nm}}{\circ}$	Torsionssteifigkeit des $i$ -ten Robotergelenks
$d_{SM}$	m	Typische Distanz zwischen dem Ursprung des Sensorkoordinatensystems und einem Merkmal
$e_i$	–	Kante $i$ eines Graphen
$e_{i \rightarrow j}$	–	Kante im Graphen $G_{Rob}$ ; Kollisionsfreie Bewegungen zwischen den Konfigurationen $\vec{\theta}_i$ und $\vec{\theta}_j$
$E$	–	Menge an Kanten eines Graphen

Symbol	Einheit	Bedeutung
$E_{abw}$	–	Erwartungswert für die kartesische Abweichung einer erfassten Merkmalsposition
$E_\gamma(p, b)$	–	Erwartungswert der Gammaverteilung
$E_{Rob}$	–	Menge der Kanten des Graphen $G_{Rob}$ ; kollisionsfreie Bewegungen
$\vec{F}'_{closed}(\vec{\Theta}, \vec{p})$	–	Vereinheitlichter Vektor der Vorwärtstransformationen $\vec{f}_E(\vec{\theta}_i, \vec{p})$ einer geschlossenen und offenen kinematischen Kette mit $i = 1 \dots m$ für ein Set mit $m$ Konfigurationen
$\vec{F}_{open}(\vec{\Theta}, \vec{p})$	–	Vektor der berechneten (partiellen) Endeffektorposen $\vec{f}_E(\vec{\theta}_i, \vec{p})$ eines Roboters mit $i = 1 \dots m$ für ein Set mit $m$ Konfigurationen
$\vec{f}_E(\vec{\theta}, \vec{p})$	–	Vektorielle Vorwärtstransformation eines Roboters zur Bestimmung des Vektors der Endeffektorpose auf Basis der Konfiguration
$_{TCP}\vec{f}(\vec{\phi}, \vec{\varphi}, \vec{p})$	–	Parametrisiertes Modell eines Roboters zur Bestimmung des TCP auf Basis der Motorwinkel der vorausgegangenen und aktuellen Konfiguration
$\vec{f}_M(\vec{\phi}, \vec{\varphi}, {}^S\vec{u}, \vec{p})$	–	Modell zur Berechnung eines charakteristischen Merkmalvektors ${}^B\vec{u}$ im Bezugskoordinatensystem $K_B$ auf Basis des Robotermodells
$f_{\chi, n}(x)$	–	Dichtefunktion der Chi-Quadrat-Verteilung $\chi_n^2$ mit $n$ Freiheitsgraden
$f_{\gamma, p, b}(x)$	–	Dichtefunktion der Gammaverteilung mit dem Formparameter $p$ und dem Skalierungsparameter $b$
$\vec{F}(\vec{\Theta}, \vec{p})$	–	Vektor der Vorwärtstransformationen $\vec{f}_E(\vec{\theta}_i, \vec{p})$ eines Roboters mit $i = 1 \dots m$ für ein Set mit $m$ Konfigurationen
$F_{GAS}$	N	Durch ein Gewichtsausgleichssystem induzierte, betragsmäßige Kraft auf die Schwinge eines Roboters

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\vec{F}_{GAS}$	N	Durch ein Gewichtsausgleichssystem induzierte Kraft auf die Schwinge eines Roboters
$^j \vec{F}_i$	N	Wirkende Kraft an der $i$ -ten Roboterachse in Bezug auf das Koordinatensystem $K_j$
$^2_{mod} \vec{F}_2$	N	Modifizierte wirkende Kraft an der zweiten Roboterachse in Bezug auf das Koordinatensystem $K_2$ unter Berücksichtigung der Kraft $\vec{F}_{GAS}$ durch ein Gewichtsausgleichssystem
$\vec{F}_{closed}(\vec{\Theta}, \vec{p})$	–	Vektor der Vorwärtstransformationen $\vec{f}_E(\vec{\theta}_i, \vec{p})$ einer geschlossenen, kinematischen Kette mit $i = 1 \dots m$ für ein Set mit $m$ Konfigurationen
$\vec{g}$	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
$^i \vec{g}$	$\frac{m}{s^2}$	Homogener Richtungsvektor der Erdbeschleunigung im Koordinatensystem $K_i$
$g_{j,i}$	–	Gewichtung des Streumaßes der $i$ -ten Messung des $j$ -ten Merkmals in Abhängigkeit vom Typ des charakteristischen Vektors des Merkmals
$\mathbf{G}_{skal}$	–	Skalierungsmatrix zur Skalierung der unterschiedlichen Einflüsse der Messgrößen
$G$	–	Graph
$G_{Rob}$	–	Graphentheoretische Repräsentanz des freien Konfigurationsraums $C_{frei}$
$G_{TSP}$	–	Graph zur Ermittlung einer Lösung der Reihenfolge der Datenerfassung zur Reduktion der Dauer
$h_{GAS,0}$	m	Länge des Zylinders des Gewichtsausgleichssystems
$h_{GAS}(\theta_2)$	m	Federhub des Gewichtsausgleichszyllinders
$\vec{h}_i$	–	Vektor der Endeffektorpose im Bezugskordinatensystem für die Konfiguration $\vec{\theta}_i$ unter Festlegung einer Konvention zur Beschreibung der Orientierung

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\vec{H}$	–	Vektor der Endeffektorposen $\vec{h}_i$ mit $i = 1 \dots m$ für ein Set mit $m$ Konfigurationen im Bezugskoordinatensystem
$\vec{H}_{ext}$	–	Vektor der mit Hilfe eines externen Messsystems erfassten (partiellen) Endeffektorposen $\vec{h}_i$ mit $i = 1 \dots m$ für ein Set mit $m$ Konfigurationen im Bezugskoordinatensystem
$\mathbf{H}_{skal}$	–	Skalierungsmatrix zur Skalierung der Parametereinflüsse (Spaltenskalierung der Jacobi-Matrix)
$i_{G_j}$	$(^\circ)^{-1}$	Übersetzungsverhältnis des Getriebes $G_j$
$i_{zins}$	–	Kalkulationszins
$\mathbf{J}$	–	Sensitivitätsmatrix; Matrix der partiellen Ableitungen der Vorwärtstransformationen an den $m$ durch die Konfigurationen gegebenen Stellen nach den Modellparametern
$\mathbf{J}_i$	–	Jacobi-Matrix der Vorwärtstransformation an der Stelle der Konfiguration $\vec{\theta}_i$ ; Matrix der partiellen Ableitungen der Vorwärtstransformation nach den Modellparametern
$K_{ges,V}$	$\frac{\text{€}}{\text{a}}$	Jährliche Gesamtkosten von Vielstellenmeseinrichtungen
$K_i$	–	$i$ -tes Koordinatensystem einer kinematischen Kette
$K_{ih}$	–	$i$ -tes Hilfskoordinatensystem einer kinematischen Kette
$K_{LT}$	–	Koordinatensystem des Lasertrackers
$K_M$	–	Koordinatensystem eines Merkmals
$K_P$	–	Koordinatensystem des Prüfobjektes
$K_{P,sys}$	$\frac{\text{€}}{\text{a}}$	Jährliche Personalkosten eines Messsystems pro Jahr auf Basis von Zeitaufwänden aus manuellen Tätigkeiten
$K_R$	–	Koordinatensystem des Roboters
$K_S$	–	Koordinatensystem des Sensors

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$K$	–	Menge an gültigen Konfigurationen zur Kalibrierdatenaufnahme an einem Merkmal des Prüfobjekts
$K_{set}$	–	Ausgewählte Teilmenge an Kalibrierkonfigurationen aus der Menge an gültigen Konfigurationen $K$
$k_{ana}$	–	Anzahl der Achsstellungen, an denen die Position des Lasertracker-Reflektors erfasst wird
$K_{an,sys}$	€	Anschaffungskosten je System
$K_B$	–	Bezugskoordinatensystem
$K_E$	–	Koordinatensystem des Endeffektors
$K_{fix,a}$	$\frac{€}{a}$	Maschinenabhängige Gemeinkosten eines Messsystems
$K_{ges,a}$	$\frac{€}{a}$	Jährliche Gesamtkosten Messsysteme
$\delta K_{ges,a}$	$\frac{€}{a}$	Differenz der jährlichen Gesamtkosten zwischen roboterbasierten Messsystemen mit Selbst-Kalibrierung und dem Einsatz von Vielstellenmesseinrichtungen
$K_{ges,a,M}$	$\frac{€}{a}$	Gesamtkosten Messsysteme pro Jahr pro Merkmal
$K_{ges,SK}$	$\frac{€}{a}$	Jährliche Gesamtkosten von roboterbasierten Messsystemen mit Selbst-Kalibrierung
$K_{Inst}$	$\frac{T€}{a}$	Instandhaltungs-, Betriebs- und Lizenzkosten
$l$	–	Anzahl an Merkmalen
${}^i\vec{l}$	m	Verbindungsvektor zwischen den Roboterachsen $i$ und $i + 1$ in Bezug auf das Koordinatensystem $K_i$
${}^i\vec{l}_g$	m	Position des Massenschwerpunkts des Roboterglieds $i$ in Bezug auf das Koordinatensystem $K_i$
$L$	m	Länge eines Biegebalkens
$L_A$	m	Länge des Arms
$L_{AB}$	m	Distanz zwischen den Lasertracker-Reflektoren $A$ und $B$

Symbol	Einheit	Bedeutung
$L_K$	m	Distanz zwischen der Position der Krafteinbringung durch das Gewichtsausgleichssystem und dem Rotationszentrum zwischen Karussell und Schwinge
$L_S$	m	Länge der Schwinge
${}^B\vec{m}_{M,mess,i}$	–	Erfasste Position des Merkmals $i$ im Bezugskoordinatensystem $K_B$
$m$	–	Anzahl an Kalibrierkonfigurationen
$\vec{m}$	m	Position der Drehachse in Bezug zum Koordinatensystem des Lasertrackers $K_{LT}$
$m_{Glieder,i}$	kg	Masse des Roboterglieds $i$
$m_i$	–	Anzahl an Kalibrierkonfigurationen am Merkmal $i$
${}^P\vec{m}_{M,nom,i}$	–	Nominelle Position des Merkmals $i$ im Koordinatensystem des Prüfobjektes $K_P$
${}^S\vec{m}_M$	–	Homogener Ortsvektor des Merkmals in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem $K_S$ , bestimmt auf Basis der am Merkmal erfassten Punktwolke $P$
$M_2(\vec{\theta})$	Nm	Auftretendes Drehmoment an der zweiten Achse
$M_{2,max}$	Nm	Maximales Drehmoment an der zweiten Achse
$M_{2,rel}(\vec{\theta})$	–	Relatives Drehmoment an der zweiten Achse
$M_{B,x}$	Nm	Gravitationsinduziertes Drehmoment auf die Basis in $\hat{x}$ -Richtung
$M_i$	Nm	Betragsmäßiges Drehmoment auf die $i$ -te Roboterachse
$\vec{M}_i(\vec{\theta})$	Nm	Drehmoment auf das $i$ -te Robotergelenk in der Konfiguration $\vec{\theta}$
$\Delta M_i$	Nm	Belastungsänderung der Achse $i$ ; Änderung des betragsmäßigen Drehmoments auf die $i$ -te Roboterachse zwischen der vorangegangenen Motorwinkelkonfiguration $\vec{\phi}$ und der aktuellen Motorwinkelkonfiguration $\vec{\phi}$

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
${}^i\vec{M}_{i,g}$	Nm	Gravitationsinduziertes Drehmoment auf die $i$ -te Roboterachse in Bezug auf das Koordinatensystem $K_i$ aufgrund der Masse $m_{Glie d,i}$ des Roboterglieds $i$
${}^j\vec{M}_i$	Nm	Drehmoment auf die $i$ -te Roboterachse in Bezug auf das Koordinatensystem $K_j$
${}_{mod}^2\vec{M}_2$	Nm	Modifiziertes Drehmoment auf die zweite Roboterachse in Bezug auf das Koordinatensystem $K_2$ unter Berücksichtigung der Kraft $\vec{F}_{GAS}$ durch ein Gewichtsausgleichssystem
$M$	–	Gesamtheit der erreichbaren Endeffektorposen durch die Roboterkinematik im Arbeitsraum $W$ mit Bezug auf ein Koordinatensystem $K_B$
$\hat{n}$	–	Einheitsvektor zur Beschreibung der Orientierung einer Drehachse im Koordinatensystem des Lasertrackers $K_{LT}$
$n_{ab}$	a	Abschreibungsdauer
$n_{einmess}$	–	Anzahl der im Rahmen der Einmessmethode erfassten Merkmalspositionen
$n_{PW}$	–	Anzahl an dreidimensionalen Punkten in einer Punktwolke
$n_v$	–	Anzahl an zufälligen Knoten, welche dem Graphen $G$ hinzugefügt werden
$N$	–	Anzahl an Modellparametern
$n_{kin,min}$	–	Minimale Anzahl an Modellparametern für die kinematische Modellierung
$N_M$	–	Durchschnittliche Anzahl an zu prüfenden Merkmalen je Prüfobjekt
$N_P$	$\frac{1}{a}$	Anzahl der Prüfobjekte pro Jahr
$N_{sys}$	–	Anzahl an notwendigen Systemen zur Durchführung eines Prüfumfangs unter Berücksichtigung der maximalen Systemkapazität $C_{sys}$

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$N(0, \sigma_k^2)$	–	Normalverteilung mit Erwartungswert Null und Varianz $\sigma_k^2$
$O$	–	Beobachtbarkeitsindex für die Bewertung und Auswahl eines Sets an Kalibrierkonfigurationen bei der Selbst-Kalibrierung; Bewertungskriterium
$O_1$	–	Beobachtbarkeitsindex nach BORM & C.-H. MENG (1991)
$O_2$	–	Beobachtbarkeitsindex nach DRIELS & PATHRE (1990)
$O_3$	–	Beobachtbarkeitsindex nach NAHVI & HOLLERBACH (1996)
$O_4$	–	Beobachtbarkeitsindex nach NAHVI & HOLLERBACH (1996); Produkt aus $O_2$ und $O_3$
$O_5$	–	Beobachtbarkeitsindex nach SUN & HOLLERBACH (2008)
$O_i$	–	Menge der Punkte, welche durch ein Hindernis $i$ im Arbeitsraum des Roboters eingenommen werden
$p$	–	Formparameter der Dichtefunktion der Gammaverteilung
$\vec{p}_0^*$	–	Vektor der im Rahmen der initialen Kalibrierung identifizierten Parameter
$\vec{p}$	–	Parametervektor des Robotermodells
$\vec{p}^*$	–	Gesuchter Parametervektor des Robotermodells zur Minimierung des Bestimmungsgleichungssystems
$\vec{p}_{Antrieb}$	–	Modellparameter zur Charakterisierung der idealisierten Übertragungsfunktion
$p_{B,x}$	$\frac{\text{Nm}}{\circ}$	Parameter der lineare Steifigkeit des Sattelgelenks zur Beschreibung der Nachgiebigkeit der Roboterbasis in $\hat{x}$ -Richtung

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$p_{B,y}$	$\frac{\text{Nm}}{\circ}$	Parameter der lineare Steifigkeit des Sattelgelenks zur Beschreibung der Nachgiebigkeit der Roboterbasis in $\hat{y}$ -Richtung
$p_{GAS}$	$\frac{\text{N}}{\text{m}}$	Parameter der lineare Federkonstante zur Beschreibung des Gewichtsausgleichssystems
$p_i$	—	$i$ -ter Parameter des Robotermodells
$p_{i,Hysteresese}$	—	Parameter zur Beschreibung der Hysteresese der Achse $i$
$p_{i,Spiel1}$	—	Erster Parameter zur Beschreibung des Spiels der Achse $i$
$p_{i,Spiel2}$	—	Zweiter Parameter zur Beschreibung des Spiels der Achse $i$
$p_{i,Torsion1}$	—	Erster Parameter zur Beschreibung der Nachgiebigkeit der Achse $i$
$p_{i,Torsion2}$	—	Zweiter Parameter zur Beschreibung der Nachgiebigkeit der Achse $i$
$\vec{p}_{kin}$	—	Vektor der kinematischen Parameter des Robotermodells
$\vec{p}_k$	—	Parametervektor des Robotermodells in der $k$ -ten Iteration des numerischen Lösungsverfahrens im Rahmen der Parameteridentifikation
$\vec{p}_t$	—	Vektor der betriebsabhängigen Parameter
$P_{sys}$	kW	Leistungsaufnahme je System
$P$	—	Punktwolke; Menge an dreidimensionalen Punkten in Bezug auf ein Koordinatensystem
$q$	—	Anzahl an angetriebenen Achsen eines Roboters
$q_r$	—	Anzahl an rotatorischen Achsen eines Roboters
$q_t$	—	Anzahl an translatorischen Achsen eines Roboters
$r$	m	Entfernung des Lasertracker-Reflektors zur Drehachse

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\delta r$	m	Erfasste Positionsabweichung eines Merkmals aufgrund eines Fehlers in der Sensorpose
$\vec{r}_i$	m	Residuenvektor für eine Roboterkonfiguration $i$
$r_{ij}$	–	Komponente der Rotationsmatrix $\mathbf{R}_{\hat{n}}(\alpha)$ in der $i$ -ten Zeile und $j$ -ten Spalte der Matrix
$r_j$	–	Summe der quadrierten euklidischen Abweichungen zwischen dem wahren, charakteristischen Vektor eines Merkmals ${}^B\vec{v}_j$ und den auf Basis von $m_j$ Messungen und des Modells berechneten charakteristischen Vektoren ${}^B\vec{u}_{j,i}$ des Merkmals $j$
$r_k$	m	Abweichungen bezüglich einer Raumrichtung $k \in \{x, y, z\}$ für ein Set aus $m$ Konfigurationen
$R$	–	Gesamtstreumaß für $l$ Merkmale; Summe der einzelnen Streumaße $r'_j$
$\mathbf{R}$	–	Rotationsmatrix ( $SO(3)$ ) in $\mathbb{R}^3$
$\mathbf{R}_{\hat{n}}(\alpha)$	–	Rotationsmatrix ( $SO(3)$ ) in $\mathbb{R}^3$ zur Beschreibung einer beliebigen Rotation um einen Einheitsvektor $\hat{n}$ um den Winkel $\alpha$
$\mathbf{Rot}(\hat{n}, \alpha)$	–	Homogene Rotationsmatrix ( $SE(3)$ ) zur Beschreibung einer Rotation um einen Einheitsvektor $\hat{n}$ um den Winkel $\alpha$
$R'$	–	Gewichtetes Gesamtstreumaß für $l$ Merkmale; Summe der gewichteten einzelnen Streumaße $r'_j$
$R_{sys}$	€	Restwert am Ende der Nutzung je System
$s_{new}$	–	Abstand der Konfiguration $\vec{\theta}_{new}$ zur Konfiguration $\vec{\theta}_{rand,i}$
$t_{acc}$	s	Dauer der Beschleunigungsphase (Beschleunigungs- und Abbremsphase) bei einer achssynchronen PTP-Bewegung

Symbol	Einheit	Bedeutung
$t_{E,M}$	min	Änderungsaufwand je Prüfauftrag pro Merkmal
$t_{E,P}$	min	Änderungsaufwand je Prüfauftrag
$t_i$	min	Betriebsdauer nach Initialkalibrierung
$t_{M,M}$	s	Direkte Messaufwände pro Merkmal
$t_{M,P}$	s	Direkte Messaufwände je Prüfauftrag
$t_{PTP}$	s	Bewegungsdauer einer achssynchronen PTP-Bewegung
$\vec{t}$	m	Translationsvektor in $\mathbb{R}^3$
$t_W$	$\frac{h}{a}$	Indirekte Messaufwände pro Jahr
${}^0_B\mathbf{T}_0$	—	Hilfstransformation des Sattelgelenks zur Beschreibung der gravitationsinduzierten Nachgiebigkeit der Roboterbasis
${}_{Def,K}{}^1\mathbf{T}_1$	—	Hilfstransformation zur Beschreibung der Deformation des Karussells aufgrund des Gewichtsausgleichssystems in Bezug auf das Koordinatensystem $K_1$
${}_{Def,S}{}^2\mathbf{T}_2$	—	Hilfstransformation zur Beschreibung der Deformation der Schwinge in Bezug auf das Koordinatensystem $K_2$
${}_{Def,A}{}^3\mathbf{T}_3$	—	Hilfstransformation zur Beschreibung der Deformation des Roboterarms in Bezug auf das Koordinatensystem $K_3$
${}_{Def,A}{}^4\mathbf{T}_4$	—	Hilfstransformation zur Beschreibung der Deformation des Roboterarms in Bezug auf das Koordinatensystem $K_4$
$T_{max}$	$\frac{h}{a}$	Maximale Systemverfügbarkeit
${}^j\mathbf{T}_i$	—	Homogene Transformationsmatrix ( $SE(3) = \mathbb{R}^3 \rtimes SO(3)$ ) zwischen dem Koordinatensystem $K_j$ und Koordinatensystem $K_i$

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
${}^{i-1}_{DH}\mathbf{T}_i$	–	Homogene Transformationsmatrix ( $SE(3)$ ) zwischen dem Koordinatensystem $K_{i-1}$ und dem Koordinatensystem $K_i$ zweier aufeinanderfolgenden Achsen unter Verwendung der Denavit-Hartenberg-Konvention
${}^j_{GNR}\mathbf{T}_i$	–	Homogene Transformationsmatrix ( $SE(3)$ ) zwischen dem Koordinatensystem $K_j$ und Koordinatensystem $K_i$ unter Verwendung der Gier-Nick-Roll-Konvention
${}^{B}_{Kin}\mathbf{T}_E(\vec{\theta}, \vec{p})$	–	Kinematische Vorwärtstransformation eines Roboters zur Bestimmung der Endeffektorpose auf Basis der Konfiguration
${}^{Modell}_i\mathbf{T}_{i+1}$	–	Um die Deformationen der Roboterglieder erweiterte kinematische Transformation zwischen den Koordinatensystemen $K_i$ und $K_{i+1}$
${}^B_{Rob}\mathbf{T}_E$	–	Vorwärtstransformation eines Roboters zur Bestimmung der Endeffektorpose auf Basis der Konfiguration
${}^S\mathbf{T}_M$	–	Homogene Transformationsmatrix zwischen dem Sensorkoordinatensystem $K_S$ und dem Merkmalkoordinatensystem $K_M$ bestimmt auf Basis der am Merkmal erfassten Punktwolke $P$
<b>Trans</b> ( $\vec{t}$ )	–	Homogene Translationsmatrix ( $SE(3)$ ) zur Beschreibung einer Translation um den Vektor $\vec{t} \in \mathbb{R}^3$
$\hat{u}_0$	–	Einheitsvektor in der Drehebene einer Achse im Koordinatensystem des Lasertrackers $K_{LT}$
${}^B\vec{u}_{j,i}$	–	Charakteristischer Vektor eines Merkmals $j$ in Bezug auf das Bezugskoordinatensystem $K_B$ berechnet auf Basis der $i$ -ten Messung und des Modells

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
${}^S\vec{u}_{j,i}$	–	Charakteristischer Vektor eines Merkmals $j$ in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem $K_S$ für die $i$ -te Messung
$\mathbf{U}$	–	Matrix der Singulärwertzerlegung
$\hat{v}_0$	–	Einheitsvektor in der Drehebene einer Achse im Koordinatensystem des Lasertrackers $K_{LT}$
${}^B\vec{v}_j$	–	Wahrer charakteristischer Vektor eines Merkmals $j$ in Bezug auf das Bezugskoordinatensystem $K_B$
${}^B\vec{v}'_j$	–	Approximierter charakteristischer Vektor eines Merkmals $j$ in Bezug auf das Bezugskoordinatensystem $K_B$ auf Basis einer $m_j$ -fach Messung des Merkmals
$v_i$	–	Knoten $i$ eines Graphen
$\mathbf{V}$	–	Matrix der Singulärwertzerlegung
$V$	–	Menge an Knoten eines Graphen
$V_i$	m <sup>3</sup>	Betrachtungsvolumen $i$ im Arbeitsraum des Roboters
$V_{Rob}$	–	Menge der Knoten des Graphen $G_{Rob}$ ; kollisionsfreie Konfigurationen
$w(x)$	–	Biegelinie eines einseitig eingespannten Biegebalkens nach Bernoulli
$W$	–	Weg in einem Graphen; Abfolge paarweiser verschiedener Knoten
$W$	–	Arbeitsraum eines Roboters; Menge aller durch die Kinematik erreichbaren Punkte des TCPs mit Bezug auf ein Koordinatensystem $K_B$
$\vec{x}_K$	m	Verbindungsvektor zwischen Achse 2 und dem Befestigungspunkt des Gewichtsausgleichssystems am Karussell
${}^B\vec{x}_{mess,i}$	–	Homogener Ortsvektor der messtechnisch Erfassten TCP-Position in der Roboterkonfiguration $i$ im Bezugskoordinatensystem

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\vec{x}_{R,j}$	m	Position des Lasertracker-Reflektors im Koordinatensystem des Lasertrackers $K_{LT}$ beim Achswinkel $\theta_i$
$\vec{x}_S$	m	Verbindungsvektor zwischen Achse 2 und dem Befestigungspunkt des Gewichtsausgleichssystems an der Schwinge
${}^i\vec{x}$	–	Homogener Ortsvektor mit Bezug auf das Koordinatensystem $K_i$
$x, y, z$	m	kartesische Koordinaten
$\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$	–	Einheitsvektoren der Koordinatenachsen des Koordinatensystems $K_i$
${}^S\vec{x}_M, {}^S\vec{y}_M, {}^S\vec{z}_M$	–	Homogene Richtungsvektoren des Merkmals in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem $K_S$ , bestimmt auf Basis der am Merkmal erfassten Punktwolke $P$
$\Delta z_{RA}$	m	Verschiebung des Lasertracker-Reflektors $A$ in $\hat{z}$ -Richtung

---

## Griechische Formelzeichen

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\alpha_i$	°	Rotationsparameter der Denavit-Hartenberg-Transformation zur Beschreibung des Koordinatensystems $K_i$ in Bezug auf das Koordinatensystem $K_{i-1}$
$\beta_i$	°	Rotationsparameter der Hayati-Mirmirani-Transformation zur Beschreibung des Koordinatensystems $K_i$ in Bezug auf das Koordinatensystem $K_{i-1}$
$\chi_n^2$	–	Chi-Quadrat-Verteilung mit $n$ Freiheitsgraden
$\Delta\eta_{kip}$	°	Kippwinkel der Roboterbasis aufgrund des gravitationsinduzierten Drehmoments

---

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\Delta\eta_{kipp,x}$	°	$\hat{x}$ -Komponente des Kippwinkels der Roboterbasis aufgrund des gravitationsinduzierten Drehmoments
$\Delta\eta_{kipp,y}$	°	$\hat{y}$ -Komponente des Kippwinkels der Roboterbasis aufgrund des gravitationsinduzierten Drehmoments
$\Delta_P$	$\frac{1}{a}$	Änderungen der Prüfaufträge (Bauteil- oder Prüfplanänderungen) pro Jahr
$\Delta\vec{\theta}_{i \rightarrow j}$	°	Differenzen der Gelenkstellungen zwischen der Startkonfiguration $\vec{\theta}_i$ und der Zielkonfiguration $\vec{\theta}_j$
$\Delta\theta_{k,i \rightarrow j}$	°	Differenz der Gelenkstellungen der $k$ -ten Achse zwischen der Startkonfiguration $\vec{\theta}_i$ und der Zielkonfiguration $\vec{\theta}_j$
$\vec{\varepsilon}_i$	—	Fehlerterm bei der Vorwärtstransformation bei einer Konfiguration $\vec{\theta}_i$ ; Abweichung der auf Basis des Modells ermittelten und wahren Pose des Endeffektors
$\vec{\varepsilon}$	—	Vektor der Fehlerterme $\vec{\varepsilon}_i$ mit $i = 1 \dots m$ für ein Set mit $m$ Konfigurationen
$\vec{\epsilon}_{j,i}$	—	Fehlervektor zur Beschreibung der Abweichung zwischen dem wahren charakteristischen Vektor eines Merkmals ${}^B\vec{v}_j$ und dem auf Basis der $i$ -ten Messung und des Modells berechneten charakteristischen Vektor ${}^B\vec{u}_{j,i}$ des Merkmals $j$
$\delta\eta$	°	Orientierungsfehler des Sensors bei der Erfassung eines Merkmals
$\Gamma(x)$	—	Gammafunktion
$\kappa$	—	Konditionszahl der Jacobi-Matrix
$\kappa_{Energie}$	$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$	Energiekosten
$\kappa_P$	$\frac{\text{€}}{\text{h}}$	Personalkosten (inklusive Nebenkosten)
$\kappa_{raum}$	$\frac{\text{€}}{\text{a} \cdot \text{m}^2}$	Raumkosten
$\Lambda(\vec{x})$	—	Zielfunktional

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\lambda_{p_i}$	–	Skalierungsfaktor für den Parameter $p_i$ zur Konditionierung des Modells
$\phi_i$	°	Drehwinkel der Motorwelle (Motorwinkel) des $i$ -ten Motors in der aktuellen Konfiguration des Roboters
$\vec{\phi}$	°	Vektor der Motorwinkel in der aktuellen Konfiguration des Roboters
$\varphi_i$	°	Drehwinkel des $i$ -ten Motors in der vorangegangenen Konfiguration des Roboters
$\vec{\varphi}$	°	Vektor der Drehwinkel der Motoren in der vorangegangenen Konfiguration des Roboters
$\vec{\phi}_0$	°	Nullstellung der Motoren
$\Psi(t)$	°	Roboterbahn; Kurve im Konfigurationsraum $C$
$\Psi_{i \rightarrow j}$	–	Kürzester Weg zwischen den Konfigurationen $\vec{\theta}_i$ und $\vec{\theta}_j$ im Graphen $G_{Rob}$
$\rho_{j,i}$	–	Euklidische Abweichung zwischen dem wahren charakteristischen Vektor eines Merkmals ${}^B\vec{v}_j$ und dem auf Basis der $i$ -ten Messung und des Modells berechneten charakteristischen Vektor ${}^B\vec{u}_{j,i}$ des Merkmals $j$
$\Sigma$	–	Singulärwertmatrix der Sensitivitätsmatrix $\mathbf{J}$
$\sigma_i$	–	$i$ -ter Singulärwert der Singulärwertmatrix $\Sigma$ mit $i = 1 \dots N$ bei einer Vorwärtstransformation mit $N$ unabhängigen Parametern
$\tau_{aus}$	s	Ausschwingdauer des Robotersystems nach Erreichen der Soll-Pose
$\theta_i$	°	Gelenkstellung (Achswinkel) des $i$ -ten Robotergetelns; Rotationsparameter der Denavit-Hartenberg-Transformation zur Beschreibung des Koordinatensystems $K_i$ in Bezug auf das Koordinatensystem $K_{i-1}$
$\theta_{i,j}$	°	$j$ -te Gelenkstellung des $i$ -ten Robotergetelns

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\Delta\theta_{i,j}$	°	Relativer Achswinkelfehler in der $j$ -ten Gelenkstellung des $i$ -ten Robotergelenks
$\dot{\theta}_{k,max}$	$\frac{^\circ}{s^2}$	Betragsmäßige Beschleunigung (Anfahrbeschleunigung und Abbremsbeschleunigung) der $k$ -ten Achse
$\dot{\theta}_{k,max}$	$\frac{^\circ}{s}$	Maximale Drehgeschwindigkeit der $k$ -ten Achse
$\vec{\theta}(\vec{\phi}, \vec{\varphi})$	°	Modell der Antriebselemente
$\delta\vec{\theta}_{Hysteresis}$	°	Fehlerterm aufgrund von Hystereseeffekte der Gelenke bei der Modellierung der Antriebselemente; Vektor der Winkelfehler $\delta\theta_{i,Hysteresis}$
$\delta\theta_{i,Hysteresis}(\Delta M_i)$	°	Winkelfehler der Achse $i$ aufgrund des Hystereseeinflusses in Abhängigkeit der Belastungsänderung $\Delta M_i$
$\delta\vec{\theta}_{Spiel}$	°	Fehlerterm aufgrund von Gelenkspiel bei der Modellierung der Antriebselemente; Vektor der Winkelfehler $\delta\theta_{i,Spiel}$
$\delta\theta_{i,Spiel}(M_i, \phi_i, \varphi_i)$	°	Winkelfehler der Achse $i$ aufgrund von Spiel in Abhängigkeit des auf die Achse wirkenden Drehmoments $M_i$ und der Motorwinkel in der vorangegangenen und aktuellen Konfiguration
$\delta\theta_{i,Torsion}(M_i)$	°	Winkelfehler der Achse $i$ aufgrund von Torsionssteifigkeiten in Abhängigkeit des auf die Achse wirkenden Drehmoments $M_i$
$\delta\vec{\theta}_{Torsion}$	°	Fehlerterm aufgrund von Torsionssteifigkeiten der Gelenke bei der Modellierung der Antriebselemente; Vektor der Winkelfehler $\delta\theta_{i,Torsion}$
$\vec{\theta}_{ideal}(\vec{\phi})$	°	Ideale Übertragungsfunktion der Antriebselemente
$\vec{\theta}_{i \rightarrow j}(t)$	°	Achssynchrone PTP-Bewegung des Roboters zwischen den Konfigurationen $\vec{\theta}_i$ und $\vec{\theta}_j$
$\vec{\theta}_S$	°	Ausgangskonfiguration des Roboters
$\vec{\theta}$	°	Konfiguration; Vektor der Gelenkstellungen eines Roboters

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\vec{\Theta}$	°	Vektor der Konfigurationen $\vec{\theta}_i$ mit $i = 1 \dots m$ für ein Set mit $m$ Konfigurationen
$\vec{\theta}_{near,i}$	°	Benachbarter Knoten zur Zufallskonfiguration $\vec{\theta}_{rand,i}$
$\vec{\theta}_{new}$	°	Neuer, hinzuzufügender Knoten zum Graph $G$
$\vec{\theta}_{rand,i}$	°	Kollisionsfreie Zufallskonfiguration $i$ ; Knoten im Graph $G$
$\dot{\theta}_{k,i \rightarrow j}(t)$	$\frac{^\circ}{s}$	Trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil der $k$ -ten Achse für eine achssynchrone PTP-Bewegung
$\dot{\vec{\theta}}_{i \rightarrow j}(t)$	$\frac{^\circ}{s}$	Vektor der Achswinkelgeschwindigkeiten für eine achssynchrone PTP-Bewegung
$\xi_{i,j}$	°	Relative Drehwinkel der $i$ -ten Achse, berechnet auf Basis der Position des Lasertracker-Reflektors $\vec{x}_{R,j}$
$\zeta_S$	°	Maximaler Winkel (Blickwinkel) zwischen der Normale eines Merkmals und der Sichtachse des Sensors

---

## Mathematische Symbole

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\vec{0}$	—	Nullvektor
$\ \vec{x}\ _2$	—	Euklidische Norm eines Vektors $\vec{x}$ ; 2-Norm
$\arctan 2(y, x)$	—	Erweiterte inverse Winkelfunktion Arkustangens
$c_\xi$	—	Kurzschreibweise für $\cos(\xi)$
$\delta_{ij}$	—	Kronecker-Delta
$\inf\{\cdot\}$	—	Infimum einer Menge; Größte untere Schranke
$\emptyset$	—	Leere Menge
$\epsilon_{ikj}$	—	Levi-Civita-Symbol

---

---

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\operatorname{sgn}(x)$	–	Signumfunktion
$s_\xi$	–	Kurzschreibweise für $\sin(\xi)$

# 1 Einleitung

## 1.1 Produktionsnahe Koordinatenmesstechnik

Die Produktion ist einem stetigen Wandel unterworfen und muss auf sich ändernde Rahmenbedingungen und Trends reagieren (REINHART 2017, S. XXXV; BAUERNHANSL et al. 2014, S. 13). Die wesentlichen Zielgrößen der Produktion hierbei sind die Herstellkosten, die erzielbare Produktqualität und die Geschwindigkeit sowie die Wandelbarkeit des Produktionssystems (ABELE & REINHART 2011, S. 34). Insbesondere die Produktqualität beeinflusst auf direktem Weg die Kundenzufriedenheit und ist im Speziellen bei Produkten aus dem Premiumsegment von großer Bedeutung (KAMISKE 2015, S. 5, 19; FELDMANN et al. 2014, S. 700; YIN, REN, GUO et al. 2014). Folglich werden verstärkt Methoden des modernen Qualitätsmanagements, wie beispielsweise der Demingkreis, eingesetzt und der Verantwortungsbereich der Produktion zunehmend auch auf die Produktqualität erweitert (KEFERSTEIN & MARXER 2015, S. 7–10). Dementsprechend muss produktionsnah die datentechnische Grundlage für die Qualitätsbeurteilung gewährleistet und die notwendige Messtechnik für den Einsatz befähigt werden (FELDMANN et al. 2014, S. 722).

Das Ziel der produktionsnahen Fertigungsmesstechnik ist hierbei die Kontrolle, Quantifizierung und Klassifizierung der qualitätsrelevanten Größen (KAMISKE 2015, S. 88; KEFERSTEIN & MARXER 2015, S. 1, 283). Insbesondere die geometrischen Produktmerkmale, welche stetig kleiner werdenden Toleranzen unterworfen sind, stehen im Betrachtungsfokus (PFEIFER & SCHMITT 2010, S. 2; YIN, REN, GUO et al. 2014). Ein quantitatives Merkmal (Variablenmerkmal) entspricht hierbei einer Eigenschaft des Prüfobjektes, die als Messwert ausgegeben werden kann (KEFERSTEIN & MARXER 2015, S. 285). Messverfahren zur Erfassung solcher Eigenschaften auf Basis eines Vergleichs von Soll- und Ist-Geometrie im Hinblick

1 auf Gestalt und Abmessungen des Produktes können der Koordinatenmesstechnik als Teilgebiet der Fertigungsmesstechnik zugeordnet werden (KEFERSTEIN & MARXER 2015, S. 58; PONN & LINDEMANN 2011, S. 133). Für die Grundlagen der Koordinatenmesstechnik sei an dieser Stelle auf den Anhang A.1 verwiesen.

In Abhängigkeit von der Größe des zu prüfenden Objektes, den gegebenen Toleranzen und den Randbedingungen des Einsatzbereiches stellt die Wahl eines geeigneten Messsystems eine große Herausforderung an die produktionsnahe Koordinatenmesstechnik dar. Beispielsweise besitzen Karosserieteile in der Automobilindustrie Dimensionen im Bereich von 1 m (BERTAGNOLLI 2006, S. 33), wohingegen die Toleranzen in der Größenordnung von etwa 200 µm einzuordnen sind. Darüber hinaus muss der Betrieb des Messsystems mit den Umgebungsbedingungen der Produktion vereinbar sein.

Gemäß den Zielgrößen sollen Messsysteme folglich geringe Investitions- und Betriebskosten aufweisen sowie die angestrebten qualitätsrelevanten Größen erfassen können. Die zweite Forderung korreliert hierbei stark mit den definierten Toleranzen des Prüfobjekts und der Messunsicherheit des Systems. Eine weitere aus den Zielgrößen ableitbare Anforderung ist die Geschwindigkeit, welche zum einen im Rahmen der Messgeschwindigkeit die Anzahl der prüfbaren Objekte pro Zeiteinheit beeinflusst und zum anderen die Dauer der Inbetriebnahme beschreibt. Um dem Ziel eines wandlungsfähigen Systems gerecht zu werden, muss das System flexibel auf neue Produkte und Produktderivate bis hin zum kundenindividuellen Produkt reagieren können (M. ULRICH 2018, S. 1).

Insbesondere roboterbasierte Koordinatenmesssysteme<sup>1</sup>, bestehend aus einem Standard-Industrieroboter<sup>2</sup> und einen oder mehreren durch diesen geführte Sensoren, rücken aufgrund deren Kosten, Flexibilität und Geschwindigkeit im Kontext eines produktionsnahen Umfelds verstärkt in den Betrachtungsfokus (DERFLING 2013, S. 1–2; GREENWAY 2000; LEE & PARK 2000).

---

<sup>1</sup>Bei roboterbasierten Koordinatenmesssystemen „gehen die Messwerte des roboterinternen Wegmesssystems - d.h., der Gelenksensoren - in das Messergebnis ein.“ (DERFLING 2013, S. 16)

<sup>2</sup>Für die Grundlagen von Industrierobotern sei auf den Anhang A.2 verwiesen.

## 1.2 Potential und Defizit roboterbasierter Koordinatenmesssysteme

Durch Entwicklungen im Bereich der computergestützten Bildverarbeitung, der Projektionstechnik und der bildgebenden Sensorik werden vermehrt optische, dreidimensional (3D) erfassende Sensoren für die Koordinatenmesstechnik verwendet (YIN, REN, GUO et al. 2014). Diese ermöglichen eine schnelle, berührungslose und flächenhafte Abtastung von Oberflächen im Messvolumen des Sensors. Aktuelle Sensoren besitzen hierbei eine Genauigkeit in der Größenordnung von  $10\text{ }\mu\text{m}$  bei einem Messvolumen von etwa  $20 \times 20 \times 20\text{ cm}^3$  (WECKENMANN et al. 2009). Hierdurch kann die Erfassung von einzelnen Prüfmerkmalen (z. B. Bohrungen, Langlöcher etc.) in Form von Punktwolken<sup>3</sup> realisiert werden. In Anwendungsbereichen, bei denen das zu prüfende Objekt größere Dimensionen als das Messvolumen aufweist, ist eine Positionierung und Orientierung des Sensors relativ zu jedem relevanten Prüfmerkmal und die Überführung der Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem<sup>4</sup> notwendig (M. ULRICH 2018, S. 9).

Durch Kombination eines optischen 3D-Sensors mit einem Industrieroboter sollen die Vorteile beider Komponenten verknüpft werden. Zum einen können so einzelne Merkmale schnell erfasst werden, und zum anderen ermöglicht der Roboter den flexiblen Einsatz eines solchen Systems auch bei großvolumigen Bauteilen (YIN, REN, GUO et al. 2014). Die Roboterkinematik erfüllt hierbei neben der handhabenden auch eine referenzierende Aufgabe. Dies bedeutet, dass die Sensorpose<sup>5</sup> auf Basis der Achsstellungen und des Robotermodells bestimmt sowie für die Überführung der Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem genutzt wird. Hierbei gehen die Messwerte der roboterinternen Sensorik über den funktionalen Zusammenhang des Robotermodells mit in das Messergebnis ein (DERFLING 2013, S. 16). Abbildung 1.1 zeigt exemplarisch ein roboterbasiertes Koordinatenmesssystem am Beispiel eines Prüfobjektes aus dem Karosseriebau der Automobilindustrie (Autotür).

---

<sup>3</sup>Menge dreidimensionaler Punkte in einem lokalen Bezugskoordinatensystem

<sup>4</sup>Die Überführung mehrerer Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem wird im Rahmen der Koordinatenmesstechnik als Registrierung bezeichnet (M. ULRICH 2018, S. 9; BERTAGNOLLI 2006, S. 152; BENNAMOUN & MAMIC 2002, S. 102).

<sup>5</sup>Position und Orientierung des Sensors in einem Bezugskoordinatensystem

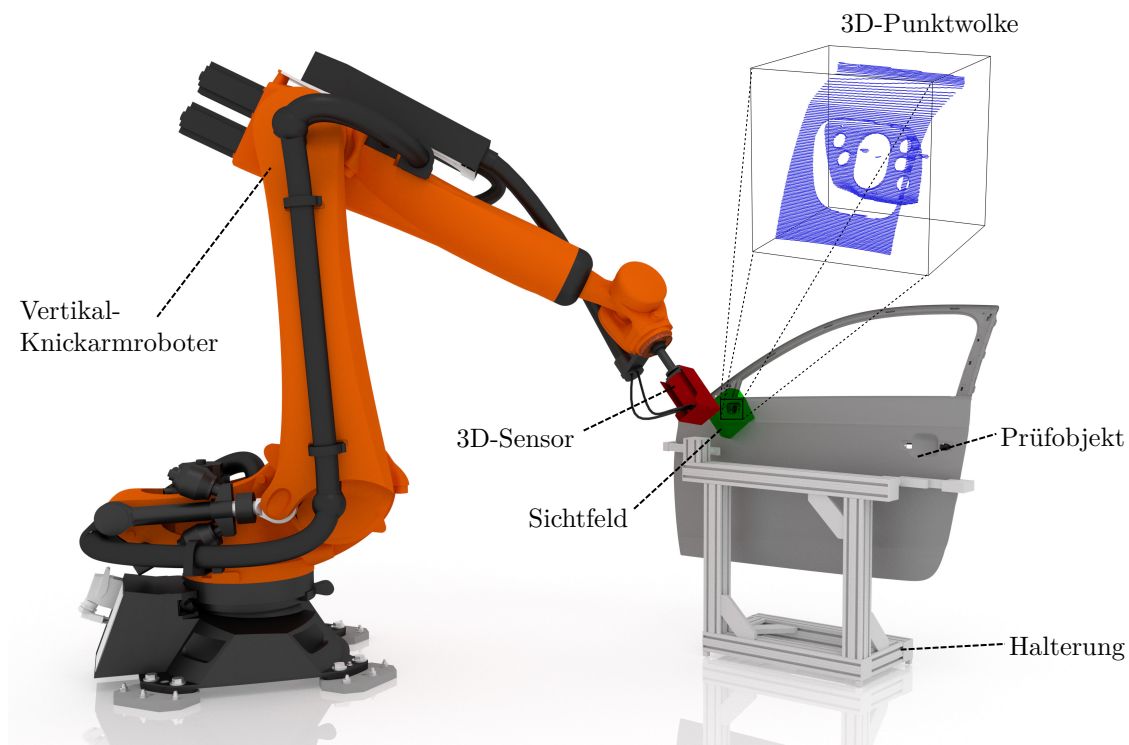


Abbildung 1.1: Darstellung eines roboterbasierten Koordinatenmesssystems am Beispiel eines Prüfobjektes aus der Automobilindustrie (Autotür) sowie die durch flächenhafte Antastung der Prüfobjektoberfläche erfasste Punktwolke.

In Bezug auf die abgeleiteten Anforderungen an die Messtechnik zeigen roboterbasierte Messsysteme ein hohes Potential im produktionsnahen Umfeld. Im Vergleich zu konventionellen Koordinatenmessgeräten weisen diese Systeme deutlich geringere Investitions- und Betriebskosten sowie eine höhere Messgeschwindigkeit auf. Letztere wird maßgeblich durch die Kombination eines Roboters und des Einsatzes optischer 3D-Sensoren realisierbar (LEE & PARK 2000). Darüber hinaus sind roboterbasierte Messsysteme aufgrund ihrer Robustheit<sup>6</sup> für den produktionsnahen Einsatz geeignet.

Gegenüber Vielstellenmesseinrichtungen können roboterbasierte Messsysteme flexibler und mit deutlich weniger initialem Inbetriebnahmeaufwand eingesetzt

<sup>6</sup>Vertikal-Knickarmroboter und optische 3D-Sensoren sind etablierte Komponenten in der Produktion und können mit vertretbarem Aufwand robust gegen typische Einflussgrößen innerhalb des Produktionsprozesses betrieben werden.

werden. Die freie Programmierung ermöglicht hierbei die effiziente Adaption des Messprozesses an eine sich wandelnde Produktion mit neuen Produkten und Produktderivaten.

Beschränkt wird der Einsatz roboterbasierter Koordinatenmesssysteme bislang maßgeblich durch die unzureichende Genauigkeit, welche sich entlang der Messkette aus den Genauigkeiten der Komponenten zusammensetzt (LUDWIG 2011, S. 56–57). Hierbei besitzen optische 3D-Sensoren typischerweise eine deutlich höhere Genauigkeit im Vergleich zu der Pose-Genauigkeit<sup>7</sup> von Standard-Industrierobotern (M. ULRICH, LUX & PIPREK 2014). Im Hinblick auf die Genauigkeitsanforderungen an Messsysteme wird daher der Einsatz maßgeblich durch die Pose-Genauigkeit des Roboters limitiert (YIN, REN, GUO et al. 2014).

Die Befähigung roboterbasierter Messsysteme zum Einsatz in der produktionsnahen Koordinatenmesstechnik durch die Steigerung der Pose-Genauigkeit des Roboters kann folglich einen maßgeblichen Beitrag zur Ausrichtung auf die Zielgrößen der Produktion leisten und deren Potential erschließen. Insbesondere sind hierfür die Genauigkeitsanforderung sowie die Integration in den Ablauf einer messtechnischen Aufgabenstellung zu adressieren.

### 1.3 Kalibrierung zur Steigerung der Genauigkeit

Die Pose des Sensors wird durch die Roboterkinematik im Raum definiert und auf Basis der mathematischen Beschreibung des Roboters (Robotermodell) berechnet (GREENWAY 2000). Stimmt das Robotermodell nicht in ausreichendem Maß mit dem Realsystem überein, resultiert ein Fehler in der berechneten Sensorpose. Die Genauigkeit des gesamten Messsystems verringert sich.

Zur Steigerung der Genauigkeit von Robotersystemen werden verschiedene Kalibrierverfahren eingesetzt. Das Ziel der Kalibrierung ist die Feststellung des Zusammenhangs zwischen den Eingangsgrößen (roboterinterne Sensorwerte) und dem realen Wert der Ausgangsgrößen (Istpose) des Systems (in Anlehnung an

---

<sup>7</sup> „Die Pose-Genauigkeit gibt die Abweichung zwischen einer Sollpose und dem Mittelwert der Istposen an, die sich beim Anfahren der Sollpose aus derselben Richtung ergeben.“ (EN ISO 9283 1998, S. 11)

SCHRÖER 1993, S. 2). Dies entspricht der Identifikation eines geeigneten Robotermodells und wird typischerweise dem eigentlichen Einsatz des Robotersystems vorgelagert.

Ein wesentlicher Vorteil von Kalibrierverfahren ist, dass der eigentliche hardwaretechnische Aufbau und die Funktionsweise des Systems im Betrieb nicht verändert werden. Folglich wird auch die Robustheit des Systems nicht negativ beeinflusst und die Systemkomplexität bleibt erhalten. Lediglich das Robotermodell wird an das Realsystem angenähert und im Betrieb zur Erzielung einer höheren Genauigkeit verwendet (RADKHAH et al. 2010).

Im industriellen Anwendungskontext ergeben sich folgende Herausforderungen für Kalibrierverfahren (LAST et al. 2007):

- Die Anforderungen an die zu erreichende Genauigkeit und der Arbeitsbereich des Robotersystems sind stark von der Anwendung und der Aufgabe abhängig.
- Die zeitliche und räumliche Gültigkeit der Kalibrierung während des Betriebs ist in der Regel unbekannt. Folglich sind eine hohe Systemkenntnis und Erfahrungswissen für die dauerhafte Gewährleistung der Gültigkeit notwendig.
- Die erreichbare Qualität der Kalibrierung ist meist stark vom Erfahrungswissen des Anwenders beziehungsweise der Anwenderin<sup>8</sup> abhängig.
- Überwiegend ist ein hoher manueller Aufwand zur Durchführung der Kalibrierung notwendig.
- Meist ist zusätzliche Systemtechnik zur Kalibrierung notwendig.

Kalibrierverfahren eignen sich prinzipiell zur Steigerung der Pose-Genauigkeit von Robotern. Bedingt durch die anwendungs- und umgebungsspezifischen Anforderungen wird jedoch die breite Anwendung dieser Verfahren insbesondere bei roboterbasierten Koordinatenmesssystemen eingeschränkt.

---

<sup>8</sup>Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird nachfolgend auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für beiderlei Geschlecht.

---

Daher wird in folgender Arbeit ein Kalibrierverfahren zur Befähigung roboterbasierter Koordinatenmesssysteme für den produktionsnahen Einsatz unter Berücksichtigung der oben genannten Herausforderungen adressiert.

## 1.4 Wissenschaftssystematische Einordnung und Aufbau der Arbeit

Diese konstruktive Arbeit mit dem übergeordneten Ziel der Befähigung roboterbasierter Koordinatenmesssysteme durch ein Kalibrierverfahren für den produktionsnahen Einsatz lässt sich den Handlungswissenschaften als Unterklasse der Realwissenschaften zuordnen (P. ULRICH & HILL 1976, S. 305). Das Bestreben der Realwissenschaften hierbei ist es „Wirklichkeitsausschnitte zu explizieren [...], zu generalisieren (verallgemeinernde Abstraktion von Einzelfällen) und Handlungsalternativen zu ihrer Gestaltung zu entwerfen“ (P. ULRICH & HILL 1976, S. 306).

Der grundsätzliche Aufbau der Arbeit ist hypothesenbasiert (TÖPFER 2010, S. 185–186) und baut auf der deduktiven Überprüfung gemäß dem wissenschaftstheoretischen Verständnis des kritischen Rationalismus auf (POPPER 1935, S. 5–7). Hierfür werden, ausgehend von der einleitend dargestellten Fragestellung, zuerst der Stand der Erkenntnisse im Bereich der Kalibrierung von Robotern (Kapitel 2) insbesondere mit Fokus auf Industrieroboter mit einer seriellen Kinematik aufgezeigt. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 der Handlungsbedarf aus dem Stand der Erkenntnisse abgeleitet und damit begründet die Zielsetzung beschrieben. Die zur Erreichung der Zielsetzung notwendigen Lösungsbausteine werden auf Basis theoretischer Überlegungen in Form von drei Hypothesen formuliert. Diese bilden die jeweilige Grundlage für die drei Hauptkapitel (Kapitel 4–6).

Im ersten Hauptkapitel (Kapitel 4) werden mittels eines experimentellen Ansatzes Genauigkeitseinflüsse bei Robotern analysiert. TÖPFER (2010, S. 150–152) bezeichnet dies als exploratorisch-deskriptiven Ansatz. Aufbauend auf den Ergebnissen der Analyse wird auf Basis einer mathematisch-physikalischen Beschreibung ein Robotermodell entwickelt (gemäß TÖPFER (2010, S. 150–153) handelt es sich hierbei um einen explanatorisch-explikativen Ansatz). Das Kapitel schließt mit

der konfirmatorisch-instrumentellen Gültigkeitsbetrachtung zur Validierung der Hypothese (TÖPFER 2010, S. 150–153).

Die zweite Hypothese befasst sich mit der Möglichkeit der Datenaufnahme zur Kalibrierung ohne externe Systemtechnik sowie der Parameteridentifikation (Kapitel 5). Die Realisierbarkeit wird analytisch-deduktiv nachgewiesen und im Rahmen einer empirischen Gültigkeitsbetrachtung im zweiten Hauptkapitel belegt.

Der dritte Bestandteil, die Kompensation und übergreifende Messstrategie (Kapitel 6), sowie die zugrundeliegende Hypothese folgt aus dem deduktiven Schluss aus den ersten beiden Hypothesen. Die Gültigkeit wird am Ende des Kapitels überprüft.

Es folgt die Validierung des Gesamtkonzeptes sowie eine technische und wirtschaftliche Bewertung (Kapitel 7). Eine Zusammenfassung in Kapitel 8 sowie ein Ausblick mit Handlungsempfehlung schließen die Arbeit ab.

## 2 Stand der Erkenntnisse im Bereich der Kalibrierung

Im Kontext der Messtechnik wird als Kalibrierung der Prozess zur Feststellung und Dokumentation der Abweichung eines Messgerätes gegenüber einem Normal verstanden (DIN 1319-1 1995, S. 22). Durch diesen Prozess können die ermittelten Abweichungen nachfolgend bei Messungen berücksichtigt werden. Die Genauigkeit des Messgerätes wird verbessert. Da im Anwendungsfall der roboterbasierten Koordinatenmesstechnik die Pose-Genauigkeit des Roboters in das Messergebnis mit einfließt und maßgeblich die Genauigkeit bestimmt, muss insbesondere die Kalibrierung des Roboters betrachtet werden (LUDWIG 2011, S. 56).

In der Robotik wird der Begriff der Kalibrierung als Überbegriff für die Roboter-, Werkzeug- und Umgebungskalibrierung verwendet (SCHRÖER 1998, S. 172–173). Abbildung 2.1 zeigt schematisch die Klassifizierung der Kalibrierung in der Robotik.

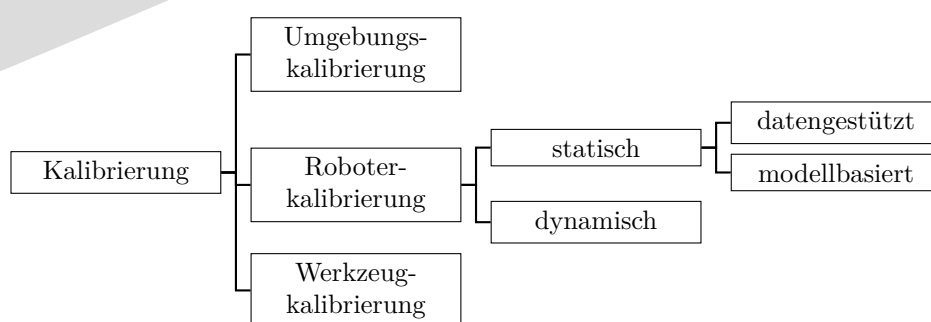


Abbildung 2.1: Begriffliche Unterteilung bei der Kalibrierung von Robotersystemen.

Die Aufgabe der Umgebungskalibrierung ist die Bestimmung der relativen Position und Orientierung des Roboters und Objekten, die am Prozess beteiligt sind, in einem gemeinsamen Bezugskordinatensystem (WIEST 2001, S. 19–20). Die

Werkzeugkalibrierung setzt das Koordinatensystem des Werkzeugs in Bezug zum Flanschkoordinatensystem der letzten Roboterachse (WIEST 2001, S. 18–19). Dieser Bezug wird in Form einer Transformation, bestehend aus Translation und Rotation, beschrieben.

Die Roboterkalibrierung wird zur Steigerung der Pose-Genauigkeit (statische Kalibrierung) oder der Erhöhung der Bahnengenauigkeit (dynamische Kalibrierung) eingesetzt (RADKHAH et al. 2010). Je nach Anwendung ist hierbei die prozessrelevante Zielgröße zu adressieren. Im Kontext der roboterbasierten Koordinatenmesstechnik wird die Datenaufnahme bei flächenhafter Antastung der Prüfbjektoberfläche in einer statischen Sensorpose ausgeführt. Daher ist lediglich die Pose-Genauigkeit Teil des Messergebnisses. Im Folgenden wird daher die statische Roboterkalibrierung für serielle kinematische Ketten betrachtet.

Die statische Roboterkalibrierung wird weiterhin in datengestützte (auch: numerische) und modellbasierte Verfahren unterteilt (ELATTA et al. 2004). Bei den datengestützten Verfahren werden die Abweichungen der Pose im Arbeitsraum des Roboters am Realsystem erfasst. Mittels Interpolation zwischen den erfassten Daten wird auf die Endeffektorpose geschlossen. Aufgrund des hohen messtechnischen Aufwands zur Datenaufnahme sind solche Verfahren wenig verbreitet (WIEST 2001, S. 15–16; BONGARDT 2004, S. 38–39).

Modellbasierte statische Kalibrierverfahren hingegen identifizieren Modellabweichungen auf Basis von am Realsystem erfassten Daten. Hierfür sind typischerweise initial folgende Schritte notwendig (in Anlehnung an WIEST 2001, S. 7–8 und RADKHAH et al. 2010):

- Analyse von Einflussgrößen auf die Pose-Genauigkeit
- Parametrische Modellierung
- Kalibrierdatenaufnahme
- Parameteridentifikation

In Anlehnung an diese Schritte wird in den nachfolgenden Unterkapiteln der Stand der Forschung von Kalibrierverfahren mit Fokus auf den Einsatz bei seriellen kinematischen Ketten betrachtet. Insbesondere werden aufgrund ihrer industriellen Relevanz (IFR STATISTICAL DEPARTMENT 2016, S. 95) hierbei Vertikal-Knickarmroboter hervorgehoben.

## 2.1 Einflüsse auf die Pose-Genauigkeit von seriellen kinematischen Ketten

Die Pose-Genauigkeit von Industrierobotern ist typischerweise um ein Vielfaches schlechter als deren Pose-Wiederholgenauigkeit (M. ULRICH, LUX & PIPREK 2014; BONGARDT 2004, S. 18). Nach WIEST (2001, S. 8), GRÄSER (1999, S. 19) und GOSSEL (1996, S. 17) ist die Pose-Wiederholgenauigkeit auf stochastische Systemabweichungen zurückzuführen und stellt „die untere Schranke für die Verbesserung der absoluten Positioniergenauigkeit“ (WIEST 2001, S. 8) durch Kalibrierverfahren dar.

Bei der Pose-Genauigkeit unterscheidet BONGARDT (2004, S. 19) zwischen mechanischen und steuerungstechnischen Einflüssen. Diese können wiederum in fertigungsbedingte oder betriebsbedingte Einflüsse klassifiziert werden, wobei hier zusätzlich zwischen systematischen und stochastischen Effekten<sup>9</sup> unterschieden wird (ROOS 1998, S. 15; BONGARDT 2004, S. 19). Eine weitere verbreitete Klassifizierungsmöglichkeit ist die Unterscheidung zwischen geometrischen bzw. geometrisch-kinematischen und nicht-geometrischen Einflussgrößen. Diese wird unter anderem von WIEST (2001, S. 7) und SCHRÖER (1993, S. 18, 22–23) verwendet.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die mechanischen und steuerungstechnischen Einflüsse auf die Pose-Genauigkeit in Anlehnung an die Klassifizierung nach BONGARDT (2004, S. 19) dargelegt.

### 2.1.1 Mechanische Einflüsse

Die Steuerung des Roboters bestimmt die Pose auf Basis der im Robotermodell hinterlegten mechanischen Größen. Abweichungen zwischen den mechanischen Eigenschaften des Realsystems und dem Modell führen zu Abweichungen der

---

<sup>9</sup>Die Unterteilung in systematische und stochastische Einflussgrößen ist hierbei jedoch nicht eindeutig. So ordnen GRÄSER (1999, S. 19) und BONGARDT (2004, S. 20) Getriebeispiel beispielsweise den stochastischen Effekten zu, wohingegen GERSTMANN (1991, S. 47–49) und SCHRÖER (1993, S. 114) hierfür abstrahierte Beschreibungsformen entwickeln und folglich als systematisch betrachten.

bestimmten Pose. Nach GRÄSER (1999, S. 19) können mechanische Einflussgrößen der kinematischen Kette, den Getrieben und den Antrieben zugeordnet werden. Tabelle 2.1 stellt die mechanischen Einflüsse auf die Pose-Genauigkeit in komprimierter Form dar.

*Tabelle 2.1: Zusammenfassende Darstellung der mechanischen Einflussgrößen (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an BONGARDT 2004, S. 20).*

		Mechanische Einflüsse		
		Kinematische Kette	Getriebe	Antriebe
fertigungsbedingt	systematisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fertigungstoleranz</li> <li>Montagefehler</li> <li>Justagefehler (Nulllagenfehler)</li> <li>Elastizität der Roboterglieder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Torsionssteifigkeit</li> <li>Übersetzung</li> <li>Exzentrizität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dynamik</li> </ul>
	stochastisch		<ul style="list-style-type: none"> <li>Umkehrspanne</li> <li>Spiel</li> <li>Reibung</li> </ul>	
betriebsbedingt	systematisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperaturbedingte Geometrieabweichungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperaturbedingte bzw. verschleißbedingte Veränderung der Torsionssteifigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erwärmung</li> </ul>
	stochastisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schwingungseinflüsse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperaturbedingte bzw. verschleißbedingte Veränderung des Getriebespiels</li> <li>Temperaturabhängige Reibung</li> </ul>	

## Geometrische Einflüsse

Zu den geometrischen Einflussgrößen zählen alle Größen, welche die geometrischen Beziehungen innerhalb der kinematischen Struktur definieren. Hierbei machen nach SHIAKOLAS et al. (2002) und KLIMCHIK et al. (2012) Fehler der geometrischen Einflussgrößen zur Beschreibung der kinematischen Kette 90 % des Positionierungsfehlers aus.

Diese geometrischen Fehler sind zumeist fertigungsbedingt (KLIMCHIK et al. 2012) und umfassen die Geometrieabweichungen der Roboterglieder, Justagefehler (Nulllagenfehler<sup>10</sup>) sowie Montagefehler und sind daher den systematischen Einflussgrößen zugeordnet (KLIMCHIK et al. 2012; BONGARDT 2004, S. 20; GRÄSER 1999, S. 19).

Nach CHEN et al. (2008) tragen die Nulllagenfehler einen maßgeblichen Teil zur Pose-Genauigkeit bei. Die Autoren verweisen hierbei auf eine fehlerhafte Justage im Rahmen der Inbetriebnahme. BEYER (2005, S. 18) quantifiziert den Nulllagenfehler mit 80 % bis 90 %.

Insbesondere die Geometrie der Roboterglieder unterliegt jedoch auch betriebsbedingten Einflüssen (REINHART et al. 1998; GONG et al. 2000). So zeigt GRÄSER (1999, S. 56–74) den Einfluss von innerer und äußerer Erwärmung auf Geometrieabweichungen der kinematischen Kette. WIEST (2001, S. 8) quantifiziert die Positionsänderung am Endeffektor eines Roboters<sup>11</sup> bei einer Temperaturänderung von 20°C in der Größenordnung von 1 mm, was in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von GRÄSER (1999, S. 71) ist. ELATTA et al. (2004) quantifiziert den Fehlerbeitrag der Temperatureinflüsse auf nur 0,1 %, ohne hierbei jedoch genauere Randbedingungen zu nennen.

## Nicht-geometrische Einflüsse

Zu den nicht-geometrischen Einflüssen gehören Einflussgrößen, welche zu Abweichungen vom idealisierten System aufgrund von wirkenden Kräften und Drehmomenten sowie äußeren Einflüssen führen.

Anhand von Nachgiebigkeitskennlinien<sup>12</sup> von Getrieben identifiziert GERSTMANN (1991, S. 74, 102–103) Übersetzungsfehler, Torsionssteifigkeit bzw. Torsionsnach-

<sup>10</sup> „Unter Nulllagenfehler [!] versteht man die Abweichungen von den nominellen mechanischen Achsnullstellungen.“ (WIEST 2001, S. 30)

<sup>11</sup> Hierbei wird eine 2 m große Roboterstruktur angenommen WIEST (2001, S. 8).

<sup>12</sup> Gemessene Winkelabweichung verglichen mit dem idealisierten Winkel an der Getriebeausgangsseite in Abhängigkeit des anliegenden Drehmoments.

giebigkeit, Spiel bzw. Reststeifigkeit<sup>13</sup>, Hysterese<sup>14</sup> und Gleichlauf<sup>15</sup> als Fehlereinflüsse von Robotergetrieben auf die Pose-Genauigkeit.

SHIAKOLAS et al. (2002) benennen hierbei die Torsionsnachgiebigkeit der Gelenke als größten Faktor nach den geometrischen Einflussgrößen. Nach ELATTA et al. (2004) ist der Beitrag von Nachgiebigkeit der Gelenke und der Strukturelemente 8-10 % des gesamten Positionierungs- und Orientierungsfehler. LIM et al. (2009) hingegen betrachten die Nachgiebigkeit der Strukturelemente im Vergleich zu den geometrischen Einflussgrößen und den Gelenknachgiebigkeiten als vernachlässigbar.

Das Spiel in den Gelenken wird neben der Torsionsnachgiebigkeit von SLAMANI, NUBIOLA et al. (2012b) als wichtiger Einflussfaktor identifiziert. ELATTA et al. (2004) beziffern den Einfluss von Spiel in den Gelenken auf die Pose-Genauigkeit mit 0,5-1,0 %. Im Gegensatz zu GERSTMANN (1991, S. 74) wird von SLAMANI, NUBIOLA et al. (2012b) die Auswirkung von Spiel in den Gelenken in Abhängigkeit der Anfahrtrichtung und der TCP-Geschwindigkeit zur Erreichung der Zielpose beschrieben. Diese korreliert wiederum mit den Drehrichtungen der Gelenke (TAEK OH 2011).

Der Einfluss des Gleichlaufs bei Getrieben auf die Pose-Genauigkeit konnte bei den Untersuchungen von SCHRÖER (1993, S. 115) an verschiedenen Robotersystemen nicht nachgewiesen werden.

In Verbindung mit einer kinematischen Kopplung (HAYAT et al. 2013; SCHRÖER 1993, S. 111) der Antriebselemente bewirken Getriebeeffekte eine Fehlstellung der Gelenke und folglich eine Abweichung zwischen Modell und Realsystem.

---

<sup>13</sup>Spielfreie Getriebe „weisen [...] häufig eine stark ausgeprägte Nichtlinearität der Nachgiebigkeitskennlinie auf. Bei kleinen Momenten sind geringe Steifigkeiten festzustellen, die [...] als Reststeifigkeiten [...] bezeichnet werden.“ (GERSTMANN 1991, S. 74)

<sup>14</sup>„Das Maß für die Hysterese wird [...] abweichend von der üblichen Vorgehensweise als Differenz der Winkelstellungen vor Beginn der Belastung und nach Entlastung ermittelt.“ (GERSTMANN 1991, S. 74)

<sup>15</sup>„Unter dem Gleichlauf eines Getriebes wird verstanden, daß in jeder Winkelstellung der Antriebs- und Abtriebswelle exakt dasselbe Übersetzungsverhältnis vorliegt.“ (GERSTMANN 1991, S. 102)

Reibungseffekte können im Rahmen detaillierterer Beschreibungen, wie beispielsweise von BITTENCOURT & AXELSSON (2014) gezeigt, als teilweise systematisch betrachtet werden.

Durch externe, gravitationsinduzierte und durch die kinematische Struktur (beispielsweise durch ein Gewichtsausgleichssystem) eingebrachte Kräfte treten Deformationen der Kinematikelemente auf, welche den nicht-geometrischen Einflüssen zugeordnet werden können.

Die Pose-Genauigkeit bezieht sich auf die statische Pose, kann jedoch durch Schwingungseinflüsse (externe Anregung bzw. Ausschwingverhalten nach einer Bewegung) beeinflusst werden.

Betriebsbedingte Veränderungen des Roboterhaltens treten maßgeblich durch Temperaturänderungen (beispielsweise „Aufwärm- und Abkühlvorgänge beim Betriebsstart oder im Aussetzbetrieb“ nach BONGARDT 2004, S. 22) und nutzungsbedingten Verschleiß der Komponenten auf.

### 2.1.2 Steuerungstechnische Einflüsse

Steuerungstechnische Einflüsse lassen sich nach BONGARDT (2004, S. 21–22) der Sensorik, Steuerungshardware und Steuerungssoftware zuordnen. Tabelle 2.2 fasst in Anlehnung an BONGARDT (2004, S. 20) die Einflussgrößen zusammen.

Für die Pose-Genauigkeit sind nach BONGARDT (2004, S. 22) bei aktuellen Industrierobotern maßgeblich die Fehlereinflüsse aus vereinfachten Modellen sowie aus Parameterabweichungen des Modells zu „den entsprechenden Größen des realen Roboters“ (BONGARDT 2004, S. 22) relevant und somit softwareseitig anzusiedeln. Nach SHIAKOLAS et al. (2002) beeinflusst darüber hinaus die Auslegung der Regelung das Anfahrverhalten und damit die Genauigkeit.

Hardwareeinflüsse sind bei statischen Genauigkeitskenngrößen insbesondere durch die Sensorcharakteristika geprägt. Der Sensorauflösung kommt hierbei nach WIEST (2001, S. 8) „kein signifikanter Fehlereinfluß zu.“

Tabelle 2.2: Zusammenfassende Darstellung der steuerungstechnischen Einflussgrößen (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an BONGARDT 2004, S. 20).

		Steuerungstechnische Einflüsse	
		Software	Hardware
fertigungs- bedingt	systematisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parameterabweichungen</li> <li>• Modellvereinfachungen</li> <li>• Regelung</li> <li>• Abweichung in Last- oder Werkzeugdaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Linearität der Sensorik</li> <li>• Abtastrate der Sensorik</li> <li>• Nulllagenfehler</li> <li>• Interpolationstaktrate</li> </ul>
	stochastisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rundungsfehler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auflösung der Sensorik</li> </ul>
betriebs- bedingt	systematisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parameterabweichungen</li> <li>• Modellvereinfachungen</li> </ul>	
	stochastisch		

## 2.2 Parametrische Modellierung

Das Ziel der parametrischen Modellierung ist eine mathematische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den Zustandsgrößen eines Robotersystems und dessen Systemverhalten. Hierbei wird ein System durch die Parameter charakterisiert (ELATTA et al. 2004). Die parametrische Modellierung ist folglich für eine Vielzahl an typgleichen Robotersystemen gültig.

Nach ELATTA et al. (2004) kann im Rahmen der parametrischen Modellierung zwischen der kinematischen (auch geometrischen) und der nicht-kinematischen (auch nicht-geometrischen) Modellierung unterschieden werden.

### 2.2.1 Kinematische Modellierung

Die kinematische Modellierung umfasst die parametrisierte Beschreibung der kinematischen Kette bestehend aus Gelenken und Verbindungselementen, wobei diese idealisiert angenommen werden (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 18–19).

Mathematisch entspricht dies der parametrisierten Vorwärtstransformation  ${}_{Kin}^B\mathbf{T}_E : C \times \mathbb{R}^N \rightarrow M, (\vec{\theta}, \vec{p}) \mapsto {}_{Kin}^B\mathbf{T}_E(\vec{\theta}, \vec{p})$ , wobei  $\vec{p} \in \mathbb{R}^N$  der Parametervektor,  $\vec{\theta} \in C$  ein Punkt im Konfigurationsraum und  ${}_{Kin}^B\mathbf{T}_E$  die Pose des Endeffektors in einem Bezugskoordinatensystem beschreibt (MURRAY et al. 1994, S. 84). Die Menge  $M \subset SE(3)$  entspricht hierbei der Gesamtheit der erreichbaren Endeffektorposen im kartesischen Arbeitsraum  $W$  eines Roboters mit dem Bezugskoordinatensystem  $K_B$  (MURRAY et al. 1994, S. 95). Das Endeffektorkoordinatensystem sei  $K_E$ .

Hierfür wird jedem Roboterglied ein körperfestes Koordinatensystem zugeordnet und die Transformationen zwischen diesen bestimmt (WIEST 2001, S. 28). Die Roboterglieder werden hierbei als Starrkörper betrachtet (SCHRÖER 1993, S. 7) und die Koordinatensysteme konventionsgemäß so gewählt, dass die z-Achse mit der Rotationsachse des nachfolgenden rotatorischen Gelenks übereinstimmt.

Aus Gründen der einfachen Berechnung und Nachvollziehbarkeit haben sich insbesondere mathematische Formulierungen in homogenen Koordinaten<sup>16</sup> zur Beschreibung dieser Koordinatensysteme etabliert. Hierbei kann durch multiplikative Verkettung von Einzeltransformationen zwischen aufeinanderfolgenden Gelenken eine Transformation entlang der kinematischen Kette beschrieben werden.

Für serielle kinematische Ketten mit  $q$  Achsen gilt für die Transformation zwischen dem Bezugs- und Endeffektorkoordinatensystem Gleichung 2.1 (KHALIL & DOMBRE 2006, S. 48).

$${}_{Kin}^B\mathbf{T}_E(\vec{\theta}) = {}^B\mathbf{T}_0 \cdot \prod_{i=0}^{q-1} {}^i\mathbf{T}_{i+1}(\vec{\theta}) \cdot {}^q\mathbf{T}_E \quad (2.1)$$

Eine Transformation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Gelenken einer kinematischen Kette kann hierbei anhand unterschiedlicher Konventionen parametrisiert werden (ELATTA et al. 2004; WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 23). Diese unterscheiden sich maßgeblich durch die Parameteranzahl und Sequenz der Transformation.

<sup>16</sup>Die Grundlagen und Beschreibung von Transformationen zwischen Koordinatensystemen auf Basis von homogenen Koordinaten kann dem Anhang in Abschnitt A.2.3 entnommen werden.

Nach SCHRÖER (1993, S. 29) müssen hierbei im Kontext der Kalibrierung folgende Anforderungen erfüllt sein:

- Vollständigkeit
- Stetigkeit der Parametrisierung
- Minimalität der Parametrisierung

Im Rahmen der kinematischen Modellierung bedeutet Vollständigkeit, dass alle geometrischen Relationen zweier aufeinanderfolgenden Gelenke durch einen Satz Parameter charakterisiert werden können (SCHRÖER et al. 1997).

Die Forderung nach Stetigkeit der Parametrierung ist insbesondere im Rahmen der Parameteridentifikation durch numerische Optimierungsverfahren notwendig. Hierbei darf eine kleine Abweichung der Pose nur auf eine kleine Parameterabweichung zurückzuführen sein. Formal kann dieses Kriterium durch die Betrachtung des Rangs der Jacobi-Matrix<sup>17</sup> der beschreibenden Transformation überprüft werden (SCHRÖER et al. 1997).

Die Minimalität der kinematischen Parametrierung lässt sich durch die Betrachtung der Freiheitsgrade des Roboterglieds und den Gelenkarten bestimmen. So sind für die Beschreibung eines rotatorischen Gelenks mindestens vier und eines translatorischen Gelenks mindestens zwei Parameter notwendig. Nach SCHRÖER et al. (1997) ergibt sich daher für eine kinematische Kette mit  $q_r$  rotatorischen und  $q_t$  translatorischen Achsen eine minimale Anzahl  $n_{kin,min} = 4q_r + 2q_t + 6$  an notwendigen Parametern. Sechs Parameter entfallen hierbei auf die Beschreibung der Transformation zwischen dem letzten Roboterglied und dem Endeffektorkoordinatensystem.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die relevanten Konventionen zur kinematischen Modellierung dargestellt.

---

<sup>17</sup>Hierbei ist die Jacobi-Matrix im mathematischen Sinne als Matrix der partiellen Ableitungen der Endeffektorpose nach den Parametern gemeint.

## Denavit-Hartenberg-Konvention

Die Transformation nach DENAVIT & HARTENBERG (1955) (Denavit-Hartenberg-Transformation, DH-Transformation) gilt bei der Berechnung der Vorwärtskinematik von kinematischen Ketten als Standardverfahren (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 23).

Gemäß der DH-Konvention gilt für die verwendeten Koordinatensysteme einer seriellen Kinematik (PAUL 1992, S. 51):

- Die  $\hat{z}_{i-1}$ -Achse liegt entlang der Rotations- / Translationsachse des Gelenkes  $i$ . Dabei entspricht die Richtung der  $\hat{z}_{i-1}$ -Achse der positiven Drehrichtung beziehungsweise der positiven Verschiebungsrichtung des Gelenks.
- Die  $\hat{x}_i$ -Achse hat die Orientierung  $\hat{x}_i = \hat{z}_{i-1} \times \hat{z}_i$ .
- Jedes Koordinatensystem ist rechtshändig.

Die Transformationen werden auf Basis von vier Parametern, den sogenannten Denavit-Hartenberg-Parametern, definiert und setzen sich aus den folgenden vier Einzeltransformationen zusammen (PAUL 1992, S. 53):

- Rotation um  $\theta_i$  um die  $\hat{z}_{i-1}$ -Achse
- Translation um  $d_i$  entlang der  $\hat{z}_{i-1}$ -Achse
- Translation um  $a_i$  entlang der  $\hat{x}_i$ -Achse
- Rotation um  $\alpha_i$  um die  $\hat{x}_i$ -Achse

Es handelt sich folglich um ein Verfahren mit minimalem Parametersatz (SCHRÖER et al. 1997).

Die resultierende DH-Transformation setzt sich aus dem Produkt der Einzeltransformationen zusammen und ist in den Gleichungen 2.2a<sup>18</sup> und 2.2b<sup>19</sup> dargestellt

<sup>18</sup>Die homogenen Matrizen für eine Rotation um einen beliebigen Einheitsvektor sowie für eine Translation können dem Anhang in Abschnitt A.2.3 entnommen werden.

<sup>19</sup>Für eine übersichtlichere Darstellung werden die Kurzformen  $c_\xi = \cos(\xi)$  und  $s_\xi = \sin(\xi)$  verwendet.

(PAUL 1992, S. 53).

$${}^{i-1}_{DH}\mathbf{T}_i = \mathbf{Rot}(\hat{z}_{i-1}, \theta_i) \cdot \mathbf{Trans}(d_i \cdot \hat{z}_{i-1}) \cdot \mathbf{Trans}(a_i \cdot \hat{x}_i) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{x}_i, \alpha_i) \quad (2.2a)$$

$$= \left( \begin{array}{ccc|c} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad (2.2b)$$

Bei zwei aufeinanderfolgenden, parallelen Achsen ergibt eine Unstetigkeit hinsichtlich der Parameter (SCHRÖER et al. 1997).

### Hayati-Mirmirani-Konvention

Um Parameterunstetigkeiten bei nahezu parallelen, aufeinanderfolgenden Achsen zu verhindern, existiert die Konvention nach HAYATI & MIRMIRANI (1985) (Hayati-Mirmirani-Konvention, HM-Konvention), welche sich aus drei Rotationen und einer Translation zusammensetzt (HAYATI 1983):

- Rotation um  $\theta_i$  um die  $\hat{z}_{i-1}$ -Achse
- Translation um  $a_i$  entlang der  $\hat{x}_i$ -Achse
- Rotation um  $\alpha_i$  um die  $\hat{x}_i$ -Achse
- Rotation um  $\beta_i$  um die  $\hat{y}_i$ -Achse

Analog zur DH-Konvention handelt es sich folglich um eine Beschreibung mittels vier Parametern. Gleichungen 2.3a und 2.3b beschreiben die zusammengesetzte Transformation (SCHRÖER et al. 1997).

$${}^{i-1}_{HM}\mathbf{T}_i = \mathbf{Rot}(\hat{z}_{i-1}, \theta_i) \cdot \mathbf{Trans}(a_i \cdot \hat{x}_i) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{x}_i, \alpha_i) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{y}_i, \beta_i) \quad (2.3a)$$

$$= \left( \begin{array}{ccc|c} c_{\theta_i}c_{\beta_i} - s_{\theta_i}s_{\alpha_i}s_{\beta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & c_{\theta_i}s_{\beta_i} + s_{\theta_i}s_{\alpha_i}c_{\beta_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i}c_{\beta_i} + c_{\theta_i}s_{\alpha_i}s_{\beta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\beta_i} - c_{\theta_i}s_{\alpha_i}c_{\beta_i} & a_i s_{\theta_i} \\ -c_{\alpha_i}s_{\beta_i} & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i}c_{\beta_i} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad (2.3b)$$

## Veitschegger-Wu-Konvention

Die Konvention nach VEITSCHEGGER & C.-H. WU (1986) (Veitschegger-Wu-Konvention, VW-Konvention) kombiniert die beiden Vorgehen nach DH und HM. Hierdurch werden, wie bei der HM-Konvention, Parameterunstetigkeiten bei parallelen, aufeinanderfolgenden Achsen vermieden (VEITSCHEGGER & C.-H. WU 1988). Die Beschreibung verwendet hierbei fünf Parameter und ist folglich nicht minimal. Die resultierende Transformation ist in den Gleichungen 2.4a und 2.4b gegeben (VEITSCHEGGER & C.-H. WU 1986; SCHRÖER et al. 1997).

$${}^{i-1}_{VW}\mathbf{T}_i = {}^{i-1}_{DH}\mathbf{T}_i(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{y}_i, \beta_i) \quad (2.4a)$$

$$= \left( \begin{array}{ccc|c} c_{\theta_i} c_{\beta_i} - s_{\theta_i} s_{\alpha_i} s_{\beta_i} & -s_{\theta_i} c_{\alpha_i} & c_{\theta_i} s_{\beta_i} + s_{\theta_i} s_{\alpha_i} c_{\beta_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} c_{\beta_i} + c_{\theta_i} s_{\alpha_i} s_{\beta_i} & c_{\theta_i} c_{\alpha_i} & s_{\theta_i} s_{\beta_i} - c_{\theta_i} s_{\alpha_i} c_{\beta_i} & a_i s_{\theta_i} \\ -c_{\alpha_i} s_{\beta_i} & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} c_{\beta_i} & d_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad (2.4b)$$

## Weitere Konventionen

Als eine alternative Erweiterung der DH-Beschreibung wird von STONE, SANDERSON & NEUMAN (1986) die Verwendung von sechs Parametern vorgeschlagen. Das sogenannte S-Modell setzt sich hierbei aus den Teiltransformationen der DH-Transformation und einer zusätzlichen Rotation um die  $\hat{z}_i$ -Achse sowie einer Verschiebung an ihr entlang zusammen (STONE, SANDERSON & NEUMAN 1986; STONE & SANDERSON 1988).

