

300

Fertigungstechnik - Erlangen

Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Arnd Buschhaus

300

Buschhaus

Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung
robotergeführter Prozesse

ISSN 1431-6226
ISBN 978-3-87525-427-3

 Meisenbach
GmbH Verlag

Arnd Buschhaus

Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse

Arnd Buschhaus

*Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung roboter-
geführter Prozesse*

Bericht aus dem Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

FAPS

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:	07. Juli 2017
Vorsitzender des Promotionsorgans:	Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISSN 1431-6226

ISBN 978-3-87525-427-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich genannten Sonderfällen -, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2017

Herstellung: inprint GmbH, Erlangen

Printed in Germany

Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ingenieur

vorgelegt von

Arnd Buschhaus
aus Tettwang

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:	07.07.2017
Vorsitzender des Promotionsorgans:	Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. J. Franke Prof. Dr.-Ing. B. Kuhlenkötter

Arnd Buschhaus

Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und akademischer Rat am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, der mir durch das in mich gesetzte Vertrauen die Promotion ermöglichte. Die stetige Unterstützung meiner Forschungsarbeiten im Bereich der Robotik, Sensorik und Bahnplanung sowie die Bereitstellung eines fruchtbaren Forschungsumfelds und der notwendigen Infrastruktur waren für mich ebenso förderlich wie die zahlreichen wertvollen Diskussionen bezüglich neuer Forschungsvorhaben, Veröffentlichungen und Lehrveranstaltungen. Auch möchte ich mich für die Übernahme des Erstgutachtens bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme der Ruhr-Universität Bochum danke ich für die Übernahme des zweiten Gutachtens. Mein Dank gilt zudem Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Nöth als weiterem Mitglied des Prüfungsausschusses. Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, ehemaliger Inhaber des Lehrstuhls FAPS, danke ich für den Vorsitz des Promotionsverfahrens. Auch danke ich der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) sowie der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V., welche durch die Förderung meiner Forschungsarbeiten vorliegende Promotion ermöglicht haben. In diesem Zusammenhang bedanke ich mich zudem bei dem projektbegleitenden Ausschuss meines Forschungsvorhabens, welcher mit seinen fruchtbaren Hinweisen die Inhalte wesentlich mit geprägt hat.

Ein großer Dank gilt zudem allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl FAPS. Besonders bedanken möchte ich mich bei allen Kollegen und Kolleginnen des Forschungsbereichs Biomechatronik für den regen fachlichen Austausch und die darüber hinaus angenehme Arbeitsatmosphäre. Insbesondere die Kollegen Andreas Blank, Sebastian Reitelshöfer, Johannes Hörber, Michael Scholz, Christian Ziegler, Andreas Dobroschke, Thomas Kuhn und Johannes Götz haben ebenso zu einem Gelingen der Dissertation beigetragen wie die Vielzahl hochmotivierter und engagierter studentischer Mitarbeiter.

Mein herzlicher Dank gilt auch meinen Eltern, die mich auf meinem Bildungsweg stets gefördert haben sowie meiner Partnerin Claudia und meinem Sohn Ben, die für mich während der Anfertigung dieser Arbeit Rückhalt und somit eine besondere Hilfe waren.

Erlangen, im Juli 2017

Arnd Buschhaus

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation und Hintergrund.....	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	4
2	Industrieroboter als flexible Handhabungsgeräte konfrontiert mit vielerlei Genauigkeitseinflüssen	6
2.1	Industrieroboter.....	6
2.1.1	Kinematischer Aufbau von Industrierobotern	7
2.1.2	Arten von Industrierobotern.....	8
2.2	Genauigkeitsrelevante Eigenschaften robotergestützter Prozesszellen	9
2.2.1	Milieu: Zellkomponenten	10
2.2.2	Material: Werkstück und Werkmittel.....	10
2.2.3	Methode: Prozess	11
2.2.4	Maschine: Greifer, Endeffektor und Industrieroboter	11
2.3	Genauigkeitskenngrößen von Industrierobotern	14
2.3.1	Punktbezogene Wiederhol- und Absolutgenauigkeit.....	14
2.3.2	Bahnbezogene Wiederhol- und Absolutgenauigkeit	16
2.3.3	Geschwindigkeitsgenauigkeit, -wiederholgenauigkeit und -schwankung.....	17
2.3.4	Diskussion der Genauigkeitskenngrößen gemäß Norm.....	18

2.4	Roboterprogrammierung und der Einfluss auf die Genauigkeit bei der Bewegungsausführung	20
2.4.1	Online-Programmierung von Industrierobotern	20
2.4.2	Offline-Programmierung von Industrierobotern	21
2.4.3	Sensorbasierte Programmierung von Industrierobotern.....	22
2.4.4	Beurteilung der Programmierarten im Hinblick auf die Robotergeräufigkeitsanforderungen	22
2.5	Beispielhafte Einsatzbereiche hochgenauer Industrieroboter.....	24
2.5.1	Einsatz im Bereich „Umformen“	24
2.5.2	Einsatz im Bereich „Trennen“.....	24
2.5.3	Einsatz im Bereich „Fügen“	25
2.5.4	Einsatz im Bereich „Beschichten“	26
2.5.5	Einsatz im Bereich „Stoffeigenschaften Ändern“.....	26
2.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	27
3	Voruntersuchungen zum bewegungsabhängigen Genauigkeitsverhalten von Knickarmrobotern	28
3.1	Typische Genauigkeitswerte von Knickarmrobotern.....	28
3.1.1	Herstellerangaben.....	28
3.1.2	Untersuchungen aus Forschung und Entwicklung	29
3.2	Methode zur Evaluierung des Genauigkeitsverhaltens.....	31
3.2.1	Getestete Systeme zur Überprüfung des Verhaltens kleinskaliger Knickarmroboter	32
3.2.2	Messmittel zur hochgenauen und -dynamischen Erfassung von Robotertrajektorien.....	33
3.2.3	Ermittlung des Roboterbasiskoordinatensystems	34

3.3	Experimentell ermittelte Abweichungen beim Bahnverhalten	36
3.3.1	Absolut- und Wiederholgenauigkeit	37
3.3.2	Bereichsabhängiges Genauigkeitsverhalten	37
3.3.3	Abstandsabhängiges Genauigkeitsverhalten	39
3.3.4	Genauigkeitsverhalten in Eck-/Unstetigkeitsbereichen	40
3.3.5	Dynamikabhängiges Bahngenauigkeitsverhalten	41
3.3.6	Geschwindigkeitsverhalten	42
3.3.7	Konfigurationsabhängiges Genauigkeitsverhalten	43
3.4	Zusammenfassung und Handlungsbedarfe	44
4	Stand der Technik und Forschung im Bereich der Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern.....	47
4.1	Angepasste Bahnplanung und Roboterprogrammgenerierung im Bereich dreidimensionaler Bearbeitungsaufgaben.....	47
4.1.1	Prozess- und werkstückbezogene Bahnplanung	47
4.1.2	Kinematik- und dynamikbezogene Bahnplanung	49
4.2	Genauigkeitssteigerung durch Kalibrierung	51
4.2.1	Kalibrierung der Einzelachsen	52
4.2.2	Datengestützte/numerische Kalibrierung	52
4.2.3	Geometrische/statische Kalibrierung.....	53
4.2.4	Dynamische Kalibrierung	55
4.3	Regelung der Roboterbewegung zur Prozesslaufzeit durch sensorbasierte Ist-Zustandserfassung	55
4.3.1	Lichtschnittverfahren	56
4.3.2	Monokamerasysteme.....	58
4.3.3	Stereokamerasysteme	60
4.4	Schlussfolgerungen und Handlungsbedarfe	62

5	Methode zur Bahnplanung und Optimierung komplexer 3D-Robotertrajektorien	64
5.1	Optimierung von Roboterbewegungsbahnen hinsichtlich Stetigkeit	64
5.1.1	Motivation und Hintergrund	65
5.1.2	Lösungsansatz	67
5.2	Methode und mathematische Grundlagen	70
5.2.1	Überführung der Bahn in ein Bearbeitungskoordinatensystem	70
5.2.2	Auswahl der Optimierungsstrategie	73
5.2.3	Modifikation der Prozessbahn	74
5.2.4	Anpassung der Bewegungsparameter	80
5.2.5	Inverse Koordinatentransformation	82
5.3	Zusammenfassung und Beurteilung	82
6	Universelles Regelungssystem zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern	84
6.1	Systemarchitektur	84
6.1.1	Aufbau und Funktionsweise der verteilten Anwendung	85
6.1.2	Fernsteuerungseinheit	87
6.1.3	Ausführungseinheit	88
6.2	Bahnsteuerung und Regelkreissystematik	89
6.2.1	Bahnsteuerung dreidimensionaler Robotertrajektorien	89
6.2.2	Methode zur vektorbasierten Bahnsteuerung	91
6.2.3	Feininterpolationsalgorithmus zur Ausregelung von Bewegungsabweichungen	93

6.3	Ermittlung des Ist-Zustands als Regelgröße	104
6.3.1	Methode zur vektorbasierten, translatorischen Ist-Bewegungsermittlung.....	104
6.3.2	Algorithmus zur Ist-Positionsermittlung	106
6.3.3	Algorithmus zur translatorischen Ist-Bewegungsermittlung.....	108
6.3.4	Algorithmus zur Folgereferenzierung	110
6.4	Ermittlung des Soll-Zustands als Führungsgröße	111
6.4.1	Ermittlung durch Berechnung.....	111
6.4.2	Erfassung aus der Robotersteuerung	112
6.5	Zusammenfassung und Beurteilung	113
7	Beispielhafte Umsetzung sowie Evaluierung der Methoden und Algorithmen	115
7.1	Versuchsumgebung.....	115
7.2	Umsetzung der Methode zur Bahnoptimierung und Analyse	118
7.2.1	Implementierung in dem Softwaretool „PathTransformer“.....	118
7.2.2	Analyse des Beschleunigungsverhaltens der Achsen.....	120
7.2.3	Analyse des Relativgeschwindigkeitsverhaltens	125
7.3	Umsetzung des Regelungssystems und Analyse	128
7.3.1	Implementierung in dem Softwaretool „UniversalRobotControl“	128
7.3.2	Analyse der Regelgrößenermittlung.....	132
7.3.3	Analyse des Regelverhaltens.....	141
7.3.4	Synthese des Gesamtsystems.....	148
7.4	Zusammenfassung und Beurteilung	152

8	Zusammenfassung	154
9	Summary.....	158
10	Abkürzungs- und Variablenverzeichnis	161
11	Literaturverzeichnis	169
12	Verzeichnis projektbezogener studentischer Arbeiten	185
13	Verzeichnis projektbezogener Publikationen	188

1 Einleitung

Übergeordnetes Thema vorliegender Dissertationsschrift ist die Absolutgenauigkeitssteigerung von Standardindustrierobotern. Einen ersten Forschungsschwerpunkt stellen hierbei Algorithmen zur Optimierung komplexer Robotertrajektorien als Basis für Roboter-Steuerungsprogramme dar, welche eine hochgenaue Bewegungsausführung überhaupt erst ermöglichen. Den zweiten wesentlichen Forschungsgegenstand bildet eine Methode zur flexiblen, universellen Regelung von Roboterbewegungen zur Prozesslaufzeit. Die Arbeiten basieren dabei auf den Erkenntnissen detaillierter Untersuchungen des bewegungssituationsabhängigen Genauigkeitsverhaltens von Industrierobotern. Diese Untersuchungen stellen einen dritten Schwerpunkt der Arbeiten dar.

1.1 Motivation und Hintergrund

Industrieroboter sind heutzutage als flexible Handhabungsgeräte aus der Herstellung innovativer Produkte nicht mehr wegzudenken und gewinnen zudem aufgrund ihrer weitreichenden Vorteile zunehmend an Bedeutung. Dies belegen auch aktuelle Studien der International Federation of Robotics (IFR) und des VDMA Fachverbandes Robotik + Automation. So wird in den aktuell vorliegenden Zahlen bis 2018 von einem prozentualen jährlichen Wachstum der weltweiten Roboterinstallationen im zweistelligen Bereich ausgegangen, wobei insbesondere der asiatische/australische Markt als zentraler Treiber angesehen wird [1]. Auch roboterherstellende Firmen aus Deutschland partizipieren an dem weltweiten Erfolg. Seit der Wirtschaftskrise 2009/2010 erreichen sowohl die inländischen Verkaufszahlen als auch die Exporte in Deutschland hergestellter Roboter jährlich neue Rekordzahlen [2]. Diese positive Entwicklung ist auch in dem zunehmenden Anwendungsspektrum von Robotern begründet. Während Industrieroboter in der Vergangenheit maßgeblich im Bereich einfacher, punktorientierter Pick-and-Place Aufgaben genutzt wurden, werden Roboter mittlerweile bei einer Vielzahl weiterer Prozesse verwendet. So werden Industrieroboter zusätzlich zu deren Einsatz im Bereich der Handhabung vermehrt bei komplexen Prozessaufgaben wie z. B. Schweißen, Löten, Kleben, Fräsen, Beschichten, Schneiden, Schleifen, Entgraten, Falzen, Montieren/Demontieren und sogar Messen eingesetzt [3].

In dem Kontext des erweiterten Anwendungsspektrums und der zunehmenden Aufgabenkomplexität, ist auch eine zeiteffiziente Programmierung der mit dem jeweiligen Prozess einhergehenden Roboterbewegung von hoher Relevanz. Während die Programmierung punktorientierter Pick-and-Place Aufgaben häufig direkt am realen Roboter und in der realen Prozessumgebung stattfindet, ist dies bei Prozessen mit komplexen dreidimensionalen Roboterbewegungsbahnen nicht wirtschaftlich darstellbar. Dies ist insbesondere im Hinblick auf sinkende Losgrößen

bei gleichzeitig steigender Variantenvielfalt von Bedeutung, da eine manuelle Programmierung mit einem hohen Arbeitsaufwand zum einen und einem Anlagenstillstand zum anderen einhergeht. Aufgrund dessen gewinnt eine Offline-Programmierung des Roboters unter Nutzung moderner 3D-Kinematik-Simulationstools zunehmend an Bedeutung. Basierend auf einer virtuellen Darstellung der Prozessumgebung, kann die erforderliche Roboterbewegung bereits in der Planung dargestellt und basierend auf diesen Daten Steuerungsprogramme für die Roboterkinematik erstellt werden.

Kritisch sind jedoch Abweichungen der optimalen, virtuellen Prozessumgebung von dem realen Gegenstück. So werden geometrische Unterschiede oder physikalische Effekte in der Simulation nicht abgebildet. Entsprechend sind die offline erzeugten Steuerungsprogramme nur eingeschränkt auf die Realität übertragbar. Eine Vielzahl von Arbeiten zielt dementsprechend darauf ab, die Unterschiede zwischen realer und virtueller Umgebung durch Zell-, Werkzeug- und Werkstückkalibrierung zu verringern. Besonders herausfordernd ist in diesem Kontext die Modellierung des tatsächlichen Roboterbewegungsverhaltens, da hier eine Vielzahl unterschiedlicher Ursachen wechselwirken. So ist eine quantitative Beschreibung und Berücksichtigung instationärer oder dynamischer Effekte aufgrund mannigfaltiger mechanischer und physikalischer Einflüsse sowie zusätzlich einer hohen Anzahl unterschiedlicher Kinematiken derzeit technisch und auch wirtschaftlich nicht sinnvoll in der Simulation darstellbar. Erschwerend kommt der Umstand hinzu, dass die normativen Grundlagen zur Beschreibung der Roboter Genauigkeitskenndaten ausgesprochen unscharf gehalten sind und damit ein großer Spielraum zur Angabe der Roboter Genauigkeit eingeräumt wird. Zusätzlich fehlt den verfügbaren Simulationstools die Möglichkeit Roboterprogramme zu generieren, die genauigkeitsreduzierenden dynamischen Effekten während der Bewegung Rechnung tragen und deren Auftreten bereits durch eine geeignete Ausprägung der Trajektorie vermeiden. [4], [5], [6], [7]

Im Zusammenspiel resultieren die dargestellten Aspekte in einer sehr hohen Absolut(un)genauigkeit des Roboters, welche für Prozesse mit hohen Genauigkeitsanforderungen nicht ausreichend ist.

Eine vielversprechende Möglichkeit zur Absolutgenauigkeitssteigerung ist die Ausstattung des Roboters mit Sensorsystemen, welche eine dynamische Erfassung der tatsächlich herrschenden Umgebungsbedingungen ermöglichen. Geeignet verarbeitet und berücksichtigt bei der Prozessausführung, erlauben die sensorbasierten Informationen eine adaptive Anpassung des Roboterhaltens an die reale Situation. Dieser auch als „(Visual) Servoing“ bekannte Ansatz [8], kann unter anderem eingesetzt werden, um die Roboter Genauigkeit während eines individuellen Prozessdurchlaufs zu steigern und zudem auf weitere Randbedingungen zu reagieren, wie z. B. eine Verschiebung oder Verdrehung des Werkstücks. Vorteilhaft bei dieser Vorgehensweise ist insbesondere, dass nicht spezifische Ursachen für

Abweichungen ausgeglichen werden, sondern vielmehr der schlussendliche Effekt adressiert wird. Dieser Effekt ist dabei durch eine Vielzahl zusammenwirkender Faktoren bedingt und die Identifikation einzelner, abweichungserzeugender Wirkmechanismen nicht eindeutig möglich. [9], [10], [11], [12]

Moderne Robotersteuerungen bieten zu deren Regelung häufig Schnittstellen an, die den Anschluss spezifischer Sensoren ermöglichen, wobei die Steuerungen Befehlssätze für deren Auswertung bereitstellen. Die Dynamik der Verarbeitung externer Sensordaten und die Einflussnahme auf den Roboter ist jedoch nicht zuletzt aufgrund der begrenzten Berechnungskapazitäten der Robotersteuerungen und den limitierten Möglichkeiten des zur Verfügung gestellten Befehlssatzes sehr eingeschränkt. Oft bildet auch diese Verarbeitungsdynamik in Kombination mit einer hohen geometrischen Auflösung der Sensordatenverarbeitung und zugleich dynamischen/hochgenauen Regelung der Roboterbewegung einen unlösbaren Zielkonflikt. So sind die bekannten Ansätze zumeist entweder genau oder zeiteffizient, vereinen aber nur selten beide Eigenschaften. Auch die nur unzureichende Interoperabilität unterschiedlicher Sensortypen verschiedener Sensorhersteller mit proprietären Steuerungsarchitekturen der Roboterhersteller bedingen Hemmnisse und Einschränkungen, insbesondere im Hinblick auf eine Austauschbarkeit von Roboter und/oder Sensor sowie weiterführend auch der Applikation.

1.2 Zielsetzung

Zielsetzung dieser Arbeit ist in diesem Kontext die Erforschung von Methoden, Systemen und Werkzeugen zur hochpräzisen adaptiven Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse. Der Fokus liegt hierbei auf der Absolutgenauigkeitssteigerung von Industrierobotern bis in den Bereich der Wiederholgenauigkeit hinein.

Ein zentrales Ziel ist die Erforschung einer Methode zur Roboterregelung, welche zusätzlich zur Genauigkeitssteigerung durch eine effiziente, externe Datenverarbeitung eine dynamische Regelung der Roboterbewegung ermöglicht. Damit einhergehend wird eine übergeordnete Systemarchitektur erforscht, entwickelt und umgesetzt, die eine einfache Adaptierbarkeit an die proprietären Steuerungskonzepte unterschiedlicher Roboterhersteller ermöglicht. Um die Universalität des Systems weiter zu steigern und eine einfache Anpassung an die individuellen Erfordernisse mannigfaltiger Applikationen zu erlauben, ist eine weitere Forschungsaufgabe, die modulare Anbindbarkeit unterschiedlicher Datenquellen, wie z. B. verschiedener Sensorsysteme, zu ermöglichen. Zentraler Bestandteil der Systemarchitektur ist dabei eine Datenverarbeitungs-Zwischenebene, in welcher die Entscheidungsintelligenz verankert ist. Diese Zwischenebene ermöglicht eine Entkoppelung der Datenerfassung von der Befehlsausführung durch die Roboterkinematik. Ziel ist es, einerseits die etablierten Funktionalitäten moderner Robotersteuerungen zu nutzen

und gleichzeitig deren Fähigkeitsportfolio flexibel zu erweitern und somit an die spezifischen Anforderungen verschiedenster Applikationen anzupassen.

Insbesondere im Hinblick auf das Forschungsziel der Absolutgenauigkeitssteigerung, ist zusätzlich zu dem adressierten regelungstechnischen Ansatz die Bereitstellung geeigneter Roboterprogramme notwendig, welche eine kontinuierliche und exakte Bewegungsausführung zur Prozesslaufzeit überhaupt erst erlauben. Dementsprechend ist ein zweiter Forschungsgegenstand die Entwicklung einer Methode zur aufwandsarmen Generierung von Roboterbewegungsbahnen, welche zum einen den Prozessanforderungen genügen, zum anderen aber auch die Basis für ein gesteigertes Genauigkeitsverhalten des Industrieroboters bilden.

Schlussendlich soll die vorliegende Arbeit durch grundlegende Genauigkeitsuntersuchungen von Knickarmrobotern auch einen Beitrag leisten, deren Genauigkeitsverhalten besser zu verstehen, da dem Stand der Technik und Forschung dahingehend nur wenig aussagekräftige Informationen entnommen werden können. Die Erkenntnisse der Untersuchungen bilden hierbei die Basis für die erforschten Methoden zur Steuerung und Regelung der Roboterbewegung.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Nach einer kurzen Einführung in die Grundlagen der Robotik und Vorstellung typischer Kinematiken, werden in Kapitel 2 die genauigkeitsrelevanten Eigenschaften robotergestützter Prozesszellen dargestellt mit besonderem Schwerpunkt auf der Industrieroboter Genauigkeit sowie den normativen Grundlagen zur Beschreibung derselben. Da auch die Art der Roboterprogrammerstellung das Genauigkeitsverhalten von Robotern wesentlich beeinflusst, sind die Möglichkeiten der Roboterprogrammierung und deren Auswirkungen Inhalt des Folgeabschnitts. Abschließend werden mögliche Anwendungsfelder für bahngenaue Roboter dargestellt.

Wesentliche Voraussetzung für eine Verbesserung der Roboter Genauigkeit ist ein tiefgreifendes Verständnis über deren Verhalten. Dementsprechend werden in Kapitel 3 typische Kennwerte aus Literatur, Datenblättern sowie wissenschaftlichen Studien diskutiert. Aufgrund der eingeschränkten Aussagekraft der verfügbaren Werte und der Vorgaben gemäß Norm, besteht ein Handlungsbedarf in erweiterten Genauigkeitsüberprüfungen von Knickarmrobotern. Die in Kapitel 3 dargestellten eigenen Untersuchungen adressieren diesen Umstand. Dabei erlauben die Erkenntnisse eine deutlich differenziertere Betrachtung des Roboter Genauigkeitsbegriffs im Vergleich zum Stand der Technik und Forschung und unterstreichen die Bedeutung einer Genauigkeitssteigerung.

Aufgrund der zunehmenden Relevanz einer hohen Roboter Genauigkeit bei unterschiedlichsten Applikationen ist die Aufgabenstellung der Genauigkeitsverbesserung seit vielen Jahren im Fokus der Bemühungen von Roboterherstellern, Systemintegratoren und Forschungsinstituten. Bekannte Ansätze aus dem Stand der

Technik und Forschung gehören zu den Bereichen der Bahnerstellung, Roboterkalibrierung und der Roboterregelung. In Kapitel 4 werden die Eigenschaften der bereits durchgeführten Arbeiten aus Forschung, Entwicklung und Applikation beschrieben. Ausgehend von den Erkenntnissen der eigenen Genauigkeitsuntersuchungen und der umfassenden Analyse des Standes der Technik und Forschung werden im Nachgang die in dieser Arbeit behandelten weiteren Forschungsfelder abgeleitet.

Ein wesentlicher Forschungsbereich ist eine angepasste Programmerstellung für die Robotersteuerung zur Reduzierung von Ungenauigkeiten aufgrund der physikalisch bedingten Kinematikträgheit und das hierdurch verringerte Genauigkeitsverhalten, insbesondere bei abrupten Richtungsänderungen oder Umorientierungen. Als Lösungsansatz wird in Kapitel 5 eine während der Arbeiten erforschte Methode zur Modifikation von Robotertrajektorien hinsichtlich eines stetigen Verlaufs unter Berücksichtigung prozess-, werkstück- und roboterspezifischer Randbedingungen thematisiert. Durch Anwendung der Methode werden nicht erfüllbare Bewegungsvorgaben für den Manipulator vermieden. Die Methode birgt zudem das Potential, sowohl Verschleiß als auch Energieverbrauch der Kinematik zu senken.