BROCKETT (1984) nutzt zur Beschreibung von kinematischen Ketten das Produkt von Exponentialfunktionen („product of exponentials“, POE) basierend auf der Schraubentheorie, wobei translatorische und rotatorische Gelenke einheitlich beschreibbar sind.

Das Nullreferenzmodell („zero-reference model“, MOORING et al. 1991, S. 49–50) basiert auf der Rodrigues-Formel und beschreibt die Orientierung der Achsen eines Roboters als Richtungsvektoren und deren Positionierung als Punkte in einem Referenzkoordinatensystem.

Speziell für die Kalibrierung entwickeln ZHUANG, ROTH et al. (1992) eine vollständige und parameterstetige („completeness and parametric continuity“, CPC) Modellierung. Hierfür wird eine vierparametrische Linienrepräsentation um zwei Parameter zur Positionierung erweitert.

Darüber hinaus sind in der Literatur weitere, spezielle Konventionen unter Verwendung von mehr als sechs Parametern zu finden (MOORING et al. 1991, S. 48–49).

Als weitere Formen der Darstellung von Transformationen werden Quaternionen (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 13), Beschreibungen mittels Geometrischer Algebra („Geometric Algebra“, DORST et al. 2010, S. 420–422) sowie Konformaler Geometrie Algebra („Conformal Geometric Algebra“, HILDENBRAND 2006, S. 70–81) vorgeschlagen.

### 2.2.2 Modellierung nicht-geometrischer Einflussgrößen

In Abhängigkeit der anwendungsseitigen Genauigkeitsanforderungen an ein Robotersystem müssen nicht-geometrische Effekte für eine adäquate Modellierung berücksichtigt werden. Insbesondere die Beschreibung der Getriebecharakteristika und die Elastizität von Strukturelementen des Roboters werden hierbei betrachtet.

Die meisten Modellierungen, welche nicht-geometrische Einflüsse berücksichtigen, verwenden vereinfachte Beschreibungen der Nachgiebigkeit der Gelenke. SCHRÖER (1993, S. 113–114), LIM et al. (2009) und GONG et al. (2000) basieren auf einem linearisierten Modell zur Beschreibung der Getriebeachgiebigkeit ohne Berücksichtigung von Hystereseeffekten.

Detailliertere Beschreibungen von Getriebecharakteristika sind beispielsweise in ZHANG et al. (2015) und GERSTMANN (1991, S. 73–75) zu finden, wobei die Integration in eine Robotermodellierung hierbei nicht betrachtet wird. ZHANG et al. (2015) entwickeln speziell für Wellgetriebe (engl.: Harmonic Drive) ein Modell unter Berücksichtigung einer nicht-linearen Nachgiebigkeit<sup>20</sup> und Hysterese.

---

<sup>20</sup>ZHANG et al. (2015) verwenden hierbei eine Arkustangensfunktion, um eine zunehmende Steifigkeit bei größeren Drehmomenten abzubilden.

GERSTMANN (1991) betrachtet neben dem Übersetzungsfehler, der Nachgiebigkeit und der Hysterese zusätzlich Einflüsse durch Spiel bzw. Reststeifigkeiten und Gleichlauf (GERSTMANN 1991, S. 102–103).

Der Einfluss von Getriebespiel wird von GERSTMANN (1991, S. 73) und SCHRÖER (1993, S. 114) in Abhängigkeit des wirkenden Drehmoments beschrieben. SCHRÖER (1993, S. 114) verwendet hier eine Sprungfunktion an der Stelle des Richtungswechsels des Drehmoments. GERSTMANN (1991, S. 73) beschreibt das Verhalten mit Hilfe geringer Steifigkeit in einem Bereich kleiner Drehmomente (Reststeifigkeit). Im Gegensatz hierzu existieren Ansätze, welche das Spiel in Abhängigkeit der Anfahrriechtung (SLAMANI, NUBIOLA et al. 2012b) und der Drehrichtung der Achse charakterisieren (TAEK OH 2011).

Einflüsse des Gleichlaufs bei Getrieben werden von GERSTMANN (1991, S. 102–103) an isolierten Getrieben gezeigt und von SCHRÖER (1993, S. 116) als eine periodische Schwankung des Übersetzungsverhältnis beschrieben. SCHRÖER (1993, S. 115) weist jedoch darauf hin, dass der Einfluss des Gleichlaufs an Robotern nicht nachgewiesen werden konnte.

Am System auftretende Kräfte und Drehmomente wirken sich neben den Getrieben auf die Geometrie der Strukturelemente aus. SCHRÖER (1993, S. 152–153) schlägt zur Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der einzelnen Glieder elastische Balken- und Plattenersatzmodelle vor. Neben vereinfachten Ersatzmodellen existieren auch Betrachtungen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) des Elastizitätsverhaltens.

## 2.3 Kalibrierdatenaufnahme

Die Kalibrierdatenaufnahme befasst sich mit der Erfassung von Daten am Real-system, welche einen Rückschluss auf das Robotermodell erlauben.

Gegeben sei ein parametrisiertes, nicht-lineares Robotermodell mit  $N$  Parametern und der Vorwärtstransformation  ${}^B_{Rob}\mathbf{T}_E : C \times \mathbb{R}^N \rightarrow M, (\vec{\theta}, \vec{p}) \mapsto {}^B_{Rob}\mathbf{T}_E(\vec{\theta}, \vec{p})$ , wobei  $\vec{p} \in \mathbb{R}^N$  der Parametervektor,  $\vec{\theta} \in C$  ein Punkt im Konfigurationsraum und  ${}^B_{Rob}\mathbf{T}_E$  die Pose des Endeffektors in einem Bezugskoordinatensystem beschreibt.

Da die Transformationsmatrix  ${}_{Rob}^B \mathbf{T}_E \in SE(3)$  die Position und Orientierung des Endeffektors beschreibt, kann unter Festlegung einer Konvention für die Angabe der Orientierung eine vektorielle Funktion  $\vec{f}_E : C \times \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^6, (\vec{\theta}, \vec{p}) \mapsto \vec{f}_E(\vec{\theta}, \vec{p})$  bestimmt werden (SCHRÖER et al. 1997; HOLLERBACH & WAMPLER 1996). Für eine Roboterkonfiguration  $i$  mit den Gelenkstellungen  $\vec{\theta}_i$  kann die Endeffektorpose  $\vec{h}_i \in \mathbb{R}^6$  nach Gleichung 2.5 in Abhängigkeit von den Modellparametern bestimmt werden, wobei  $\vec{\varepsilon}_i$  einem Fehlerterm entspricht (SUN & HOLLERBACH 2008).

$$\vec{h}_i = \vec{f}_E(\vec{\theta}_i, \vec{p}) + \vec{\varepsilon}_i \quad (2.5)$$

Ein Set von  $m$  Konfigurationen kann folglich durch Kombination der jeweiligen Berechnungsgleichungen 2.5 als Gleichungssystem 2.6 dargestellt werden (HOLLERBACH, KHALIL et al. 2008, S. 322).

$$\vec{H} = \begin{pmatrix} \vec{h}_1 \\ \vdots \\ \vec{h}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{f}_E(\vec{\theta}_1, \vec{p}) \\ \vdots \\ \vec{f}_E(\vec{\theta}_m, \vec{p}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \vec{\varepsilon}_1 \\ \vdots \\ \vec{\varepsilon}_m \end{pmatrix} = \vec{F}(\vec{\Theta}, \vec{p}) + \vec{\varepsilon} \quad (2.6)$$

Hierbei entspricht  $\vec{\Theta} = (\vec{\theta}_1 \dots \vec{\theta}_m)^T$  dem Vektor der  $m$  Konfigurationen des Sets. Ziel der Kalibrierdatenaufnahme ist die messtechnische Erfassung von Realdaten am Robotersystem, sodass die Bestimmung geeigneter Modellparameter  $\vec{p}^*$  unter Erfüllung des Gleichungssystems 2.6 möglich ist. Hierfür müssen Messverfahren mit zugehörigen Messsystemen festgelegt und geeignete Roboterkonfigurationen (Kalibrierkonfigurationen) identifiziert werden (JOUBAIR et al. 2016). Aufgrund der notwendigen Bewegung des Roboters müssen darüber hinaus Verfahren der Bahnplanung von Robotern betrachtet werden.

Nach ELATTA et al. (2004) ist die Kalibrierdatenaufnahme der schwierigste und zeitaufwendigste Prozessschritt der Kalibrierung. Existierende Ansätze zur Datenaufnahme weisen hierbei folgende Nachteile auf (ELATTA et al. 2004):

- Die Einrichtung der Messtechnik erfordert einen hohen Personalaufwand und ist nicht für die Kalibrierung in industriellen Umgebungen geeignet.
- Es ist Fachpersonal zur Bedienung der Messtechnik notwendig.
- Die Datenaufnahme ist zeitaufwendig und schwierig zu automatisieren.
- Die Großzahl an Messsystemen ist lediglich für den Einsatz unter Laborbedingungen konzipiert.

### 2.3.1 Messverfahren

Nach HOLLERBACH & WAMPLER (1996) können Messverfahren zur Erfassung von Kalibrierdaten auf Basis der zugrunde liegenden Messkette klassifiziert werden. Es wird hierbei zwischen Achsvermessungen („Screw-axis measurement methods“), Kalibrierverfahren mit offenen, kinematischen Ketten („Open-loop methods“) und Kalibrierverfahren mit geschlossenen, kinematischen Ketten („Closed-loop methods“) unterschieden.

HOLLERBACH & WAMPLER (1996) zeigen jedoch auch, dass bei der mathematischen Formulierung der Problemstellung sich die beiden letzten Verfahren nicht unterscheiden und in diesem Zusammenhang vereinheitlicht werden können.

#### Achsvermessungen

Ein direktes, auf Schraubentheorie beruhendes Verfahren zur Bestimmung einer kinematischen Struktur ist nach HOLLERBACH & WAMPLER (1996) die Einzelachsvermessung („circle point analysis“). Hierbei werden einzelne Achswinkel unter Beobachtung der Endeffektorposition variiert und auf die Achslage zurückgeschlossen (WIEST 2001, S. 14–15). Nach SCHRÖER et al. (1997) ist jedoch die Annahme, dass bei der Betrachtung einer Achse lediglich die Fehlereinflüsse dieser beobachtet werden, beispielsweise durch Torsionsnachgiebigkeit und kinematische Kopplungen verletzt.

Eine Einzelachsvermessung auf Basis einer POE-Beschreibung des Roboters unter Verwendung von Theodoliten wird von H. WANG, SHEN et al. (2012) gezeigt.

H. WANG, LU et al. (2015) verwenden eine robotergeführte Kamera, welche sich bei Einzelachsbewegungen zu einem im Arbeitsraum positionierten Referenzmuster („Schachbrettmuster“) unter Verwendung eines Spiegels referenziert. Die Autoren zeigen, dass hierdurch die Parametrierung des Robotermodells verbessert werden kann.

Ein weiteres Verfahren, welches der Gruppe der Achsvermessungen zugeordnet wird, ist die Messung von Endeffektorgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Achswinkelgeschwindigkeiten (HOLLERBACH & WAMPLER 1996). Hierbei können alle Rotationsachsen simultan bewegt und ermittelt werden.

## Kalibrierverfahren mit offenen kinematischen Ketten

Bei Open-Loop-Kalibrierverfahren werden die Gelenkstellungen roboterseitig und die Endeffektorposen  $\vec{H}_{ext}$  vollständig oder partiell durch ein externes Messsystem im Bezugskoordinatensystem gemessen (DERFLING 2013, S. 38–39). Für die Kalibrierung ist folglich zusätzliche Systemtechnik notwendig. Eine Kalibrierkonfiguration im Kontext dieser Arbeit entspricht folglich der Kombination aus am Realsystem erfasster Endeffektorpose und korrelierender Roboterkonfiguration.

Sei  $b_{ext}$  die Anzahl der erfassten Freiheitsgrade der Endeffektorpose,  $m$  die Anzahl der gemessenen Endeffektorposen und  $N$  die Anzahl der Parameter. Bei einer ausreichend hohen Anzahl an gemessenen Posen ( $m > \frac{N}{b_{ext}}$  mit  $1 \leq b_{ext} \leq 6$ ) ergibt sich in Abhängigkeit der Parameteranzahl gemäß Gleichung 2.7 ein überbestimmtes Gleichungssystem.

$$\vec{H}_{ext} = \vec{F}_{open}(\vec{\Theta}, \vec{p}) \quad (2.7)$$

Es existieren eine Vielzahl an Open-Loop-Kalibrierverfahren, welche sich maßgeblich durch die verwendete Messtechnik zur Erfassung der Endeffektorpose unterscheiden. Zu den betrachteten Messsystemen gehören beispielsweise Lasertracker (PRENNINGER et al. 1995; SLAMANI, JOUBAIR et al. 2015; NUBIOLA, SLAMANI et al. 2014; NUBIOLA & BONEV 2013; KAMALI et al. 2016), optische Koordinatenmesssysteme (NUBIOLA, SLAMANI et al. 2014), Theodoliten (KHALIL & DOMBRE 2006, S. 287), Inertialsysteme, kamerabasierte Messsysteme (MOTTA et al. 2001; Y. MENG & ZHUANG 2007), Seilzüge (WIEST 2001, S. 85–88) und externe Messarme (W. WANG et al. 2014). Auch die kombinierte Verwendung von Messsystemen, wie beispielsweise die Kombination von photogrammetrischen Messsystemen mit Inertialsensoren bei JANOCHA & DIEWALD (1995), wird vorgeschlagen.

## Kalibrierverfahren mit geschlossenen kinematischen Ketten

Closed-Loop-Kalibrierverfahren hingegen betrachten redundante kinematische Ketten mit räumlich fixiertem Endeffektor. BENNETT & HOLLERBACH (1988) adressieren hierfür serielle kinematische Ketten mit mindestens sieben Freiheitsgraden oder zwei seriellen Ketten mit verbundenen Endeffektoren. Hierdurch

entfällt die Notwendigkeit eines externen Messsystems zur Bestimmung der (partiellen) Endeffektorpose. Da der Ursprung des Bezugskoordinatensystems beliebig positioniert werden kann, beschreibt Gleichung 2.8 ohne Einschränkung der Allgemeinheit die Vorwärtstransformation einer geschlossenen, kinematischen Kette.

$$\vec{0} = \vec{F}_{closed}(\vec{\Theta}, \vec{p}) \quad (2.8)$$

Analog zu einer extern gemessenen Endeffektorpose können nur Komponenten der Pose beschränkt werden (BENNETT & HOLLERBACH 1991). Nach BENNETT & HOLLERBACH (1989) ist dies oftmals für serielle Ketten, welche mit der Umwelt physisch interagieren, gültig.

Nachteilig bei Closed-Loop-Kalibrierverfahren ist die Einbringung von Kräften (WIEST 2001, S. 14) durch die Fixierung sowie die Tatsache, dass nicht alle Parameter aufgrund der Skalierungsinvarianz<sup>21</sup> (BENNETT & HOLLERBACH 1989) der kinematischen Kette bestimmt werden können.

### Vereinheitlichung von Kalibrierverfahren mit offenen und geschlossenen kinematischen Ketten

HOLLERBACH & WAMPLER (1996) vereinheitlichen Open-Loop- und Closed-Loop-Verfahren durch Auffassung von externen Messungen als Robotergelenk mit gemessenen Freiheitsgraden. Die kinematische Kette wird folglich durch die externe Messung im Bezugskoordinatensystem als Randbedingung geschlossen. Das Gleichungssystem 2.9 kann analog zur Bestimmungsgleichung einer geschlossenen kinematischen Kette formuliert werden.

$$\vec{0} = \vec{H}_{ext} - \vec{F}_{open}(\vec{\Theta}, \vec{p}) = \vec{F}'_{closed}(\vec{\Theta}, \vec{p}) \quad (2.9)$$

Dementsprechend können Messungen, welche einen Bezug zwischen dem Endeffektor und einem Bezugsobjekt (Referenzobjekt bzw. Artefakt) herstellen, auch als geschlossene kinematische Ketten betrachtet werden.

<sup>21</sup>Winkel sind invariant gegenüber Skalierung. Werden bei Kalibrierverfahren mit geschlossenen kinematischen Ketten lediglich Winkelbeziehungen erfasst, existieren im Allgemeinen beliebig viele Lösungen, welche sich hinsichtlich eines Skalierungsfaktors unterscheiden.

GAUDREAU et al. (2016) entwickeln in diesem Zusammenhang ein robotergeführtes, tastendes Messsystem, welches mit im Arbeitsraum positionierten Präzisionskugeln und einer entsprechenden Lageregelung des Endeffektors eine geschlossene kinematische Kette bilden kann. Hierbei werden die Positionen der Kugeln als bekannt vorausgesetzt und das Messsystem lässt sich als Kugelgelenk der kinematischen Kette auffassen. Die regelungstechnische Realisierung eines Kugelgelenks wird auch von ŠVACO et al. (2014) vorgeschlagen, wobei hierbei die messtechnische Erfassung mittels eines Stereokamerasystems betrachtet wird.

Das messtechnische Schließen der kinematischen Kette anhand kugelförmiger Artefakte wird auch von LETTENBAUER (2002, S. 42–43) gezeigt, wobei hier die Positionen der Kugeln nicht als bekannt vorausgesetzt werden. LETTENBAUER (2002, S. 50–54) entwickelt zur Bestimmung der Referenzpunkte ein robotergeführtes Messwerkzeug.

WATANABE et al. (2006) verwenden eine robotergeführte Kamera und ein Referenzobjekt, wobei die Sichtachse der Kamera stets auf das Referenzobjekt ausgerichtet ist, um eine geschlossene kinematische Kette zu erzeugen. Ein ähnlicher Ansatz wird von YIN, REN, ZHU et al. (2013) für den Einsatz bei roboterbasierten Messsystemen vorgeschlagen. Hierbei werden Artefakte als Referenzpunkte und ein 2D-Lasertriangulationssensor verwendet, um iterativ die Roboterkonfiguration bis zur Erfüllung der Fixpunktbedingung zu adaptieren. Die so realisierte geschlossene kinematische Kette wird anschließend zur Identifikation der Modellparameter verwendet. Dieser Ansatz wird von YIN, REN, GUO et al. (2014) durch die Entwicklung eines optischen 3D-Sensors, bestehend aus einer hochgenauen Linearachse und einem 2D-Lasertriangulationssensor, erweitert. Hierbei werden kugelförmige Artefakte als Referenzpunkte verwendet.

Darüber hinaus existieren verschiedene Ansätze, bei denen eine Laserquelle mit punktförmiger Strahlung durch den Roboter geführt und durch externe Messsysteme erfasst wird (ISIOS GMBH 2019). GATLA et al. (2007) verwenden hierfür Kamerasysteme, wohingegen LIU & XI (2011) und NIEVES et al. (2013) positions- und richtungsempfindliche Messtechnik entwickeln.

Werden die Freiheitsgrade des TCPs einer seriellen, offenen Kette auf eine Ebene beschränkt (engl.: plane constrained), kann dies formal analog als partiell geschlossene Kette formuliert werden (IKITS & HOLLERBACH 1997). ZHONG & LEWIS

(1995) verwenden einen durch den Roboter geführten Tastkopf, um verschiedene Roboterkonfigurationen unter Berücksichtigung der Ebenenbeschränkung zu erreichen.

RADKHAH et al. (2010) betrachten ein System bestehend aus einem Industrieroboter mit einer robotergeführten Kamera und einem bzw. mehreren bekannten Referenzobjekten mit Punktmustern. Hierbei werden die Positionen der Punkte auf dem Referenzobjekt und die Relativbeziehung zwischen verschiedenen Referenzobjekten als bekannt angenommen und gegebenenfalls mit externer Messtechnik erfasst. Hierdurch können die Relativpositionen („Vector Difference“) des Endeffektors in Bezug auf ein Referenzobjekt aus verschiedenen Roboterkonfigurationen miteinander paarweise verglichen werden.

Unter Verwendung eines Kreisformmessgerätes (Kugelstab mit teleskopischem Linearsensor, engl.: telescoping ballbar), einer Fixierung im Arbeitsraum und einem Endeffektor mit jeweils drei Befestigungspunkten zeigen NUBIOLA & BONEV (2014), dass eine redundante kinematische Kette unter Verwendung einer Hexapodstruktur zur Kalibrierung erzeugt werden kann. Hierdurch können sowohl die Endeffektorposition als auch -orientierung berücksichtigt werden.

Das formale Schließen der kinematischen Kette durch eine Messung wird auch im Rahmen von kooperierenden Robotern von L. WU et al. (2016) gezeigt. Die Autoren adressieren hierbei zwei offene kinematische Ketten mit fixierter Roboterbasis und der relativen Erfassung zwischen den Endeffektoren mittels eines kamerabasierten Messsystems.

Ebenfalls basierend auf der Formulierung einer geschlossenen kinematischen Kette zeigen BENNETT, GEIGER et al. (1991), dass durch die Erfassung der Endeffektorposition mittels einer externen Stereokamera sowohl die Roboter- als auch die Kameraparameter identifiziert werden können.

### 2.3.2 Auswahlverfahren für Kalibrierkonfigurationen

Die Bestimmung geeigneter Modellparameter  $\vec{p}^*$  erfolgt im Rahmen der Kalibrierung auf Basis am Realsystem erfasster Endeffektorposen und den Achswinkeln

der korrelierenden Roboterkonfigurationen (JOUBAIR et al. 2016). Die Kalibrierkonfigurationen<sup>22</sup> müssen hierbei die Identifizierbarkeit (Beobachtbarkeit<sup>23</sup>) aller Parameter gewährleisten (HOLLERBACH & WAMPLER 1996). Bedingt durch die Unsicherheiten der Messsysteme und den Eigenschaften der Modellierung ist die Auswahl geeigneter Kalibrierkonfigurationen daher für eine effiziente Kalibrierung notwendig (SUN & HOLLERBACH 2008).

Da in der Regel das Erfassen von sehr vielen Kalibrierkonfigurationen im gesamten Arbeitsraum des Robotersystems nicht möglich ist, haben sich Verfahren zur Untersuchung der Parameterbeobachtbarkeit (engl.: observability analysis) für eine Auswahl (Set) an Kalibrierkonfigurationen etabliert. Zur Quantifizierung der Beobachtbarkeit existieren mehrere Beobachtbarkeitsindizes (engl.: observability indices), die auf der Singulärwertzerlegung der Sensitivitätsmatrix  $\mathbf{J}$  beruhen (JOUBAIR et al. 2016).

Die Sensitivitätsmatrix kann hierbei gemäß den Gleichungen 2.10 und 2.11a-2.11b als partielle Ableitungen der Vorwärtstransformation an den  $m$  durch die Konfigurationen gegebenen Stellen nach den Modellparametern verstanden werden, wobei an den Stellen der Nominalparameter  $\vec{p}_{nom}$  ausgewertet wird (JOUBAIR et al. 2016).

$$\mathbf{J} = (\mathbf{J}_1 \dots \mathbf{J}_m)^T \quad (2.10)$$

wobei für  $\mathbf{J}_i$  mit  $i = 1 \dots m$  gilt:

$$\mathbf{J}_i = \frac{\partial \vec{f}_E}{\partial \vec{p}} (\vec{\theta}_i, \vec{p}) \Big|_{\vec{p}=\vec{p}_{nom}} \quad (2.11a)$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{E1}}{\partial p_1} (\vec{\theta}_i, \vec{p}) \Big|_{\vec{p}=\vec{p}_{nom}} & \frac{\partial f_{E1}}{\partial p_2} (\vec{\theta}_i, \vec{p}) \Big|_{\vec{p}=\vec{p}_{nom}} & \dots & \frac{\partial f_{E1}}{\partial p_N} (\vec{\theta}_i, \vec{p}) \Big|_{\vec{p}=\vec{p}_{nom}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{E6}}{\partial p_1} (\vec{\theta}_i, \vec{p}) \Big|_{\vec{p}=\vec{p}_{nom}} & \frac{\partial f_{E6}}{\partial p_2} (\vec{\theta}_i, \vec{p}) \Big|_{\vec{p}=\vec{p}_{nom}} & \dots & \frac{\partial f_{E6}}{\partial p_N} (\vec{\theta}_i, \vec{p}) \Big|_{\vec{p}=\vec{p}_{nom}} \end{pmatrix} \quad (2.11b)$$

<sup>22</sup>Eine Kalibrierkonfiguration entspricht der Kombination aus der am Realsystem vollständig bzw. partiell erfassten Endeffektorpose und der hierzu korrelierenden Roboterkonfiguration.

<sup>23</sup>Im Kontext dieser Arbeit wird in Anlehnung an die in englischsprachigen Veröffentlichungen verwendete Bezeichnung „Observability“ der Begriff „Beobachtbarkeit“ für die Identifizierbarkeit der Modellparameter verwendet.

Durch eine Singulärwertzerlegung (Gleichung 2.12) der Sensitivitätsmatrix  $\mathbf{J}$  kann die Singulärwertmatrix  $\Sigma$  gefunden werden (SUN & HOLLERBACH 2008).

$$\mathbf{J} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T \quad (2.12)$$

Hierbei sind  $\mathbf{U}$  sowie  $\mathbf{V}$  orthogonale Matrizen. Die Singulärwertmatrix hat die in Gleichung 2.13 gegebene Form und beinhaltet die Singulärwerte  $\sigma_j$  mit  $j = 1 \dots N$  in absteigender Reihenfolge ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_N$ ).

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_N \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Die Anzahl  $N$  der Singulärwerte korreliert mit der Anzahl der unabhängigen Modellparameter (JOUBAIR et al. 2016). Sind Singulärwerte Null, tritt ein Rangverlust der Sensitivitätsmatrix auf, und es können entsprechend viele Parameter nicht beobachtet werden (NAHVI & HOLLERBACH 1996; SCHRÖER 1993, S. 229).

## Beobachtbarkeitsindizes

Zur Bewertung einer Auswahl an Kalibrierkonfigurationen haben sich fünf Beobachtbarkeitsindizes etabliert, welche die Identifizierbarkeit der Parameter quantifizieren. Diese sind in Anlehnung an die konventionelle, statistische Versuchsplanung hinsichtlich A-, D-, E- und G-optimalen Kriterien abgeleitet (KLIMCHIK et al. 2012).

BORM & C.-H. MENG (1991) schlagen hierfür einen Beobachtbarkeitsindex  $O_1$  gemäß Gleichung 2.14 und die Maximierung des Produktes aller Singulärwerte vor.

$$O_1 = \frac{(\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_N)^{\frac{1}{N}}}{\sqrt{m}} \quad (2.14)$$

DRIELS & PATHRE (1990) adressieren den Kehrwert der Konditionszahl der Sensitivitätsmatrix als Beobachtbarkeitsindex  $O_2$  (Gleichung 2.15).

$$O_2 = \frac{\sigma_N}{\sigma_1} \quad (2.15)$$

Von NAHVI & HOLLERBACH (1996) werden zwei weitere Beobachtbarkeitsindizes vorgeschlagen, welche zum einen den minimalen Singulärwert ( $O_3$ , Gleichung 2.16) sowie zum anderen das Produkt aus  $O_2$  und  $O_3$  (Gleichung 2.17) betrachten.

$$O_3 = \sigma_N \quad (2.16)$$

$$O_4 = O_2 \cdot O_3 = \frac{\sigma_N^2}{\sigma_1} \quad (2.17)$$

Der von SUN & HOLLERBACH (2008) vorgeschlagene Beobachtbarkeitsindex  $O_5$  wird auf Basis des mit der Anzahl an Parametern dividierten harmonischen Mittels der Singulärwerte berechnet (Gleichung 2.18).

$$O_5 = \left( \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} + \dots + \frac{1}{\sigma_N} \right)^{-1} \quad (2.18)$$

Im Rahmen von Kalibrierverfahren gilt es ein Set an Kalibrierkonfigurationen zu finden, welches den betrachteten Beobachtbarkeitsindex maximiert (HOLLERBACH & WAMPLER 1996).

### Auswahlverfahren für Kalibrierkonfigurationen

JOUBAIR et al. (2016) verwenden einen Tauschalgorithmus auf Basis der Beobachtbarkeitsindizes zur Bestimmung eines Kalibrierkonfigurationensets. Hierbei sind die Größe des Sets und die möglichen Kalibrierkonfigurationen vorgegeben. Die Auswahl geeigneter Kalibrierkonfigurationen lässt sich folglich der diskreten Optimierung zuordnen.

Nach JOUBAIR et al. (2016) ist hierbei die Eignung der Beobachtbarkeitsindizes abhängig vom betrachteten Robotersystem. Für einen sechssachsigen Vertikal-Knickarmroboter bei externer Positionsmessung des Endeffektors ist nach JOUBAIR et al. (2016) der  $O_1$  am besten geeignet.

IKITS & HOLLERBACH (1997) verwenden den Beobachtbarkeitsindex  $O_4$  zur Auswahl geeigneter Kalibrierkonfigurationen bei einer auf eine Ebene beschränkten Endeffektorposition (Closed-Loop-Verfahren).

Ein weiterer Ansatz basierend auf dem Beobachtbarkeitsindex  $O_1$  und dem heuristischen Approximationsverfahren der simulierten Abkühlung (engl.: simulated annealing) zur Auswahl von Kalibrierkonfigurationen wird von ZHUANG, K. WANG et al. (1994) vorgeschlagen.

AOYAGI et al. (2010) verwenden einen genetischen Algorithmus zur Auswahl geeigneter Kalibrierkonfigurationen auf Basis des Beobachtbarkeitsindex  $O_1$ .

Nach ELATTA et al. (2004) sind bisherige Verfahren zur Auswahl von Kalibrierkonfigurationen maßgeblich auf den Laboreinsatz beschränkt, bei welchem keine Beschränkungen der Roboterbewegungen vorliegen.

### 2.3.3 Simulationsgestützte Bahnplanung bei Industrierobotern

Die Aufgabe der Bahnplanung ist die Erstellung einer für den Roboter ausführbaren Bewegungssequenz, welche vorgegebene Konfigurationen  $\vec{\theta}_i$  mit  $i = 1 \dots m$  kollisionsfrei miteinander verbindet. Charakterisiert ist eine solche Bahn durch eine Trajektorie im kollisionsfreien Konfigurationsraum  $\Psi : [0, 1] \rightarrow C_{frei}, t \mapsto \vec{\theta}$  (LATOMBE 1991, S. 9–10).

Elementarer Bestandteil der Bahnplanung ist die Überprüfung von Konfigurationen des Roboters auf Kollisionen (Kollisionsdetektion) mit sich selbst sowie mit seiner Umgebung (ERICSON 2005, S. 1; LAVALLE 2006, S. 156). Sie nimmt einen wesentlichen Anteil des Berechnungsaufwands ein (LIN & GOTTSCHALK 1998).

Hierfür werden bei der simulationsgestützten Bahnplanung alle relevanten Objekte mit einer geometrischen Repräsentanz in einer virtuellen Szene abgebildet und paarweise auf Kollisionen überprüft. Im Rahmen von Computerspielen, Physik- und Robotersimulationen existieren eine Vielzahl an Verfahren und Software-Implementierungen zur Kollisionsdetektion auf Basis von CAD-Daten (JIMÉNEZ et al. 2001; ERICSON 2005, S. 1). Darüber hinaus gibt es im Kontext der Bahnplanung Ansätze zur Verlagerung solcher aufwändigen Berechnungen auf Serverstrukturen (VICK et al. 2015).

Für eine effiziente Berechnung wird die statische Kollisionsdetektion typischerweise in eine Grob- und eine Feinphase unterteilt (LAVALLE 2006, S. 210; ERICSON 2005, S. 14). Bei der Grobphase werden Objektgeometrien mit primitiven Hüllgeometrien (beispielsweise Quader, Zylinder oder Kugeln) approximiert und deren Kollision überprüft (RÜCKEL 2006, S. 69; ERICSON 2005, S. 284). Darüber hinaus existieren Verfahren, Hindernisse durch Hüllgeometrien hierarchisch, beispielsweise in Form von Datenstrukturen in Baumform („Octrees“) (RÜCKEL 2006, S. 61), zu approximieren (JIMÉNEZ et al. 2001). Wird im Rahmen der Grobphase eine Kollision der Hüllgeometrien detektiert, kann in der Feinplanung anhand der exakten Objektgeometrie die Kollision erneut überprüft werden.

Zur Überprüfung einer Roboterbewegung auf Kollisionsfreiheit wird diese in Bezug auf die Zustandsgrößen diskretisiert und die jeweiligen Konfigurationen auf Unterschreitung eines Mindestabstands zwischen Objekten überprüft (LAVALLE 2006, S. 185). Die minimale Ausdehnung eines detektierbaren Hindernisses wird folglich durch die Diskretisierung und den Mindestabstand definiert (JIMÉNEZ et al. 2001; ERICSON 2005, S. 214; LAVALLE 2006, S. 214–217).

Bei den Bahnplanungsverfahren kann zwischen kombinatorischen, potentialfeld- und stichprobenbasierten Verfahren unterschieden werden (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 115). Hierbei liegt der Unterschied in der Vorgehensweise zur Erfassung des freien Konfigurationsraums zur Bestimmung der geforderten Bahn.

### Kombinatorische und potentialfeldbasierte Bahnplanungsverfahren

Zur Ermittlung einer kollisionsfreien Bahn wird bei kombinatorischen Bahnplanungsverfahren der vollständige, kollisionsfreie Konfigurationsraum ermittelt (LAVALLE 2011). Hierfür müssen alle Konfigurationen bzw. Bereiche im Konfigurationsraum, bei denen Kollisionen zwischen Geometrieelementen des Roboters  $A(\vec{\theta})$  und einem Hindernis  $O_i$  auftreten, identifiziert werden (vgl. Gleichungen A.2 und A.3 in Abschnitt A.2.2).

Insbesondere Zelldekompositionsverfahren zur Unterteilung des Konfigurationsraums in eine endliche Anzahl an Bereichen einfacher Geometrie (sogenannte Zellen) ermöglichen die Klassifizierung hinsichtlich der Kollisionsfreiheit (RUSSELL & NORVIG 2010, S. 989–991; KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 115–116).

Bei mehreren Hindernissen im Arbeitsraum des Roboters und höherdimensionalen Konfigurationsräumen (beispielsweise bei den sechs Achsen eines Vertikal-Knickarmroboters) ist jedoch die Bestimmung des kollisionsfreien beziehungsweise kollisionsbehafteten Konfigurationsraums durch kombinatorische Verfahren mit hohem Rechenaufwand verbunden und meist nicht praktikabel (LAVALLE 2011).

Eine Alternative zur kombinatorischen sind potentialfeldbasierte Bahnplanungsverfahren (RÜCKEL 2006, S. 63–65; BARRAQUAND & LATOMBE 1991). Diese basieren auf der Bewegung eines Objektes in einem Potentialfeld einer realwertigen Funktion, wobei von Hindernissen ein abstoßendes und von der Zielkonfiguration ein anziehendes Potential ausgeht (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 117). Hierbei kann das Potentialfeld als zusätzlicher Kostenterm bei der Bestimmung einer geeigneten Trajektorie berücksichtigt werden (RUSSELL & NORVIG 2010, S. 991).

### Stichprobenbasierte Bahnplanungsverfahren

Im Gegensatz zu kombinatorischen wird bei stichprobenbasierten Bahnplanungsverfahren nicht der vollständige kollisionsfreie Konfigurationsraum abgebildet. Es wird lediglich eine Teilmenge auf Kollisionen überprüft, innerhalb derer eine kollisionsfreie Bahn gefunden werden kann. Hierbei wird zwischen Methoden mit Mehrfachabfragen (engl.: multi-query) und Einzelabfragen (engl.: single-query) unterschieden, welche sich für die einmalige beziehungsweise für eine mehrfache Bahnerzeugung eignen (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 112).

Eine verbreitete Methode zur mehrfachen Bahnplanung in statischen Umgebungen ist die sogenannte probabilistische Landkartenmethode (engl.: probabilistic road-map method, PRM) (TSIANOS et al. 2007; KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 112). Hierbei wird der kollisionsfreie Konfigurationsraum als Graph  $G$  abgebildet, wobei ein Knoten  $\vec{\theta}_i$  einer kollisionsfreien Konfiguration und jede Kante  $e_i$  einer kollisionsfreien Bewegung zwischen den Konfigurationen  $\vec{\theta}_{i-1}$  und  $\vec{\theta}_i$  entspricht.

Zur Erzeugung des Graphen  $G$  werden in der ersten Phase  $n_v$  kollisionsfreie Zufallskonfigurationen erzeugt und als Knoten  $\vec{\theta}_{rand,1} \dots \vec{\theta}_{rand,n_v}$  hinzugefügt. In einer nachfolgenden Phase werden für jeden Knoten dessen nächste Nachbarn

bestimmt und die Kollisionsfreiheit der Bewegung zwischen diesen mit Hilfe eines lokalen Planers ermittelt (KAVRAKI, KOLOUNTZAKIS et al. 1996).

Wird eine geeignete Abstandsmetrik für die Bestimmung der nächsten Nachbarn gewählt (LAVALLE 2006, S. 239), sind die resultierenden Bewegungen klein und die Kollisionsfreiheit kann beispielsweise durch simulative Kollisionsdetektoren für gängige Bewegungsarten geprüft werden. Ist eine Bewegung zwischen zwei Knoten kollisionsfrei, wird dem Graph eine Kante hinzugefügt (LAVALLE 2006, S. 237–238).

Typischerweise ist bei der Bahnplanung die Richtung der Bewegung irrelevant, und folglich werden ungerichtete Kanten verwendet. Analog zu den Zufallskonfigurationen können dem Graph die innerhalb der Bahnplanung vorgegebenen Konfigurationen hinzugefügt werden. Ist der Graph zusammenhängend, reduziert sich die Bahnplanungsaufgabe auf die Suche nach einem geeigneten Weg innerhalb des Graphen (KAVRAKI, KOLOUNTZAKIS et al. 1996). Ist der Graph nicht zusammenhängend, werden weitere Zufallskonfigurationen ergänzt. Die PRM ist aufgrund der mit der Anzahl an Zufallskonfigurationen zunehmenden Dichte probabilistisch vollständig (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 112–113).

Es existieren verschiedene Modifikationen der PRM, welche sich maßgeblich in der Erzeugungsart der Zufallskonfigurationen unterscheiden. Darüber hinaus werden Ansätze vorgeschlagen, welche zunächst alle Bewegungen zwischen benachbarten Konfigurationen als kollisionsfrei annehmen und nur dann überprüfen, sofern diese in der resultierenden Bahn beinhaltet sind (BOHLIN & KAVRAKI 2000). Dies reduziert die Anzahl an durchzuführenden Kollisionsdetektionen, macht gegebenenfalls jedoch eine erneute Wegsuche innerhalb des Graphen notwendig.

Nach TEKOUO MOUTCHHO (2012, S. 104–106) und M. ULRICH (2018, S. 83–84) ist die PRM-Methode für die Bahnplanung bei roboterbasierten Messsystemen geeignet.

Bei sich häufig ändernden Umgebungen wird die Bahnplanung quasi-statisch meist nur einmalig für einen erzeugten kollisionsfreien Konfigurationsraum ausgeführt. Die Methode der sogenannten „Rapidly-Exploring Random Trees“ (dt.: schnell entdeckende Zufallsbäume) zählt zu den Single-Query-Planern und erzeugt ausgehend von einer Startkonfiguration Bäume, bis die Zielkonfiguration erreicht wird (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 113–114).

Zu Beginn enthält der erzeugte Baum nur die Startkonfiguration und gegebenenfalls die Zielkonfiguration. In einem iterativen Vorgehen wird eine zufällige, kollisionsfreie Konfiguration  $\vec{\theta}_{rand,i}$  erzeugt und deren nahegelegenster Nachbar  $\vec{\theta}_{near,i}$  im existierenden Baum gesucht. Die neue, hinzuzufügende Konfiguration  $\vec{\theta}_{new}$  wird, ausgehend von der Konfiguration  $\vec{\theta}_{near,i}$ , im Abstand  $s_{new}$  in Richtung der Zufallskonfiguration  $\vec{\theta}_{rand,i}$  erzeugt, sofern die neue Konfiguration kollisionsfrei ist. Ist die Bewegung zwischen den Konfigurationen  $\vec{\theta}_{new}$  und  $\vec{\theta}_{near,i}$  kollisionsfrei, wird dem Graph der Knoten und eine Kante hinzugefügt. Anderenfalls wird die zufällig erzeugte Konfiguration verworfen. Nach jeder Erweiterung des Graphen kann eine mögliche Lösung (Pfad zwischen Start- und Zielkonfiguration) gesucht beziehungsweise weitere Konfigurationen hinzugefügt werden (LAVALLE 2006, S. 217–218).

Verschiedene Abwandlungen dieses Vorgehens beschäftigen sich mit der Beeinflussung der Wachstumsrichtung der Bäume (KUFFNER & LAVALLE 2000) sowie der Erkundung des Konfigurationsraums auf Basis mehrerer Bäume (LAVALLE 2006, S. 219–220).

Softwaretechnische Implementierungen von stichprobenbasierten Bahnplanungsverfahren sind beispielsweise in der „Open Motion Planning Library“ (OMPL, SUCAN et al. 2012) für das „Robot Operating System“<sup>24</sup> (ROS) realisiert.

## Weitere Zielgrößen der Bahnplanung

Werden die Kanten des Graphen mit einem Kostenwert (beispielsweise die benötigte Zeit für die Bewegung) versehen, korreliert der kürzeste Weg im Graph mit der Bahn mit den geringsten Kosten (JUNGNICKEL 2013, S. 65–66; M. ULRICH, LUX, JÜRGENSEN et al. 2016).

Ist die Reihenfolge der anzufahrenden Konfigurationen einer zu bestimmenden Bahn nicht festgelegt, so kann auf Basis von Planungskriterien (beispielsweise benötigte Zeit zur Ausführung der Bahn) die Reihenfolge festgelegt werden. Hierbei handelt es sich folglich um ein kombinatorisches Optimierungsproblem, welches

<sup>24</sup>Software-Framework für Roboter, koordiniert von Open Source Robotics Foundation (<http://www.ros.org/>).

meist mit Hilfe der Graphentheorie formuliert wird. Analog zum Problem des Handlungsreisenden (engl.: travelling salesman problem, TSP) gilt es die Reihenfolge der Knoten festzulegen, bei welcher der resultierende Weg die geringsten Kosten aufweist (JUNGNICKEL 2013, S. 482; M. ULRICH, LUX, JÜRGENSEN et al. 2016).

## 2.4 Identifikation von Kalibrierparametern

Im Allgemeinen sind Modelle, welche sich zur Steigerung der Pose-Genauigkeit eignen, „nicht-linear und sehr komplex“ (SCHRÖER 1993, S. 183). Bei der modellbasierten Kalibrierung werden solche Modelle mittels Parameteridentifikationsverfahren möglichst gut an die Realität angeglichen. Dies entspricht der Minimierung der Modellabweichungen in Bezug auf die am Realsystem erfassten Kalibrierdaten (SCHRÖER 1993, S. 186), wobei das Zielfunktional  $\Lambda$  die Norm der Abweichungen spezifiziert (vgl. Minimierungsproblem 2.19).

$$\min_{\vec{p}} \left( \Lambda \left( \vec{H}_{ext} - \vec{F} \left( \vec{\Theta}, \vec{p} \right) \right) \right) \quad (2.19)$$

Besonders im Hinblick auf die Komplexität der Modellierung und die Qualität der erfassten Messdaten existieren verschiedene Optimierungsverfahren zur Lösung der Minimierungsaufgabe. Etablierte Zielfunktionale und Parameteridentifikationsverfahren im Kontext der Roboterkalibrierung werden im Abschnitt 2.4.1 betrachtet. Der Einfluss der Modellierung auf die Identifikation wird anschließend im Rahmen der Skalierung in Abschnitt 2.4.2 dargestellt.

### 2.4.1 Zielfunktional und Identifikationsverfahren

Gemäß Gleichung 2.6 ergibt sich für den Vektor  $\vec{\varepsilon}$  der Modellabweichungen (Residuenvektor) Gleichung 2.20.

$$\vec{\varepsilon} = \vec{H}_{ext} - \vec{F} \left( \vec{\Theta}, \vec{p} \right) \quad (2.20)$$

Hierbei ist  $\vec{\varepsilon} \in \mathbb{R}^{m \cdot b_{ext}}$  bei  $m$  Messungen der Endeffektorpose bezüglich  $b_{ext}$  Freiheitsgraden.

Das Zielfunktional bestimmt hierbei die Abbildung des Residuenvektors auf eine zu minimierende Größe, wobei die Wahl der Norm<sup>25</sup> prinzipiell beliebig ist. Typische Zielfunktionale können „die (ggf. gewichtete) Summe der Quadrate, das Maximum der Komponenten und spezielle Risikofunktionen“ (SCHRÖER 1993, S. 187) sein.

Die Verwendung der Maximumsnorm überführt das Optimierungsproblem hierbei in ein Tschebyscheffsches Approximationsverfahren (SCHRÖER 1993, S. 188). Nach SCHRÖER (1993, S. 188) ist dies jedoch nicht für die Kalibrierung von Robotern geeignet, da hierdurch „Meßausreißer zum Maßstab für das Optimierungsverfahren würden.“ Darüber hinaus ist die Lösung von Optimierungsproblemen mit der Maximums- und der 1-Norm als Zielfunktionale schwieriger als die Lösung eines Ausgleichsproblems mit der 2-Norm (SCHRÖER 1993, S. 189).

Wird als Zielfunktional folglich die quadrierte euklidische Norm (auch 2-Norm) gewählt, geht das Minimierungsproblem in ein Problem kleinster Fehlerquadrate (engl.: least square problem) über. Hierdurch werden zum einen große Abweichungen stärker gewichtet als kleine Abweichungen, zum anderen können Kompensationseffekte von Beiträgen mit unterschiedlichen Vorzeichen ausgeschlossen werden (SCHRÖER 1993, S. 186).

Im Rahmen der Parameteridentifikation wird daher meist als Zielfunktional  $\Lambda(\vec{\varepsilon}) = \frac{1}{2} \|\vec{\varepsilon}\|_2^2$  gewählt (ELATTA et al. 2004). Eine notwendige Bedingung für die Optimierung ist hierbei, dass der Gradient der Zielfunktion beim gesuchten Parametersatz ein Nullvektor ist (SCHRÖER 1993, S. 189).

Zur Lösung eines solchen Problems hat sich das Gauß-Newton-Verfahren etabliert. Hierbei wird in jeder Iteration  $k$  die Modellfunktion durch eine Taylorserie an der aktuellen Schätzung der Parameter  $\vec{p}_k$  approximiert und durch Vernachlässigung von Termen höherer Ordnung linearisiert. Es ergibt sich ein linearisierter Zusammenhang gemäß Gleichung 2.21 (KHALIL & DOMBRE 2006, S. 261).

$$\vec{\varepsilon} = \mathbf{J} \cdot \Delta \vec{p}_k \quad (2.21)$$

<sup>25</sup>Zur Definition und Eigenschaften einer Norm vgl. DAHMEN & REUSKEN (2008, S. 15).

Hierbei entspricht  $\mathbf{J}$  der Jacobi-Matrix und  $\Delta\vec{p}_k$  der Parameterkorrektur im betrachteten Iterationsschritt. Die Parameterkorrektur kann nach Gleichung 2.22 bestimmt werden (SCIAVICCO & SICILIANO 2000, S. 65).

$$\Delta\vec{p}_k = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \cdot \vec{\epsilon} \quad (2.22)$$

Ausgehend vom Gauß-Newton-Algorithmus haben sich weitere Lösungsverfahren<sup>26</sup> wie Liniensuchverfahren und das Levenberg-Marquardt-Verfahren im Bereich der Roboterkalibrierung etabliert (LETTENBAUER 2002, S. 44–48; ROOS 1998, S. 96–98; SCHRÖER 1993, S. 192). Hierbei wird in aktuellen Ansätzen meist das Levenberg-Marquardt-Verfahren aufgrund der höheren Robustheit gegenüber dem Gauß-Newton-Verfahren bevorzugt (ELATTA et al. 2004).

In diesem Kontext gilt es, insbesondere Rangverluste der Jacobi-Matrix zu vermeiden. Diese können nach HOLLERBACH, KHALIL et al. (2008, S. 323) auf ungeeignete Kalibrierdaten und nicht identifizierbare Parameter zurückgeführt werden.

Durch die gezielte Auswahl an Kalibrierkonfigurationen (vgl. Abschnitt 2.3.2) auf Basis von Beobachtbarkeitsindizes sowie einer geeigneten Modellierung unter Berücksichtigung der Minimalität der Parametrisierung (SCHRÖER 1993, S. 29) können im Vorfeld Probleme bei der Parameteridentifikation vermieden werden.

### 2.4.2 Skalierung

Eine wesentliche Herausforderung bei der Lösung nicht-linearer Optimierungsprobleme stellt die Konditionierung dar. Im Wesentlichen lassen sich Probleme hieraus auf unterschiedliche Einheiten und Größenordnungen der erfassten Kalibrierdaten (beispielsweise bei der Erfassung von Position und Orientierung) und der Modellparameter zurückführen (HOLLERBACH, KHALIL et al. 2008, S. 323). Darüber hinaus muss die Modellierung die Parameterstetigkeit sicherstellen (SCHRÖER 1993, S. 29).

---

<sup>26</sup>Für die Grundlagen numerischer Optimierungsverfahren bei nicht-linearen Problemen sei auf DAHMEN & REUSKEN (2008) und PAPAGEORGIOU et al. (2012) verwiesen.

SCHRÖER (1993, S. 214) zieht die Konditionszahl  $\kappa = \frac{\sigma_1}{\sigma_N}$  der Jacobi-Matrix als Gütekriterium heran, wobei für eine gute Konditionierung  $\kappa < 100$  sein sollte.

Zur Verbesserung der Konditionierung des Optimierungsproblems existieren Skalierungsverfahren, welche sich auf die erfassten Messgrößen sowie die Parameter des Modells beziehen (HOLLERBACH, KHALIL et al. 2008, S. 339).

Hierbei können die erfassten Messgrößen und die Jacobi-Matrix durch Linksmultiplikation einer Skalierungsmatrix  $\mathbf{G}_{skal}$  gewichtet werden (Gleichung 2.23, HOLLERBACH, KHALIL et al. 2008, S. 339).

$$\mathbf{G}_{skal}\vec{\epsilon} = \mathbf{G}_{skal}\mathbf{J} \cdot \Delta\vec{p}_k \quad (2.23)$$

Um einen möglichst gleich großen Einfluss der Modellparameter im Rahmen von numerischen Lösungsverfahren zu erzielen, können die Spalten der Jacobi-Matrix mit der Diagonalmatrix  $\mathbf{H}_{skal}$  skaliert werden (Parameterskalierung). Es gilt Gleichung 2.24 (HOLLERBACH, KHALIL et al. 2008, S. 340).

$$\vec{\epsilon} = (\mathbf{J}\mathbf{H}_{skal}) \cdot (\mathbf{H}_{skal}^{-1}\Delta\vec{p}_k) \quad (2.24)$$

Die Lösung des Problems kleinster Fehlerquadrate ändert sich hierdurch nicht (HOLLERBACH, KHALIL et al. 2008, S. 340).



## 3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ausgehend vom Stand der Erkenntnisse aus Kapitel 2 werden zunächst die Defizite bisheriger Lösungsansätze in Bezug auf den produktionsnahen Einsatz roboterbasierter Messsysteme diskutiert und daraus der Handlungsbedarf abgeleitet. Basierend darauf werden der Betrachtungsrahmen eingegrenzt und die Zielsetzung formuliert. Die zur Erreichung der Zielsetzung notwendige Vorgehensweise mit Bezug auf den Aufbau der Arbeit wird im nachfolgenden Abschnitt zusammen mit den zugrundeliegenden Hypothesen dargestellt.

### 3.1 Handlungsbedarf

Setzt man bisherige Ansätze zur Kalibrierung von Robotern in Bezug zu den Anforderungen aus dem produktionsnahen Umfeld<sup>27</sup> der Koordinatenmesstechnik, können Defizite und der daraus resultierende Handlungsbedarf identifiziert werden. Hierfür wird zwischen den Teilaspekten Modellierung, Kalibrierdatenaufnahme und Parameteridentifikation unterschieden.

Die meisten Kalibrierverfahren verwenden stark vereinfachte Modellierungen. Hierbei werden oftmals lediglich kinematische Modelle unter Vernachlässigung von nicht-geometrischen Effekten verwendet. Dies führt zu einer eingeschränkten Gültigkeit im Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit. Komplexere Modellierungen, wie beispielsweise von SCHRÖER (1993) vorgeschlagen, adressieren zwar eine Vielzahl an Einflussgrößen, bilden diese aber meist nur in vereinfachter Form ab (beispielsweise durch Linearisierung). Die getroffenen Modellvereinfachungen können zu einem systematischen Modellfehler führen, welcher wiederum

---

<sup>27</sup>Vergleiche hierzu Abschnitt 1.3.

die erreichbare Genauigkeit des Messsystems limitiert. Des Weiteren zeigen die charakterisierenden Größen des Modells oftmals keinen physikalischen Bezug zum Realsystem, was die Plausibilisierung ermittelter Parameter erschwert.

Die meisten Methoden der Datenaufnahme basieren auf externen oder speziell für die Kalibrierung entwickelten Messsystemen, sind wenig automatisiert und erfordern hohe manuelle Aufwände (ELATTA et al. 2004). Dies bedingt, dass solche Ansätze für den produktionsnahen Einsatz oftmals zu teuer und zu langsam sind. Ein weiteres Defizit von Kalibrierverfahren stellt die stark auf Erfahrungswissen beruhende Datenaufnahme dar. So wird zum einen kein Bezug zwischen Arbeitsraum des Systems und den Kalibrierkonfigurationen betrachtet und zum anderen die Bewertung der zeitlichen Gültigkeit der Kalibrierdaten dem Anwender überlassen. Dieser komplexe Entscheidungsbereich des Anwenders erhöht die Wahrscheinlichkeit von Anwendungsfehlern und ist mit den Anforderungen an ein Messsystem nicht vereinbar.

Existierende Ansätze zur Auswahl von geeigneten Kalibrierkonfigurationen werden vornehmlich in Kombination mit einfachen Modellen und unbeschränkten Arbeitsräumen (keine Berücksichtigung der Bahnplanungsaspekte) diskutiert und sind nach ELATTA et al. (2004) daher bislang auf den Einsatz unter Laborbedingungen beschränkt.

Der Einfluss der Modellierung auf Verfahren der Parameteridentifikation findet im Kontext der Roboterkalibrierung wenig Beachtung. So werden beispielsweise Skalierungseffekte meist getrennt von den Messverfahren zur Kalibrierdatenaufnahme betrachtet, da hierbei oftmals der Absolutbezug eines externen Messsystems vorausgesetzt wird.

Die durch die Parameteridentifikation gewonnenen Parameter werden meist quasi-statisch behandelt. Insbesondere bei sich ändernden Umgebungsbedingungen ist diese Annahme nur sehr eingeschränkt gültig. Die Bewertung der Güte des aktuellen Modells basiert daher meist auf dem Erfahrungswissen des Anwenders. Dies ist insbesondere beim Einsatz in der Koordinatenmesstechnik als Defizit bisheriger Ansätze zu werten.

---

Im Kontext von roboterbasierten Koordinatenmesssystemen lässt sich daher folgender Handlungsbedarf ableiten:

- Das dem Kalibrierverfahren zugrunde liegende Modell muss alle zur Erreichung der geforderten Messgenauigkeit des Systems relevanten Einflussgrößen mit Bezug zum Realsystem abbilden.
- Die Kalibrierdatenaufnahme muss unter produktionsnahen Bedingungen und Berücksichtigung des Anwendungskontextes mit reduzierten manuellen Aufwand erfolgen.
- Zusätzliche Systemtechnik ist im Hinblick auf Investitionskosten und Systemkomplexität zu vermeiden.
- Die Gültigkeit der Kalibrierung und damit die Gewährleistung der Systemgenauigkeit ist während des Betriebs aufrecht zu erhalten. Das System muss Abweichungen zwischen Modell und Realsystem folglich selbst identifizieren können.

## 3.2 Eingrenzung

Ein roboterbasiertes Messsystem im Kontext dieser Arbeit besteht aus einer seriellen kinematischen Kette mit rotatorischen Achsen, einem durch den Roboter geführten 3D-Sensor und einem Prüfobjekt.

Um sowohl Position als auch Orientierung des Sensors unabhängig voneinander festlegen zu können, werden Robotersysteme mit mindestens sechs Achsen benötigt. Insbesondere soll als handhabende Kinematik aufgrund dessen Verbreitung und Flexibilität der Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen betrachtet werden. Roboter mit dieser Bauform zeichnen sich neben geringen Investitionskosten durch ein geringes Störvolumen in Bezug auf das Arbeitsraumvolumen aus.

Die Größe des Prüfobjekts sei ohne Einschränkung größer als das Erfassungsvolumen des 3D-Sensors. Für den optischen 3D-Sensor wird darüber hinaus eine Genauigkeit im Rahmen der durch die Messaufgabe geforderten Toleranzen und eine deutlich höhere Genauigkeit, verglichen mit der Positionsgenauigkeit des unkalibrierten Roboters, angenommen.

Abbildung 3.1 zeigt exemplarisch ein solches System, dessen Komponenten sowie die Messkette am Beispiel eines Prüfobjektes aus dem Karosseriebau (Autotür).

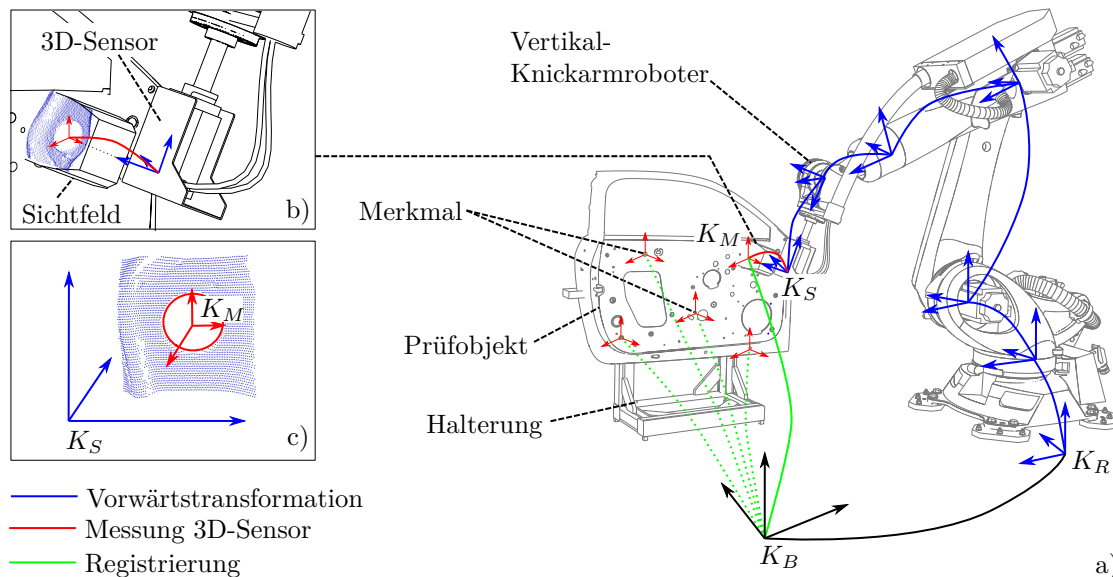


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung eines roboterbasierten Koordinatenmesssystems: a) Zugrunde liegende Messkette (verkettete Transformation aus der Vorwärtstransformation und der Messung des 3D-Sensors) zur Registrierung der erfassten 3D-Punktwolken in einem bauteilübergreifenden Basiskoordinatensystem  $K_B$ , b) Detailansicht der Messung des 3D-Sensors, c) Erfasste 3D-Punktwolke im Sensorkoordinatensystem  $K_S$  sowie das über ein Ausgleichsgeometrieelement bestimmte Merkmalskoordinatensystem  $K_M$ .

### 3.3 Zielsetzung

Auf Basis des dargestellten Handlungsbedarfs wird folgende Zielsetzung abgeleitet:

*Das Ziel dieser Arbeit ist die Genauigkeitssteigerung roboterbasierter Koordinatenmesssysteme durch Selbst-Kalibrierung. Hierbei soll auf den Einsatz von zusätzlicher, externer Messtechnik oder physischer Referenzmarkierungen verzichtet werden.*

Diese Zielsetzung adressiert insbesondere die folgenden Aspekte:

- Genauigkeitssteigerung roboterbasierter Messsysteme durch eine mathematisch-physikalische Modellierung des Gesamtsystems unter Berücksichtigung von Einflussgrößen auf die Genauigkeit.
- Reduktion der Investitionskosten durch Verzicht auf zusätzliche, externe Systemtechnik bei der Kalibrierung.
- Reduzierung von Fehlereinflüssen durch den Anwender und des manuellen Aufwands durch Steigerung des Autonomiegrads.

Die zur Erreichung dieser Zielgrößen notwendigen Lösungsbausteine werden ausgehend von Hypothesen in den nachfolgenden Kapiteln erarbeitet.

### 3.4 Hypothesen und Vorgehensweise

Um roboterbasierte Koordinatenmesssysteme hinsichtlich der Genauigkeitsanforderungen zu befähigen, muss neben dem 3D-Sensor auch die Pose-Genauigkeit des handhabenden Roboters betrachtet werden. Hierbei soll folgende Hypothese zugrunde gelegt werden:

**Hypothese I:** *Die Genauigkeit roboterbasierter Messsysteme ist beschränkt durch die Pose-Genauigkeit des Roboters. Durch eine geeignete, mathematisch-physikalische Modellierung kann die Genauigkeit gesteigert werden, um die prinzipielle Systemeignung im Kontext der Koordinatenmesstechnik zu erreichen.*

Um die These zu plausibilisieren, werden zunächst Einflussfaktoren auf die Pose-Genauigkeit von Robotern in Kapitel 4 analysiert. Hieraus werden Anforderungen an eine verallgemeinerte parametrische Modellierung von seriellen kinematischen Ketten abgeleitet und in eine mathematische Formulierung überführt. Die Gültigkeit der These wird im Kapitel 4 mit der Betrachtung von Vertikal-Knickarmrobotern überprüft.

Basierend auf einer geeigneten mathematisch-physikalischen Modellierung von roboterbasierten Messsystemen kann ein solches System kalibriert werden. Hierbei müssen die Abweichungen zwischen Modell und Realsystem festgestellt werden. Bezugnehmend auf die Zielsetzung einer Selbst-Kalibrierung müssen folglich Abweichungen mit den Systemkomponenten selbst erfassbar sein und Rückschlüsse

auf das zugrundeliegende Modell erlauben. Der nachfolgende Ansatz zur Datenaufnahme im Rahmen einer Selbst-Kalibrierung ist in LUX & REINHART (2015) veröffentlicht und kann in eine verallgemeinerte Hypothese überführt werden.

Ein Prüfobjekt mit erfassbaren Merkmalen befindet sich statisch im Arbeitsraum des roboterbasierten Messsystems. Besitzt mindestens ein Merkmal weiterhin eine Punkt-Ebenen-Beziehung, kann der Sensor relativ zum Merkmal so positioniert werden, dass der charakteristische Punkt des Merkmals sich im Ursprung des Sensorkoordinatensystems befindet. Die Orientierung sei so gewählt, dass die Ebenen-Normale mit der Sichtachse des Sensors zusammenfällt. Ein solches Merkmal könnte beispielsweise eine Bohrung am Prüfobjekt sein, wobei der Mittelpunkt den charakteristischen Punkt und der Rand der Bohrung die dazugehörige Ebene definiert.

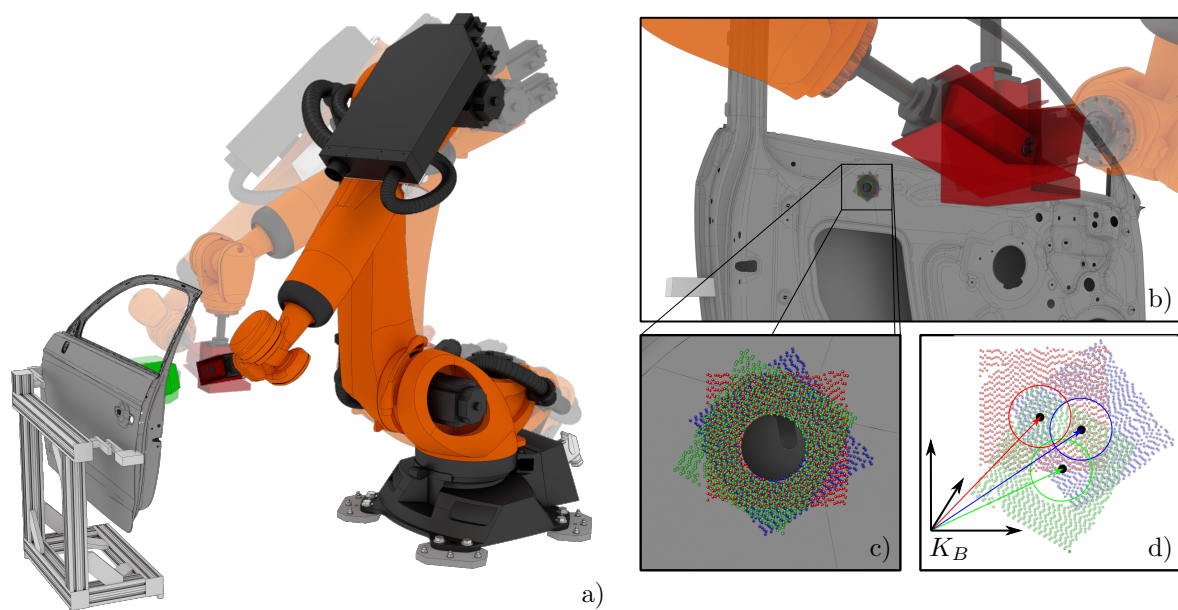
Aus Gründen der Symmetrie würde eine ideale Drehung des Sensors um die Sichtachse den charakteristischen Punkt sowie die Ebenen-Normale invariant lassen. Da die Pose des Sensors vollständig durch die handhabende Kinematik definiert wird, kann auf Basis des Modells eine solche Drehung bestimmt werden. Unter der Annahme einer idealen Entsprechung von Modell und Realsystem würde die reine Drehung des Sensors um die Sichtachse zu invarianten Merkmalscharakteristika führen. Im Allgemeinen ist dies jedoch aufgrund der Abweichungen zwischen Modell und Realsystem nicht der Fall. Abbildung 3.2 stellt exemplarisch die Erfassung eines Merkmals aus verschiedenen Sensorposen dar. Eine auf Basis des angenommenen Modells berechnete Drehung des Sensors um seine Sichtachse manifestiert sich in Form einer Relativverschiebung zwischen Sensor- und Merkmalskoordinatensystem. Da die Verschiebung verglichen mit dem Erfassungsvolumen klein ist, kann diese unmittelbar mit dem 3D-Sensor erfasst werden. Sofern die Systemgenauigkeit maßgeblich durch die Pose-Genauigkeit limitiert ist, korrelieren die resultierenden Relativverschiebungen mit den Modellabweichungen.

Unter der Annahme mindestens eines statischen Merkmals im Arbeitsraum des roboterbasierten Messsystems lässt sich daher folgende Hypothese formulieren, wobei keine exakte Kenntnis über die Position und Orientierung des Merkmals notwendig ist:

**Hypothese II:** *Die Streuung einer mehrfach gemessenen Merkmalspose auf Basis unterschiedlicher Roboterkonfigurationen lässt Rückschlüsse auf die aktuelle*

*Modellgüte zu und ermöglicht die Selbst-Kalibrierung am Prüfobjekt ohne den Einsatz externer Systemtechnik.*

Mit dem Schwerpunkt auf der Erhöhung des Autonomiegrades soll im Kapitel 5 die Möglichkeit zur Erfassung von Kalibrierdaten mit dem robotergeführten 3D-Sensor erarbeitet werden. Insbesondere soll die Automatisierung sowie die Auswahl geeigneter Kalibrierkonfigurationen betrachtet werden. Auf Grundlage dieser Daten sollen die Modellparameter bestimmt werden. Die zweite Hypothese soll im Rahmen einer Gültigkeitsbetrachtung verifiziert werden.



*Abbildung 3.2: Ansatz zur Datenaufnahme für die Selbst-Kalibrierung: a) Verschiedene Roboterkonfigurationen zur Drehung des Sensors um dessen Sichtachse, b) Detailansicht der Sensorposen, c) Detailansicht der erfassten 3D-Punktwolken eines Merkmals aus verschiedenen Sensorposen, d) registrierte Punktwolken und deren resultierenden Relativverschiebungen aufgrund von Modellabweichungen.*

Treffen die erste und die zweite Hypothese zu, kann eine dritte These mit Bezug zur Anwendung in der Koordinatenmesstechnik abgeleitet werden.

**Hypothese III:** *Die Modellgüte kann zur Bewertung der Gültigkeit des aktuellen Modells und der automatisierten (Teil-)Kalibrierung im Rahmen einer Messstrategie verwendet werden.*

Die Einbettung der Selbst-Kalibrierung in den Anwendungskontext der roboterbasierten Koordinatenmesstechnik erfolgt in Kapitel 6 in Form einer Messstrategie. Hierbei wird neben der Durchführung von Messaufgaben auch die Kompensation betriebsbedingter Einflüsse betrachtet.

Eine technische Bewertung wird anhand einer prototypischen Implementierung in Kapitel 7 dargestellt. Die Validierung erfolgt anhand von Artefakten zur Befähigungsanalyse von Prüfmitteln und Karosserieteilen aus der Automobilindustrie. Im Rahmen einer Kostenvergleichsrechnung mit alternativen Koordinatenmesssystemen wird die wirtschaftliche Eignung von roboterbasierten Messsystemen mit Selbst-Kalibrierung diskutiert.

Abbildung 3.3 zeigt die Gliederung der Hauptkapitel und die adressierten Hypothesen, welche am jeweiligen Kapitelende überprüft werden.

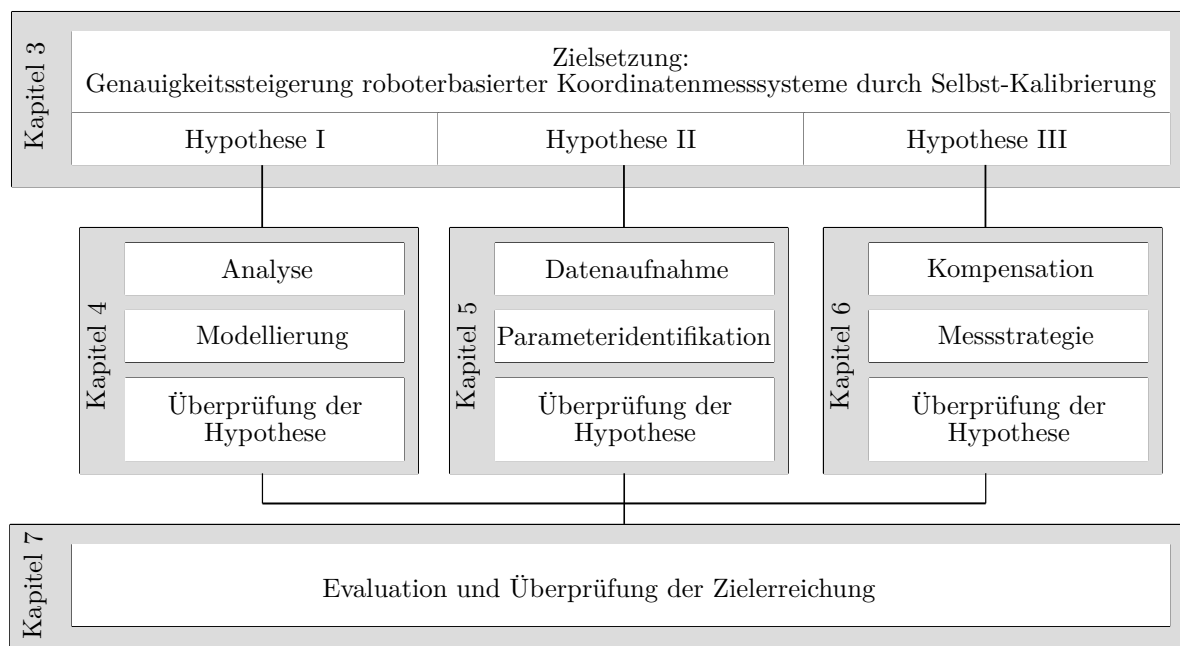


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Hauptkapitel und deren Zusammenhang mit den Hypothesen.

Die Ergebnisse sollen abschließend in Kapitel 8 zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Potentiale aufgezeigt werden.

## 4 Analyse und Modellierung

Grundlage des Kapitels bildet die erste Hypothese, welche die prinzipielle Möglichkeit der Genauigkeitssteigerung von roboterbasierten Messsystemen durch ein geeignetes Modell adressiert.

**Hypothese I:** *Die Genauigkeit roboterbasierter Messsysteme ist beschränkt durch die Pose-Genauigkeit des Roboters. Durch eine geeignete, mathematisch-physikalische Modellierung kann die Genauigkeit gesteigert werden, um die prinzipielle Systemeignung im Kontext der Koordinatenmesstechnik zu erreichen.*

Zur Plausibilisierung dieser These müssen folgende Leitfragen beantwortet werden:

- Welche Einflussgrößen bestimmen die Pose-Genauigkeit eines Robotersystems?
- Wie lassen sich die Einflussgrößen charakterisieren?
- Wie kann ein verallgemeinertes, parametrisiertes Modell auf Basis einer mathematisch-physikalischen Beschreibung formuliert werden?

Hierfür wird zunächst anhand des mechanischen Aufbaus eine Systembeschreibung mit den genauigkeitsrelevanten Komponenten abgeleitet. Durch Voruntersuchungen an den relevanten Komponenten können in einem folgenden Schritt die Eigenschaften charakterisiert werden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen bezüglich der Genauigkeitseinflüsse wird ein mathematisch-physikalisches, parametrisches Modell für serielle kinematische Ketten formuliert. Im Rahmen einer Gültigkeitsbetrachtung wird die Eignung des Modells für die Anwendung zur Genauigkeitssteigerung bei Vertikal-Knickarm-Robotern untersucht.

### 4.1 Analyse von Einflussgrößen auf die Pose-Genauigkeit

Für eine detailliertere Systembeschreibung wird zunächst der mechanische Aufbau betrachtet. Das zur Modellbildung notwendige Verständnis zur verallgemeinerten Beschreibung von komponentenspezifischen Effekten wird durch eine Methode zur Analyse von rotatorischen Achsen mittels eines 3D-Lasertrackersystems erarbeitet.

#### 4.1.1 Analyse des mechanischen Aufbaus

##### **Voruntersuchung**

Die Analyse des mechanischen Aufbaus einer seriellen kinematischen Kette soll exemplarisch anhand eines Standard-Vertikal-Knickarmroboters gezeigt werden. Aufgrund der ausgeprägten Ähnlichkeiten im Aufbau solcher Roboter, unabhängig vom Hersteller, lassen sich die hierbei gewonnenen Erkenntnisse übertragen und verallgemeinern. Insbesondere sollen Bauformen mit Zentralhand Berücksichtigung finden. Abbildung 4.1 zeigt die kinematische Struktur und Komponenten eines Industrieroboters *KR 30 L15/2* der Firma *KUKA Roboter GmbH*.

Gemäß ihrer Funktion können die Komponenten des Roboters in Glieder, Antriebseinheiten und Sensorik unterteilt werden. Die Glieder des Roboters sind strukturelle Elemente, welche die Roboterachsen miteinander verbinden und deren Anordnung zueinander determinieren. Die Antriebseinheiten beinhalten alle Komponenten des Roboters, die zur Bewegung der Glieder und deren Regelung beitragen. Hierzu zählen Motoren, Getriebe sowie die interne Sensorik.

Abbildung 4.2 zeigt die Einzelteile eines Elektromotors. Die Feststellbremse ist im unbestromten Zustand geschlossen. Die hierdurch erzeugte Reibungskraft wirkt einem an der Motorwelle anliegenden Belastungsmoment entgegen und verhindert das Verdrehen der Welle. Der im Motor integrierte Sensor erfasst den Drehwinkel der Motorwelle. Diese Größe dient als Steuergröße der Antriebsregelung. Die Antriebswelle des Motors ist direkt (z. B. bei den Hauptachsen) oder über Komponenten zur Kraftübertragung (beispielsweise Wellen und Zahnriemen bei den Handachsen) mit einem Getriebe verbunden.

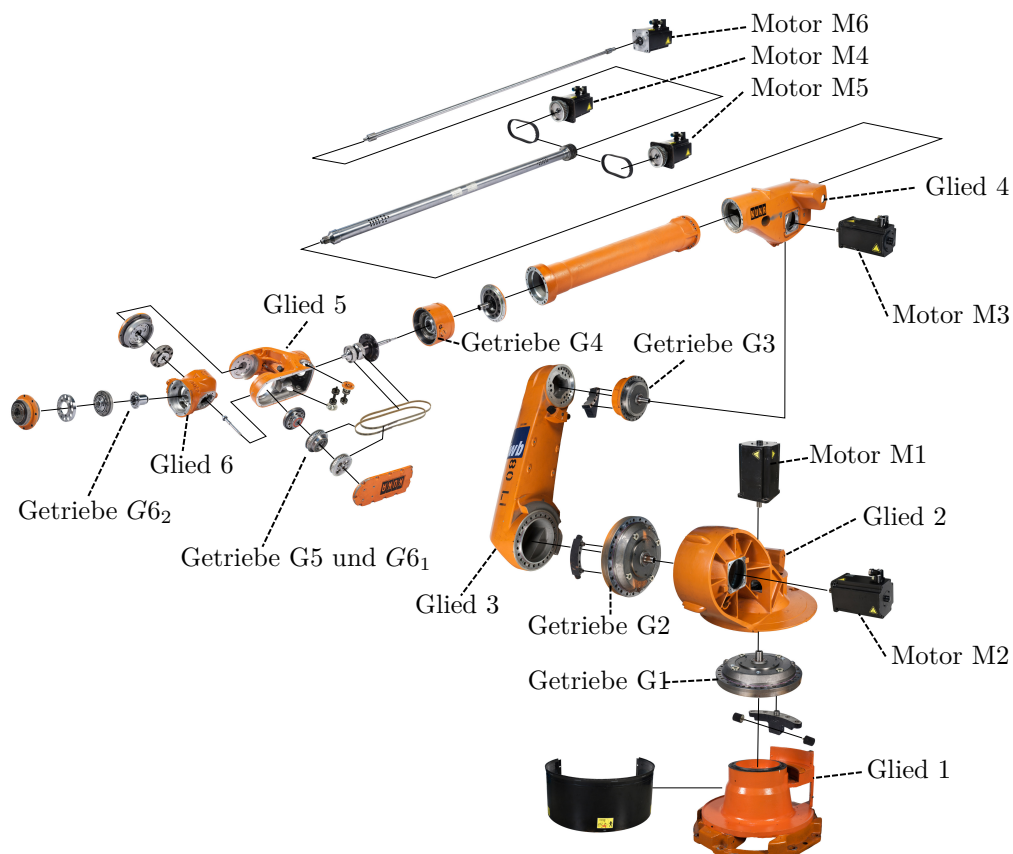


Abbildung 4.1: Komponenten und charakteristische kinematische Struktur eines Vertikal-Knickarmroboters mit sechs Achsen (KR 30 L15/2 der Firma KUKA Roboter GmbH) in Anlehnung an LUX, M. ULRICH et al. 2017.

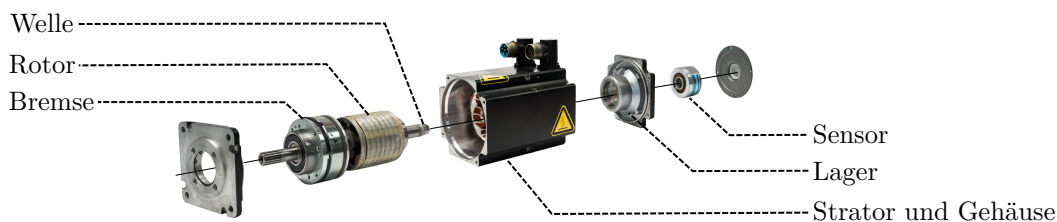


Abbildung 4.2: Komponenten eines Motors für den Antrieb einer Roboterachse.

Um hohe Übersetzungsverhältnisse bei kompakter Bauweise zu realisieren, werden typischerweise mehrstufige Getriebe bei Industrierobotern eingesetzt. Abbildung 4.3 zeigt exemplarisch den Aufbau des zweistufigen Umlaufgetriebes der ersten Achse eines Vertikal-Knickarmroboters vom Typ KR 30 L15/2 der Firma

*KUKA Roboter GmbH*. Die erste Getriebestufe besteht aus einem Planetengetriebe, wobei die Planetenräder mit den Exzentern des Zykloidgetriebes, der zweiten Stufe des Getriebes, verbunden sind.

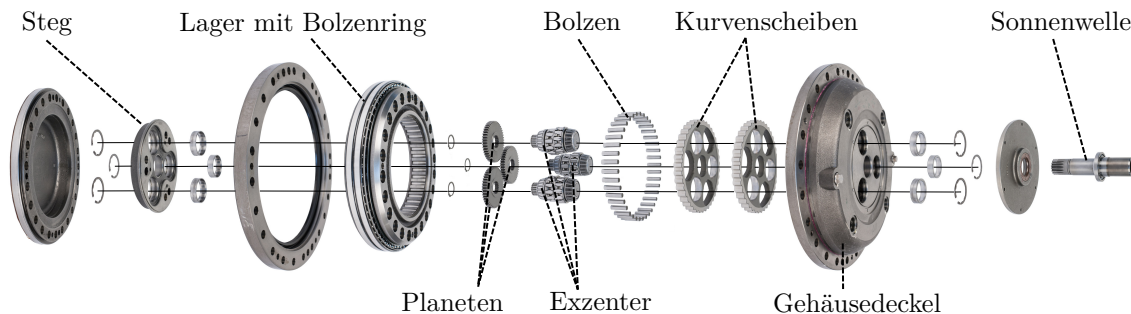


Abbildung 4.3: Aufbau des Getriebes der ersten Achse eines Industrieroboters KR 30 L15/2 der Firma KUKA Roboter GmbH.

Dies hat zur Folge, dass eine hohe Winkelauflösung auf der Ausgangsseite des Getriebes erreicht werden kann, um die Pose-Wiederholgenauigkeit zu erhöhen. Durch die Integration der Sensorik in die Motoren können jedoch die Einflüsse der nachfolgenden Komponenten, insbesondere der Getriebe, nicht messtechnisch von der Robotersteuerung erfasst werden. Die meist als Zustandsgrößen eines Roboters verwendeten Achswinkelstellungen werden folglich durch einen funktionalen Zusammenhang in Abhängigkeit der Getriebeelemente und deren mechanischen Aufbau bestimmt.

Mit zunehmend größerem Arbeitsraum und damit verbunden größeren Robotergliedern sowie höheren Traglasten des Roboters nehmen die auftretenden Drehmomente auf die Getriebe zu. Bei Vertikal-Knickarmrobotern sind hierbei insbesondere die Getriebe der zweiten Roboterachse betroffen. Um die auftretenden Drehmomente auf das Getriebe zu reduzieren, werden deshalb bei manchen Robotern Gewichtsausgleichssysteme (REINER 2011, S. 28; ORTMEIER & ENGELHARDT 1999) eingesetzt. Solche Systeme bestehen meist aus einem hydro-pneumatischen Zylinder, welcher zwischen dem Karussell und der Schwinge befestigt ist (ORTMEIER & ENGELHARDT 1999). Abbildung 4.4 zeigt ein solches System an der zweiten Achse eines Industrieroboters KR 90 R3100 extra HA der Firma KUKA Roboter GmbH.

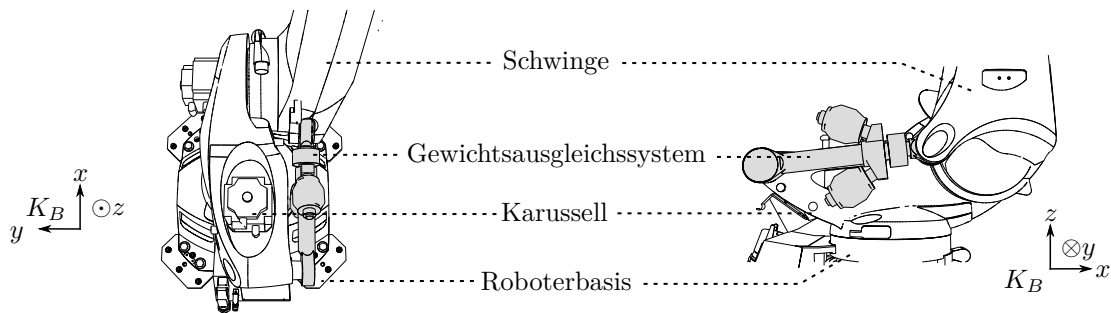


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung eines Gewichtsausgleichssystems an der zweiten Achse eines Industrieroboters KR 90 R3100 extra HA der Firma KUKA Roboter GmbH.

In Abhängigkeit vom Achswinkel erzeugt der Zylinder eine auf die Schwinge wirkende Kraft, welche dem auftretenden Drehmoment entgegen wirkt.

## Systembeschreibung

Basierend auf dem mechanischen Aufbau kann die kinematische Struktur schematisch dargestellt werden (Abbildung 4.5). Die Roboterglieder werden als gepunktete Rechtecke dargestellt. Hierbei entspricht  $\phi_i$  dem Drehwinkel der Motorwelle (Motorwinkel) des Motors  $M_i$ . Der Achswinkel der  $i$ -ten Achse ist als  $\theta_i$  bezeichnet. Das optionale Gewichtsausgleichssystem (GAS) ist gestrichelt als parallele Verbindung zwischen dem zweiten und dritten Glied eingezeichnet. Die Getriebeelemente  $G_i$  werden als Kreise dargestellt und dem antreibenden Motor  $M_i$  zugeordnet. Um die Zuordnung der Getriebeelemente gemäß dem Aufbau zu den Robotergliedern zu erlauben, werden Getriebestufen mit einem weiteren Index versehen, sofern diese mit Komponenten zur Kraftübertragung miteinander verbunden sind.

Das Fundament, auf welchem die Roboterbasis (erstes Glied) befestigt ist, wird als statisch angenommen. Die Verbindung zwischen Roboterbasis und Fundament ist nicht angetrieben und wird daher als passiv bezeichnet.

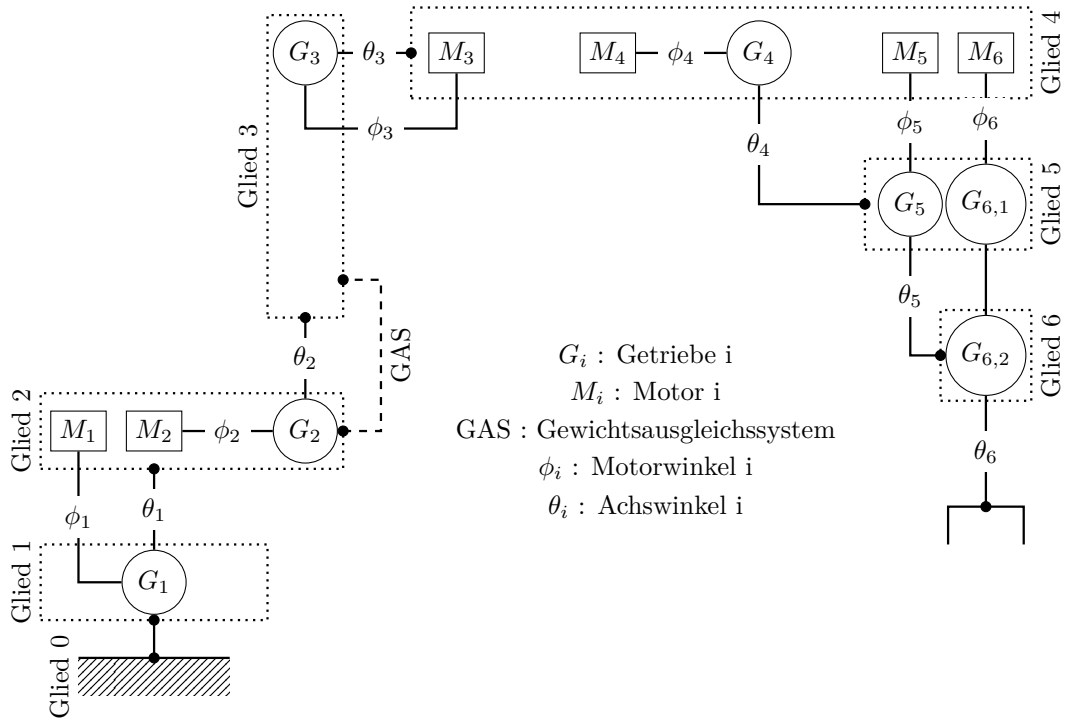


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der kinematischen Struktur eines Vertikal-Knickarmroboters in Anlehnung an LUX, M. ULRICH et al. 2017.

Aus der Abbildung 4.5 können die Zusammenhänge zwischen den Motorwinkeln und Achswinkeln entnommen und schematisch dargestellt werden. Auffällig hierbei sind insbesondere die kinematischen Kopplungen der Handachsen, welche exemplarisch für die sechste Roboterachse in Abbildung 4.6 dargestellt ist.

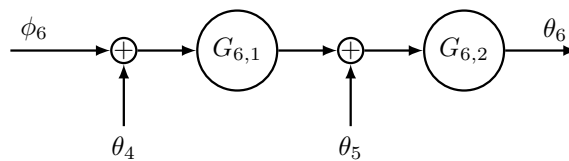


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Motorwinkel  $\phi_6$ , den Achswinkeln  $\theta_4$ ,  $\theta_5$  und dem resultierenden Achswinkel  $\theta_6$  der letzten Roboterachse (LUX, M. ULRICH et al. 2017).

Mit den korrespondierenden Übersetzungsverhältnissen  $i_{G_j}$  der Getriebestufen für die sechste Achse ergibt sich der Zusammenhang 4.1. Hierbei wird ersichtlich,

dass der resultierende Achswinkel  $\theta_6$  nicht ausschließlich vom Drehwinkel des Motors  $M_6$ , sondern darüber hinaus von den Achsstellungen der vierten und fünften Achse beeinflusst wird.

$$\theta_6 \propto \frac{1}{i_{G_{6,2}}} \cdot \left( \frac{1}{i_{G_{6,1}}} \cdot (\phi_6 + \theta_4) + \theta_5 \right) \quad (4.1)$$

Als Folgerung aus dem mechanischen Aufbau kann festgestellt werden, dass durch die Integration der internen Sensoren in die Motoren die Motorwinkel  $\phi_i$  als Steuergröße fungieren. Um von den Steuergrößen auf die Zustandsgrößen des Roboters, die Achswinkelstellungen  $\theta_i$ , zu schließen, muss folglich der funktionale Zusammenhang zwischen den Antriebselementen bekannt sein. Insbesondere ist dies bei kinematischen Kopplungen der Roboterachsen (z. B. bei den Handachsen) von Relevanz. Eine weitere unmittelbare Konsequenz des Aufbaus sind die Einflüsse der geometrischen Beziehungen der Roboterachsen zueinander auf die Position und Orientierung des Endeffektors (geometrische Einflussgrößen).

#### 4.1.2 Analyse nicht-geometrischer Effekte

Die Modellierung unter Berücksichtigung der angestrebten Genauigkeitsanforderungen des Gesamtsystems erfordert ein sehr grundlegendes Verständnis über auftretende Einflussgrößen. Hierfür soll eine Methode zur Identifikation nicht-geometrischer Effekte bei seriellen kinematischen Ketten erarbeitet werden. Auf Basis dieser Methode werden an zwei Vertikal-Knickarmrobotern relevante Effekte identifiziert.

#### **Methode zur Identifikation nicht-geometrischer Effekte**

Die Methode zur Identifikation und Charakterisierung nicht-geometrischer Effekte basiert auf der sequentiellen Untersuchung der Roboterachsen von seriellen kinematischen Ketten. Hierfür werden Abweichungen vom idealen Verhalten einer Achse mit Hilfe eines Lasertrackers erfasst und in Abhängigkeit der wirkenden Drehmomente charakterisiert (LUX, M. ULRICH et al. 2017).

Durch die Erfassung der Bewegung von ausgezeichneten Punkten an zwei aufeinanderfolgenden Robotergliedern kann das Verhalten der verbindenden Achse charakterisiert werden. Abbildung 4.7 zeigt schematisch eine rotatorische Achse sowie an den Robotergliedern angebrachte Lasertracker-Reflektoren. Der Referenz-Reflektor ist hierbei am unbewegten Glied achsnah angebracht. Die Reflektoren A und B werden auf dem angetriebenen Glied in unterschiedlichen Entfernungen zur Achse befestigt.

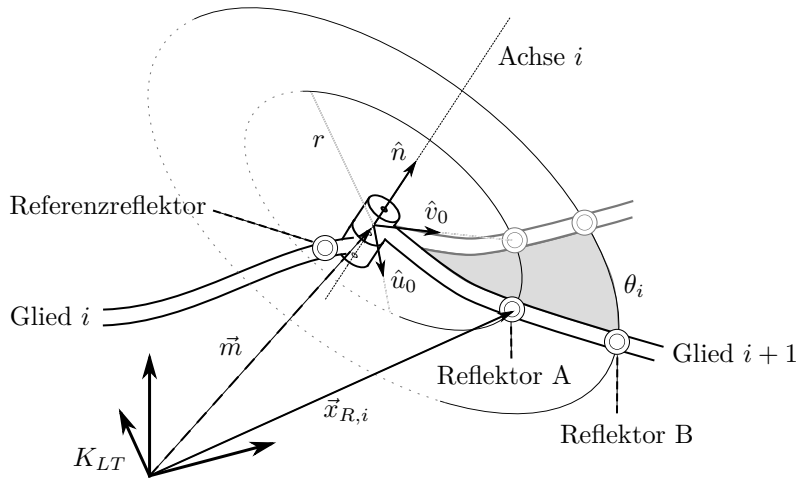


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Identifikation nicht-geometrischer Effekte an einer rotatorischen Achse  $i$  zwischen den Gliedern  $i$  und  $i + 1$  mittels eines 3D-Lasertrackers.

Bei Drehung der Achse beschreiben die Bahnen der Reflektoren A und B Kreisbögenabschnitte im Raum mit unterschiedlichen Radien. Für die Position  $\vec{x}_{R,i}$  eines am bewegten Roboterglied befestigten Reflektors gilt folglich Gleichung 4.2 in Abhängigkeit des Achswinkels  $\theta_i$ .

$$\vec{x}_{R,i} = \vec{m} + r \cdot \hat{u}_0 \cdot \cos \theta_i + r \cdot \hat{v}_0 \cdot \sin \theta_i \quad (4.2)$$

Abbildung 4.7 skizziert schematisch die zur Beschreibung verwendeten Größen. Hierbei gibt  $r$  die Entfernung des Reflektors von der Drehachse und  $\vec{m}$  die Position der Achse in Bezug zum Koordinatensystem  $K_{LT}$  des Lasertrackers an. Die Orientierung der Achse ist durch den Vektor  $\hat{n}$  gegeben und wird durch  $\hat{u}_0$  sowie  $\hat{v}_0$  zu einem rechtshändigen Koordinatensystem ergänzt. Hierbei wird  $\hat{u}_0$  gemäß Gleichung 4.2 entsprechend der Nulllage der Achse gewählt.

Im Umkehrschluss kann aus den erfassten Positionsdaten der Reflektoren und den zugehörigen Achswinkeln auf die Drehachse sowie deren Winkelfehler geschlossen werden. Hierfür werden in einem ersten Schritt die Positionsdaten der Reflektoren in Bezug auf das Koordinatensystem des Lasertrackers in Abhängigkeit des Achs- bzw. Motorwinkels erfasst. Mittels Regressionsverfahren werden in einem darauffolgenden Schritt die Kreischarakteristika für die auf dem angetriebenen Glied angebrachten Reflektoren bestimmt. Sei  $\vec{x}_{R,j}$  mit  $j = 1, \dots, k_{ana}$  und  $k_{ana} > 5$  die Position  $j$  des Reflektors  $A$  bei verschiedenen Achswinkelstellungen  $\theta_{i,j}$ , so können durch das Minimierungsproblem 4.3 die Parameter  $\vec{m}$ ,  $\hat{u}_0$ ,  $\hat{v}_0$  und  $r$  bestimmt werden.

$$\min_{\vec{m}, \hat{u}_0, \hat{v}_0, r} \left( \vec{x}_{R,j} - \left( \vec{m} + r \cdot \hat{u}_0 \cdot \cos \theta_{i,j} + r \cdot \hat{v}_0 \cdot \sin \theta_{i,j} \right) \right)^2 \quad (4.3)$$

Die Orientierung der Achse berechnet sich nachfolgend mit Gleichung 4.4.

$$\hat{n} = \hat{u}_0 \times \hat{v}_0 \quad (4.4)$$

Insbesondere werden hierbei die Drehebene und die Orientierung der Achse bestimmt. Für jeden Punkt des Kreisbogens kann der relative Winkel  $\xi_i$  und die Verschiebung des Reflektors in Normalenrichtung zur Drehebene bestimmt werden. Es ergibt sich folglich im Vergleich zum Winkel der Robotersteuerung  $\theta_i$  ein relativer Achswinkelfehler  $\Delta\theta_i$  und eine axiale Verschiebung  $\Delta d_{axial,j}$  je erfasstem Datenpunkt.

$$\Delta\theta_{i,j} = \theta_{i,j} - \xi_{i,j} \quad (4.5)$$

$$\Delta d_{axial,j} = \hat{n} \cdot (\vec{x}_{R,j} - \vec{m}) \quad (4.6)$$

Werden darüber hinaus die Massen und Massenschwerpunkte der einzelnen Glieder abgeschätzt, kann das konfigurationsabhängige Drehmoment auf die betrachtete Achse  $\vec{M}_i(\vec{\theta})$  approximiert werden. Die Torsionssteifigkeit  $D_i$  des Gelenks  $i$  lässt sich folglich mit Gleichung 4.7 beschreiben.

$$D_i(\vec{M}) = \left. \frac{\partial (\vec{M}_i \cdot \vec{n})}{\partial \Delta\theta_{i,j}} \right|_{\vec{M}} \quad (4.7)$$

Hierbei entspricht  $\vec{M}_i \cdot \vec{n}$  dem auf die Drehachse wirkenden Drehmoment und  $\Delta\theta_{i,j}$  dem relativen Winkelfehler der  $i$ -ten Achse an der entsprechenden Stelle.

Die Methode zur Analyse von nicht geometrischen Einflussgrößen wurde an einem *KR 30 L15/2* und einem *KR 90 R3100 extra HA* durchgeführt. Hierbei wurde ein Lasertrackersystem *LTD500* von *Leica Geosystems AG*<sup>28</sup> eingesetzt. Nachfolgend werden identifizierte Einflussgrößen auf die Pose-Genauigkeit exemplarisch dargestellt.

### Nachgiebigkeit der Roboterbasis

Die Roboterbasis entspricht dem ersten Glied der Kinematik und wird gemäß den Herstellerspezifikationen meist im Boden verankert. Die Verbindung zwischen Boden und Roboterbasis kann hierbei als passives Gelenk aufgefasst werden.

Insbesondere bei Endeffektorposen im äußeren Bereich des Arbeitsraums werden hohe, auf die Roboterbasis wirkende, Drehmomente erzeugt. Diese werden maßgeblich durch die Stellungen der Hauptachsen beeinflusst.

Wird die Methode zur Analyse nicht-geometrischer Effekte auf passive Gelenke adaptiert, können Reflektoren entsprechend Abbildung 4.8 a) an der Roboterbasis befestigt werden.

Eine Nachgiebigkeit der Roboterbefestigung kann dann identifiziert werden, wenn die Verschiebungen der Reflektoren A und B mit dem durch Gravitation induzierten Drehmoment auf die Roboterbasis korrelieren. Hierbei kann das induzierte Drehmoment durch Änderung der ersten beiden Hauptachsen in Betrag und Richtung variiert werden.

Wird lediglich der Betrag des induzierten Drehmoments durch Änderungen des zweiten Achswinkels bei gestreckter Armkonfiguration ( $\theta_i = 0$  für  $i \neq 2$ ) betrachtet, kann der resultierende Kippwinkel  $\Delta\eta_{kipp}$  gemäß Gleichung 4.8 abgeschätzt werden<sup>29</sup>. Hierbei ist  $L_{AB}$  die Distanz zwischen den beiden Lasertracker-Reflektoren und  $\Delta z_{RA}$  beziehungsweise  $\Delta z_{RB}$  die Verschiebung der entsprechenden Lasertracker-Reflektoren in  $\hat{z}$ -Richtung.

---

<sup>28</sup>Genauigkeit von 25  $\mu\text{m}$  bei einem maximalen Abstand von 2,5 m zwischen Lasertracker und Reflektor.

<sup>29</sup>Hierbei wird angenommen, dass keine zusätzlichen Lasten oder ein Werkzeug angebracht sind und keine externen Kräfte auf die Roboterstruktur wirken.

$$\tan(\Delta\eta_{kipp}(\theta_2)) \approx \frac{\Delta z_{RA}(\theta_2) - \Delta z_{RB}(\theta_2)}{L_{AB}} \quad \text{mit } \theta_i = 0 \text{ für } i \neq 2 \quad (4.8)$$

Basierend auf dieser Abschätzung stellt Abbildung 4.8 b) den Kippwinkel um die senkrecht zur Verbindungslinie der Reflektoren A und B stehende Achse (y-Achse in Abbildung 4.8 a) in Abhängigkeit des Achswinkels  $\theta_2$  der zweiten Achse dar. Das Auftreten einer Winkeländerung im Vergleich zum Idealzustand in Abhängigkeit vom wirkenden Drehmoment impliziert eine Nachgiebigkeit. Diese Nachgiebigkeit der Roboterbefestigung zeigt für beide untersuchten Roboter einen ähnlichen Verlauf bei unterschiedlich starker Ausprägung.

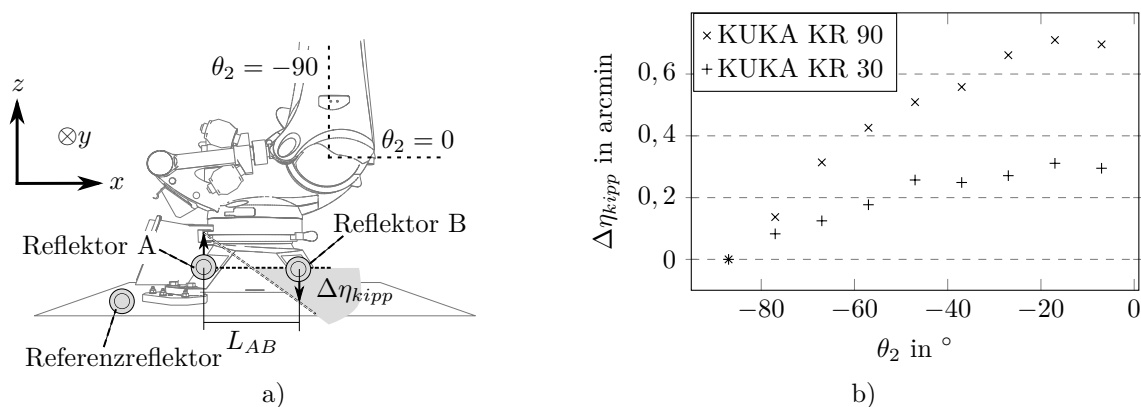


Abbildung 4.8: Nachgiebigkeit der Roboterbasis (LUX, M. ULRICH *et al.* 2017):  
a) Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Analyse des Kippwinkels  $\Delta\eta_{kipp}$  in Abhängigkeit des gravitationsinduzierten Drehmoments. b) Kippwinkel  $\Delta\eta_{kipp}$  in Abhängigkeit des Achswinkels  $\theta_2$  der zweiten Achse für die Industrieroboter KR 90 R3100 extra HA und KR 30 L15/2 der Firma KUKA Roboter GmbH.

Neben dem betragsmäßig wirkenden Drehmoment muss auch die Richtungsabhängigkeit bedingt durch die Roboterkonfiguration in Betracht gezogen werden.

Der Einfluss dieses Effekts auf die Positionsgenauigkeit des Endeffektors kann unter Berücksichtigung der Längen der einzelnen Roboterglieder und der Größenordnung abgeschätzt werden. Unter der Annahme eines maximalen Kippwinkels von 0,5 arcmin bei  $\theta_2 = 0^\circ$  und einer gestreckten Armkonfiguration bei einer Armlänge von 3 m ergibt sich ein Positionsfehler in der Größenordnung von 0,4 mm.

## Getriebeeffekte

Bezugnehmend auf den Stand der Forschung werden Getriebeeffekte als ein wichtiger Einflussfaktor auf die Pose-Genauigkeit genannt (vgl. Abschnitt 2.2.2). Um im Kontext einer Modellierung die hierbei auftretenden Effekte abbilden zu können, ist eine Charakterisierung dieser elementar. Die Methode zur Identifikation nicht-geometrischer Effekte kann auf die einzelnen Achsen angewendet werden und ermöglicht somit die Charakterisierung der Getriebeeffekte ohne eine Demontage des Systems.

Abbildung 4.9 zeigt exemplarisch für die zweite Achse eines *KR 30 L15/2* den relativen Winkelfehler  $\Delta\theta_2$  in Abhängigkeit vom Achswinkel  $\theta_2$  bei einer gestreckten Armkonfiguration ( $\theta_i = 0$  für  $i \neq 2$ ). Die Drehrichtungen der Achse werden durch unterschiedliche Symbole repräsentiert.

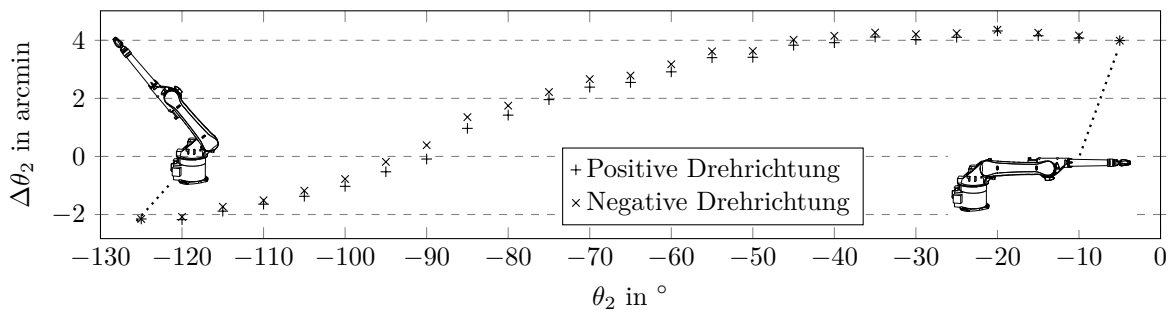


Abbildung 4.9: Relativer Winkelfehler  $\Delta\theta_2$  in Abhängigkeit vom Achswinkel  $\theta_2$  bei einer gestreckten Armkonfiguration ( $\theta_i = 0$  für  $i \neq 2$ ) für einen Industrieroboter *KR 30 L15/2* der Firma *KUKA Roboter GmbH* (LUX, M. ULRICH et al. 2017).

Da im Allgemeinen die Massenschwerpunkte und Massen der einzelnen Komponenten nicht als bekannt vorausgesetzt werden können, kann das auf die Achse wirkende, relative Drehmoment abgeschätzt werden. Hierfür wird der Quotient aus auftretendem Drehmoment  $M_2(\vec{\theta})$  und maximal auftretendem Drehmoment  $M_{2,max}$  betrachtet. Gleichung 4.9 beschreibt exemplarisch für die zweite Roboterachse das relative Drehmoment in Abhängigkeit des Achswinkels  $\theta_2$  bei gestreckter Armkonfiguration. Hierbei wird der sinusförmige Zusammenhang zwischen Drehmoment und Achsstellung nach MA et al. (1994) angenommen.

$$M_{2,rel}(\vec{\theta}) \Big|_{\theta_i=0 \forall i \neq 2} = \frac{M_2(\vec{\theta})}{M_{2,max}} \Big|_{\theta_i=0 \forall i \neq 2} \approx \cos(\theta_2) \quad (4.9)$$

Folglich kann, wie in Abbildung 4.10 für die zweite Achse dargestellt, der relative Winkelfehler in Bezug zum relativen Drehmoment dargestellt werden.

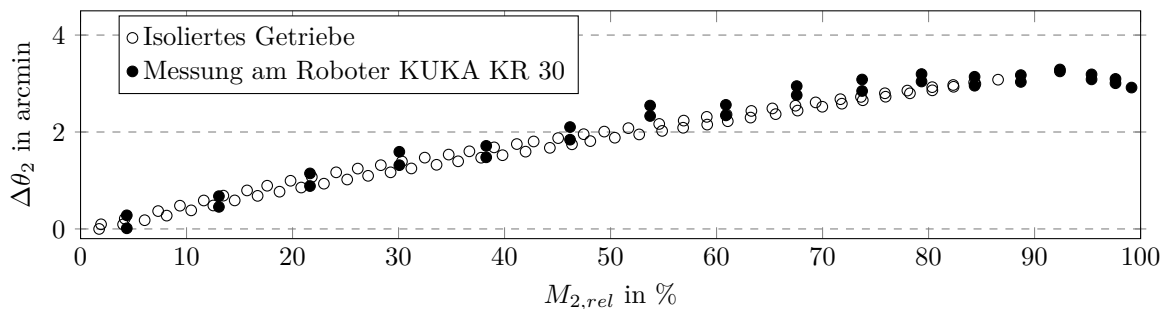


Abbildung 4.10: Relativer Winkelfehler  $\Delta\theta_2$  in Abhängigkeit des relativen Drehmoments  $M_{2,rel}$  bei einer gestreckten Armkonfiguration ( $\theta_i = 0$  für  $i \neq 2$ ) für einen Industrieroboter KR 30 L15/2 der Firma KUKA Roboter GmbH (LUX, M. ULRICH et al. 2017).

Unter Verwendung der Korrelation zwischen relativem Drehmoment und relativem Winkelfehler kann in Anlehnung an GERSTMANN (1991, S. 73–74) eine linearisierte, relative Torsionssteifigkeit gemäß Gleichung 4.7 bestimmt werden.

Zur Validierung der Methode bei der Analyse von Getrieben wird in Abbildung 4.10 zusätzlich die Messreihe am isolierten Getriebe<sup>30</sup> dargestellt.

Neben der Torsionssteifigkeit kann anhand der unterschiedlichen relativen Winkelfehlervläufe bei den Drehrichtungen auf das Hysteres- und Spielverhalten geschlossen werden. Hierbei korrelieren die Drehrichtungen mit zunehmendem beziehungsweise abnehmendem Drehmoment auf die Achse.

<sup>30</sup>Das Getriebe der zweiten Achse des Roboters KR 30 L15/2 wurde nach dem Anwenden der Methode ausgebaut und isoliert untersucht. Hierfür wurde das Getriebegehäuse in Einbaulage fixiert und der Winkelfehler auf Getriebeausgangsseite in Abhängigkeit vom angelegten Drehmoment bestimmt. Der Messablauf sowie die Auswertung hinsichtlich der Vergleichbarkeit wird im Anhang A.5.1 beschrieben. Das maximal wirkende Drehmoment wurde absolut durch Bestimmung der Massen aller Roboterkomponenten ermittelt.

In Abhängigkeit der Distanz zwischen Endeffektor und Achse ergeben sich durch die Torsionssteifigkeit Positionsabweichungen in der Größenordnung von 1 mm und durch die Hysterese Positionsabweichungen im Bereich von 0,1 mm.

Werden Roboter über eine lange Zeit für wiederholende Aufgaben eingesetzt, können sich verschleißbedingt die Charakteristika der Getriebe ändern. Solche Verschleißeffekte können sich in Form von erhöhtem Spiel, geringerer Torsionssteifigkeit, größerer Hysterese oder axialen Verschiebungen manifestieren. Die Identifikation solcher verschleißbedingter Einflüsse ist exemplarisch für ein Getriebe dem Anhang A.5.2 zu entnehmen.

### Gewichtsausgleichssystem

Gewichtsausgleichssysteme bestehen meist aus einem hydro-pneumatischen Zylinder, der zwischen den Robotergliedern befestigt ist, welche durch die zweite Achse verbunden werden. In Abhängigkeit des Achswinkels induziert das Gewichtsausgleichssystem eine auf das nachfolgende Roboterglied wirkende Kraft. Auf der einen Seite reduziert diese aufgrund des Hebelarms das wirkende Drehmoment, auf der anderen Seite tritt aufgrund der asymmetrischen Befestigung ein Drehmoment senkrecht zur Roboterachse auf. Abbildung 4.11 a) zeigt schematisch die durch das Gewichtsausgleichssystem induzierte Kraft.

Der Einfluss des Gewichtsausgleichssystems auf die Pose-Genauigkeit des Roboters kann mit Hilfe der axialen Verschiebung<sup>31</sup> identifiziert werden. Abbildung 4.11 b) zeigt schematisch die verwendeten Reflektorpositionen.

Die Reflektoren wurden in unterschiedlichen Abständen zur Drehachse auf dem angetriebenen Glied befestigt. Der Referenzreflektor wurde auf dem vorgelagerten Glied nahe der Achse befestigt. Die gemessene axiale Verschiebung (Abweichung in Normalenrichtung der Drehebene) der Reflektoren ist in Abbildung 4.11 c) dargestellt.

---

<sup>31</sup>Translation eines Reflektors in Richtung des Normalenvektors der Drehebene in Abhängigkeit des Achswinkels.

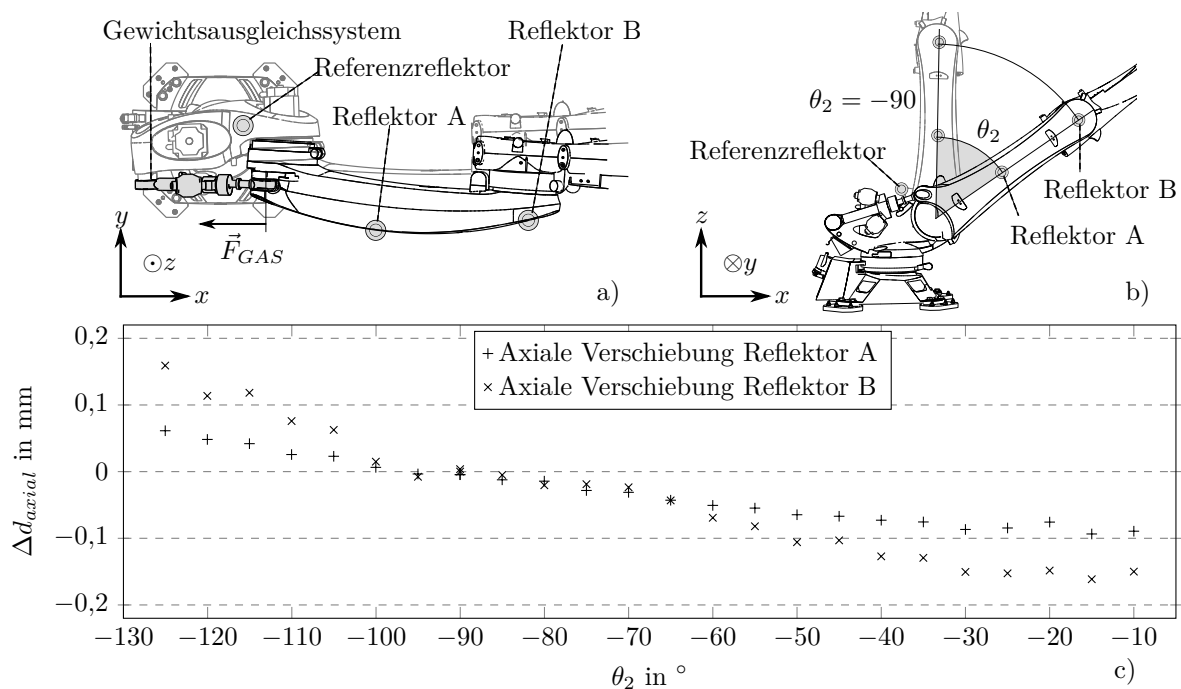


Abbildung 4.11: Analyse des Gewichtsausgleichssystems (LUX, M. ULRICH *et al.* 2017): a) Aufsicht auf den Versuchsaufbau sowie die durch das Gewichtsausgleichssystem induzierte Kraft  $\vec{F}_{GAS}$  auf die Schwin-  
ge, b) Positionierung der Reflektoren und Einfluss des Achs-  
winkels  $\theta_2$  der zweiten Roboterachse, c) Axiale Verschiebung in  
Abhängigkeit des Achswinkels  $\theta_2$  der zweiten Roboterachse für  
Reflektor A und B.

Wird die axiale Verschiebung der Reflektoren<sup>32</sup> mit deren Abstand zur Drehachse in Relation gesetzt, nimmt die axiale Verschiebung betragsmäßig mit größerer Distanz zu. Das durch das Gewichtsausgleichssystem induzierte Drehmoment führt folglich zu einer Änderung der Achsrichtung in Abhängigkeit des Achswinkels.

In Abhängigkeit von der Distanz zwischen der mit Gewichtsausgleichssystem versehenen Achse und dem Endeffektor kann die Größenordnung des Positionierungsfehlers, bedingt durch ein Gewichtsausgleichssystem, bei einer Armlänge von 3 m mit etwa 0,3 mm abgeschätzt werden.

<sup>32</sup>Hierbei seien Konfigurationen betrachtet, an welchen das Gewichtsausgleichssystem eine Kraft induziert.

### 4.1.3 Zwischenfazit aus der Analyse

Die sensortechnische Erfassung der Motorwinkel sowie der strukturelle Aufbau des Robotersystems erfordern zum einen, die Werte der Motordrehwinkelgeber als Zustandsgrößen des Systems zu betrachten, und zum anderen, die Übersetzungsverhältnisse mit kinematischen Kopplungen von Achsen (Handachsen) im Modell zu berücksichtigen.

Neben den geometrischen Eigenschaften der kinematischen Kette sind insbesondere zur Erreichung der Genauigkeitsanforderungen der Messtechnik auch die nicht-geometrischen Effekte im Modell zu inkludieren. Hierbei lassen sich Effekte den Komponenten zuordnen und mit physikalischem Bezug beschreiben. Die Methode zur Analyse von nicht-geometrischen Effekten ermöglicht hierbei die Charakterisierung einzelner Komponenten, ohne das Robotersystem zu demontieren.

Insbesondere gravitationsinduzierte Nachgiebigkeit in den Gelenken sowie der Befestigung der Roboterbasis und den Einfluss von Gewichtsausgleichssystemen auf die Struktur der kinematischen Kette können hierbei wesentliche Fehlereinflüsse auf die Pose-Genauigkeit darstellen.

## 4.2 Anforderungen an die Modellierung

Das Ziel der Modellierung ist die möglichst exakte Abbildung des statischen Systemverhaltens auf Basis erfassbarer Größen. Formal entspricht dies folglich der mathematischen Formulierung der Vorwärtstransformation.

Im Kontext der roboterbasierten Koordinatenmesstechnik lassen sich folgende Anforderungen aus Anwendungssicht ableiten:

- Genauigkeit:  
Die im Rahmen der messtechnischen Anwendung geforderte Genauigkeit muss entlang der Messkette erfüllt werden. Diese setzt sich zum einen aus der Roboterpose und der 3D-Messung des geführten Sensors zusammen. Folglich müssen alle genauigkeitsrelevanten Effekte des Robotersystems im Modell berücksichtigt werden.

- Verallgemeinerbarkeit auf offene kinematische Ketten:  
Ein wesentlicher Aspekt für die Anwendung des Modells ist die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Systeme. Diese setzt voraus, dass relevante Effekte komponentenspezifisch charakterisiert und parametrisiert modellierbar sind. Somit ist zum einen die Verallgemeinerung der Modellierung auf serielle kinematische Ketten gewährleistet und zum anderen können Systeme mittels Parameter vollständig charakterisiert werden.
- Bezug zu real-physikalischen Größen:  
Die Möglichkeit zur Plausibilisierung des Modells hilft dem Anwender, den Betrieb zu gewährleisten. Hierfür muss das Modell in einer nachvollziehbaren Form überprüfbar sein. Dies bedeutet, dass die Parameter einen Bezug zu real-physikalischen Größen haben müssen.
- Integrierbarkeit in die Anwendung:  
Die Integration der Modellierung in ein roboterbasiertes Koordinatensystem erfordert die Möglichkeit, das Systemverhalten des Roboters mit den Daten des 3D-Sensors zu verknüpfen.

Bedingt durch die Notwendigkeit, die Modellierung durch einen Abgleich mit dem Realsystem zu adaptieren, müssen drüber hinaus die Anforderungen Vollständigkeit, Minimalität und Stetigkeit der Parametrisierung (BEYER 2005, S. 75; SCHRÖER 1993, S. 29) zur Realisierung der Kalibrierung erfüllt werden.

### 4.3 Mathematisch-physikalisches Modell des Roboters

Das Robotermodell lässt sich als mathematische Abbildung zwischen messtechnisch erfassbaren Zustandsgrößen des Systems und dem Systemverhalten auffassen. Die funktionalen Parameter sind Formvariablen der mathematischen Abbildung und charakterisieren das Robotersystem eindeutig. Parameter sind hierbei statische Größen. Sie werden nicht durch die Roboterkonfiguration beeinflusst.

Im Falle der statischen Modellierung ist das Systemverhalten durch die Transformation zwischen einem Bezugskoordinatensystem und dem Endeffektorkoordinatensystem definiert. Auf Basis dieser Transformation können die im Anwendungskontext erfassten Punktwolken eines Merkmals im gemeinsamen Bezugskoordinatensystem registriert werden. Das Ergebnis des Modells entspricht folglich der

Pose des Endeffektors beziehungsweise der Charakterisierung eines gemessenen Merkmals in Bezug auf ein Bezugskoordinatensystem.

Bei seriellen, kinematischen Ketten wird typischerweise der Drehwinkel der Motorwelle  $\phi_i$  innerhalb des Motors  $i$  erfasst (vgl. Abbildung 4.2). Im Rahmen der Modellierung müssen folglich die Motorwinkel als Steuergrößen des Systems aufgefasst und die Übertragungsfunktion der Antriebselemente modelliert werden (Abschnitt 4.3.1).

Die geometrischen Einflüsse auf das Systemverhalten werden im Rahmen der kinematischen Modellierung in Abschnitt 4.3.2 betrachtet und nachfolgend um nicht-geometrische Einflüsse (Abschnitt 4.3.3) erweitert.

Die Zusammenführung der Bestandteile des Modells sowie die Diskussion der Eigenschaften wird in Abschnitt 4.3.4 betrachtet.

#### 4.3.1 Modellierung der Antriebselemente

Die Übertragungsfunktion der Antriebselemente verknüpft die messbaren Steuergrößen des Systems, die Motorwinkel  $\vec{\phi}$ , mit dessen Zustandsgrößen, den Achswinkelkonfigurationen  $\vec{\theta} \in C$ . Die hierbei betrachtete Systemgrenze inkludiert alle Komponenten, welche die Kraftübertragung ausgehend vom Motor bis zur kinematischen Achse realisieren.

Unter Berücksichtigung der kinematischen Struktur (z.B. kinematische Kopplung der Handachsen, vgl. Abbildung 4.5) kann in erster Näherung das Modell der Antriebselemente als Komposition aus einer ideal kinematischen Übertragungsfunktion und einem Fehlerterm, resultierend aus den nicht-geometrischen Effekten, verstanden werden. Im Speziellen zeigt dieser nicht-geometrische Fehlerterm gemäß Abschnitt 4.1.2 Abhängigkeiten zur Roboterkonfiguration in Form von induzierten Drehmomenten sowie zum vorausgegangenen Systemverhalten. So zeigt sich beispielsweise bei der Hysterese von Getrieben eine Abhängigkeit von der zur Erreichung der Konfiguration ausgeführten Bewegung.

Sei  $\vec{\phi} \in C_\phi \subset \mathbb{R}^q$  der Vektor der Motorwinkel in der aktuellen Roboterkonfiguration und  $\vec{\varphi} \in C_\phi \subset \mathbb{R}^q$  der Vektor der Motorwinkel in der vorherigen Roboterkonfiguration, so ist unter Berücksichtigung der Bewegungsart das vorausgegangene

Systemverhalten charakterisiert. Die Menge  $C_\phi \subset \mathbb{R}^q$  sei, in Anlehnung an den Konfigurationsraum, die Gesamtheit aller zulässigen Motorwinkelkonfigurationen des Systems<sup>33</sup>. Folglich entspricht die Definitionsmenge der Übertragungsfunktion dem Mengenprodukt  $C_\phi^2 = C_\phi \times C_\phi$ . Das Modell der Antriebselemente  $\vec{\theta} : C_\phi^2 \rightarrow C$ ,  $(\vec{\phi}, \vec{\varphi}) \mapsto \vec{\theta}$  kann entsprechend Gleichung 4.10 aufgeteilt werden.

$$\vec{\theta}(\vec{\phi}, \vec{\varphi}) = \underbrace{\vec{\theta}_{ideal}(\vec{\phi})}_{\text{ideale Übertragungsfunktion}} + \underbrace{\delta\vec{\theta}(\vec{\phi}, \vec{\varphi})}_{\text{Fehlerterm aus nicht-geometrischen Effekten}} \quad (4.10)$$

Die ideale Übertragungsfunktion berücksichtigt hierbei in Form von Gleichung 4.11 die kinematischen Kopplungen der Achsen und eine beliebige Nullstellung der Motoren  $\vec{\phi}_0$ .

$$\vec{\theta}_{ideal}(\vec{\phi}) = \mathbf{A} \cdot (\vec{\phi} - \vec{\phi}_0) \quad \text{wobei} \quad \mathbf{A} \in \mathbb{R}^{q \times q} \quad (4.11)$$

Die Matrixeinträge können hierbei anhand der kinematischen Struktur mit den Getriebeübersetzungen korreliert werden. Für Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen kann die sich hierdurch ergebende Matrixform dem Anhang A.6.1 entnommen werden.

Neben der idealen Übertragungsfunktion ist für die Modellierung der Antriebselemente die Abbildung der nicht-geometrischen Effekte notwendig. In Bezug zur Analyse ist hierbei insbesondere die Abbildung von Torsionssteifigkeit, Hysterese und Spiel relevant. Für den Fehlerterm aus nicht-geometrischen Effekten gilt daher Gleichung 4.12.

$$\delta\vec{\theta}(\vec{\phi}, \vec{\varphi}) = \delta\vec{\theta}_{Torsion} + \delta\vec{\theta}_{Hysterese} + \delta\vec{\theta}_{Spiel} \quad (4.12)$$

Die einzelnen Beiträge zum Fehlerterm der nicht-geometrischen Effekte werden im Abschnitt 4.3.3 betrachtet.

<sup>33</sup>Hierbei habe das System  $q$  angetriebenen Roboterachsen.

## 4.3.2 Kinematische Modellierung

Ziel der kinematischen Modellierung ist die mathematische Beschreibung der Transformationen zwischen den körperfesten Koordinatensystemen, welche den einzelnen Robotergliedern zugeordnet werden.

Abbildung 4.12 zeigt schematisch die zur Beschreibung des kinematischen Modells verwendeten Koordinatensysteme bei einem roboterbasierten Koordinatenmesssystem, bestehend aus einem Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen und einem 3D-Sensor. Die Koordinatensysteme seien so gewählt, dass  $K_0$  der Roboterbasis,  $K_E$  dem Endeffektorkoordinatensystem und  $K_B$  dem Bezugskoordinatensystem entspricht.

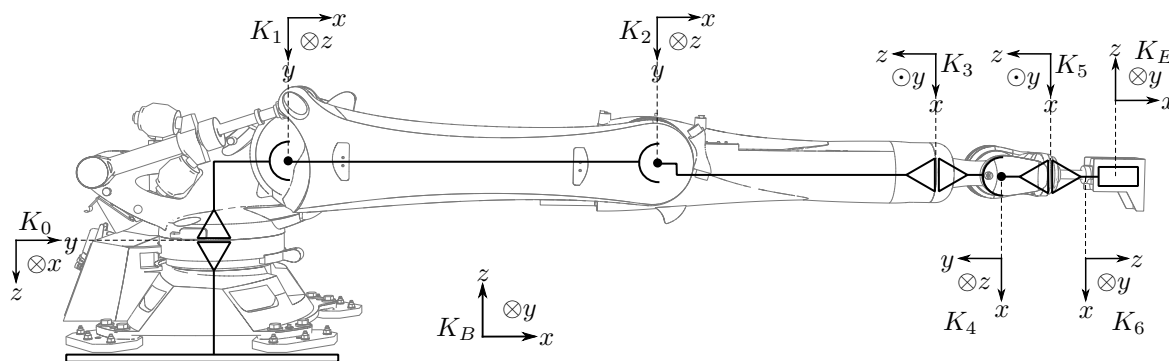


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung der Koordinatensysteme zur kinematischen Modellierung in Anlehnung an LETTENBAUER 2002, S. 40.

Unter Berücksichtigung der Anforderung nach Minimalität der Parameter werden Transformationen zwischen zwei Koordinatensystemen, welche über eine rotatorische Achse verbunden sind, mit Hilfe einer vierparametrigen Konvention beschrieben. Aufgrund der Nachvollziehbarkeit und Verbreitung wird die Beschreibung nach Denavit und Hartenberg gewählt, sofern die aufeinanderfolgenden Achsen nicht nahe der Parallelität sind (DENAVIT & HARTENBERG 1955; WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 23).

Transformationen, welche nicht durch einen kinematischen Zusammenhang in der Anzahl der Freiheitsgrade begrenzt sind, werden durch Beschreibungsformen mit sechs Parametern dargestellt. Eine geeignete Form stellt hierbei die

Beschreibung mittels Eulerwinkelkonvention<sup>34</sup> dar, da diese im Bereich der Robotik weit verbreitet und einfach nachvollziehbar ist. Insbesondere ist dies für die letzte Transformation der kinematischen Kette (Transformation zum Endeffektor beziehungsweise Sensorkoordinatensystem) und die Transformation vom Bezugskoordinatensystem zur Roboterbasis zutreffend. Zur Gewährleistung der Parameterstetigkeit wird bei nahezu parallelen aufeinanderfolgenden Achsen die Konvention nach Hayati und Mirmirani (HAYATI & MIRMIRANI 1985) verwendet.

Tabelle 4.1 fasst die für die jeweiligen Transformationen verwendeten Konventionen, Bezeichnungen und Parameter zusammen.

*Tabelle 4.1: Zur kinematischen Modellierung verwendete Transformationen mit zugehörigen Koordinatensystemen sowie deren Parameter.*

Transformation	Konvention	Zustandsgröße	Parameter
${}^B\mathbf{T}_0 : K_B \rightarrow K_0$	GNR	-	$\{x_B, y_B, z_B, A_B, B_B, C_B\}$
${}^0\mathbf{T}_1 : K_0 \rightarrow K_1$	DH	$\theta_1$	$\{\theta_1, d_1, a_1, \alpha_1\}$
${}^1\mathbf{T}_2 : K_1 \rightarrow K_2$	HM	$\theta_2$	$\{\theta_2, a_2, \alpha_2, \beta_2\}$
${}^2\mathbf{T}_3 : K_2 \rightarrow K_3$	DH	$\theta_3$	$\{\theta_3, d_3, a_3, \alpha_3\}$
${}^3\mathbf{T}_4 : K_3 \rightarrow K_4$	DH	$\theta_4$	$\{\theta_4, d_4, a_4, \alpha_4\}$
${}^4\mathbf{T}_5 : K_4 \rightarrow K_5$	DH	$\theta_5$	$\{\theta_5, d_5, a_5, \alpha_5\}$
${}^5\mathbf{T}_6 : K_5 \rightarrow K_6$	DH	$\theta_6$	$\{\theta_6, d_6, a_6, \alpha_6\}$
${}^6\mathbf{T}_E : K_6 \rightarrow K_E$	GNR	-	$\{x_E, y_E, z_E, A_E, B_E, C_E\}$

Durch eine multiplikative Verkettung der Transformationen kann gemäß Gleichung 4.13 die Vorwärtstransformation bestimmt werden (KHALIL & DOMBRE 2006, S. 42).

$${}_{Kin}^B\mathbf{T}_E(\vec{\theta}) = {}^B\mathbf{T}_0 \cdot \prod_{i=0}^5 {}^i\mathbf{T}_{i+1}(\vec{\theta}) \cdot {}^6\mathbf{T}_E \quad (4.13)$$

<sup>34</sup>Die Beschreibung von Transformationen mittels Eulerwinkelkonvention kann dem Anhang A.2.3 entnommen werden. Insbesondere wird im Folgenden die Z-Y'-X"-Konvention, auch Gier-Nick-Roll-Konvention (GNR-Konvention), verwendet.

## Parametrisierung

Im Kontext der kinematischen Modellierung können Abhängigkeiten zwischen Parametern unterschiedlicher Transformationen, insbesondere bei Berücksichtigung vom Bezug- und Endeffektorkoordinatensystem mittels einer sechseparametrigen Beschreibung, entstehen. Solche redundanten Parameter sind folglich nicht unabhängig im Rahmen der Kalibrierung zu identifizieren (VEITSCHGGER & C.-H. WU 1988).

Um der Anforderung nach Parameterunabhängigkeit zu entsprechen, werden daher folgende Annahmen für Vertikal-Knickarmroboter getroffen:

- Das Bezugskoordinatensystem kann beliebig gewählt sein.
- Die Transformation zum Endeffektor besitzt sechs Freiheitsgrade.
- Der Translationsanteil der Transformation  ${}^3\mathbf{T}_4$  ist konstant.
- Der Translationsanteil der Transformation  ${}^5\mathbf{T}_6$  ist Null.
- Der Nulllagenfehler wird im Rahmen der Modellierung der Antriebselemente berücksichtigt.

Für ein roboterbasiertes Koordinatenmesssystem ergeben sich folglich zusätzlich 26 Parameter im Rahmen der kinematischen Modellierung. Diese werden wiederum in einem Vektor  $\vec{p}_{kin}$  zusammengefasst.

### 4.3.3 Modellierung nicht-geometrischer Effekte

Ausgehend von der Betrachtung statischer gravitationsinduzierter Kräfte können nachfolgend parametrisierte Modelle der einzelnen Komponenten zur Beschreibung der nicht-geometrischen Effekte erstellt werden.

## Gravitationsinduzierte Kräfte und Drehmomente

Für die Bestimmung der Fehlereinflüsse nicht-geometrischer Effekte ist eine Abschätzung der wirkenden Kräfte und Drehmomente notwendig. Diese sind abhängig von der betrachteten Roboterkonfiguration, welche unter der Annahme kleiner nicht-geometrischer Effekte mit Hilfe der idealen Übertragungsfunktion

(Gleichung 4.11) und dem kinematischen Modell (Gleichung 4.13) approximiert werden kann.

Zur Berechnung des Gravitationseinflusses kann dementsprechend nach WIEST (2001, S. 32–34) der Richtungsvektor der Erdbeschleunigung  $\vec{g}$  entlang der kinematischen Kette transformiert werden. Es gilt folglich im Koordinatensystem  $K_i$  die Relation aus Gleichung 4.14.

$${}^i\vec{g} = {}^i\mathbf{T}_B \cdot {}^B\vec{g} \quad \text{mit} \quad {}^B\vec{g} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -g & 0 \end{pmatrix}^T \quad (4.14)$$

Durch eine sequentielle Betrachtung von Kraft- und Drehmomentengleichgewicht, ausgehend vom letzten Glied der kinematischen Kette, können in Abhängigkeit der Roboterkonfiguration die resultierenden Kräfte und Drehmomente auf die Roboterlieder und Roboterachsen bestimmt werden. Die Gleichungen 4.15a-4.15d zur Berechnung der Kraft und dem Drehmoment an einem Glied  $i$  ergeben sich aus Abbildung 4.13.

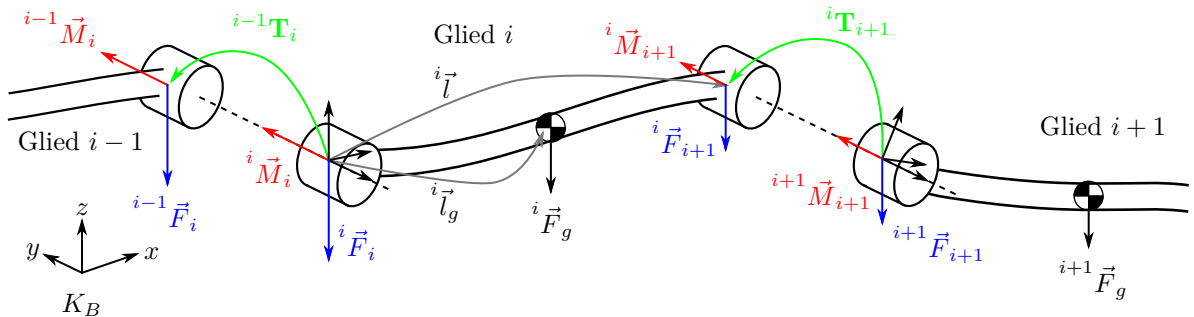


Abbildung 4.13: Schematische Darstellung einer kinematischen Kette zur Berechnung von wirkenden Kräften und Momenten auf eine Achse.

$${}^i\vec{F}_i = {}^i\vec{F}_g + {}^i\vec{F}_{i+1} = m_{\text{Glieder},i} \cdot {}^i\vec{g} + {}^i\mathbf{T}_{i+1} \cdot {}^{i+1}\vec{F}_{i+1} \quad (4.15a)$$

$${}^i\vec{M}_i = {}^i\vec{M}_{i,g} + {}^i\vec{M}_{i+1} \quad (4.15b)$$

$${}^i\vec{M}_{i,g} = {}^i\vec{l}_g \times {}^i\vec{F}_g = m_{\text{Glieder},i} \cdot {}^i\vec{l}_g \times {}^i\vec{g} \quad (4.15c)$$

$${}^i\vec{M}_{i+1} = {}^i\mathbf{T}_{i+1} \cdot {}^{i+1}\vec{M}_{i+1} + {}^i\vec{l} \times \left( {}^i\mathbf{T}_{i+1} \cdot {}^{i+1}\vec{F}_{i+1} \right) \quad (4.15d)$$

Typischerweise kann hierbei für Vertikal-Knickarmroboter jeweils Rotationssymmetrie für die Roboterglieder um eine ausgezeichnete Achse des körperfesten Koordinatensystems angenommen werden. Der Massenschwerpunkt des Strukturelements befindet sich folglich im Abstand  $|\vec{l}_g|$  zum Ursprung entlang dieser Koordinatenachse. Die zur Abschätzung der wirkenden Kräfte und Momente notwendigen Größen können dem Datenblatt des Roboters entnommen beziehungsweise abgeschätzt werden.

### Einfluss eines Gewichtsausgleichssystems

Das Gewichtsausgleichssystem kann im Rahmen der Modellierung als Feder zwischen der Schwinge und dem Karussell eines Vertikal-Knickarmroboters approximiert werden. Dies ermöglicht eine einfache geometrische Abschätzung der hierdurch erzeugten Kräfte durch Betrachtung des Federhubs  $h_{GAS}(\theta_2)$  aus dem unausgelenkten Zustand  $h_{GAS,0}$  unter Berücksichtigung der konstruktiven Befestigungspunkte. Abbildung 4.14 zeigt schematisch die zur Berechnung verwendeten Größen.

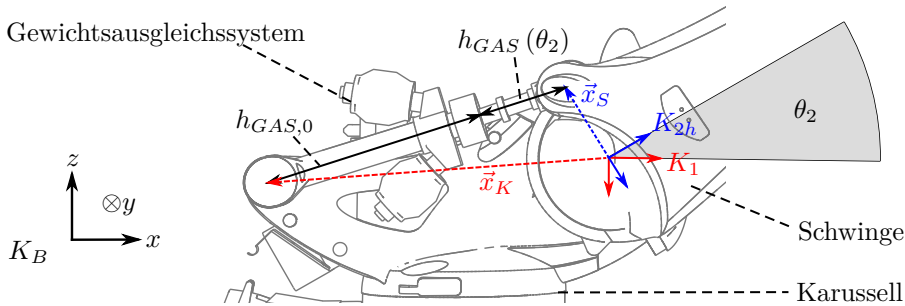


Abbildung 4.14: Schematische Darstellung des Gewichtsausgleichssystems zur Berechnung der induzierten Kraft auf die Schwinge.

Zur Berechnung des Federhubs  $h_{GAS}(\theta_2)$  mittels Gleichung 4.16 werden die relevanten Vektoren in ein gemeinsames Koordinatensystem, unter Zuhilfenahme der Koordinatensysteme  $K_1$  und  $K_{2h}$  sowie deren Transformation, überführt.

$$\begin{aligned} h_{GAS}(\theta_2) &= |\vec{x}_K - \vec{x}_S(\theta_2)| - h_{GAS,0} = |\vec{x}_K - {}^1\mathbf{T}_{2h}(\theta_2) \cdot {}^{2h}\vec{x}_S| - h_{GAS,0} \\ &= |{}^{2h}\vec{x}_K(\theta_2) - {}^{2h}\vec{x}_S| - h_{GAS,0} = |{}^{2h}\mathbf{T}_1(\theta_2) \cdot {}^1\vec{x}_K - {}^{2h}\vec{x}_S| - h_{GAS,0} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Unter der Annahme einer linearen Federkonstanten  $p_{GAS}$  beschreibt Gleichung 4.17 die betragsmäßige Kraft zwischen Karussell und Schwinge  $F_F$  in Abhängigkeit des Achswinkels  $\theta_2$ . Die Federkonstante  $p_{GAS}$  wird hierbei als zu bestimmender Parameter angenommen.

$$F_{GAS}(\theta_2) = h_{GAS}(\theta_2) \cdot p_{GAS} \quad (4.17)$$

Als vektorielle Größe in Bezug auf das Hilfskoordinatensystem  $K_{2h}$  der Schwinge ergibt sich folglich Gleichung 4.18.

$${}^2\vec{F}_{GAS}(\theta_2) = \frac{{}^{2h}\vec{x}_K(\theta_2) - {}^{2h}\vec{x}_S}{|{}^{2h}\vec{x}_K(\theta_2) - {}^{2h}\vec{x}_S|} \cdot F_{GAS}(\theta_2) \quad (4.18)$$

Die auf die Achse wirkenden Kräfte und Momente müssen folglich modifiziert werden. Es ergeben sich gemäß den Gleichungen 4.19a und 4.19b die Kraft sowie das Drehmoment auf die zweite Achse eines Roboters mit Gewichtsausgleichssystem.

$${}^2_{mod}\vec{F}_2 = {}^2\vec{F}_2 + {}^2\vec{F}_{GAS}(\theta_2) \quad (4.19a)$$

$${}^2_{mod}\vec{M}_2 = {}^2\vec{M}_2 + {}^2\vec{x}_S \times {}^2\vec{F}_{GAS}(\theta_2) \quad (4.19b)$$

Die Befestigungspunkte des Gewichtsausgleichssystems werden hierbei gemäß der Nominaldaten des Roboters angenommen. Lediglich die Federkonstante  $p_{GAS}$  geht als Parameter in die Modellierung ein.

### Torsionssteifigkeit

Getriebe weisen eine belastungsabhängige Nachgiebigkeit auf (GERSTMANN 1991, S. 72–73), welche die Roboterkonfiguration und damit die Pose des Endeffektors beeinflusst. Die Nachgiebigkeit eines rotatorischen Gelenks  $i$  stellt folglich ein Winkelfehler  $\delta\theta_{i,Torsion}(M_i)$  in Abhängigkeit des wirkenden Drehmoments  $M_i$  dar.

Typische Nachgiebigkeitskennlinien zeigen einen Sättigungsbereich für betragsmäßig große Drehmomente. Unter Berücksichtigung der Parameterminimalität kann eine Taylorreihe approximiert und nach der dritten Ordnung abgebrochen werden. Drüber hinaus folgt aus der Analyse des Nachgiebigkeitsverhaltens, dass es sich um ein ursprungssymmetrisches Verhalten des funktionalen Zusammenhangs handelt. Es gilt daher  $\delta\theta_{i,Torsion}(-M_i) = -\delta\theta_{i,Torsion}(M_i)$  und  $\delta\theta_{i,Torsion}(0) = 0$ . Gleichung 4.20 stellt basierend hierauf ein zweiparametriges Modell für die Nachgiebigkeit des Getriebes  $i$  mit den Parametern  $p_{i,Torsion1}$  und  $p_{i,Torsion2}$  dar.

$$\delta\theta_{i,Torsion}(M_i) = p_{i,Torsion1} \cdot M_i + p_{i,Torsion2} \cdot M_i^3 \quad (4.20)$$

## Hysteresese

Die Hysteresese bei Getrieben bezeichnet die Winkelabweichung von der Idealübertragung in Abhängigkeit einer Belastungsänderung. Dieser Effekt lässt sich nach GERSTMANN (1991, S. 74) auf Reibungsverluste, Werkstoffeigenschaften und Wirkungsgrade zurückführen. Typischerweise ist dieser Effekt betragsmäßig deutlich geringer als die Winkelabweichungen durch die Torsionssteifigkeit.

Eine vereinfachte Modellierung dieses Effektes kann durch die Betrachtung der Belastungsänderung mittels der Signumfunktion<sup>35</sup>  $sgn(\cdot)$  mit einer konstanten Hysteresese dargestellt werden (Gleichung 4.21).

$$\delta\theta_{i,Hysteresese}(\Delta M_i) = sgn(\Delta M_i) \cdot \frac{p_{i,Hysteresese}}{2} \quad (4.21)$$

$$= sgn\left(M_i|_{\vec{\phi}} - M_i|_{\vec{\varphi}}\right) \cdot \frac{p_{i,Hysteresese}}{2} \quad (4.22)$$

Aufgrund der Einbaulage des Getriebes der ersten Roboterachse bei Vertikal-Knickarmrobotern wirken in Ruhe keine Drehmomente um die Gelenkachse. Folglich wird hierfür die Hysteresese nicht in der Modellierung berücksichtigt ( $\delta\theta_{1,Hysteresese} = 0$ ).

---

<sup>35</sup>Die Signumfunktion kann dem Anhang A.3.2 entnommen werden.

## Getriebeispiel

Das Spiel im Getriebe stellt nach GERSTMANN (1991, S. 74) einen Sprung des Winkelfehlers an der Stelle des unbelasteten Zustands im Steifigkeitsdiagramm dar und lässt sich auf fertigungsbedingte Toleranzen zurückführen. SLAMANI, NUBIO-LA et al. (2012b) beschreiben Spiel hingegen in Abhängigkeit der Anfahrriichtung. Die richtungsabhängigen Genauigkeitskenngrößen Umkehrspanne<sup>36</sup> und Streuung der Mehrfachrichtungspose-Genauigkeit<sup>37</sup> implizieren hierbei ebenfalls eine Richtungsabhängigkeit und damit einen Einfluss der Drehrichtung der Achsen.

Mathematisch kann der Einfluss des Getriebeispiels in Gleichung 4.23 als Kombination dieser beiden Ansätze abgebildet werden. Hierzu wird die Richtung des wirkenden Drehmomentes  $M_i$  auf die Achse  $i$  sowie die Drehrichtung  $\text{sgn}(\phi_i - \varphi_i)$  der Achse zur Erreichung der Pose betrachtet.

$$\delta\theta_{i,\text{Spiel}}(M_i, \phi_i, \varphi_i) = \text{sgn}(M_i) \cdot \frac{p_{i,\text{Spiel1}}}{2} + \text{sgn}(\phi_i - \varphi_i) \cdot \frac{p_{i,\text{Spiel2}}}{2} \quad (4.23)$$

Hierbei repräsentieren die Parameter die betragsmäßige Größe des jeweiligen Sprungs des Winkelfehlers. Analog zur Hysterese wird der drehmomentabhängige Teil des Getriebeispiels des ersten Getriebes bei Vertikal-Knickarmrobotern Null. Es gilt  $\delta\theta_{1,\text{Spiel}} = \text{sgn}(\phi_1 - \varphi_1) \cdot \frac{p_{1,\text{Spiel2}}}{2}$ .

## Nachgiebigkeit der Roboterbasis

Um die Nachgiebigkeit der Roboterbasis als passives Gelenk innerhalb des Modells abbilden zu können, wird ein Sattelgelenk mit richtungsabhängigen, linearen Steifigkeiten angenommen (vgl. Abbildung 4.15). Die Steifigkeiten sind hierbei die charakterisierenden Parameter  $p_{B,x}$  und  $p_{B,y}$ .

<sup>36</sup> „Die Umkehrspanne [...] als systematische Abweichung ist in der jeweiligen Meßrichtung die Differenz, die sich aus den Mittelwerten der Meßwerte beider Anfahrriichtungen für jede Position bzw. Orientierung ergibt“ (VDI 2861 1988, S. 10).

<sup>37</sup> „Die Streuung der Mehrfachrichtungspose-Genauigkeit drückt die Abweichung zwischen den verschiedenen Istposen aus, die sich ergibt, wenn dieselbe Sollpose  $n$ -mal aus drei orthogonalen Richtungen angefahren wird“ (EN ISO 9283 1998, S. 15).

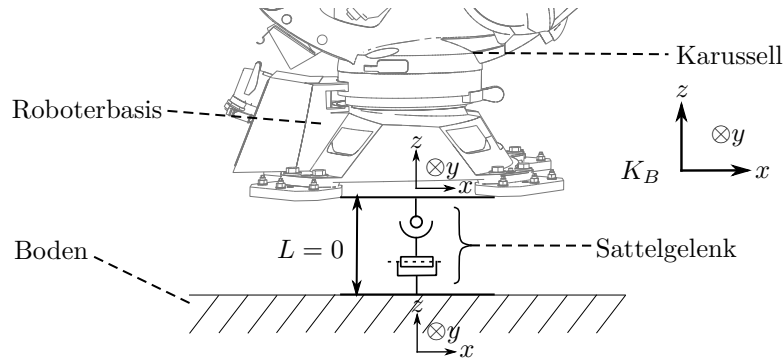


Abbildung 4.15: Schematische Darstellung zur Modellierung der gravitationsinduzierten Nachgiebigkeit der Roboterbasis.

Die gravitationsinduzierten Drehmomente  $M_{B,x}$  und  $M_{B,y}$ , welche auf die Roboterbasis wirken, resultieren folglich in einer Verkippung des Roboters mit den Kippwinkeln  $\Delta\eta_{kipp,x}$  und  $\Delta\eta_{kipp,y}$ . Diese können gemäß Gleichung 4.24 approximiert werden.

$$\Delta\eta_{kipp,x} = \frac{M_{B,x}}{p_{B,x}} \quad (4.24)$$

$$\Delta\eta_{kipp,y} = \frac{M_{B,y}}{p_{B,y}} \quad (4.25)$$

Gleichung 4.26 überführt die drehmomentabhängigen Kippwinkel in eine Transformationsmatrix für das Sattelgelenk.

$${}^0_B\mathbf{T}_0 = \mathbf{Rot}(\hat{y}, \Delta\eta_{kipp,y}) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{x}, \Delta\eta_{kipp,x}) \quad (4.26)$$

Unter Verwendung der homogenen Transformationsmatrix kann die Nachgiebigkeit der Roboterbasis folglich als passives Gelenk vor der ersten Achse in die kinematische Transformationskette des Roboters integriert werden.

## Deformation der Roboterglieder der Hauptachsen

Die Annahme ideal steifer Roboterglieder ist insbesondere bei Robotern mit hohen gravitationsinduzierten Drehmomenten unzulässig. Die auftretenden Kräfte führen nach LETTENBAUER (2002, S. 12) und SCHRÖER (1993, S. 22–23, 151–155) zu Deformationen der Glieder. Aufgrund der geometrischen Maße von Robotergliedern der Hauptachsen (Karussell, Schwinge und Arm bei Vertikal-Knickarmrobotern) gilt es maßgeblich, diese in Form eines Deformationsmodells in das Gesamtmodell zu integrieren.

Zur vereinfachten Modellierung wird eine Beschreibung als Biegebalken nach Bernoulli angenommen<sup>38</sup>, wobei  $w(L)$  der Auslenkung am Balkenende ( $x = L$ ) und  $w'(L) = \frac{dw}{dx}(L)$  dem Winkel  $\omega$  aufgrund der Balkenbiegung am Balkenende entspricht<sup>39</sup>.

Hierbei wird eine gleichmäßige Verteilung der Masse des Glieds über die Länge angenommen. Die Masse des Roboterglieds kann hierbei auf Basis der Roboter-gesamtmasse abgeschätzt werden. Als zu identifizierender Parameter der Deformation eines Glieds wird das Produkt aus dem Elastizitätsmodul und dem als konstant approximierten Flächenträgheitsmoment verwendet.

Die Deformation der Schwinge mit Länge  $L_S$  kann durch eine zusätzliche Hilfsttransformation  ${}_{Def,S}^2\mathbf{T}_2$  (Gleichungen 4.27a und 4.27b) zwischen den Koordinatensystemen  $K_2$  und  $K_3$  in der Transformationskette berücksichtigt werden. Hierbei führt die Biegung und Verdrehung zu einer Verschiebung entlang der  $y_2$ -Achse sowie eine Rotation um die  $-z_2$ -Achse (jeweils in Bezug auf das Koordinatensystem  $K_2$ ).

$${}_{Def,S}^2\mathbf{T}_2 = \mathbf{Trans}(\hat{y}, w(L_S)) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{z}, \omega_S) \quad (4.27a)$$

$$\approx \mathbf{Trans}(\hat{y}, w(L_S)) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{z}, w'(L_S)) \quad (4.27b)$$

<sup>38</sup>Die Herleitung zur Berechnung der Biegelinie  $w(x)$  und des Winkels  $\omega$  am Balkenende aufgrund der Biegung kann dem Anhang A.6.2 entnommen werden.

<sup>39</sup>Hierbei wird die Annahme der Kleinwinkelnäherung und  $w(L) \ll L$  zugrunde gelegt.

Die Deformation des Arms kann analog bestimmt werden, wobei die Hilfsttransformation zwischen den Koordinatensystemen  $K_4$  und  $K_5$  in die Transformationskette integriert wird, um den Bezug über die gesamte Armlänge  $L_A$  zu realisieren. Hierfür müssen zunächst die Auslenkung in  $x_3$ -Richtung und die Verdrehung um die  $-y_3$ -Richtung in Bezug auf das Koordinatensystem  $K_3$  (vgl. Gleichungen 4.28a und 4.28b) bestimmt werden.

$${}_{Def,A}^3\mathbf{T}_3 = \mathbf{Trans}(\hat{x}, w(L_A)) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{y}, -\omega_A) \quad (4.28a)$$

$$\approx \mathbf{Trans}(\hat{x}, w(L_A)) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{y}, -w'(L_A)) \quad (4.28b)$$

Mittels Gleichungen 4.29a und 4.29b kann die Hilfsttransformation  ${}_{Def,A}^4\mathbf{T}_4$  für die Integration in die kinematische Transformationskette in Bezug auf das Koordinatensystem  $K_4$  bestimmt werden.

$${}_{Def,A}^4\mathbf{T}_4 = {}^4\mathbf{T}_3 \cdot {}_{Def,A}^3\mathbf{T}_3 \cdot {}^3\mathbf{T}_4 \quad (4.29a)$$

$$= {}^3\mathbf{T}_4^{-1} \cdot {}_{Def,A}^3\mathbf{T}_3 \cdot {}^3\mathbf{T}_4 \quad (4.29b)$$

Eine Besonderheit bei der Deformation von Robotergliedern stellt das Karussell bei Vertikal-Knickarmrobotern mit Gewichtsausgleichssystem dar. Wie im Rahmen der Analyse (vgl. Abschnitt 4.1.2) gezeigt, wird hierbei durch das Gewichtsausgleichssystem eine zusätzliche, asymmetrisch wirkende Kraft eingebracht, die eine Änderung der Drehachse bewirkt. Zur Modellierung wird hierfür ein masseloser Biegebalken angenommen, wobei die Auslenkung in  $x_1$ -Richtung und die Verdrehung um die  $y_1$ -Achse des Koordinatensystems  $K_1$  betrachtet wird. Die Hilfsttransformation zur Integration in die Transformationskette ist durch die Gleichungen 4.30a und 4.30b gegeben. Die Länge  $L_K$  entspricht hierbei der Distanz zwischen der Position der Krafteinbringung durch das Gewichtsausgleichssystem und dem Rotationszentrum zwischen Karussell und Schwinge.

$${}_{Def,K}^1\mathbf{T}_1 = \mathbf{Trans}(\hat{x}, w(L_K)) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{y}, \omega_K) \quad (4.30a)$$

$$\approx \mathbf{Trans}(\hat{x}, w(L_K)) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{y}, w'(L_K)) \quad (4.30b)$$

#### 4.3.4 Integration in ein Gesamtmodell

Im Rahmen des Gesamtmodells werden die identifizierten und modellierten Effekte in eine mathematische Beschreibung überführt, welche eine Überprüfung und Bewertung der Genauigkeitssteigerung des Robotersystems erlaubt. Abbildung 4.16 zeigt schematisch den Aufbau des Gesamtmodells für die Berechnung der Endeffektorpose (Vorwärtstransformation) sowie die Integration des Modells in das Messsystem (Registrierung).

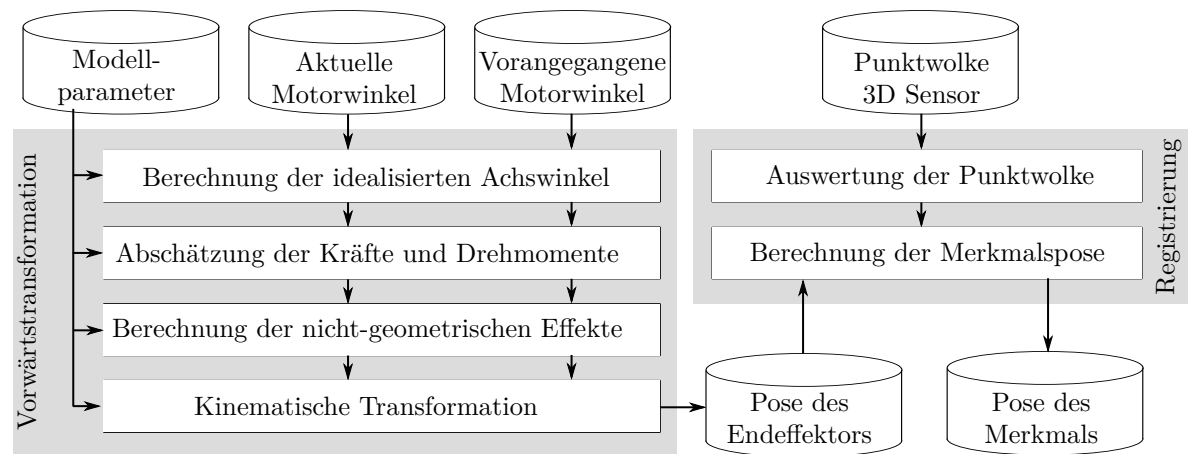


Abbildung 4.16: Schematische Darstellung des Gesamtmodells zur Berechnung der Pose des Endeffektors sowie der Registrierung der Sensordaten zur Bestimmung der Pose eines erfassten Merkmals des Prüfobjektes.

Das Modell einer seriellen kinematischen Kette mit  $q$  angetriebenen Achsen und  $N$  Parametern entspricht hierbei einer Abbildung  ${}_{Rob}^B\mathbf{T}_E : C_\phi^2 \times \mathbb{R}^N \rightarrow M, (\vec{\phi}, \vec{\varphi}, \vec{p}) \mapsto {}_{Rob}^B\mathbf{T}_E(\vec{\phi}, \vec{\varphi}, \vec{p})$ , wobei  $M \subset SE(3)$  die Menge der erreichbaren Endeffektorposen im kartesischen Arbeitsraum  $W$  eines Roboters ist.

Diese Abbildung kann durch die Komposition der Modellkomponenten und durch die Adaption der Transformation entlang der kinematischen Kette erzeugt werden (Gleichung 4.32). Für die Endeffektorpose eines Vertikal-Knickarmroboters mit Ge-

wichtsausgleichssystem gelten folglich die Zuordnungsvorschriften 4.31a-4.31f.

$$(\vec{\phi}, \vec{p}) \mapsto \vec{\theta}_{ideal} \quad (4.31a)$$

$$(\vec{\theta}_{ideal}, \vec{p}) \mapsto {}^j\vec{F}_i \quad (4.31b)$$

$$(\vec{\theta}_{ideal}, \vec{p}) \mapsto {}^j\vec{M}_i \quad (4.31c)$$

$$({}^j\vec{M}_i, \vec{\phi}, \vec{\varphi}, \vec{p}) \mapsto \delta\vec{\theta} \quad (4.31d)$$

$$(\vec{\theta}_{ideal}, \delta\vec{\theta}) \mapsto \vec{\theta} \quad (4.31e)$$

$$(\vec{\theta}, {}^j\vec{F}_i, {}^j\vec{M}_i) \mapsto {}_{Modell}^i\mathbf{T}_{i+1} = \begin{cases} {}^0\mathbf{T}_0 \cdot {}^0\mathbf{T}_1 & \text{für } i = 0 \\ {}^{Def,K}{}^1\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 & \text{für } i = 1 \\ {}^{Def,S}{}^2\mathbf{T}_2 \cdot {}^2\mathbf{T}_3 & \text{für } i = 2 \\ {}^{Def,A}{}^4\mathbf{T}_4 \cdot {}^4\mathbf{T}_5 & \text{für } i = 4 \\ {}^i\mathbf{T}_{i+1} & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.31f)$$

$$\Rightarrow {}_{Rob}^B\mathbf{T}_E(\vec{\phi}, \vec{\varphi}, \vec{p}) = {}^B\mathbf{T}_0 \cdot \prod_{i=0}^5 {}_{Modell}^i\mathbf{T}_{i+1} \cdot {}^6\mathbf{T}_E \quad (4.32)$$

Im Speziellen gilt für die Position des TCPs im Bezugskordinatensystem folglich Gleichung 4.33, wobei  ${}^E\vec{0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T$  der Ursprung im Endeffektorkoordinatensystem ist.

$${}_{TCP}\vec{f}(\vec{\phi}, \vec{\varphi}, \vec{p}) = {}_{Rob}^B\mathbf{T}_E(\vec{\phi}, \vec{\varphi}, \vec{p}) \cdot {}^E\vec{0} \quad (4.33)$$

In Anlehnung an Kalibrierverfahren mit offenen kinematischen Ketten kann der Residuenvektor  $\vec{r}_i$  für eine Roboterkonfiguration  $i$  definiert werden (Gleichung 4.34).

$$\vec{r}_i = \begin{pmatrix} r_{i,x} & r_{i,y} & r_{i,z} & 0 \end{pmatrix}^T = {}^B\vec{x}_{mess,i} - {}_{TCP}\vec{f}_i(\vec{\phi}_i, \vec{\varphi}_i, \vec{p}) \quad (4.34)$$

Hierbei entspricht  ${}^B\vec{x}_{mess,i}$  der messtechnisch erfassten TCP-Position.

Im Falle eines adäquaten Modells werden alle relevanten Effekte abgebildet. Der euklidische Fehler nähert sich der Positionswiederholgenauigkeit des Systems an.

Dies bedeutet, dass die Abweichungen bezüglich der einzelnen Raumrichtungen normalverteilt (SCHRÖER 1993, S. 186) um die Sollposition auftreten und den Zusammenhang 4.35 erfüllen.

$$r_k = (r_{0,k}, \dots, r_{m,k}) \sim N(0, \sigma_k^2) \quad \text{mit } k \in \{x, y, z\} \quad (4.35)$$

Für die Summe der quadrierten Abweichungen ergibt sich folglich eine Chi-Quadrat-Verteilung  $\chi_n^2$  mit drei Freiheitsgraden  $n = 3$  (Zusammenhang 4.36),

$$\chi_3^2 \sim r_x^2 + r_y^2 + r_z^2 \quad (4.36)$$

wobei für die Dichte  $f_{\chi,n}(x)$  der Chi-Quadrat-Verteilung  $\chi_n^2$  mit  $n$  Freiheitsgraden unter Verwendung der Gammafunktion  $\Gamma$  Gleichung 4.37 gilt.

$$f_{\chi,n}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} \cdot x^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{x}{2}} & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x \leq 0 \end{cases} \quad (4.37)$$

Die Chi-Quadrat-Verteilung lässt sich hierbei als Spezialfall der Dichte der Gamma-verteilung  $\gamma(p, b)$  (vgl. Gleichung 4.38) mit dem Formparameter  $p = \frac{n}{2}$  auffassen, wobei  $\Gamma$  die Gammafunktion,  $p \in \mathbb{R}^+$  der Form- und  $b \in \mathbb{R}^+$  der Skalierungsparameter ist.

$$f_{\gamma,p,b}(x) = \begin{cases} \frac{b^p}{\Gamma(p)} \cdot x^{p-1} \cdot e^{-bx} & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x \leq 0 \end{cases} \quad (4.38)$$

Folglich lässt sich die Dichte der Gammaverteilung zur Beschreibung der Summe der quadrierten Abweichungen des Modells verwenden. Eine Weibullverteilung für die euklidischen Abweichungen, wie von JOUBAIR et al. (2016) vorgeschlagen, wird hierbei als nicht zutreffend angenommen, da diese Verteilung für normalverteilte Abweichungen nicht in die Chi-Quadrat-Verteilung übergeht.

Die Gültigkeit des Modells kann folglich entsprechend der Verteilung bewertet werden. Sie ermöglicht die Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit gemäß dem Erwartungswert der Gammaverteilung (vgl. Gleichung 4.39).

$$E_{\gamma}(p, b) = \frac{p}{b} \quad (4.39)$$

Der Erwartungswert entspricht folglich der Modellgenauigkeit und korreliert mit der Modellgüte.

## 4.4 Gültigkeitsbetrachtung des Robotermodells

### 4.4.1 Methode zur Gültigkeitsbetrachtung

Zur Untersuchung der Gültigkeit und der Vergleichbarkeit des Modells wird in Anlehnung an das Vorgehen von SCHRÖER (1993, S. 300–302) ein Kalibrierverfahren mit externer Datenerfassung verwendet. Hierbei wird ein Kalibrierdatenset in einem spezifizierten Volumen mittels eines Lasertrackers erfasst und zur Identifikation geeigneter Modellparameter verwendet. Die erreichbare Genauigkeit wird anhand eines Validierdatensets, welches unabhängig von den Kalibrierdaten erfasst wird, verglichen.

Abbildung 4.17 zeigt schematisch den Versuchsaufbau mit zugehörigem Erfassungsvolumen. Zur Datenaufnahme (Kalibrierdaten und Validierdaten) werden Roboterkonfigurationen angefahren, welche eine randomisierte TCP-Position im Erfassungsvolumen bei Einhaltung einer Sichtlinie zwischen Lasertracker und Reflektor gewährleisten. Für jede Roboterkonfiguration werden hierbei die Position des Reflektors im Lasertrackerkoordinatensystem, die aktuelle Achswinkelkonfiguration, die aktuelle und vorherige Motorwinkelkonfiguration gespeichert. Auf Basis der Kalibrierdaten werden die Modellparameter durch Minimierung der Zielfunktion gemäß Gleichung 2.19 (vgl. Abschnitt 2.4) auf Basis des Levenberg-Marquardt-Verfahrens identifiziert.