Ein vielversprechender Ansatz zur Erhöhung der Roboter Genauigkeit zur Bewegungslaufzeit ist der Einsatz von Sensoren, deren Informationen genutzt werden, um die Roboterbewegung nachzuregeln. Bekannte Systeme weisen jedoch Defizite im Hinblick auf Genauigkeit, Geschwindigkeit und Universalität auf. Zentraler Inhalt von Kapitel 6 ist dementsprechend die Erläuterung einer im Rahmen der Arbeiten erforschten Methode zur hochpräzisen und -effizienten adaptiven Regelung robotergeführter Prozesse mit besonderem Schwerpunkt auf der Genauigkeitssteigerung von Standardknickarmrobotern. Ausgehend von einer Erklärung der übergeordneten Systemarchitektur, werden in diesem Kapitel die maßgeblichen Methoden zur Bewegungsausführung und Regelkreissystematik sowie der Führungs- und Regelgrößenerfassung erläutert. Zusätzlich zu einem Einsatz im Bereich der Genauigkeitssteigerung ist das System zudem flexibel für verschiedene Applikationen einsetzbar (z. B. Gestensteuerung, Griff in die Kiste etc.) und birgt das Potential zum universellen Einsatz bei unterschiedlichen herstellerepezifischen Robotersteuerungen, was zum Kapitelabschluss zusammenfassend dargestellt wird.

Die erforschten Methoden zur Trajektorienoptimierung und Roboterregelung werden exemplarisch in den intuitiv bedienbaren Softwaretools „PathTransformer“ und „UniversalRobotControl“ umgesetzt. In Kapitel 7 werden dieses Tools einleitend kurz vorgestellt. Im Nachgang werden die Untersuchungsergebnisse der quantifizierten, experimentellen Evaluierung der Methoden dargestellt und diskutiert. Im besonderen Fokus stehen hierbei neben dem Funktionserfüllungsgrad zudem die Zeiteffizienz und erreichbare geometrische Genauigkeit durch die erforschten Algorithmen.

In Kapitel 8 wird die Arbeit abschließend zusammengefasst und ausblickende Hinweise auf mögliche Folgearbeiten gegeben.

2 Industrieroboter als flexible Handhabungsgeräte konfrontiert mit vielerlei Genauigkeitseinflüssen

Die zentrale Aufgabe eines Industrieroboters ist die definierte Führung eines Werkzeugs oder eines Werkstücks im Raum. Ein wesentliches Merkmal von Robotern ist deren freie Programmierbarkeit hinsichtlich der auszuführenden Bewegungen und die daraus resultierende universelle Einsetzbarkeit. Die Möglichkeit Bewegungsfolgen mittels textueller Steuerungsprogramme vorzugeben, ermöglicht eine einfache Anpassung der Bewegung ohne die Notwendigkeit mechanischer Eingriffe. Weitere Voraussetzungen für eine universelle Einsetzbarkeit sind mehrere Achsen, die vielfältige Bewegungen erlauben. Unzureichende Absolutgenauigkeiten schränken deren Einsetzbarkeit für Aufgaben mit besonders ausgeprägten Genauigkeitsanforderungen jedoch oftmals ein.

Nach einer kurzen Darstellung typischer Industrieroboter Ausführungen in Abschnitt 2.1 werden in Abschnitt 2.2 die genauigkeitsrelevanten Eigenschaften robotergestützter Prozesszellen erläutert. Die normativen Grundlagen zur Beschreibung der Genauigkeit von Industrierobotern werden in Abschnitt 2.3 erörtert und deren Aussagekraft diskutiert. Die Art der Roboterprogrammierung bestimmt wesentlich die Genauigkeitsanforderungen, welche an die Roboter gestellt werden. In Abschnitt 2.4 werden dahingehend die Möglichkeiten zur Roboterprogrammierung mit Bezug zu den Genauigkeitsanforderungen erläutert. Anwendungsfelder für hochgenaue Industrieroboter werden in Abschnitt 2.5 aufgezeigt und das Kapitel in Abschnitt 2.6 abschließend zusammengefasst.

2.1 Industrieroboter

Definiert sind Industrieroboter „als universell einsetzbare [flexible] Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar sind.“ [13]. Die wesentlichen Komponenten eines Industrierobotersystems sind in Abbildung 1 dargestellt.

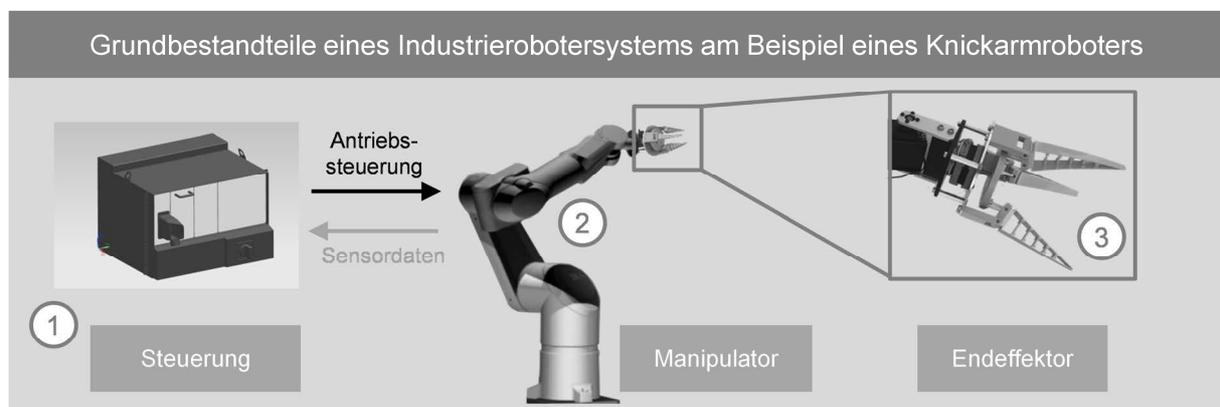


Abbildung 1: Grundbestandteile eines Industrierobotersystems [14]

Grundlegende Komponenten von Industrierobotersystemen sind eine Robotersteuerung (1), ein Manipulator (2) sowie ein auswechselbarer Endeffektor (3), welcher an der Roboterhandwurzel montiert ist. Letzterer dient zur Erfüllung der jeweils vorgesehenen Handhabungs-, Montage- oder Bearbeitungsaufgabe. Der Manipulator wird durch seinen kinematischen Aufbau beschrieben, der einen wesentlichen Einfluss auf dessen Genauigkeitsverhalten ausübt. Die Steuerung übernimmt zum einen Berechnungsaufgaben und zum anderen die Ansteuerung der Antriebe. Zu den Berechnungen gehören die Transformation von Positionen und Orientierungen von und in das Roboterkoordinatensystem, die Bahnplanung sowie die Verarbeitung der Sensordaten des Manipulators. Zentrale Leistungskenngröße der Robotersteuerung ist der Interpolationstakt, welcher typischerweise im Bereich von ein bis zwölf Millisekunden liegt [15].

2.1.1 Kinematischer Aufbau von Industrierobotern

Die Kinematik beschreibt den mechanischen Aufbau des Manipulators, also die räumliche Zuordnung der Bewegungsachsen nach Folge und Aufbau. Sie behandelt die Geometrie sowie die zeitabhängigen Bewegungsaspekte. Innerhalb der Kinematik werden dynamische Aspekte (wie z. B. Trägheits- oder Schwerkraft) vernachlässigt. [16] Die Glieder eines Manipulators sind über Gelenke zu einer kinematischen Kette miteinander verbunden. Nachstehende Abbildung 2 zeigt die nach VDI 2861 definierten Arten kinematischer Ketten mittels Ersatzschaltbildern.

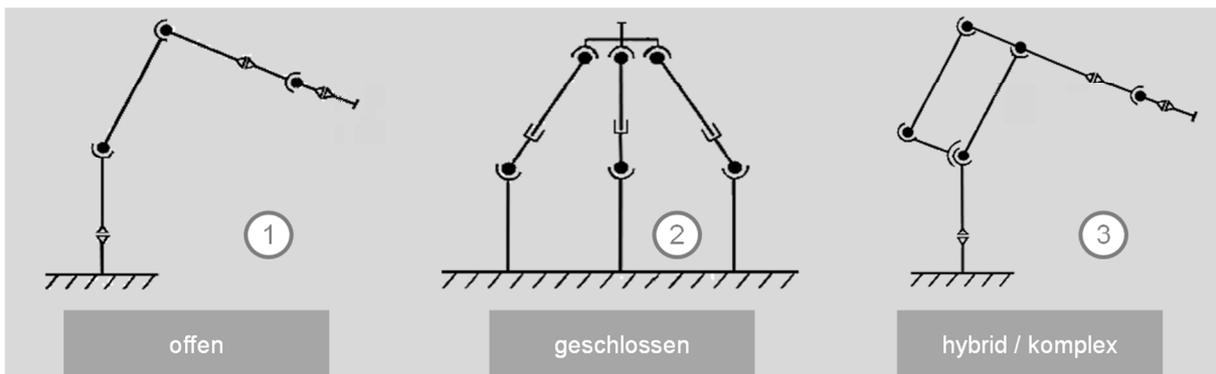


Abbildung 2: Arten kinematischer Ketten von Industrierobotern (angelehnt an [17])

Kinematische Ketten lassen sich in drei Grundarten einteilen: Manipulatoren mit offener (1), geschlossener (2) und hybrider (3) kinematischer Kette. Bei letzterer sind Bestandteile der Kette sowohl offen als auch geschlossen ausgeführt. Eine offene kinematische Kette ist dadurch charakterisiert, dass eine einzige Aneinanderreihung starrer Körper den Anfang mit dem Ende der Kette verbindet (serielle Kinematik). Bildet dagegen die Kette ein geschlossenes System, so handelt es sich um eine geschlossene kinematische Kette. Geschlossene Systeme sind oft als parallele Kinematik ausgeführt, bei der mehrere kinematische Ketten die Basis mit dem Endeffektor verbinden. Im Vergleich zur offenen Kette werden bei diesem Aufbau eine hohe Steifigkeit und damit einhergehend eine hohe Genauigkeit erreicht.

Nachteilig sind jedoch der verringerte Arbeitsraum und das reduzierte Bewegungsvermögen. [18], [19]

2.1.2 Arten von Industrierobotern

Obwohl es eine Vielzahl an Möglichkeiten gibt, durch entsprechende Kombinationen von Bewegungsachsen kinematische Ketten zu konstruieren, wird in der Praxis nur eine bestimmte Auswahl an gängigen Konfigurationen genutzt. Abbildung 3 gibt eine Übersicht üblicher kinematischer Konfigurationen und deren Arbeitsräume.