Zur Betrachtung der Gültigkeit werden die anhand des Modells berechneten TCP-Positionen mit den durch den Lasertracker erfassten Positionen verglichen und entsprechend der Abweichungsverteilung bewertet.

Die Gültigkeitsbetrachtung wurde exemplarisch für den Roboter *KR 90 R3100 extra HA* der Firma *KUKA Roboter GmbH* unter Verwendung eines Lasertrackers *LTD500*<sup>40</sup> der Firma *Leica Geosystems AG* durchgeführt.

---

<sup>40</sup>Vor der Datenaufnahme wurde das Lasertrackersystem mehrere Stunden aufgewärmt, um Drifteffekte auszuschließen. Weitere Spezifikationen zur Verwendung sind dem Anhang in Abschnitt A.4.2 zu entnehmen.

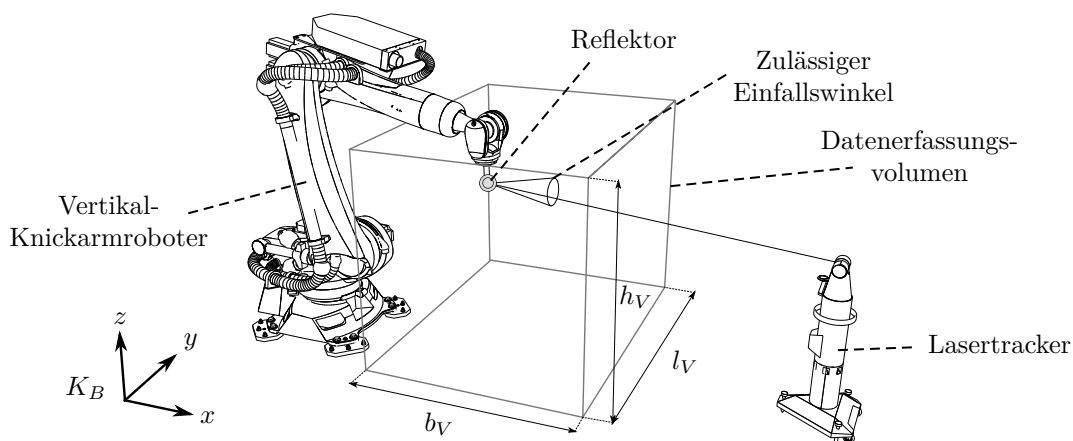


Abbildung 4.17: Versuchsaufbau zur Betrachtung der Modellgültigkeit: Die Datenaufnahme der Kalibrier- und Validierdaten erfolgt mit Hilfe eines 3D-Lasertrackers in einem definierten, quaderförmigen Erfassungsvolumen.

#### 4.4.2 Genauigkeit

Zur Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit muss im Rahmen der Parameteridentifikation sichergestellt sein, dass das resultierende Gleichungssystem (vgl. Abschnitt 2.3, Gleichung 2.6) deutlich überbestimmt ist. Dies bedeutet, dass die Anzahl der zur Parameteridentifikation verwendeten Roboterkonfigurationen  $m$  einem Vielfachen der Anzahl der Parameter  $N$  entspricht.

Als Referenz ist in Abbildung 4.18 (links) die Verteilung der kartesischen Abweichungen für  $m = 200$  Roboterkonfigurationen und idealisierten Parametern<sup>41</sup> dargestellt. Die Größenordnung der hierbei auftretenden Abweichungen sind in Übereinstimmung mit Positionsgenauigkeiten aus der Literatur (M. ULRICH, LUX & PIPREK 2014; BONGARDT 2004, S. 18) und den Abschätzungen aus dem Abschnitt 4.1 zur Analyse.

<sup>41</sup>Hierbei wurden die Parameter der Robotergeometrie aus dem Datenblatt des Roboters übernommen und lediglich die Parameter zur Charakterisierung der Endeffektortransformation sowie Transformation des Bezugskoordinatensystem mittels Optimierungsverfahren ermittelt.

Abbildung 4.18 (rechts) zeigt für  $m \gg N$  die Verteilung der kartesischen Abweichungen nach der Identifikation aller Modellparameter sowie die Darstellung der Verteilung als Boxplot. Zur weiteren Charakterisierung der Verteilung kann mittels Regressionsverfahren eine entsprechend parametrisierte Dichtefunktion der Gammaverteilung für die quadrierten Abweichungen identifiziert werden.

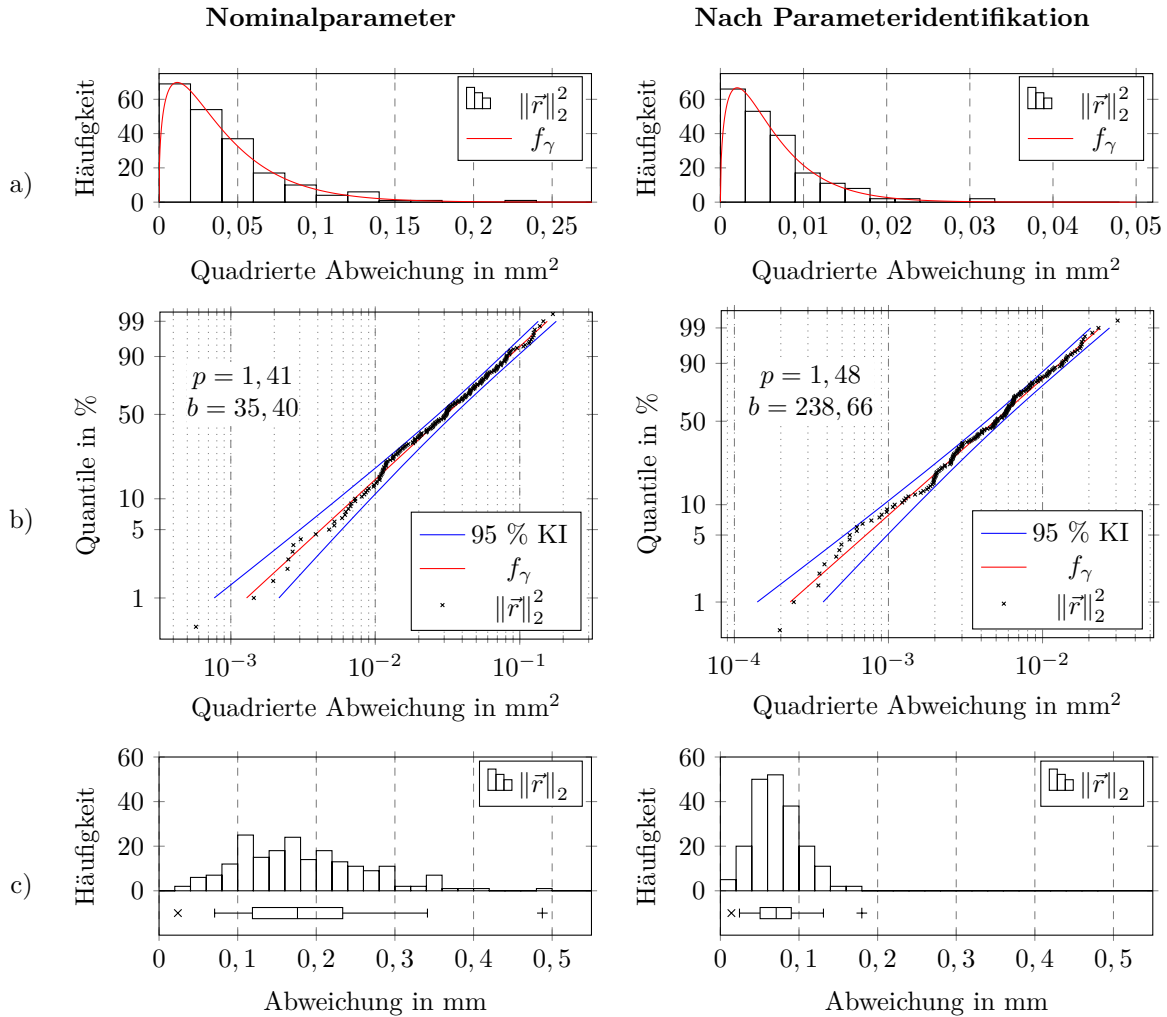


Abbildung 4.18: Modellgenauigkeit mit Nominalparameter (links) und auf Basis der Lasertrackerdaten identifizierten Parameter (rechts) am Beispiel eines KR 90 R3100 extra HA: a) Verteilung der quadrierten Abweichungen, b) Wahrscheinlichkeitsdiagramm der Dichte der Gammaverteilung mit 95 % Konfidenzintervall, c) Histogramm der kartesischen Abweichungen und Darstellung als Box-Whisker-Diagramm.

Für das parametrisierte Modell ist die Dichte der Gammaverteilung ähnlich der Chi-Quadrat-Verteilung. Weiterhin ist der Median der kartesischen Abweichungen in der Größenordnung der Positions-Wiederholgenauigkeit. Dies plausibilisiert die Vollständigkeit des Modells hinsichtlich der Abbildung von genauigkeitsrelevanten Effekten.

Im Vergleich zu der Verteilung der kartesischen Abweichungen mit idealisierten Parametern lässt sich eine Verbesserung der Positionsgenauigkeit um den Faktor 2,6 feststellen.

Die erreichte Genauigkeitssteigerung durch eine geeignete Parametrisierung des Modells ist hierbei reproduzierbar. Abbildung 4.19 stellt die Verteilungen der kartesischen Abweichungen für eine zwanzigfache Parametrisierung des Modells auf Basis von Kalibrierdatensets mit jeweils  $m = 200$  Roboterkonfigurationen dar.

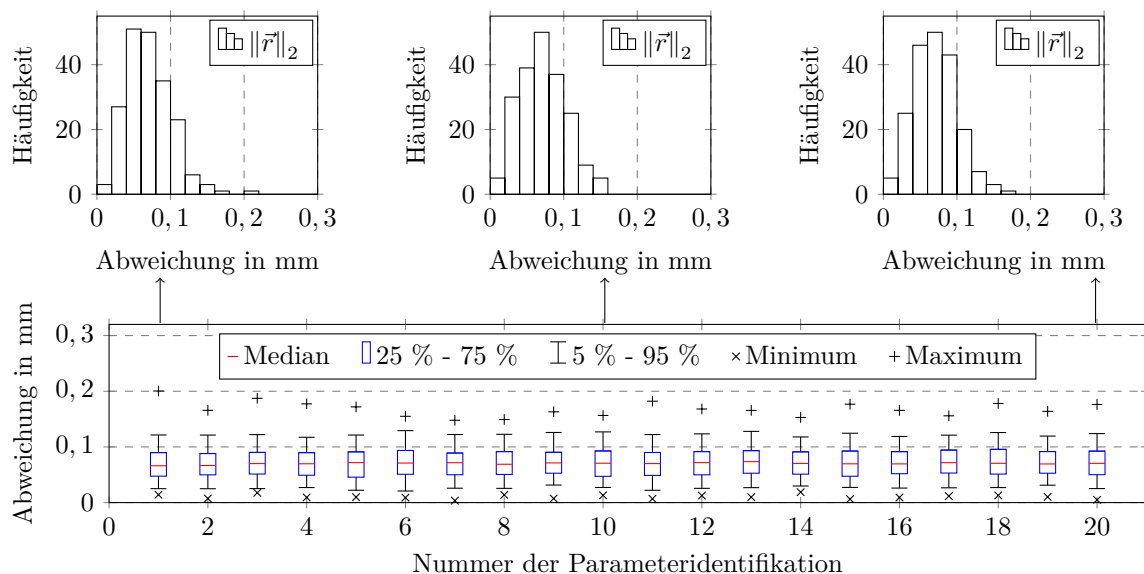


Abbildung 4.19: Reproduzierbarkeit der Abweichungsverteilungen für 20 unabhängige Parameteridentifikationen mit jeweils  $m = 200$  Roboterkonfigurationen bezogen auf einen Validierungsdatensatz mit 200 Roboterkonfigurationen.

Ein wesentlicher Aspekt zur Beurteilung der Gültigkeit ist darüber hinaus die Abhängigkeit der erreichbaren Genauigkeit des Modells mit den zur Identifikation der Parameter erfassten Roboterkonfigurationen. Abbildung 4.20 illustriert

die Verteilungen der Abweichungen in Abhängigkeit der zur Identifikation der Parameter erfassten Anzahl an Roboterkonfigurationen  $m$ .

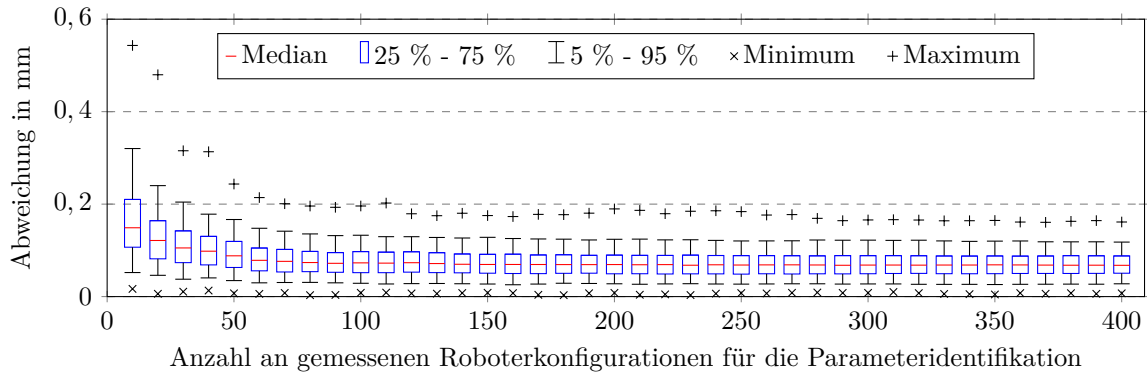


Abbildung 4.20: Verteilung der Abweichungen bezogen auf einen Validierungsdatensatz mit 200 Roboterkonfigurationen in Abhängigkeit der Anzahl zur Parameteridentifikation verwendeten Roboterkonfigurationen (bei jeweils fünffacher Wiederholung).

Für eine kleine Anzahl an Kalibrierkonfigurationen ist das Gleichungssystem unterbestimmt und nicht alle relevanten Parameter können identifiziert werden. Mit größer werdender Anzahl an verwendeten Konfigurationen nähert sich die Verteilung der Abweichungen der erreichbaren Genauigkeit an.

Die erreichbare Genauigkeit ist hierbei höher als die mit Modellen aus kommerziell erhältlichen Kalibriersoftwarepaketen. Abbildung 4.21 vergleicht auf Basis eines Kalibrierdatensets mit  $m = 200$  erfassten Roboterkonfigurationen die nach Identifikation der jeweiligen Parameter auftretenden Abweichungen. Hierbei weisen die Modelle der Kalibriersoftwarepakete „RoboCal V3.1“<sup>42</sup> und „Robot Calibration Environment“<sup>43</sup> vergleichbare Genauigkeiten auf. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell erreicht im Vergleich eine höhere Genauigkeit.

<sup>42</sup>RoboCal V3.1, Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (SCHRÖER 1994).

<sup>43</sup>Robot Calibration Environment (Robot Cal) v2013.12.17, New River Kinematics Inc.

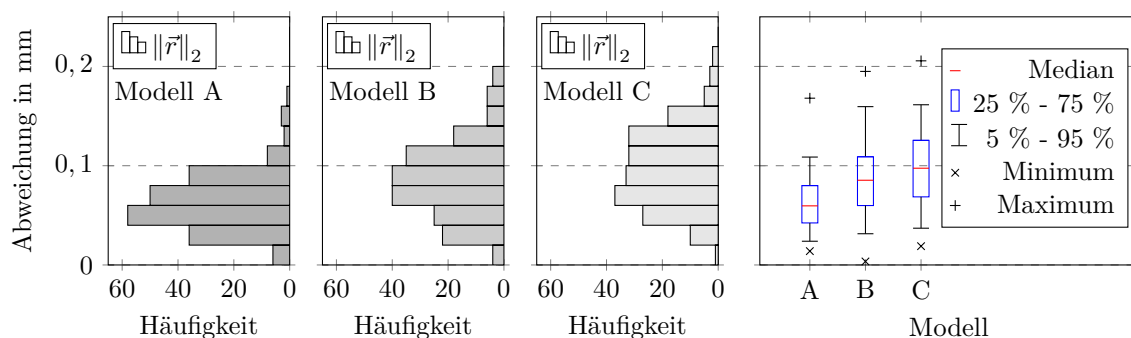


Abbildung 4.21: Vergleich der Abweichungen (Validierungsmessung mit 200 Roboterkonfigurationen) verschiedener Modellierungen nach Parameteridentifikation ( $m = 200$ ). Modell A: im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Modell, Modell B: RoboCal V3.1 (SCHRÖER 1994), Modell C: Robot Calibration Environment (Robot Cal) v2013.12.17.

#### 4.4.3 Räumlicher Gültigkeitsbereich

Zur Betrachtung des räumlichen Gültigkeitsbereiches wird die Verteilung der Abweichungen in verschachtelten, quaderförmigen Volumina<sup>44</sup> des Arbeitsraumes des Roboters betrachtet.

Die Genauigkeit in Abhängigkeit des betrachteten Volumens sowie des zur Identifikation der Parameter verwendeten Volumens ist in Abbildung 4.22 dargestellt. Insbesondere zeigt dies die Gültigkeit des Modells innerhalb des zur Parameteridentifikation verwendeten Volumens. Außerhalb des Kalibriervolumens kann keine Gültigkeit des Modells gewährleistet werden.

Im Kontext der Anwendung lässt sich hieraus ableiten, dass die Kalibrierung des Robotersystems im Arbeitsbereich der durchzuführenden Aufgabe erfolgen muss.

<sup>44</sup>Die zur Betrachtung der Gültigkeit verwendeten Volumina sind dem Anhang A.6.3 zu entnehmen.

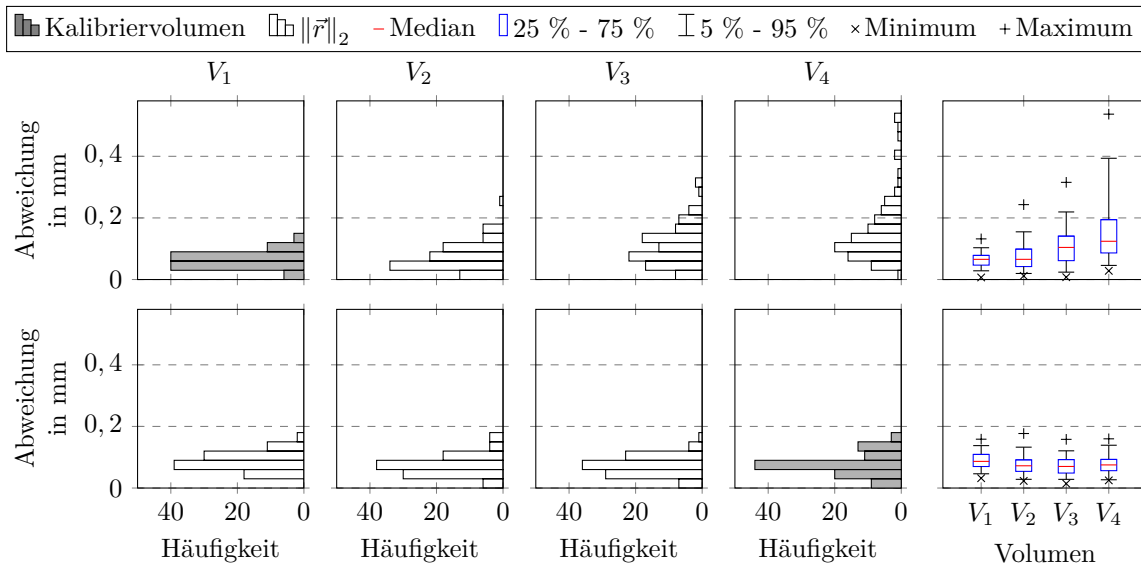


Abbildung 4.22: Abhängigkeit der erreichten Modellgenauigkeit vom Kalibriervolumen (Volumen zur Erfassung der TCP-Positionen). Die Residuenverteilung für die Parameteridentifikation ( $m = 200$ ) ist in grau dargestellt. Die Validierungsmessungen beinhalten 100 Roboterkonfigurationen je Betrachtungsvolumen ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ ). Die Auswertungen bei Verwendung der Kalibriervolumen  $V_2$  und  $V_3$  können dem Anhang A.6.3 entnommen werden.

#### 4.4.4 Zeitliche Gültigkeit

Besonders im Hinblick auf betriebsbedingte und temperaturbedingte Einflüsse ist die Betrachtung der zeitlichen Gültigkeit anwendungsrelevant. So zeigt sich insbesondere im Betrieb eines Roboters eine Drift relativ zum Kaltzustand<sup>45</sup>. Die Ausprägung der Systemänderung während des Betriebs bestimmt folglich die zeitliche Gültigkeit des Modells und muss im Kontext der Anwendung berücksichtigt werden.

Bei der Modellierung wurde ein quasi statisches Verhalten des Systems angenommen. Zur Identifikation der zeitlichen Gültigkeit wurde das Modell für den

<sup>45</sup>Der Kaltzustand eines Roboters bezeichnet dessen Charakteristika, nachdem der Roboter sich mehrere Stunden im ausgeschalteten Zustand in der betrachteten Umgebung befunden hat.

Roboter *KR 90 R3100 extra HA* aus dem Kaltzustand ( $t_0 = 0$ ) mit  $m = 200$  Roboterkonfigurationen parametrisiert und die zeitliche Änderung der Abweichungen erfasst. Abbildung 4.23 zeigt die Verteilungen der Abweichungen nach verschiedenen Betriebsdauern.

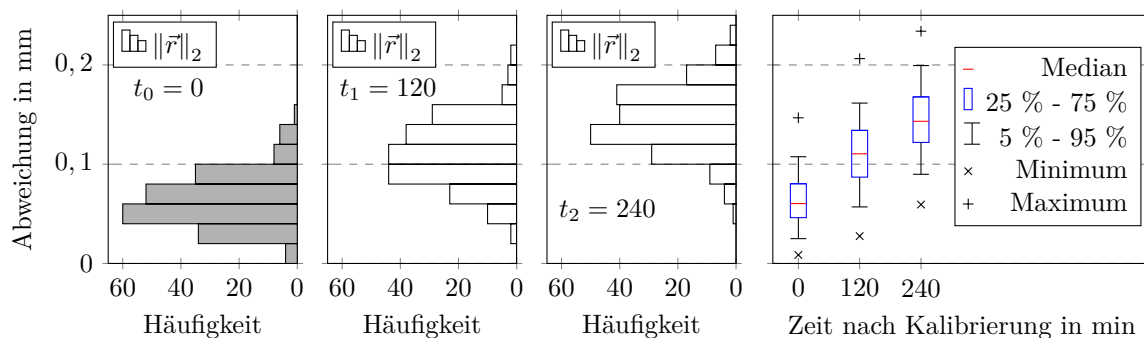


Abbildung 4.23: Zeitliche Gültigkeit des Modells bei einer Kalibrierung aus dem Kaltzustand: Parameteridentifikation auf Basis von  $m = 200$  erfassten Roboterkonfigurationen zum Zeitpunkt  $t_0 = 0$  min mit nachfolgender Validierung zu den Zeitpunkten  $t_1 = 120$  min und  $t_2 = 240$  min mit jeweils 200 Roboterkonfigurationen.

In Abhängigkeit vom betrachteten Betriebszustand zeigt die Veränderung der Abweichungsverteilungen, dass die Übereinstimmung zwischen parametrisiertem Modell und Realsystem abnimmt. Mit zunehmender Betriebsdauer nimmt die Änderungsrate ab, und das System befindet sich in einem stabilen Betriebszustand. Die Annahme eines quasi statischen Modells ist daher besonders für ein Robotersystem im Warmzustand<sup>46</sup> gewährleistet.

Folglich kann unter Berücksichtigung der charakteristischen, betriebsbedingten Änderungsraten eine Genauigkeitssteigerung durch Parametrisierung des Modells erreicht werden. Im Kontext der Anwendung ist hierfür jedoch eine geeignete Strategie für die Identifikation und Kompensation (MÖNNING 2006, S. 24) von Änderungen notwendig (vgl. Kapitel 6).

<sup>46</sup>Der Warmzustand eines Roboters bezeichnet dessen Charakteristika nach mehrstündigem kontinuierlichen Betrieb.

#### 4.4.5 Verallgemeinerbarkeit auf unterschiedliche Roboter

Der Gültigkeitsbereich der Modellierung umfasst serielle kinematische Ketten und insbesondere Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen. Die Beschreibung unterschiedlicher Robotertypen muss daher auf Basis desselben Modells mit typspezifischen Parametern realisierbar sein. Abbildung 4.24 zeigt die Residuenverteilung für unterschiedliche Roboter nach der Parameteridentifikation.

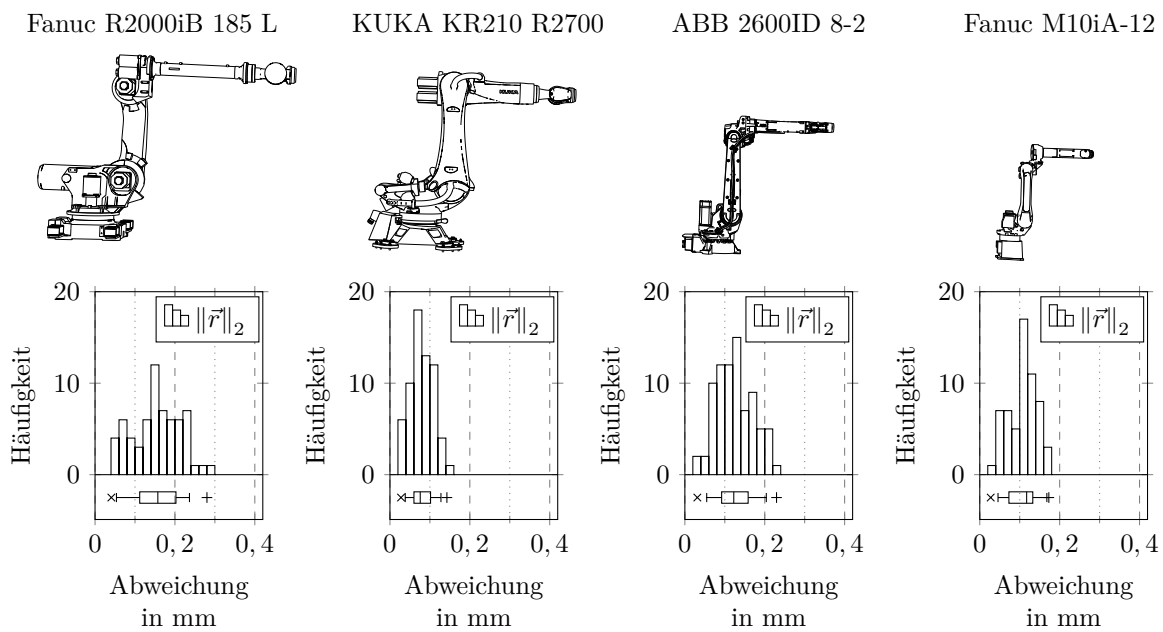


Abbildung 4.24: Residualverteilungen nach Parameteridentifikation für Roboter vom Typ Fanuc R2000iB 185 L, KUKA KR210 R2700, ABB 2600ID 8-2 und Fanuc M10iA-12. Die Darstellungen der Roboter entsprechen hierbei den ungefähren Größenverhältnissen.

Für alle betrachteten Roboter lässt sich unter Verwendung des entsprechend parametrisierten Modells eine Genauigkeit in der Größenordnung der Positions-Wiederholgenauigkeit realisieren.

#### 4.4.6 Fazit und Überprüfung der Hypothese

Im Rahmen der komponentenspezifischen Analyse serieller kinematischer Ketten wurden Einflussgrößen auf die Pose-Genauigkeit des Roboters identifiziert und deren Größenordnung abgeschätzt. Systembedingt pflanzt sich der Fehler der Sensorpose auf die resultierende erreichbare Genauigkeit des roboterbasierten Koordinatenmesssystems fort.

Durch die Charakterisierung der einzelnen Komponenten und Integration in ein parametrisiertes mathematisch-physikalisches Modell konnte die Übereinstimmung von Modell und Realsystem, verglichen mit einem kinematischen, idealisierten Modell, erhöht werden. Die erreichte Genauigkeit konnte insbesondere auch im Vergleich zu kommerziell erhältlichen Kalibriersoftwarepaketen durch die Ergänzung weiterer identifizierter Effekte gesteigert werden. Darüber hinaus konnte die Gültigkeit für unterschiedliche Robotertypen nachgewiesen werden.

Die Identifikation der Modellparameter muss hierbei durch ein stark überbestimmtes ( $m \gg N$ ) Gleichungssystem erfolgen. Die hierdurch erreichbare Genauigkeitssteigerung ist innerhalb des zur Parameteridentifikation betrachteten Volumens gültig, wohingegen die Gültigkeit außerhalb dieses Volumens nicht gewährleistet ist.

Die Grundannahme eines quasi statischen Modells ist insbesondere für einen Roboter im Warmzustand zutreffend. Die betriebsbedingten Einflüsse können folglich im Rahmen einer geeigneten Messstrategie für roboterbasierte Koordinatenmesssysteme berücksichtigt werden.

Zusammenfassend ist die Hypothese I im Rahmen des dargestellten Gültigkeitsbereichs zutreffend.



## 5 Datenaufnahme und Parameteridentifikation

Basierend auf der ersten Hypothese und der mathematisch-physikalischen Beschreibung des Systemverhaltens adressiert die zweite Hypothese die Fähigkeit eines roboterbasierten Messsystems, das Modell selbst zu parametrisieren.

**Hypothese II:** *Die Streuung einer mehrfach gemessenen Merkmalspose auf Basis unterschiedlicher Roboterkonfigurationen lässt Rückschlüsse auf die aktuelle Modellgüte zu und ermöglicht die Selbst-Kalibrierung am Prüfobjekt ohne den Einsatz externer Systemtechnik.*

Hierfür wird im ersten Abschnitt 5.1 die Erfassung von Kalibrierdaten mittels robotergeführtem 3D-Sensor hergeleitet. Insbesondere sollen hierbei die Randbedingungen des betrachteten Systems sowie die Gültigkeitsbereiche des Modells berücksichtigt werden. Nachfolgend wird eine Methode zur automatisierten Kalibrierdatenerfassung (Abschnitt 5.2) dargestellt. Diese umfasst neben der geeigneten Auswahl von Kalibrierkonfigurationen auch die automatisierte Generierung eines ausführbaren Programmablaufs. Im Rahmen der Parameteridentifikation (Abschnitt 5.3) wird das Vorgehen zur Bestimmung der Parameter auf Basis der vorgestellten Kalibrierdatenerfassung betrachtet. Am Ende des Kapitels wird die Hypothese durch die Betrachtung des Gültigkeitsbereichs überprüft (Abschnitt 5.4).

### 5.1 Kalibrierung mittels robotergeführtem 3D-Sensor

Das adressierte Ziel der Selbst-Kalibrierung eines roboterbasierten Koordinatenmesssystems bedingt insbesondere, dass keine zusätzliche Systemtechnik (beispielsweise externe Messsysteme, Referenzmarkierungen) benötigt wird. Die Anpassung des Modells an das Realsystem erfordert jedoch die messtechnische Erfassung des Systemverhaltens und muss folglich auf Basis der Roboterdaten sowie der Daten des 3D-Sensors erfolgen. Als weitere Anforderung an die Kalibrierdatenerfassung kann aus der Gültigkeitsbetrachtung des Modells gefolgert werden, dass diese bezüglich des Erfassungsvolumens den Arbeitsraum der durchzuführenden Aufgabe umfassen muss.

Zusammenfassend ist folglich die Kalibrierdatenerfassung am Prüfobjekt selbst mittels robotergeführtem 3D-Sensor zur Erreichung der Zielsetzung notwendig.

Im Allgemeinen gilt hierbei für koordinatenmesstechnische Anwendungen, dass die Soll-Gestalt des Prüfobjekts bekannt, dessen exakte Geometrie aber unbekannt ist. Des Weiteren ist die Anordnung des Prüfobjekts relativ zum Messsystem statisch. In Konsequenz sind folglich auch alle Merkmalsposen statisch und müssen bei einer mehrfachen Messung im Rahmen der Messunsicherheit zum selben Ergebnis führen. Abbildung 5.1 zeigt schematisch die Erfassung eines statischen Merkmals mit verschiedenen Roboterkonfigurationen.

Hierbei kann für jede Messung die Merkmalspose im Bezugskoordinatensystem unter Berücksichtigung des parametrisierten Modells und den 3D-Sensordaten bestimmt werden. Für ein unzureichend exakt parametrisiertes Modell ergeben sich unterschiedliche Merkmalsposen bei einer Mehrfachmessung desselben Merkmals mit unterschiedlichen Roboterkonfigurationen. Dies steht im Widerspruch zu einem statischen Merkmal und erlaubt den Rückschluss auf die Modellgüte. Diese Systemeigenschaft bildet die Grundlage für die Erfassung von Kalibrierdaten, ohne die exakte Position, Orientierung und Form eines Merkmals zu kennen.

Um dem Problem der Mehrdeutigkeit der Lösung aufgrund der Skalierungsin-

varianz<sup>47</sup> bei Closed-Loop-Kalibrieransätzen mit Punktfixierung zu entgegen, wird bei dem hier verfolgten Ansatz keine feste Relation zwischen Sensor- und Merkmalskoordinatensystem gefordert. Insbesondere durch unterschiedliche Positionierungen des Merkmals im Erfassungsvolumen kann über die Messung des 3D-Sensors ein Absolutbezug hergestellt werden. Die Sensormessung ist folglich die Referenznorm der Kalibrierung beim adressierten Ansatz der Selbst-Kalibrierung.<sup>48</sup>

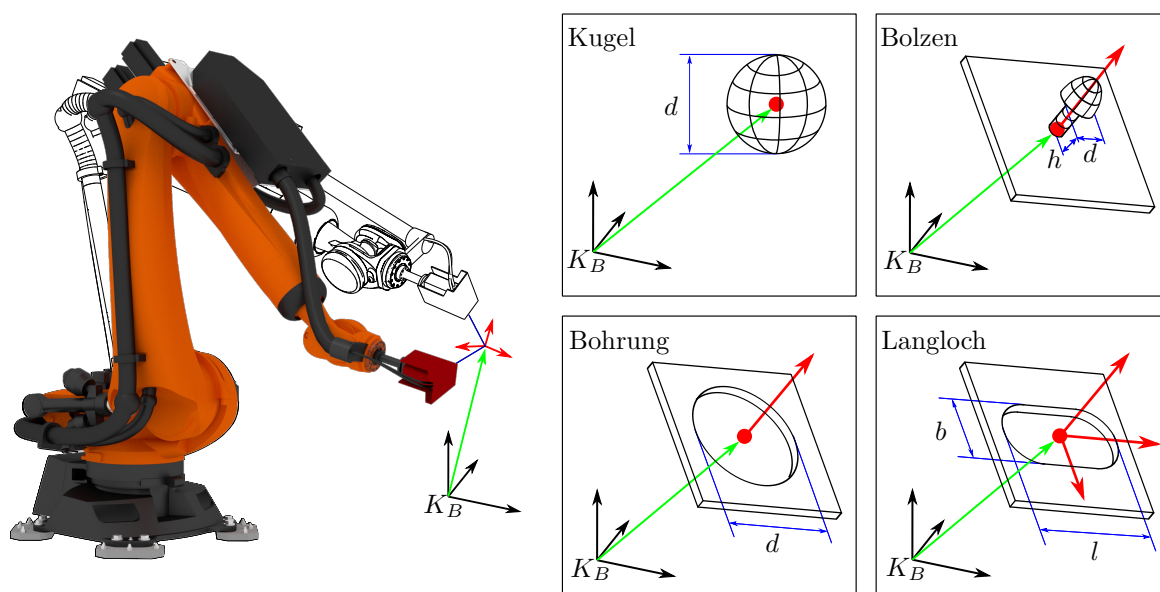


Abbildung 5.1: Erfassung eines Merkmals aus unterschiedlichen Roboterkonfigurationen und gängige Merkmalstypen. Der Translationsanteil und charakteristische Richtungsvektoren in Abhängigkeit der Merkmalssymmetrie beschreiben die Merkmalspose im Bezugskordinatensystem  $K_B$ . Eine gemessene Merkmalspose muss bei einem idealen Modell und statischem Merkmal folglich unabhängig von der Roboterkonfiguration sein.

<sup>47</sup>Die Beschreibung einer kinematischen Kette ist winkeltreu bei einer Größenskalierung und hat folglich keine Auswirkung auf die erfassbaren Größen bei einer Punktfixierung des Endeffektors. Aufgrund des fehlenden Absolutbezugs ist daher keine eindeutige Lösung identifizierbar.

<sup>48</sup>Diese Annahme ist für eine hohe Sensorgenauigkeit, verglichen mit der Positionsgenauigkeit des Roboters, gültig (vgl. hierzu auch die systemtechnische Eingrenzung des Betrachtungsraums in Abschnitt 3.2).

## 5.1.1 Integration des 3D-Sensors in das Modell

Im Falle eines robotergeführten 3D-Sensors entspricht die letzte Transformation des Modells der Transformation vom Roboterflansch in das Sensorkoordinatensystem  $K_S$ . Der TCP beschreibt folglich den Ursprung des Sensorkoordinatensystems. Bei der Messung eines Merkmals wird das Prüfobjekt im Sichtfeld des Sensors flächenhaft erfasst und in Form einer Punktwolke  $P = \{\vec{x}_i | \vec{x}_i \in \mathbb{R}^3, i = 1 \dots n_{PW}\}$  im Sensorkoordinatensystem ausgegeben. Die Identifikation eines Merkmals innerhalb der Punktwolke erfolgt durch das Angleichen eines geometrischen Ausgleichselements mittels Regressionsverfahren.

Die Position und Orientierung eines Merkmals beziehungsweise dessen Ausgleichselement (Merkmalspose) kann hierbei als Transformation zwischen dem Sensorkoordinatensystem  $K_S$  und dem merkmalseigenen Koordinatensystem aufgefasst werden. In Abhängigkeit der Merkmalssymmetrie ist die Transformation nicht eindeutig. So sind beispielsweise bei rotationssymmetrischen Merkmalen (Bohrung) fünf Freiheitsgrade und bei kugelsymmetrischen Merkmalen (Kugel) lediglich drei Freiheitsgrade (nur Translationsanteil) definiert. Für die weitere Betrachtung sei daher, gemäß Gleichung 5.1, die allgemeine Transformation  ${}^S\mathbf{T}_M$  durch die drei homogenen Richtungsvektoren  ${}^S\vec{x}_M$ ,  ${}^S\vec{y}_M$  und  ${}^S\vec{z}_M$  sowie den homogenen Ortsvektor  ${}^S\vec{m}_M$  charakterisiert.

$${}^S\mathbf{T}_M = \left( \begin{array}{cccc} {}^S\vec{x}_M & {}^S\vec{y}_M & {}^S\vec{z}_M & {}^S\vec{m}_M \end{array} \right) \quad (5.1)$$

Eine Charakteristik des Merkmals entspricht hierbei einem Orts- oder Richtungsvektor, der eindeutig anhand des Ausgleichselements bestimmbar ist. Exemplarisch sind in Abbildung 5.1 die Charakteristika (Position und Orientierungen) bei gängigen Merkmalstypen dargestellt.

Neben der Merkmalspose können anhand des Ausgleichselements weitere merkmalspezifische Größen (beispielsweise der Radius) ermittelt werden, welche der Plausibilisierung der Sensormessung durch einen Abgleich mit der Sollgröße dienen können (vgl. Abbildung 5.1).

Die Registrierung der Merkmalsposen in einem gemeinsamen Koordinatensystem  $K_B$  erfolgt unter Berücksichtigung der charakteristischen Vektoren durch die

Transformation des Modells gemäß den Gleichungen 5.2a und 5.2b.

$${}^B\vec{u} = \vec{f}_M(\vec{\phi}, \vec{\varphi}, {}^S\vec{u}, \vec{p}) \quad (5.2a)$$

$$= {}_{Rob}^B\mathbf{T}_S(\vec{\phi}, \vec{\varphi}, \vec{p}) \cdot {}^S\vec{u} \quad (5.2b)$$

Hierbei ist  ${}^S\vec{u} \in \{{}^S\vec{x}_M, {}^S\vec{y}_M, {}^S\vec{z}_M, {}^S\vec{m}_M\}$  ein charakteristischer Vektor des Merkmals, der Vektor  $\vec{\phi}$  die aktuelle Motorwinkelkonfiguration, der Vektor  $\vec{\varphi}$  die vorhergegangene Motorwinkelkonfiguration und  $\vec{p}$  der Parametervektor.

### 5.1.2 Formulierung der Zielfunktion

Die Zielfunktion beschreibt im Rahmen der Kalibrierung den funktionalen Zusammenhang der Übereinstimmung von Modell und Realsystem (Modellgüte) in Abhängigkeit der Modellparameter. Hierfür wird die Abweichung der auf Basis des Modells berechneten Größe mit der wahren Größe verglichen. In Anlehnung an SUN & HOLLERBACH (2008) gilt für einen charakteristischen Merkmalsvektor eines Merkmals  $j$  für eine Messung  $i$  der Zusammenhang 5.3.

$$\underbrace{{}^B\vec{u}_{j,i} = \vec{f}_M(\vec{\phi}_i, \vec{\varphi}_i, {}^S\vec{u}_{j,i}, \vec{p})}_{\text{modellbasierter Merkmalsvektor}} := \underbrace{{}^B\vec{v}_j}_{\text{wahrer Merkmalsvektor}} + \underbrace{\vec{\epsilon}_{j,i}}_{\text{Fehlervektor}} \quad (5.3)$$

Hierbei sei  ${}^B\vec{v}_j$  der wahre Merkmalsvektor, welcher unbekannt ist. Der Vektor  $\vec{\epsilon}_{j,i}$  beschreibt die kartesischen Abweichungen der  $i$ -ten Messung aufgrund von Modellabweichungen und Messfehlern.

Die Modellgüte ist hierbei reziprok zu den auftretenden, betragsmäßigen Abweichungen. Folglich kann die Zielfunktion als Maximierung der Modellgüte oder Minimierung der Abweichungen formuliert werden. Für die euklidische Abweichung  $\rho_{j,i}$  einer Einzelmessung  $i$  des Merkmals  $j$  gelten Gleichungen 5.4a-5.4c.

$$0 \leq \rho_{j,i} = \left\| {}^B\vec{v}_j - {}^B\vec{u}_{j,i} \right\|_2 \quad (5.4a)$$

$$= \left\| {}^B\vec{v}_j - \vec{f}_M(\vec{\phi}_i, \vec{\varphi}_i, {}^S\vec{u}_{j,i}, \vec{p}) \right\|_2 \quad (5.4b)$$

$$= \left\| \vec{\epsilon}_{j,i} \right\|_2 \quad (5.4c)$$

Hierbei ist  ${}^B\vec{v}_j$  der wahre charakteristische Vektor (beispielsweise der exakte Ortsvektor des Mittelpunktes einer Bohrung) des Merkmals  $j$  im Bezugskordinatensystem  $K_B$  und im Allgemeinen unbekannt. Die Prädiktion des charakteristischen

Vektors  ${}^B\vec{u}_{j,i}$  auf Basis des Modells kann hierbei gemäß den Gleichungen 5.2a und 5.2b bestimmt werden.

Wird ein charakteristischer Vektor eines Merkmals  $j$  mit  $m_j$  Konfigurationen gemessen, ist die Summe der quadrierten Einzelabweichungen ein Maß für die Streuung (vgl. Gleichungen 5.5a und 5.5b). Darüber hinaus entspricht die Quadrierung der Überführung des Minimierungsproblems in ein Problem kleinster Fehlerquadrate. Der wahre charakteristische Vektor  ${}^B\vec{v}_j$  ist hierbei jedoch unbekannt. So ist beispielsweise die exakte Position des Merkmals im Bezugskoordina- tensystem im Rahmen der Kalibrierung nicht messbar. Dies steht im Gegensatz zu den Kalibrierverfahren, bei denen externe Messmittel zur Bestimmung dieser Charakteristika eingesetzt werden.

$$r_j = \sum_{i=1}^{m_j} \rho_{j,i}^2 \quad (5.5a)$$

$$= \sum_{i=1}^{m_j} \left\| {}^B\vec{v}_j - \vec{f}_M(\vec{\phi}_i, \vec{\varphi}_i, {}^S\vec{u}_{j,i}, \vec{p}) \right\|_2^2 \quad (5.5b)$$

Die Voraussetzung, dass das Merkmal statisch ist, ermöglicht die Approximation des charakteristischen Vektors (Gleichung 5.6) auf Basis einer Mehrfachmessung sowie des aktuellen Modells im Rahmen der Parameterschätzung und der hierdurch determinierten Modellgenauigkeit.

$${}^B\vec{v}_j \approx {}^B\vec{v}'_j = \frac{1}{m_j} \sum_{h=1}^{m_j} \vec{f}_M(\vec{\phi}_h, \vec{\varphi}_h, {}^S\vec{u}_{j,h}, \vec{p}) \quad (5.6)$$

Aus Gleichung 5.5b und 5.6 folgt daher die Approximation 5.7a für das Streu- maß in Bezug auf den arithmetischen Mittelwert des charakteristischen Vektors. Durch Einsetzen von Gleichung 5.3 erhält man den Zusammenhang 5.7c zwischen Streumaß und Modellabweichung. Mit der Parallelogrammgleichung<sup>49</sup> kann dies

<sup>49</sup>Die Parallelogrammgleichung für Vektorräume und deren Beweis können dem Anhang A.3.3 entnommen werden.

in Form von Gleichung 5.7d dargestellt werden.

$$r_j \approx r'_j = \sum_{i=1}^{m_j} \left\| \frac{1}{m_j} \sum_{h=1}^{m_j} \vec{f}_M(\vec{\phi}_h, \vec{\varphi}_h, {}^S\vec{u}_{j,h}, \vec{p}) - \vec{f}_M(\vec{\phi}_i, \vec{\varphi}_i, {}^S\vec{u}_{j,i}, \vec{p}) \right\|_2^2 \quad (5.7a)$$

$$= \sum_{i=1}^{m_j} \left\| \frac{1}{m_j} \sum_{h=1}^{m_j} ({}^B\vec{v}_j + \vec{\epsilon}_{j,h}) - ({}^B\vec{v}_j + \vec{\epsilon}_{j,i}) \right\|_2^2 \quad (5.7b)$$

$$= \sum_{i=1}^{m_j} \left\| \frac{1}{m_j} \sum_{h=1}^{m_j} \vec{\epsilon}_{j,h} - \vec{\epsilon}_{j,i} \right\|_2^2 \quad (5.7c)$$

$$= \sum_{i=1}^{m_j} \left[ 2 \cdot \left( \left\| \frac{1}{m_j} \sum_{h=1}^{m_j} \vec{\epsilon}_{j,h} \right\|_2^2 + \|\vec{\epsilon}_{j,i}\|_2^2 \right) - \underbrace{\left\| \frac{1}{m_j} \sum_{h=1}^{m_j} \vec{\epsilon}_{j,h} + \vec{\epsilon}_{j,i} \right\|_2^2}_{=: \Upsilon} \right] \quad (5.7d)$$

Mit Hilfe der Dreiecksungleichung<sup>50</sup> kann der Term  $\Upsilon$  in Gleichung 5.7d nach oben abgeschätzt werden (Gleichungen 5.8a-5.8c).

$$\Upsilon \leq \left( \frac{1}{m_j} \left\| \sum_{h=1}^{m_j} \vec{\epsilon}_{j,h} \right\|_2 + \|\vec{\epsilon}_{j,i}\|_2 \right)^2 \quad (5.8a)$$

$$= \frac{1}{m_j^2} \left\| \sum_{h=1}^{m_j} \vec{\epsilon}_{j,h} \right\|_2^2 + \frac{2}{m_j} \left\| \sum_{h=1}^{m_j} \vec{\epsilon}_{j,h} \right\|_2 \cdot \|\vec{\epsilon}_{j,i}\|_2 + \|\vec{\epsilon}_{j,i}\|_2^2 \quad (5.8b)$$

$$\leq \underbrace{\frac{1}{m_j^2} \left\| \sum_{h=1}^{m_j} \vec{\epsilon}_{j,h} \right\|_2^2 + \frac{2}{m_j} \sum_{h=1}^{m_j} \|\vec{\epsilon}_{j,h}\|_2 \cdot \|\vec{\epsilon}_{j,i}\|_2 + \|\vec{\epsilon}_{j,i}\|_2^2}_{=: \Omega} \quad (5.8c)$$

Folglich kann mit dem Term  $\Omega$  aus der Abschätzung 5.8c das Streumaß  $r'_j$  nach unten (Gleichung 5.9b) und nach oben (Gleichung 5.10) abgeschätzt werden.

$$r'_j \geq \frac{2}{m_j} \left\| \sum_{h=1}^{m_j} \vec{\epsilon}_{j,h} \right\|_2^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{m_j} \|\vec{\epsilon}_{j,i}\|_2^2 - \sum_{i=1}^{m_j} [\Omega] \quad (5.9a)$$

$$= \frac{1}{m_j} \left\| \sum_{i=1}^{m_j} \vec{\epsilon}_{j,i} \right\|_2^2 + \sum_{i=1}^{m_j} \|\vec{\epsilon}_{j,i}\|_2^2 - \frac{2}{m_j} \left( \sum_{i=1}^{m_j} \|\vec{\epsilon}_{j,i}\|_2 \right)^2 \quad (5.9b)$$

<sup>50</sup>Die Dreiecksungleichung für Summen und deren Beweis für eine induktive Anwendung können dem Anhang A.3.4 entnommen werden.

$$r'_j \leq \frac{2}{m_j} \left\| \sum_{i=1}^{m_j} \vec{\epsilon}_{j,i} \right\|_2^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{m_j} \|\vec{\epsilon}_{j,i}\|_2^2 \quad (5.10)$$

Die Betrachtung des Streumaßes für ein einzelnes Merkmal lässt sich insbesondere auf mehrere statische Merkmale  $j$  mit  $j = 1 \dots l$  erweitern. Für das Gesamtstreumaß  $R$  gilt folglich der Zusammenhang 5.11.

$$R(\vec{p}) = \sum_{j=1}^l r'_j(\vec{p}) \quad (5.11)$$

Die Modellgüte kann folglich durch Reduktion des Gesamtstreumaßes gemäß des Minimierungsproblems 5.12 gesteigert werden.

$$\min_{\vec{p}} (R(\vec{p})) \quad (5.12)$$

Die Formulierung der Zielfunktion auf Basis von charakteristischen Vektoren ermöglicht die Kalibrierung des Systems unter Ausnutzung von Position und Orientierung eines Merkmals. Hierbei kann die Datenerfassung dynamisch in drei bis sechs Dimensionen in Abhängigkeit der Merkmalssymmetrie erfolgen. Der Vorteil einer höherdimensionalen Datenerfassung am Prüfobjekt selbst ist die Reduktion an notwendigen Messungen, um die Parameter durch Lösen des Gleichungssystems zu bestimmen, sowie die Datenerfassung in anwendungsnahen Roboterkonfigurationen. Als Konsequenz ergeben sich hierdurch jedoch die Herausforderungen, dass zum einen Merkmale und geeignete Konfigurationen gefunden werden und zum anderen diese für die Identifikation der Parameter geeignet sein müssen. Im Kontext der Selbst-Kalibrierung müssen diese Auswahl sowie die Datenerfassung automatisiert erfolgen, was im nachfolgenden Abschnitt betrachtet wird.

## 5.2 Automatisierte Kalibrierdatenerfassung

Die Kalibrierdatenerfassung im Kontext der Selbst-Kalibrierung umfasst die Generierung von möglichen kollisionsfreien Kalibrierkonfigurationen auf Basis der zur Verfügung stehenden Merkmale, die Auswahl von geeigneten Kalibrierkonfigurationen sowie die Erzeugung eines kollisionsfreien Ablaufprogramms zur Durchführung der Datenerfassung. Abbildung 5.2 stellt schematisch den Ablauf zur automatisierten Kalibrierdatenerfassung dar. Hierbei kann zwischen den simulativ (auf Basis einer modellbasierten Simulation) und am Realsystem durchgeführten Schritten unterschieden werden.

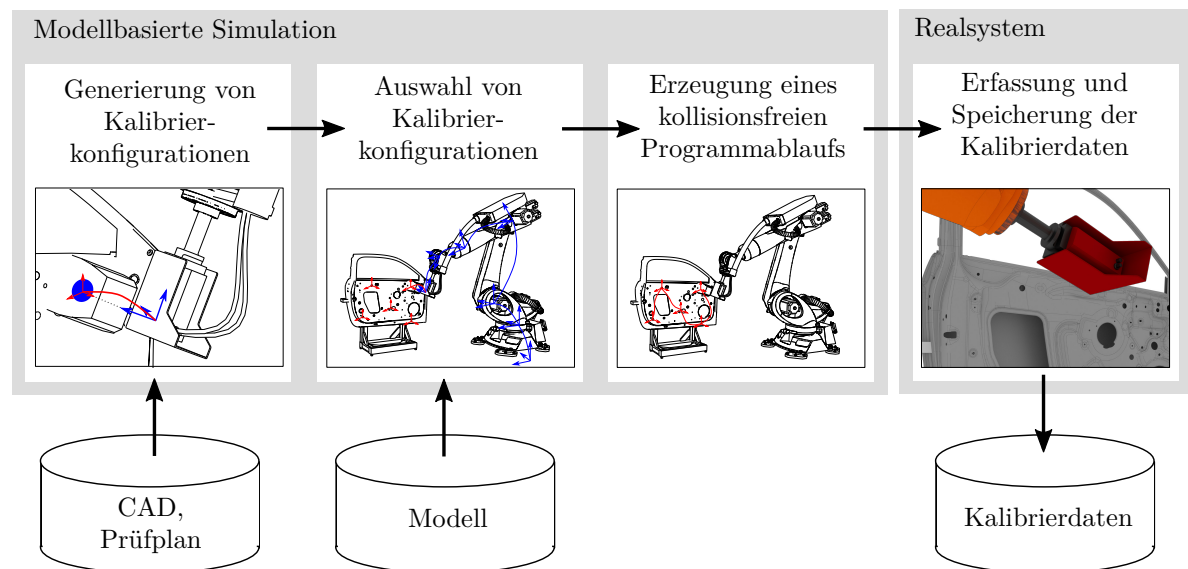


Abbildung 5.2: Ablauf der automatisierten Kalibrierdatenerfassung unter Verwendung der modellbasierten Simulation zur Erzeugung eines Programmablaufs und anschließender Erfassung der Kalibrierdaten am Realsystem.

Dem Vorgehen werden hierbei folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Es existiert ein Prüfplan für das zu betrachtende Prüfobjekt.
- Die Soll-Gestalt des Prüfobjekts liegt in Form eines CAD-Modells vor.

- Die Positionierung des Prüfobjektes ist im Rahmen einer Grobpositionierung<sup>51</sup> bekannt.
- Kollisionsobjekte innerhalb des roboterbasierten Messsystems sind in Form eines virtuellen Geometriemodells abgebildet<sup>52</sup>.
- Die Parameter des Modells sind auf Basis der Idealgeometrie des Robotersystems geschätzt.

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die einzelnen Bestandteile der Methode eingegangen.

### 5.2.1 Generierung von möglichen Kalibrierkonfigurationen

Um geeignete Kalibrierkonfigurationen auswählen zu können, wird in einem ersten Schritt der Lösungsraum möglicher Kalibrierkonfigurationen in Abhängigkeit des Prüfobjekts diskretisiert. Eine mögliche Kalibrierkonfiguration muss hierbei kollisionsfrei sein und die Erfassung eines Merkmals des Prüfobjekts ermöglichen (BERTAGNOLLI 2006, S. 69).

Dementsprechend werden alle am Prüfobjekt vorhandenen Merkmale hinsichtlich deren typspezifischer Eignung zur Kalibrierung klassifiziert. So eignen sich beispielsweise Antastpunkte einer Ebene aufgrund von lediglich einem charakteristischen Vektor (Normalenvektor zur Ebene) weniger für die Kalibrierung als Bohrungen mit zwei charakteristische Vektoren (Ortsvektor und orthogonaler Vektor zur Ebene der Bohrung). Hierfür wird der Prüfplan des Prüfobjekts automatisiert ausgewertet und die Soll-Merkmalsspose anhand der Prüfobjektpositionierung in das Bezugskordinatensystem  $K_B$  überführt.

---

<sup>51</sup>Die Grobpositionierung des Prüfobjektes kann durch eine geeignete Fixierung, welche im Vorfeld zum Robotersystem referenziert wurde, erfolgen. Alternativ kann die Prüfobjektpositionierung zunächst abgeschätzt werden und im Rahmen der Messstrategie (vgl. Abschnitt 6.2) durch eine Einmessmethode (vgl. hierzu auch Abschnitt A.7.1 im Anhang) bestimmt werden (RÜCKEL 2006, S. 49–50). Die Möglichkeit der Bestimmung einer geeigneten Positionierung eines Objektes in Relation zum Robotersystem wird beispielsweise von DIAZ P. et al. (2018) betrachtet.

<sup>52</sup>Hierbei ist auch die Erzeugung von Kollisionsobjekten auf Basis von erfassten 3D-Daten möglich (FRIEDRICH et al. 2018).

Gemäß den Sensorspezifikationen können für jede Merkmalspose entsprechende Sensorposen generiert werden. Hierbei müssen insbesondere das Sichtfeld des Sensors sowie Blickwinkelbeschränkungen berücksichtigt werden (BERTAGNOLLI 2006, S. 69). Die Sensorposen können beispielsweise durch Translation und Rotation ausgehend von einer Idealpose des Sensors erzeugt werden. Abbildung 5.3 illustriert exemplarisch eine mögliche Sensorpose für ein Merkmal unter Berücksichtigung des maximalen Blickwinkels  $\zeta_S$  und des Erfassungsvolumens.

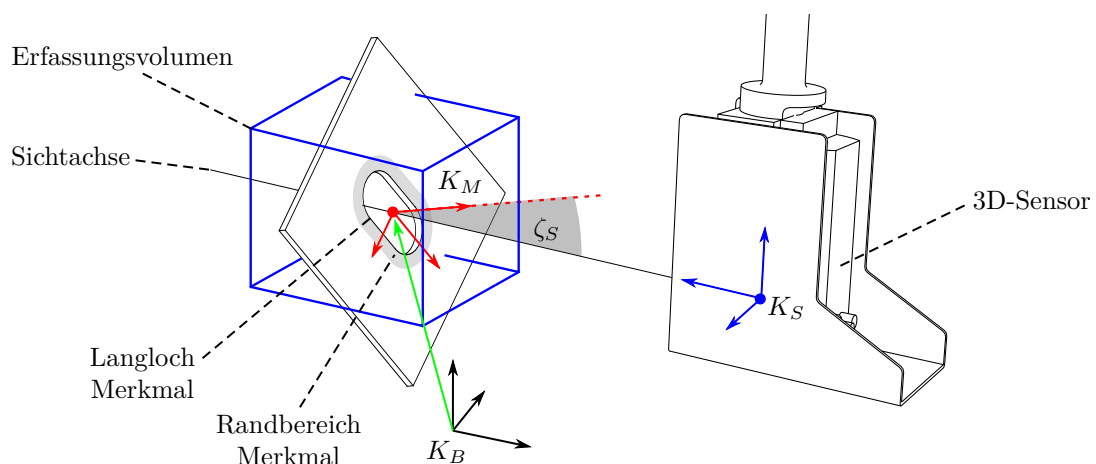


Abbildung 5.3: Generierung möglicher Sensorposen auf Basis eines Merkmals, wobei sich das Merkmal sowie dessen Randbereich vollständig im Erfassungsvolumen des Sensors befindet und die Sichtachse des Sensors einen maximalen Winkel  $\zeta_S$  zur Merkmalsnormalen nicht überschreitet.

Insbesondere muss bei der Generierung von Sensorposen darauf geachtet werden, dass die Verteilung der Rotation und Translation ausgehend von der Idealpose möglichst den messbaren Bereich abdeckt, um der Mehrdeutigkeit der Lösung im Rahmen der Parameteridentifikation aufgrund der Skalierungsinvarianz (vgl. Abschnitt 5.1) entgegen zu wirken.

Neben den sensorseitigen Anforderungen müssen die Sensorposen sowie die Roboterkonfiguration kollisionsfrei sein. Für jede Sensorpose werden unter Verwendung der inversen Kinematik des idealisierten Roboters die möglichen Konfigurationen bestimmt und diese mittels einer Physiksimulation auf Kollision überprüft. Hierbei

wird anhand des Infimum<sup>53</sup> die Einhaltung des kartesischen Mindestabstands  $d_c$  aller beteiligten Objekte überprüft (Bedingung 5.13).

$$\inf\{\|\vec{a} - \vec{o}\| \mid \vec{a} \in A(\vec{\theta}), \vec{o} \in \bigcup_i O_i\} > d_c \quad (5.13)$$

Eine Konfiguration ist folglich gültig, sofern folgende Kriterien erfüllt sind:

- Der Merkmalstyp besitzt mindestens einen charakteristischen Vektor, welcher mittels eines Auswertealgorithmus aus den Punktwolken ermittelt werden kann.
- Das Merkmal befindet sich vollständig im Sichtvolumen des 3D-Sensors (LEE & PARK 2000).
- Es besteht eine direkte Sichtlinie zwischen Sensor und Merkmal (Hinter-schneidungsfreiheit) (LEE & PARK 2000).
- Es existiert mindestens eine Roboterkonfiguration zur Erreichung der Sensorpose.
- Es tritt keine Kollision auf (LEE & PARK 2000).

Die Menge an gültigen Konfigurationen wird als Kandidaten  $K$  bezeichnet.

### 5.2.2 Auswahl von Kalibrierkonfigurationen

Im Rahmen der Gültigkeitsbetrachtung des Modells (vgl. Abschnitt 4.4) wurde der Einfluss der Kalibrierkonfigurationen auf die erreichbare Genauigkeit hinsichtlich des betrachteten Arbeitsbereichs sowie deren Anzahl aufgezeigt. Bei Kalibrierdaten, welche mittels des robotergeführten 3D-Sensors erfasst werden, müssen neben den Roboterkonfigurationen auch die entsprechenden Merkmale ausgewählt werden.

Im Allgemeinen müssen hierbei die ausgewählten Kalibrierkonfigurationen die Beobachtbarkeit aller relevanten Effekte in dem durch die auszuführende Aufgabe definierten Arbeitsraum gewährleisten. Dies ist gleichbedeutend mit der Identifizierbarkeit aller Modellparameter auf Basis der definierten Zielfunktion.

---

<sup>53</sup>Größte untere Schranke

Ein Parameter  $p_i$  ist folglich identifizierbar, wenn eine Parameteränderung bei einem gegebenen Set aus Kalibrierkonfigurationen an der Stelle der geschätzten Nominalparameter  $\vec{p}_{nom}$  Auswirkung auf die Zielfunktion hat (Bedingung 5.14). Die Nominalparameter weisen hierbei Fehler in Bezug auf die gesuchten Parameter  $\vec{p}^*$  auf. Es gilt  $\vec{p}_{nom} \neq \vec{p}^*$  und folglich  $R > 0$ .

$$\left. \frac{\partial}{\partial p_i} R \right|_{\vec{p}_{nom}} = \sum_{j=1}^l \left. \frac{\partial}{\partial p_i} r'_j \right|_{\vec{p}_{nom}} \neq 0 \quad (5.14)$$

Insbesondere folgt aus der Summe der Streumaße, dass für mindestens ein Merkmal die partielle Ableitung nach einem Parameter ungleich Null ist (Bedingung 5.15).

$$\exists j \in \{1 \dots l\} : \quad \left. \frac{\partial}{\partial p_i} r'_j \right|_{\vec{p}_{nom}} \neq 0 \quad (5.15)$$

Die Änderung eines beobachtbaren Parameters bezüglich einer Konfiguration  $i$  führt folglich zu einer Änderung des erfassten charakteristischen Vektors des Merkmals  $j$  (Bedingung 5.16).

$$\left. \frac{\partial}{\partial p_i} \vec{f}_M(\vec{\phi}_i, \vec{\varphi}_i, {}^S\vec{u}_{j,i}, \vec{p}) \right|_{\vec{p}_{nom}} \neq 0 \quad (5.16)$$

Da der wahre charakteristische Vektor des Merkmals unbekannt ist und daher gemäß der Zielfunktion das Streumaß betrachtet wird, muss des Weiteren die Sensitivität des Modells bezüglich eines Parameters konfigurationsabhängig sein (Bedingung 5.17).

$$\left. \frac{\partial}{\partial \vec{\phi}} \left( \frac{\partial}{\partial p_i} \vec{f}_M(\vec{\phi}, \vec{\varphi}, {}^S\vec{u}_{j,i}, \vec{p}) \right) \right|_{\substack{\vec{p}=\vec{p}_{nom} \\ \vec{\phi}=\vec{\phi}_i \\ \vec{\varphi}=\vec{\varphi}_i}} \neq 0 \quad (5.17)$$

Hieraus folgt, dass mit zunehmender Anzahl an Konfigurationen mit Bezug auf ein Merkmal dessen gemittelter charakteristischer Vektor eine bessere Approximation darstellt.

Für die Bewertung eines Sets an Kalibrierkonfigurationen muss folglich zum einen die Sensitivität der Konfigurationen und zum anderen die Approximationsgüte des gemittelten charakteristischen Vektors betrachtet werden.

Für die Sensitivitätsmatrix  $\mathbf{J}_j$  des Modells unter Berücksichtigung des robotergeführten 3D-Sensors bei einem gegebenen Set aus Kalibrierkonfigurationen mit  $m_j$  Konfigurationen an einem Merkmal  $j$  gilt Gleichung 5.18.

$$\mathbf{J}_j = \left( \begin{array}{c} \frac{\partial \vec{f}_M(\vec{\phi}_1, \vec{\phi}_1, {}^S\vec{u}_{j,1}, \vec{p})}{\partial \vec{p}} \\ \vdots \\ \frac{\partial \vec{f}_M(\vec{\phi}_{m_j}, \vec{\phi}_{m_j}, {}^S\vec{u}_{j,m_j}, \vec{p})}{\partial \vec{p}} \end{array} \right) \bigg|_{\vec{p}=\vec{p}_{nom}} \quad (5.18)$$

Werden  $l$  Merkmale berücksichtigt, setzt sich die Sensitivitätsmatrix  $\mathbf{J}$  des Modells gemäß Gleichung 5.19 zusammen.

$$\mathbf{J} = (\mathbf{J}_1 \dots \mathbf{J}_l)^T \quad (5.19)$$

Durch eine Singulärwertzerlegung der Sensitivitätsmatrix  $\mathbf{J} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$  erhält man die Singulärwertmatrix  $\mathbf{\Sigma}$  mit den Singulärwerten  $\sigma_1 \dots \sigma_N$ . Diese ermöglichen die Bewertung eines Sets an Kalibrierkonfigurationen. In Anlehnung an BORM & C.-H. MENG (1991) wird der Beobachtbarkeitsindex  $O_1$  zur Quantifizierung verwendet (Gleichung 5.20), da dieser nach JOUBAIR et al. (2016) am besten für Vertikal-Knickarmroboter geeignet und aufgrund der Invarianz gegenüber der Parameterskalierung vorteilhaft bei komplexen Modellen ist.

$$O_1 = \frac{(\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_N)^{\frac{1}{N}}}{\sqrt{\sum_{j=1}^l m_j}} \quad (5.20)$$

Da der wahre charakteristische Vektor des Merkmals unbekannt ist, weisen die einzelnen Kalibrierkonfigurationen gemäß der Zielfunktion keinen Absolutbezug

zueinander auf, sondern charakterisieren lediglich die Streuung eines mehrfach erfassten Merkmals. Daher muss neben der Eignung der Konfigurationen auch die Approximationsgüte des charakteristischen Vektors in der Bewertung des Sets an Kalibrierkonfigurationen berücksichtigt werden.

Die Approximationsgüte des charakteristischen Vektors ist hierbei reziprok zum Fehler des Mittelwerts und kann folglich als proportional zu  $\sqrt{m_j}$  für ein  $m_j$ -fach aus verschiedenen Konfigurationen gemessenes Merkmal  $j$  angenommen werden.

Die Bewertung eines Sets an Kalibrierkonfigurationen kann folglich gemäß Gleichung 5.21 bestimmt werden, wobei Kalibrierdaten an  $l$  Merkmalen mit jeweils  $m_j$  ( $j = 1 \dots l$ ) Messungen erfasst werden.

$$O = \sum_{j=1}^l \left( \sqrt{m_j} \right) \cdot O_1 \quad (5.21)$$

Die Auswahl der Kalibrierkonfigurationen  $K_{set}$  lässt sich folglich als diskretes Maximierungsproblem der Bewertungskriteriums  $O$  auffassen.

$$\max_{K_{set}} (O) \quad (5.22)$$

Hierfür wird, wie von JOUBAIR et al. (2016) vorgeschlagen, ein heuristisches Tauschverfahren unter Vorgabe einer Anzahl an Kalibrierkonfigurationen<sup>54</sup> verwendet, da hierdurch schnell eine Verbesserung der Gesamtbeobachtbarkeit erreicht werden kann. Das Erreichen des globalen Optimums ist nicht gefordert, da aufgrund des diskretisierten Kandidatensets dessen Erreichen im Allgemeinen nicht möglich und aus Anwendungssicht nicht nötig ist.

Um die Berechnungsaufwände während des Tauschverfahrens gering zu halten, werden im Vorfeld für alle Kandidaten in  $K$  die Einträge in  $\mathbf{J}_j$  beziehungsweise  $\mathbf{J}$  berechnet. Für jeden Tauschversuch müssen daher lediglich die zu den jeweiligen Kandidaten gehörenden Blöcke der Jacobi-Matrix  $\mathbf{J}$  getauscht, eine Singulärwertzerlegung durchgeführt und das Bewertungskriterium  $O$  berechnet werden. Eine

<sup>54</sup>Die geeignete Anzahl an Kalibrierkonfigurationen wurde im Rahmen der Gültigkeitsbetrachtung des Modells (Abschnitt 4.4) gezeigt und kann gemäß den Anforderungen der Anwendung festgelegt werden.

Neuberechnung der Ableitungen für jede Kalibrierkonfiguration entfällt (BUSCH 2016, S. 43–44).

Das Ergebnis des Tauschverfahrens ist ein Set  $K_{set} \subset K \subset C_{frei}$  an kollisionsfreien, für die Kalibrierung geeigneten Konfigurationen.

### 5.2.3 Erzeugung eines kollisionsfreien Programmablaufs

Das Ziel der automatisierten Datenaufnahme besteht darin, auf Basis der ausgewählten Kalibrierkonfigurationen ein am Realsystem ausführbaren Programmablauf zu erzeugen und die erfassten Daten in einer für die Parameteridentifikation verwendbaren Form zu speichern.

Hierfür muss das System zur Planung von kollisionsfreien Bewegungen zwischen den ausgewählten Kalibrierkonfigurationen befähigt, eine geeignete Reihenfolge der anzufahrenden Konfigurationen bestimmt und ein Ablaufprogramm unter Berücksichtigung der Sensorparametrisierung erstellt werden.

Abschließend muss im Rahmen der Datenerfassung am Realsystem das Ablaufprogramm abgefahren und die erfassten Daten auf Plausibilität überprüft und gespeichert werden.

## Bahnplanung

Den Ausgangspunkt zur Generierung von kollisionsfreien Bewegungen zwischen Konfigurationen stellt die Abbildung des freien Konfigurationsraums dar. Verfahren, welche den Konfigurationsraum diskretisieren (kombinatorische Bahnplanungsverfahren), sind im Vergleich zu stichprobenbasierten Bahnplanungsverfahren aufgrund des notwendigen Berechnungsaufwandes weniger geeignet. Insbesondere sind jedoch durch die Notwendigkeit, mehrmalig Bewegungen zwischen Konfigurationen zu planen, Multi-Query-Verfahren im Rahmen der Kalibrierdatenerfassung zu bevorzugen. Hierfür kann der freie Konfigurationsraum in Form eines Graphen  $G_{Rob}$  dargestellt werden.

Bei der graphentheoretischen Repräsentanz des freien Konfigurationsraums werden kollisionsfreie Konfigurationen als Knoten  $\vec{\theta}_i \in V_{Rob} \subset C_{frei}$  und kollisionsfreie

Bewegungen zwischen zwei Konfigurationen  $\vec{\theta}_i$  und  $\vec{\theta}_j$  als Kanten  $e_{i \rightarrow j} \in E_{Rob}$  in einem Graphen  $G_{Rob} = (V_{Rob}, E_{Rob})$  beschrieben (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 112). Ist der Graph zusammenhängend, kann zwischen jedem Konfigurationspaar eine Bahn gefunden werden.

Abbildung 5.4 zeigt schematisch die Erzeugung eines zusammenhängenden Graphen zur Planung einer kollisionsfreien Bahn. Hierfür werden in einem ersten Schritt die Kalibrier- und Transferkonfigurationen im freien Konfigurationsraum erzeugt. In einem zweiten Schritt werden kollisionsfreie Bewegungen ermittelt und als Kanten zur Vernetzung der Knoten (Konfigurationen) hinzugefügt.

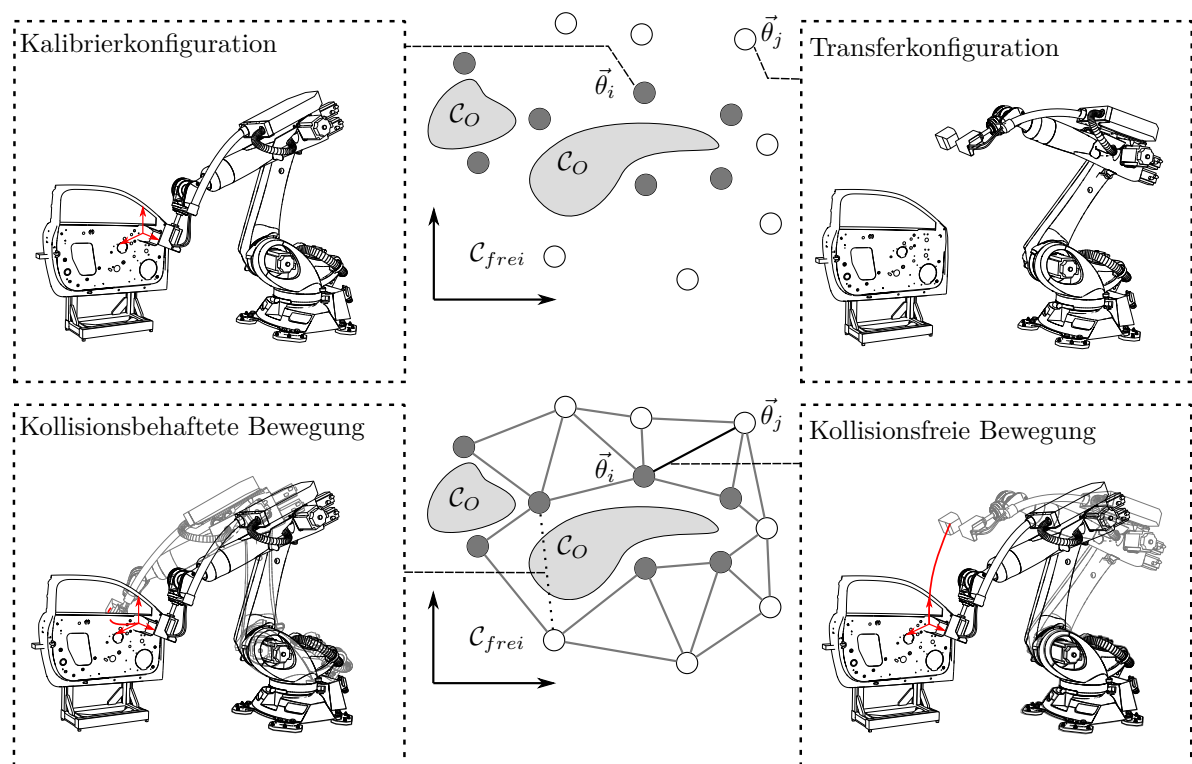


Abbildung 5.4: Graphentheoretische Darstellung des Konfigurationsraums: Kalibrier- und Transferkonfigurationen werden durch Knoten im freien Konfigurationsraum repräsentiert. Kollisionsfreie Bewegungen zwischen Knoten entsprechen Kanten im freien Konfigurationsraum.

Die Probabilistic-Roadmap-Methode kann in Anlehnung an M. ULRICH, LUX, JÜRGENSEN et al. (2016) durch das initiale Hinzufügen der ausgewählten Kalibrierkonfigurationen  $K_{set} \subset C_{frei}$  und einer kollisionsfreien Ausgangskonfiguration  $\vec{\theta}_S$

des Systems in den Graphen  $G_{Rob}$  adaptiert werden. Des Weiteren kann innerhalb der ersten Phase der PRM der Graph durch zusätzliche Konfigurationen (Transferkonfigurationen), sofern diese kollisionsfrei sind, ergänzt werden. Solche möglichen Konfigurationen können zufällig oder beispielsweise durch die Vorgabe von Sensorposen innerhalb definierter Bereiche erzeugt werden. So stellt eine Konfiguration, welche durch die Verschiebung einer Sensorpose entlang der Oberflächennormale des Prüfobjekts resultiert, einen für den Anwendungsfall geeigneten Kandidaten dar. Abbildung 5.5 illustriert die Erzeugung zusätzlicher Transferkonfigurationen auf Basis einer Kalibrierkonfiguration.

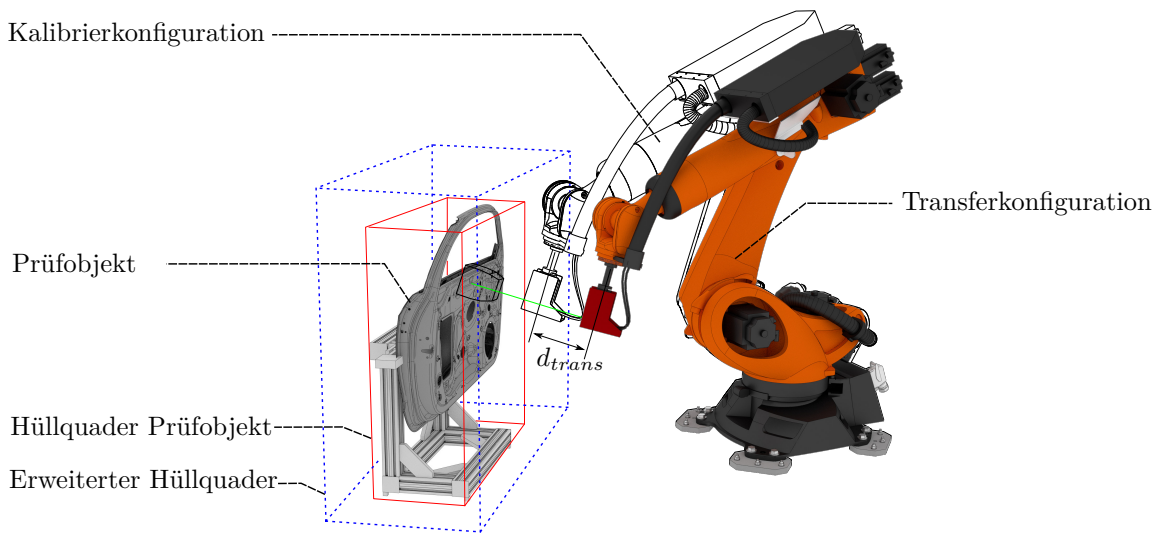


Abbildung 5.5: Erzeugung einer möglichen Transferkonfiguration durch Translation des Sensors entlang der Sichtachse ausgehend von einer Kalibrierkonfiguration. Weitere mögliche Transferkonfigurationen können im erweiterten Hüllquader (exklusive des Hüllquaders des Prüfobjektes) erzeugt werden.

Die Bewegungen im Rahmen der Kalibrierdatenaufnahme stellen lediglich Transferbewegungen zwischen den Messkonfigurationen dar und können zur Reduktion der benötigten Zeit als achssynchrone PTP-Bewegungen betrachtet werden. Die Verbindung zweier Knoten des Graphen durch eine Kante repräsentiert folglich eine kollisionsfreie PTP-Bewegung zwischen den korrelierenden Konfigurationen.

Die Menge der durch den Roboter eingenommenen Punkte im Arbeitsraum  $W$  bei der Ausführung einer PTP-Bewegung von der Konfiguration  $\vec{\theta}_i$  nach  $\vec{\theta}_j$  sei

durch die Menge  $A_{i,j}$  mit Gleichung 5.23 gegeben.

$$A_{i,j} = \{\vec{a} | \vec{a} \in A(\vec{\theta}_{i \rightarrow j}(t)) \forall t \in [0, t_{PTP}]\} \quad (5.23)$$

Dabei beschreibt  $\vec{\theta}_{i \rightarrow j} : [0, t_{PTP}] \rightarrow C_{frei}, t \mapsto \vec{\theta}_{i \rightarrow j}(t)$  eine achssynchrone PTP-Bewegung mit betragsmäßig konstanten Achsbeschleunigungen (Anfahrbeschleunigung und Abbremsbeschleunigung) mit der Bewegungsdauer  $t_{PTP}$ .<sup>55</sup> Eine Kante  $e_{i \rightarrow j}$  zwischen den Knoten  $\vec{\theta}_i$  und  $\vec{\theta}_j$  ist folglich ungerichtet und es gilt  $e_{i \rightarrow j} = e_{j \rightarrow i}$ .

Die Menge der Punkte  $O$  im Arbeitsraum  $W$ , welche von Hindernissen eingenommen werden, ist in Gleichung 5.24 beschrieben.

$$O = \bigcup_i O_i \quad (5.24)$$

Eine kollisionsfreie PTP-Bewegung beziehungsweise deren Repräsentation als Kante  $e_{i \rightarrow j}$  erfüllt folglich die Bedingung 5.25 für das Infimum, wobei  $d_c$  den kartesischen Mindestabstand zweier Objekte für die Kollisionsfreiheit beschreibt.

$$e_{i \rightarrow j} \in E \Rightarrow \inf\{\|\vec{a} - \vec{o}\| | \vec{a} \in A_{i,j}, \vec{o} \in O\} > d_c \quad (5.25)$$

Die Realisierung der Kollisionsdetektion kann mittels einer geometrischen Simulation des Robotersystems auf Basis von CAD-Daten erfolgen. Die Diskretisierung muss hierbei unter Berücksichtigung der minimal zu detektierenden Objektgröße sowie des Mindestabstandes  $d_c$  bei der Kollisionsdetektion erfolgen.

Auf Basis der Bedingung für eine Kante kann für jeden Knoten des Graphen die Verbindung zu seinen nächsten Nachbarn überprüft werden. Die Auswahl der nächsten Nachbarn kann hierbei auf Basis der Bewegungsdauer einer direkten PTP-Bewegung  $t_{PTP}$  ermittelt werden. Eine solche Abstandsmetrik bevorzugt die Überprüfung von Kanten mit kurzen Bewegungsdauern. Darüber hinaus kann die Dauer der Bewegung  $t_{PTP}$  als zusätzliche Information in Form einer Gewichtung<sup>56</sup> jeder Kante zugeordnet werden.

<sup>55</sup>Die mathematische Beschreibung von achssynchronen PTP-Bewegungen und die Berechnung deren Dauer kann dem Anhang A.2.6 entnommen werden.

<sup>56</sup>Da  $t_{PTP} > 0$  gilt, sind alle Kantengewichte größer Null und die Verwendung des Dijkstra-Algorithmus zur Suche nach dem kürzesten Weg ist folglich möglich.

Ist der Graph  $G_{Rob}$  zusammenhängend, kann für eine gesuchte Bahn von Konfiguration  $\vec{\theta}_i$  zur Konfiguration  $\vec{\theta}_j$  der kürzeste Weg  $\Psi_{i \rightarrow j}$  innerhalb des Graphen unter Verwendung des Dijkstra- (JUNGnickel 2013, S. 83–84; Krumke & Noltemeier 2012, S. 177–179; LaValle 2006, S. 36–37) beziehungsweise des A\*-Algorithmus (Rückel 2006, S. 62; LaValle 2006, S. 37–38) identifiziert werden. Ein solcher Weg  $\Psi_{i \rightarrow j}$  besteht im Allgemeinen aus einer Folge von Knoten und Kanten. Darüber hinaus kann der Weg wiederum mit einer Gewichtung in Form der Dauer für die gesamte Bahn charakterisiert werden.

### Bestimmung der Sequenz ausgewählter Kalibrierkonfigurationen

Das Ziel der Kalibrierdatenerfassung ist es, jede ausgewählte Kalibrierkonfiguration mindestens einmal anzufahren. Da hierbei eine große Anzahl an Konfigurationen berücksichtigt wird, spielt die Reihenfolge, in welcher diese angefahren werden, eine wichtige Rolle für die resultierende Dauer der Datenerfassung. Es gilt daher, mit vertretbarem Rechenaufwand, ausgehend von der Ausgangskonfiguration des Systems, eine Reihenfolge der Kalibrierkonfigurationen festzulegen. Die Endkonfiguration soll wiederum der Ausgangskonfiguration entsprechen.

Diese Problemstellung entspricht dem Problem des Handlungsreisenden (engl.: travelling salesman problem, TSP). Zur Formulierung einer solchen Problemstellung hat sich die Beschreibung als Suche nach dem kürzesten Kreis innerhalb eines Graphen  $G_{TSP}$  etabliert. Hierbei seien die ausgewählten Kalibrierkonfigurationen  $K_{set}$  sowie die Ausgangskonfiguration  $\vec{\theta}_s$  Knoten des Graphen. Des Weiteren sei der Graph vollständig vernetzt, wobei die Kanten jeweils der kürzesten, kollisionsfreien Bahn  $\Psi_{i \rightarrow j}$  zwischen den Konfigurationen  $\vec{\theta}_i$  und  $\vec{\theta}_j$  entsprechen. Diese Bahn kann unter Verwendung der Bahnplanung für jedes Konfigurationspaar bestimmt werden. Die Dauer der Bahn zwischen zwei Konfigurationen entspricht der Gewichtung der Kante.

Da der Berechnungsaufwand zur Bestimmung der optimalen Lösung mit zunehmender Anzahl an Knoten zunimmt, werden für solche Probleme heuristische Algorithmen zur Bestimmung von Näherungslösungen eingesetzt. Der Algorithmus nach Christophides ist ein geeignetes, heuristisches Verfahren zum Lösen des TSP, wobei die Approximation maximal um 50 % länger als die optimale

Lösung ist (M. ULRICH 2018, S. 104–106; M. ULRICH, LUX, JÜRGENSEN et al. 2016; REINELT 1994, S. 91–92).

Als Ergebnis der Lösung des TSP im Graphen  $G_{TSP}$  erhält man eine Sequenz bestehend aus Kalibrierkonfigurationen, welche durch Transferbahnen miteinander verbunden sind.

### Programmablauf zur Kalibrierdatenerfassung

Der resultierende Programmablauf besteht aus einer Abfolge von Befehlen, welche von einer Steuereinheit des roboterbasierten Koordinatenmesssystems ausgeführt werden kann.

Hierbei werden unter Einhaltung der Sequenz der ausgewählten Kalibrierkonfigurationen die entsprechenden kollisionsfreien Bahnen in Form einer PTP-Bewegungsfolge beschrieben. Der ermittelte Kreis im Graphen  $G_{TSP}$  definiert die Reihenfolge der anzufahrenden Kalibrierkonfigurationen, wobei der Programmablauf mit der Ausgangskonfiguration beginnt.

Durch die Bremsbeschleunigung beim Erreichen einer Konfiguration kommt es zu einer Ausschwingbewegung<sup>57</sup> des Sensors um seine Sollpose. Da insbesondere für die Kalibrierdatenerfassung jedoch ein statisches Verhalten zugrunde gelegt wird, kann die Sensormessung erst nach einer typischen Ausschwingzeit  $\tau_{aus} \approx 1\text{s}$  ausgelöst werden.

Nach Erreichen eines statischen Systemzustands werden auf Basis der Merkmalsinformationen bei der entsprechenden Kalibrierkonfiguration das Sichtvolumen des Sensors parametrisiert sowie das Auswerteverfahren mit der entsprechenden Ausgleichsgeometrie festgelegt.

<sup>57</sup>Das Ausschwingverhalten eines Vertikal-Knickarmroboters kann dem Anhang zur verwendeten Hardware in Abschnitt A.4.1 entnommen werden.

### 5.2.4 Erfassung und Speicherung der Kalibrierdaten

Zur Datenaufnahme wird das Ablaufprogramm sequentiell auf einer Steuereinheit ausgeführt. Hierbei werden für jede erreichte Konfiguration die eingenommenen Motorwinkel an die Steuereinheit zurück übertragen. Ist eine Kalibrierkonfiguration erreicht, wird nach der Ausschwingdauer eine Punktwolke im definierten Scanvolumen erfasst. Anhand des Merkmalstyps wird ein Ausgleichselement bestimmt und mittels Regressionsverfahren in die Punktwolke eingepasst. Die Übereinstimmung der relativen Merkmalseigenschaften (beispielsweise Radius einer Bohrung, Länge von Haupt- und Nebenachse eines Langlochs oder Höhe eines Bolzens) mit der Sollgeometrie kann hierbei zur Plausibilisierung der Messung verwendet werden. Weicht das geometrische Ausgleichselement stark von der Sollgeometrie ab, kann die Messung wiederholt oder verworfen werden. Solche Abweichungen können beispielsweise bei unvollständig erfassten Merkmalen oder durch Reflektionen der Projektion auftreten.

Die plausibilisierten, charakteristischen Vektoren des Ausgleichselements in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem werden anschließend zusammen mit den Motorwinkeln der Kalibrierkonfiguration, den Motorwinkeln der vorherigen Konfiguration, einer eindeutigen Bezeichnung des Merkmals und weiteren Informationen zur Protokollierung gespeichert.

## 5.3 Parameteridentifikation

Das Ziel der Parameteridentifikation ist das Lösen des Minimierungsproblems 5.12 auf Basis der erfassten Realdaten ausgehend von initialen Parametern, um das Modell möglichst gut in Übereinstimmung mit dem realen Messsystem zu bringen.

Hierbei gilt es, die initialen Parameter so anhand bekannter Informationen abzuschätzen, dass diese ausreichend nah an der Lösung des Minimierungsproblems liegen (Abschnitt 5.3.1) und anschließend die Ermittlung der gesuchten Parameter ermöglichen. Durch eine geeignete Skalierung der Funktionsparameter und Gewichtung der Residuen kann die formulierte Zielfunktion für Verfahren der numerischen Optimierung befähigt werden (Abschnitt 5.3.2). Im Rahmen der

numerischen Optimierung wird das Verfahren zur Parameteridentifikation auf Basis der Zielfunktion beschrieben (Abschnitt 5.3.3).

Die Ausgangsbasis bilden die erfassten Kalibrierdaten, wobei jeder charakteristische Vektor eines Merkmals  $j \in [1, \dots, l]$  mehrfach ( $m_j$ -fach) erfasst ist. Die Gesamtanzahl  $m$  an Messungen ergibt sich folglich aus Gleichung 5.26.

$$m = \sum_{j=1}^l m_j \quad (5.26)$$

### 5.3.1 Initiale Parameterschätzung

Den Ausgangspunkt für die Parameteridentifikation bildet die Schätzung der initialen Parameter. Insbesondere aus Anwendungssicht muss hierbei zwischen nominal bekannten und unbekannten Parametern unterschieden werden.

So lässt sich beispielsweise die Nominalgeometrie der Roboterglieder sowie die Geometrie des Endeffektors dem jeweiligen Datenblatt des Roboters beziehungsweise des Sensors entnehmen und kann als initiale Parameterschätzung herangezogen werden.

Für eine initiale Parameterschätzung der Antriebselemente müssen die Nullstellungen der Achswinkel mit den Motorwinkeln korreliert sowie die Einträge der Übertragungsmatrix approximiert werden. Eine solche Abschätzung ist jedoch ohne eine detaillierte Kenntnis über die kinematische Struktur nicht direkt möglich. Zur initialen Parameterschätzung der Antriebselemente werden daher die während der Kalibrierdatenaufnahme erfassten Achswinkel und korrelierenden Motorwinkel verwendet. Gemäß Gleichung 5.27 ergibt sich folglich ein überbestimmtes Gleichungssystem<sup>58</sup>, welches in Form eines Minimierungsproblem formuliert werden kann.

<sup>58</sup>Im Falle eines Vertikal-Knickarmroboters mit Zentralhand sind mindestens 15 Bestimmungsgleichungen notwendig. Diese Anforderung ist unter Verwendung von Kalibrierdaten bereits implizit erfüllt. Es gilt  $m > 15$ .

$$\min_{\vec{p}_{Antrieb}} \left( \sum_{i=1}^m \left\| \vec{\theta}_i - \mathbf{A}(\vec{p}_{Antrieb}) \cdot (\vec{\phi}_i - \vec{\phi}_0) \right\|_2^2 \right) \quad (5.27)$$

Dabei entspricht  $m$  der Anzahl an erfassten Kalibrierkonfigurationen,  $\mathbf{A}$  der Übertragungsmatrix und  $\vec{\phi}_0$  dem Nullstellungsvektor der Achsen. Die durch die Robotersteuerung berechneten Achswinkel sind durch  $\vec{\theta}_i$  und die erfassten Motorwinkel durch  $\vec{\phi}_i$  gegeben.

Dieses Minimierungsproblem kann mittels numerischer Optimierungsverfahren gelöst werden. Die gefundene Lösung entspricht folglich den in der Robotersteuerung hinterlegten Werten für die Übersetzung der Getriebestufen und der Nullstellung der Achsen.

Bezugnehmend auf Genauigkeitsuntersuchungen bei Vertikal-Knickarmroboter lassen sich die Einflüsse der verbleibenden Parameter in der Größenordnung von etwa 1 mm einordnen. Insbesondere da diese Parameter im Allgemeinen nicht ohne vorherige Analysemethoden bekannt und von Anwenderseite nicht abschätzbar sind, werden diese initial zu Null gesetzt. Dementsprechend werden Getriebenachgiebigkeit, Hystereseeffekte, Nachgiebigkeit der Befestigung, Elastizität der Roboter Elemente sowie der Einfluss von Gewichtsausgleichssystemen initial als vernachlässigbar angenommen. Diese Annahme ist in Übereinstimmung mit bisherigen Kalibrieransätzen wie beispielsweise von WIEST (2001, S. 53).

### 5.3.2 Gewichtung der Residuen und Parameterskalierung

#### Residuengewichtung

Die im Rahmen der Optimierung betrachtete Zielfunktion 5.11 beschreibt die Abweichungen des Modells in Bezug zum Realsystem. Hierbei werden sowohl die Positionsabweichungen als auch die Orientierungsabweichungen eines mehrfach gemessenen Merkmals betrachtet. Diese korrelieren aufgrund der statischen Merkmalspose wiederum direkt mit den Poseabweichungen des Sensors.

Da insbesondere bei numerischen Optimierungsverfahren die Zielfunktion als Gesamtes minimiert wird, müssen die einzelnen Residuen gemäß ihres Beitrags

auf die resultierende Genauigkeit des roboterbasierten Messsystems gewichtet werden. Dies stimmt mit der Erkenntnis von HOLLERBACH & WAMPLER (1996) überein. Abbildung 5.6 illustriert schematisch den unterschiedlichen Einfluss von Positions- und Orientierungsabweichung des Sensors in Bezug auf ein Merkmal.

Eine translatorische Abweichung des Sensors ist proportional zur erfassten Positionsabweichung eines Merkmals, wohingegen eine Orientierungsabweichung des Sensors in Abhängigkeit zur Merkmalsdistanz zu einer Positionsabweichung des Merkmals führt. Bei einer typischen Distanz  $d_{SM}$  zwischen Sensor und Merkmal ergibt sich für eine Orientierungsabweichung  $\delta\eta$  eine relative Positionsabweichung  $\delta r$  gemäß Gleichung 5.28a und unter der Annahme kleiner Orientierungsabweichungen die Näherung 5.28b.

$$\delta r = d_{SM} \cdot \sin(\delta\eta) \quad (5.28a)$$

$$\approx d_{SM} \cdot \delta\eta \quad (5.28b)$$

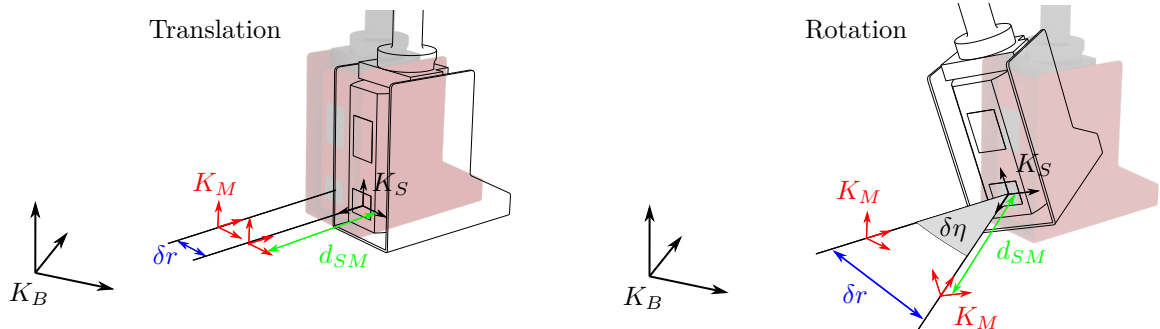


Abbildung 5.6: Einfluss von Positions- und Orientierungsabweichung des Sensors auf die ermittelte Merkmalsposition.

Entsprechend des Einflusses auf die Positionsabweichung können die Residuen der Zielfunktion gewichtet werden. Man erhält die gewichtete Zielfunktion 5.29

$$R' = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{m_j} g_{j,i} \cdot \left\| \frac{\sum_{h=1}^{m_j} \vec{f}_M(\vec{\phi}_h, \vec{\varphi}_h, {}^S\vec{u}_{j,h}, \vec{p})}{m_j} - \vec{f}_M(\vec{\phi}_{j,i}, \vec{\varphi}_{j,i}, {}^S\vec{u}_{j,i}, \vec{p}) \right\|_2^2 \quad (5.29)$$

mit den Gewichten für Positionsvektor und Orientierungsvektor.

$$g_{j,i} = \begin{cases} 1, & \text{für } {}^S\vec{u}_{j,i} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T = 1 \\ d_{SM}, & \text{für } {}^S\vec{u}_{j,i} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T = 0 \end{cases} \quad (5.30)$$

### Konditionierung und Parameterskalierung

Aufgrund des physikalischen Bezugs der Modellparameter liegt diesen das Internationale Einheitensystem (SI) zugrunde. Die Einflüsse einzelner Parameter können sich daher betragsmäßig in mehreren Größenordnungen unterscheiden. Nach HOLLERBACH & WAMPLER (1996) ist deren Skalierung für die Gewährleistung der Konvergenz bei nichtlinearen, numerischen Optimierungen sowie für die Singulärwertzerlegung im Rahmen der Auswahl von Kalibrierkonfigurationen notwendig.

Um die Einflüsse der Parameter bewerten zu können, hat sich die Beschreibung der Kondition oder Konditionszahl  $\kappa$  (Gleichung 5.31) ausgehend von der Singulärwertzerlegung der Sensitivitätsmatrix etabliert.

$$\kappa(\mathbf{J}) = \frac{\sigma_1}{\sigma_N} \quad (5.31)$$

Je kleiner die Konditionszahl ist, desto geringer unterscheiden sich die Einflüsse der einzelnen Parameter. Um im Rahmen der Parameteridentifikation zum einen Parameter mit physikalischen Bezug und zum anderen ein gut konditioniertes Modell für die numerische Optimierung zu verwenden, können die Parameter skaliert werden (HOLLERBACH & WAMPLER 1996; SCHRÖER 1993, S. 212–219).

Da der Parametereinfluss auf die messtechnisch erfasste Größe konfigurationsabhängig ist, wird der mittlere Einfluss der Parameter für das betrachtete Set an Kalibrierkonfigurationen betrachtet. Dessen Kehrwert wird als Skalierungsfaktor  $\lambda_{p_i}$  für den jeweiligen Parameter  $p_i$  des Modell verwendet.

$$\lambda_{p_i} = \left( \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{m_j} \left\| \frac{\partial \vec{f}_M(\vec{\phi}_{j,i}, \vec{\varphi}_{j,i}, {}^S\vec{u}_{j,i}, \vec{p})}{\partial p_i} \Big|_{\vec{p}=\vec{p}_{nom}} \right\| \right)^{-1} \quad (5.32)$$

Dies entspricht dem reziproken Mittelwert der dem jeweiligen Parameter entsprechenden Spalte der Jacobi-Matrix  $\mathbf{J}$ . Die Skalierung lässt sich folglich als Spaltenskalierung der Jacobi-Matrix auffassen.

Die Skalierungsfaktoren werden im Vorfeld der Optimierung berechnet, im Modell integriert und die initialen Parameterwerte entsprechend angepasst.

Um für den Anwender den physikalischen Bezug der Parameter nach der Optimierung wieder zu gewährleisten, werden die Parameterwerte nach dem Optimierungsverfahren zurück skaliert.

### 5.3.3 Numerische Optimierung

Das zur Parameteridentifikation formulierte Minimierungsproblem (Gleichung 5.33) entspricht hierbei der Methode der kleinsten Quadrate mit entsprechenden Gewichtungen.

$$R'(\vec{p}^*) = \min_{\vec{p} \in \mathbb{R}^n} \left( \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{m_j} g_{j,i} \cdot \left\| {}^B \vec{v}'_j - \vec{f}_M(\vec{\phi}_{j,i}, \vec{\varphi}_{j,i}, {}^S \vec{u}_{j,i}, \vec{p}) \right\|_2^2 \right) \quad (5.33)$$

In Abhängigkeit der Problemstellung existiert eine Vielzahl an Optimierungsverfahren. Insbesondere die Fähigkeit des Verfahrens, robust gegenüber Fehlern der initialen Parameter eine Lösung zu finden, stellt ein wichtiges Auswahlkriterium dar.

Aufgrund dieser Unsicherheiten bei der initialen Parameterschätzung, insbesondere bei den initial vernachlässigten Effekten, sowie der großen Anzahl an zu bestimmenden Parametern ist das Levenberg-Marquardt-Verfahren geeignet. Dies spiegelt sich auch in der Verbreitung dieses Verfahren bei bisherigen Kalibrieransätzen wider (ELATTA et al. 2004).

Da die Modellabweichung auf Basis der Approximation des arithmetischen Mittels des charakteristischen Vektors des Merkmals erfolgt, ist der Rechenaufwand zur Ermittlung der partiellen Ableitung  $\frac{\partial}{\partial \vec{p}} {}^B \vec{v}'_j$  hoch. Zur effizienteren Optimierung wird deshalb das arithmetische Mittel des charakteristischen Merkmalsvektors  ${}^B \vec{v}'_j$  als quasi-statisch für jede Iteration angenommen.

Nach jedem Iterationsschritt  $k$  des Optimierungsverfahrens werden auf Basis der aktuellen Parameter die approximierten, charakteristischen Merkmalsvektoren  ${}^B\vec{v}'_j$  erneut bestimmt. Es gilt folglich Gleichung 5.34.

$${}^B\vec{v}'_j(\vec{p}_k) \approx \frac{1}{m_j} \sum_{h=1}^{m_j} \vec{f}_M(\vec{\phi}_{j,h}, \vec{\varphi}_{j,h}, {}^S\vec{u}_{j,h}, \vec{p}_k) \quad (5.34)$$

Als Abbruchkriterien des Optimierungsverfahrens werden eine maximale Anzahl an Iterationsschritten sowie die minimale Änderung der Zielfunktion je Iterationsschritt verwendet.

Die maximale Anzahl an Iteration dient hierbei der Limitierung der Berechnungsdauer, sofern kein anderes Abbruchkriterium erfüllt wird. Hierbei kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine adäquate Lösung gefunden wurde.

Die Unterschreitung der minimal geforderten Änderung der Zielfunktion in einer Iteration führt zum Abbruch des Optimierungsverfahrens. Mit den hierbei bestimmten Parametern werden nachfolgend alle Residuen berechnet und anhand deren Verteilung die Gültigkeit der ermittelten Lösung überprüft.

## 5.4 Gültigkeitsbetrachtung der Datenerfassung und Parameteridentifikation

### 5.4.1 Automatisierte Kalibrierdatenerfassung

Im Rahmen der automatisierten Kalibrierdatenerfassung gilt es, gültige Kalibrierkonfigurationen zu generieren, geeignete Konfigurationen für die Kalibrierung auszuwählen und durch ein am Realsystem ausführbares Programm zu erfassen.

In den nachfolgenden Abschnitten sollen diese Bestandteile anhand eines exemplarischen Prüfbodens auf ihre Eignung hin untersucht werden.

## Generierung von Kalibrierkonfigurationen

Die Erzeugung eines Kandidatensets  $K$  auf Basis der geometrischen Simulation und eines Prüfplans bildet hierbei die Grundlage für den nachfolgenden Auswahlprozess.

Exemplarisch ist in Abbildung 5.7 a) die geometrische Simulation für ein Prüfobjekt mit drei Merkmalen visualisiert. Ausgehend von geeigneten Sensorposen zur Erfassung der Merkmale werden kollisionsfreie Kalibrierkonfigurationen erzeugt. Abbildung 5.7 b) zeigt die Achswinkelverteilungen für die drei exemplarischen Merkmale und jeweils 200 erzeugten Konfigurationen.

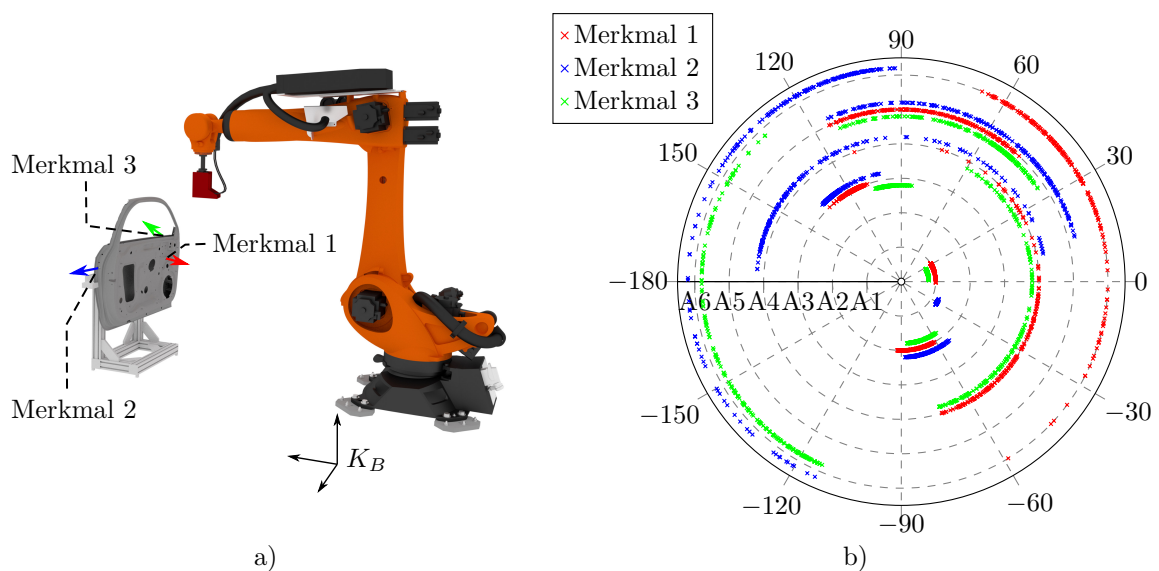


Abbildung 5.7: Generierung von Kalibrierkonfigurationen: a) Darstellung der geometrischen Simulation mit drei exemplarischen Merkmalen eines Prüfobjektes, b) Verteilung der Achswinkel für 200 Kalibrierkonfigurationen je Merkmal.

Insbesondere definiert hierbei die Lage des Merkmals am Prüfobjekt die Verteilung der Achswinkel. Das Einbeziehen von mehreren Merkmalen zur Erzeugung von Kalibrierkonfigurationen ermöglicht folglich das Abdecken eines breiteren Achswinkelbereiches.

Ein wesentlicher Vorteil der Kalibrierdatenerfassung am Prüfobjekt selbst stellt hierbei die Übereinstimmung von Kalibrierkonfiguration und Messkonfiguration

der eigentlichen Prüfaufgabe dar, da die Modelloptimierung an denselben Stellen stattfindet. Unter Berücksichtigung des räumlichen Gültigkeitsbereiches (vgl. Abschnitt 4.4) des Modells ist folglich eine höhere Genauigkeit zu erwarten als bei konventionellen Verfahren<sup>59</sup> zur Kalibrierdatenerfassung.

### Auswahl von Kalibrierkonfigurationen

Da typischerweise das Set an Kandidaten  $K$  deutlich größer als die im Rahmen der Anwendung zu erfassenden Kalibrierdaten ist, gilt es, Konfigurationen auszuwählen, welche eine robuste Parameteridentifikation zulassen. Dies entspricht der Maximierung des Bewertungskriteriums  $O$  für eine vorgegebene Anzahl an Konfigurationen.

Abbildung 5.8 zeigt die Steigerung des Bewertungskriteriums  $O$  in Abhängigkeit der Tauschversuche für ein Set mit 100 Konfigurationen aus einem Kandidatenset mit 600 Konfigurationen an drei Merkmalen (vgl. Abbildung 5.7). Ausgehend von der initialen Auswahl, welche lediglich Konfigurationen eines Merkmals enthält, wird durch sukzessives Tauschen von Konfigurationen insbesondere mit Konfigurationen anderer Merkmale eine Steigerung des Bewertungskriteriums erreicht.

Hierbei zeigt sich, dass der Verlauf des Bewertungskriteriums in Sättigung geht und folglich die Wahrscheinlichkeit, geeignetere Konfigurationen in den Kandidaten zu finden, abnimmt. Darüber hinaus zeigt die Winkelverteilung der ausgewählten Konfigurationen, dass mit zunehmenden Tauschversuchen ein größerer Achswinkelbereich abgedeckt wird.

---

<sup>59</sup>Bei den meisten Verfahren zur Kalibrierdatenerfassung werden die Konfigurationen unabhängig von der adressierten Anwendung erzeugt.

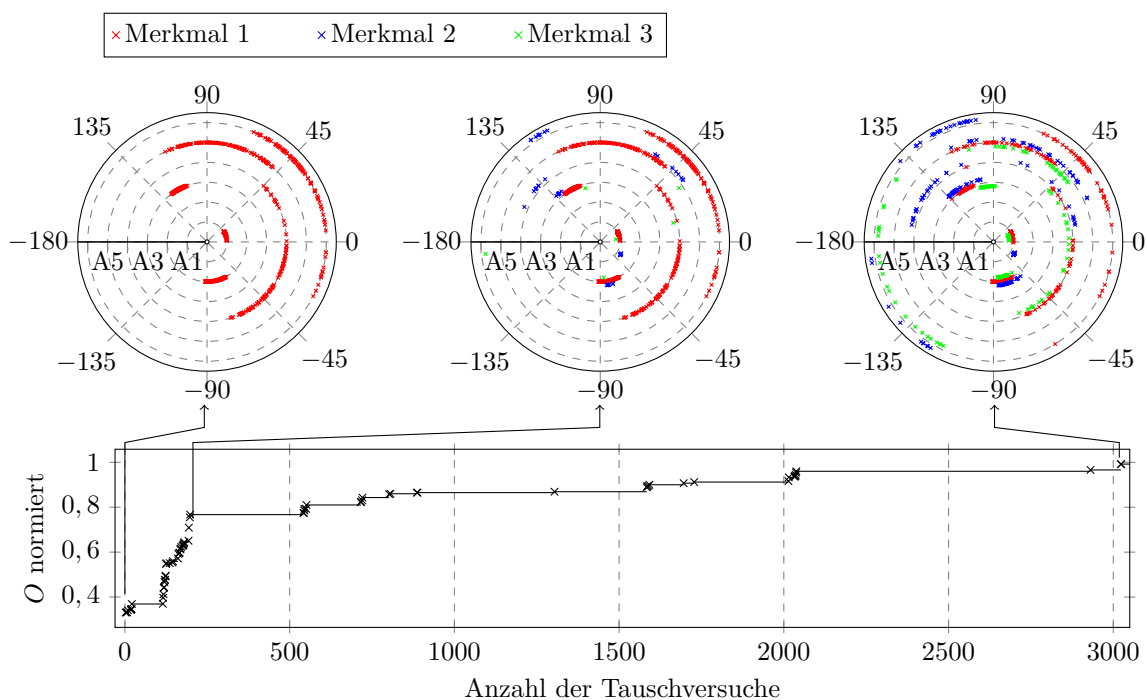


Abbildung 5.8: Auswahl von 100 Kalibrierkonfigurationen aus einem Set von 600 Konfigurationen (je 200 Konfigurationen an drei Merkmalen, vgl. Abbildung 5.7 a) durch Steigerung des Beobachtbarkeitsindex  $O$  in Abhängigkeit der Anzahl an Tauschversuchen. Die initiale Auswahl besteht aus 100 zufälligen Konfigurationen des Merkmals 1.

## Erfassung der Kalibrierdaten

Im Rahmen der numerischen Optimierung der Zielfunktion werden die Modellparameter so adaptiert, dass eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Modell und Kalibrierdaten erreicht wird. In Folge haben fehlerbehaftete Kalibrierdaten unmittelbaren Einfluss auf die Qualität der Kalibrierung.

Insbesondere die Bestimmung der Merkmalscharakteristika kann in Abhängigkeit der Qualität der 3D-Punktwolken zu Messausreißern führen. Abbildung 5.9 zeigt die Erfassung einer geeigneten 3D-Punktwolke (b) am Realsystem mittels eines 3D-Lasertriangulationssensors *Helix HDR/H0200* der Firma *Perceptron Inc.* (a).

Ungünstige Punktwolken führen zu Fehlern bei der Bestimmung von geometrischen Ausgleichselementen, welche typischerweise mittels Regressionsmethoden an die erfassten Daten angepasst werden. Typische Ursachen sind zu geringe

Punktdichten, nicht vollständig erfasste Merkmale, Reflexionen und die Erfassung von dahinter liegenden Merkmalen (Abbildung 5.9 c–f).

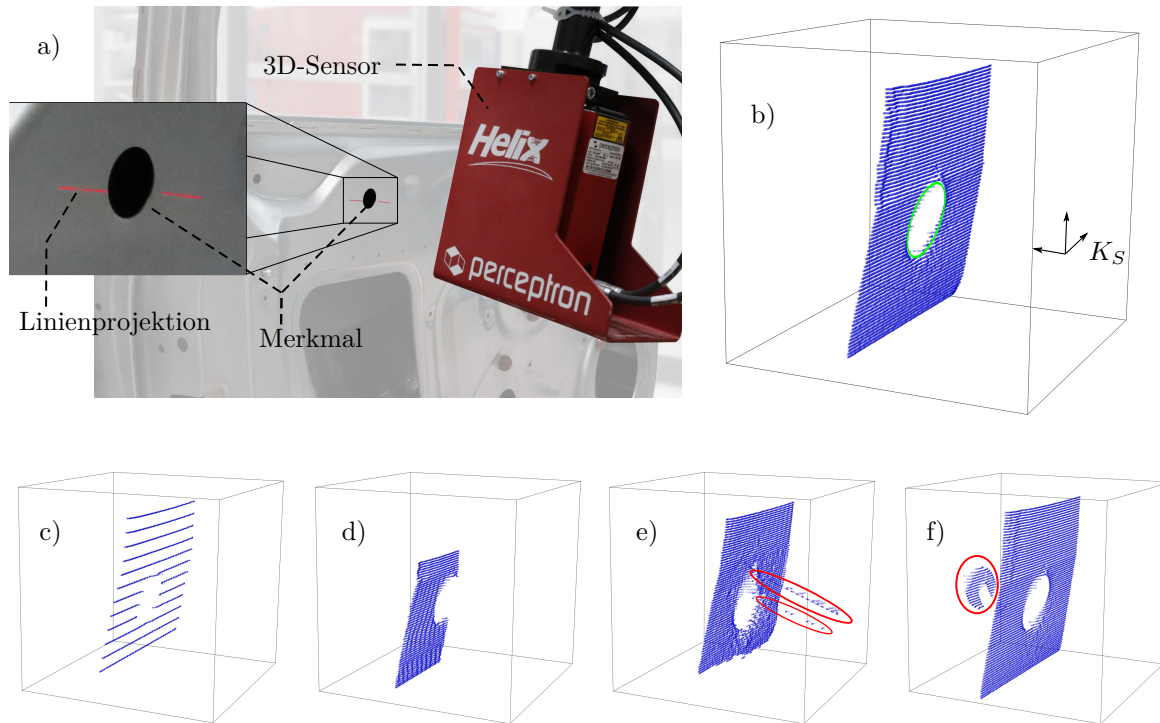


Abbildung 5.9: Erfassung der Kalibrierdaten am Beispiel einer Bohrung: a) Aufnahme einer 3D-Punktwolke am Prüfobjekt mittels 3D-Lasertriangulationssensor, b) Geeignete 3D-Punktwolke zur Auswertung, c) Ungeeignete Punktwolke mit zu geringer Punktedichte, d) Ungeeignete Punktwolke mit nicht vollständig erfasstem Merkmal, e) Ungeeignete Punktwolke mit Reflexion, f) Ungeeignete Punktwolke mit Erfassung eines dahinter liegenden Merkmals.

Zur automatisierten Erkennung von Ausreißern können die ermittelten Charakteristika eines Merkmals (beispielsweise Radien und Längen) unter Berücksichtigung einer Toleranzgrenze mit deren Nominalwerten<sup>60</sup> verglichen werden.

<sup>60</sup>Die Nominalgeometrie jedes Merkmals ist im Prüfplan enthalten.

## 5.4.2 Parameteridentifikation

Zur Validierung der Parameteridentifikation auf Basis von am Prüfobjekt mehrfach erfassten Merkmalen wird zunächst der Einfluss der automatisierten Parameterskalierung auf die numerische Optimierung betrachtet sowie die erreichbare Messgenauigkeit des Systems überprüft. Nachfolgend wird der Einfluss der Auswahl von Kalibrierkonfigurationen auf die Parameteridentifikation evaluiert.

### Numerische Optimierung

Die Gültigkeitsbetrachtung der numerischen Optimierung wird am Beispiel eines Prüfobjektes Autotür mit 10 Bolzenmerkmalen durchgeführt. Hierbei werden zur Parameteridentifikation 200 Kalibrierkonfigurationen unter Berücksichtigung der Bolzenposition und -orientierung verwendet.

Abbildung 5.10 a) zeigt die Zielgröße in Abhängigkeit der Iterationsschritte des Levenberg-Marquardt-Verfahrens mit und ohne Parameterskalierung. Die erreichte Lösung wird für eine hohe Anzahl an Iterationsschritten nicht durch die Parameterskalierung verändert, jedoch wird eine höhere Konvergenzgeschwindigkeit erreicht. Dies ermöglicht das schnellere Erreichen eines Abbruchkriteriums und dadurch einen schnelleren Optimierungsprozess.

Die Güte der Übereinstimmung zwischen Modell und Kalibrierdaten kann in Anlehnung an die quadrierten Abweichungen (vgl. Abschnitt 4.3.4) bei Kalibrierdaten mit messtechnischem Absolutbezug anhand des quadrierten Streumaßes erfolgen. Abbildung 5.10 b) zeigt die Häufigkeitsverteilung des quadrierten Streumaßes nach 400 Iterationsschritten sowie die entsprechende Dichtefunktion der Gammaverteilung. Aus dem zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdiagramm (Abbildung 5.10 c) kann gefolgert werden, dass analog zur Gültigkeitsbetrachtung des Modells (vgl. Abschnitt 4.4) die Güte der Parameteridentifikation durch die Dichtefunktion der Gammaverteilung charakterisiert wird.

Zur Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit ist in Abbildung 5.10 d) die Häufigkeitsverteilung der kartesischen Abweichungen der Merkmalspositionen dargestellt. Die Abweichungen sind hierbei auf eine Lasertracker-Referenzmessung bezogen. Der auf Basis der Dichtefunktion ermittelte Erwartungswert für die kartesische

Abweichung ( $E_{abw} = \sqrt{E_\gamma} = 0,077 \text{ mm}$ ) ist in guter Übereinstimmung mit dem Median der gemessenen Abweichungen.

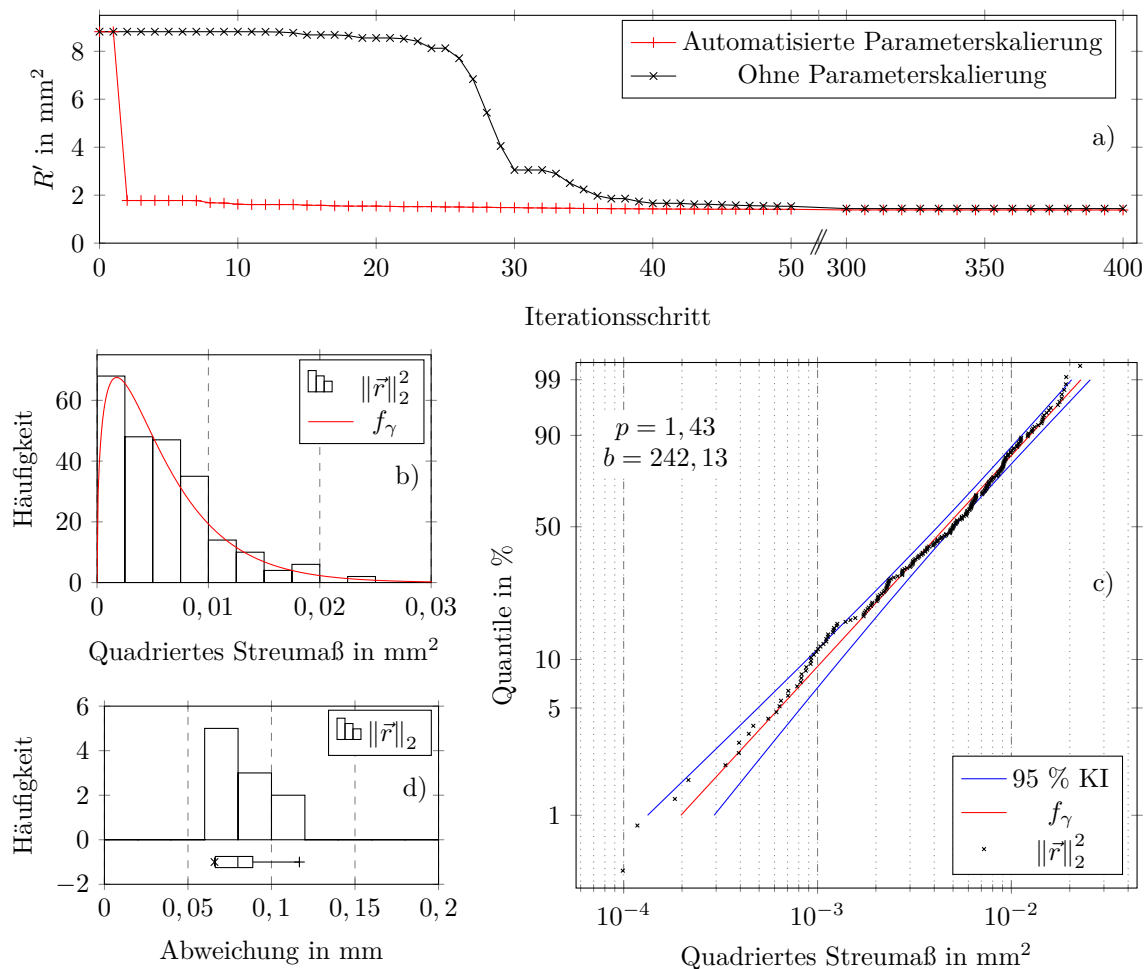


Abbildung 5.10: Parameteridentifikation auf Basis von 200 Kalibrierkonfigurationen an 10 Bolzenmerkmalen einer Autotür: a) Zielgröße in Abhängigkeit des Optimierungsiterationsschrittes mit und ohne automatische Parameterskalierung, b) Verteilung der quadrierten Abweichungen nach 400 Iterationsschritten, c) Wahrscheinlichkeitsdiagramm der Dichte der Gammaverteilung mit 95 % Konfidenzintervall (KI), d) Histogramm der kartesischen Abweichungen der Merkmalspositionen referenziert gegen eine Lasertracker-Vergleichsmessung und Darstellung als Box-Whisker-Diagramm.

## Einfluss der Kalibrierkonfigurationen auf die Parameteridentifikation

Zur Evaluation des Einflusses der Kalibrierkonfigurationen werden in Abbildung 5.11 die kartesischen Abweichungen der Positionen von 10 Bolzenmerkmalen nach der Parameteridentifikation mit einem zufälligen Set an Kalibrierkonfigurationen in Abhängigkeit des Beobachtbarkeitsindex  $O$  dargestellt. Die ermittelten Positionen werden hierbei gegen eine Lasertracker-Vergleichsmessung referenziert.

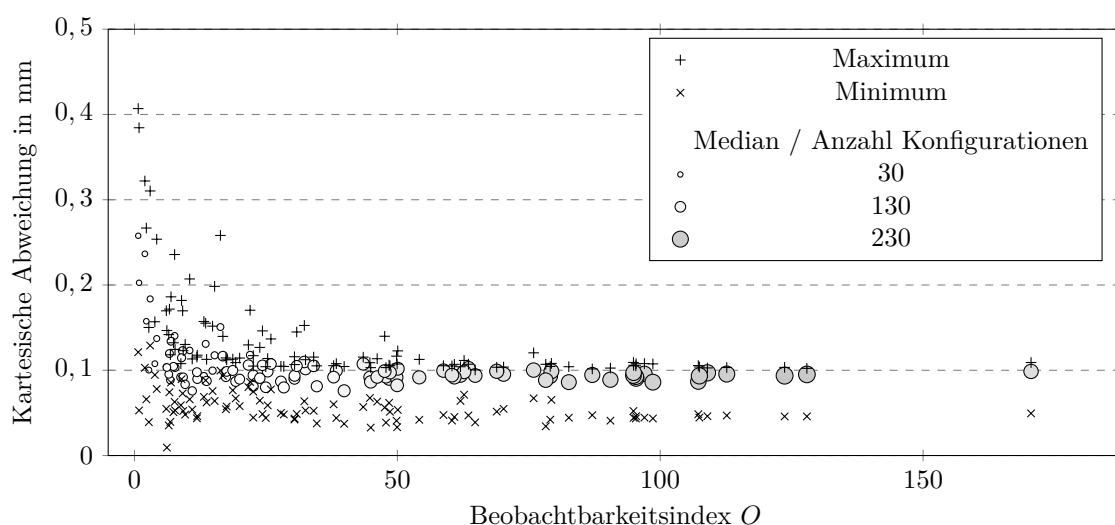


Abbildung 5.11: Verteilung der kartesischen Abweichungen der Merkmalspositionen einer Validierungsmessung von 10 Bolzenmerkmalen einer Autotür (referenziert gegen eine Lasertracker-Vergleichsmessung) in Abhängigkeit des Beobachtbarkeitsindex  $O$  der zur Parameteridentifikation verwendeten Kalibrierdaten (mit  $30 \leq m \leq 230$ ).

Insbesondere zeigt die Breite der Verteilungen bei kleinen Beobachtbarkeitsindizes, dass hier keine zuverlässige Parameteridentifikation durchgeführt werden kann. Mit zunehmender Anzahl an Konfigurationen und größeren Beobachtbarkeitsindizes wird eine zuverlässige Parameteridentifikation möglich.

Der Beobachtbarkeitsindex  $O$  eignet sich folglich für die automatisierte Auswahl der Kalibrierkonfigurationen und ermöglicht die zuverlässige Parameteridentifikation auf Basis der Streuung einer mehrfach gemessenen Merkmalspose.

### 5.4.3 Fazit und Überprüfung der Hypothese

Wird das Prüfobjekt als statisch im Arbeitsraum des Roboters angenommen, so sind die Streuungen von mehrfach gemessenen Merkmalsposen ein Maß für die Übereinstimmung von Modell und Realsystem. Durch die Integration des 3D-Sensors in das Modell ist die Formulierung einer Zielfunktion zur Parameteridentifikation auf Basis der Minimierung dieser Streuungen möglich, ohne die Daten aus externen Messsystemen zu benötigen.

Durch die automatisierte Generierung und Auswahl von Kalibrierkonfigurationen am Prüfobjekt selbst sowie der automatisierten Programmerzeugung kann auf Basis der CAD-Daten und des Prüfplans die datentechnische Grundlage für die Parameteridentifikation erzeugt werden. Hierbei kommt dem Anwender lediglich eine überprüfende Rolle zu.

Durch die automatisierten Schritte der Datenaufnahme und Parameteridentifikation kann folglich unter Berücksichtigung einer geeigneten parametrisierten Modellierung das System befähigt werden, selbstständig seine Genauigkeit zu steigern. Dieser Prozess wird als Selbst-Kalibrierung bezeichnet.

Resümierend ist folglich die Hypothese II für roboterbasierte Koordinatenmesssysteme mit einem 3D-Sensor und einem statischen Prüfobjekt gültig.

## 6 Kompensation und Messstrategie

Die Selbst-Kalibrierung stellt ein Verfahren zur Befähigung des roboterbasierten Messsystems zur Erreichung der im Rahmen der messtechnischen Aufgabe geforderten Genauigkeit dar. Die Gültigkeit des durch die Kalibrierung parametrisierten, statischen Modells ist gemäß Abschnitt 4.4 zeitlich jedoch nur begrenzt gegeben. Aus Anwendungssicht ist daher insbesondere eine Strategie zur Aufrechterhaltung der Genauigkeit und Modellgültigkeit während des Messbetriebs notwendig. Basierend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Kapitel wird daher eine Messstrategie mit Kompensation betriebsbedingter Einflüsse entwickelt. Die dritte Hypothese fasst die Grundlage hierfür zusammen.

**Hypothese III:** *Die Modellgüte kann zur Bewertung der Gültigkeit des aktuellen Modells und automatisierten (Teil-)Kalibrierung im Rahmen einer Messstrategie verwendet werden.*

Hierfür wird in einem ersten Schritt das betriebsbedingte Systemverhalten analysiert und die partielle Selbst-Kalibrierung als geeignetes Werkzeug zur Kompensation betriebsbedingter Einflüsse evaluiert. Die Modellgüte als Maß für die Übereinstimmung von Modell und Realsystem bildet darüber hinaus die Grundlage für eine iterative Überprüfung des Modells und wird zusammen mit der Kompensation im Rahmen der Messstrategie in den Ablauf eines Messprozesses integriert. Eine Gültigkeitsbetrachtung überprüft am Ende des Kapitels die Hypothese.

## 6.1 Kompensation betriebsbedingter Einflüsse

Wie bereits im Stand der Forschung (Kapitel 2) und in der Gültigkeitsbetrachtung des Modells (Abschnitt 4.4) dargelegt weisen Robotersysteme ein betriebs- und umgebungsabhängiges Verhalten auf. Eine Modellierung unter Berücksichtigung des nicht-statischen Verhaltens in einer roboterunabhängigen Form ist jedoch nicht ohne eine deutliche Komplexitätserhöhung möglich und wird daher nicht weiter verfolgt. Die Annahme eines statischen Modellverhaltens ist folglich zeitlich nur begrenzt gültig.

Eine Möglichkeit, die Gültigkeit über eine größere Zeitspanne aufrecht zu halten, besteht in der Durchführung einer regelmäßigen Kalibrierung (LUDWIG 2011, S. 152–153) des roboterbasierten Messsystems. Aufgrund der hierfür benötigten relativ hohen Anzahl an Kalibrierdaten in Abhängigkeit der Parameteranzahl verringert dies jedoch die nutzbare Zeit für Messvorgänge.

Im Rahmen der Kompensation betriebsbedingter Einflüsse werden daher zunächst betriebsrelevante Parameter identifiziert, um auf Basis einer partiellen Selbst-Kalibrierung die Gültigkeit des Modells während des Betriebs, bei reduziertem Aufwand zur Kalibrierdatenerfassung, zu gewährleisten.

### 6.1.1 Analyse des betriebsbedingten Systemverhaltens

#### **Nachweis betriebsbedingter Systemänderungen**

Der Ausgangspunkt zur Betrachtung des betriebsbedingten Systemverhaltens sei ein mittels externer Datenerfassung kalibriertes Robotermodell. Analog zur Gültigkeitsbetrachtung des Robotermodells werden randomisierte TCP-Positionen in einem spezifizierten Erfassungsvolumen angefahren und mittels eines Lasertrackers erfasst. Hierbei werden die Roboterkonfigurationen so gewählt, dass die Einhaltung einer Sichtlinie zwischen Lasertracker und dem am TCP befestigten Reflektor gewährleistet ist. Für jede Roboterkonfiguration werden die Position des Reflektors im Lasertrackerkoordinatensystem, die aktuelle Achswinkelkonfiguration und die aktuellen sowie vorherigen Motorwinkel gespeichert.

Um betriebsbedingte Änderungen feststellen zu können, wird die Datenerfassung im Kaltzustand des Roboters begonnen und mit konstanten Achswinkelbeschleunigungen und Achswinkelgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Analyse erfolgte hierbei exemplarisch für den Roboter *KR 90 R3100 extra HA* unter Verwendung eines Lasertrackers *LTD500* der Firma *Leica Geosystems AG*.

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Gültigkeitsbetrachtung des Robotermodells werden die ersten 200 erfassten Roboterkonfigurationen zur Parameteridentifikation verwendet. Die nachfolgend erfassten, unabhängigen Daten werden anhand des Vergleichs von berechneter und gemessener TCP-Position zur Bestimmung der zeitlichen Änderung in der Verteilung der Abweichungen herangezogen.

Abbildung 6.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Verteilungen der Abweichungen, repräsentiert durch deren Box-Whisker-Plot-Darstellung. Jede Verteilung ist hierbei auf Basis von  $m = 50$  Roboterkonfigurationen ermittelt und dem Zeitpunkt der ersten erfassten Roboterkonfiguration zugeordnet. Der Zeitpunkt Null entspricht dem Beginn der Datenerfassung im Kaltzustand.

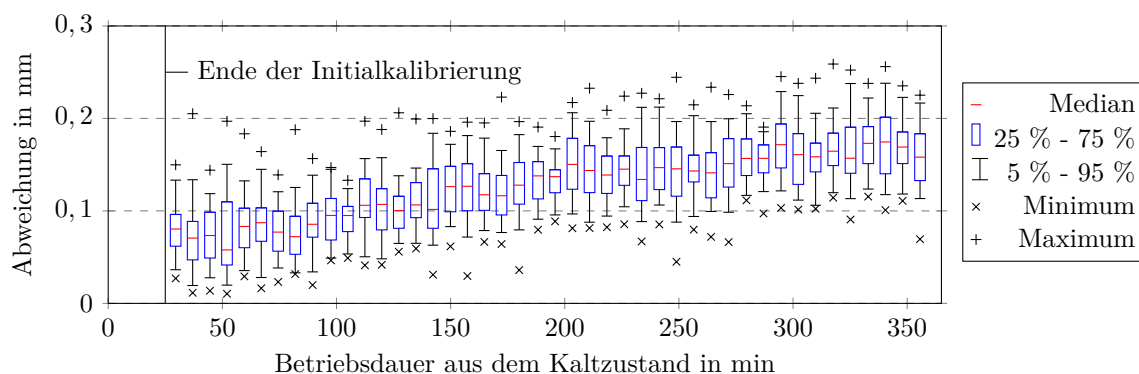


Abbildung 6.1: Zeitliche Gültigkeit des Modells bei einer Kalibrierung aus dem Kaltzustand für einen Roboter *KR 90 R3100 extra HA*: Parameteridentifikation auf Basis von  $m = 200$  mit Hilfe eines Lasertrackers (*LTD500* von *Leica Geosystems AG*) erfassten Roboterkonfigurationen mit nachfolgender Validierung des Modells mit jeweils 50 Roboterkonfigurationen.

Es ist eine Zunahme der Abweichungen über die Betriebsdauer feststellbar, wobei deren Steigung abnimmt. Dies bedeutet insbesondere, dass die Übereinstimmung

von Modell und Realsystem ausgehend vom kalibrierten Zustand abnimmt und für eine lange Betriebsdauer (Warmzustand) näherungsweise konstant wird. Dies steht in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von WIEST (2001, S. 82) und GRÄSER (1999, S. 71).

Die Modellierung ist hierbei quasi-statisch<sup>61</sup> und beschreibt das Realsystem nach der Parameteridentifikation hinreichend genau. Folglich gilt es, relevante Parameter während des Betriebs zur Kompensation betriebsbedingter Einflüsse zu adaptieren.

## Parameterklassifikation

Ein quasi-statischer Zustand eines roboterbasierten Messsystems ist eindeutig durch das Parameterset definiert. Aufgrund der mathematisch-physikalischen Modellierung korrelieren die einzelnen Parameter mit den im Rahmen der Analyse (vgl. Abschnitt 4.1) identifizierten Einflussgrößen. Folglich spiegelt sich die betriebsbedingte Änderung des Systemverhaltens in den ursächlichen Parametern wider. Diese Parameter sind eine Teilmenge der Modellparameter  $\vec{p} = (p_1 \dots p_N)^T$  und werden durch den Betrieb beeinflusst. Ein Parameter ist betriebsabhängig, wenn Gleichung 6.1 erfüllt ist.

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} \neq 0 \quad \text{für } i \in [1 \dots N] \quad (6.1)$$

Insbesondere gilt daher, dass nach einer initialen Parameteridentifikation zum Zeitpunkt  $t = 0$  das Minimierungsproblem zu einem späteren Zeitpunkt  $t$  nur durch Anpassung der betriebsabhängigen Parameter  $\vec{p}_t$  gelöst werden kann. Sei  $R$  die Zielfunktion des quasi-statischen Modells und  $\vec{p}_0^*$  die zum Zeitpunkt  $t = 0$  initial identifizierten Parameter, so ist eine vollständige Parameteridentifikation zu einem späteren Zeitpunkt  $t > 0$  gleichbedeutend mit einer Parameteridentifikation der betriebsabhängigen Parameter  $\vec{p}_t$  unter Berücksichtigung der initialen Parameter  $\vec{p}_0^*$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  (Gleichung 6.2).

---

<sup>61</sup>Ein quasi-statisches Verhalten liegt vor, sofern die Änderung des Systemverhaltens zeitlich deutlich langsamer als der eigentlich betrachtete Prozess stattfindet.

$$\min_{\vec{p}_t} (R'(\vec{p}_0^* + \vec{p}_t)) = \min_{\vec{p}} (R'(\vec{p})) \quad \text{für } t > 0 \quad (6.2)$$

Diese Tatsache ermöglicht die Identifikation betriebsabhängiger Parameter durch Vergleich der Übereinstimmung der Modellgüte bei partieller und vollständiger Parameteridentifikation über einen Testzeitraum. Diese Methode wird im nachfolgenden Abschnitt für unterschiedliche Teilmengen der Modellparameter angewendet.

### Identifikation betriebsabhängiger Parameter

Durch Modifikation der Parameteridentifikation kann das Optimierungsproblem auf die Suche nach einer Lösung auf Basis einer Teilmenge an Parametern angepasst werden.

Abbildung 6.2 zeigt die Verteilung der Abweichungen nach einer Parameteridentifikation mit einer Teilmenge an Parametern zu unterschiedlichen Zeitpunkten, wobei eine vollständige Parameteridentifikation zur Erzeugung eines initialen Parametersatzes durchgeführt wurde. Darüber hinaus sind die zeitlichen Verteilungen der Abweichungen der vollständigen Parameteridentifikation als Referenz visualisiert.

Die partielle, kontinuierliche Parameteridentifikation über die Betriebsdauer zeigt, dass die Anpassung der Parameter der Robotergeometrie zu einer nahezu vollständigen Kompensation der betriebsbedingten Systemänderungen führt. Die anderen Teilmengen an Parametern erfüllen die Gleichung 6.2 nicht und umfassen daher nicht die betriebsabhängigen Parameter.

Werden jeweils unterschiedliche Teilmengen an Parametern und deren Kombinationen sowie die Veränderung der Parameterwerte über die Betriebsdauer betrachtet, können die betriebsabhängigen Parameter identifiziert werden.

Zusammenfassend können nach einer initialen Kalibrierung die betriebsbedingten Systemänderungen durch eine partielle Parameteridentifikation kompensiert werden. Insbesondere sind hierfür aufgrund der deutlich geringeren Anzahl an Parametern weniger Kalibrierdaten notwendig.

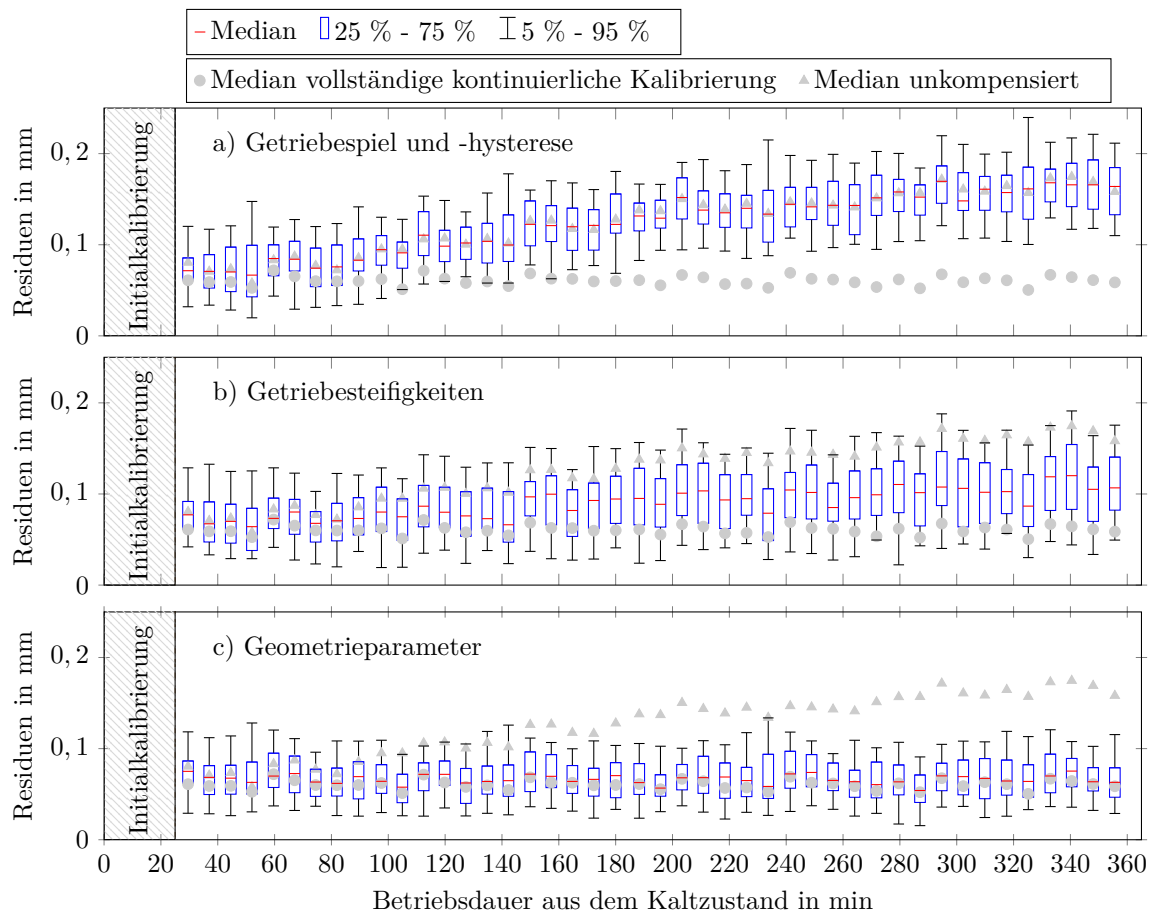


Abbildung 6.2: Zeitliche Entwicklung der Residuenverteilungen für eine partielle, klassenspezifische Parameteridentifikation (Basis von jeweils  $m = 50$  Roboterkonfigurationen nach einer Initialkalibrierung) am Beispiel eines KR 90 R3100 extra HA: a) partielle Parameteridentifikation von Getriebeispiel und -hysterese, b) partielle Parameteridentifikation der Getriebebesteifigkeiten, c) partielle Parameteridentifikation der Geometrieparameter der kinematischen Kette.

### 6.1.2 Selbst-Kompensation

#### **Anforderungen an eine automatisierte Kompensation**

Aus Anwendungssicht gilt es, die Dauer der Nutzung des roboterbasierten Messsystems zur geometrischen Prüfung bei gleichzeitiger Gewährleistung der Genauigkeitsanforderungen möglichst zu erhöhen. Hieraus folgt die Anforderung, dass die Modellparameter während des Betriebs angepasst werden müssen. Die Identifikation von Änderungen der Parameter erfolgt hierbei auf Basis von am Realsystem erfassten Daten, wobei die benötigte Dauer der Datenerfassung minimal sein soll.

#### **Datenaufnahme und partielle Parameteridentifikation**

Aufgrund der Tatsache, dass nach einer initialen, vollständigen Parameteridentifikation lediglich eine Teilmenge der Parameter einer betriebsabhängigen Änderung unterliegt, entspricht die Selbst-Kompensation einer partiellen Selbst-Kalibrierung.

Hierdurch sind zum einen die Fähigkeit des Systems zur Aufrechterhaltung der Genauigkeit und zum anderen die Anforderung nach reduziertem Aufwand zur Kalibrierdatenerfassung während des Betriebs berücksichtigt.

Analog zur Vorgehensweise bei der Selbst-Kalibrierung werden mögliche Kalibrierkonfigurationen erzeugt, geeignete Kalibrierkonfigurationen zur Maximierung der Beobachtbarkeit der betriebsabhängigen Parameter ausgewählt und ein kollisionsfreier Programmablauf erzeugt. Auf Basis des ausführbaren Programmablaufs können die Kalibrierdaten automatisiert erfasst und gespeichert werden.

Durch eine partielle Parameteridentifikation, welche lediglich die betriebsabhängigen Parameter berücksichtigt, kann das Modell an den aktuellen Systemzustand angeglichen werden. Als initiale Parameter dienen hierbei die im Rahmen der vollständigen Selbst-Kalibrierung identifizierten Parameterwerte.

## 6.2 Integration in eine Messstrategie

Das Ziel einer Messstrategie besteht in der Reduktion des Aufwandes für den Anwender bei der Durchführung einer spezifizierten Messaufgabe. Hierbei gilt es, insbesondere die Gültigkeit des Modells über den Betrieb zu gewährleisten und die Durchführung des Messprozesses zu unterstützen. Abbildung 6.3 stellt schematisch die Messstrategie mit den wesentlichen Bestandteilen dar.

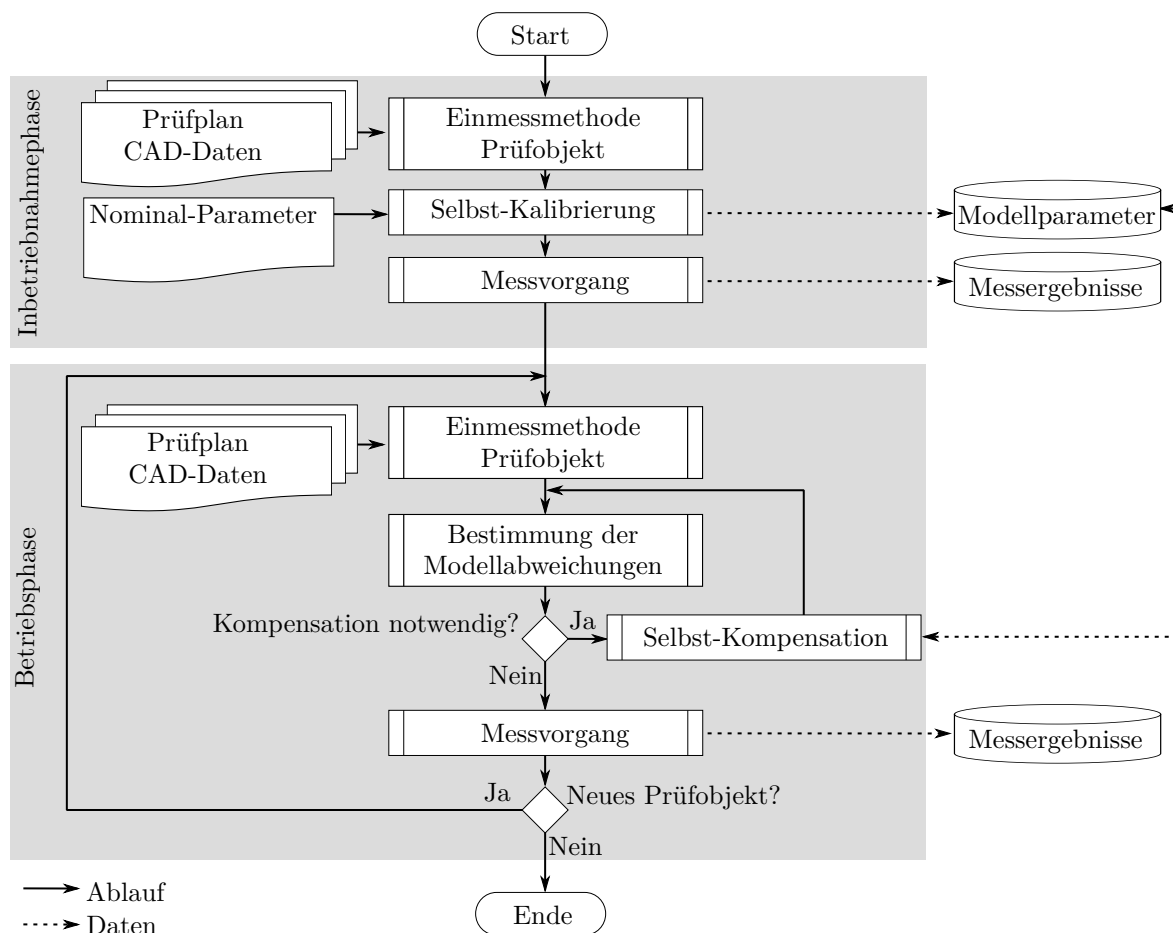


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung der Messstrategie: Flussdiagramm mit Unterteilung in Inbetriebnahme- und Betriebsphase.

Ausgehend von einer spezifizierten Messaufgabe, welche durch einen Prüfplan und den CAD-Daten des Bauteils sowie der Bauteilhalterung definiert ist, wird zunächst die geometrische Simulation erzeugt. Hierbei wird die Position und Orientierung des Prüfobjektes zunächst durch den Anwender näherungsweise vorgegeben und im Rahmen einer Einmessmethode (vgl. Abschnitt A.7.1 im

Anhang) adaptiert. Die resultierende geometrische Simulation dient als Grundlage für die kollisionsfreie Bahnplanung.

Bei Inbetriebnahme des Systems wird nachfolgend die initiale Selbst-Kalibrierung durchgeführt, wobei die Verteilung des Streumaßes als Referenz für die systembedingt erreichbare Genauigkeit dient.

Die Durchführung eines Messvorgangs (vgl. Abschnitt 6.2.3) beinhaltet die Erzeugung eines ausführbaren Programmablaufs, dessen Ausführung sowie die Auswertung der Messergebnisse. Hierbei können Teilfunktionen der Selbst-Kalibrierung (Generierung von Messkonfigurationen und Bahnplanung) verwendet werden.

Aufgrund der Annahme eines quasi-statischen Modellverhaltens ist die zeitliche Gültigkeit eines im Rahmen der Kalibrierung parametrisierten Modells begrenzt (vgl. hierzu Abschnitt 4.4.4 und Abschnitt 6.1.1). Durch die iterative Überprüfung der Modellabweichungen (Abschnitt 6.2.1) innerhalb der Messstrategie kann, unabhängig vom Erfahrungswissen des Anwenders, eine Anpassung des Modells durch Kompensation der betriebsbedingten Einflüsse erfolgen. Diese wiederum kann als partielle Selbst-Kalibrierung aufgefasst werden (Abschnitt 6.2.2).

### 6.2.1 Bestimmung der aktuellen Modellabweichung

Ein wesentlicher Bestandteil in der Betriebsphase des roboterbasierten Messsystems ist die Überprüfung der aktuellen Modellgültigkeit. Diese bildet die Entscheidungsgrundlage, ob eine Kompensation der betriebsabhängigen Systemveränderungen erfolgen muss.

Analog zur Zielgröße der Selbst-Kalibrierung spiegelt die Streuung eines mehrfach gemessenen, charakteristischen Merkmalsvektors die Übereinstimmung von Modell und Realsystem wider. Die Verteilung der Abweichungen kann hierbei mit Hilfe der Zielfunktion auf Basis der aktuellen Modellparameter berechnet werden.

Abbildung 6.4 illustriert den Ablauf zur Bestimmung der aktuellen Modellabweichung.

Der Ablauf orientiert sich hierbei stark an der Vorgehensweise der Selbst-Kalibrierung, wobei die Verteilung der Abweichungen auf Basis einer kleinen

Datenstichprobe bestimmt wird. Dies ist insbesondere für eine schnelle Bestimmung der Modellabweichung sinnvoll und möglich, da auf Basis dieser Daten keine Parameteridentifikation erfolgt.

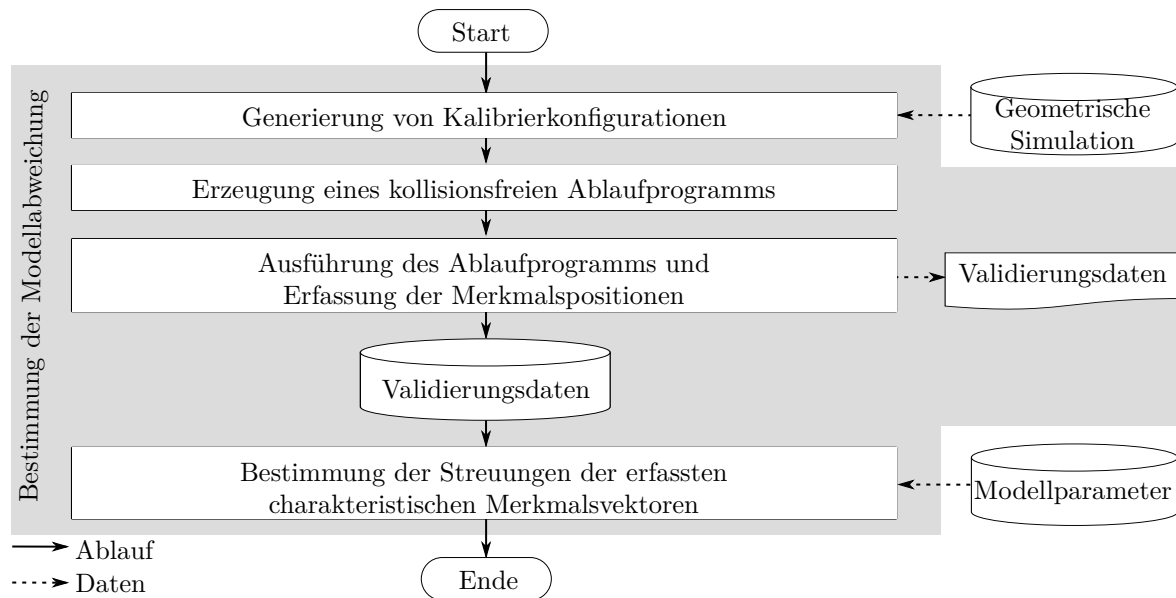


Abbildung 6.4: Flussdiagramm zur Bestimmung der Modellabweichungen.

Als Entscheidungsgröße für die Ausführung der Kompensation kann beispielsweise der Median der Streuung eines Merkmalsvektors gewählt werden.

### 6.2.2 Selbst-Kalibrierung und Selbst-Kompensation

Die Prozesse der Selbst-Kalibrierung und Selbst-Kompensation basieren beide auf der Erfassung von Daten am Realsystem, deren interner Verarbeitung mit Hilfe des aktuellen Modells sowie der Identifikation von Parametern auf Basis dieser Daten. Der maßgebliche Unterschied dieser Prozesse sind die im Rahmen der Parameteridentifikation betrachteten Modellparameter. Hieraus resultieren auch unterschiedliche Anforderungen an die Anzahl zu erfassender Daten. So muss bei der Selbst-Kalibrierung für die Erzeugung eines überbestimmten Gleichungssystems eine größere Anzahl an Kalibrierkonfigurationen erfasst werden als bei der Selbst-Kompensation.

Abbildung 6.5 illustriert den Ablauf der Selbst-Kalibrierung und Selbst-Kompensation mit den gemeinsam genutzten Teilfunktionen.

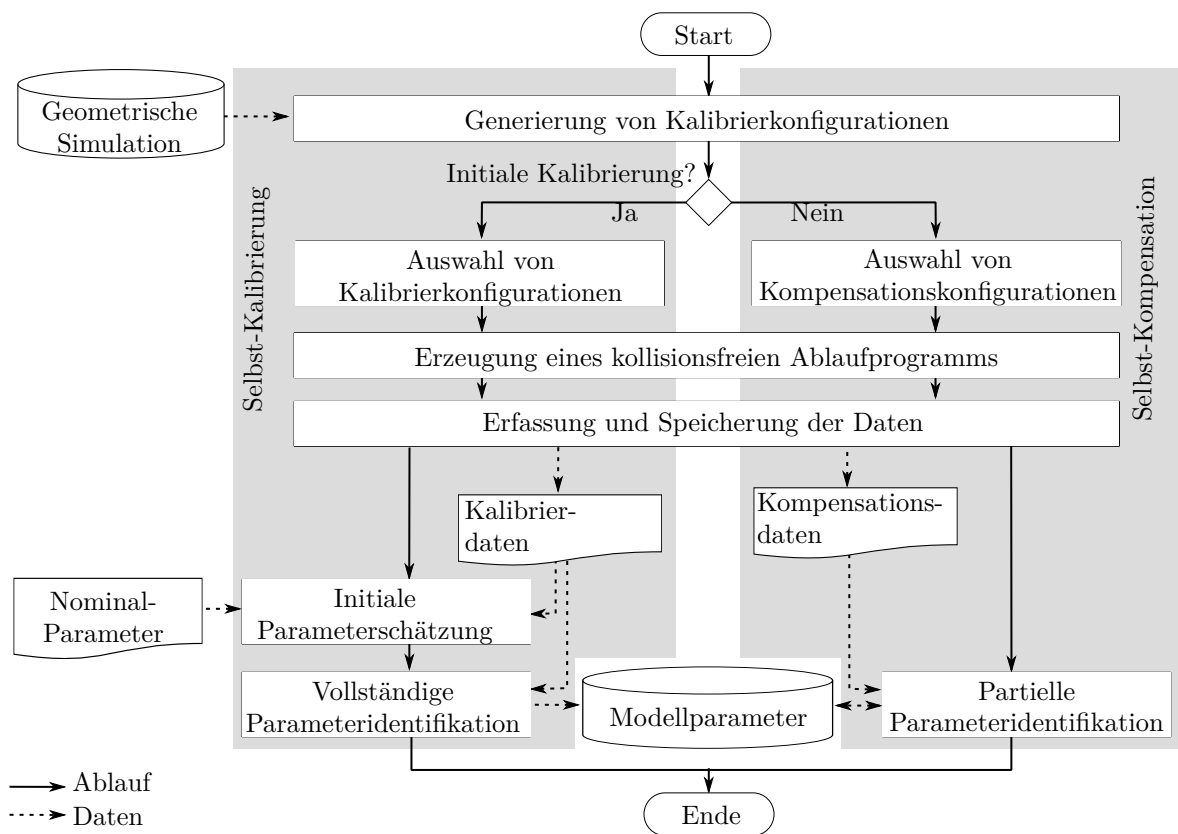


Abbildung 6.5: Flussdiagramm der Selbst-Kalibrierung und Selbst-Kompensation.

Das wesentliche Ergebnis beider Prozesse sind angepasste Modellparameter, welche eine höhere Übereinstimmung von Modell und Realsystem adressieren.

### 6.2.3 Messprozess

Das Ziel des Messprozesses ist die Quantifizierung von geometrischen Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Gestalt eines Prüfobjektes. Hierfür müssen die an Prüfmerkmalen erfassten Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt, ausgewertet und mit der Soll-Gestalt verglichen werden.

Abbildung 6.6 zeigt den schematischen Ablauf eines Messprozesses. Hierbei kann der ausführbare Programmablauf entweder in Form einer Datei bereitgestellt oder auf Basis der geometrischen Simulation und den hierin enthaltenen Prüfmerkmalen erzeugt werden. Bei der automatisierten Erzeugung des Programmablaufs wird

analog zur Kalibrierdatenerfassung verfahren, wobei jedoch lediglich eine Messkonfiguration je Merkmal verwendet wird<sup>62</sup>. Unter Verwendung des parametrisierten Modells wird jede Punktwolke in das gemeinsame Bezugskoordinatensystem überführt. Die registrierten Punktwolken können nachfolgend in eine Datei exportiert oder in einem externen Programm zur Auswertung weiterverarbeitet werden.

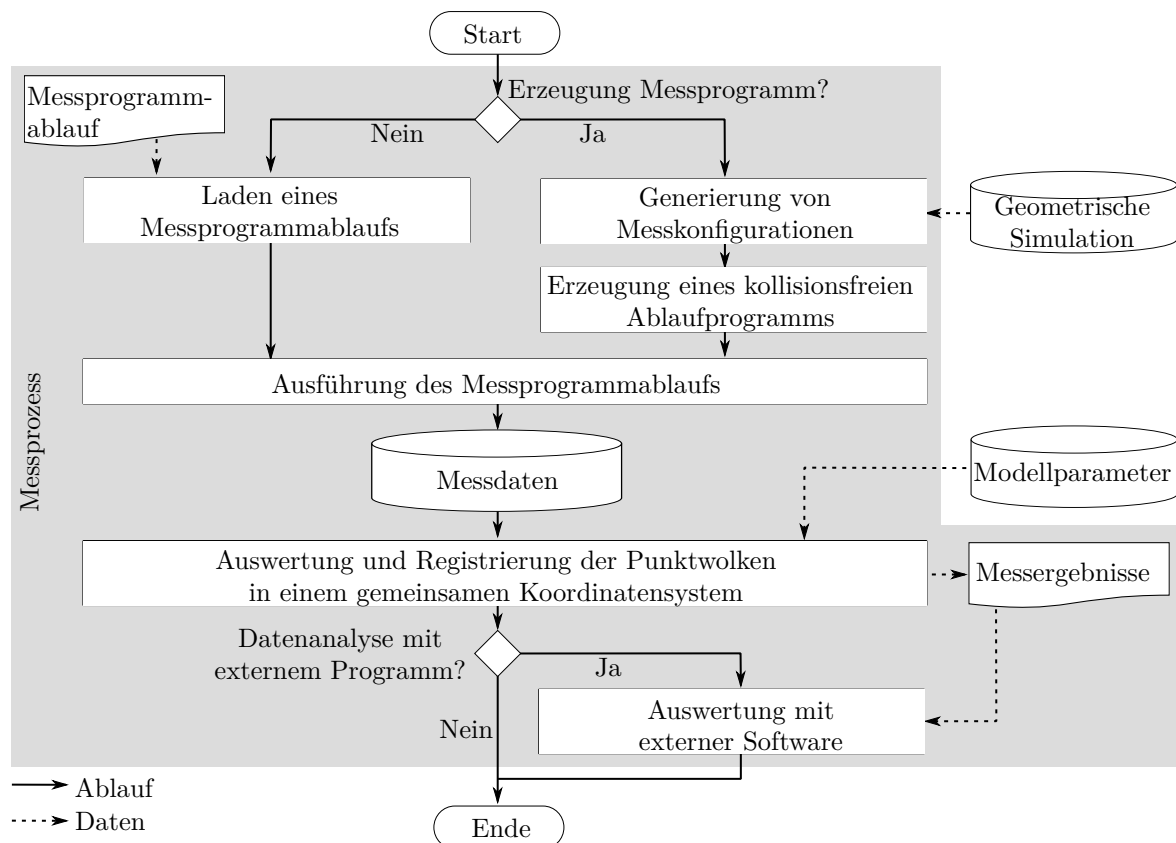


Abbildung 6.6: Flussdiagramm des Messprozesses und Auswertung der Ergebnisse.

Zusammenfassend lässt sich auf Grundlage des kalibrierten, roboterbasierten Messsystems eine registrierte Punktwolke der Prüfobjektoberfläche erfassen und mit etablierten Prozessen weiterverarbeiten.

<sup>62</sup>Hierbei hat die Auswahl der Messkonfiguration Einfluss auf die Genauigkeit. Die Möglichkeit der Optimierung von Roboterkonfigurationen im Hinblick auf genauigkeitsrelevante Einflussgrößen wird beispielsweise von SCHNEIDER et al. (2015) betrachtet.

## 6.3 Gültigkeitsbetrachtung der Kompensation

### 6.3.1 Abhängigkeit zur Anzahl an Roboterkonfigurationen

Analog zur Parameteridentifikation im Rahmen der Kalibrierung muss die Anzahl der für die Kompensation verwendeten Roboterkonfigurationen ein Vielfaches der Anzahl an betrachteten Parametern sein. In Abschnitt 6.1.1 wurden insbesondere die geometrischen Größen der Roboterkinematik als wesentliche betriebsabhängige Parameter identifiziert.

Zur Untersuchung der Gültigkeit der Kompensation wurde zunächst ein Roboter vom Typ *KR 90 R3100 extra HA* des Herstellers *KUKA Roboter GmbH* initial im Kaltzustand gemäß der Methode zur Gültigkeitsbetrachtung des Robotermodells mit Hilfe eines Lasertrackers *LTD500* der Firma *Leica Geosystems AG* kalibriert. Nachfolgend wurde durch die wiederholte Ausführung eines Bewegungsablaufs der Betrieb des Robotersystems über eine Dauer von etwa einer Stunde nachempfunden. Um die notwendige Anzahl an Roboterkonfigurationen für die Kompensation abzuschätzen, wurden in diesem Systemzustand wiederum randomisierte Roboterkonfigurationen erfasst.

Abbildung 6.7 zeigt die Verteilungen der Abweichungen nach der Kompensation in Abhängigkeit der zur partiellen Parameteridentifikation verwendeten Anzahl an Roboterkonfigurationen.

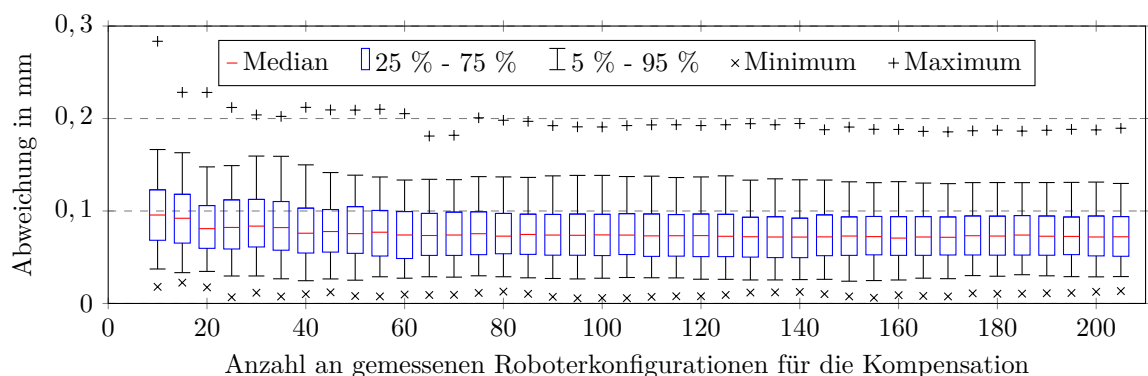


Abbildung 6.7: Verteilung der Abweichungen bezogen auf ein Validierungsdatensatz mit 100 Roboterkonfigurationen in Abhängigkeit der Anzahl zur Kompensation verwendeten Roboterkonfigurationen.