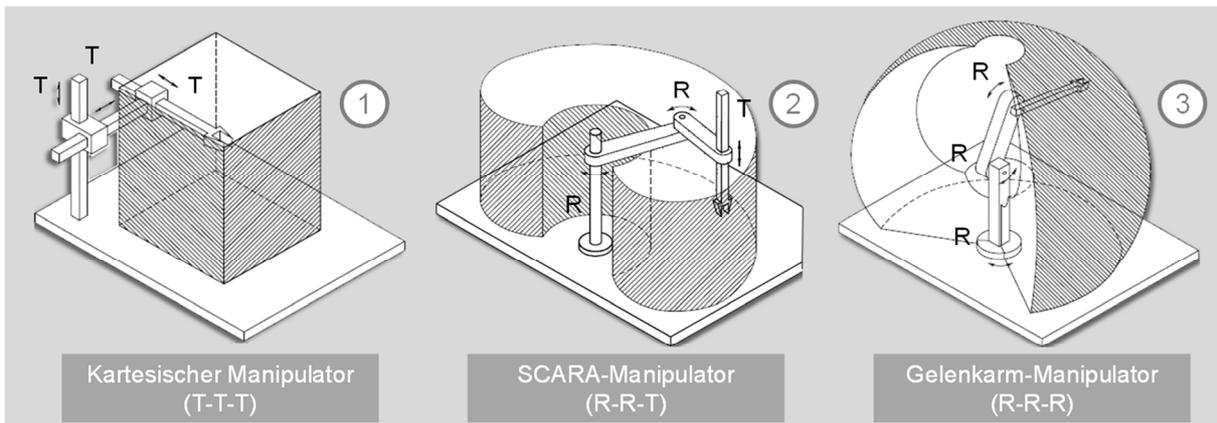


Abbildung 3: Gängige Konfigurationen und deren Arbeitsräume (angelehnt an [20])

Bei den dargestellten Beispielen handelt es sich um Manipulatoren mit offener kinematischer Kette. Ein Manipulator, dessen erste drei Achsen durch Schubgelenke realisiert sind, wird als kartesischer Manipulator (1) bezeichnet. Aus der Achskonfiguration leitet sich die kinematische Kurzbezeichnung T-T-T (T = translatorisch) ab. Für diesen Typ entsprechen die Achswerte bezogen auf die Roboterbasis den kartesischen Koordinaten des Endeffektors. Besonders hervorzuheben ist die hohe Genauigkeit dieses Typs. Aufgrund der beschränkten Beweglichkeit sind charakteristische Einsatzzwecke der Warentransport sowie einfache Montageaufgaben. [19], [21]

Bei SCARA-Manipulatoren (2) sind zwei Drehgelenke und ein Schubgelenk derart angeordnet sind, dass alle Achsen parallel zueinander liegen. Die kinematische Konfiguration ist R-R-T (R = rotatorisch). Die Struktur des SCARA-Manipulators resultiert in einer hohen Steifigkeit gegenüber vertikalen Kräften und eignet sich daher vor allem für vertikale Montageaufgaben. [19]

Die einfachste Variante eines Gelenkarmmanipulators besteht aus drei Drehgelenken (3) mit der kinematischen Konfiguration R-R-R. Die erste Drehachse ist orthogonal zu den beiden folgenden Drehachsen angebracht. Letztere beiden sind bezüglich ihrer Drehachsen zueinander parallel. Der Gelenkarmroboter verfügt aufgrund seiner Konfiguration über den größten Bewegungsfreiraum. Im Gegensatz zu einem rein kartesischen System (1) ist jedoch bei dieser Kinematik der direkte Bezug zwischen den Freiheitsgraden und den kartesischen Koordinatensystemach-

sen aufgehoben. Auch aufgrund dessen weisen Gelenkarm-Manipulatoren eine geringere Genauigkeit bezüglich der Positionierung im Arbeitsraum auf. [19]

2.2 Genauigkeitsrelevante Eigenschaften robotergestützter Prozesszellen

Eine zentrale Anforderung an eine robotergestützte Prozesszelle ist die Erfüllung der Arbeitsaufgabe innerhalb eines definierten Zeit- und Qualitätsspektrums. Entsprechend der 6M-Methode können in diesem Zusammenhang Mensch, Maschine, Material, Methode, Milieu und Management [22] als wesentliche Einflussgrößen auf die Fertigungsqualität identifiziert werden. Werden innerhalb dieser übergeordneten Faktoren die genauigkeitsrelevanten Eigenschaften im Hinblick auf roboterbasierte Prozesszellen bestimmt, lassen sich diese auf Zellkomponenten (Milieu), Werkobjekt und Werkmittel (Material), Prozess (Methode) sowie Greifer, Endeffektor und Industrieroboter (Maschine) reduzieren.

Im Kontext roboterbasierter Prozesse mit hohen Genauigkeitsanforderungen sind insbesondere eine exakte geometrische Beschreibung der beteiligten Komponenten sowie deren Lage zueinander von Relevanz. Dies kann vielfach durch eine Transformationsrelation der wesentlichen Koordinatensysteme zueinander beschrieben werden. Abbildung 4 gibt schematisch einen Überblick über roboterbasierte Prozesszellen mit den relevanten Koordinatensystemen, welche im weiteren Verlauf der Arbeit referenziert werden.

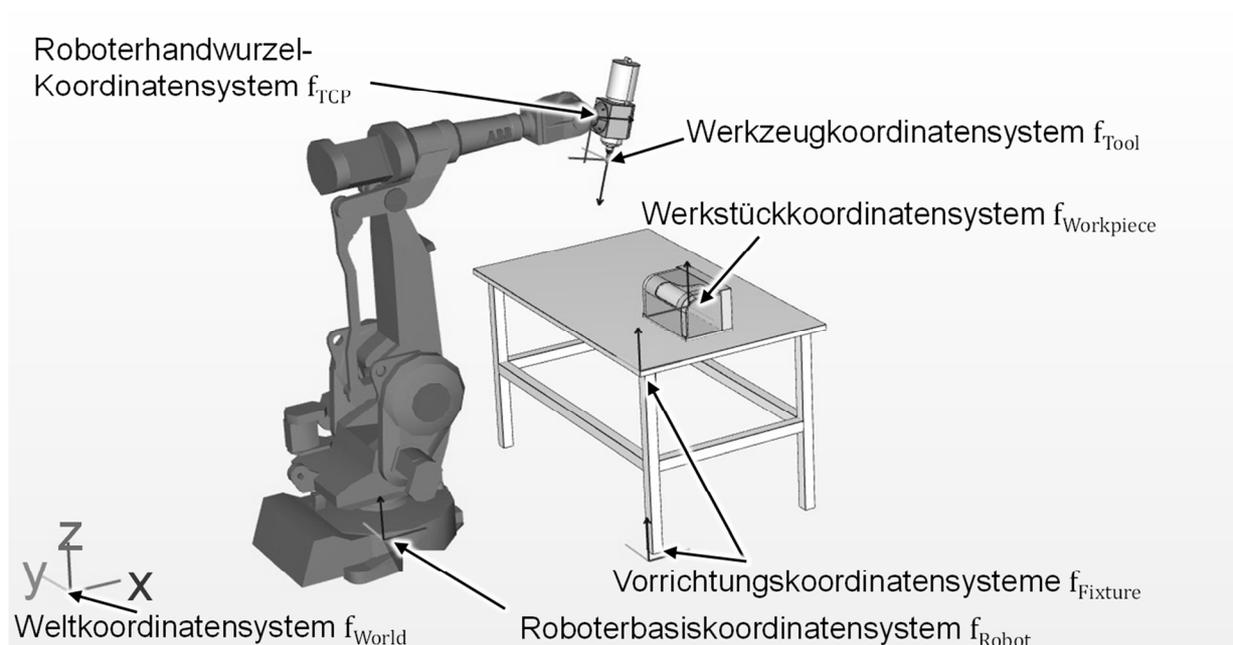


Abbildung 4: Koordinatensysteme roboterbasierter Prozesszellen

2.2.1 Milieu: Zellkomponenten

Ausgangspunkt für die Ausführung einer Fertigungsaufgabe mit hohen Genauigkeitsanforderungen ist eine exakte relative Lagebeschreibung der prozessbeteiligten Zellkomponenten zueinander. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Roboterbewegungsbeschreibung und Programmierung basierend auf nominalen Planungsdaten, z. B. unter Nutzung von 3D-Kinematik-Simulationstools durchgeführt werden. Unterschiede zwischen den Planungsdaten und der realen Situation – z. B. eine Verschiebung des Roboterbasiskoordinatensystems f_{Robot} relativ zum Werkstückkoordinatensystem $f_{\text{Workpiece}}$, was zumeist in Verbindung mit einer Verschiebung des Vorrichtungskordinatensystems f_{Fixture} auftritt – bedingen in diesem Fall Abweichungen des Prozesseingriffsortes. Diese Abweichungen können dabei als quasistationär angenommen werden. Bei gleichbleibenden Bedingungen wie Temperatur, Erschütterungen etc. ändert sich die Dimension der Abweichungen nicht. Basierend auf dieser Annahme werden unterschiedliche Kompensationsstrategien angewendet:

1. Roboterprogrammierung in der realen Prozessumgebung:

Die Erstellung des auszuführenden Roboterbewegungsprogramms unmittelbar in der Prozessumgebung ermöglicht eine Anpassung des Fertigungsablaufs an die real herrschenden Umgebungsbedingungen. Abhängig von der Komplexität der Fertigungsaufgabe, resultiert dies in einem entsprechenden Arbeitsaufwand zum einen und dem Anlagenstillstand während der Programmierung zum anderen.

2. Abgleich der Planungsdaten:

Eine weitere Kompensationsstrategie ist ein Abgleich der Planungsdaten mit den realen Bedingungen. Dieser Vorgang wird auch als „Umgebungskalibrierung“ bezeichnet. Hierbei werden mit einem externen Messsystem oder einem Messtaster am Industrieroboter die realen Positionen und Ausrichtungen der relevanten Zellkomponenten und Vorrichtungen bezüglich eines Referenzkoordinatensystems z. B. f_{World} erfasst und die Soll-Planungsdaten anhand dieser Informationen an die realen Bedingungen angepasst. [4], [23]

Gemein ist den aufgeführten Varianten, dass diese bei einem eventuellen Roboter-crash oder Veränderungen der Roboterzelle (z. B. aufgrund von Umbaumaßnahmen) erneut durchgeführt werden müssen oder eine entsprechende Nacharbeit notwendig wird.

2.2.2 Material: Werkstück und Werkmittel

Auch das Werkstück ist geometrischen Abweichungen unterworfen, insbesondere nach vorgelagerten toleranzbehafteten Fertigungsschritten. Diese Abweichungen sind dann von Bedeutung, wenn der roboterbasierte Prozess lagegerecht relativ zu spezifischen Bauteilmerkmalen erfolgen soll. Ein exaktes, roboterbasiertes Prozessieren erfordert eine Anpassung des Roboterprogramms an die Ist-

Bauteilgeometrie unter Berücksichtigung der Toleranzen. Zum Ausgleich von Werkstücktoleranzen werden üblicherweise die nachfolgenden Strategien verfolgt:

1. Werkstückkalibrierung:

Bei der Werkstückkalibrierung wird die reale Bauteilgeometrie sensorisch erfasst und relevante Merkmale in Relation zum Werkstückkoordinatensystem $f_{\text{Workpiece}}$ beschrieben. Diese Information kann genutzt werden, um die Lage der Prozessorte an die reale Werkstückgeometrie anzupassen. [24]

2. Teachen am Werkstück:

Durch ein manuelles Programmieren der prozessrelevanten Roboterbewegung am Werkstück werden die Prozessorte an das reale Werkstück angepasst, wobei der Roboter als Messmittel eingesetzt wird [4]. Dieses Vorgehen erfordert jedoch eine klare Erfassbarkeit der Prozessorte, wie z. B. eine zu bearbeitende Bauteilkante.

Die zweite Variante wird dabei bevorzugt bei großen Stückzahlen mit geringem Toleranzspektrum aufeinanderfolgender Teile genutzt, wohingegen die erste Möglichkeit eher bei geringen Losgrößen oder hohen Toleranzvariationen eingesetzt werden kann.

Zu nennen sind bezüglich des Materials im Weiteren zudem Werkmittel wie z. B. Schweißdrähte, Lötmittel, Leit-Tinten, Klebstoffe und Montagekomponenten, wobei diesen hinsichtlich des Genauigkeitseinflusses eine nur untergeordnete Rolle zukommt.

2.2.3 Methode: Prozess

Neben einer geometrischen Beschreibung der prozessbeteiligten Komponenten und deren Lage zueinander ist zum Erhalt eines qualitativ hochwertigen Arbeitsergebnisses auch ein exaktes Einstellen der Prozessparameter notwendig. Moderne Roboterkinematik-Simulationstools bieten hierzu die Möglichkeit geeignete Prozessparameter, wie z. B. Sprühkegelbreite, Lackfüllgrad etc. für roboterbasierte Lackierprozesse bereits in der Planungsphase einzustellen und zu erproben [25], [26]. Aufgrund der prozessabhängig hohen Komplexität und gegenseitigen Beeinflussung der Prozessparameter erfolgt jedoch eine Feinjustage der Parameter in der realen Prozessumgebung. Weiterführend beeinflussen auch geometrische und kinematische Faktoren das Prozessergebnis. Dies sind unter anderem der Abstand des Werkzeugs zur Prozessoberfläche, der Anstellwinkel des Werkzeugs, die relative Prozess-/Verfahrgeschwindigkeit von Werkzeug zu Werkobjekt sowie die Verfahstrategie. Roboterkinematik-Simulationstools sind in diesem Kontext auch zur Auslegung und Erprobung dieser Einflussgrößen ein wesentliches Hilfsmittel.

2.2.4 Maschine: Greifer, Endeffektor und Industrieroboter

Roboter montierte Greifsysteme bilden die Schnittstelle zwischen Kinematik und dem zu handhabenden Werkobjekt. Endeffektoren, wie z. B. Schweißzangen, Klebedüsen

oder Laserlötköpfe, dienen der Prozessausführung an definierten Eingriffsstellen des zu bearbeitenden Werkstücks. Als physischer Aufbau sind Greifer und Endeffektoren geometrischen Abweichungen von der Soll-Form unterworfen. Dies hat zur Folge, dass die mit dem Werkstück in Kontakt tretenden Bestandteile bezüglich Ihrer nominalen Position relativ zum Anflanschpunkt der Roboterhandwurzel f_{TCP} abweichen. Dies wiederum resultiert in Abweichungen des Prozesseingriffsortes von den Planungsdaten. Auch dieser Fehlereinfluss kann als näherungsweise statisch angesehen werden. Um diesen zu verringern, bestehen folgende Möglichkeiten:

1. Montage- und Komponententolerierung:

Durch eng gewählte Toleranzbereiche wird eine hohe Übereinstimmung der Einzelteile, Komponenten und Baugruppen bezüglich der Planungsdaten erreicht. Aufgrund des damit einhergehenden Mehraufwands bei Fertigung und Montage sind dieser Kompensationsstrategie jedoch technische und wirtschaftliche Grenzen gesetzt. Insbesondere im Bereich von Greifsystemen werden dementsprechend Abstimmplatten oder -module verwendet, welche ein nachträgliches Einstellen der relevanten Komponenten zueinander ermöglichen. Ebenfalls möglich ist eine partiell nachgiebige Ausführung des Greifsystems. Hierdurch wird eine flexible Anpassung der Greif- und Einweispunkte an in einem gewissen Rahmen variierende Werkstücktoleranzen gewährleistet.

2. Werkzeugkalibrierung:

Bei der Werkzeugkalibrierung wird ein werkzeugbezogenes Koordinatensystem f_{Tool} relativ zum Roboterhandwurzel-Koordinatensystem f_{TCP} beschrieben, welches die genaue Lage der mit dem Werkstück in Kontakt tretenden Komponenten definiert. Auch bei dieser Methode können entweder der Roboter selbst oder zusätzliche Messmittel zur Bestimmung von f_{TCP} eingesetzt werden. Zur Ermittlung des Werkzeugkoordinatensystems wird der Roboter in der ersten Variante im Arbeitsraum definiert rotatorisch und translatorisch bewegt, wobei vorab eine Roboterkalibrierung empfohlen wird, um roboterbasierte Fehlereinflüsse zu minimieren [4]. Bei der Verwendung externer Messmittel werden prozessrelevante Merkmale, wie z. B. die feste Elektrode einer Punktschweißzange, erfasst und deren Lage bezüglich des Werkzeugkoordinatensystems beschrieben. [7]

Zusammenfassend zielen die beiden dargestellten Möglichkeiten auf möglichst geringe Abweichungen zwischen Planungsdaten und Ist-Daten ab, wobei entweder die Ist-Daten den Soll-Daten angeglichen oder die Soll-Daten in die reale Fertigungssituation projiziert werden.

Zur Führung der Greifer und Endeffektoren können als Handhabungsgeräte Industrieroboter eingesetzt werden. Als komplexe mechatronische Systeme sind Industrieroboter unterschiedlichen Faktoren unterworfen, welche deren Genauigkeit negativ beeinflussen. Aufgrund einer Vielzahl von Arbeiten in diesem Bereich, können dabei die verschiedenen Einflüsse als weitestgehend identifiziert angesehen

werden. Einen Überblick über die wesentlichen beeinflussenden Größen angelehnt an [5], [6] und [7] qualitativ priorisiert nach deren Relevanz gibt Abbildung 5.

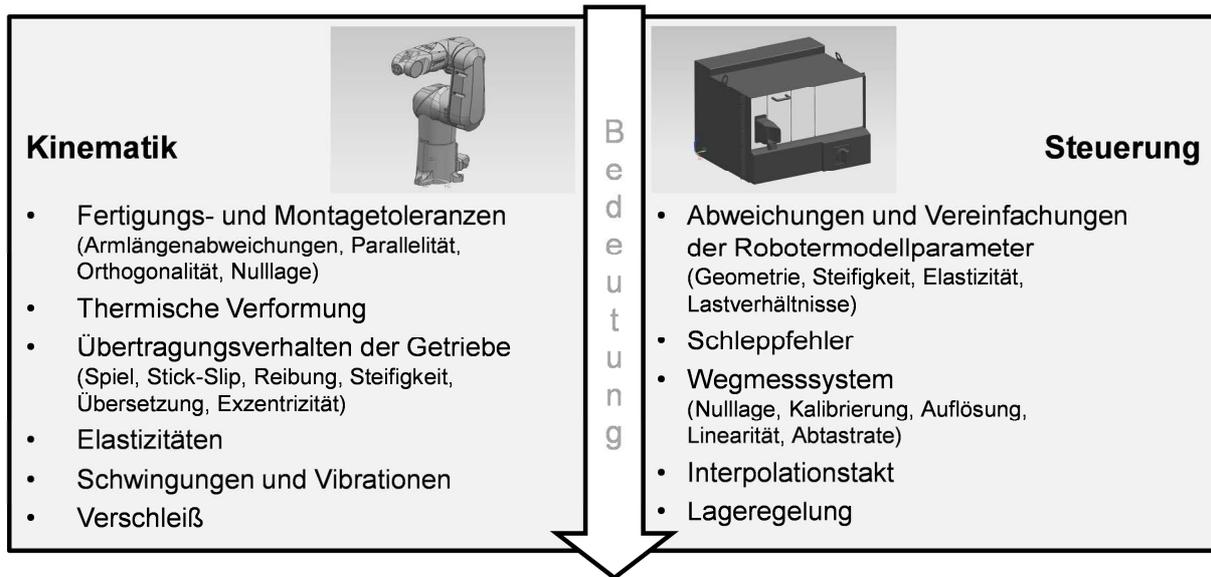


Abbildung 5: Genauigkeitsbeeinflussende Faktoren von Industrierobotern

Seitens der Kinematik besitzen *Fertigungs- und Montagetoleranzen* den größten Einfluss auf die Roboter Genauigkeit bzw. deren Ungenauigkeit. Diese umfassen toleranzbedingte Unterschiede der realen Kinematik bezüglich der nominellen Konstruktionsdaten. Zentrale Faktoren sind hierbei Längenabweichungen der Armsegmente in den drei Raumrichtungen, Achsschiefstände benachbarter Roboterachsen in Hinblick auf Orthogonalität und Parallelität sowie Nulllagefehler, welche die Abweichungen der Achsnullstellungen von den Konstruktionsdaten beschreiben.

Im Weiteren zeigen *thermische Verformungen* einen wesentlichen Einfluss auf die Roboter Genauigkeit, wobei Temperaturgradienten entweder durch das Roboterumfeld oder den Roboterbetriebszustand selbst induziert sein können. Temperaturgradienten bedingen Längenausdehnungen, Volumenausdehnung oder einer Biegung der Roboterkomponenten und resultieren damit einhergehend in Veränderungen bezüglich der Konstruktionsdaten [4].

Schwer zu beschreiben ist das real herrschende *Übertragungsverhalten der Getriebe* der Achsen. Beeinflusst durch Übersetzung, Reibung, Steifigkeit, Exzentrizitäten sowie Stick-Slip-Effekte und Spiel, können im Betrieb Abweichungen von Soll- zu Ist-Übertragung auftreten. Geringe Winkelabweichungen werden hierbei durch die Länge der Armsegmente und die serielle kinematische Kette verstärkt und führen zu signifikanten Abweichungen der Ist-Pose des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems f_{TCP} von der Soll-Pose.

Auch *Elastizitäten* der Armsegmente weisen insbesondere bei hohen Kräfteinflüssen auf die Roboterhandwurzel einen Genauigkeitseinfluss auf, welche in einer

Durchbiegungen der Armsegmente resultieren. Weitere Einflussgröße sind ein altersbedingter *Verschleiß* des Roboters und selbst- oder fremdinduzierte *Vibrationen und Schwingungen*. Letzterer Aspekt wird durch eine geeignete Roboterprogrammierung und in Kapitel 5 sowie Abschnitt 7.1 adressiert.

Auch die Robotersteuerung (Hardware und Software) übt einen deutlichen Einfluss auf die Roboter Genauigkeit aus. Haupteinflüsse sind *Abweichungen und Vereinfachungen der Robotermodellparameter* bzw. die Annahme, dass die reale Kinematik der nominellen Kinematik entspricht. Dies umfasst die beschriebenen Aspekte der Geometrie, Elastizität, Steifigkeit sowohl der Armsegmente als auch der Getriebe und im Weiteren einer mangelhaften Beschreibung der real herrschenden Lastverhältnisse im Betrieb. Diese Abweichung resultiert in einer fehlerhaften Rücktransformation und Berechnung von Einstellwerten für die Achsen, welche die Realität nicht abbilden. Besonders bei hohen dynamischen oder statischen Kräften, wie diese bei Bearbeitungsprozessen oder hohen Beschleunigungen auftreten, ist zudem der *Schleppfehler* von Bedeutung. Er bestimmt, wie das Roboterhandwurzel-Koordinatensystem f_{TCP} innerhalb eines bestimmten Radius um die vorgegebene Bahn bewegt wird [5]. Weitere steuerungsseitige Einflüsse auf die Roboter Genauigkeit sind zudem Nulllage, Auflösung, Abtastrate etc. der *Wegmesssysteme* (Encoder), der *Interpolationstakt* sowie die Methode zur *Lageregelung*. Gemessen an den andere Einflussgrößen sind diese jedoch – bis auf den dem Interpolationstakt – von untergeordneter Bedeutung.

In Summe bedingen die oben genannten Einflussfaktoren eine Abweichung der durch den Roboter tatsächlich angefahrenen Ist-Punkte von den geplanten Soll-Punkten. Diese Abweichung ist durch die roboterspezifischen Kenngrößen „Absolutgenauigkeit“ und „Wiederholgenauigkeit“ charakterisiert.

2.3 Genauigkeitskenngrößen von Industrierobotern

Eine Spezifizierung der Roboter Genauigkeit erfolgt gemäß den in den Normen ISO 9283 [27] und VDI 2861 [17] beschriebenen Kennwerten. Während die ISO-Norm zwar zurückgezogen wurde, aber dessen ungeachtet noch immer weltweit referenziert wird, ist die entsprechende VDI Richtlinien zwar in Teilaspekten detaillierter, jedoch maßgeblich von nationaler Bedeutung. Die gebräuchlichen und relevanten Kennwerte zur Beschreibung der Roboter Genauigkeit sind die *Wiederholgenauigkeit*, *Absolutgenauigkeit* sowie im weiteren Kenngrößen bezüglich der *Roboter geschwindigkeit*. Weitere Werte werden in den Normen zwar beschrieben, finden in der Praxis aber kaum Anwendung.

2.3.1 Punktbezogene Wiederhol- und Absolutgenauigkeit

Die Wiederholgenauigkeit (RP_1) beschreibt, mit welcher Genauigkeit der Roboter bei mehrfachem Anfahren einer Position aus gleicher Richtung diese Position einnimmt. Diese Kenngröße repräsentiert die durchschnittliche Abweichung der Ist-Positionen

zueinander. Die Absolutgenauigkeit (AP_P) charakterisiert dahingegen die Abweichung zwischen der Soll-Position (0_c) bzw. dem wahren Wert und dem Mittelwert der erreichten Ist-Positionen (G). Graphisch stellt Abbildung 6 diese Zusammenhänge dar.