Auffällig im Vergleich zur Betrachtung der vollständigen Parameteridentifikation ist die Tatsache, dass für die Minimierung der Residuen lediglich ein Bruchteil an Roboterkonfigurationen notwendig ist. Hierdurch wird die benötigte Zeit zur Steigerung der Genauigkeit im Vergleich zur wiederholten vollständigen Kalibrierung deutlich gesenkt.

#### 6.3.2 Kompensation während des Aufwärmbetriebs

Zur Betrachtung der Gültigkeit der Kompensation während der Aufwärmphase eines Roboters wurden nach der initialen Kalibrierung über einen Zeitraum von etwa sechs Stunden kontinuierlich randomisierte Roboterkonfigurationen mit Hilfe des Lasertrackers *LTD500* erfasst. Die Gültigkeitsbetrachtung wurde exemplarisch für den Roboter *KR 90 R3100 extra HA* von *KUKA Roboter GmbH* durchgeführt.

Abbildung 6.8 a) zeigt die zeitliche Entwicklung des Medianes der Abweichungen für die Initialkalibrierung und die Kompensationszyklen nach jeweils 100 min, 165 min und 245 min. Hierbei wurden für jeden Kompensationszyklus jeweils 50 Konfigurationen verwendet.

Mit zunehmender Betriebsdauer nähert sich das System dem Warmzustand und die Änderungsrate der Residuenverteilungen reduziert sich. Insbesondere kann hierdurch die Nutzungsdauer eines roboterbasierten Messsystems im Warmzustand erhöht werden, da die Kompensation seltener notwendig ist.

Wird das Modell jeweils auf Basis der Kompensationszyklen adaptiert, wird eine über den Betrieb nahezu gleichbleibende Genauigkeit erreicht (Abbildung 6.8 b).

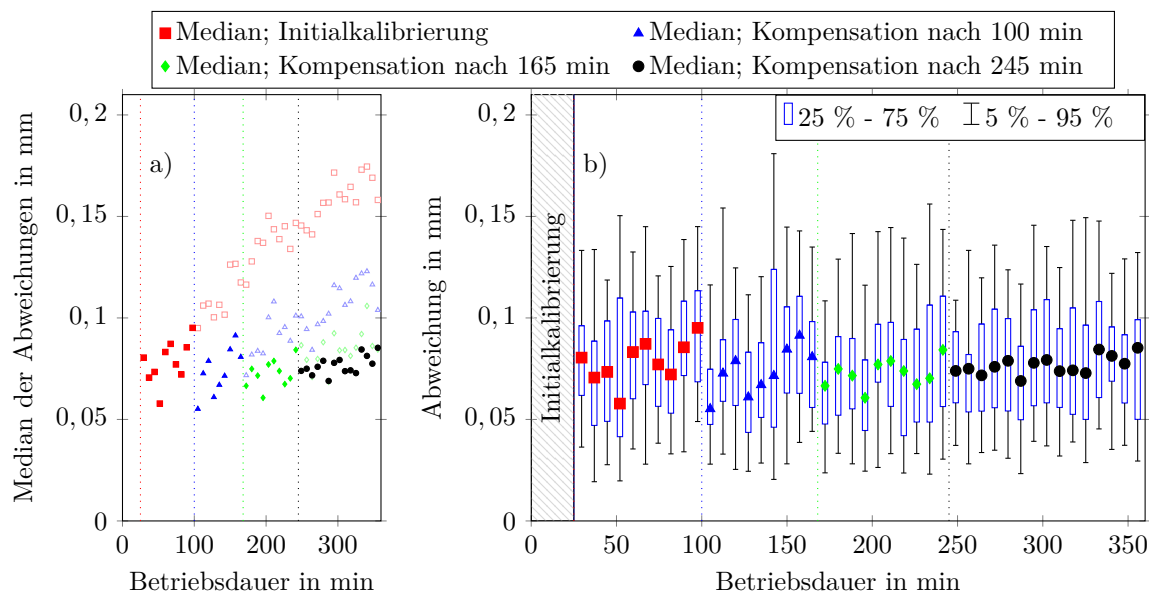


Abbildung 6.8: Kompensation während der Betriebsphase ausgehend vom Kaltzustand am Beispiel eines KR 90 R3100 extra HA: a) Zeitliche Entwicklung des Medianes der Abweichungen für die Initialkalibrierung und Kompensationszyklen nach jeweils 100 min, 165 min und 245 min, b) Resultierende Verteilung der Abweichungen während der Betriebsphase bei Kompensationszyklen (jeweils mit 50 Roboterkonfigurationen) nach Betriebsdauern von 100 min, 165 min und 245 min.

### 6.3.3 Fazit und Überprüfung der Hypothese

Zusammenfassend können durch eine partielle Selbst-Kalibrierung die betriebsbedingten Systemänderungen kompensiert werden. Insbesondere sind die Parameter der Robotergeometrie betriebsabhängig. Durch die Einschränkung der betrachteten Parameter im Rahmen der Kompensation sind weniger Roboterkonfigurationen zu erfassen, was im Vergleich zur wiederholten vollständigen Kalibrierung zu einer Erhöhung der Nutzungsdauer des roboterbasierten Messsystems führt. Die Integration der Bestandteile zur Befähigung roboterbasierter Messsysteme hinsichtlich der Genauigkeit in eine Messstrategie erlaubt darüber hinaus einen anwendungsorientierten Einsatz.



## 7 Validierung und Evaluation

### 7.1 Prototypische Implementierung

Um die Einsatzeignung der Selbst-Kalibrierung roboterbasierter Koordinatenmesssysteme zu zeigen, wird ein solches System aufgebaut und die Methoden zur Selbst-Kalibrierung softwaretechnisch implementiert. Die Validierung erfolgt anschließend auf Basis dieser Implementierung anhand eines mittels KMG referenzierten Prüfobjekts sowie eines Karosserieteils aus der Automobilindustrie (Autotür).

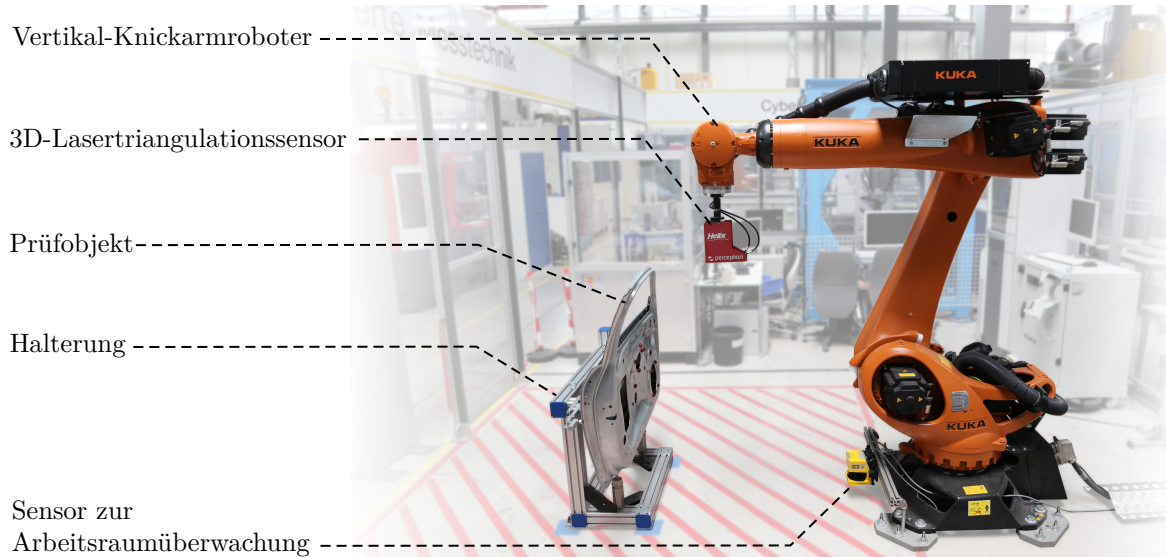
#### 7.1.1 Hardwaretechnische Realisierung

Insbesondere um die Realisierbarkeit der Selbst-Kalibrierung für roboterbasierte Messsysteme in einem industriell relevanten Maßstab zu überprüfen, werden kommerziell erhältliche Komponenten mit entsprechenden Kenngrößen gewählt.

Der Industrieroboter *KR 90 R3100 extra HA* der Firma *KUKA Roboter GmbH* besitzt hierbei einen für den adressierten Anwendungsfall relevanten Arbeitsraum, welcher die Messung großvolumiger Prüfobjekte gewährleistet. Der verwendete Lasertriangulationssensor *Helix HDR/H0200* der Firma *Perceptron Inc.* ermöglicht die Erfassung von hochauflösenden Punktwolken ohne Vorbehandlung der Prüfobjektoberfläche.

Zur Absicherung der Roboterzelle wird der Sicherheits-Laserscanner *ROTO-SCAN RS4-4E* der Firma *Leuze electronics GmbH + Co. KG* am Fuß des Roboters befestigt und mittels einer Sicherheits-Speicherprogrammierbare-Steuerung (Sicherheits-SPS) der *Siemens AG* mit der Robotersteuerung verbunden. Der

Zugang zur Roboterzelle wird durch Absperrungen reglementiert und die Gefahrenbereiche werden darüber hinaus durch Bodenmarkierungen gekennzeichnet. Abbildung 7.1 zeigt das roboterbasierte Messsystem mit Prüfobjekt (Autotür).



*Abbildung 7.1: Prototypischer Versuchsaufbau eines roboterbasierten Koordinatenmesssystems mit Prüfobjekt.*

Außerhalb der Roboterzelle befindet sich ein Computer zur Steuerung von Roboter und Sensorsystem. Zur Auswertung der vom Sensor erfassten Punktwolken wird ein separater Computer verwendet. Die Kommunikation zwischen den Computern und der Robotersteuerung erfolgt über ein gemeinsames Ethernet-Netzwerk.

## 7.1.2 Softwaretechnische Realisierung

Die Realisierung der Software erfolgt nach dem Modularitätsprinzip und wird objektorientiert umgesetzt. Abbildung 7.2 stellt schematisch die Gesamtarchitektur der Software dar.

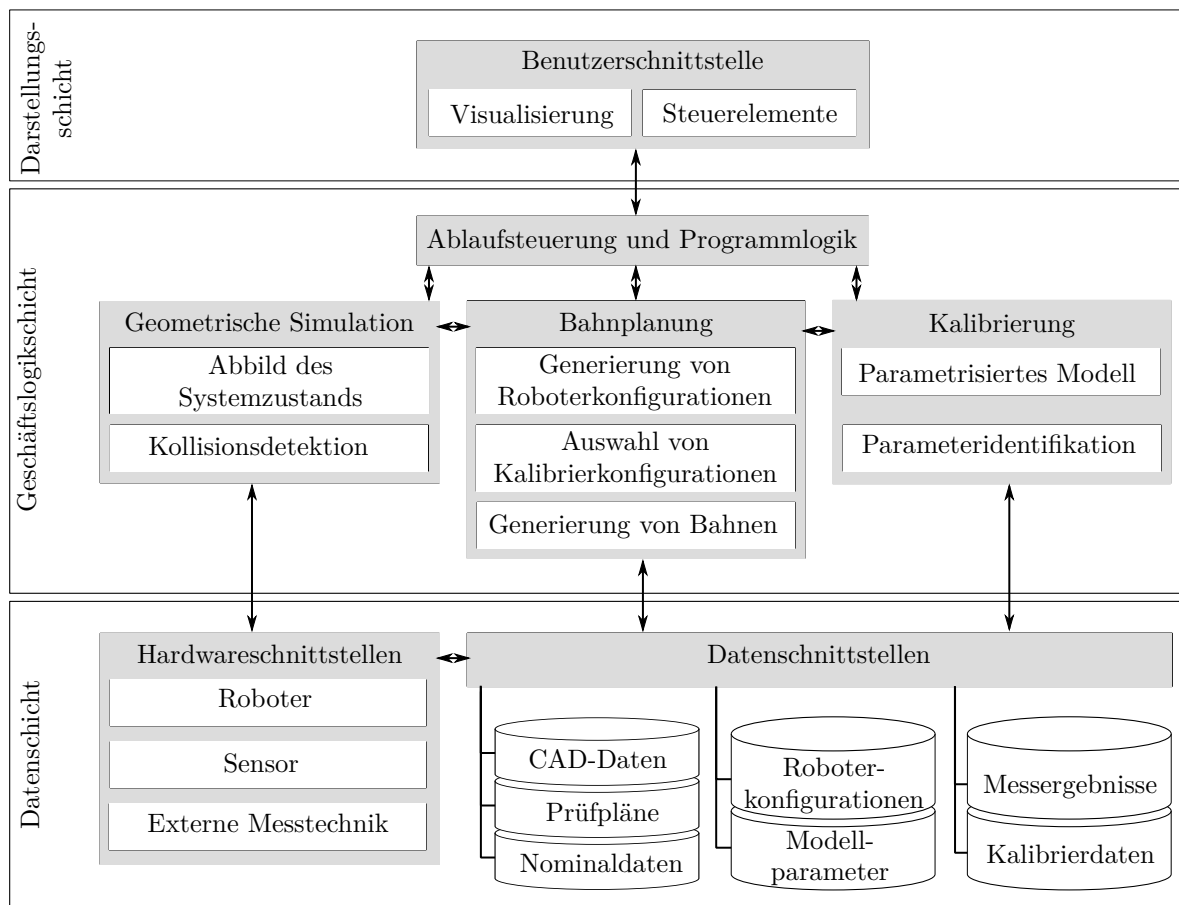


Abbildung 7.2: Gesamtarchitektur der Softwareimplementierung und die wesentlichen Softwaremodule untergliedert nach der zugrunde liegenden Schichtenarchitektur.

Die Darstellungsschicht bildet hierbei die Schnittstelle zum Anwender. Die graphische Benutzeroberfläche ist in Abbildung 7.3 dargestellt und gliedert sich in die Bereiche zur Steuerung und Überwachung des roboterbasierten Messsystems.

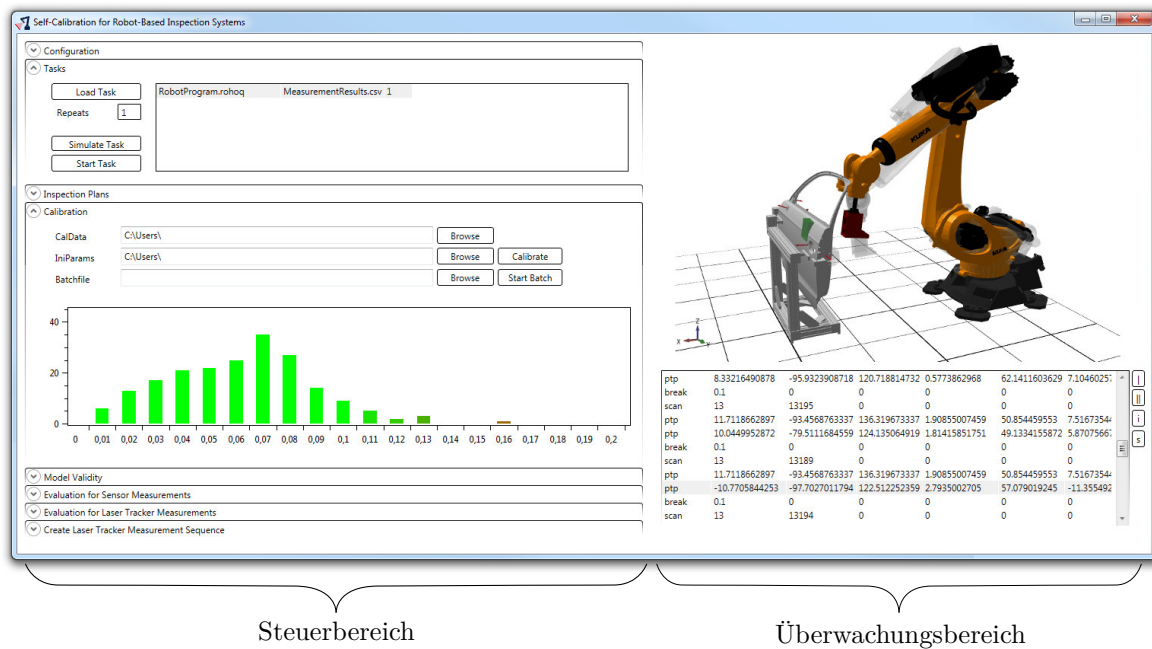


Abbildung 7.3: Darstellung der Benutzeroberfläche zur Steuerung und Überwachung des roboterbasierten Messsystems.

Innerhalb der Geschäftslogikschicht werden die softwaretechnischen Abläufe und die Programmlogik abgebildet. Die funktionalen Bestandteile werden in Form von austauschbaren und erweiterbaren Modulen realisiert. In Abhängigkeit der softwaretechnischen Anforderungen sind diese als Klassen in C# beziehungsweise als dynamische Programmbibliothek („Dynamic Link Library“) (DLL) in C++ implementiert. Die zentrale Ablaufsteuerung ist hierbei in der Programmiersprache C# mit einer Schnittstelle zur graphischen Benutzeroberfläche umgesetzt. Module mit hohen Anforderungen an die Rechenleistung wie beispielsweise die Parameteridentifikation, die Auswahl von Kalibrierkonfigurationen und die Modellierung sind in C++ realisiert.

Die Datenschicht ermöglicht den Zugriff und die Verwaltung von Daten sowie die Kommunikation mit den Hardwarekomponenten. Insbesondere soll die Implementierung hierbei die Integration und Austauschbarkeit der Komponenten gewährleisten.

Details zur softwaretechnischen Umsetzung und zu den verwendeten Bibliotheken können dem Anhang A.8 entnommen werden.

## 7.2 Validierung der Selbst-Kalibrierung am Prüfobjekt

Im Rahmen der Validierung wird die Machbarkeit der Selbst-Kalibrierung aufgezeigt und die Erfüllung der Zielsetzung überprüft. Hierfür werden mit Hilfe der prototypischen Implementierung (Abschnitt 7.1) zwei Prüfobjekte untersucht.

### 7.2.1 Validierung am Referenzobjekt

#### Prüfobjekt

Das Referenzobjekt ist ein Artefakt zur Qualifizierung optischer Messsysteme, welches aus 35 gleichmäßig in einer Ebene verteilten Kugeln besteht. Die Kugelpositionen wurden mittels eines KMG<sup>63</sup> referenziert. Abbildung 7.4 a) zeigt das Referenzobjekt und die geometrische Anordnung der Kugelmerkmale. Das Referenzobjekt wurde hierbei, wie in Abbildung 7.4 b) schematisch dargestellt, mit den Kugeln in der horizontalen Ebene auf etwa 1,5 m Höhe im Arbeitsraum des roboterbasierten Messsystems positioniert.

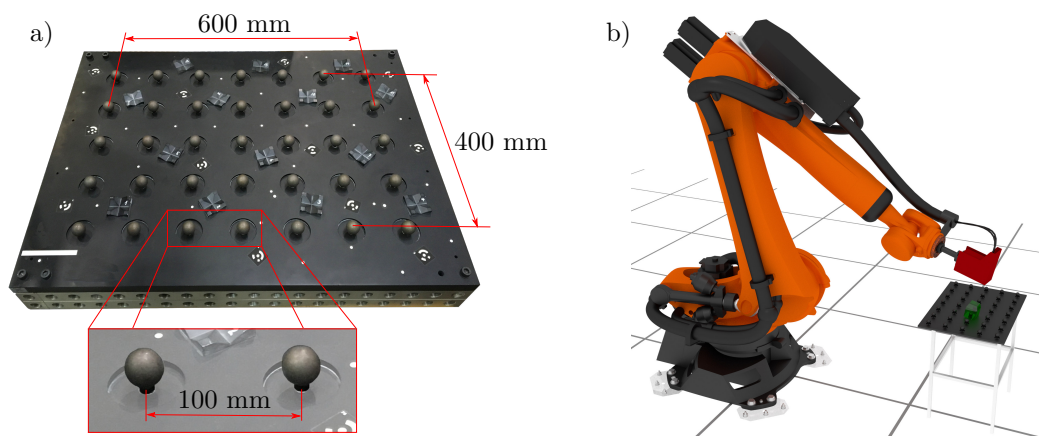


Abbildung 7.4: Validierung am Referenzobjekt: a) Referenzobjekt zur Qualifizierung optischer Messsysteme, b) Schematische Darstellung zur Positionierung des Referenzobjektes im Arbeitsraum des roboterbasierten Messsystems.

<sup>63</sup>Die Genauigkeit von kommerziellen KMG ist in der Größenordnung von  $50 \mu\text{m}$  bei einer Längenmessung von etwa 1 m (KEFERSTEIN & MARXER 2015, S. 75).

Gemäß der Messstrategie wurde in einem ersten Schritt das Prüfobjekt anhand dreier Kugeln eingemessen und die geometrische Simulation angepasst. Zur Validierung wurde ein CAD-Modell sowie ein Prüfplan, welcher die 35 Kugeln enthält, verwendet.

### **Selbst-Kalibrierung**

Als mögliche Kalibrierkonfigurationen wurden automatisiert 200 kollisionsfreie Konfigurationen je Kugel erzeugt. Für die initiale Selbst-Kalibrierung wurden 200 Konfigurationen automatisiert ausgewählt.

Auf Basis der automatisiert erzeugten Auswahl an Kalibrierkonfigurationen wurde ein kollisionsfreies Ablaufprogramm mit Parametrisierung des Sensors erzeugt und eine vollständige Parameteridentifikation durchgeführt.

### **Messergebnisse**

Nach der Selbst-Kalibrierung wurde auf Basis des Prüfplans und der geometrischen Simulation ein kollisionsfreies Ablaufprogramm zur Prüfung erstellt. Hierbei wurde für jede Kugel eine Messkonfiguration erzeugt, eine Punktwolke der Kugeloberfläche erfasst und deren Mittelpunkt ausgewertet.

Auf Basis des parametrisierten Modells, der Motorwinkel der jeweiligen Messkonfiguration sowie der vorherigen Motorwinkel werden hierbei alle Punktwolken und Mittelpunkte der Kugeln in einem gemeinsamen Bezugskoordinatensystem registriert. Um zusätzlich den Vergleich der Messgenauigkeit zum unkalibrierten roboterbasierten Messsystems zu realisieren, wurde die Registrierung der Punktwolken und Kugelmittelpunkte zusätzlich auf Basis des Nominal-Modells des Roboters durchgeführt.

Für die Auswertung und den Vergleich mit der KMG-Referenzmessung wurden die Messergebnisse zur Berichtsgenerierung in das Programm „PolyWorks“ importiert. Abbildung 7.5 zeigt die Abweichungen der Kugelmittelpunkte, ermittelt aus den achsausgerichteten Punktwolken gegenüber der KMG-Referenzmessung.

Zusätzlich ist in Abbildung 7.5 die Häufigkeitsverteilung der absoluten Abweichungen gegenüber der KMG-Referenzmessung für das unkalibrierte und kalibrierte roboterbasierte Messsystem dargestellt.

Durch die Selbst-Kalibrierung konnte die Messgenauigkeit des Gesamtsystems gegenüber dem unkalibrierten System um den Faktor 3 auf 0,15 mm ( $2\sigma$ ) in Bezug auf die KMG-Referenzmessung gesteigert werden.

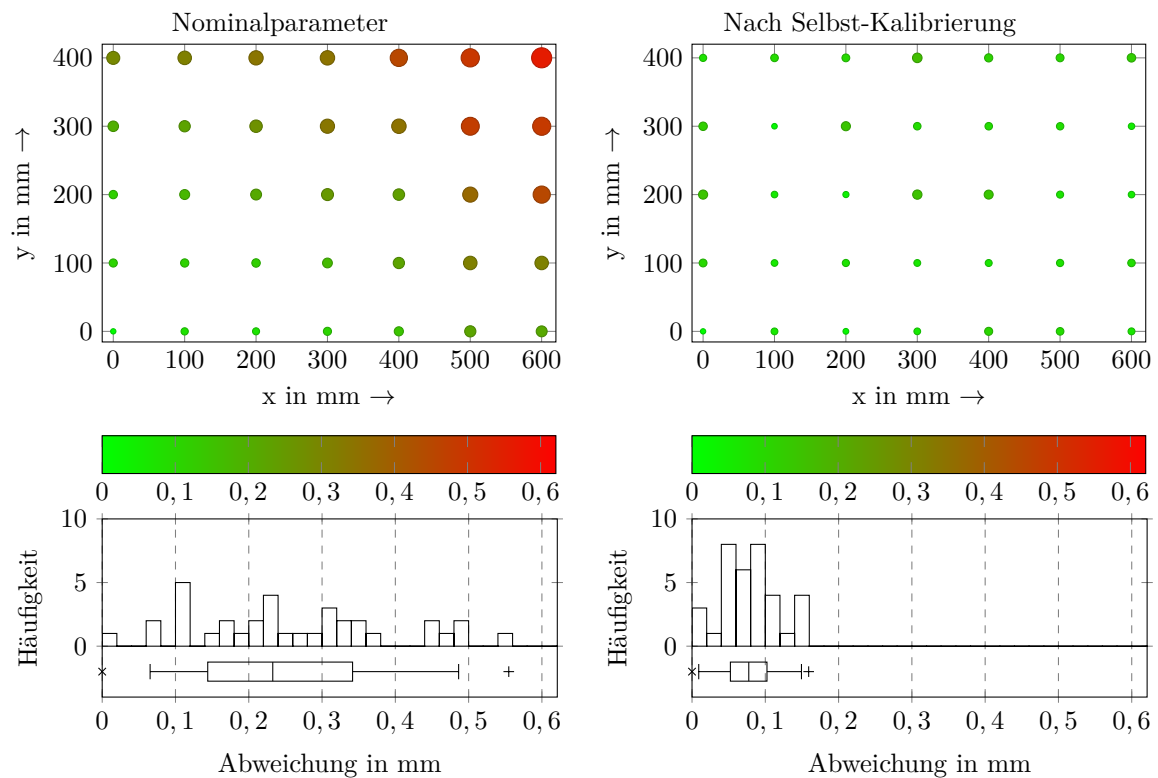


Abbildung 7.5: Messgenauigkeit (kartesische Abweichungen der Kugelmittelpunkte referenziert gegenüber der KMG-Messung) des roboterbasierten Messsystems am Referenzobjekt mit Nominalparametern (links) und nach der Selbst-Kalibrierung mit 300 Kalibrierkonfigurationen (rechts).

### 7.2.2 Prüfobjekt Autotür

#### Prüfobjekt

Zur Validierung der Selbst-Kalibrierung unter anwendungsrelevanten Bedingungen wird als zweites Prüfobjekt eine Tür einer Fahrzeugkarosserie betrachtet. Diese weist eine Vielzahl an unterschiedlichen Merkmalen auf, welche das typische Anwendungsspektrum der produktionsnahen Koordinatenmesstechnik repräsentieren. Abbildung 7.6 zeigt die verwendete Tür sowie die Merkmale. Gemäß der Anforderungen der Koordinatenmesstechnik aus der Automobilindustrie wird das Bauteil in Einbaulage gemessen.

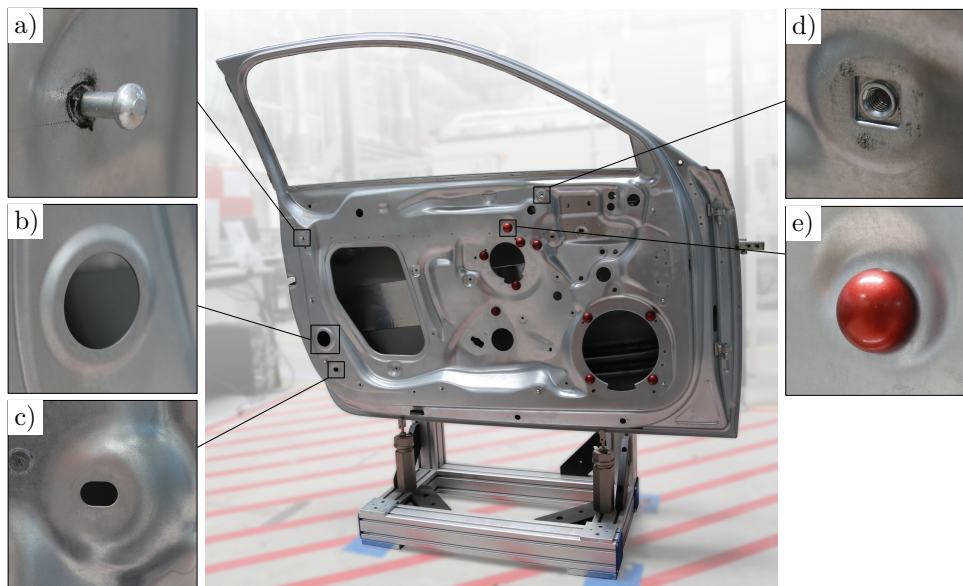


Abbildung 7.6: Prüfobjekt Autotür mit typischen Merkmalen: a) Bolzen, b) Bohrung, c) Langloch, d) Gewindebohrung, e) Messhilfsmittel für Gewindebohrung

#### Selbst-Kalibrierung

Zur Kalibrierdatenerfassung wurden Merkmale aus dem Prüfplan identifiziert, welche eine robuste sensorteknische Erfassung der Merkmalsvektoren ermöglichen. Auf Basis dieser Merkmale wurden geeignete Kalibrierkonfigurationen erzeugt. Die Auswahl der Kalibrierkonfigurationen erfolgte anhand des Beobachtbarkeitsindex.

Die Parameteridentifikation wurde auf Basis von  $m = 200$  Kalibrierkonfigurationen durchgeführt.

## Messergebnisse

Zur Validierung der Selbst-Kalibrierung wurde nachfolgend mit Hilfe der geometrischen Simulation ein Ablaufprogramm zur Prüfung der Messhilfsmittel für Gewindebohrungen erzeugt. Für die Auswertung der Messergebnisse wurden die registrierten Merkmalsmittelpunkte gegen eine Lasertrackermessung der Messhilfsmittel referenziert. Die erreichbare Systemgenauigkeit ist in Abbildung 7.7 für die Datenerfassung mit Nominalparametern (vor der Selbst-Kalibrierung) und nach der Selbst-Kalibrierung dargestellt.

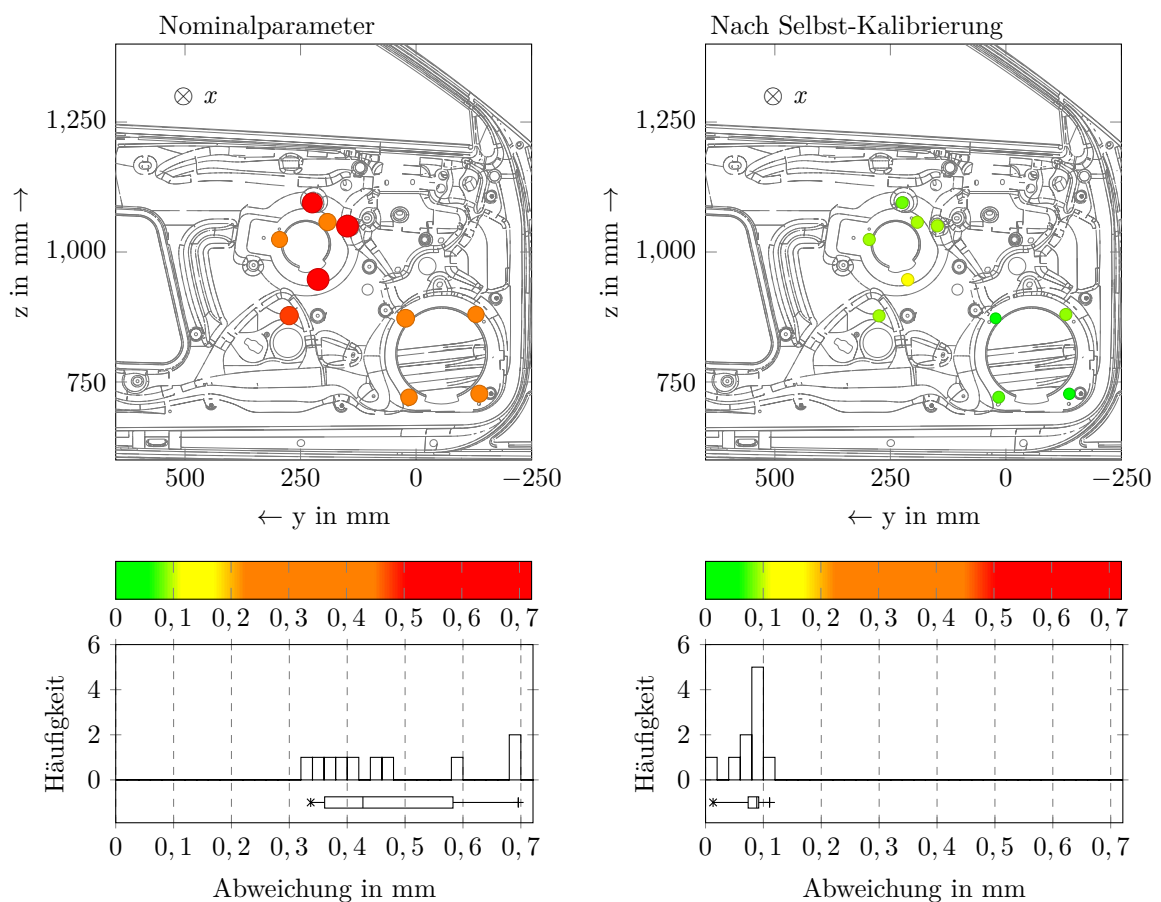
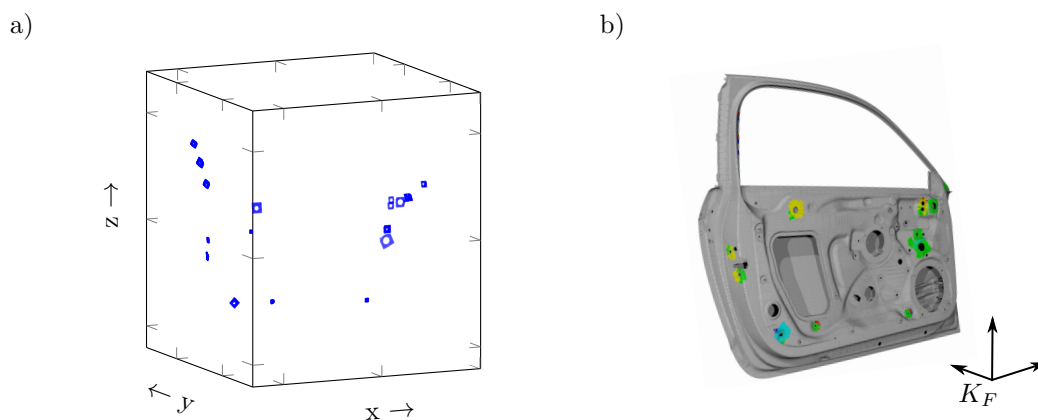


Abbildung 7.7: Messgenauigkeit (kartesische Abweichung der Mittelpunkte) am Prüfobjekt Autotür mit Nominalparametern (links) und nach der Selbst-Kalibrierung mit 200 Kalibrierkonfigurationen (rechts).

Durch die Selbst-Kalibrierung konnte die Messgenauigkeit des Gesamtsystems gegenüber dem unkalibrierten System um etwa den Faktor 6 auf 0,11 mm ( $2\sigma$ ) in Bezug auf die LT-Referenzmessung gesteigert werden.

Der Messablauf ist an etablierten KMG-Messprozessen orientiert und berücksichtigt ausgehend von den Prüfplänen die Erfassung, Registrierung und Auswertung der Merkmale. Abbildung 7.8 zeigt exemplarisch für eine Prüfauswahl an Merkmalen einer Autotür die registrierten Punktwolken (vgl. Abbildung 7.8 a) sowie deren Export in eine externe Auswertesoftware zur Erzeugung einer Falschfarbendarstellung der Abweichungen gegen das CAD-Modell (vgl. Abbildung 7.8 b).



*Abbildung 7.8: Validierung des Messablaufs anhand des Prüfobjektes Autotür: a) Registrierung der erfassten Punktwolken in einem gemeinsamen Koordinatensystem, b) Export der Punktwolken in eine Auswertesoftware, Ausrichtung der Punktwolken im Fahrzeugkoordinatensystem  $K_F$  anhand des Referenzpunktesystems und Falschfarbendarstellung gegenüber den CAD-Soll-Daten.*

### Messergebnisse während der Betriebsphase

Neben der erreichbaren Genauigkeit nach der Selbst-Kalibrierung ist insbesondere die Überprüfung der Modellgültigkeit und Kompensation während der Betriebsphase für den Einsatz im produktionsnahen Umfeld relevant.

Abbildung 7.9 zeigt die Messgenauigkeit des roboterbasierten Messsystems während der Betriebsphase bei regelmäßiger Selbst-Kompensation beginnend mit einer Initialkalibrierung im Kaltzustand des Roboters.

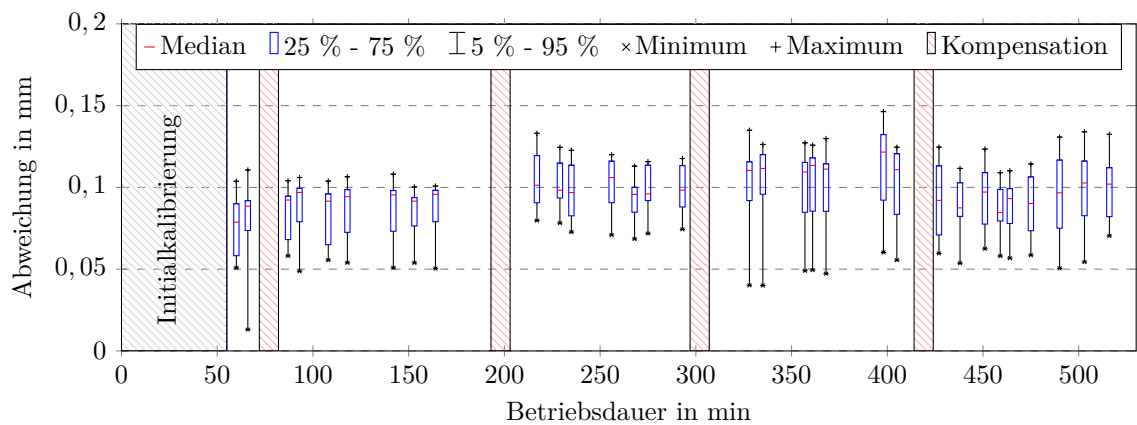


Abbildung 7.9: Messgenauigkeit (Positionen von 10 Messhilfsmitteln referenziert gegenüber einer Lasertracker-Vergleichsmessung) des roboterbasierten Messsystems während einer Betriebsphase von etwa 8 Stunden bei regelmäßiger Selbst-Kompensation mit jeweils 50 Kalibrierkonfigurationen.

Hierbei zeigt sich zum einen die Eignung der Selbst-Kalibrierung zur Befähigung von roboterbasierten Koordinatenmesssystemen zur Erreichung der Genauigkeit und zum anderen die Fähigkeit des Systems, Modellabweichungen über lange Betriebsphasen (auch während der Aufwärmphase) selbst zu identifizieren und zu kompensieren.

### 7.2.3 Überprüfung der Zielerreichung

Die in dieser Arbeit adressierte Zielsetzung der Genauigkeitssteigerung von roboterbasierten Koordinatenmesssystemen mittels Selbst-Kalibrierung konnte durch die Kombination der wesentlichen Bausteine Modellierung, automatisierte Datenaufnahme und Parameteridentifikation sowie deren Einbettung in eine Messstrategie erreicht werden.

Insbesondere die Zieldimensionen Genauigkeitssteigerung und Vermeidung von Fehlereinflüssen durch den Anwender wurden hierbei berücksichtigt.

Durch die mathematisch-physikalische Modellierung des Gesamtsystems in Kombination mit einer Kalibrierdatenerfassung am Prüfobjekt selbst kann eine gesteigerte

gerte Systemgenauigkeit erreicht<sup>64</sup> und deren Gültigkeit durch das System selbst überprüft werden.

Die Integration der Kalibrierung in eine Messstrategie sowie die Befähigung des Systems, die Kalibrierdatenaufnahme und Modelladaption automatisiert durchführen zu können, ermöglicht einen weitestgehend autonomen Einsatz des roboterbasierten Messsystems im produktionsnahen Umfeld.

## 7.3 Wirtschaftliche Bewertung

Neben der technischen Eignung eines Koordinatenmesssystems sind für den produktionsnahen Einsatz insbesondere wirtschaftliche Aspekte entscheidend. Hierbei gilt es, bei möglichst umfassender Absicherung der geometrischen Produkteigenschaften die Kosten gering zu halten.

Entsprechend soll eine Kostenvergleichsrechnung in Abhängigkeit unterschiedlicher Flexibilitätsanforderungen den wirtschaftlich sinnvollen Einsatzbereich von roboterbasierten Messsystemen mit Selbst-Kalibrierung aufzeigen. Die Flexibilität eines Messsystems sei hierbei die Fähigkeit, auf verschiedene Prüfaufträge (Bauteile oder Prüfplanänderungen) reagieren zu können. Es werden folgende drei Einsatzszenarien angenommen:

**Einsatzszenario A:** *Linien-/Serienbegleitender Einsatz eines Koordinatenmesssystems niedriger Flexibilität, wobei ein Prüfauftrag (Bauteil- oder Prüfplanänderungen) pro Jahr ( $\Delta_P = 1$ ) angenommen wird.*

**Einsatzszenario B:** *Koordinatenmesssystem mittlerer Flexibilität zur produktionsnahen, stichprobenbasierten Prüfung von Bauteilen beispielsweise als linienübergreifendes Messmittel oder während des Produktionsanlaufs. Hierfür werden  $\Delta_P = 15$  verschiedene Prüfaufträge (Bauteil- oder Prüfplanänderungen) pro Jahr angenommen.*

---

<sup>64</sup>Die Verallgemeinerbarkeit der Modellierung auf Vertikal-Knickarmroboter, insbesondere auch von anderen Herstellern, wurde im Abschnitt zur Gültigkeitsbetrachtung der Modellierung validiert (vgl. Abschnitt 4.4.5).

**Einsatzszenario C:** *Entwicklungsbegleitender Einsatz eines Koordinatenmesssystems hoher Flexibilität für die Erfassung von Merkmalen an unterschiedlichen Bauteilen. Es werden  $\Delta_P = 150$  verschiedene Prüfaufträge pro Jahr angenommen.*

Zur Berechnung der Kosten werden den drei Szenarien die im Anhang A.9 in der Tabelle A.8 aufgeführten geschätzten Zeitaufwände zugrunde gelegt. Zur Bestimmung der Personalkosten wird hierfür zwischen manuellen und automatisierten Zeitaufwänden unterschieden.

Auf Basis der unternehmensspezifischen Kalkulationswerte (vgl. Tabelle A.9 im Anhang A.9) können in Abhängigkeit der durchschnittlichen Anzahl an Merkmalen  $N_M$  je Bauteil, der Anzahl der Prüfobjekte  $N_P$  pro Jahr sowie der Anzahl an Änderungen der Prüfaufträge  $\Delta_P$  pro Jahr die Gesamtkosten ermittelt werden.

Hierbei setzen sich die Gesamtkosten aus den jährlichen Personalkosten und den maschinenabhängigen Gemeinkosten pro Jahr zusammen (Gleichung 7.1).

$$K_{ges,a} = N_{sys} \cdot K_{fix,a} + K_{P,sys} \quad (7.1)$$

Dabei entspricht  $N_{sys}$  der Anzahl an notwendigen Messsystemen unter Berücksichtigung der maximalen Systemkapazität  $C_{Sys}$  (Gleichungen 7.2a<sup>65</sup> und 7.2b). Die entsprechenden Zeitaufwände für Änderungen je Merkmal  $t_{E,M}$ , Änderungen je Prüfauftrag  $t_{E,P}$ , indirekte Messaufwände  $t_W$ , direkte Messaufwände je Merkmal  $t_{M,M}$  und direkte Messaufwände je Prüfauftrag  $t_{M,P}$  sowie die maximale Systemverfügbarkeit  $T_{max}$  können der Tabelle A.8 im Anhang A.9 entnommen werden.

$$N_{sys} = \left\lceil \frac{N_M \cdot N_P}{C_{Sys}} \right\rceil \quad (7.2a)$$

$$C_{Sys} = \frac{T_{max} - \Delta_P \cdot (t_{E,M} + t_{E,P}) - t_W}{t_{M,M} + \frac{t_{M,P}}{N_M}} \quad (7.2b)$$

<sup>65</sup>Mit der Aufrundungsfunktion  $\lceil x \rceil = \min\{k \in \mathbb{Z} | k \geq x\}$

Hierbei wird angenommen, dass die Einrichtungsaufwände je Merkmal bei Änderungen der Prüfaufträge parallelisierbar sind.

Für die maschinenabhängigen Gemeinkosten je Messmaschine pro Jahr gilt Gleichung 7.3.

$$K_{fix,a} = A_{sys} \cdot \kappa_{raum} + \frac{N_M \cdot N_P}{C_{sys} \cdot N_{sys}} \cdot T_{max} \cdot P_{sys} \cdot \kappa_{Energie} + K_{Inst} + \frac{K_{an,sys} - R_{sys}}{n_{ab}} + \frac{K_{an,sys} + R_{sys}}{2} \cdot i_{zins} \quad (7.3)$$

Die Personalkosten können gemäß Gleichung 7.4 bestimmt werden.

$$K_{P,sys} = \kappa_P \cdot \Delta_P \cdot (N_M \cdot t_{E,M} + t_{E,P}) + \kappa_P \cdot t_W \cdot N_{sys} + \kappa_P \cdot N_P \cdot (N_M \cdot t_{M,M} + t_{M,P}) \quad (7.4)$$

Die resultierenden jährlichen Kosten pro erfasstem Merkmal sind in Abbildung 7.10 für die unterschiedlichen Messsysteme und für die definierten Einsatzszenarien dargestellt.

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sind roboterbasierte Messsysteme mit Selbst-Kalibrierung im Hinblick auf die niedrigeren Anschaffungskosten und den geringeren indirekten Messaufwänden (Kalibrierung und Kompensation) durch den höheren Automatisierungsgrad gegenüber anderen roboterbasierten Systemen<sup>66</sup> in den drei definierten Einsatzszenarien überlegen.

Typische Koordinatenmessgeräte weisen zwar eine sehr hohe Genauigkeit auf, sind jedoch mit hohen Anschaffungskosten und direkten Messaufwänden mit höheren Gesamtkosten verbunden. Solche Systeme kommen folglich aus technischen Gründen zum Einsatz, wenn die Genauigkeit der Vergleichssysteme nicht ausreichend ist.

Der serienbegleitende, produktionsnahe Einsatz von Koordinatenmesssystemen zeichnet sich durch wenige unterschiedliche Prüfaufträge mit hohen Wiederholungsraten aus. Hierbei ist es meist ausreichend, wenige Merkmale an einer

<sup>66</sup>Roboterbasierte Messsysteme mit Lasertracker-Kalibrierung oder roboterbasierte Messsysteme mit Nachverfolgung (engl.: tracking) der Sensorpose mittels externer Messtechnik.

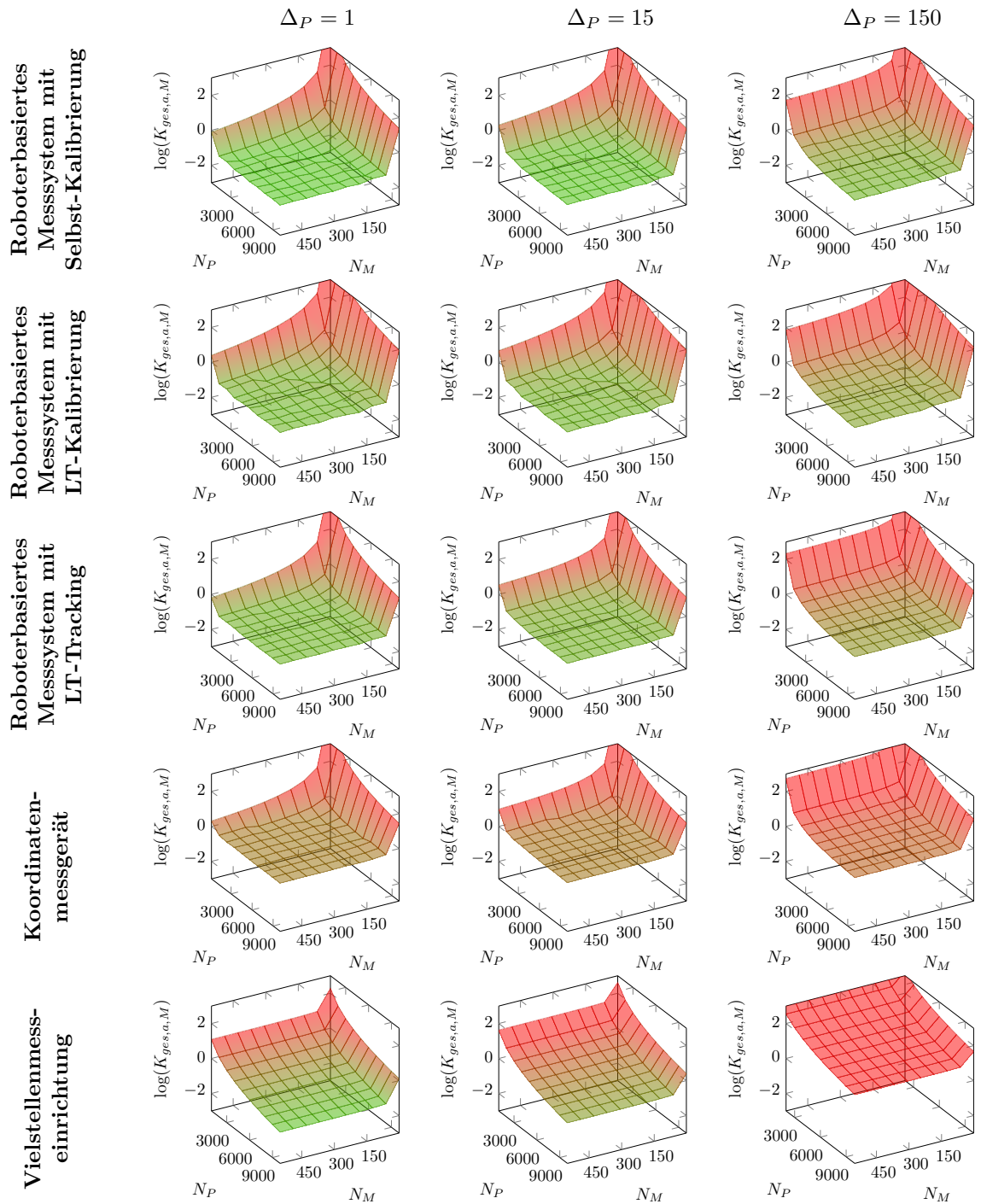


Abbildung 7.10: Vergleich der Kosten je Merkmal  $K_{ges,a,M}$  für drei Szenarien in Abhängigkeit der durchschnittlichen Anzahl an Merkmalen und der Anzahl an Prüfobjekten pro Jahr.

möglichst hohen Zahl an Produkten zu erfassen, um gegebenenfalls in den Produktionsprozess eingreifen zu können.

Besonders bei einer hohen Anzahl an Prüfobjekten beeinflusst die Messsystemkapazität durch die Anzahl der notwendig werdenden Systeme und deren Anschaffungskosten den wirtschaftlich sinnvollen Einsatzbereich.

Insbesondere bei Einsatzbereichen mit mittlerer Flexibilität (Szenario B) sind die Prüfumfänge (durchschnittliche Anzahl an Merkmalen pro Prüfobjekt  $N_M$  und Anzahl an Prüfobjekten pro Jahr  $N_P$ ) entscheidend, welches Prüfsystem am wirtschaftlichsten ist.

Abbildung 7.11 zeigt die Differenz der jährlichen Gesamtkosten  $\delta K_{ges,a} = K_{ges,SK} - K_{ges,V}$  zwischen roboterbasierten Messsystemen mit Selbst-Kalibrierung  $K_{ges,SK}$  und dem Einsatz von Vielstellenmesseinrichtungen  $K_{ges,V}$  unter der Annahme von  $\Delta_P = 15$  Prüfauftragsänderungen pro Jahr.

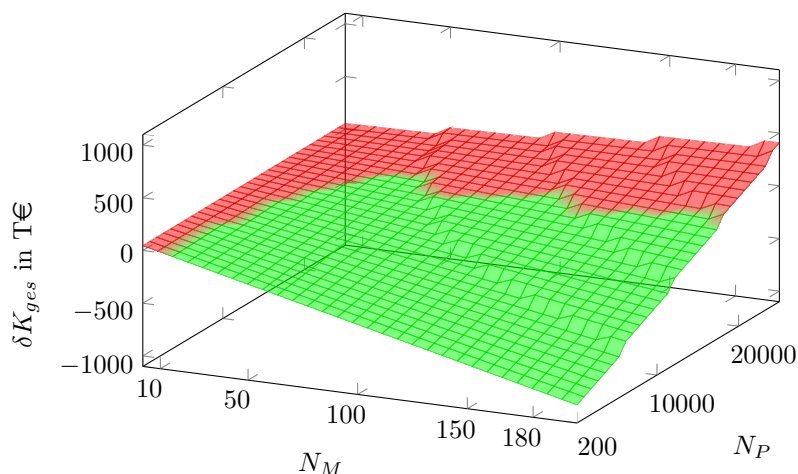


Abbildung 7.11: Differenz der jährlichen Gesamtkosten  $\delta K_{ges,a}$  zwischen roboterbasierten Messsystemen und Vielstellenmesseinrichtungen bei  $\Delta_P = 15$  Prüfauftragsänderungen pro Jahr in Abhängigkeit der durchschnittlichen Anzahl an Merkmalen pro Prüfobjekt  $N_M$  und der Anzahl an Prüfobjekten pro Jahr  $N_P$ .

Hierbei zeigt sich, dass Vielstellenmesseinrichtungen insbesondere bei der Erfassung weniger Merkmale ( $N_M < 30$ ) mit hohen Wiederholungsraten ( $N_P > 10000$ ) die wirtschaftlich sinnvollste Lösung darstellen. Mit zunehmender Anzahl an zu

---

erfassenden Merkmalen je Bauteil und sinkenden Wiederholungsraten nimmt die Kostendifferenz zu roboterbasierten Messsystemen ab. Durch die merkmalsabhängigen Anschaffungskosten der Vielstellenmesseinrichtungen ergibt sich ein Bereich (hohe Anzahl an Merkmalen bei geringer Anzahl an Prüfobjekten), ab welchem roboterbasierte Messsysteme mit Selbst-Kalibrierung serienbegleitend wirtschaftlich einsetzbar sind.

Bei Einsatzszenarien mit einer großen Anzahl an Änderungen der Prüfaufträge pro Jahr spielen die Änderungsaufwände eine zunehmend wichtigere Rolle. So führen beispielsweise bei Vielstellenmesseinrichtungen die Änderungsaufwände zu hohen Personalkosten bei sinkender Systemkapazität.

Insbesondere beim entwicklungsbegleitenden, produktionsnahen Einsatz von Messsystemen mit Änderung in der Größenordnung von  $\Delta_P = 150$  pro Jahr zeigt sich das wirtschaftliche Potential von roboterbasierten Messsystemen mit Selbst-Kalibrierung gegenüber den Vergleichssystemen.

Zusammenfassend sind roboterbasierte Messsysteme mit Selbst-Kalibrierung für den produktionsnahen Einsatz mit mittlerer (Szenario B) bis hoher Flexibilität (Szenario C) wirtschaftlich sinnvoll.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Die produktionsnahe Koordinatenmesstechnik als Teil der Fertigungsmesstechnik adressiert die Kontrolle, Quantifizierung und Klassifizierung der qualitätsrelevanten Größen eines Produktes. Gemäß der Zielgrößen der Produktion müssen geeignete Messsysteme hierbei geringe Investitions- sowie Betriebskosten aufweisen, hohe Messgeschwindigkeiten erzielen, auf neue Produkte und Produktderivate adaptierbar sein und eine im Rahmen der Toleranzen geforderte Genauigkeit gewährleisten.

Roboterbasierte Koordinatenmesssysteme kombinieren die schnelle Erfassung von Merkmalen durch optische 3D-Sensoren mit der Flexibilität eines Industrieroboters zur Anpassung der Prüfabläufe. Darüber hinaus sind die Komponenten für das produktionsnahe Umfeld geeignet und weisen geringe Investitionskosten, verglichen mit etablierten Koordinatenmesssystemen, auf. Solche Systeme sind daher im Kontext eines produktionsnahen Umfelds verstärkt im Betrachtungsfokus. Beschränkt wird der Einsatz bislang maßgeblich durch die unzureichende Genauigkeit, welche auf die Pose-Genauigkeit von Industrierobotern zurückzuführen ist.

Bisherige Kalibrierverfahren zur Steigerung der Pose-Genauigkeit erfordern meist zusätzliche Systemtechnik, hohe manuelle Aufwände sowie tiefes Erfahrungswissen des Anwenders. Sie erfüllen daher nicht die Anforderungen für den produktionstechnischen Einsatz bei roboterbasierten Messsystemen. Darüber hinaus wird die Beurteilung der (zeitlichen und räumlichen) Gültigkeit der Kalibrierung typischerweise dem Anwender überlassen.

Das Ziel dieser Arbeit umfasst daher die Genauigkeitssteigerung roboterbasierter Koordinatenmesssysteme durch Selbst-Kalibrierung und deren Integration in eine Messstrategie. Hierbei wird insbesondere auf den Einsatz von externen Messsystemen und zusätzlicher Systemtechnik verzichtet.

Die Steigerung der Pose-Genauigkeit erfordert die Anpassung des zugrundeliegenden Modells an das Realsystem. Folglich müssen innerhalb des Modells alle genauigkeitsrelevanten Einflüsse abgebildet sein. Auf Basis einer Systemanalyse und der Methode zur komponentenspezifischen Charakterisierung von nicht-geometrischen Einflussgrößen auf die Pose-Genauigkeit wird in Kapitel 4 eine parametrisierte Modellierung für serielle kinematische Ketten abgeleitet. Diese Modellierung ermöglicht im Rahmen der Kalibrierung die Erreichung von Genauigkeitskenngrößen, welche Industrieroboter für den Einsatz in der Koordinatenmesstechnik befähigen. Im Vergleich zu existierenden Modellierungen konnte eine Steigerung der Pose-Genauigkeit erreicht werden.

Unter der Annahme eines statischen Prüfobjekts im Arbeitsraum des Messsystems sind die Streuungen von mehrfach gemessenen Merkmalsposen ein Maß für die Übereinstimmung von Modell und Realsystem. Durch die Integration des 3D-Sensors in das Modell wird die Zielfunktion (Kapitel 5) zur Parameteridentifikation auf Basis der Minimierung dieser Streuungen formuliert, ohne die Daten aus externen Messsystemen zu benötigen. Durch die automatisierte Generierung und Auswahl geeigneter Kalibrierkonfigurationen an Merkmalen des Prüfobjekts sowie der simulationsgestützten Programmerzeugung auf Basis der CAD-Daten und des Prüfplans wird das roboterbasierte Koordinatenmesssystem befähigt, lediglich unter Nutzung seiner Komponenten die datentechnische Grundlage für die Modellanpassung selbst zu erfassen. In Verbindung mit der numerischen Parameteridentifikation kann dieser Prozess als Selbst-Kalibrierung bezeichnet werden.

Aufgrund von umgebungs- und betriebsabhängigen Einflüssen ist die Gültigkeit einer Kalibrierung zeitlich begrenzt. Insbesondere die Parameter der Robotergeometrie zeigen eine ausgeprägte Betriebsabhängigkeit. Durch eine partielle Selbst-Kalibrierung können diese Systemveränderungen kompensiert werden (Kapitel 6). Durch die Einschränkung der betrachteten Parameter im Rahmen der Kompensation sind weniger Roboterkonfigurationen zu erfassen, was im Vergleich zur wiederholten vollständigen Kalibrierung zu einer Erhöhung der Nutzungsdauer des

roboterbasierten Messsystems führt. Durch die Integration der Selbst-Kalibrierung und -Kompensation in eine Messstrategie für roboterbasierte Messsysteme kann darüber hinaus ein anwendungsorientierter Einsatz gewährleistet werden.

Die Eignung der Selbst-Kalibrierung für roboterbasierte Koordinatenmesssysteme ist in Kapitel 7 für zwei verschiedene Prüfobjekte belegt. Im Rahmen einer ergänzenden Kostenvergleichsrechnung wurden darüber hinaus die wirtschaftlichen Einsatzbereiche identifiziert.

Resümierend kann die Selbst-Kalibrierung bei roboterbasierten Koordinatenmesssystemen als grundlegender Bestandteil zur Erreichung der Genauigkeitsanforderungen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit im produktionsnahen Umfeld aufgefasst werden. Sie kann folglich einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Zielgrößen der Produktion leisten.

## 8.2 Ausblick

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich weitere Potentiale zur Verbesserung der Selbst-Kalibrierung bei roboterbasierten Koordinatenmesssystemen.

Modellierungsseitig wäre die Berücksichtigung der umgebungs- und betriebsbedingten Systemänderungen auf Basis eines selbst-lernenden Modells denkbar. Hierbei könnte das System mit den Informationen aus der Selbst-Kalibrierung und Kompensation Änderungen identifizieren und in Verbindung mit den Informationen über den Betriebszustand Rückschlüsse auf das Systemverhalten ziehen.

Das zur Auswahl der Kalibrierkonfigurationen verwendete Bewertungskriterium könnte ebenfalls zur Identifikation geeigneter Messkonfigurationen verwendet werden. Insbesondere würden in diesem Fall Konfigurationen bevorzugt, bei denen Parameterfehler einen möglichst geringen Einfluss auf das Messergebnis haben. In Verbindung mit einer Abschätzung der Parameterfehler könnte dies zu einer weiteren Erhöhung der Messgenauigkeit des Systems beitragen.

Weiteres Verbesserungspotential könnte durch die simultane Kalibrierung und Messung erreicht werden. Insbesondere mit dem Einsatz von optischen 3D-Sensoren

mit größerem Erfassungsvolumen könnte hierbei mit einer Sensoraufnahme neben der eigentlichen Messung simultan die Erweiterung der Kalibrierdaten durchgeführt werden. Hierdurch würde die Kalibrierung synchron zur eigentlichen Messaufgabe ausgeführt und folglich eine zeitliche und räumliche Übereinstimmung zwischen identifiziertem Modell und Realsystem erreicht werden.

# Literatur

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser, Carl. 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

AGARWAL et al. 2018

Agarwal, S.; Mierle, K.; weitere Autoren: Ceres Solver. URL: <http://ceres-solver.org> (besucht am 02.02.2019).

AOYAGI et al. 2010

Aoyagi, S.; Kohama, A.; Nakata, Y.; Hayano, Y.; Suzuki, M.: Improvement of robot accuracy by calibrating kinematic model using a laser tracking system - compensation of non-geometric errors using neural networks and selection of optimal measuring points using genetic algorithm. In: 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010). Hrsg. von IEEE. 2010, S. 5660–5665. ISBN: 978-1-4244-6675-7.

BARRAQUAND & LATOMBE 1991

Barraquand, J.; Latombe, J.-C.: Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach. The International Journal of Robotics Research 10 (1991) 6, S. 628–649. ISSN: 0278-3649. DOI: 10.1177/027836499101000604.

BAUERNHANSL et al. 2014

Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B., Hrsg. (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2014. ISBN: 978-3-658-04681-1. DOI: 10.1007/978-3-658-04682-8.

BENNAMOUN & MAMIC 2002

Bennamoun, M.; Mamic, G. J.: Object recognition: Fundamentals and case studies. Advances in Pattern Recognition. London & New York: Springer. 2002. ISBN: 978-1-85233-398-0.

BENNETT & HOLLERBACH 1988

Bennett, D. J.; Hollerbach, J. M.: Self-calibration of single-loop, closed kinematic chains formed by dual or redundant manipulators. In: 27th IEEE Conference on Decision and Control. Hrsg. von IEEE. 1988, S. 627–629. DOI: 10.1109/CDC.1988.194385.

BENNETT & HOLLERBACH 1989

Bennett, D. J.; Hollerbach, J. M.: Identifying the kinematics of robots and their tasks. In: 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hrsg. von IEEE. 1989, S. 580–586. ISBN: 0-8186-1938-4. DOI: 10.1109/ROBOT.1989.100047.

BENNETT & HOLLERBACH 1991

Bennett, D. J.; Hollerbach, J. M.: Autonomous calibration of single-loop closed kinematic chains formed by manipulators with passive endpoint constraints. IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (1991) 5, S. 597–606. ISSN: 1042296X. DOI: 10.1109/70.97871.

BENNETT, GEIGER et al. 1991

Bennett, D. J.; Geiger, D.; Hollerbach, J. M.: Autonomous Robot Calibration for Hand-Eye Coordination. The International Journal of Robotics Research 10 (1991) 5, S. 550–559. ISSN: 0278-3649. DOI: 10.1177/027836499101000510.

BEPU ENTERTAINMENT LLC 2018

Bepu Entertainment LLC: BEPUphysics. URL: <https://www.bepumentertainment.com/> (besucht am 15.01.2019).

BERTAGNOLLI 2006

Bertagnolli, F.: Robotergestützte automatische Digitalisierung von Werkstückgeometrien mittels optischer Streifenprojektion. Dissertation. Messtechnik und Sensorik. Aachen: Shaker. 2006. ISBN: 3-8322-4948-6.

## BEYER 2005

Beyer, L.: Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern - Insbesondere mit Parallelkinematik. Dissertation. Bd. Bd. 1. Forschungsberichte aus dem Laboratorium Fertigungstechnik. Aachen: Shaker. 2005. ISBN: 3-8322-3681-3.

## BEYERER et al. 2012

Beyerer, J.; Puente León, F.; Frese, C.: Automatische Sichtprüfung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2012. ISBN: 978-3-642-23965-6. DOI: 10.1007/978-3-642-23966-3.

## BITTENCOURT &amp; AXELSSON 2014

Bittencourt, A. C.; Axelsson, P.: Modeling and Experiment Design for Identification of Wear in a Robot Joint Under Load and Temperature Uncertainties Based on Friction Data. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 19 (2014) 5, S. 1694–1706. ISSN: 1083-4435. DOI: 10.1109/TMECH.2013.2293001.

## BOHLIN &amp; KAVRAKI 2000

Bohlin, R.; Kavraki, L. E.: Path planning using lazy PRM. In: 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. Piscataway: I E E E. 2000, 521–528 vol.1. ISBN: 0-7803-5886-4. DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844107.

## BONGARDT 2004

Bongardt, T.: Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern. Dissertation. Bd. 184. Forschungsberichte IWB. München: H. Utz. 2004. ISBN: 978-3-8316-0332-9.

## BORM &amp; C.-H. MENG 1991

Borm, J.-H.; Meng, C.-H.: Determination of Optimal Measurement Configurations for Robot Calibration Based on Observability Measure. The International Journal of Robotics Research 10 (1991) 1, S. 51–63. ISSN: 0278-3649. DOI: 10.1177/027836499101000106.

## BROCKETT 1984

Brockett, R. W.: Robotic manipulators and the product of exponentials formula. In: Mathematical Theory of Networks and Systems. Hrsg. von P. Fuhrmann.

Bd. 58. Berlin: Springer. 1984, S. 120–129. ISBN: 978-3-540-38826-5. DOI: 10.1007/BFb0031048.

BUSCH 2016

Busch, M.: Automatisierte Posenauswahl bei der objektbezogenen Kalibrierung eines roboterbasierten Messsystems. Unveröffentlichte Studienarbeit. Technische Universität München. 2016.

CHEN et al. 2008

Chen, H.; Fuhlbrigge, T.; Choi, S.; Wang, J.; Li, X.: Practical industrial robot zero offset calibration. In: 2008 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Hrsg. von IEEE. 2008, S. 516–521. DOI: 10.1109/COASE.2008.4626417.

DAHMEN & REUSKEN 2008

Dahmen, W.; Reusken, A.: Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 2., korrigierte Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008. ISBN: 978-3-540-76493-9.

DENAVIT & HARTENBERG 1955

Denavit, J.; Hartenberg, R. S.: A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. Trans. of the ASME. Journal of Applied Mechanics (1955) 22, S. 215–221.

DERFLING 2013

Derfling, D.: Einsatz von Industrierobotern als Koordinatenmessgeräte. Dissertation. Bd. 30. Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik. Aachen: Shaker. 2013. ISBN: 978-3-8440-2383-1.

DIAZ P. et al. 2018

Diaz P., J. R.; Mukherjee, P.; Verl, A.: Automatic Close-optimal Workpiece Positioning for Robotic Manufacturing. Procedia CIRP 72 (2018), S. 277–284. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.142.

DIESTEL 2006

Diestel, R.: Graphentheorie. 3., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer. 2006. ISBN: 9783540213918.

DIN 1319-1 1995

DIN 1319-1: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe. 1995.

DORST et al. 2010

Dorst, L.; Fontijne, D.; Mann, S.: Geometric algebra for computer science: An object-oriented approach to geometry. [2., corr. printing, Nachdr.] The Morgan Kaufmann series in computer graphics. Amsterdam: Elsevier, Morgan Kaufmann. 2010. ISBN: 0123749425.

DRIELS & PATHRE 1990

Driels, M. R.; Pathre, U. S.: Significance of observation strategy on the design of robot calibration experiments. *Journal of Robotic Systems* 7 (1990) 2, S. 197–223. ISSN: 07412223. DOI: 10.1002/rob.4620070206.

ELATTA et al. 2004

Elatta, A. Y.; Gen, L. P.; Zhi, F. L.; Daoyuan, Y.; Fei, L.: An Overview of Robot Calibration. *Information Technology Journal* 3 (2004) 1, S. 74–78. ISSN: 18125638. DOI: 10.3923/itj.2004.74.78.

EN ISO 8373 1996

EN ISO 8373: Industrieroboter Wörterbuch. 1996.

EN ISO 9283 1998

EN ISO 9283: Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods (ISO 9283 : 1998); German version ISO 9283 : 1998. 1998.

ERICSON 2005

Ericson, C.: Real-Time Collision Detection. London: CRC Press. 2005. ISBN: 1-55860-732-3.

FELDMANN et al. 2014

Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G., Hrsg. (2014): Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren. [2., geänd. Aufl.] Edition Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser. 2014. ISBN: 978-3-446-43656-5.

FRIEDRICH et al. 2018

Friedrich, C.; Csiszar, A.; Lechler, A.; Verl, A.: Efficient Task and Path Planning for Maintenance Automation Using a Robot System. *IEEE Transactions on*

Automation Science and Engineering 15 (2018) 3, S. 1205–1215. ISSN: 1545-5955. DOI: 10.1109/TASE.2017.2759814.

GATLA et al. 2007

Gatla, C. S.; Lumia, R.; Wood, J.; Starr, G.: An Automated Method to Calibrate Industrial Robots Using a Virtual Closed Kinematic Chain. IEEE Transactions on Robotics 23 (2007) 6, S. 1105–1116. ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2007.909765.

GAUDREAUULT et al. 2016

Gaudreault, M.; Joubair, A.; Bonev, I. A.: Local and closed-loop calibration of an industrial serial robot using a new low-cost 3D measuring device. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. IEEE. 2016, S. 4312–4319. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487629.

GERSTMANN 1991

Gerstmann, U.: Robotergenauigkeit: Der Getriebeeinfluss auf die Arbeits- und Positionsgenauigkeit. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verl. 1991. ISBN: 3-18-401201-8.

GONG et al. 2000

Gong, C.; Yuan, J.; Ni, J.: Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration. International Journal of Machine Tools and Manufacture 40 (2000) 14, S. 2119–2137. ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00023-7.

GOSSEL 1996

Gossel, O.: Steigerung der Genauigkeit von Industrierobotern basierend auf einer durchgängigen Genauigkeitsanalyse. Dissertation. Bd. 8. AWA-Fortschrittsberichte. Hamburg-Harburg: Technische Univ., AWA. 1996.

GRÄSER 1999

Gräser, R.-G.: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern. Dissertation. Bd. 125. Forschungsberichte IWB. München: Utz. 1999. ISBN: 3-89675-603-6.

GREENWAY 2000

Greenway, B.: Robot accuracy. *Industrial Robot: An International Journal* 27 (2000) 4, S. 257–265. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/01439910010372136.

GUENNEBAUD et al. 2018

Guennebaud, G.; Jacob, B.; weitere Autoren: Eigen2. URL: <https://eigen.tuxfamily.org/dox/> (besucht am 01.02.2019).

HÄGELE et al. 2008

Hägele, M.; Nilsson, K.; Pires, J. N.: Industrial Robotics. In: Springer handbook of robotics. Hrsg. von B. Siciliano; O. Khatib. Berlin: Springer. 2008, S. 963–986. ISBN: 978-3-540-30301-5.

HAMFELD 2001

Hamfeld, H.: Aktive Stereoskopie, Neue Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten. Dissertation. 2001.

HAYAT et al. 2013

Hayat, A. A.; Udai, A. D.; Saha, S. K.: Kinematic-Chain of an Industrial Robot and Its Torque Identification for Gravity Compensation. In: 2013 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (INaCoMM2013). Hrsg. von IIT Roorkee. Roorkee, India. 2013.

HAYATI & MIRMIRANI 1985

Hayati, S.; Mirmirani, M.: Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators. *Journal of Robotic Systems* 2 (1985) 4, S. 397–413. ISSN: 07412223. DOI: 10.1002/rob.4620020406.

HAYATI 1983

Hayati, S.: Robot arm geometric link parameter estimation. In: The 22nd IEEE Conference on Decision and Control. Hrsg. von IEEE. 1983, S. 1477–1483. DOI: 10.1109/CDC.1983.269783.

HELIX TOOLKIT CONTRIBUTORS 2018

Helix Toolkit contributors: HelixToolkit.WPF. URL: <http://helix-toolkit.org/> (besucht am 31.01.2019).

HESSE & SCHNELL 2008

Hesse, S.; Schnell, G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion, Ausführung, Anwendung. 4e akt. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg. 2008. ISBN: 978-3-8348-0471-6. DOI: 10.1007/978-3-658-05867-8{\textunderscore}10.

HILDENBRAND 2006

Hildenbrand, D.: Geometric Computing in Computer Graphics and Robotics using Conformal Geometric Algebra. Dissertation. 2006. URL: urn:nbn:de:tuda-tuprints-7647 (besucht am 02.09.2018).

HOLLERBACH, KHALIL et al. 2008

Hollerbach, J. M.; Khalil, W.; Gautier, M.: Model Identification. In: Springer handbook of robotics. Hrsg. von B. Siciliano; O. Khatib. Berlin: Springer. 2008, S. 321–344. ISBN: 978-3-540-30301-5.

HOLLERBACH & WAMPLER 1996

Hollerbach, J. M.; Wampler, C. W.: The Calibration Index and Taxonomy for Robot Kinematic Calibration Methods. The International Journal of Robotics Research 15 (1996) 6, S. 573–591. ISSN: 0278-3649. DOI: 10.1177/027836499601500604.

HUSTY et al. 2012

Husty, M.; Karger, A.; Sachs, H.; Steinhilper, W.: Kinematik und Robotik. Softcover reprint of the hardcover 1. ed. 1997. Maschinenbau : Forschung und Entwicklung. Berlin: Springer. 2012. ISBN: 978-3-642-63822-0.

IFR STATISTICAL DEPARTMENT 2016

IFR Statistical Department, Hrsg. (2016): World Robotics 2016: Industrial Robots.

IKITS & HOLLERBACH 1997

Ikits, M.; Hollerbach, J. M.: Kinematic calibration using a plane constraint. In: 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. Piscataway: IEEE. 1997, S. 3191–3196. ISBN: 0-7803-3612-7. DOI: 10.1109/ROBOT.1997.606774.

ISIOS GMBH 2019

isios GmbH. URL: <http://www.isios.de/> (besucht am 02.02.2019).

## JÄHNE 2012

Jähne, B.: Digitale Bildverarbeitung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2012. ISBN: 978-3-642-04951-4. DOI: 10.1007/978-3-642-04952-1.

## JANOCHA &amp; DIEWALD 1995

Janocha, H.; Diewald, B.: ICAROS: Over-all-calibration of industrial robots. *Industrial Robot: An International Journal* 22 (1995) 3, S. 15–20. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/EUM00000000004185.

## JIANG et al. 2016

Jiang, Y.; Huang, X.; Li, S.: An on-line compensation method of a metrology-integrated robot system for high-precision assembly. *Industrial Robot: An International Journal* 43 (2016) 6, S. 647–656. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/IR-03-2016-0091.

## JIMÉNEZ et al. 2001

Jiménez, P.; Thomas, F.; Torras, C.: 3D collision detection: A survey. *Computers & Graphics* 25 (2001) 2, S. 269–285. ISSN: 00978493. DOI: 10.1016/S0097-8493(00)00130-8.

## JOHNEN et al. 2013

Johnen, B.; Scheele, C.; Kuhlenkötter, B.: Measurement of Industrial Robot Trajectories With Reorientations. *Mechanical Engineering Research* 4 (2013) 1. DOI: 10.5539/mer.v4n1p43.

## JOUBAIR et al. 2016

Joubair, A.; Tahan, A. S.; Bonev, I. A.: Performances of observability indices for industrial robot calibration. In: 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hrsg. von IEEE. [Piscataway, NJ]: IEEE. 2016, S. 2477–2484. ISBN: 978-1-5090-3762-9. DOI: 10.1109/IROS.2016.7759386.

## JUNGNICKEL 2013

Jungnickel, D.: Graphs, networks and algorithms. 4th ed. Berlin: Springer. 2013. ISBN: 978-3-642-32278-5.

## KAMALI et al. 2016

Kamali, K.; Joubair, A.; Bonev, I.; Bigras, P.: Elasto-geometrical calibration of an industrial robot under multidirectional external loads using a laser tracker.

In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. IEEE. 2016, S. 4320–4327. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487630.

KAMISKE 2015

Kamiske, G. F., Hrsg. (2015): Handbuch QM-Methoden: Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen. Unveränd. Nachdr. d. 1. Ausg. v. 2013. München: Hanser. 2015. ISBN: 978-3-446-43586-5. DOI: 10.3139/9783446444416.fm.

KAVRAKI, KOLOUNTZAKIS et al. 1996

Kavraki, L. E.; Kolountzakis, M. N.; Latombe, J.-C.: Analysis of probabilistic roadmaps for path planning. In: 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. 1996, S. 3020–3025. ISBN: 0-7803-2988-0. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.509171.

KAVRAKI & LAVALLE 2008

Kavraki, L. E.; LaValle, S. M.: Motion Planning. In: Springer handbook of robotics. Hrsg. von B. Siciliano; O. Khatib. Berlin: Springer. 2008, S. 109–131. ISBN: 978-3-540-30301-5.

KEFERSTEIN & MARXER 2015

Keferstein, C. P.; Marxer, M.: Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. Wiesbaden: Springer Fachmedien. 2015. ISBN: 978-3-8348-2583-4. DOI: 10.1007/978-3-8348-2583-4.

KHALIL & DOMBRE 2006

Khalil, W.; Dombre, E.: Modeling identification & control of robots. London: Kogan Page Science. 2006. ISBN: 1-9039-9666-x.

KING 2009

King, D. E.: Dlib-ml: A Machine Learning Toolkit. Journal of Machine Learning Research (2009) 10, S. 1755–1758.

KLIMCHIK et al. 2012

Klimchik, A.; Pashkevich, A.; Wu, Y.; Caro, S.; Furet, B.: Design of calibration experiments for identification of manipulator elastostatic parameters. Journal of Mechanics Engineering and Automation (2012) 2, S. 531–542.

## KRALLER 2017

Kraller, S.: Messstrategie für kalibrierte, roboterbasierte Messsysteme. Unveröffentlichte Masterarbeit. Technische Universität München. 2017.

## KRUMKE &amp; NOLTEMEIER 2012

Krumke, S. O.; Noltemeier, H.: Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen. 3., Aufl. 2012. Leitfäden der Informatik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. 2012. ISBN: 978-3-8348-2264-2.

## KUFFNER &amp; LAVALLE 2000

Kuffner, J. J.; LaValle, S. M.: RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning. In: 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. Piscataway: I E E E. 2000, S. 995–1001. ISBN: 0-7803-5886-4. DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844730.

## LAST et al. 2007

Last, P.; Raatz, A.; Hesselbach, J.: Innovative Ansätze zur Kalibrierung von Industrierobotern. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 102 (2007) 3, S. 134–138. ISSN: 0947-0085. DOI: 10.3139/104.101116.

## LATOMBE 1991

Latombe, J.-C.: Robot Motion Planning. Bd. 124. The Springer International Series in Engineering and Computer Science, Robotics: Vision, Manipulation and Sensors. Boston, MA: Springer US. 1991. ISBN: 978-1-4615-4022-9.

## LAVALLE 2011

LaValle, S. M.: Motion Planning. IEEE Robotics & Automation Magazine 18 (2011) 1, S. 79–89. ISSN: 1070-9932. DOI: 10.1109/MRA.2011.940276.

## LAVALLE 2006

LaValle, S. M.: Planning Algorithms. Cambridge University Press. 2006. URL: <http://planning.cs.uiuc.edu/> (besucht am 02.09.2018).

## LEE &amp; PARK 2000

Lee, K. H.; Park, H.: Automated inspection planning of free-form shape parts by laser scanning. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 16 (2000) 4, S. 201–210. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/S0736-5845(99)00060-5.

LETTENBAUER 2002

Lettenbauer, H.: System zum Einsatz von Industrierobotern in der fertigungsnahen Qualitätsprüfung. Dissertation. Berichte aus der Robotik. Aachen: Shaker. 2002. ISBN: 9783832209414.

LIM et al. 2009

Lim, H.-K.; Kim, D.-H.; Kim, S.-R.; Kang, H.-J.: A Practical Approach to Enhance Positioning Accuracy for Industrial Robots. In: 2009 ICROS-SICE International Joint Conference (ICCAS-SICE). Hrsg. von SICE. 2009, S. 2268–2273. ISBN: 4907764340.

LIN & GOTTSCHALK 1998

Lin, M.; Gottschalk, S.: Collision Detection Between Geometric Models: A Survey. In: IMA Conference on Mathematics of Surfaces. Hrsg. von Institut of Mathematics and its Applications. 1998.

LIU & XI 2011

Liu, Y.; Xi, N.: Low-cost and automated calibration method for joint offset of industrial robot using single-point constraint. Industrial Robot: An International Journal 38 (2011) 6, S. 577–584. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/01439911111179093.

LUDWIG 2011

Ludwig, R.: Roboter gestützte Qualitätsprüfung in der Automobilfertigung. Dissertation. Bd. 18. Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik. Aachen: Shaker. 2011. ISBN: 978-3-8322-9787-9.

LUX & REINHART 2015

Lux, G.; Reinhart, G.: An approach for the automated self-calibration of robot-based inspection systems. In: 2015 IEEE 7th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). Hrsg. von IEEE. 2015, S. 106–111. DOI: 10.1109/ICCIS.2015.7274605.

LUX, M. ULRICH et al. 2017

Lux, G.; Ulrich, M.; Baker, T.; Hutterer, M.; Reinhart, G.: Analysis of non-geometric accuracy effects of articulated robots. Industrial Robot: An International

Journal 44 (2017) 5, S. 639–647. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/IR-12-2016-0354.

MA et al. 1994

Ma, D.; Hollerbach, J. M.; Xu, Y.: Gravity based autonomous calibration for robot manipulators. In: 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. IEEE Xplore. 1994, S. 2763–2768. ISBN: 0-8186-5330-2. DOI: 10.1109/ROBOT.1994.350919.

MAIER 2016

Maier, H.: Grundlagen der Robotik. 1., Auflage. Lehrbuch Studium. Berlin: VDE Verlag. 2016. ISBN: 978-3-8007-3944-8.

Y. MENG & ZHUANG 2007

Meng, Y.; Zhuang, H.: Autonomous robot calibration using vision technology. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 23 (2007) 4, S. 436–446. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2006.05.002.

MÖNNING 2006

Mönning, F.: Effiziente robotergestützte Messtechnik durch intelligente Sensorausrichtung. Dissertation. Bd. Bd. 2006,28. Berichte aus der Produktionstechnik. Aachen: Shaker. 2006. ISBN: 3-8322-5693-8.