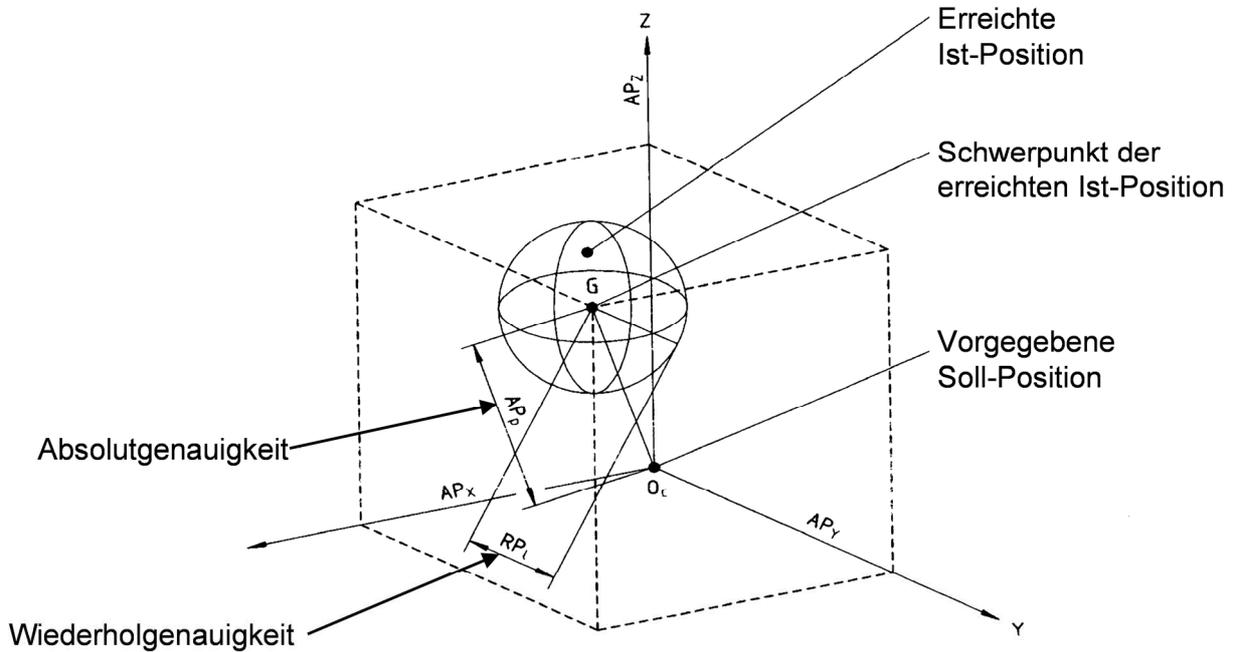


Abbildung 6: Punktbezogene Absolut- u. Wiederholgenauigkeit (angelehnt an [27])

Mathematisch wird die Absolutgenauigkeit gemäß [27] ausgedrückt über

$$AP_P = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (2.1)$$

mit

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j, \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j, \quad (2.2 - 2.5)$$

und

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ Koordinaten des Schwerpunktes G der erreichten Ist-Positionen, nach n -maligem Anfahren derselben Position,

x_c, y_c, z_c Koordinaten der vorgegebenen Soll-Position 0_c ,

x_j, y_j, z_j Koordinaten der Ist-Position bei Durchlauf j .

Die Wiederholgenauigkeit wird nach [27] berechnet über

$$RP_j = \bar{I} + 3 S_j \quad (2.6)$$

mit

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I_j, \quad (2.7)$$

dem Hilfswert Längenkompensation (Abstand zwischen der bei einem Durchgang j eingenommenen Position und dem Schwerpunkt der eingenommenen Positionen)

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (2.8)$$

und

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}}, \quad (2.9)$$

der die Häufigkeitsverteilung der Einzelwerte an einem Messort berücksichtigt.

Dabei werden jeweils $n = 30$ Messdurchläufe empfohlen. Durch eine zusätzliche Ermittlung der Orientierungsgenauigkeiten AP_a, AP_b, AP_c und der Orientierungswiederholungsgenauigkeiten RP_a, RP_b, RP_c werden die Pose-Absolutgenauigkeit und die Pose-Wiederholungsgenauigkeit ermittelt.

2.3.2 Bahnbezogene Wiederhol- und Absolutgenauigkeit

In angepasster Form gelten obige Ausführungen auch bei der Bestimmung der Bahnabsolutgenauigkeit AT_P und Bahnwiederholungsgenauigkeit RT_P , die insbesondere bei bahnbezogenen Bearbeitungsaufgaben von Relevanz sind.

Einen schematischen Überblick über die bahngenaugkeitsbezogenen Kennwerte gibt Abbildung 7.

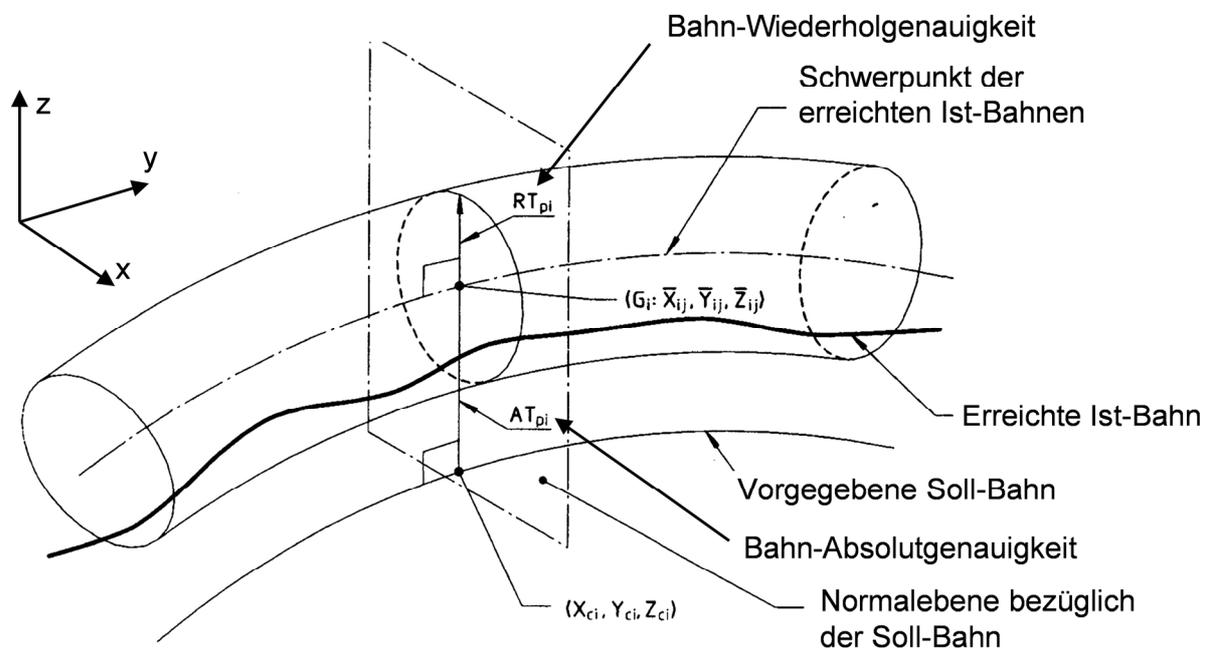


Abbildung 7: Bahnabsolutgenauigkeit u. -wiederholungsgenauigkeit (angelehnt an [27])

Auf der n -mal abgefahrenen Testbahn werden jeweils eine definierte Anzahl m Abtastpunkte erfasst. Bahnabsolutgenauigkeit und Bahnwiederholungsgenauigkeit

werden ermittelt als maximal auftretende Abweichung bei einem Durchlaufen der Abtastpunkte $i = 1 \dots m$. Es gilt somit für die Bahnabsolutgenauigkeit

$$AT_P = \max \sqrt{(\bar{x}_i - x_{ci})^2 + (\bar{y}_i - y_{ci})^2 + (\bar{z}_i - z_i)^2}, \quad i = 1 \dots m \quad (2.10)$$

und die Bahnwiederholgenauigkeit

$$RT_P = \max[\bar{l}_i + 3 S_{ij}], \quad i = 1 \dots m \quad (2.11)$$

mit

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad \bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}, \quad \bar{z}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij}, \quad (2.12 - 2.15)$$

$$\bar{l}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij}, \quad (2.16)$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + (z_{ij} - \bar{z}_i)^2}, \text{ und} \quad (2.17)$$

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \bar{l}_i)^2}{n - 1}}. \quad (2.18)$$

2.3.3 Geschwindigkeitsgenauigkeit, -wiederholgenauigkeit und -schwankung

Die relevanten Geschwindigkeitskenngrößen anhand des Geschwindigkeitsverhaltens über die Bewegungszeit illustriert Abbildung 8.

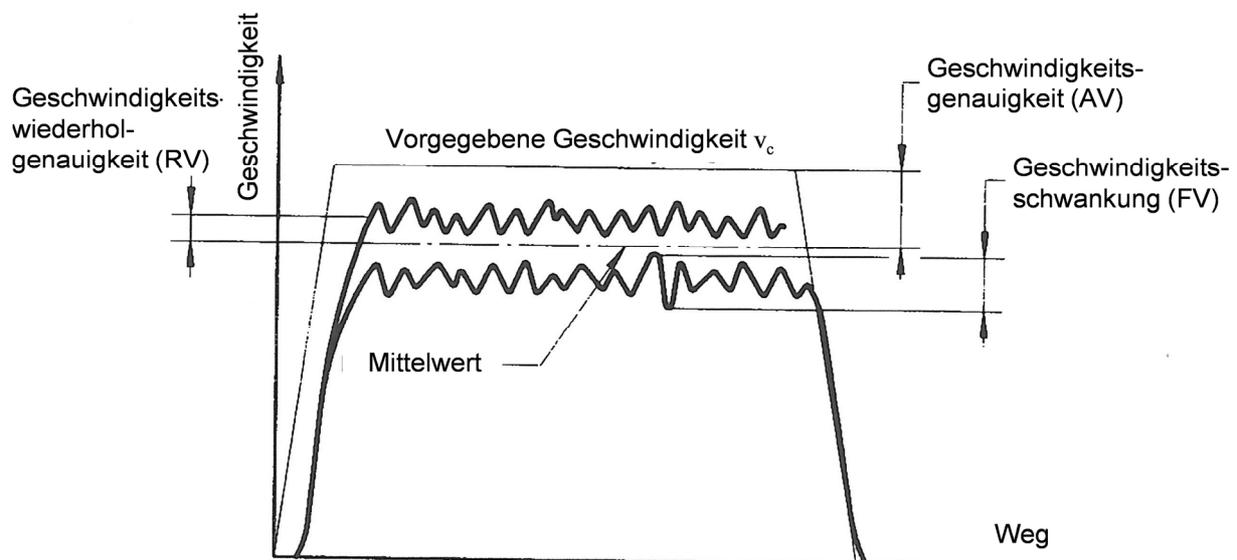


Abbildung 8: Geschwindigkeitskenngrößen (angelehnt an [27])

Die Geschwindigkeitsgenauigkeit AV beschreibt den Fehler zwischen kommandierter Geschwindigkeit und erreichter mittleren Geschwindigkeit von n Durchläufen.

Diese wird prozentual angegeben und berechnet über

$$AV = \frac{\bar{v} - v_c}{v_c} \cdot 100. \quad (2.19)$$

v_c definiert hierbei die vorgegebene Geschwindigkeit und \bar{v} die mittlere erreichte Geschwindigkeit nach n Durchläufen unter Berücksichtigung von m Messpunkten entlang der Bahn.

Die Geschwindigkeitswiederholgenauigkeit RV ist ein Maß für die Geschwindigkeitsabweichungen verschiedener Durchläufe mit gleicher vorgegebenen Geschwindigkeit v_c . Ermittelt wird RV über den Zusammenhang

$$RV = \pm \left(\frac{3 S_v}{v_c} \cdot 100 \right) \quad (2.20)$$

S_v wird hierbei analog 2.18 mit den entsprechenden Geschwindigkeitswerten ermittelt.

Schlussendlich definiert die Geschwindigkeitsschwankung FV die maximale Geschwindigkeitsabweichung während eines Durchlaufs für eine kommandierte Geschwindigkeit v_c . Berechnet wird FV über

$$FV = \max \left[\max_{i=1}^m (v_{ij}) - \min_{i=1}^m (v_{ij}) \right], \quad j = 1 \dots m \quad (2.21)$$

v_{ij} ist hierbei die eingenommene Geschwindigkeit bei der i -ten Messung für die j -te Wiederholung.