MOORING et al. 1991

Mooring, B. W.; Driels, M. R.; Roth, Z. S.: Fundamentals of manipulator calibration. New York: John Wiley & Sons. 1991. ISBN: 0-471-50864-0.

MOTTA et al. 2001

Motta, J. M. S.; Carvalho, G. C. de; McMaster, R.: Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 17 (2001) 6, S. 487–497. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/S0736-5845(01)00024-2.

MURRAY et al. 1994

Murray, R. M.; Li, Z.; Sastry, S.: A mathematical introduction to robotic manipulation. Boca Raton: CRC Press. 1994. ISBN: 1351469797.

NAHVI & HOLLERBACH 1996

Nahvi, A.; Hollerbach, J. M.: The noise amplification index for optimal pose selection in robot calibration: Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on. (1996), S. 647–654. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.503848.

NIEVES et al. 2013

Nieves, E.; Xi, N.; Jia, Y.; Martinez, C.; Zhang, G.: Development of a Position Sensitive Device and Control Method for Automated Robot Calibration. In: 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2013). Hrsg. von IEEE. Piscataway, NJ: IEEE. 2013, S. 1127–1132. ISBN: 1479915157.

NUBIOLA & BONEV 2013

Nubiola, A.; Bonev, I. A.: Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 29 (2013) 1, S. 236–245. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.06.004.

NUBIOLA & BONEV 2014

Nubiola, A.; Bonev, I. A.: Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar. Precision Engineering 38 (2014) 3, S. 472–480. ISSN: 01416359. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.01.001.

NUBIOLA, SLAMANI et al. 2014

Nubiola, A.; Slamani, M.; Joubair, A.; Bonev, I. A.: Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker. Robotica 32 (2014) 03, S. 447–466. ISSN: 0263-5747. DOI: 10.1017/S0263574713000714.

ORTMEIER & ENGELHARDT 1999

Schutzrecht EP1105258B1 () Pr.: Ortmeier, H.; Engelhardt, D.: Vorrichtung und Verfahren zum Gewichtsausgleich eines Roboterarms.

OXYPLOT CONTRIBUTORS 2018

OxyPlot contributors: OxyPlot. URL: <http://www.oxyplot.org/> (besucht am 14.01.2019).

PAPAGEORGIOU et al. 2012

Papageorgiou, M.; Leibold, M.; Buss, M.: Optimierung: Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung. 3., neu bearb. u. erg. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Imprint & Springer. 2012. ISBN: 978-3-540-34012-6.

PAUL 1992

Paul, R. P.: Robot manipulators: Mathematics, programming, and control : the computer control of robot manipulators. 9th printing. The Mit Press series in Artificial Intelligence. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1992. ISBN: 026216082X.

PFEIFER & SCHMITT 2010

Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Fertigungsmesstechnik. 3., überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg. 2010. ISBN: 978-3-486-59202-3.

PFEIFFER 2014

Pfeiffer, S.: Modellbasierte Kalibrierung von Industrierobotern. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Technische Universität München. 2014.

PIÑA 2011

Piña, E.: Rotations with Rodrigues' vector. European Journal of Physics 32 (2011) 5, S. 1171–1178. ISSN: 0143-0807. DOI: 10.1088/0143-0807/32/5/005.

PONN & LINDEMANN 2011

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. 2. Aufl. VDI-Buch. Berlin & Heidelberg: Springer. 2011. ISBN: 3642205801.

POPPER 1935

Popper, K.: Logik der Forschung - Zur Erkenntnistheorie der Modernen Naturwissenschaft. Schriften zur Wissenschaftlichen Weltauffassung. Vienna & s.l.: Springer Vienna. 1935. ISBN: 978-3-7091-4177-9. DOI: 10.1007/978-3-7091-4177-9.

PRENNINGER et al. 1995

Prenninger, J. P.; Filz, K. M.; Vincze, M.; Gander, H.: Real-time contactless measurement of robot pose in six degrees of freedom. Measurement 14 (1995) 3-4, S. 255–264. ISSN: 02632241. DOI: 10.1016/0263-2241(94)00038-9.

RADKHAH et al. 2010

Radkhah, K.; Hemker, T.; Stryk, O. von: Self-calibration for industrial robots with rotational joints. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems* 3 (2010) 3/4, S. 187. ISSN: 1753-1039. DOI: 10.1504/IJMMS.2010.033183.

REINELT 1994

Reinelt, G.: The traveling salesman: Computational solutions for TSP applications. Bd. 840. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer. 1994. ISBN: 3-540-58334-3.

REINER 2011

Reiner, M.: Modellierung und Steuerung von strukturelastischen Robotern. Dissertation. München. 2011. URL: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20100110-967161-1-6> (besucht am 02.02.2019).

REINHART 2017

Reinhart, G., Hrsg. (2017): *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. Hanser eLibrary. München: Carl Hanser Verlag. 2017. ISBN: 3446449892.

REINHART et al. 1998

Reinhart, G.; Gräser, R.-G.; Klingel, R.: Qualification of Standard Industrial Robots to Cope with Sophisticated Assembly Tasks. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 47 (1998) 1, S. 1–4. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62772-3.

ROOKS 2001

Rooks, B.: Robots get the measure of car body inspection. *Industrial Robot: An International Journal* 28 (2001) 2, S. 125–130. ISSN: 0143-991X.

ROOS 1998

Roos, E.: Anwendungsorientierte Meß- und Berechnungsverfahren zur Kalibrierung off-line programmierter Roboterapplikationen. Dissertation. Bd. Nr. 709. *Fortschritt-Berichte VDI*. Reihe 8, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Dusseldorf: VDI Verlag. 1998. ISBN: 3-18-370908-2.

RÜCKEL 2006

Rückel, V.: Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung für koope-

rierende Industrieroboter. Dissertation. Bd. 178. Fertigungstechnik - Erlangen. Bamberg: Meisenbach. 2006. ISBN: 978-3-87525-250-7.

RUSSELL & NORVIG 2010

Russell, S. J.; Norvig, P.: Artificial intelligence: A modern approach. 3rd ed. Prentice Hall series in artificial intelligence. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall. 2010. ISBN: 978-0-13-604259-4.

SATHI & RAO 2009

Sathi, S. V. B.; Rao, P.: STEP to DMIS: Automated generation of inspection plans from CAD data. In: 2009 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2009). Hrsg. von IEEE. 2009, S. 519–524. DOI: 10.1109/COASE.2009.5234154.

SCHEINMAN & MCCARTHY 2008

Scheinman, V.; McCarthy, J. M.: Mechanisms and Actuation. In: Springer handbook of robotics. Hrsg. von B. Siciliano; O. Khatib. Berlin: Springer. 2008, S. 67–86. ISBN: 978-3-540-30301-5.

SCHMITT et al. 2010

Schmitt, R.; Nisch, S.; Schonberg, A.; Demeester, F.; Renders, S.: Performance evaluation of iGPS for industrial applications. In: 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Hrsg. von R. Mautz. Piscataway, NJ: IEEE. 2010, S. 1–8. ISBN: 978-1-4244-5862-2. DOI: 10.1109/IPIN.2010.5647630.

SCHNEIDER et al. 2015

Schneider, U.; Diaz Posada, J. R.; Verl, A.: Automatic pose optimization for robotic processes. In: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. IEEE. 2015, S. 2054–2059. ISBN: 978-1-4799-6923-4. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139468.

SCHRÖER 1993

Schröer, K.: Identifikation von Kalibrationsparametern kinematischer Ketten. Dissertation. Bd. 126. Produktionstechnik - Berlin. München: Hanser. 1993. ISBN: 3446176500.

SCHRÖER 1994

Schröer, K.: Robocal—the IPK robot calibration package. *Industrial Robot: An International Journal* 21 (1994) 6, S. 35–39. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/EUM00000000004172.

SCHRÖER 1998

Schröer, K.: *Handbook on robot performance testing and calibration*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. 1998. ISBN: 3-8167-5200-4.

SCHRÖER et al. 1997

Schröer, K.; Albright, S. L.; Grethlein, M.: Complete, minimal and model-continuous kinematic models for robot calibration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 13 (1997) 1, S. 73–85. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/S0736-5845(96)00025-7.

SCIAVICCO & SICILIANO 2000

Sciavicco, L.; Siciliano, B.: *Modelling and control of robot manipulators*. 2nd ed. *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. London: Springer. 2000. ISBN: 1-85233-221-2.

SHIAKOLAS et al. 2002

Shiakolas, P. S.; Conrad, K. L.; Yih, T. C.: On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots. *International journal of modelling and simulation* 22 (2002) 4, S. 245–254. ISSN: 0228-6203.

SLAMANI, JOUBAIR et al. 2015

Slamani, M.; Joubair, A.; Bonev, I. A.: A comparative evaluation of three industrial robots using three reference measuring techniques. *Industrial Robot: An International Journal* 42 (2015) 6, S. 572–585. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/IR-05-2015-0088.

SLAMANI, NUBIOLA et al. 2012a

Slamani, M.; Nubiola, A.; Bonev, I. A.: Assessment of the positioning performance of an industrial robot. *Industrial Robot: An International Journal* 39 (2012) 1, S. 57–68. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/01439911211192501.

SLAMANI, NUBIOLA et al. 2012b

Slamani, M.; Nubiola, A.; Bonev, I. A.: Modeling and assessment of the backlash

error of an industrial robot. *Robotica* 30 (2012) 07, S. 1167–1175. ISSN: 0263-5747. DOI: 10.1017/S0263574711001287.

STONE & SANDERSON 1988

Stone, H. W.; Sanderson, A. C.: Statistical performance evaluation of the S-model arm signature identification technique. In: 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. 1988, S. 939–946. DOI: 10.1109/ROBOT.1988.12180.

STONE, SANDERSON & NEUMAN 1986

Stone, H. W.; Sanderson, A. C.; Neuman, C.: Arm signature identification. In: 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. 1986, S. 41–48. DOI: 10.1109/ROBOT.1986.1087664.

SUCAN et al. 2012

Sucan, I. A.; Moll, M.; Kavraki, L. E.: The Open Motion Planning Library. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19 (2012) 4, S. 72–82. ISSN: 1070-9932. DOI: 10.1109/MRA.2012.2205651.

SUN & HOLLERBACH 2008

Sun, Y.; Hollerbach, J. M.: Observability index selection for robot calibration. In: 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. [Piscataway, N.J.]: IEEE Xplore. 2008, S. 831–836. ISBN: 978-1-4244-1646-2. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543308.

ŠVACO et al. 2014

Švaco, M.; Šekoranja, B.; Šuligoj, F.; Jerbić, B.: Calibration of an Industrial Robot Using a Stereo Vision System. *Procedia Engineering* 69 (2014), S. 459–463. ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.012.

SZALKAI 2018

Szalkai, B.: Satsuma Graph Library. URL: <http://satsumagraph.sourceforge.net/> (besucht am 15.01.2019).

TAEK OH 2011

Taek Oh, Y.: Influence of the joint angular characteristics on the accuracy of industrial robots. *Industrial Robot: An International Journal* 38 (2011) 4, S. 406–418. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/01439911111132094.

TEKOUO MOUTCHIHIO 2012

Tekouo Moutchiho, W. B.: A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection Systems. Dissertation. München. 2012.

THOMASON 2018

Thomason, L.: TinyXML-2. URL: <https://github.com/leethomason/tinyxml2> (besucht am 02.02.2019).

TÖPFER 2010

Töpfer, A.: Erfolgreich Forschen - Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden. Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin & Heidelberg: Springer. 2010. ISBN: 978-3-642-13901-7.

TSIANOS et al. 2007

Tsianos, K. I.; Sucan, I. A.; Kavraki, L. E.: Sampling-based robot motion planning: Towards realistic applications. Computer Science Review 1 (2007) 1, S. 2–11. ISSN: 15740137. DOI: 10.1016/j.cosrev.2007.08.002.

M. ULRICH 2018

Ulrich, M.: 3D-Image-Stitching für roboterbasierte Messsysteme. Dissertation. München. 2018. URL: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20180309-1363147-1-5>.

M. ULRICH, FORSTNER et al. 2015

Ulrich, M.; Forstner, A.; Reinhart, G.: High Accuracy 3D Image Stitching for Robot-Based Inspections Systems. In: 2015 IEEE International Conference on Image Processing. Hrsg. von IEEE. 2015.

M. ULRICH, LUX, JÜRGENSEN et al. 2016

Ulrich, M.; Lux, G.; Jürgensen, L.; Reinhart, G.: Automated and Cycle Time Optimized Path Planning for Robot-Based Inspection Systems. Procedia CIRP 44 (2016), S. 377–382. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.021.

M. ULRICH, LUX & PIPREK 2014

Ulrich, M.; Lux, G.; Piprek, T.: Analysis and Visualisation of the Positioning Accuracy and Underlying Effects of Industrial Robots. Advanced Materials Research 1018 (2014), S. 15–22. ISSN: 1662-8985. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.15.

P. ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Wirtschaftswissenschaften. *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* 5 (1976) 7+8.

VDI 2861 1988

VDI 2861: Montage- und Handhabungstechnik - Kenngrößen für Industrieroboter - Einsatzspezifische Kenngrößen - Blatt 2. 1988.

VEITSCHEGGER & C.-H. WU 1988

Veitschegger, W. K.; Wu, C.-H.: Robot calibration and compensation. *IEEE Journal on Robotics and Automation* 4 (1988) 6, S. 643–656. ISSN: 0882-4967. DOI: 10.1109/56.9302.

VEITSCHEGGER & C.-H. WU 1986

Veitschegger, W. K.; Wu, C.-H.: Robot accuracy analysis based on kinematics. *IEEE Journal on Robotics and Automation* 2 (1986) 3, S. 171–179. ISSN: 0882-4967. DOI: 10.1109/JRA.1986.1087054.

VICK et al. 2015

Vick, A.; Vonasek, V.; Penicka, R.; Kruger, J.: Robot control as a service — Towards cloud-based motion planning and control for industrial robots. In: 2015 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo). Hrsg. von IEEE. IEEE. 2015, S. 33–39. ISBN: 978-1-4799-7043-8. DOI: 10.1109/RoMoCo.2015.7219710.

WALDRON & SCHMIEDELER 2008

Waldron, K.; Schmiedeler, J.: Kinematics. In: *Springer handbook of robotics*. Hrsg. von B. Siciliano; O. Khatib. Berlin: Springer. 2008, S. 9–33. ISBN: 978-3-540-30301-5.

H. WANG, LU et al. 2015

Wang, H.; Lu, X.; Hu, Z.; Li, Y.: A vision-based fully-automatic calibration method for hand-eye serial robot. *Industrial Robot: An International Journal* 42 (2015) 1, S. 64–73. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/IR-06-2014-0352.

H. WANG, SHEN et al. 2012

Wang, H.; Shen, S.; Lu, X.: A screw axis identification method for serial robot

calibration based on the POE model. *Industrial Robot: An International Journal* 39 (2012) 2, S. 146–153. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/01439911211201609.

W. WANG et al. 2014

Wang, W.; Wang, G.; Yun, C.: A calibration method of kinematic parameters for serial industrial robots. *Industrial Robot: An International Journal* 41 (2014) 2, S. 157–165. ISSN: 0143-991X. DOI: 10.1108/IR-06-2013-369.

WASSERMANN et al. 2018

Wassermann, J.; Vick, A.; Krüger, J.: Intuitive robot programming through environment perception, augmented reality simulation and automated program verification. *Procedia CIRP* 76 (2018), S. 161–166. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2018.01.036.

WATANABE et al. 2006

Watanabe, A.; Sakakibara, S.; Ban, K.; Yamada, M.; Shen, G.; Arai, T.: A Kinematic Calibration Method for Industrial Robots Using Autonomous Visual Measurement. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (2006) 1, S. 1–6. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60353-9.

WEBER 2009

Weber, W.: *Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung*. 2., neu bearbeitete Auflage. München: Hanser Verlag. 2009. ISBN: 978-3-446-41031-2.

WECKENMANN et al. 2009

Weckenmann, A.; Jiang, X.; Sommer, K.-D.; Neuschaefer-Rube, U.; Seewig, J.; Shaw, L.; Estler, T.: Multisensor data fusion in dimensional metrology. *CIRP Annals* 58 (2009) 2, S. 701–721. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.008.

WUEST 2001

Wiest, U.: *Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern*. Dissertation. Berichte aus der Automatisierungstechnik. Aachen: Shaker. 2001. ISBN: 978-3-8265-8609-5.

WIORA 2001

Wiora, G.: *Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestalt-Vermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren*. Dissertation. 2001.

L. WU et al. 2016

Wu, L.; Wang, J.; Qi, L.; Wu, K.; Ren, H.; Meng, M. Q.-H.: Simultaneous Hand-Eye, Tool-Flange, and Robot-Robot Calibration for Comanipulation by Solving the  $AXB=YCZ$  Problem. *IEEE Transactions on Robotics* 32 (2016) 2, S. 413–428. ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2016.2530079.

YIN, REN, GUO et al. 2014

Yin, S.; Ren, Y.; Guo, Y.; Zhu, J.; Yang, S.; Ye, S.: Development and calibration of an integrated 3D scanning system for high-accuracy large-scale metrology. *Measurement* 54 (2014), S. 65–76. ISSN: 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.04.009.

YIN, REN, ZHU et al. 2013

Yin, S.; Ren, Y.; Zhu, J.; Yang, S.; Ye, S.: A vision-based self-calibration method for robotic visual inspection systems. *Sensors (Basel, Switzerland)* 13 (2013) 12, S. 16565–16582. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s131216565.

ZACHER 2004

Zacher, M.: Integration eines optischen 3D-Sensors in ein Koordinatenmessgerät für die Digitalisierung komplexer Oberflächen. Dissertation. Bd. 3. Berichte aus der Produktionstechnik. Aachen: Shaker. 2004. ISBN: 3-8322-2351-7.

ZHANG et al. 2015

Zhang, H.; Ahmad, S.; Liu, G.: Torque Estimation for Robotic Joint With Harmonic Drive Transmission Based on Position Measurements. *IEEE Transactions on Robotics* 31 (2015) 2, S. 322–330. ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2015.2402511.

ZHONG & LEWIS 1995

Zhong, X.-L.; Lewis, J. M.: A new method for autonomous robot calibration. In: 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. Los Alamitos, Calif.: IEEE Computer Society Press. 1995, S. 1790–1795. ISBN: 0-7803-1965-6. DOI: 10.1109/ROBOT.1995.525529.

ZHUANG, ROTH et al. 1992

Zhuang, H.; Roth, Z. S.; Hamano, F.: A complete and parametrically continuous

kinematic model for robot manipulators. IEEE Transactions on Robotics and Automation 8 (1992) 4, S. 451–463. ISSN: 1042296X. DOI: 10.1109/70.149944.

ZHUANG, K. WANG et al. 1994

Zhuang, H.; Wang, K.; Roth, Z. S.: Optimal selection of measurement configurations for robot calibration using simulated annealing. In: 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hrsg. von IEEE. IEEE Xplore. 1994, S. 393–398. ISBN: 0-8186-5330-2. DOI: 10.1109/ROBOT.1994.351264.

# Anhang

## A.1 Grundlagen der Koordinatenmesstechnik

Das Ziel der Koordinatenmesstechnik ist die Feststellung und Quantifizierung von geometrischen Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Gestalt eines Prüfobjektes.

Hierfür wird die Oberfläche des Prüfobjektes punktweise in einem Koordinatensystem abgetastet. Die resultierende Menge der dreidimensionalen Punkte wird hierbei auch als Punktwolke (Gleichung A.1) bezeichnet und beinhaltet die Koordinatentripel der erfassten Punkte in einem kartesischen Koordinatensystem (ZACHER 2004, S. 18).

$$P = \{(x_i, y_i, z_i) \mid x_i \in \mathbb{R}, y_i \in \mathbb{R}, z_i \in \mathbb{R}, i = 1 \dots n_{pw}\} \quad (\text{A.1})$$

Aus den erfassten Punkten werden die zu ermittelnden Merkmale rekonstruiert und mit der Sollgestalt verglichen. Ein quantitatives Merkmal (Variablenmerkmal) entspricht hierbei einer Eigenschaft des Prüfobjektes, die als Messwert ausgegeben werden kann. Merkmale lassen sich hierbei in folgende Merkmalsgruppen unterteilen (KEFERSTEIN & MARXER 2015, S. 58):

- Maße, Abstände, Winkel
- Formabweichungen
- Lagebeziehungen

Die Position und Orientierung eines Merkmals im Bezugskordinatensystem wird als Merkmalspose bezeichnet.

Die Soll-Gestalt des Prüfobjekts sowie die den Merkmalen zuzuordnenden Geometrielemente werden in einem Prüfplan<sup>67</sup> zusammengefasst und dienen zusammen mit den Computer-Aided-Design-Daten (CAD-Daten) als Datenbasis für die Koordinatenmesstechnik.

Im Rahmen der Auswertung werden geometrische Ausgleichselemente aus den erfassten Oberflächenpunkten bestimmt. Da meist eine große Anzahl an Oberflächenpunkten erfasst wird, werden hierfür die Geometrielemente mittels Regressionsmethoden an die erfassten Daten angepasst. Zur Beschreibung von Position

---

<sup>67</sup>Ein Prüfplan kann hierbei manuell oder automatisiert aus den CAD-Daten erzeugt werden (SATHI & RAO 2009).

---

und Orientierung des zugeordneten Geometrieelements werden merkmalseigene Koordinatensysteme verwendet.

Das Ergebnis wird abschließend in Form eines Prüfberichts dokumentiert und gegebenenfalls visualisiert. Typischerweise wird hierfür auf Basis der CAD-Daten eine farbkodierte Darstellung des Prüfobjekts zur Abbildung der geometrischen Abweichungen generiert.

### A.1.1 Klassifizierung von Messsystemen

Im Kontext der Koordinatenmesstechnik kann gemäß der Einsatzorte zwischen produktionslinienintegrierten („In-Line“), produktionsliniennahen („At-Line“) und von der Produktionslinie entkoppelten („Off-Line“) Messsystemen unterschieden werden.

In-Line Messsysteme sind an die Taktzeit gebunden und prüfen in der Regel ausgewählte Merkmale an jedem Produkt innerhalb der Produktionslinie.

At-Line Systeme sind nicht unmittelbar in die Produktionslinie integriert und prüfen Produkte, welche gezielt (beispielsweise stichprobenartig) aus der Linie ausgeschleust werden. Solche Systeme werden maßgeblich im Hinblick auf einen flexiblen, kostengünstigen Einsatz im Produktionsumfeld entwickelt.

Die Off-Line Messtechnik ist von der Produktionslinie zeitlich sowie räumlich entkoppelt und dient meist der Bemusterung und geometrischen Untersuchung der Gesamtheit von Merkmalen bei Prüfobjekten. Off-Line Messsysteme wie Koordinatenmessgeräte (KMGs) sind meist für sehr definierte Umgebungsbedingungen wie beispielsweise den Einsatz in Messräumen (KEFERSTEIN & MARXER 2015, S. 127–130) ausgelegt und daher nur begrenzt für den Einsatz im Produktionsumfeld geeignet (YIN, REN, GUO et al. 2014). Diese zeichnen sich insbesondere durch eine hohe Genauigkeit aus.

Darüber hinaus können Koordinatenmesssysteme anhand ihres Aufbaus und der verwendeten Komponenten klassifiziert werden. Hierbei kann zwischen der eingesetzten Sensorik zur Erfassung von Oberflächenpunkten des Prüfobjektes, der handhabenden Kinematik und dem referenzierenden System unterschieden werden.

Das referenzierende System dient hierbei der Registrierung<sup>68</sup> der ermittelten Oberflächenpunkte in einem prüfobjektübergreifenden Koordinatensystem.

Sensorseitig wird zwischen berührungsgebundener (taktile) und berührungsloser Sensorik unterschieden (LEE & PARK 2000). Bei berührungsgebundenen Sensoren besteht ein physischer Kontakt zwischen Sensor und Prüfobjekt. Typischerweise werden solche Sensoren bei Koordinatenmessgeräten in Form von schaltenden taktilen Kugelmessrastern eingesetzt, um den Kontakt des Messkopfes mit der Werkstückoberfläche zu detektieren. Neben rein schaltenden Ausführungen des Messkopfes existieren auch taktil messende Sensoren.

Im Gegensatz zu berührungsgebundener Sensorik erfordern berührungslose Sensoren keinen physischen Kontakt zum Prüfobjekt. Besonders durch Fortschritte im Bereich der Computertechnik, Sensortechnik, Optoelektronik und Beleuchtungstechnik finden vermehrt optische Sensoren Einzug in die Koordinatenmesstechnik.

Bezüglich der handhabenden Kinematik kann zwischen Koordinatenmessgeräten, Vielstellenmesseinrichtungen und handgeführter, extern referenzierter Messtechnik sowie roboterbasierten Messsystemen unterschieden werden.

Koordinatenmessgeräte (KMGs) werden meist Off-Line eingesetzt und zeichnen sich durch eine hohe Messgenauigkeit aus. Solche Systeme bestehen überwiegend aus einer kartesischen Portalkinematik, welche meist mit einem Tastkopf ausgerüstet ist. Die Registrierung der Oberflächenpunkte erfolgt hierbei durch die Berechnung des Antastpunktes auf Basis der Kinematik. Neben der taktilen Messung existieren Ansätze, die Kinematik mit optischen Sensoren zu kombinieren. Die Messgeschwindigkeit ist bei taktilen Verfahren durch die mehrfache Antastung je Merkmal sowie die Geschwindigkeit der Kinematik begrenzt. Darüber hinaus sind Koordinatenmessgeräte meist mit sehr hohen Investitionskosten verbunden und erfordern oftmals Rahmenbedingungen, welche im produktionsnahen Umfeld nicht oder nur mit hohem Aufwand realisierbar sind.

Vielstellenmesseinrichtungen bestehen aus mehreren, meist berührungslos arbeitenden Sensoren, welche im Rahmen der Inbetriebnahme zueinander referenziert

---

<sup>68</sup>Die Registrierung bezeichnet die Bestimmung der Transformationen zur Überführung der Daten in ein gemeinsames Koordinatensystem (WECKENMANN et al. 2009).

---

werden und folglich synchron mehrere Merkmale erfassen können. Von Vorteil ist die hohe Messgeschwindigkeit zur Erfassung mehrerer Merkmale, weshalb solche Systeme meist In-Line zum Einsatz kommen. Demgegenüber stehen hohe Investitionskosten durch die Vielzahl an Sensoren sowie der hohe Inbetriebnahmeaufwand durch die Referenzierung der Sensoren zueinander. (ROOKS 2001)

Bei handgeführten Messmitteln wird der Sensor zur Messung von Oberflächenpunkten vom Anwender an das Prüfobjekt herangeführt, während die Pose des Sensors im Raum von einem externen Referenzierungssystem, beispielsweise einem Lasertrackersystem, erfasst wird. Besonders in Kombination mit optischen Sensoren können hierdurch sehr flexible Systeme zur Koordinatenmesstechnik realisiert werden. Nachteilig erweisen sich insbesondere Einschränkungen durch die notwendige Sichtverbindung des Sensors zum Referenzsystem. Darüber hinaus sind den Genauigkeitsanforderungen entsprechende Referenzierungssysteme für Position und Orientierung des Sensors mit hohen Investitionskosten verbunden und erfordern Expertise vom Anwender.

Roboterbasierte Messsysteme bestehen aus einem Industrieroboter und einem durch diesen geführten Sensor. Im Kontext der Koordinatenmesstechnik werden meist optische 3D-Sensoren eingesetzt. Die Roboterkinematik erfüllt hierbei eine handhabende als auch referenzierende Aufgabe. Ein solches System zeichnet sich besonders durch die Flexibilität und hohe Messgeschwindigkeit aus. Darüber hinaus sind die einzelnen Komponenten auf das Produktionsumfeld ausgelegt und besitzen geringe Investitions- und Betriebskosten.

### A.1.2 Optische Sensoren in der Koordinatenmesstechnik

Optische Sensoren erhalten aufgrund der erreichbaren Genauigkeit und Messgeschwindigkeit zunehmend Einzug in messtechnische Anwendungen (LEE & PARK 2000). Die dreidimensionale Messdatenerfassung bildet hierbei die Grundlage der realitätsnahen Abbildung einer Objektoberfläche in Form von Punktwolken. Abbildung A.1 stellt die Klassifikation gängiger optischer 3D-Messverfahren nach deren Funktionsprinzip dar.

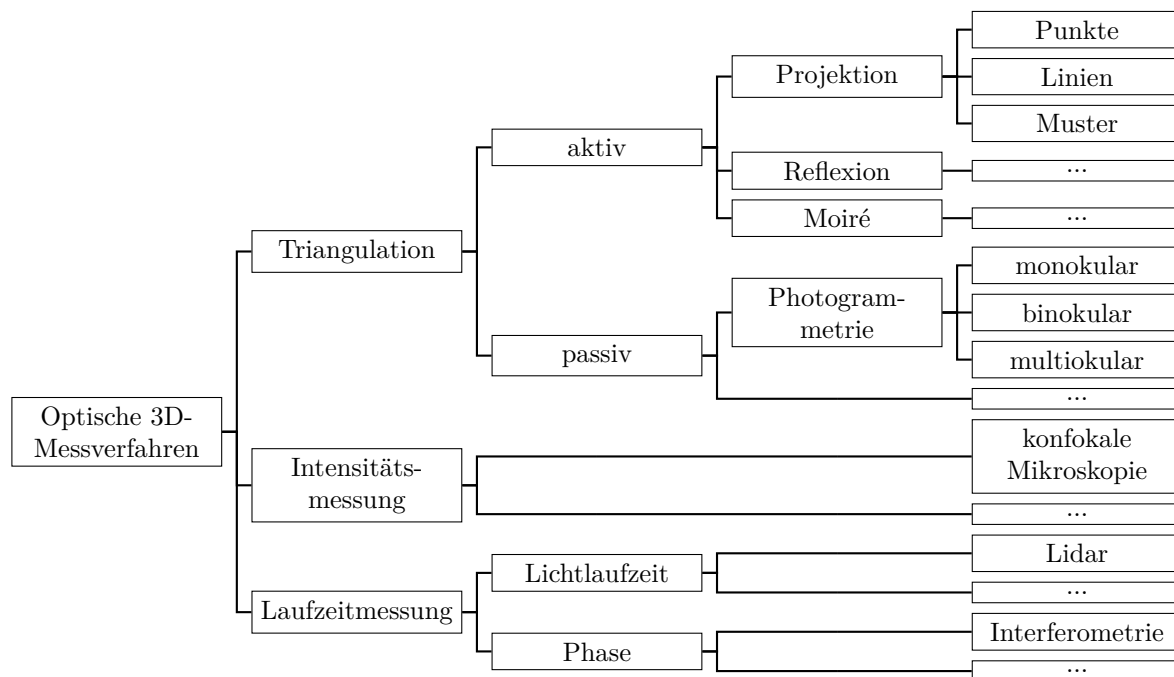


Abbildung A.1: Klassifizierung optischer 3D-Messverfahren (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an BEYERER et al. 2012, S. 431).

Aufgrund des typischen Messbereiches (Größenordnung 1 m) und Genauigkeitsanforderungen (Größenordnung  $100\ \mu\text{m}$ ) von koordinatenmesstechnischen Anwendungen sind Triangulationsverfahren und interferometrische Verfahren industriell weit verbreitet. Nachfolgend sollen daher diese beiden Messverfahren und zugehörige Sensorsysteme detaillierter beschrieben werden. Für die Grundlagen weiterer Messverfahren sei auf BEYERER et al. (2012) verwiesen.

## Triangulationsverfahren

Optische Triangulationsverfahren nutzen trigonometrische Zusammenhänge, um ausgehend von bekannten geometrischen Relationen auf nicht direkt messbare Zielgrößen zu schließen. Hierbei wird zwischen aktiver und passiver Triangulation unterschieden (BEYERER et al. 2012, S. 272).

Passive Triangulationsverfahren beruhen auf der Beobachtung eines Objektpunktes ausgehend von mindestens zwei bekannten Standpunkten. Hierbei werden auf Basis der Beobachtungsrichtungen und des bekannten Abstandes zwischen den Standpunkten die Koordinaten des Objektpunktes bestimmt (JÄHNE 2012,

S. 262). Dies wird beispielsweise durch zwei zueinander referenzierte Kameras (Photogrammetrie) realisiert (JÄHNE 2012, S. 264–265). Hierbei werden die korrespondierenden Bildpunkte identifiziert und zur Bestimmung der Objektpunktkoordinaten verwendet. (BEYERER et al. 2012, S. 341–343)

Abbildung A.2 stellt schematisch einen Photogrammetriesensor bestehend aus zwei bildgebenden Kameras dar.

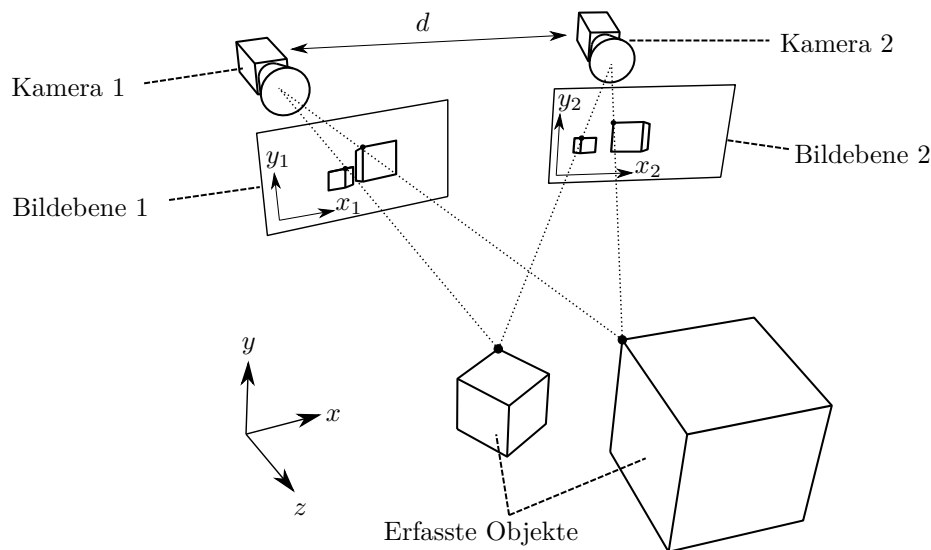


Abbildung A.2: Schematische Darstellung der auf passiver Triangulation beruhenden Funktionsweise eines Photogrammetriesensors bestehend aus zwei bildgebenden Kameras (Stereokamera) mit definiertem Abstand  $d$  (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an WIORA 2001, S. 8; HAMFELD 2001, S. 27 und ZACHER 2004, S. 14).

Bei der aktiven Triangulation wird eine Lichtquelle zur Mustererzeugung verwendet, welche wiederum definiert zu einem bildgebenden Sensor positioniert ist. Neben Streifenlichtprojektionssysteme werden meist Lasertriangulationssensoren eingesetzt.

Abbildung A.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau und Funktionsweise eines aktiven, eindimensionalen Triangulationssensors. Hierbei projiziert eine Laserquelle einen fokussierten Strahl auf die Oberfläche des Messobjektes. Die reflektierte Lichtstrahlung wird meist mithilfe optischer Systeme auf einen lichtempfindlichen Liniensensor (meist CCD- beziehungsweise CMOS-Sensoren) abgebildet. In Abhängigkeit

des Objektabstandes zum Sensor variiert die Schwerpunktposition der reflektierten Strahlung auf dem lichtempfindlichen Sensor (vgl. Abbildung A.3 a).

Hierbei wird die Objektoberfläche als diffus reflektierend angenommen, um eine Lichtstreuung in Richtung des Sensors zu gewährleisten. Die resultierende Streuung setzt sich hierbei aus einem gerichteten Reflexionsanteil und einem ideal diffusen Anteil (Lambertsches Gesetz) zusammen (vgl. Abbildung A.3 b). Diese Bedingung ist bis auf stark reflektierende Oberflächen gegeben (BEYERER et al. 2012, S. 85–86).

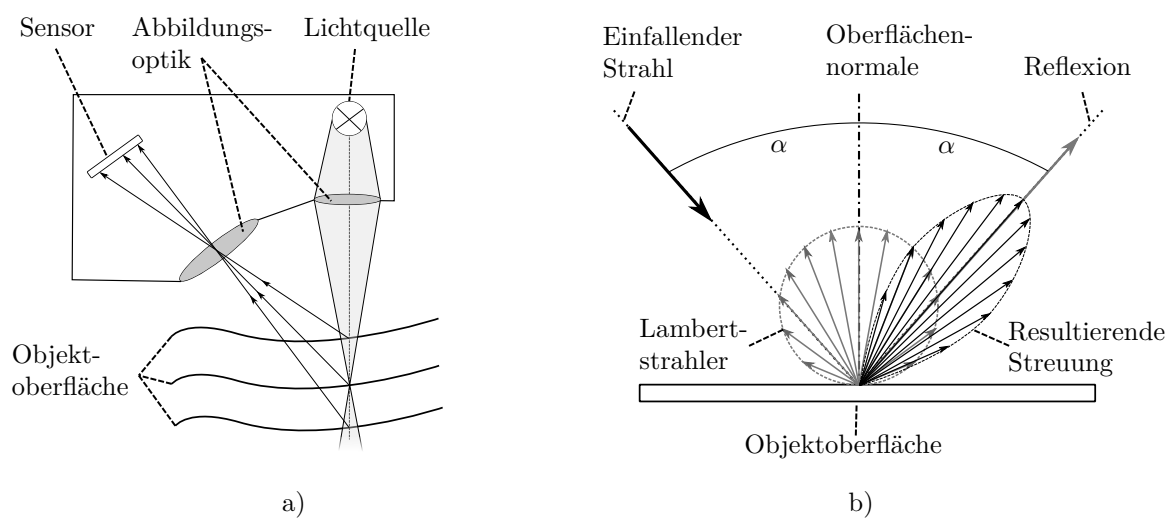
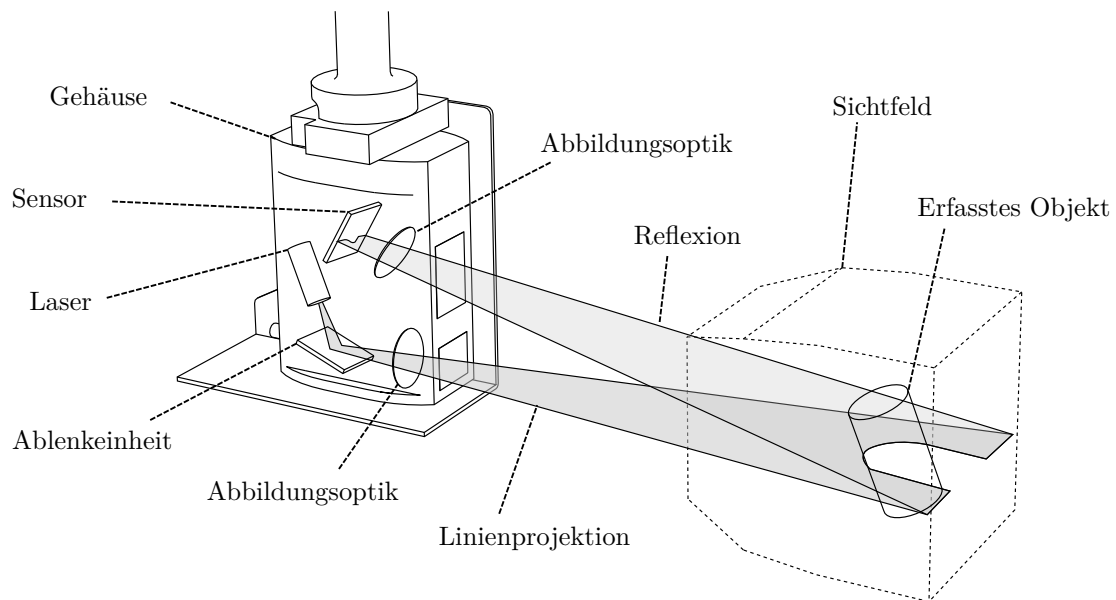


Abbildung A.3: Funktionsweise eines aktiven, eindimensionalen Lasertriangulationssensors: a) Aufbau und Komponenten eines 1D-Lasertriangulationssensors sowie Einfluss des Objektabstands auf den Strahlengang (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an KEFERSTEIN & MARXER 2015, S. 204 und BEYERER et al. 2012, S. 304), b) Streuung eines fokussierten Lichtstrahls an einer Objektoberfläche als Mischform aus diffuser Streuung und Reflexion (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an BEYERER et al. 2012, S. 86).

Wird die Projektion mit einer speziellen Optik auf eine Linienprojektion erweitert und die lichtempfindliche Detektionseinheit als Flächensensor realisiert, spricht man vom Laserlichtschnittverfahren. Auf Basis dieses Verfahrens lässt sich durch eine geeignete Ablenkeinheit ein flächenhaft antastender Lasertriangulationssensor

realisieren. Aufgrund der Erweiterung des zweidimensionalen Laserlichtschnittverfahrens bezeichnet man solche Sensoren auch als 2,5D-Sensoren. Abbildung A.4 illustriert den Aufbau eines 3D-Lasertriangulationssensors zur flächenhaften Antastung einer Objektoberfläche.



*Abbildung A.4: Schematische Darstellung des Aufbaus eines 3D-Lasertriangulationssensors zur flächenhaften Antastung einer Objektoberfläche (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an BEYERER et al. 2012, S. 311 und HESSE & SCHNELL 2008, S. 289).*

Prinzipiell sind Triangulationssensoren auf die Erfassung von Oberflächen ohne Hinterschneidungen und Hohlräume beschränkt. Dementsprechend muss der Sensor relativ zum zu erfassenden Merkmal entsprechend positioniert und orientiert werden.

## Interferometrische Verfahren

Grundlage von optischen, interferometrischen Verfahren bildet die Überlagerung von kohärentem Licht und die Ausnutzung dessen Wellencharakters. Hierbei variiert die Lichtintensität in einem bestimmten Punkt in Abhängigkeit der Phasenverschiebung von überlagerten Wellen. Technisch wird ein Interferometer meist

durch eine kohärente Lichtquelle und einen Strahlteiler, welcher den emittierten Strahl in zwei Strahlwege aufteilt, realisiert. Die überlagerten Strahlengänge interferieren in Abhängigkeit der Längenverhältnisse der Strahlen. Die Lichtwellen löschen sich aus oder verstärken die Intensität am Detektor. Die relative Längeninformation kann folglich durch Auswertung des Intensitätsverlaufs ermittelt werden (Distanzinterferometrie). Abbildung A.5 b) illustriert am Beispiel eines Michelson-Interferometers den Aufbau (BEYERER et al. 2012, S. 371–372; JÄHNE 2012, S. 263).

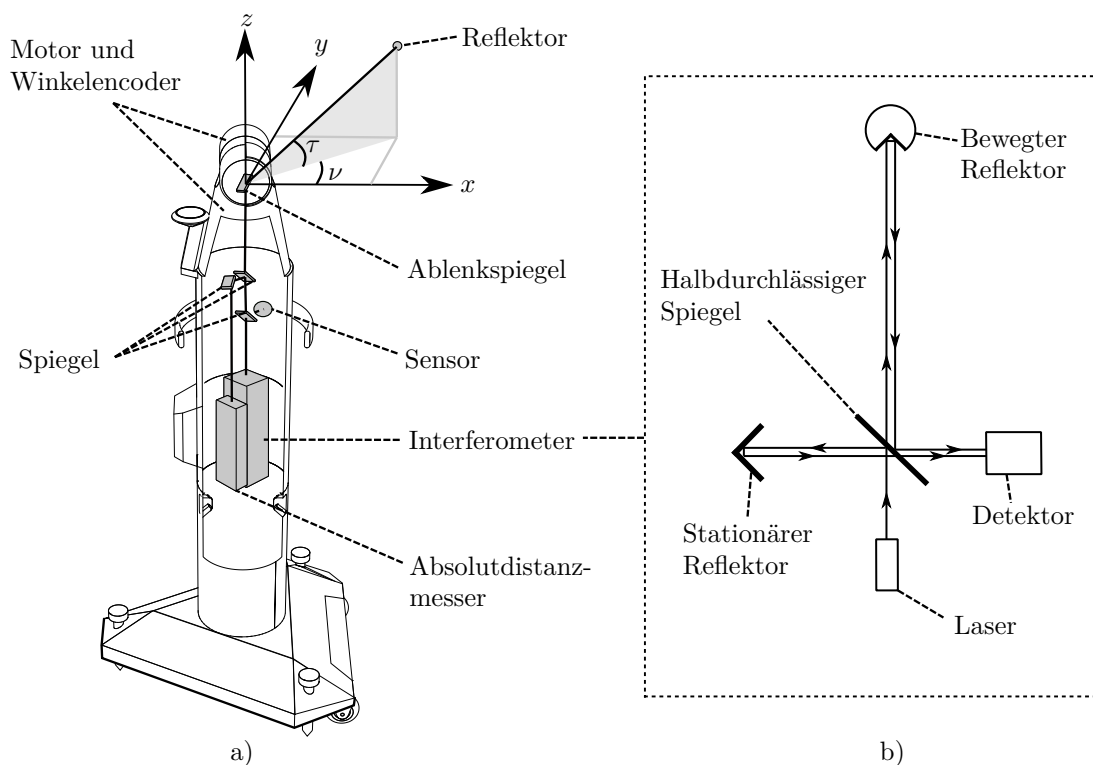


Abbildung A.5: Schematische Darstellung eines 3D-Lasertrackers: a) Aufbau und Komponenten eines 3D-Lasertrackers (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an PRENNINGER et al. 1995 und AOYAGI et al. 2010), b) Funktionsweise und Aufbau eines Michelson-Interferometers (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an KEFERSTEIN & MARXER 2015, S. 26 und BEYERER et al. 2012, S. 372).

Wird das Messverfahren der Distanzinterferometrie mit einer Richtungsmessung (tachymetrische Verfahren) kombiniert, kann die Position im Raum erfasst werden. Ein solches System wird als Lasertracker bezeichnet. Technisch wird hierfür ein

---

Reflektor, welcher den einfallenden Lichtstrahl in derselben Richtung reflektiert, verwendet (WIEST 2001, S. 43). Abbildung A.5 a) zeigt den schematischen Aufbau eines 3D-Lasertrackers.

### A.1.3 Registrierung von Punktwolken

Für die messtechnische Repräsentation des Prüfobjektes wird die Oberfläche punktweise in einem gemeinsamen Koordinatensystem erfasst. Bedingt durch die technische Realisierung der verwendeten Sensorik kann in der Regel jedoch nur eine Teilmenge der Oberflächenpunkte aus einer stationären Sensorpose erfasst werden. Der Sensor muss folglich zur Erfassung der notwendigen Oberflächenpunkte in mehrere Posen überführt werden.

Die Registrierung der Punktwolken bezeichnet in diesem Zusammenhang die Bestimmung der Transformation zur Überführung der erfassten Messdaten in ein gemeinsames Koordinatensystem. Abbildung A.6 stellt schematisch gängige Realisierungsmöglichkeiten zur Registrierung von Einzelaufnahmen in der Koordinatenmesstechnik dar.

Technisch kann die Registrierung durch die Erfassung der Sensorpose realisiert werden. Hierfür kann ein externes Messsystem (beispielsweise Lasertracker JIANG et al. 2016 oder ein „indoor global positioning system“ (iGPS) (SCHMITT et al. 2010)) verwendet oder die handhabende Kinematik (Roboter GREENWAY 2000, Kinematik eines Koordinatenmessgeräts) genutzt werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Ausnutzung stationärer Merkmale, welche zwischen den Einzelaufnahmen in Bezug zueinander gebracht werden können. Hierzu zählen in das Erfassungsvolumen des Sensors eingebrachte Referenzmarken (beispielsweise bei photogrammetrischen Verfahren) (KEFERSTEIN & MARXER 2015, S. 239) und externe, statische Projektionen (M. ULRICH, FORSTNER et al. 2015; M. ULRICH 2018, S. 61–63). Solche Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass die stationären Merkmale von der handhabenden Kinematik und somit von der Bewegung des Sensors entkoppelt sind.

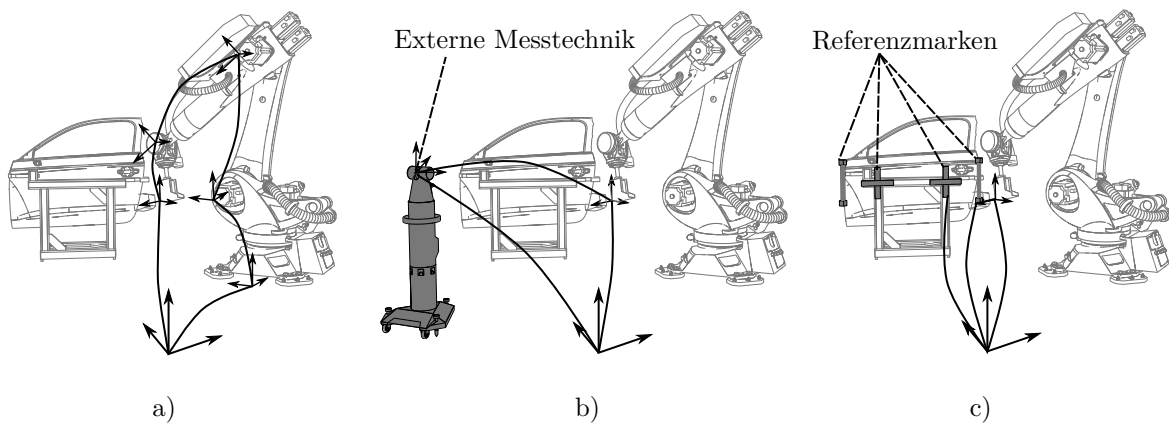


Abbildung A.6: Gängige Registrierungsverfahren von Punktwolken am Beispiel eines roboterbasierten Messsystems (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an M. ULRICH 2018, S. 10): a) Registrierung durch Berechnung der Sensorpose auf Basis der handhabenden Kinetik, b) Registrierung durch die Erfassung der Sensorpose mit externer Messtechnik, c) Registrierung anhand korrespondierender Punkte oder Merkmale (beispielsweise stationäre Referenzmarken) zwischen mehreren Aufnahmen.

---

## A.2 Grundlagen von Industrierobotern

Ein Industrieroboter wird nach EN ISO 8373 (1996, S. 2) definiert als „Automatisch gesteuerter, frei programmierbarer Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein kann.“

Im Allgemeinen besteht ein Industrieroboter aus einem Manipulator, welcher durch die Kinematik charakterisiert ist, einer Steuereinheit und einem Endeffektor<sup>69</sup> sowie ggf. zusätzlichen Peripheriegeräten (MAIER 2016, S. 36).

Die Kinematik eines Roboters beschreibt dessen mechanischen Aufbau und die Anordnung der Roboterachsen zueinander. Typischerweise kommt bei der Roboterkinematik eine Kombination von Rotations- und Translationsachsen zum Einsatz. Die strukturellen Verbindungselemente zwischen den Achsen werden auch als Roboterglieder (kurz: Glieder) bezeichnet (EN ISO 8373 1996, S. 3).

### A.2.1 Bauformen

Die Bauformen von Industrierobotern werden typischerweise anhand ihrer Kinematik klassifiziert. Hierbei kann zwischen serieller und paralleler Kinematik unterschieden werden (HÄGELE et al. 2008, S. 975; MAIER 2016, S. 84). Abbildung A.7 zeigt die Einordnung typischer Roboterbauformen.

---

<sup>69</sup> „Vorrichtung, die speziell zum Anbringen an die mechanische Schnittstelle [...] konzipiert ist, mit der der Roboter [...] seine Aufgabe erfüllt.“ (EN ISO 8373 1996, S. 3)

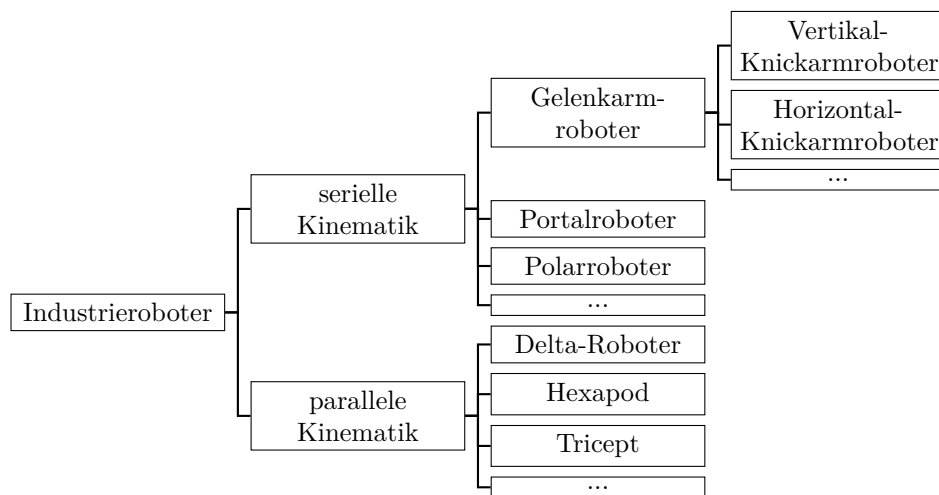


Abbildung A.7: Einordnung gängiger Bauformen von Industrierobotern (in Anlehnung an MAIER 2016, S. 84; EN ISO 8373 1996, S. 4 und IFR STATISTICAL DEPARTMENT 2016, S. 26–27).

## Serielle Kinematik

Bei einer seriellen Kinematik sind die Roboterachsen so angeordnet, dass jedes Roboterglied lediglich über eine Achse mit dem vorhergehenden Glied verbunden ist (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 10). Jedes Glied hat hierbei maximal zwei Achsen. Besitzt jedes Glied exakt zwei Achsen, wird die Kinematik als geschlossene Kette bezeichnet, andernfalls als offene Kette. Typische Vertreter offener, serieller Ketten sind Gelenkarmroboter, Portalroboter und Polarroboter. Zu den Gelenkarmrobotern zählen Vertikal-Knickarmroboter, Horizontal-Knickarmroboter wie der „Selectively Compliant Arm for Robotic Assembly“ (SCARA), Dualarm-Roboter und Palettierroboter mit mechanischer Zwangskopplung.

Die am weitesten verbreitete Industrieroboter-Bauform ist der Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen, welcher in Abbildung A.8 schematisch dargestellt ist (IFR STATISTICAL DEPARTMENT 2016, S. 95).

Die Anzahl und Anordnung der Achsen ermöglicht die freie Positionierung und Orientierung des Werkzeugs im Arbeitsraum. Hierbei werden die Achsen in Haupt- und Neben- bzw. Handachsen unterschieden. Die Glieder der Hauptachsen besitzen eine größere geometrische Ausdehnung und bestimmen folglich maßgeblich die Position des Endeffektors im Arbeitsraum des Roboters (WEBER 2009, S. 16).

Die Hand- bzw. Nebenachsen eines Vertikal-Knickarm-Roboters werden technisch meist in Form einer Zentralhand<sup>70</sup> realisiert, um eine einfachere inverse Kinematik zu gewährleisten (MAIER 2016, S. 145).

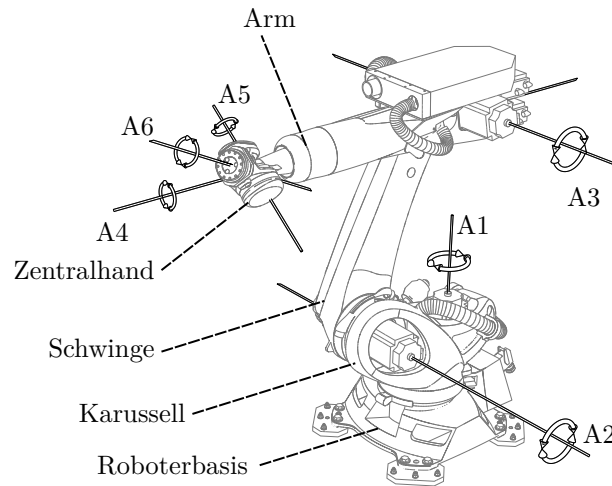


Abbildung A.8: Hauptkomponenten und charakteristische Achsanordnung eines Vertikal-Knickarmroboters (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an MAIER 2016, S. 65).

## Parallele Kinematik

Bei parallelen Kinematiken sind mindestens zwei Achsen parallel angeordnet, sodass die Bewegung der Roboterglieder auf ein gemeinsames, nachfolgendes Glied wirken (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 10). Hierdurch lassen sich insbesondere Robotersysteme mit geringen bewegten Massen realisieren. Industriell sind Delta-, Hexapod- und Tripod-Kinematiken typische Vertreter dieser Bauform.

<sup>70</sup>Als Zentralhand bezeichnet man die Bauform einer Roboterhand, bei der sich die letzten drei Achsen in einem zentralen Punkt schneiden (MAIER 2016, S. 145).

## A.2.2 Roboterkonfiguration und freier Konfigurationsraum

### Roboterkonfiguration

Die Aufgabe der Zustandsgrößen ist die eindeutige Festlegung und Beschreibung des Systems. Der Raum aller möglichen Zustände oder Konfigurationen eines Roboters wird durch dessen charakteristische, messbare Gelenkstellungen aufgespannt und als Konfigurationsraum  $C$  bezeichnet (SCHEINMAN & MCCARTHY 2008, S. 71; KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 110). Bei Robotersystemen entsprechen daher meist die Achswerte den Zustandsgrößen (MURRAY et al. 1994, S. 83–84). Ein Punkt im Konfigurationsraum des Roboters beschreibt den Zustand des Roboters eindeutig und wird als Roboterkonfiguration, Roboterstellung oder auch Roboterpose bezeichnet (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 110; MAIER 2016, S. 105).

Für einen Roboter mit  $n$  Gelenkfreiheitsgraden kann folglich die Konfiguration durch den Vektor der Gelenkstellungen  $\vec{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_n)^T \in \mathbb{R}^n$  angegeben werden (SCHRÖER 1993, S. 7; EN ISO 8373 1996, S. 3). Der Konfigurationsraum  $C \subset \mathbb{R}^n$  fasst unter Berücksichtigung der möglichen Gelenkstellungen (z.B. Achswinkelbeschränkungen) die zulässigen Konfigurationen zusammen (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 110).

Eine stetige Kurve im Konfigurationsraum gemäß einer Abbildung  $\Psi : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^n, t \mapsto \vec{\theta}(t)$  wird als Roboterbahn zwischen der Startkonfiguration  $\vec{\theta}(0)$  und der Zielkonfiguration  $\vec{\theta}(1)$  bezeichnet (LATOMBE 1991, S. 9).

### Hindernisse und freier Konfigurationsraum

Ein Punkt im Konfigurationsraum  $\vec{\theta} \in C$  beschreibt die Konfiguration des Roboters eindeutig (BARRAQUAND & LATOMBE 1991). Unter Berücksichtigung der Geometrie aller Roboterelemente kann folglich die Menge der Punkte  $A(\vec{\theta}) \subset \mathbb{R}^3$ , welche durch den Roboter im Arbeitsraum eingenommen werden, in Abhängigkeit von der Konfiguration bestimmt werden (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 110).

Eine Kollision ist der unbeabsichtigte Kontakt des Roboters mit einem Objekt (auch: Kollisionsobjekt oder Hindernis) in dessen Arbeitsraum (SCHEINMAN & MCCARTHY 2008, S. 71). Dies ist der Fall, wenn ein oder mehrere Punkte

im kartesischen Arbeitsraum sowohl vom Roboter als auch von einem Objekt eingenommen werden. Zur Beschreibung lassen sich die Punkte, welche durch das Objekt  $i$  im Arbeitsraum eingenommen werden, als Menge  $O_i \subset \mathbb{R}^3$  auffassen.

Gemäß Gleichung A.2 entspricht dann die Teilmenge  $C_{O,i} \subset C$  allen Konfigurationen, bei denen Kollisionen zwischen den Geometrieelementen des Roboters  $A(\vec{\theta})$  und dem Hindernis  $O_i$  auftreten (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 110; LAVALLE 2006, S. 155).

$$C_{O,i} = \{\vec{\theta} \in C \mid A(\vec{\theta}) \cap O_i \neq \emptyset\} \quad (\text{A.2})$$

Unter Berücksichtigung aller im Arbeitsraum des Roboters befindlichen Kollisionsobjekte  $O_i$  ergibt sich der freie Konfigurationsraum als Menge aller Konfigurationen, bei denen keine Kollision auftritt (Gleichung A.3). (LATOMBE 1991, S. 10; KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 110; LAVALLE 2006, S. 156)

$$C_{frei} = C \setminus \left( \bigcup_i C_{O,i} \right) \quad (\text{A.3})$$

Die Aufgabe der Bewegungsplanung, das Finden einer kollisionsfreien Roboterbewegung von einer Start- in eine Zielkonfiguration, lässt sich folglich als Identifikation einer Trajektorie im freien Konfigurationsraum beschreiben (SCHEINMAN & MCCARTHY 2008, S. 71).

## Graphentheoretische Repräsentation des freien Konfigurationsraums

Da der freie Konfigurationsraum eine unendliche Menge an kollisionsfreien Konfigurationen darstellt, ist dessen mathematische Darstellung und insbesondere deren Ermittlung anwendungsseitig schwierig. Aus diesem Grund hat sich die Repräsentation des freien Konfigurationsraums mit Hilfe von Graphen etabliert (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 111).

Ein Graph  $G$  besteht hierbei aus einer Menge von Knoten  $V$  (engl.: vertex/vertices) sowie Verbindungen zwischen diesen, den sogenannten Kanten  $E$  (engl.: edge/edges) (DIESTEL 2006, S. 2; JUNGnickel 2013, S. 2).

Eine Kante  $e$  zwischen zwei Knoten  $v_1$  und  $v_2$  kann gerichtet  $e = (v_1, v_2)$  (richtungsabhängig) oder ungerichtet  $e = \{v_1, v_2\}$  (richtungsunabhängig) sein (KRUMKE & NOLTEMEIER 2012, S. 7, 12). Besitzt der Graph mehrere Kanten zwischen zwei Knoten (Mehrfachkanten), so spricht man von einem Multigraphen (DIESTEL 2006, S. 31).

Der Grad  $d_G(v)$  entspricht der Anzahl an Kanten des Knotens  $v$ . Existieren keine Mehrfachkanten und Schlingen (Kante, welche einen Knoten mit sich selbst verbindet) (DIESTEL 2006, S. 30), entspricht der Grad der Anzahl an verbundenen Nachbarknoten. Ein Knoten wird als isoliert bezeichnet, sofern er keine Nachbarn  $d_G = 0$  besitzt (DIESTEL 2006, S. 5).

Wird jeder Kante eine reelle Zahl zugeordnet, so spricht man von einem gewichteten Graphen. Ein Weg  $W$  in einem Graph bezeichnet die Abfolge paarweise verschiedener Knoten  $W = v_1, \dots, v_n$ , welche durch Kanten miteinander verbunden sind (DIESTEL 2006, S. 7). Ist hierbei  $v_1 = v_n$ , so handelt es sich um einen Kreis (auch: Zyklus) (DIESTEL 2006, S. 8). Ein ungerichteter Graph ist zusammenhängend, wenn zu je zwei beliebigen Knoten ein Weg zwischen diesen existiert (DIESTEL 2006, S. 11).

Entspricht jeder Knoten  $v_i = \vec{\theta}_i \in V$  mit  $i = \{1, \dots, j, \dots, n\}$  einer kollisionsfreien Konfiguration ( $V \subset C_{frei}$ ) und jede Kante  $e = \{v_i, v_j\} = \{\vec{\theta}_i, \vec{\theta}_j\} \in E$  mit  $i \neq j$  einer kollisionsfreien Bahn zwischen den Roboterkonfigurationen  $\vec{\theta}_i$  und  $\vec{\theta}_j$ , so kann der freie Konfigurationsraum als Graph dargestellt werden (KAVRAKI & LAVALLE 2008, S. 112). Abbildung A.9 stellt schematisch die graphentheoretische Repräsentanz des Konfigurationsraums dar. Hierbei sind die Kanten ungerichtet, sofern die Bewegungsrichtung die Kollisionsfreiheit nicht beeinflusst. Eine kollisionsfreie Bahn zwischen einer Start- und Zielkonfiguration lässt sich folglich als Weg in einem Graph beschreiben.

Durch Zuordnung der benötigten Zeit für die Ausführung einer Bewegung zu jeder Kante (gewichteter Graph) kann im Rahmen der Wegsuche die benötigte Zeit als Auswahlkriterium verwendet werden. (JUNGNICKEL 2013, S. 65–66; M. ULRICH, LUX, JÜRGENSEN et al. 2016)

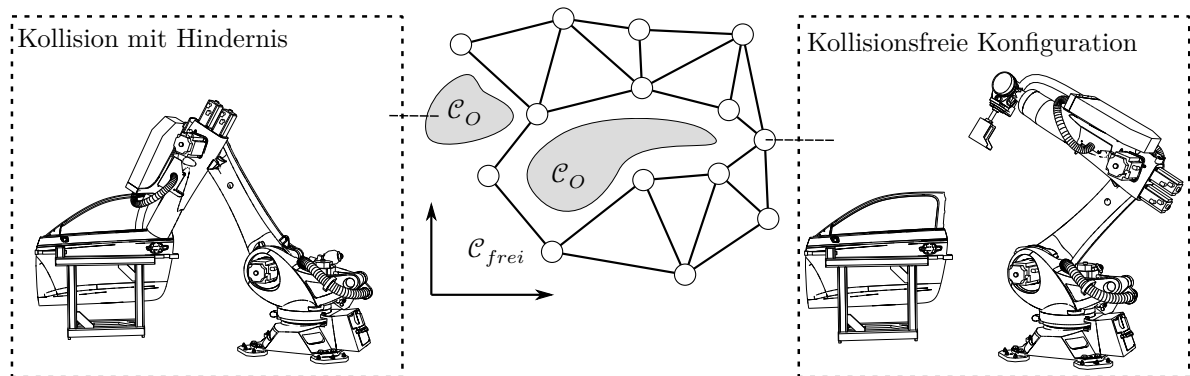


Abbildung A.9: Graphentheoretische Repräsentanz des Konfigurationsraums  $C$  durch Knoten (kollisionsfreie Konfiguration) und Kanten (kollisionsfreie Bewegung zwischen zwei Konfigurationen) (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an LAVALLE 2006, S. 238).

## A.2.3 Roboterkoordinatensysteme und deren Transformation

### Bezugskoordinatensysteme

Prozessbedingt werden vom Robotersystem auszuführende Aufgaben meist im kartesischen Raum beschrieben.

Um die geometrischen Relationen zwischen Roboter, Endeffektor und bestimmten Objekten in der Roboterumgebung (z.B. Werkstück, Prüfobjekt oder Greiferwechselsystemen) darzustellen, werden kartesische Bezugskoordinatensysteme definiert. Die räumliche Beziehung der Koordinatensysteme zueinander wird durch deren Transformation beschrieben.

Abbildung A.10 zeigt exemplarisch anhand eines roboterbasierten Koordinatenmesssystems typische Bezugskoordinatensysteme sowie deren Transformationen.

Eine Transformation  ${}^B\mathbf{T}_i$  (auch Koordinatentransformation) beschreibt die Position und Orientierung eines Koordinatensystems  $K_i$  in Bezug auf ein Basiskoordinatensystem  $K_B$ . Hierdurch können die Koordinaten eines Punktes  ${}^B\vec{p}$  in einem Koordinatensystem in ein anderes Koordinatensystem überführt werden.

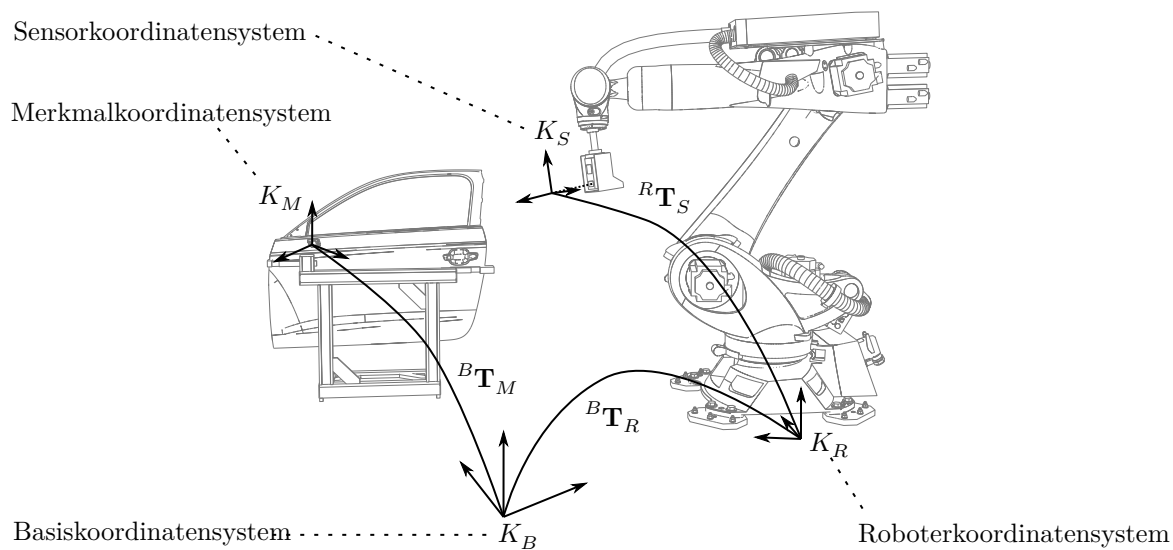


Abbildung A.10: Bezugskoordinatensysteme eines roboterbasierten Koordinatensystems und deren Transformationen.

Im kartesischen Raum setzt sich im Allgemeinen eine solche Transformation aus einem Rotationsanteil  $\mathbf{R} \in SO(3)$  und einer Translation  $\vec{t} \in \mathbb{R}^3$  zusammen, die gemäß den Gleichungen A.4a und A.4b dargestellt werden können.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (\text{A.4a})$$

$$\vec{t} = (t_1 \quad t_2 \quad t_3)^T \quad (\text{A.4b})$$

Hierbei entfallen jeweils drei Freiheitsgrade auf die Rotation sowie die Translation.

## Homogene Koordinatentransformation

Besonders im Bereich der Robotik hat sich die Darstellung und Berechnung von Transformationen zwischen Koordinatensystemen mittels homogener Koordinaten etabliert. Hierbei werden Rotation und Translation zu einer  $4 \times 4$  Transformationsmatrix erweitert (Gleichung A.5), wobei  ${}^j\mathbf{T}_i$  die Position und Orientierung des Koordinatensystems  $K_i$  in Bezug auf das Koordinatensystem  $K_j$  beschreibt. (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 14)

$${}^j\mathbf{T}_i = \left( \begin{array}{c|c} \mathbf{R} & \vec{t} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right) = \left( \begin{array}{ccc|c} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad (\text{A.5})$$

Es handelt sich bei einer solchen Transformation um die Euklidische Gruppe  $SE(3) = \mathbb{R}^3 \rtimes SO(3)$ , die sich aus der Hintereinanderausführung zweier Bewegungen zusammensetzt (SCHRÖER et al. 1997).

Als Spezialfälle können die reine Translation **Trans** ( $\vec{t}$ ) um den Vektor  $\vec{t} = (t_1, t_2, t_3)^T$  (Gleichung A.6a) und die Rotation **Rot** ( $\hat{n}, \alpha$ ) um einen Einheitsvektor  $\hat{n} = (n_1, n_2, n_3)^T$  um den Winkel  $\alpha$  (Gleichung A.6b) aufgefasst werden. Hierbei sei  $\mathbf{I}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  die Einheitsmatrix. (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 14)

$$\mathbf{Trans}(\vec{t}) = \left( \begin{array}{c|c} \mathbf{I}_3 & \vec{t} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right) \quad (\text{A.6a})$$

$$\mathbf{Rot}(\hat{n}, \alpha) = \left( \begin{array}{c|c} \mathbf{R}_{\hat{n}}(\alpha) & \vec{0} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right) \quad (\text{A.6b})$$

Unter Verwendung des Kronecker-Deltas  $\delta_{ij}$  und des Levi-Civita-Symbols  $\epsilon_{ikj}$  gilt für die Komponenten  $r_{ij}$  der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_{\hat{n}}(\alpha) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  Gleichung A.7 (PIÑA 2011).

$$r_{ij} = (1 - \cos \alpha) n_i n_j + \cos \alpha \delta_{ij} + \sum_{k=1}^3 \sin \alpha \epsilon_{ikj} n_k \quad \forall \quad i, j \in \{1, 2, 3\} \quad (\text{A.7})$$

Analog zur Erweiterung bei Matrizen werden Vektoren im  $\mathbb{R}^3$  zu einem  $4 \times 1$  Vektor ergänzt, wobei nachfolgende, in Tabelle A.1 dargestellte, Konvention gilt. (MURRAY et al. 1994, S. 36)

*Tabelle A.1: Darstellung von Vektoren in homogenen Koordinaten (MURRAY et al. 1994, S. 36; KHALIL & DOMBRE 2006, S. 14).*

Vektortyp	$\mathbb{R}^3$	Homogene Koordinaten
Ortsvektor	$(x_1 \ x_2 \ x_3)^T$	$(x_1 \ x_2 \ x_3 \ 1)^T$
Richtungsvektor	$(o_1 \ o_2 \ o_3)^T$	$(o_1 \ o_2 \ o_3 \ 0)^T$

Folglich kann ein Punkt mit den Koordinaten  ${}^i\vec{x} = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ 1)^T$  im Koordinatensystem  $K_i$  mittels Gleichung A.8 in Bezug auf das Koordinatensystem  $K_j$  angegeben werden.

$${}^j\vec{x} = {}^j\mathbf{T}_i \cdot {}^i\vec{x} \quad (\text{A.8})$$

Ein weiterer Vorteil von homogenen Transformationsmatrizen ist die analytische Invertierbarkeit aufgrund der Orthogonalität der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  und der Matrixstruktur. Die Inverse der Transformationsmatrix  ${}^j\mathbf{T}_i^{-1}$  ist durch Gleichung A.9 gegeben und beschreibt die Position und Orientierung des Koordinatensystems  $K_j$  in Bezug auf das Koordinatensystem  $K_i$ . (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 14; WEBER 2009, S. 36)

$${}^j\mathbf{T}_i^{-1} = {}^i\mathbf{T}_j = \left( \begin{array}{c|c} \mathbf{R}^{-1} & -\mathbf{R}^{-1}\vec{t} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c|c} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T\vec{t} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right) \quad (\text{A.9})$$

Darüber hinaus lassen sich durch die Verwendung von homogenen Koordinaten verkettete Transformationen als Produkt darstellen. Das Matrixprodukt ist nicht kommutativ und die Verkettung daher reihenfolgeabhängig. Gleichung A.10 beschreibt die Transformation  ${}^m\mathbf{T}_n$  des Koordinatensystems  $K_n$  in Bezug auf das Koordinatensystem  $K_m$  entlang einer Transformationskette (KHALIL & DOMBRE 2006, S. 42).

$${}^m\mathbf{T}_n = \prod_{i=m}^{n-1} {}^i\mathbf{T}_{i+1} \quad \text{für } m < n \quad (\text{A.10})$$

Zur vereinfachten Charakterisierung von Transformationen zwischen zwei beliebigen Koordinatensystemen (insbesondere deren Orientierungsanteil) existieren verschiedene Konventionen, welche durch Festlegung von Transformationssequenzen deren Parametrisierung erlauben (Vergleiche hierzu auch Abschnitt 2.2.1). (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 10–18)

## Transformation mittels Eulerwinkelkonvention

Eine verbreitete Konvention zur Beschreibung der Orientierung ist die Eulerwinkelkonvention. Hierbei wird das Bezugskoordinatensystem durch drei sukzessive Rotationen um die Koordinatensystemachsen in die Zielorientierung überführt. Die Drehreihenfolge wird oftmals bei der Spezifikation der Konvention angegeben. Im Kontext der Robotik wird oftmals die Z-Y'-X''-Konvention<sup>71</sup> verwendet, wobei die zweite und dritte Rotation um die zuvor mitgedrehten Achsen berechnet wird (WEBER 2009, S. 37–38).

In Kombination mit einem Translationsanteil lassen sich Eulerkonventionen zur Parametrisierung von Transformationen zwischen zwei Bezugskoordinatensystemen verwenden. Die Gleichungen A.11a und A.11b beschreiben eine solche Transformation in Abhängigkeit der drei Drehwinkel  $A$ ,  $B$  und  $C$  sowie der Translation  $\vec{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$  (SCHRÖER et al. 1997; WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 11–12). Hierbei werden die Abkürzungen  $c_\xi = \cos(\xi)$  und  $s_\xi = \sin(\xi)$  zur Darstellung der trigonometrischen Funktionen verwendet.

$${}_{GNR}^j \mathbf{T}_i = \mathbf{Trans}(\vec{t}) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{z}, A) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{y}, B) \cdot \mathbf{Rot}(\hat{x}, C) \quad (\text{A.11a})$$

$$= \left( \begin{array}{ccc|c} c_A c_B & c_A s_B s_C - s_A c_C & c_A s_B c_C + s_A s_C & t_x \\ s_A c_B & s_A s_B s_C + c_A c_C & s_A s_B c_C - c_A s_C & t_y \\ -s_B & c_B s_C & c_B c_C & t_z \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad (\text{A.11b})$$

Eulerwinkel werden in der Robotik meist zur Angabe von Orientierungen aufgrund der einfachen Nachvollziehbarkeit verwendet.

Unter Berücksichtigung der Matrixstruktur aus Gleichung A.5 gelten für die Berechnung der Eulerwinkel mit der erweiterten Arkustangensfunktion<sup>72</sup> die

<sup>71</sup>auch Gier-Nick-Roll-Konvention (GNR-Konvention).

<sup>72</sup>Die erweiterte Arkustangensfunktion kann der Gleichung A.18 im Anhang A.3.1 entnommen werden.

Gleichungen A.12a–A.12c (WEBER 2009, S. 40).

$$A = \arctan 2(r_{21}, r_{11}) \quad (\text{A.12a})$$

$$B = \arcsin(r_{31}) \quad (\text{A.12b})$$

$$C = \arctan 2(r_{32}, r_{33}) \quad (\text{A.12c})$$

## Endeffektorpose

Die Endeffektorpose (auch Werkzeugpose oder kurz: Pose) beschreibt die Positionierung und Orientierung des Endeffektors im Arbeitsraum des Roboters (EN ISO 8373 1996, S. 4). Hierfür wird dem Endeffektor ein Koordinatensystem zugeordnet. Der Ursprung dieses Koordinatensystems wird meist als Werkzeugmittelpunkt (engl.: Tool-Center-Point, kurz: TCP, WEBER 2009, S. 15) bezeichnet und an einem markanten Punkt des Endeffektors definiert. Die Endeffektorpose lässt sich folglich als Transformation  ${}^B\mathbf{T}_E \in SE(3)$  zwischen einem Bezugskordinatensystem und dem Endeffektorkoordinatensystem mit Hilfe von Translation und Orientierung ausdrücken. Zur vollständigen Beschreibung der Endeffektorpose sind folglich mindestens sechs unabhängige Parameter notwendig.

Wird ein optischer 3D-Sensor vom Roboter geführt, wird das sensorinterne Koordinatensystem in Bezug zu einem Basiskoordinatensystem beschrieben. In Anlehnung an die Endeffektorpose wird hierbei auch der Begriff Sensorpose verwendet.

Als Sollpose wird die Pose des Endeffektors bezeichnet, welche dem Robotersystem als Zielgröße dient. Die tatsächlich durch das System erreichte Pose wird als Istpose bezeichnet. Die zeitliche Abfolge von Posen entspricht der Trajektorie des Endeffektors.

Der kartesische Arbeitsraum  $W \subset \mathbb{R}^3$  (engl.: reachable workspace, WEBER 2009, S. 18) eines Roboters ist die Menge aller durch die Kinematik erreichbaren Punkte des TCPs mit Bezug auf ein Koordinatensystem  $K_B$  (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 25).

## Vorwärts- und Rückwärtstransformation

Die Menge  $M \subset SE(3)$  (engl.: dextrous workspace, WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 25) sei die Gesamtheit der erreichbaren Endeffektorposen im kartesischen Arbeitsraum  $W$  eines Roboters mit dem Bezugskordinatensystem  $K_B$  (MURRAY et al. 1994, S. 95). Das Endeffektorkoordinatensystem sei  $K_E$ .

Die Abbildung  ${}_{Kin}^B \mathbf{T}_E : C \rightarrow M, \vec{\theta} \mapsto {}_{Kin}^B \mathbf{T}_E(\vec{\theta})$  eines Punktes  $\vec{\theta}$  aus dem Konfigurationsraum in eine erreichbare Endeffektorpose  ${}_{Kin}^B \mathbf{T}_E(\vec{\theta})$  des Arbeitsraums  $W$  des Roboters wird als Vorwärtstransformation (auch: Direkte Kinematik) bezeichnet (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 26).

Ziel dieses funktionalen Zusammenhangs ist die Bestimmung der Endeffektorpose auf Basis der Gelenkstellungen. Gemäß der Definitions- (Konfigurationsraum  $C$ ) und Zielmenge (Menge der erreichbaren Posen  $M$ ) handelt es sich hierbei um eine surjektive, jedoch nicht notwendigerweise um eine injektive Abbildung. Es kann daher nicht von einer Bijektivität ausgegangen werden.

Die Umkehrung der Vorwärtstransformation, die sogenannte Rückwärtstransformation (auch: Inverse Kinematik), wird für die Bestimmung der Gelenkstellungen auf Basis einer vorgegebenen Endeffektorpose benötigt (GREENWAY 2000; WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 27). Diese ist im Allgemeinen jedoch nicht eindeutig und nicht analytisch lösbar (MURRAY et al. 1994, S. 99; MAIER 2016, S. 106). Abbildung A.11 zeigt exemplarisch für einen Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen unterschiedliche Konfigurationen zur Erreichung einer definierten Pose im Arbeitsraum<sup>73</sup>.

Im Spezialfall von sechssachsigen Vertikal-Knickarmroboter mit Zentralhand kann die Rückwärtstransformation analytisch bestimmt werden<sup>74</sup> (WALDRON & SCHMIEDELER 2008, S. 27).

<sup>73</sup>Bei Robotern mit Zentralhand existieren acht theoretisch mögliche Konfigurationen (MURRAY et al. 1994, S. 114; KHALIL & DOMBRE 2006, S. 67).

<sup>74</sup>Die analytische Lösung der Rückwärtstransformation für einen idealisierten sechssachsigen Vertikal-Knickarmroboter mit Zentralhand kann beispielsweise WALDRON & SCHMIEDELER (2008, S. 27–29), HUSTY et al. (2012, S. 428–435) und MURRAY et al. (1994, S. 104–106) entnommen werden.

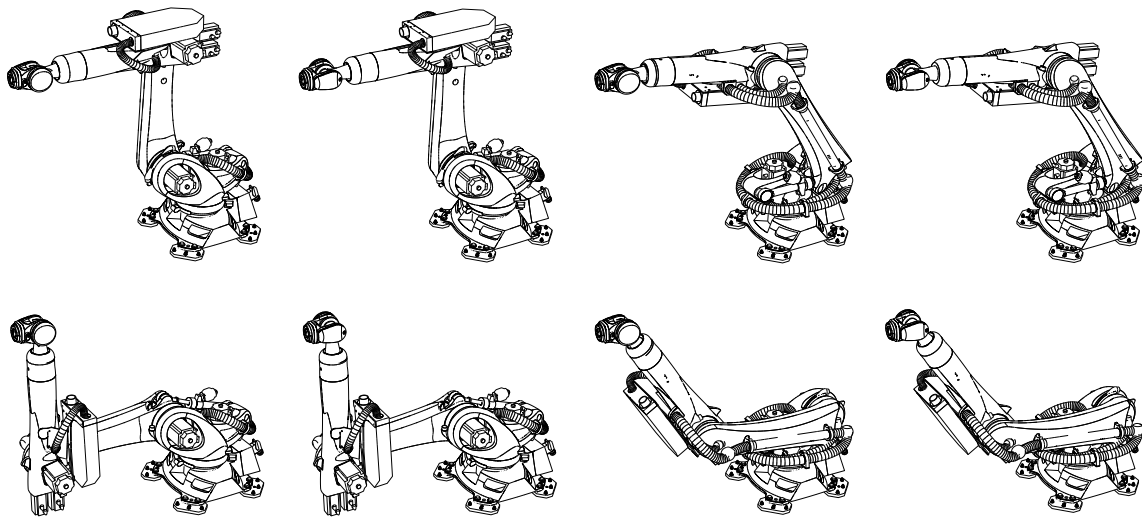


Abbildung A.11: Theoretisch mögliche Konfigurationen zur Erreichung einer definierten Pose im Arbeitsraum in Anlehnung an M. ULRICH 2018, S. 91.