2.3.4 Diskussion der Genauigkeitskenngrößen gemäß Norm

Während eine Überprüfung der Wiederholgenauigkeit in den Normen eindeutig spezifiziert ist und mit moderatem Aufwand auch vom Anwender durchgeführt werden kann, sind die Ausführungen bezüglich einer Feststellung der Absolutgenauigkeit deutlich unschärfer gehalten. So wird zwar qualitativ ein kubusförmiger Testraum beschrieben, dessen Positionierung im verfügbaren Arbeitsraum des Roboters bleibt jedoch dem Prüfer überlassen. Es wird lediglich die Empfehlung ausgesprochen, dass „der (Test)kubus in dem Bereich des Arbeitsraumes mit der größten voraussichtlichen Nutzung platziert werden sollte“ („the cube shall be located in that portion of working space with the greatest anticipated use“) [27]. Etwas genauer, jedoch ebenfalls mit Ermessensspielraum, ist die Größe des Kubus beschrieben, der „[...] das größtmögliche Volumen haben sollte [...]“ („The cube shall have the maximum volume allowable with the edges parallel to the base coordinate system.“) [27]. Dabei hängt das realisierbare Volumen in direkter Weise von der Positionierung des Kubus ab. Spezifischer ist bei der Volumenangabe die VDI-Norm [17], Blatt 2. Für die Kantenlänge des Kubus wird als Richtwert $l_x = l_y = l_z = \sim 0,3 \cdot D_{\max}$ vorgeschlagen, wobei D_{\max} als „die größte erreichbare Entfernung zwischen der Mitte der Schnittstelle Nebenachse-Werkzeug und der Mitte

des ersten Gelenks des Industrieroboters (ausgehend vom Sockel)“ definiert ist. Aufgrund der maßgeblich nationalen Sichtbarkeit dieser Empfehlung kann jedoch von einer nur sehr eingeschränkten praktischen Berücksichtigung insbesondere im internationalen Umfeld ausgegangen werden. Dargestellt ist der empfohlene Testkubus für sechsachsige Roboter in Abbildung 9.

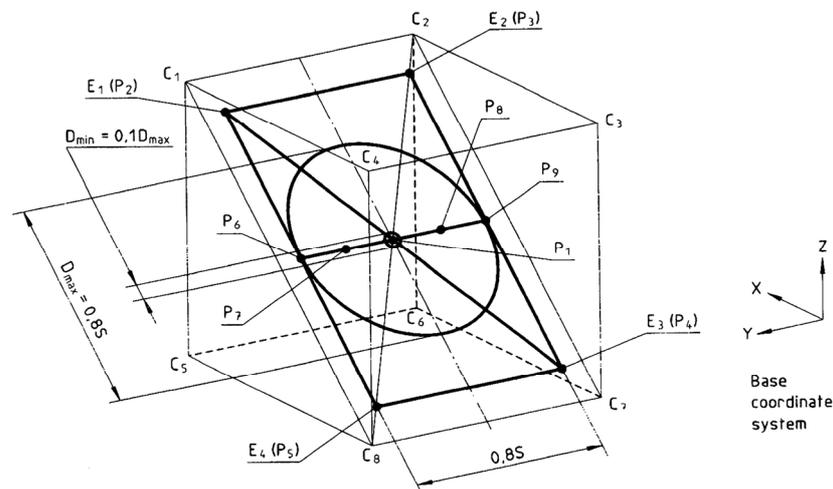


Abbildung 9: Testkubus für sechsachsige Roboter (angelehnt an [27])

Die Empfehlungen insbesondere der Norm [27] erschweren eine quantitative und vergleichbare Festlegung der Absolutgenauigkeit auch für Roboterhersteller, da Hersteller nur schwerlich über Wissen bezüglich des tatsächlichen Arbeitsraums des Endanwenders verfügen können, zumal der Arbeitsraum auch deutlich zwischen den möglichen Anwendungen variiert. Diesem Umstand mag es auch geschuldet sein, dass trotz der hohen Bedeutung die Absolutgenauigkeit nur in Ausnahmefällen Datenblättern entnommen werden kann. Wird diese angegeben, kann gemutmaßt werden, dass der Testkubus sowohl von der Positionierung als auch von der Größe in einem Bereich des Roboterarbeitsraums platziert wurde, der eine eher optimistische Absolutgenauigkeitscharakteristik aufweist. Werden diese Informationen in den Datenblättern dargestellt, können sie jedoch als Anhaltspunkt für den Endanwender zur Auslegung und Anordnung der jeweiligen Applikation genutzt werden. Auch aufgrund der großen Vielfalt der möglichen Anwendungen in Zusammenschau mit den applikationsbezogenen Restriktionen ist dies jedoch nur eingeschränkt praktikabel.

Zusammenfassend ist feststellbar, dass der Begriff der Absolutgenauigkeit zwar spezifiziert, dessen Aussagekraft für den Endanwender aber bei einer Ermittlung gemäß den in den einschlägigen Normen beschriebenen Verfahren deutlich beschränkt ist. Abhängig von der Programmierart werden jedoch insbesondere an die Absolutgenauigkeit hohe Anforderungen gestellt, um eine spätere exakte Aufgabenausführung zu ermöglichen.

2.4 Roboterprogrammierung und der Einfluss auf die Genauigkeit bei der Bewegungsausführung

Robotersteuerungsprogramme beinhalten die Kontrollanweisungen zur Steuerung des Programmablaufs (Unterprogrammaufrufe, Schleifen etc.), Bewegungsanweisungen (Zielpunktpositionen und Orientierungen, Interpolationsart, Geschwindigkeit etc.), Ein- und Ausgabeanweisungen (Effektoransteuerung, Sensordatenabfrage etc.) sowie Variablenzuweisungen und logische/arithmetische Operationen [16], [21]. Dabei existiert derzeit keine übergeordnete Nomenklatur der Programmiersprache, mit der eine herstellerunabhängige Roboteransteuerung möglich ist. Vielmehr bietet jeder Roboterhersteller für seine Robotertypen eine proprietäre Metasyntax zur Programmierung an. Roboterherstellerabhängige Programmiersprachen sind z. B. KUKA: KRL, ABB: RAPID und Stäubli: VAL. [21] Die üblichen Möglichkeiten zur Roboterprogrammerstellung sind in Abbildung 10 dargestellt.

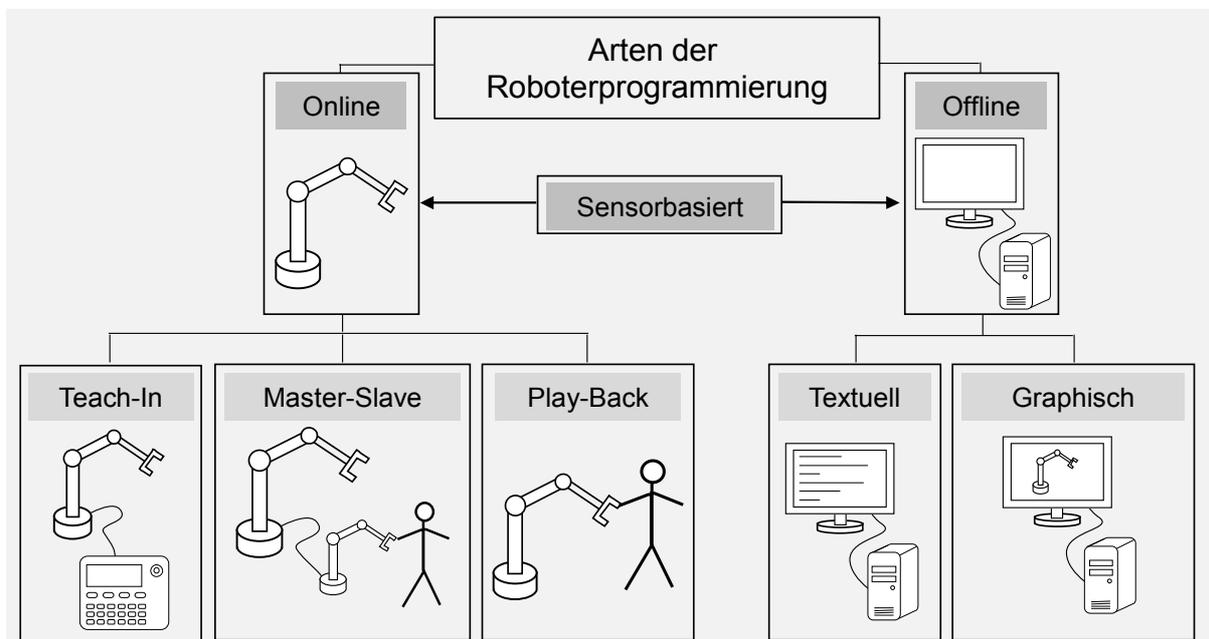


Abbildung 10: Arten der Roboterprogrammierung (angelehnt an [16], [21], [28])

Grundsätzlich unterschieden wird bei der Programmerstellung eine direkte „Online“-Programmierung eine indirekte „Offline“-Programmierung sowie eine sensorbasierte Programmierung. Diese Möglichkeiten beeinflussen entscheidend die Anforderungen an den Industrieroboter im Hinblick auf die notwendige Absolutgenauigkeit.

2.4.1 Online-Programmierung von Industrierobotern

Unter der Online-Programmierung von Industrierobotern wird die direkte Erzeugung des Steuerungsprogramms an der ausführenden Kinematik verstanden, gewöhnlicherweise in der Arbeitsumgebung, in welcher der Roboter eingesetzt wird. Charakterisierend ist hierbei, dass der Roboter während der Programmierung nicht für die eigentliche Aufgabenerfüllung zur Verfügung steht. Etabliert sind bei der

direkten Programmierung die Verfahren Teach-In, Master-Slave und Play-Back [21], [16]:

Teach-In-Verfahren: Unter Zuhilfenahme eines Handbediengeräts wird der Roboter in die gewünschten Soll-Positionen verfahren, diese Positionen händisch abgespeichert und zusätzlich Informationen bezüglich Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Interpolationsart etc. hinterlegt.

Master-Slave-Verfahren: Diese Programmierart greift auf einen zweiten, durch den Bediener bewegbaren Manipulator zurück. Die an diesem Slave-Manipulator aufgezeichneten Achsstellungen beziehungsweise Posen werden unter Beachtung eines Skalierungsfaktors auf den zu programmierenden Master-Manipulator übertragen.

Play-Back-Verfahren: Bei diesem Verfahren wird der Roboter manuell durch den Bediener entlang der gewünschten Raumkurve geführt und die Achsstellungen in einem definierten Zeitintervall abgespeichert und in das Steuerungsprogramm übernommen.

Der Vorteil der genannten Programmierarten liegt vorwiegend in der Praxisorientierung. Die Programmierung erfolgt anwendungsnah und benötigt nur rudimentäre Vorkenntnisse der Programmiersprachen. Die aufgezeichneten Soll-Positionen berücksichtigen bereits Toleranzen, die sowohl inhärent durch den Roboter verursacht werden als auch im Roboterumfeld auftreten. Jedoch steht der Roboter während der Dauer der Programmierung nicht für andere Zwecke zur Verfügung. Des Weiteren sind komplexe Ablaufprogramme kaum zu realisieren, da entsprechende Befehlssätze fehlen und meist keine Möglichkeit besteht externe Signale oder Sensorinformationen im Programmablauf zu berücksichtigen. Hierfür wird die Offline-Programmierung verwendet.

2.4.2 Offline-Programmierung von Industrierobotern

Die Offline-Programmierung von Industrierobotern umfasst eine Generierung des Roboterprogramms unabhängig von dem realen Roboter. Hierdurch kann die Programmierung als Bestandteil der Fertigungsplanung in die Arbeitsvorbereitung verlagert und zudem deutlich komplexere Programmabläufe erzeugt werden. Die üblichen Verfahren bei dieser indirekten Roboterprogrammierung sind eine textuelle oder graphische Programmierung, wobei die Programmerstellung auf gesonderten Rechneranlagen erfolgt.

Textuelle Verfahren: Bei diesen Verfahren wird die Programmierung über eine symbolische Beschreibung von Operationen und Daten z. B. in einer der aufgeführten herstellereigenen Programmiersprachen vorgenommen. Werden im Rahmen der textuellen Programmierung alle Verfahrenswege und Positionen unter Berücksichtigung der Kollisionsfreiheit unmittelbar von dem Programmierer vorgegeben, wird dieses Verfahren als *explizit* bezeichnet.

Graphische Verfahren: Bei dieser Programmierart werden digitale Modelle der am Produktionsprozess beteiligten Komponenten in einem graphischen Softwaretool zur virtuellen Nachbildung der Fertigungssituation genutzt. Der Funktionsumfang dieser Tools ermöglicht eine Festlegung und Darstellung der anzufahrenden Positionen und Verfahrbahnen durch den Roboter. Über einen Postprozessor werden im Nachgang die durch den realen Roboter ausführbaren Steuerungsprogramme abgeleitet und dabei der Quellcode in herstellerspezifischer Metasyntax erstellt.