Konfigurationen, bei denen zwei rotatorische Achsen fluchtend zueinander angeordnet sind, bezeichnet man als Singularität. Hierbei können sich die rotatorischen Anteile der fluchtenden Achsen kompensieren. (MAIER 2016, S. 105) Eine Eindeutigkeit der Konfiguration wird daher meist durch Einschränkung der Zielmenge erreicht.

### A.2.4 Genauigkeitskenngrößen

Genauigkeitskenngrößen für Industrieroboter werden hinsichtlich deren Zielgröße in Posekenngrößen und Bahnkenngrößen unterteilt. Für Anwendungen, bei denen die Genauigkeit der statischen Pose des Endeffektors relevant ist, werden Genauigkeitskenngrößen mit Bezug auf die Endeffektorpose ohne Berücksichtigung dynamischer Effekte verwendet. Bahnbezogene Genauigkeitskenngrößen hingegen dienen der Quantifizierung der Bahngenauigkeit und unterliegen dynamischen Einflüssen.

Insbesondere die Erfassung dynamischer Genauigkeitskenngrößen ist messtechnisch sehr aufwendig und erfordert spezielle Messinstrumente (JOHNEN et al. 2013).

---

## Pose-Genauigkeit

„Die Pose-Genauigkeit gibt die Abweichung zwischen einer Sollpose und dem Mittelwert der Istposen an, die sich beim Anfahren der Sollpose aus derselben Richtung ergeben.“ (EN ISO 9283 1998, S. 11)

Hierbei kann nochmals zwischen der Positionsgenauigkeit („Differenz zwischen der Position einer Sollpose und dem Schwerpunkt der Istpositionen“) und Orientierungsgenauigkeit („Differenz zwischen der Orientierung einer Sollpose und dem Durchschnitt der Istorientierungen“) unterschieden werden. (EN ISO 9283 1998, S. 11)

Typischerweise erreichen Standard-Vertikal-Knickarm-Roboter eine Positionsgenauigkeit in der Größenordnung von 1 mm (M. ULRICH, LUX & PIPREK 2014; BONGARDT 2004, S. 18)

## Pose-Wiederholgenauigkeit

„Die Pose-Wiederholgenauigkeit gibt die Exaktheit der Übereinstimmung zwischen den Istposen nach  $n$  wiederholten Anläufen zu derselben Sollpose in derselben Richtung an.“ (EN ISO 9283 1998, S. 14) Die Pose-Wiederholgenauigkeit ist folglich das Streumaß der Pose-Genauigkeit.

„Die Umkehrspanne  $U$  als systematische Abweichung ist in der jeweiligen Meßrichtung die Differenz, die sich aus den Mittelwerten der Meßwerte beider Anfahrrichtungen für jede Position bzw. Orientierung ergibt.“ (VDI 2861 1988, S. 10)

Hierbei kann wiederum zwischen der Positions-Wiederholgenauigkeit und der Orientierungs-Wiederholgenauigkeit unterteilt werden. (EN ISO 9283 1998, S. 14)

Bei Standard-Vertikal-Knickarm-Robotern ist die Positions-Wiederholgenauigkeit in der Größenordnung von 10  $\mu\text{m}$  und meist mehrere Größenordnungen kleiner als die Positions-Genauigkeit. (HÄGELE et al. 2008, S. 969; SLAMANI, NUBIOLA et al. 2012a)

### Drift von Posekenngrößen

„Die Drift der Pose-Genauigkeit (dAP) ist die Streuung der Pose-Genauigkeit über einen festgelegten Zeitraum (T).“ (EN ISO 9283 1998, S. 20)

Die Messung für die Drift wird hierbei aus dem kalten Zustand des Roboters begonnen und über mehrere Stunden kontinuierlich durchgeführt.

### Bahnbezogene Genauigkeitskenngrößen

Bei bahnbezogenen Genauigkeitskenngrößen kann zwischen der Bahn-Genauigkeit und der Bahn-Wiederholgenauigkeit unterschieden werden. Die Kenngrößen sind hierbei von der Form der Bahn unabhängig. (EN ISO 9283 1998, S. 22)

Die Bahn-Genauigkeit beschreibt nach EN ISO 9283 (1998, S. 22), „wie exakt ein Roboter in der Lage ist, seine mechanische Schnittstelle entlang einer Sollbahn  $n$ -mal in derselben Richtung zu bewegen.“ Die Bahn-Genauigkeit entspricht hierbei der maximalen Abweichung hinsichtlich Position und Orientierung.

Die Bahn-Wiederholgenauigkeit hingegen ist das Streumaß, welches die „Übereinstimmung zwischen den Istbahnen für dieselbe  $n$ -mal wiederholte Sollbahn“ (EN ISO 9283 1998, S. 23) beschreibt.

## A.2.5 Bewegungsarten und Programmierung

### Bewegungsarten

Bei einer Bewegung des Endeffektors von einer Start- zu einer Zielpose wird zwischen den Bewegungsarten Point-to-Point (PTP), Bahnsteuerung und Vielpunktsteuerung unterschieden (MAIER 2016, S. 134).

Die PTP-Bewegung eines Roboters beschreibt die schnellste Bewegung von der Start- zur Zielpose. Verwendung findet diese Bewegungsart daher maßgeblich für Transferbewegungen, bei denen lediglich die statischen Endeffektorposen relevant sind und keine exakte Bahn des Endeffektors gefordert ist (MAIER 2016, S. 135). Charakterisiert wird diese Bewegungsart durch die notwendigen

Achswinkeldifferenzen zwischen den Konfigurationen, welche mit Hilfe der Rückwärtstransformation von der Robotersteuerung bestimmt werden (GREENWAY 2000). Hierbei wird zwischen der synchronen und asynchronen PTP-Bewegung unterschieden (MAIER 2016, S. 135). Die synchrone PTP-Bewegung zeichnet sich dadurch aus, dass alle Roboterachsen gleichzeitig ihre Bewegung starten und beim Erreichen der Zielpose beenden (GREENWAY 2000). Die Bewegungsdauer ergibt sich folglich aus der Zeit, die von der langsamsten Achse (Leitachse) für die Winkeländerung benötigt wird<sup>75</sup>. Bei der asynchronen PTP-Bewegung werden alle Achsbewegungen gleichzeitig gestartet, wobei die Achsen mit einer definierten Geschwindigkeit verfahren (MAIER 2016, S. 135). Die Achsbewegungen enden nicht notwendigerweise zum selben Zeitpunkt.

Bei der Bahnsteuerung werden die Achswinkel des Roboters so gesteuert, dass der Endeffektor sich entlang einer definierten Bahn bewegt (MAIER 2016, S. 136). Hierfür werden komplexe Bahnen meist aus Kreesegmenten (zirkuläre Bewegung) und Geraden (lineare Bewegung) zusammengesetzt. Die Steuerung erfolgt durch Bestimmung der Gelenkstellungen mit Hilfe der Rückwärtstransformation im Interpolationstakt der Robotersteuerung (MAIER 2016, S. 136). Anwendungen finden diese Bewegungsarten beispielsweise in der roboterbasierten Bearbeitung oder Montage, bei denen die Endeffektorbahnen exakt definiert sind.

Die Vielpunktsteuerung eines Roboters eignet sich, sofern die Zerlegung der Roboterbahn in einfachere Bahnabschnitte nicht möglich ist. Hierbei wird eine Endeffektorbahn durch geeignet viele Stützstellen definiert, wobei zwischen den einzelnen Stützstellen von der Robotersteuerung interpoliert wird. Solche Bewegungsarten bilden unter anderem die Grundlage für die sogenannten Play-Back-Programmierverfahren, bei denen eine abgefahrene Bahn in Stützstellen zerlegt wird und nachfolgend wiederholt abgefahren werden kann. (MAIER 2016, S. 137)

## Online-Programmierung

Programmierverfahren, bei denen der Bewegungsablauf am Roboter selbst sowie dessen Steuerung vorgenommen wird, werden als Online-Programmierverfahren

<sup>75</sup>Die Beschreibung der achssynchroneen PTP-Bewegung ist dem Abschnitt A.2.6 zu entnehmen.

bezeichnet (HÄGELE et al. 2008, S. 977). Hierzu zählen das Teach-In- und das Play-Back-Verfahren.

Beim Teach-In-Verfahren werden Roboterposen manuell mit einem Eingabegerät (Handprogrammiergerät) angefahren und in einer Programmsequenz unter Berücksichtigung der Bewegungsart gespeichert (MAIER 2016, S. 185). Vorteil dieses Verfahrens ist die Anschaulichkeit und Flexibilität bei der Anpassung an reale Umgebungsbedingungen.

Beim Play-Back-Verfahren wird die Kinematik meist bei abgeschalteten Antrieben durch den Anwender geführt, während die Steuerung Stützstellen in einem Ablaufprogramm speichert (MAIER 2016, S. 186–187). Dieses Verfahren zeichnet sich durch dessen Intuitivität aus und erfordert keine Expertenkenntnisse vom Anwender.

Bei allen Online-Programmierverfahren kann das Robotersystem während des Programmiervorgangs nicht produktiv eingesetzt werden (MAIER 2016, S. 185).

### **Offline-Programmierung**

Bei der Offline-Programmierung erfolgt die Erstellung eines Roboterprogramms, ohne dass notwendigerweise hierfür der Roboter selbst oder dessen Steuerung benötigt wird. Die Programmierung kann folglich während des Produktiveinsatzes des Roboters erfolgen (MAIER 2016, S. 189). Typische Verfahren der Offline-Programmierung sind unter anderem textuelle und CAD-gestützte Programmierverfahren sowie die Programmierung mittels 3D-Simulation (HÄGELE et al. 2008, S. 979–980).

Darüber hinaus existieren Ansätze, welche eine benutzerfreundliche Übertragbarkeit der Offline-Programmierung auf das Realsystem ermöglichen sollen. Hierzu zählen beispielsweise die Verwendung von virtuell angereicherten Abbildungen des Realsystems („Augmented Reality“), um dem Anwender eine intuitive Programmierung zu ermöglichen (WASSERMANN et al. 2018).

## A.2.6 Beschreibung der achssynchronen PTP-Bewegung

Bei der achssynchronen PTP-Bewegung werden zunächst die Differenzen der Gelenkstellungen zwischen Start- und Zielkonfiguration berechnet (Gleichung A.13).

$$\Delta \vec{\theta}_{i \rightarrow j} = \vec{\theta}_j - \vec{\theta}_i \quad (\text{A.13})$$

Die minimale Bewegungsdauer der  $k$ -ten Achse ergibt sich mit der entsprechenden Achswinkeldifferenz  $\Delta \theta_{k,i \rightarrow j}$  gemäß Gleichung A.14 (M. ULRICH, LUX, JÜRGENSEN et al. 2016).

$$t_{min,k}(\Delta \theta_{k,i \rightarrow j}) = \begin{cases} \frac{\Delta \theta_{k,i \rightarrow j}}{\dot{\theta}_{k,max}} + \frac{\dot{\theta}_{k,max}}{\ddot{\theta}_k} & \text{für } \Delta \theta_{k,i \rightarrow j} > \frac{\dot{\theta}_{k,max}^2}{\ddot{\theta}_k} \\ \sqrt{\frac{2\Delta \theta_{k,i \rightarrow j}}{\ddot{\theta}_k}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

Hierbei sei  $\dot{\theta}_{k,max}$  die maximale Drehgeschwindigkeit und  $\ddot{\theta}_k$  die betragsmäßige, konstante Beschleunigung (Anfahrbeschleunigung und Abbremsbeschleunigung) des  $k$ -ten Gelenks bei einer PTP-Bewegung.

Die Gesamtdauer der PTP-Bewegung eines Roboters mit  $q$  angetriebenen Achsen wird folglich durch die Leitachse (Achse mit der längsten minimalen Bewegungsdauer) durch Gleichung A.15 bestimmt (M. ULRICH, LUX, JÜRGENSEN et al. 2016).

$$t_{PTP} = \max_{k \in [1 \dots q]} (t_{min,k}) \quad (\text{A.15})$$

Anhand der Leitachse  $k_{leit}$  kann die Dauer der Beschleunigungsphasen  $t_{acc}$  (Beschleunigungs- und Abbremsdauer) mit Gleichung A.16 bestimmt werden.

$$t_{acc} = \begin{cases} \frac{\dot{\theta}_{leit,max}}{\ddot{\theta}_{leit}} & \text{für } \Delta \theta_{leit,i \rightarrow j} > \frac{\dot{\theta}_{leit,max}^2}{\ddot{\theta}_{leit}} \\ \frac{t_{PTP}}{2} & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

Wird ein trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil der Achsen angenommen, ergibt sich für die Achsgeschwindigkeit  $\dot{\theta}_{k,i \rightarrow j}$  der  $k$ -ten Achse in Abhängigkeit der Bewegungsdauer  $t$  der Zusammenhang gemäß Gleichung A.17.

$$\dot{\theta}_{k,i \rightarrow j}(t) = \begin{cases} t \cdot \ddot{\theta}_k & \text{für } 0 \leq t < t_{acc} \\ \frac{\Delta\theta_{k,i \rightarrow j} - t_{acc}^2 \cdot \ddot{\theta}_k}{t_{PTP} - 2 \cdot t_{acc}} & \text{für } t_{acc} \leq t < t_{PTP} - t_{acc} \\ \frac{\Delta\theta_{k,i \rightarrow j} - t_{acc}^2 \cdot \ddot{\theta}_k}{t_{PTP} - 2 \cdot t_{acc}} - (t - t_{PTP} + t_{acc}) \cdot \ddot{\theta}_k & \text{für } t_{PTP} - t_{acc} \leq t \end{cases} \quad (\text{A.17})$$

Durch Zusammenführen der Gleichungen A.17 für alle Roboterachsen zu einem Vektor  $\dot{\vec{\theta}}_{i \rightarrow j}(t)$  und Integration über die Zeit unter Berücksichtigung der Randbedingungen  $\vec{\theta}_{i \rightarrow j}(0) = \vec{\theta}_i$  und  $\vec{\theta}_{i \rightarrow j}(t_{PTP}) = \vec{\theta}_j$  erhält man die zeitlich parametrisierte, achssynchrone PTP-Bewegung  $\vec{\theta}_{i \rightarrow j} : [0, t_{PTP}] \rightarrow C_{frei}, t \mapsto \vec{\theta}_{i \rightarrow j}(t)$ .

---

## A.3 Mathematischer Anhang

### A.3.1 Erweiterte inverse Winkelfunktion Arkustangens

$$\arctan 2(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & \text{für } x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & \text{für } x < 0 \text{ und } y \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & \text{für } x < 0 \text{ und } y < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & \text{für } x = 0 \text{ und } y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{für } x = 0 \text{ und } y < 0 \\ \text{nicht definiert} & \text{für } x = 0 \text{ und } y = 0 \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

### A.3.2 Signumfunktion

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x = 0 \\ -1 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

### A.3.3 Parallelogrammgleichung für Vektorräume

Sei  $\|\vec{x}\|_2 := \sqrt{\langle \vec{x}, \vec{x} \rangle}$  die Skalarproduktnorm für  $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$ , so gilt:

$$\|\vec{x} + \vec{y}\|_2^2 + \|\vec{x} - \vec{y}\|_2^2 = 2 \cdot (\|\vec{x}\|_2^2 + \|\vec{y}\|_2^2) \quad (\text{A.20})$$

#### Beweis

$$\|\vec{x} + \vec{y}\|_2^2 + \|\vec{x} - \vec{y}\|_2^2 = \langle \vec{x} + \vec{y}, \vec{x} + \vec{y} \rangle + \langle \vec{x} - \vec{y}, \vec{x} - \vec{y} \rangle \quad (\text{A.21})$$

$$= \langle \vec{x}, \vec{x} + \vec{y} \rangle + \langle \vec{y}, \vec{x} + \vec{y} \rangle + \langle \vec{x}, \vec{x} - \vec{y} \rangle - \langle \vec{y}, \vec{x} - \vec{y} \rangle \quad (\text{A.22})$$

$$= \langle \vec{x}, \vec{x} \rangle + \langle \vec{x}, \vec{y} \rangle + \langle \vec{y}, \vec{x} \rangle + \langle \vec{y}, \vec{y} \rangle \\ + \langle \vec{x}, \vec{x} \rangle - \langle \vec{x}, \vec{y} \rangle - \langle \vec{y}, \vec{x} \rangle + \langle \vec{y}, \vec{y} \rangle \quad (\text{A.23})$$

$$= 2\langle \vec{x}, \vec{x} \rangle + 2\langle \vec{y}, \vec{y} \rangle \quad (\text{A.24})$$

$$= 2 \cdot (\|\vec{x}\|_2^2 + \|\vec{y}\|_2^2) \quad (\text{A.25})$$

## A.3.4 Dreiecksungleichung für Summen

Die Dreiecksungleichung kann für Summen erweitert werden. Es gilt:

$$\left\| \sum_{i=1}^n \vec{x}_i \right\|_2 \leq \sum_{i=1}^n \|\vec{x}_i\|_2 \quad (\text{A.26})$$

**Beweis**

Die Dreiecksungleichung für Summen kann durch induktives Anwenden der Dreiecksungleichung gezeigt werden.

$$\left\| \sum_{i=1}^n \vec{x}_i \right\|_2 \leq \left\| \sum_{i=1}^{n-1} \vec{x}_i \right\|_2 + \|\vec{x}_n\|_2 \quad (\text{A.27})$$

$$\leq \left\| \sum_{i=1}^{n-2} \vec{x}_i \right\|_2 + \|\vec{x}_{n-1}\|_2 + \|\vec{x}_n\|_2 \quad (\text{A.28})$$

$$\vdots$$

$$\leq \sum_{i=1}^n \|\vec{x}_i\|_2 \quad (\text{A.29})$$

---

## A.4 Verwendete Komponenten und Software

### A.4.1 Roboter

Die im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit verwendeten Roboter sind in Tabelle A.2 aufgeführt.

*Tabelle A.2: Liste der verwendeten Roboter.*

Hersteller	Typ
ABB Ltd	ABB 2600ID 8-2
Fanuc K.K.	Fanuc M10iA-12
Fanuc K.K.	Fanuc R2000iB 185 L
KUKA Roboter GmbH	KUKA KR 30 L15/2
KUKA Roboter GmbH	KUKA KR 90 R3100 extra HA
KUKA Roboter GmbH	KUKA KR 210 R2700

Als Bewegungsart wurde lediglich eine auf Basis der Achswinkel charakterisierte PTP-Bewegung verwendet. Zur Reduktion von dynamischen Einflüssen wurden darüber hinaus die Bewegungen bei reduzierter Geschwindigkeit ausgeführt.

Insbesondere bei der Betrachtung der statischen Pose-Genauigkeit ist hierbei das Ausschwingverhalten des Roboters nach einer Bewegung zu berücksichtigen. Abbildung A.12 zeigt einen typischen zeitlichen Verlauf des euklidischen Abstands des TCPs zur Zielposition nach einer PTP-Bewegung, gemessen am Roboter *KR 90 R3100 extra HA*.

Die TCP-Abweichung zeigt hierbei ein periodisch, gedämpftes Verhalten. Als Folge hieraus ergibt sich, dass vor jeder Erfassung der Pose beziehungsweise Messung eines Merkmals für die typische Dauer des Ausschwingverhaltens pausiert werden muss. Dies ist insbesondere im Rahmen der Programmerzeugung zur Datenaufnahme bei roboterbasierten Messsystemen relevant.

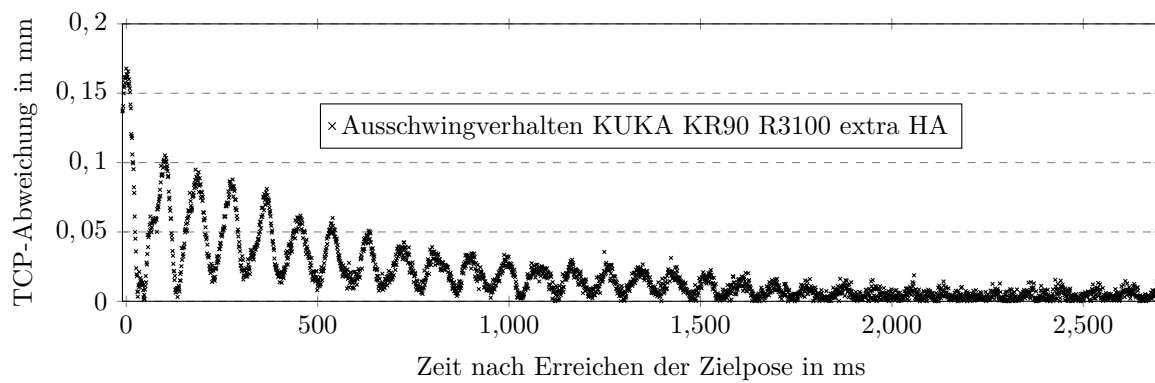


Abbildung A.12: Ausschwingverhalten (zeitlicher Verlauf des euklidischen Abstands des TCPs zur Zielposition) nach einer typischen PTP-Bewegung am Beispiel eines KR 90 R3100 extra HA. Die TCP-Position wurde hierfür mit einem Lasertracker LTD500 der Firma Leica Geosystems AG in zeitdiskreten Abständen erfasst.

Der Einfluss des Roboterzustands (Warm- beziehungsweise Kaltzustand) hat besonders bei der Betrachtung innerhalb der Betriebsphase einen wesentlichen Einfluss. Zur Erreichung des Kaltzustands wurde das Robotersystem hierbei für mindestens acht Stunden nicht bewegt. Der Warmzustand, sofern im Rahmen von Untersuchungen erfordert, wurde durch die Ausführung eines entsprechenden Aufwärmprogrammablaufs<sup>76</sup> realisiert.

<sup>76</sup>Zyklisches Roboterprogramm, wobei alle Achsen des Roboters Bewegungen bei hohen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ausführen.

## A.4.2 Messtechnik

### Lasertracker LTD500 der Firma Leica Geosystems AG

Als externes Messsystem zur Kalibrierdatenerfassung im Rahmen der Gültigkeitsbetrachtung (vgl. Abschnitt 4.4) und zur Charakterisierung nicht-geometrischer Effekte (vgl. Abschnitt 4.1.2) wird ein Lasertracker *LTD500* der Firma *Leica Geosystems AG* verwendet.

Die Funktionsweise eines Lasertrackers ist in Abschnitt A.1.2 beschrieben. Die Genauigkeit des Lasertrackersystems wird hierbei durch die Richtungsmessung des Laserstrahls beschränkt. Die Messgenauigkeit ist folglich linear abhängig von der Distanz des Reflektors. Für das verwendete System wird eine Genauigkeit von  $\pm 0,025$  mm bei einer Distanz von 2,5 m und eine Genauigkeit von  $\pm 0,050$  mm bei einer Distanz von 5,0 m spezifiziert.

Die Drift der erfassten Position des Reflektors über die Betriebsdauer muss im Rahmen von Messungen, welche die Messgrößen über einen langen Zeitraum zueinander in Bezug stellen, berücksichtigt werden. Abbildung A.13 zeigt die Drift der kartesischen Abweichung der Position eines statischen Reflektors in Abhängigkeit der Betriebsdauer des Lasertrackers *LTD500* der Firma *Leica Geosystems AG*. Insbesondere nach der Inbetriebnahme zeigt sich eine starke Drift, welche nach etwa sechs Stunden vernachlässigt werden kann.

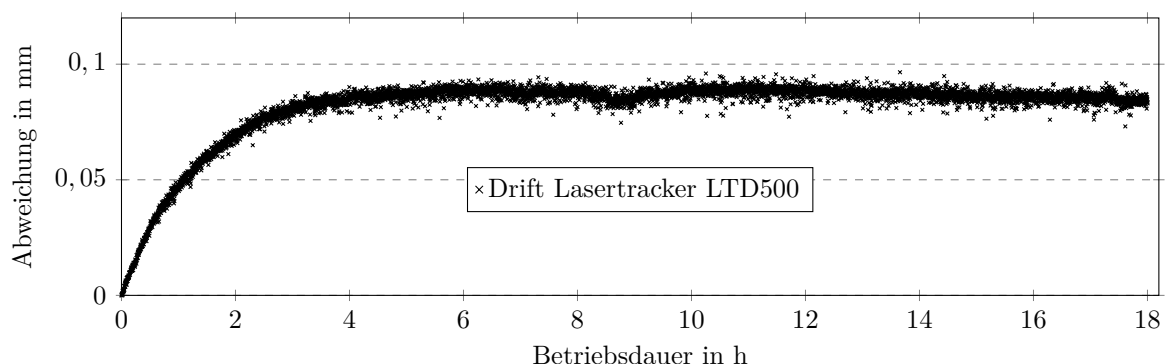


Abbildung A.13: Drift der kartesischen Abweichung der Position eines statischen Reflektors in Abhängigkeit der Betriebsdauer des Lasertrackers *LTD500* der Firma *Leica Geosystems AG*. (In Anlehnung an KRALLER 2017, S. 46–47)

Um insbesondere bei der Kalibrierdatenerfassung Drifteffekte als Fehlereinflüsse ausschließen zu können, wird der Lasertracker jeweils vor der Verwendung für mindestens acht Stunden betrieben.

### Laserscanner Helix HDR/H0200 der Firma Perceptron Inc.

Der 3D-Laserscanner *Helix HDR/H0200* der Firma *Perceptron Inc.* wird in dieser Arbeit als robotergeführter Sensor zur flächenhaften Antastung der Prüfobjektoberfläche verwendet.

Der Sensor besitzt ein maximales Erfassungsvolumen von etwa  $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ . Neben den Dimensionen des Erfassungsvolumens ist die Intensität der Laserstrahlung sowie die Punktdichte der Messung für jedes Merkmal parametrierbar. Das zugehörige Softwarepaket (vgl. Abschnitt A.4.3) ermöglicht die Auswertung der typischen Merkmale im Kontext der KMT auf Basis der erfassten Punktwolken.

Zur Identifikation des betriebsbedingten Einflusses wurde die Position eines positions-invarianten Kugelmerkmals über einen Zeitraum von etwa 18 Stunden nach Inbetriebnahme erfasst. Abbildung A.14 zeigt die Drift der kartesischen Abweichung.

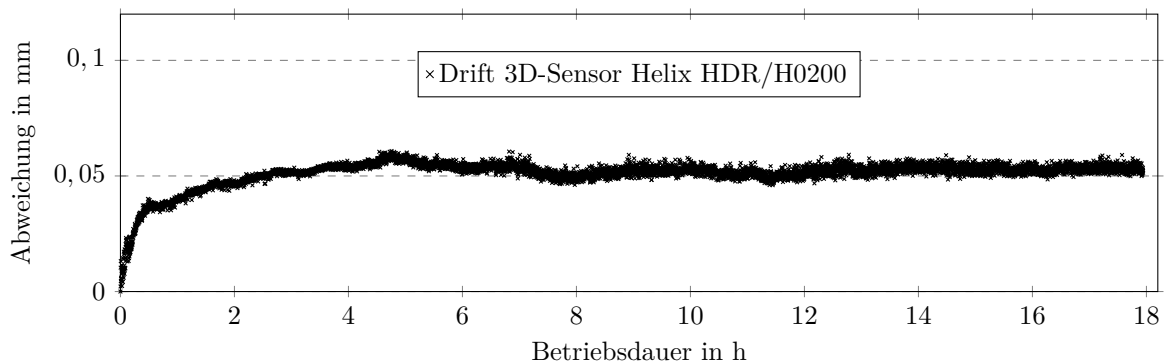


Abbildung A.14: Drift der kartesischen Abweichung der Position eines positions-invarianten Kugelmerkmals in Abhängigkeit der Betriebsdauer des 3D-Sensors *Helix HDR/H0200* der Firma *Perceptron Inc.* (In Anlehnung an KRALLER 2017, S. 47–48)

Um Drifteffekte während des Betriebs ausschließen zu können, wird der Sensor für mindestens acht Stunden vor Verwendung eingeschaltet.

---

### A.4.3 Software

#### Verwendete Programme

Im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit sowie der zugrundeliegenden Ergebnisse wurden folgende, in Tabelle A.3 aufgeführten, Programme unter Microsoft Windows 7 verwendet.

*Tabelle A.3: Liste der verwendeten Programme.*

Programm	Entwickler
Visual Studio 2012	Microsoft Corporation
MATLAB R2013b	The MathWorks Inc.
OriginPro 2015G	OriginLab Corporation
3DCreate 2014	Visual Components Oy
PolyWorks Inspector <sup>TM</sup> 2015	InnovMetric Software Inc.
PolyWorks Viewer <sup>TM</sup> 2015	InnovMetric Software Inc.
Leica Axyz 1.3.0	Leica Geosystems AG
Perceptron Measurement Queue	Perceptron Inc.
Perceptron Plant Diagnostics	Perceptron Inc.
Perceptron Plant Setup	Perceptron Inc.
Perceptron Reporting Client	Perceptron Inc.
WorkVisual	KUKA AG
Blender 2.78	Blender Foundation
CATIA V5-6R2015	Dassault Systèmes SE
TeXstudio 2.12.2	Benito van der Zander
Excel 2013	Microsoft Corporation
RoboCal V3.1	Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (SCHRÖER 1994)
Robot Calibration Environment (Robot Cal) v2013.12.17	New River Kinematics Inc.

## Verwendete Softwarebibliotheken

Zur softwaretechnischen Umsetzung der Selbst-Kalibrierung und verschiedener Auswerteprogramme wurden extern erstellte Softwarebibliotheken verwendet. Diese sind in Tabelle A.4 aufgeführt.

*Tabelle A.4: Liste der verwendeten Softwarebibliotheken.*

Softwarebibliothek	Referenz
Ceres Solver	AGARWAL et al. (2018)
BEPUpysics	BEPU ENTERTAINMENT LLC (2018)
HelixToolkit.WPF	HELIX TOOLKIT CONTRIBUTORS (2018)
Satsuma	SZALKAI (2018)
OxyPlot	OXYPLOT CONTRIBUTORS (2018)
Eigen2	GUENNEBAUD et al. (2018)
dlib	KING (2009)
TinyXML-2	THOMASON (2018)

---

## A.5 Ergänzungen zur Analyse von Einflussgrößen auf die Pose-Genauigkeit

### A.5.1 Messung der Getriebecharakteristika an isolierten Getrieben

Zur Validierung der Methode zur Identifikation und Charakterisierung nicht-geometrischer Einflüsse auf die Pose-Genauigkeit können die Getriebecharakteristika am ausgebauten Getriebe erfasst werden.

Zur Bestimmung des Übersetzungsverhältnisses wird der Winkel auf der Ausgangsseite des Getriebes mit dem Winkel der Antriebswelle in Relation gesetzt. Hierfür wird der Winkel an der Eingangsseite variiert und mit Hilfe eines am Getriebegehäuse befestigten Reflektor die Rotation der Ausgangsseite gemessen (Abbildung A.15 a). Der Winkel kann aus den Positionen des Reflektors berechnet werden.

Abbildung A.15 b zeigt schematisch den Versuchsaufbau zur Erfassung der Nachgiebigkeitskennlinie. Hierbei wird die ausgangsseitige Winkelabweichung in Abhängigkeit eines definiert, aufgebrachten Drehmoments gemessen. Die Antriebswelle wird hierfür fixiert.

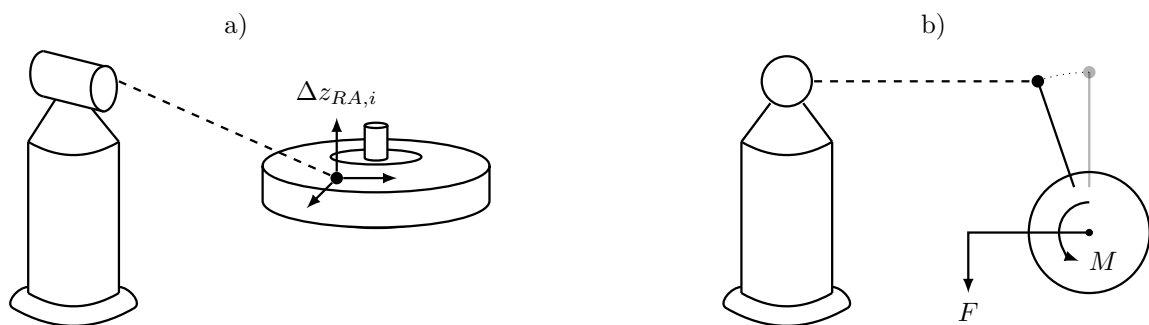


Abbildung A.15: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Getriebecharakteristika am ausgebauten Getriebe mit Hilfe des Lasertrackers LTD500 der Firma Leica Geosystems AG: a) Erfassung des Ausgangswinkels am Getriebe in Abhängigkeit des Winkels der Antriebswelle, b) Erfassung des Ausgangswinkels am Getriebe in Abhängigkeit des auf Ausgangsseite wirkenden Drehmoments.

## Übersetzungsverhältnis

Wird der Winkel der Getriebeausgangsseite über den Winkel der Antriebswelle aufgetragen, ergibt sich der lineare Verlauf aus Abbildung A.16 für das Getriebe der zweiten Achse des Roboters *KR 30 L15/2*.

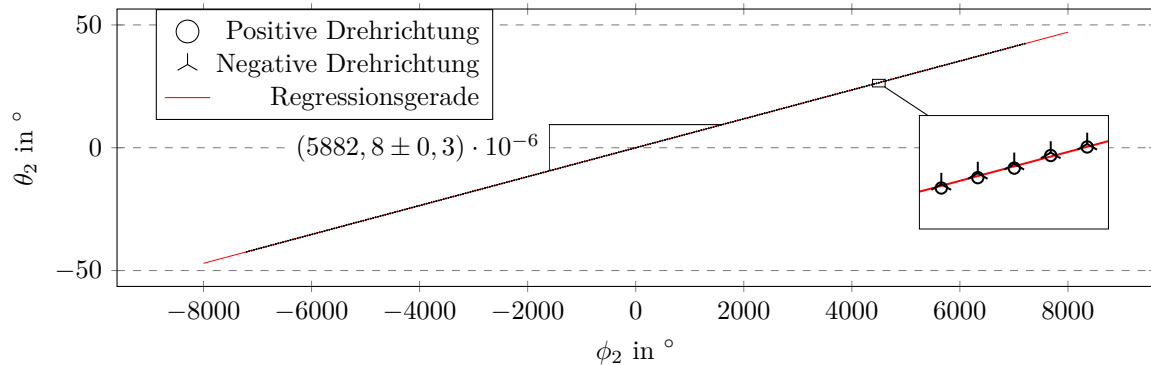


Abbildung A.16: Übersetzungsverhältnis des Getriebes der zweiten Roboterachse des Roboters *KR 30 L15/2*.

Die Steigung der Regressionsgerade entspricht hierbei der Übersetzung des Getriebes. Darüber hinaus ist im Vergleich der beiden Drehrichtungen ein richtungsabhängiges Verhalten erkennbar.

Eine Abweichung des Gleichlaufs bzw. der Übersetzungsgleichförmigkeit kann nicht identifiziert werden.

## Nachgiebigkeit und Hysterese

Die Nachgiebigkeit und Hysterese bei Getrieben sind wesentliche genauigkeitsrelevante Einflüsse. Abbildung A.17 zeigt die Nachgiebigkeitskennlinie des Getriebes der zweiten Roboterachse des Roboters *KR 30 L15/2*.

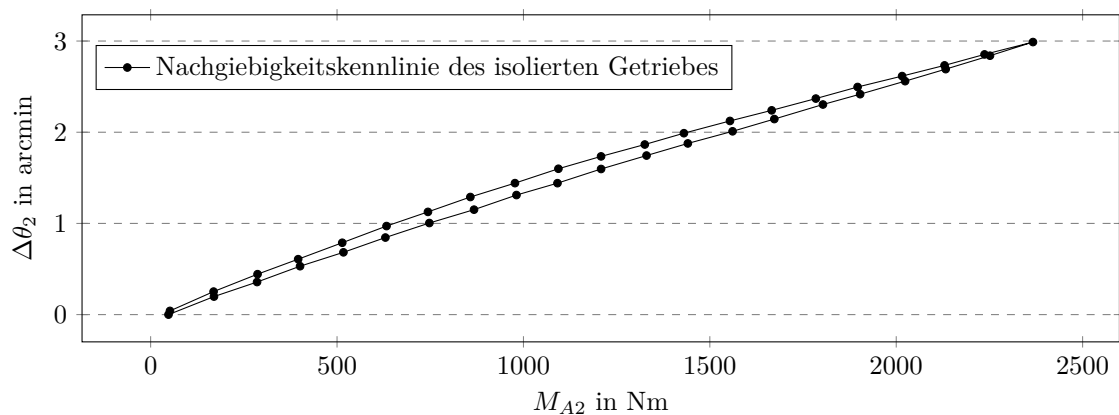


Abbildung A.17: Nachgiebigkeitskennlinie des Getriebes der zweiten Roboterachse des Roboters KR 30 L15/2.

In Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus der Analyse der Getriebecharakteristika am Roboter kann hier die Nachgiebigkeit und Hysterese qualitativ identifiziert werden.

Tabelle A.5 stellt exemplarisch für die zweite Achse des Roboters *KR 30 L15/2* die am Roboter ermittelten Charakteristika (relative Torsionssteifigkeit und Hysterese) den Ergebnissen der Untersuchung des isolierten Getriebes gegenüber.

Tabelle A.5: Charakteristika des Getriebes der zweiten Achse des Roboters *KR 30 L15/2*, bestimmt mit Hilfe der Analysemethode sowie nachfolgender Untersuchung des Einzelgetriebes nach der Demontage des Roboters (nach LUX, M. ULRICH et al. 2017).

Messmethode	relative Torsionssteifigkeit $\frac{\%}{\text{arcmin}^{-1}}$	Hysterese $\text{arcmin}$
Messung am Roboter	$0,40 \pm 0,02$	$0,25 \pm 0,18$
Messung am isolierten Getriebe	$0,44 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,06$

## A.5.2 Identifikation verschleißbedingter Einflüsse

Werden Roboter über eine lange Zeit für wiederholende Aufgaben eingesetzt, können sich verschleißbedingt die Charakteristika der Getriebe ändern. Solche Verschleißeffekte können sich in Form von Spiel, Torsionssteifigkeit, Hysterese oder axialen Verschiebungen manifestieren.

Abbildung A.18 zeigt die axiale Verschiebung in Abhängigkeit des Achswinkels aufgrund eines Lagerschadens bei der ersten Achse des Roboters KUKA KR 30 L15/2<sup>77</sup>.

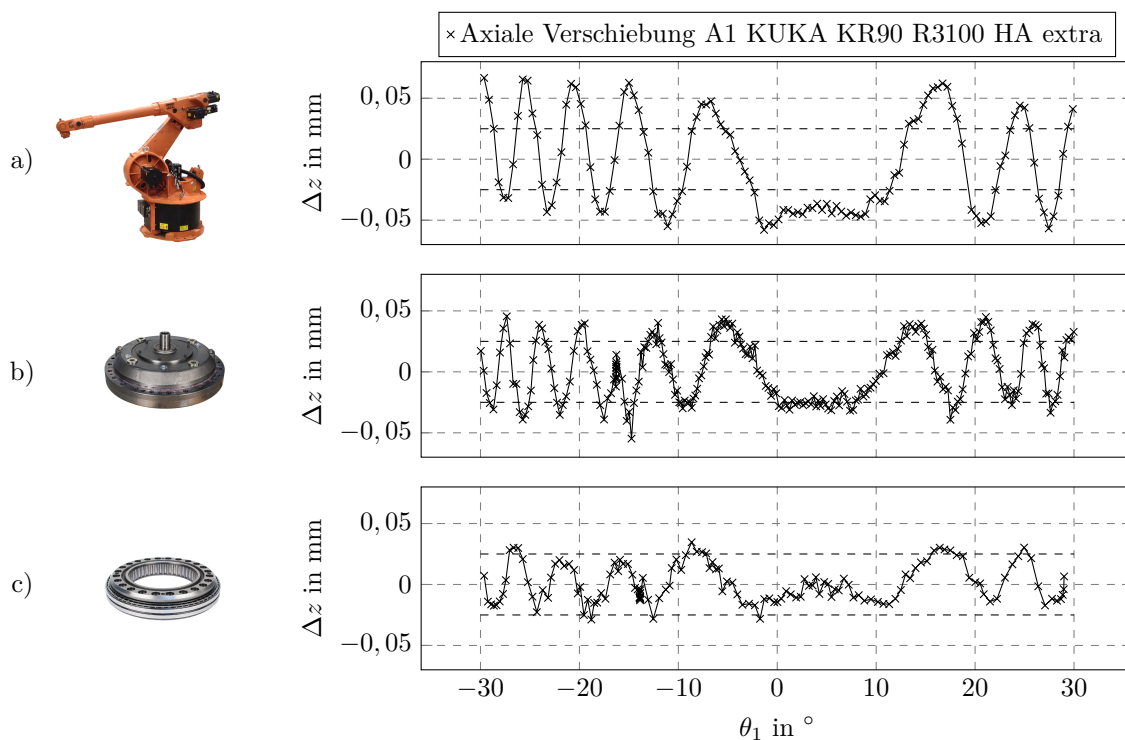


Abbildung A.18: Identifikation von verschleißbedingten Schäden am Getriebelager durch Messung der axialen Verschiebung in Abhängigkeit des Achswinkels am Beispiel der ersten Achse eines KUKA KR 30 L15/2 (in Anlehnung an LUX, M. ULRICH et al. 2017): a) Messung am Karussell, b) Messung am Getriebegehäuse, c) Messung am Getriebelager.

<sup>77</sup>Der Roboter wurde mehrere Jahre im industriellen Einsatz für repetitive Aufgaben verwendet.

---

Zur Verifizierung des detektierten Schadens wurde nachfolgend die axiale Verschiebung erneut am isolierten Getriebe sowie am entsprechenden Lager des Getriebes gemessen.

Die Identifikation des Verschleißes kann folglich ohne den Ausbau des Getriebes am Roboter selbst mit der in Abschnitt 4.1.2 dargestellten Methode erfolgen.

## A.6 Ergänzungen zur Modellierung

### A.6.1 Übertragungsmatrix für einen Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen

Im Speziellen nimmt für die in Abschnitt 4.1.1 identifizierte Struktur von Vertikal-Knickarmrobotern mit sechs Achsen und einer Zentralhand die Übertragungsmatrix  $\mathbf{A}$  die in Gleichung A.30 gegebene Form an.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{pmatrix} \quad \text{für } N = 6 \quad (\text{A.30})$$

Die Matrixeinträge repräsentieren neben der kinematischen Struktur des Roboters auch dessen Getriebeübersetzungen. Tabelle A.6 korreliert die Matrixeinträge mit den Übersetzungen der Getriebestufen aus Abbildung 4.5.

Die zur Parametrisierung der Antriebselemente (Übertragungsmatrix und Nullstellung der Motorwinkel) von seriellen kinematischen Ketten mit  $N$  angetriebenen Achsen notwendige Anzahl an unabhängigen Parametern  $K_{p,Antrieb}$  ist in Gleichung A.31 gegeben. Hierbei sei  $u$  die Anzahl an kinematisch gekoppelten, aufeinanderfolgenden Achsen.

$$K_{p,Antrieb} = 2 \cdot N + \frac{u^2 - u}{2} \quad (\text{A.31})$$

Für einen Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen und kinematisch gekoppelten Handachsen ( $u = 3$ ) sind folglich  $K_{p,Antrieb} = 15$  Parameter notwendig. Die Parameter werden in einem Parametervektor  $\vec{p}_{Antrieb} \in \mathbb{R}^{K_{p,Antrieb}}$  zusammengefasst.

*Tabelle A.6: Matrixeinträge der Übertragungsmatrix für einen Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen unter Verwendung der Übersetzungen der Getriebestufen nach Abbildung 4.5 (in Anlehnung an LUX, M. ULRICH et al. 2017).*

Matrixeintrag	Berechnungsterm
$a_{11}$	$(i_{G1} \mp 1)^{-1}$
$a_{22}$	$i_{G2}^{-1}$
$a_{33}$	$(i_{G3} + 1)^{-1}$
$a_{44}$	$i_{G4}^{-1}$
$a_{54}$	$(i_{G4} \cdot i_{G5})^{-1}$
$a_{55}$	$i_{G5}^{-1}$
$a_{64}$	$(i_{G4} \cdot i_{G6_2})^{-1} \cdot (i_{G5} + i_{G6_1})^{-1}$
$a_{65}$	$(i_{G5} \cdot i_{G6_2})^{-1}$
$a_{66}$	$(i_{G6_1} \cdot i_{G6_2})^{-1}$

## A.6.2 Beschreibung eines Biegebalkens nach Bernoulli

Abbildung A.19 zeigt schematisch einen einseitig eingespannten, langen Balken sowie die zur Berechnung verwendeten Größen.

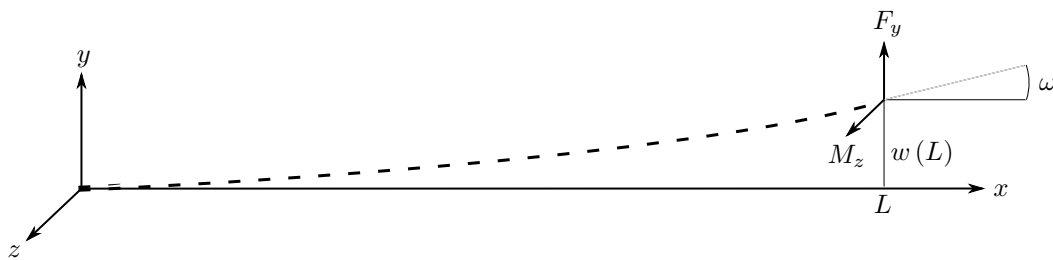


Abbildung A.19: Einseitig eingespannter Biegebalken mit am Balkenende wirkender externer Kraft und wirkendem Drehmoment.

Die Querbelastrung per Längeneinheit  $q(x)$ , die Querkraft  $Q(x)$  und das Biegemoment  $M(x)$  stehen hierbei gemäß den Gleichungen A.32a und A.32b in Zusammenhang.

$$\frac{dQ}{dx} = -q(x) \quad (\text{A.32a})$$

$$\frac{dM}{dx} = Q(x) \quad (\text{A.32b})$$

Wird weiterhin eine über die Balkenlänge gleichverteilte Masse angenommen, ergibt sich für die Querbelastrung per Längeneinheit Gleichung A.33. Durch Integration über die Balkenlänge erhält man die Querkraft und das Biegemoment.

$$q(x) = \frac{m \cdot \vec{g} \cdot \hat{y}}{L} \quad (\text{A.33})$$

Die Integrationskonstanten können hierbei unter Berücksichtigung der Randbedingungen A.34a–A.34d bestimmt werden.

$$Q(0) = -F_y - m \cdot \vec{g} \cdot \hat{y} \quad (\text{A.34a})$$

$$Q(L) = -F_y \quad (\text{A.34b})$$

$$M(0) = M_z + L \cdot F_y + \frac{L}{2} \cdot m \cdot \vec{g} \cdot \hat{y} \quad (\text{A.34c})$$

$$M(L) = M_z \quad (\text{A.34d})$$

Hierbei sei  $M_z$  das externe Drehmoment in z-Richtung und  $F_y$  die externe, am Balkenende wirkende Kraft (vgl. Abbildung A.19) sowie  $m$  die Gesamtmasse des Balkens.

Aus der schubstarren Balkentheorie 1. Ordnung folgen die Differentialgleichungen zur Bestimmung der Biegelinie (Gleichungen A.35), wobei  $E$  das Elastizitätsmodul des Balkens<sup>78</sup> und  $I$  das über die Balkenlänge konstante Flächenträgheitsmoment ist.

$$w''(x) = \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = -\frac{M(x)}{E \cdot I} \quad (\text{A.35})$$

Am Balkenende  $x = L$  ergibt sich folglich die Balkenbiegung  $\frac{dw}{dx}(L)$  und Auslenkung  $w(L)$  durch Integration über die Balkenlänge und unter Berücksichtigung der festen Balkeneinspannung.

Unter Annahme eines langen Balkens und der Kleinwinkelnäherung folgt für den Biegewinkel am Balkenende Gleichung A.36.

$$\omega \approx \frac{dw}{dx}(L) \quad (\text{A.36})$$

<sup>78</sup>Hierbei wird ein isotropes Elastizitätsverhalten des Balkens angenommen.

### A.6.3 Gültigkeitsbetrachtung des Robotermodells bezüglich des Kalibriervolumens

Die räumliche Gültigkeit des kalibrierten Robotermodells ist abhängig von den zur Parameteridentifikation herangezogenen Kalibrierkonfigurationen. Zur Analyse des Einflusses des Kalibriervolumens werden verschiedene Volumina im Arbeitsraum des Roboters definiert und zur Kalibrier- beziehungsweise Validierungserfassung herangezogen.

Tabelle A.7 stellt die verschachtelten, quaderförmigen Schalenvolumina dar. Für jedes Volumen wurden jeweils  $u = 300$  Roboterkonfigurationen<sup>79</sup> und korrespondierende TCP-Positionen erfasst.

*Tabelle A.7: Betrachtete quaderförmige Schalenvolumina zur Überprüfung der räumlichen Gültigkeit. Die Volumina der größeren Quader exkludieren hierbei die kleineren Quadervolumina (Erweiterte Darstellung in Anlehnung an KRALLER 2017, S. 55).*

Bezeichnung	Abmessungen in $mm$			Volumen in $m^3$
	$b_V$	$l_V$	$h_V$	
$V_1$	650	800	650	0,286
$V_2$	819	1008	693	$0,572 - V_1 = 0,286$
$V_3$	1032	1270	873	$1,144 - (V_1 + V_2) = 0,572$
$V_4$	1300	1600	1100	$2,288 - (V_1 + V_2 + V_3) = 1,144$

Die Genauigkeit in Abhängigkeit des betrachteten Volumens sowie des zur Identifikation der Parameter verwendeten Volumens ist in Abbildung A.20 dargestellt.

<sup>79</sup>Hiervon wurden jeweils 200 Roboterposen für die Parameteridentifikation ausgewählt. Die verbleibenden 100 Roboterkonfigurationen wurden als Validierungsdaten verwendet.

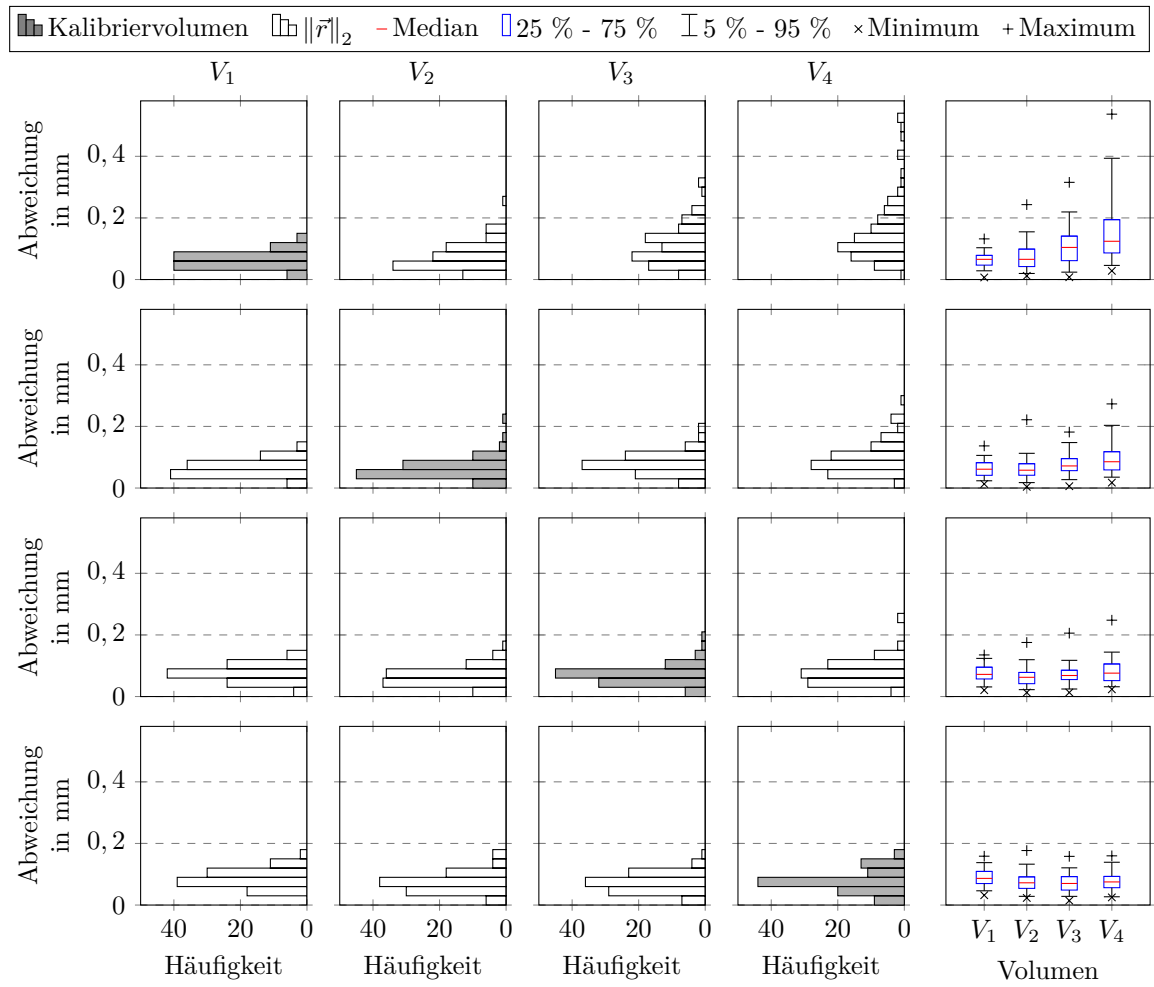


Abbildung A.20: Abhängigkeit der erreichten Modellgenauigkeit vom Kalibrier-  
volumen (Volumen zur Erfassung der TCP-Positionen). Die  
Residuenverteilung für die Parameteridentifikation ( $u = 200$ ) ist  
in grau dargestellt. Die Validierungsmessungen beinhalten 200  
Roboterkonfigurationen je Betrachtungsvolumen ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ ).

## A.7 Ergänzungen zur Messstrategie

### A.7.1 Einmessmethode für das Prüfobjekt

Zur Erzeugung der geometrischen Simulation sind Position und Orientierung des Prüfobjektes sowie aller relevanten Hindernisse (z.B. Halterung des Prüfobjektes) relativ zu einem Bezugskoordinatensystem des Roboters notwendig. Im Kontext der Robotik wird dies auch als Umgebungskalibrierung bezeichnet (vgl. Kapitel 2). Im Allgemeinen können die Transformationen der Umgebungsobjekte jedoch nicht als bekannt vorausgesetzt werden, da das Prüfobjekt meist durch den Anwender lediglich grob im Arbeitsraum positioniert wird. Dies erfolgt beispielsweise anhand von Bodenmarkierungen.

Für eine kollisionsfreie Bahnplanung muss die Genauigkeit der Ausrichtung innerhalb der geometrischen Simulation an jedem Punkt eines Objektes höher als die minimale Distanz  $d_c$  für die Kollisionsdetektion (siehe Gleichung 5.13 in Abschnitt 5.2.1) sein.

Werden die Positionen  ${}^B\vec{m}_{M,mess,i}$  mit  $i \in [1 \dots n_{einmess}]$  und  $n_{einmess} > 3$  von unabhängigen Merkmalen erfasst, welche sich nicht auf einer Verbindungsgerade befinden, kann eine geeignete Transformation des Prüfobjektkoordinatensystems  $K_P$  in das Bezugskoordinatensystem des roboterbasierten Messsystems  $K_B$  bestimmt werden. Auf Basis des Modells kann für jedes Merkmal dessen Position im Bezugskoordinatensystem abgeschätzt werden.

Hierfür wird mittels Regressionsverfahren eine Transformation  ${}^B\mathbf{T}_P$  bestimmt, welche das Gleichungssystem A.37 möglichst exakt erfüllt, wobei die Nominalpositionen  ${}^P\vec{m}_{M,nom,i}$  der betrachteten Merkmale im Koordinatensystem des Prüfobjektes dem Prüfplan entnommen werden.

$${}^B\vec{m}_{M,mess,i} \approx {}^B\mathbf{T}_P \cdot {}^P\vec{m}_{M,nom,i} \quad \forall i \in [1 \dots n_{einmess}] \text{ und } n_{einmess} > 3 \quad (\text{A.37})$$

Die Erfassung der Merkmale kann hierbei manuell oder teilautomatisiert erfolgen. Bei der manuellen Erfassung richtet der Anwender den Sensor durch Handver-

fahren des Roboters an den Merkmalen aus, hinterlegt jeweils die eindeutige Bezeichnung der Merkmale gemäß Prüfplan und löst die Sensormessung aus.

Bei der teil-automatisierten Erfassung schätzt der Anwender zunächst die Position und Orientierung des Prüfobjektes ab. Auf Basis dieser Abschätzung kann eine Bahn zur Erfassung der Merkmale geplant werden, welche vor der Ausführung vom Anwender überprüft und gegebenenfalls nachjustiert werden muss. Abbildung A.21 zeigt den Ablauf der Einmessmethode für die teilautomatisierte Erfassung der Merkmale zur Ausrichtung des Prüfobjektes.

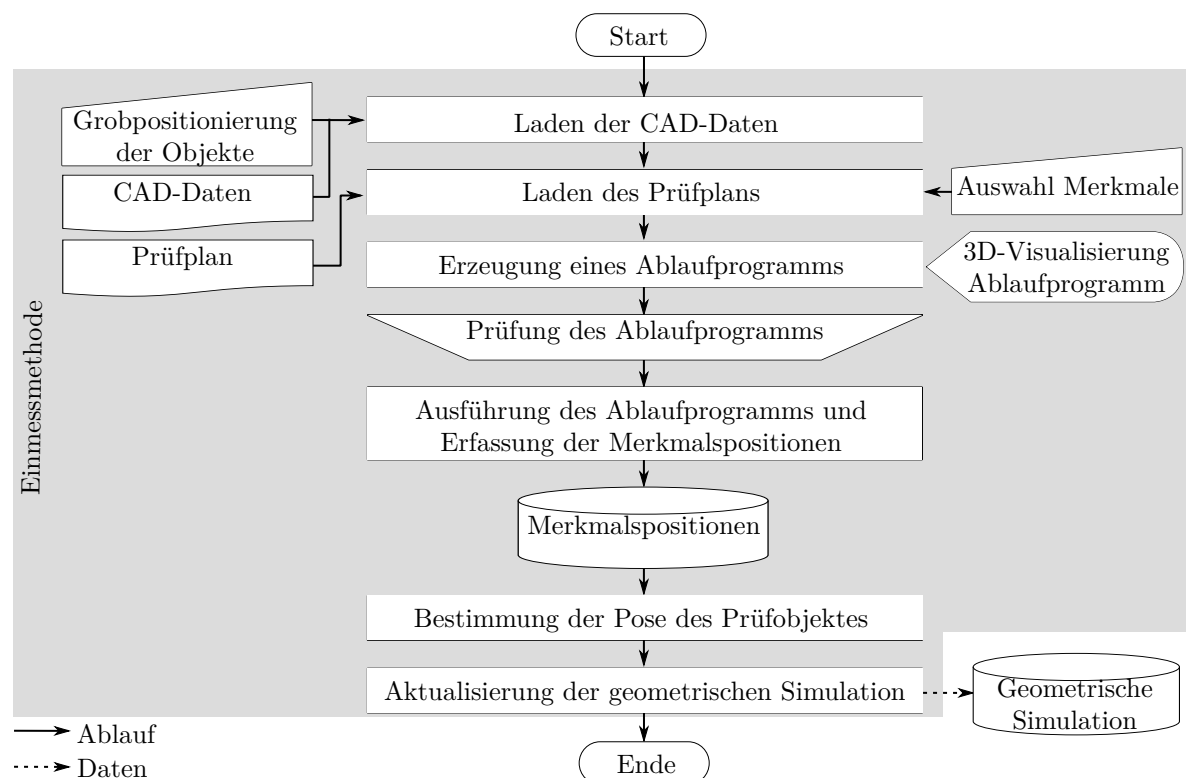


Abbildung A.21: Flussdiagramm der Einmessmethode

Die Einmessmethode ermöglicht folglich die Erstellung der geometrischen Simulation als Grundlage für die kollisionsfreie Bahnplanung ohne die Notwendigkeit externer Messtechnik zur Bestimmung der Position und Orientierung des Prüfobjektes.

## A.8 Ergänzungen zur softwaretechnischen Realisierung

Alle implementierungs- und hardwarespezifischen Eigenschaften<sup>80</sup> sind in einer Initialisierungsdatei mit einer erweiterbaren Auszeichnungssprache (Extensible Markup Language) (XML) hinterlegt und werden automatisiert bei Programmstart geladen.

### A.8.1 Benutzerschnittstelle

Die Benutzeroberfläche ermöglicht die Steuerung und Überprüfung des roboterbasierten Messsystems. Diese ist auf Basis der Klassenbibliothek „Windows Presentation Foundation“ (WPF) in der Programmiersprache C# implementiert und untergliedert sich in zwei Bereiche zur Steuerung und Überwachung (vgl. Abbildung 7.3).

Der linke Bereich (Steuerbereich) ermöglicht die Eingabe von Daten, Auswahl von durchzuführenden Aufgaben, Erstellung von neuen Messaufgaben und Kalibrierabläufen, Simulation und Ausführung von Aufgaben, Auswertung von Messungen und Steuerung der Selbst-Kalibrierung. Hierbei werden parallelisierbare Prozesse durch gleichzeitige Ausführstränge („Multithreading“) abgebildet. Zur Darstellung von Verteilungen der Residuen sowie von ausgewerteten Messungen wird die Softwarebibliothek „OxyPlot“<sup>81</sup> verwendet.

Der rechte Bereich (Überwachungsbereich) dient der Darstellung des aktuellen Systemzustands. Hierbei wird die aktuell auszuführende Sequenz in Form von Steuerbefehlen (unten rechts) und als mit dem Realsystem synchronisierte 3D-Visualisierung dargestellt. Die nächste Zielkonfiguration des Roboters wird hierbei jeweils durch einen transparenten Roboter visualisiert. Zur 3D-Visualisierung innerhalb der graphischen Benutzeroberfläche wird auf Teilfunktionen der Softwarebibliothek „HelixToolkit.WPF“<sup>82</sup> aufgebaut.

---

<sup>80</sup>Hierzu zählen unter anderem die Netzwerkeinstellungen, Standardeinstellungen und Parameter für Hardwarekomponenten, Ordnerverzeichnisse sowie Achswinkel- und Arbeitsraumbeschränkungen.

<sup>81</sup><http://www.oxyplot.org/> (zuletzt besucht am 14.01.2019)

<sup>82</sup><http://helix-toolkit.org/> (zuletzt besucht am 31.01.2019)

Die Ergebnisse der Messung können sowohl in der Benutzeroberfläche dargestellt werden als auch in Form von registrierten Punktwolken für die Berichtsgenerierung an externe Systeme übermittelt werden. Hierfür wurde die Schnittstelle „*D3D++*“<sup>83</sup> zur industriellen Auswertesoftware für Koordinatenmesstechnik „*PolyWorks*“<sup>84</sup> zur detaillierteren Auswertung der Messergebnisse verwendet.

Die Benutzeroberfläche erlaubt folglich die Steuerung des Gesamtprozesses ausgehend von den CAD-Daten und dem Prüfplan des Prüfobjektes über die Selbstkalibrierung bis hin zur Generierung eines Messberichts.

### A.8.2 Geometrische Simulation und Kollisionsdetektion

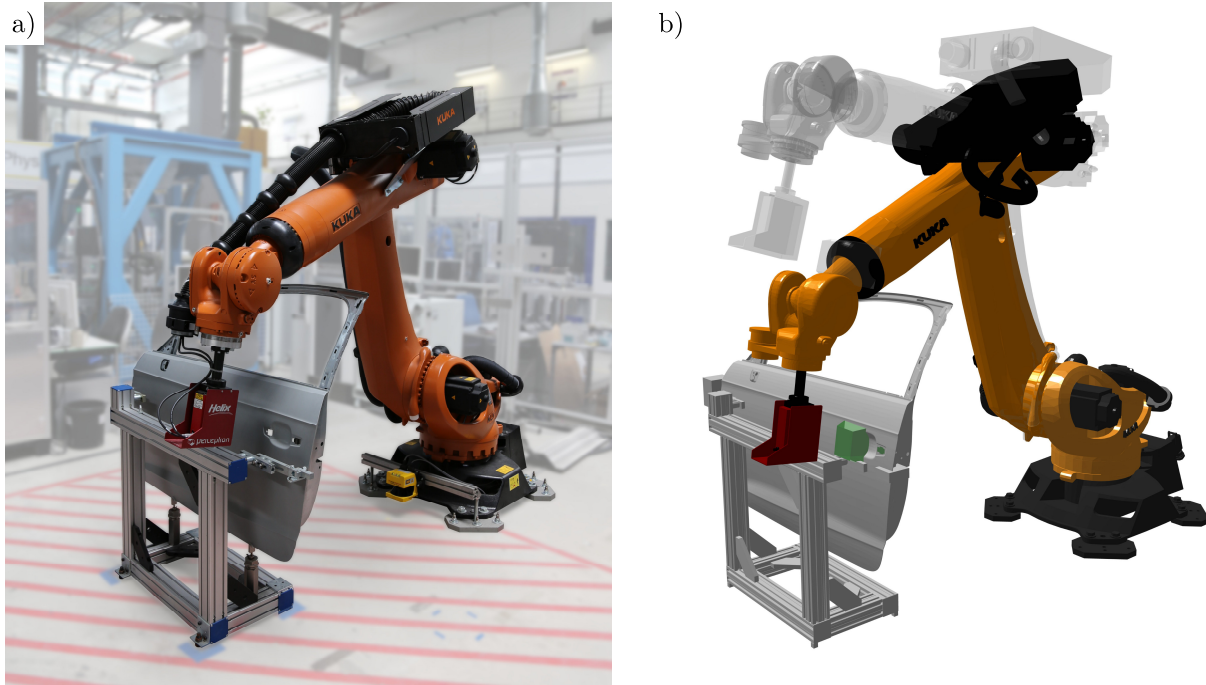
Die geometrische Simulation des roboterbasierten Messsystems beschreibt die geometrischen Zustände des Systems und ist ein wesentlicher Bestandteil zur Erzeugung von Kalibrierkonfigurationen und kollisionsfreien Bahnen. Hierfür werden CAD-Daten des Roboters und des 3D-Sensors mit den nominalen Geometriedaten gemäß Datenblatt bei Programmstart geladen. Die kinematische Struktur ist hierbei durch das Modell und die Programmbibliothek gegeben. Das Prüfobjekt, dessen Halterung und weitere Hindernisse der Roboterzelle können anhand ihrer CAD-Daten in die geometrische Simulation geladen werden. Als CAD-Dateiformat ist das Stereolithographie-Format (STL-Format) implementiert, wobei weitere Formate integrierbar sind. Die Position und Orientierung eines Objektes kann in Bezug auf das Koordinatensystem der Roboterbasis vom Anwender vorgegeben und über die Bedienoberfläche geändert werden.

Mithilfe einer Einmessroutine können durch die Erfassung von drei Merkmalen die Position und Orientierung des Prüfobjektes bestimmt werden. Hierbei werden auf Basis des aktuellen Robotermodells die Merkmalspositionen bestimmt und durch Regressionsverfahren die Position und Orientierung der geladenen Prüfobjektgeometrie angepasst.

<sup>83</sup>Erweiterung für *PolyWorks*®, entwickelt von der *Duwe-3d AG*, zur Realisierung einer Automatisierungsschnittstelle mittels TCP/IP sowie für den Im- und Export von Prüfmerkmalsplänen.

<sup>84</sup>Softwarepaket zur Verarbeitung und Auswertung von Punktwolken der Firma *InnovMetric Software Inc.*, in Deutschland vertrieben von der *Duwe-3d AG*.

Abbildung A.22 zeigt das reale roboterbasierte Messsystem und die korrespondierende visualisierte, virtuelle Repräsentanz.



*Abbildung A.22: Darstellung des realen, roboterbasierten Messsystems (a) und die korrespondierende visualisierte virtuelle Repräsentanz (b).*

Die geometrische Simulation bildet die datentechnische Grundlage für die Kollisionsdetektion zur Generierung gültiger Konfigurationen und Bahnen sowie für die Visualisierung des aktuellen Systemzustands.

Für die Detektion von Kollisionen werden die geometrischen Objekte auf Unterschreitung eines Mindestabstands für eine spezifizierte Konfiguration überprüft. Die Kollisionsdetektion ist in der Programmiersprache C# auf Basis der Softwarebibliothek „BEPUpysics“<sup>85</sup> für eine effiziente Berechnung in eine Grob- und Feinphase unterteilt. In der Grobphase werden zunächst anhand der primitiven Hüllkörper (beispielsweise Quader) und paarweisem Überprüfen der Überschneidungsmenge mögliche Kollisionen identifiziert. In der nachfolgenden Feinphase werden diese möglichen Kollisionen mit Hilfe der CAD-Geometrien überprüft. Hier-

---

<sup>85</sup><https://www.bepumentertainment.com/> (zuletzt besucht am 15.01.2019).

---

bei werden Positionen und Orientierungen der Objekte auf Basis des idealisierten Modells bestimmt und in der geometrischen Simulation angepasst.

### A.8.3 Generierung von Konfigurationen und Bahnen

Zur Generierung von Mess- und Kalibrierkonfigurationen wird ein Prüfplan eingelesen. Im Rahmen der Implementierung ist ein im Automobilbau etabliertes Format realisiert. Anhand der geometrischen Simulation sowie der Rückwärtstransformation werden anschließend für relevante Merkmale kollisionsfreie Konfigurationen erzeugt und in einer XML-Datei gespeichert. Hierbei werden die Sensorcharakteristika (wie beispielsweise Sensorsichtfeld und Richtlinien zur Sensorausrichtung) berücksichtigt. Diese erzeugten kollisionsfreien Konfigurationen dienen als Grundlage für die Auswahl von Kalibrierkonfigurationen beziehungsweise der Erzeugung einer Bahn.

Die graphentheoretische Repräsentation des Konfigurationsraums (vgl. Abschnitt A.2.2 und 5.2.3) wird unter Verwendung der Kollisionsdetektion durch die Softwarebibliothek „Satsuma“<sup>86</sup> in der Programmiersprache C# realisiert. Hierbei werden dynamisch Transferkonfigurationen erzeugt, bis ein zusammenhängender Graph entsteht. Dieser wiederum bildet die Grundlage für die Bestimmung der Reihenfolge der Kalibrierkonfigurationen.

Das erzeugte Ablaufprogramm wird in Form einer XML-Datei gespeichert und kann durch die Steuereinheit am Realsystem ausgeführt sowie auf der graphischen Benutzeroberfläche simuliert werden.

### A.8.4 Auswahl von Kalibrierkonfigurationen

Aufgrund des Berechnungsaufwands zur Singulärwertzerlegung ist das Modul zur Auswahl von Kalibrierkonfigurationen in der Programmiersprache C++ als dynamische Programmbibliothek implementiert. Mögliche Konfigurationen werden hierfür aus der erzeugten XML-Datei unter Verwendung der Softwarebibliothek

---

<sup>86</sup><http://satsumagraph.sourceforge.net/> (zuletzt besucht am 15.01.2019).

„TinyXML-2“<sup>87</sup> eingelesen. Zur Berechnung der partiellen Ableitungen des parametrisierten Modells für jede Konfiguration (Jacobi-Matrix) wird auf Teilfunktionen der Softwarebibliothek zur numerischen Optimierung nicht-linearer Probleme „Ceres Solver“<sup>88</sup> zugegriffen. Die in jeder Iteration der Auswahl durchgeführte Singulärwertzerlegung ist mit der Bibliothek „Eigen2“<sup>89</sup> implementiert.

Die im Rahmen der Auswahl erzeugte Menge an Konfigurationen wird zur nachfolgenden Erzeugung des Ablaufprogramms in Form einer XML-Datei gespeichert.

### A.8.5 Parametrisiertes Modell

Als wesentliches Berechnungsmodul wird das parametrisierte Modell im Kalibrier- und Messprozess häufig aufgerufen. Deshalb ist das Modell als dynamische Programmbibliothek in der Programmiersprache C++ unter Verwendung der algebraischen Funktionen der Softwarebibliotheken „Eigen2“ und „dlib“<sup>90</sup> implementiert.

Das parametrisierte Modell des roboterbasierten Messsystems ist durch dessen Parametersatz charakterisiert. Die Parameterwerte können hierbei zum einen über Funktionsaufrufe und zum anderen über das Einlesen einer externen Datei (kommaseparierte Datei) festgelegt werden. Um identifizierte Parameter wiederzuverwenden, können diese ebenfalls in einer Datei gespeichert werden.

Die Programmbibliothek enthält neben dem parametrisierten Modell Hilfsfunktionen zur Vorwärts- und analytischen Rückwärtstransformation für die idealisierte Kinematik. Die nominalen Geometriedaten sind hierbei in einer kommaseparierten Datei zur Beschreibung der kinematischen Struktur hinterlegt.

---

<sup>87</sup><https://github.com/leethomason/tinyxml2> (zuletzt besucht am 02.02.2019).

<sup>88</sup><http://ceres-solver.org/> (zuletzt besucht am 02.02.2019).

<sup>89</sup><https://eigen.tuxfamily.org/dox/> (zuletzt besucht am 01.02.2019).

<sup>90</sup><http://dlib.net/> (zuletzt besucht am 10.01.2019).

---

### A.8.6 Parameteridentifikation

Das Softwaremodul zur Parameteridentifikation ist als dynamische Programm-bibliothek in der Programmiersprache C++ implementiert. Die Zielfunktion beschreibt die quadratische Summe der Streuung der mehrfach gemessenen charakteristischen Merkmalvektoren und wird auf Basis des parametrisierten Modells und eines Kalibrierdatensatzes bestimmt. Die Skalierungsfaktoren der Parameter werden hierbei dynamisch auf Basis der partiellen Ableitungen des parametrisierten Modells unter Verwendung der numerischen Ableitungsfunktion der Bibliotheken „Ceres Solver“ und „Eigen2“ ermittelt und auf die Zielfunktion angewendet.

Zur Minimierung der Zielfunktion wird die Softwarebibliothek „Ceres Solver“ zur numerischen Optimierung nicht-linearer Probleme verwendet. Hierbei wird das Levenberg-Marquardt-Verfahren verwendet. Die Berechnung des arithmetischen Mittels der charakteristischen Merkmalsvektoren wird hierbei durch eine Rückruffunktion (engl.: callback) nach jeder Iteration des Lösungsverfahrens realisiert.

Um betriebsbedingte Effekte zu kompensieren, wird analog zur Parameteridentifikation die Zielfunktion minimiert, wobei jedoch nicht alle Parameter variiert werden. Dies ist im Rahmen der Implementierung durch Klassifizierung von Parametern und deren Ausschluss aus dem Optimierungsproblem umgesetzt.

Die ermittelten Parameter sowie deren Residuenverteilung werden nach der Parameteridentifikation in Form von kommaseparierten Dateien gespeichert.

### A.8.7 Schnittstellen zu Hardwarekomponenten

Die Schnittstellen zu den Hardwarekomponenten sind herstellerneutral definiert und werden gemäß den Hardwareklassen eingebunden. Die Softwarearchitektur ermöglicht die Einbindung beliebiger Roboter, Sensoren sowie externer Messtechnik. Hierfür wird für jede Hardwarekomponente eine C#-Klasse zur Hardwareabstraktion mit definiertem Funktionsumfang implementiert.

Im Rahmen der Implementierung wurde eine Schnittstellenklasse zu einem KUKA Roboter über das „Robot Sensor Interface“ (RSI) umgesetzt, wobei die Kommu-

nikation über das „User Datagram Protocol“ (UDP) mit Empfangsbestätigung erfolgt.

Die Steuerung des 3D-Sensors ist sowohl über den Roboter (RSI-Schnittstelle) als auch über eine direkte Anbindung der Sensor-Programmierschnittstelle (Application Programming Interface) (API) in die Schnittstellenklasse möglich.

Die klassenbasierte Einbindung von Hardwarekomponenten ermöglicht darüber hinaus auch die Integration von externer Messtechnik wie beispielsweise eines Lasertrackers. Exemplarisch ist eine Schnittstelle zur Steuersoftware des Lasertrackers LTD 500 der Firma Leica mittels „Component Object Model“ (COM) umgesetzt (PFEIFFER 2014, S. 46–47).

## A.9 Ergänzungen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Tabelle A.8: Geschätzte Zeitaufwände und Berechnung der Personalkosten.

		Symbol	Einheit	Kalibrierung		Roboterbasiertes Messsystem mit Selbst-		Roboterbasiertes Messsystem mit LT-Kalibrierung		Roboterbasiertes Messsystem mit LT-Tracking		Koordinaten-messgerät		Vielstellen-	
				auto.	man.	auto.	man.	auto.	man.	auto.	man.	auto.	man.	auto.	man.
Randbedingungen:	Maximale Systemverfügbarkeit	$T_{max}$	$h/a$	3960											
	Betriebsstunden pro Tag	-	$h/d$	16											
	Werkzeuge	-	$d$	250											
Verfüg-	Verfügbarkeit	-	%	99											
	Zeitaufwand pro Merkmal	$t_{E,M}$	$min$	0	5	0	5	0	5	0	10	0	15	0	120
	Zeitaufwand pro Prüfauftrag	$t_{E,P}$	$min$	20	75	0	140	0	140	0	140	40	100	0	210
Änderungs-	Einmessen der Bauteilpositionierung	-	$min$	5	10	-	20	-	20	-	20	10	10	-	30
	Programmierung je Prüfauftrag	-	$min$	15	5	-	60	-	60	-	60	30	30	-	120
	Einrichtungsaufwand je Prüfauftrag	-	$min$	-	60	-	60	-	60	-	60	-	60	-	60
	Einrichtungsaufwand je Merkmal	-	$min$	-	5	-	5	-	5	-	10	-	15	-	120
Indirekte Mess-	Zeitaufwand pro Jahr	$t_W$	$h/a$	625	-	1250	-	-	-	0	-	250	-	0	-
	Anzahl Kalibrierungen pro Tag	-	$1/d$	1	-	1	-	-	-	-	-	2	-	-	-
	Dauer Kalibrierung	-	$min$	30	-	60	-	-	-	-	-	30	-	-	-
	Anzahl Kompensationen pro Tag	-	$1/d$	8	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Direkte Mess-	Dauer Kompensation	-	$min$	15	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Zeitaufwand pro Merkmal	$t_{M,M}$	$s$	10	-	10	-	10	-	15	-	30	-	0	-
	Zeitaufwand pro Prüfauftrag	$t_{M,P}$	$s$	10	-	10	-	10	-	10	-	10	-	15	-
	Bewegungs- und Messdauer je Merkmal	-	$s$	5	-	5	-	5	-	5	-	15	-	-	-
Mess-	Messdauer je Merkmal	-	$s$	5	-	5	-	5	-	10	-	15	-	-	-
	Messdauer je Prüfauftrag	-	$s$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-
Auswertung	Messdauer je Prüfauftrag	-	$s$	10	-	10	-	10	-	10	-	10	-	10	-
	Auswertung je Prüfauftrag	-	$s$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximale Systemkapazität (Anzahl gemessener Merkmale pro Jahr)		$C_{sys}$	$1/a$	$C_{sys} = \frac{T_{max} - \Delta_P \cdot (t_{E,M} + t_{E,P}) - t_W}{t_{M,M} + \frac{t_{M,P}}{N_M}}$											
Anzahl an notwendigen Systemen		$N_{sys}$	-	$N_{sys} = \lceil \frac{N_M \cdot N_P}{C_{sys}} \rceil$											
Personalkosten pro Jahr (Auf Basis von Zeitaufwänden aus manuellen Tätigkeiten)		$K_{P,sys}$	€/a	$K_{P,sys} = \kappa_P \cdot (\Delta_P \cdot (N_M \cdot t_{E,M} + t_{E,P}) + t_W \cdot N_{sys} + N_M \cdot N_P \cdot t_{M,M} + N_P \cdot t_{M,P})$											

Tabelle A.9: Anschaffungskosten und Berechnung der Gesamtkosten.

Randbedingungen:													
Anzahl Änderungen Prüfaufträge pro Jahr: $\Delta_P$													
Durchsch. Anzahl an Merkmalen je Prüfobjekt: $N_M$													
Anzahl Prüfobjekte pro Jahr: $N_P$													
Personalkosten (inkl. Nebenkosten): $\kappa_P = 75 \text{ €/h}$													
Kalkulationszins: $i_{zins} = 5 \text{ \%}$													
Abschreibungsdauer: $n_{ab} = 6 \text{ a}$													
fix: merkmals- bzw. prüfauftragsunabhängig													
var.: merkmals- bzw. prüfauftragsabhängig													
Anschaffungskosten	Anschaffungskosten je System	Symbol	Einheit	Roboterbasiertes Messsystem mit Selbst-Kalibrierung		Roboterbasiertes Messsystem mit LT-Kalibrierung		Roboterbasiertes Messsystem mit LT-Tracking		Koordinaten-messgerät		Vielstellen-messeinrichtung	
		fix	var.	fix	var.	fix	var.	fix	var.	fix	var.		
		$K_{an,sys}$	T€	80	-	150	-	180	-	315	-	$15 + 15 \cdot N_M$	-
		-	T€	15	-	15	-	15	-	-	-	-	$15N_M$
		-	T€	50	-	50	-	50	-	-	-	-	-
		-	T€	-	-	70	-	100	-	-	-	-	-
	-	T€	-	-	-	-	-	-	300	-	-	-	
-	T€	15	-	15	-	15	-	15	-	15	-		
Restwert am Ende der Nutzung		$R_{sys}$	T€	3	-	5	-	5,5	-	9,5	-	$0,5 \cdot N_M + 0,5$	-
Flächenbedarf		$A_{sys}$	m <sup>2</sup>	25	-	25	-	25	-	20	-	10	-
Raumkosten		$\kappa_{raum}$	€/a·m <sup>2</sup>	30	-	30	-	30	-	50	-	30	-
Leistungsaufnahme		$P_{sys}$	kW	7	-	7	-	7	-	5	-	1	-
Energiekosten		$\kappa_{Energie}$	€/kWh	0,13									
Instandhaltungs-, Betriebs- und Lizenzkosten		$K_{Inst}$	T€/a	10	-	15	-	15	-	10	-	10	-
Maschinenabhängige Gemeinkosten je Messsystem pro Jahr		$K_{fix,a}$	€/a	$K_{fix,a} = A_{sys} \cdot \kappa_{raum} + \frac{N_M \cdot N_P \cdot T_{max} \cdot P_{sys} \cdot \kappa_{Energie}}{C_{sys} \cdot N_{sys}} + K_{Inst} + \frac{K_{an,sys} - R_{sys}}{n_{ab}} + \frac{K_{an,sys} + R_{sys}}{2} \cdot i_{zins}$									
Gesamtkosten Messsysteme gesamt pro Jahr		$K_{ges,a}$	€/a	$K_{ges,a} = N_{sys} \cdot K_{fix,a} + K_{P,sys}$									
Gesamtkosten Messsysteme gesamt pro Merkmal pro Jahr		$K_{ges,a,M}$	€/a	$K_{ges,a,M} = \frac{K_{ges,a}}{N_M \cdot N_P}$									