Wesentlicher Vorteil der Offline-Programmierung ist die Möglichkeit, die Roboterprogrammierung bereits in der Planungsphase vornehmen zu können. Zudem ist bei einer bereits existierenden Roboterzelle parallel zur Programmierung eine Weiterführung der vorherigen Arbeitsaufgabe möglich, da der tatsächliche Roboter nicht für die Programmierung benötigt wird. Nachteilig ist dahingegen die Notwendigkeit zur Bereitstellung eines möglichst realitätsnahen digitalen Modells von Robotersystem, Anlagenumgebung und Werkstück. Dieser Sachverhalt begründet maßgeblich die hohen Genauigkeitsanforderungen derart programmierter Roboter.

2.4.3 Sensorbasierte Programmierung von Industrierobotern

Die vorteilhaften Eigenschaften der Online-Programmierung (Anpassung des Roboterprogramms an die realen Umgebungsbedingungen) und der Offline-Programmierung (Realisierung komplexer Programmabläufe) können durch einen sensorbasierten Ansatz zweckmäßig miteinander verknüpft werden. Offline kann hierbei die Handhabungsaufgabe oder Ablaufschematas auf hohem Abstraktionsgrad beschrieben und das Verhalten des Roboters bezüglich der Signale von Sensoren definiert werden. Online findet durch eine geeignete Auswertung der Sensorsignale, welche den Umweltzustand repräsentieren, eine dynamische Anpassung des Roboterprogramms während der Aufgabenausführung statt. Dies ermöglicht eine flexible Adaptierung z. B. des Roboterbewegungsverhaltens oder von Handhabungsoperationen an variable Umgebungsbedingungen. Abweichungen in der Umwelt können dementsprechend von dem ausführenden System erfasst und autonom in einem durch den Bediener im Vorfeld definierten Rahmen ausgeregelt werden. Diese aufgabenorientierte Herangehensweise der Roboterprogrammierung wird auch als *implizit* bezeichnet. Eine besonders mächtige Klasse von Sensoren stellen hierbei optische System dar, welche in Abschnitt 4.3 ausführlich diskutiert werden.

2.4.4 Beurteilung der Programmierarten im Hinblick auf die Roboter Genauigkeitsanforderungen

Wird die Programmierung online vorgenommen, sind die Anforderungen bezüglich des Roboters auf eine hohe Wiederholgenauigkeit beschränkt, um eine möglichst gleichbleibendes Arbeitsergebnis zu gewährleisten. Dies ist möglich, da bei dieser Programmierart alle wesentlichen in Abschnitt 2.2 beschriebenen genauigkeitsrelevante Eigenschaften robotergestützter Prozesszellen mit berücksichtigt werden können. Vorausgesetzt wird, dass über die gesamte Fertigungslaufzeit keine

Änderungen an den geometrischen Relationen der prozessbeteiligten Komponenten vorgenommen werden. Einschränkungen können sich jedoch insbesondere bei komplexen Prozessaufgaben durch die Erfassbarkeit der anzufahrenden Soll-Punkte ergeben. Da die Beurteilung, ob der jeweilige Soll-Punkt während der Programmierphase ausreichend exakt angefahren wurde durch den Bediener erfolgt, ist die erreichbare Genauigkeit bei der Programmierung durch das subjektive sensorische Auflösungsvermögen des Programmierers oder eventueller Hilfsmittel beschränkt. Dieser trivial anmutende Umstand verhindert in der Praxis oftmals eine Online-Programmierung komplexer Arbeitsaufgaben direkt am Roboter.

Wird der Roboter offline programmiert, werden zusätzlich zu einer hohen Wiederholgenauigkeit auch gesteigerte Anforderungen an eine hohe Absolutgenauigkeit gestellt. Dabei kann die Absolutgenauigkeit als ein Maß für die Abweichung des idealen während der Offline-Programmierung genutzten Robotermodells von der realen Kinematik verstanden werden. Die offline programmierten Soll-Punkte im Arbeitsraum beziehen sich zumeist auf das Roboterbasiskoordinatensystem f_{Robot} , wobei die Verbindung über die kinematische Kette des Roboters gegeben ist. Bei der Ansteuerung der Achsen zum Anfahren der Soll-Punkte nutzt die Robotersteuerung zur Durchführung der notwendigen Transformationen das ideale Robotermodell, welches auch dem bei der Programmierung verwendeten Modell entspricht. Aufgrund der in Abschnitt 2.2.4 dargestellten Defizite weicht der reale Roboter jedoch deutlich von diesem idealen, theoretischen Modell ab. Als Ergebnis unterscheidet sich auch die reale Roboterbewegung von der idealen Roboterbewegung sowohl im Hinblick auf Position und Orientierung der anzufahren Punkte [29]. Diese Abweichungen sind dabei zusätzlich zu den kinematischen Einflussfaktoren und den herrschenden Umgebungsbedingungen abhängig von sich einstellenden dynamischen Effekten des Roboters bei der Aufgabenausführung. Zusätzlich erschwerend kommt hinzu, dass sich nicht nur das idealisierte Modell und Verhalten des Roboters von der Realität unterscheidet, sondern auch die tatsächliche Arbeitsumgebung von den vorausgesetzten Informationen bei der Offline-Programmierung abweicht.

Zusammenfassend bestehen bei der Online-Roboterprogrammierung somit hohe Anforderungen an deren Wiederholgenauigkeit wohingegen bei der Offline-Programmierung hohe Anforderungen sowohl an die Wiederholgenauigkeit als auch die Absolutgenauigkeit des ausführenden Handhabungsgeräts gestellt werden. Dabei ist die Absolutgenauigkeit hinsichtlich des Betrags um etliche Zehnerpotenzen höher und somit ungenauer als die Wiederholgenauigkeit (Kapitel 3).

Dieser Sachverhalt begründet auch eine derzeit nur geringe Nutzung von Knickarmrobotern bei Fertigungsaufgaben mit hohen Genauigkeitsanforderungen bzw. einen hohen manuellen Arbeitsaufwand zum händischen „Nachteachen“ der Roboterbewegungsbahnen am realen Roboter. In diesem Kontext bildet die

sensorbasierte Programmierung ein wirkungsvolles Mittel, das Roboterverhalten dynamisch an die vorherrschenden Umgebungsbedingungen anzupassen.

2.5 Beispielhafte Einsatzbereiche hochgenauer Industrieroboter

Eine ausreichend hohe Genauigkeit vorausgesetzt, erschließen sich jedoch aufgrund des hohen Bewegungsvermögens und der geringen Kosten von Knickarmrobotern eine Vielzahl von Anwendungsfeldern, bei denen diese derzeit nur eingeschränkt bzw. mit hohem Aufwand eingesetzt werden können. Eine systematische Einteilung potentieller Einsatzbereiche kann gemäß DIN 8580 [30] erfolgen, welche die Fertigungsverfahren der Produktionstechnik in sechs Hauptgruppen unterteilt. Hochgenauen Industrierobotern kommt hierbei bei urformenden Fertigungsverfahren keine besondere Bedeutung zu, wobei aufgrund geringer Trennschärfe auch eine Zuordnung der im Folgenden erläuterten Verfahren aus der Gruppe Beschichten zu dem Bereich Urformen denkbar ist.

2.5.1 Einsatz im Bereich „Umformen“

Zunehmend werden im Automotive-Bereich Rollfalzverfahren zum Verbinden von Anbauteilen wie Frontklappen, Heckklappen oder Türen genutzt. Bei diesem Verfahren werden in einem zumeist mehrstufigen, bördelartigen Prozess zum Verbinden mehrlagiger Bauteile die Kanten umgelegt. Hierbei ersetzen Knickarmroboter zunehmend hydraulische Falzmaschinen/-werkzeuge. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Stückzahlen je Modellreihe abnehmen, gleichzeitig aber die Anzahl unterschiedlicher Modellreihen zunimmt in Kombination mit einer Vergrößerung des Spektrums unterschiedlicher Materialien und Blechstärken. In diesem Zusammenhang erlauben Knickarmroboter eine flexible Anpassung des Falzvorgangs an variierende Fertigungssituationen. Zum Erhalt einer gleichbleibenden Falzqualität ist ein möglichst konstanter Anpressdruck der Falzrolle an die Falzkante von zentraler Bedeutung. Dies erfordert auch das exakte Abfahren einer offline erzeugten Trajektorie in einem applikationsabhängigen Toleranzbereich von wenigen 100 µm. Dies macht derzeit kosten-, zeit- und arbeitsintensive Iterations-schleifen durch Fachleute bei der Inbetriebnahme notwendig. Die Gewährleistung eines exakten Abfahrens der in der Planungsphase erstellten Bewegungsbahn kann helfen diesen Aufwand deutlich zu reduzieren. [6], [31]

2.5.2 Einsatz im Bereich „Trennen“

Fräsoperationen werden konventionellerweise unter Zuhilfenahme mehrachsiger CNC-Maschinen durchgeführt, da diese zum einen Genauigkeiten im Bereich weniger Mikrometer aufweisen und zudem aufbaubedingt über eine hohe Steifigkeit zur Aufnahme der auftretenden Kräfte verfügen. Die Nutzung von Knickarmrobotern als Handhabungsgeräte in diesem Bereich verspricht dahingegen aufgrund der zusätzlichen kinematischen Freiheitsgrade die Möglichkeit zur Fertigung komplexer Geometrien, die in Fräsanlagen nur unter Zuhilfenahme zusätzlicher Vorrichtungen

realisierbar wären. Des Weiteren weisen geeignete Knickarmroboter einen um bis zu fünf Mal geringeren Preis auf als vergleichbare Fräsanlagen. Zentrale Herausforderungen Knickarmroboter für diese Aufgabe zu befähigen ist - zusätzlich zu einem geeigneten Umgang mit den auftretenden Kräften und Schwingungen - eine Absolutgenauigkeit in einen Bereich kleiner als 100 μm , um den Genauigkeitsanforderungen komplexer Bauteile gerecht zu werden. Dies wird zusätzlich zu den inhärenten genauigkeitsbeeinflussenden Eigenschaften der Roboter erschwert durch die ausgeprägte Wechselwirkung zwischen Fräsprozess und Roboterstruktur. [7], [32], [33], [34], [35]

2.5.3 Einsatz im Bereich „Fügen“

Die Miniaturisierung und die damit einhergehenden Herausforderungen bei der Bereitstellung geeigneter Montageverfahren werden als zentrales Thema bei der Produktentwicklung in unterschiedlichsten Anwendungsfeldern angesehen. Dies erfordert zumeist applikationsabhängige Montagegenauigkeiten deutlich unter 200 μm [36]. Die zu montierenden Produkte sind dabei dreidimensional aufgebaut, sodass die eingesetzte Geräte- und Handhabungstechnik mindestens vier, wenn nicht sogar sechs Freiheitsgrade zur Positionierung der Bauteile bereitstellen muss. Dabei müssen die Montagevorgänge hochgenau durchgeführt werden, um die Produktfunktionalität sicherzustellen. Die Nutzung geeigneter Handhabungstechnik birgt hierbei das Potential zur Produktherstellung mit gleichbleibend hoher Qualität bei gleichzeitig reduzierten Herstellkosten. Diese Herausforderung adressierend wurden Präzisionsroboter entwickelt, welche Wiederholgenauigkeiten sogar kleiner 1 μm erlauben [37], [38]. Eine alternative Herangehensweise, die als vielversprechend angesehen wird, ist eine Sensorführung des Handhabungsgeräts, da hierbei situationsbedingt auf variierende Umgebungszustände reagiert werden kann. [39]

Auch in der Automobilproduktion steht eine Reduzierung der Herstellkosten in Verbindung mit kürzeren Taktzeiten im Fokus der Bemühungen. Ein Ansatzpunkt ist die Nutzung von Remote-Laserstrahlschweißverfahren, bei denen im Vergleich zu herkömmlichen Widerstandspunktschweißprozessen gemäß [40] von einer achtzigprozentigen Taktzeitverringerung ausgegangen wird. Während die eigentliche Laserstrahlauslenkung über ein hochgenaues Scannersystem realisiert wird, ist für die Gewährleistung der Nahtzugänglichkeit eine lagegerechte Positionierung des Scanners relativ zum Werkobjekt notwendig. Knickarmroboter als Handhabungsgeräte ermöglichen bei dieser Applikation eine hochflexible Positionierung des Scanners in sechs Freiheitsgraden im Arbeitsraum bei einer gleichzeitig deutlichen Kostenersparnis im Vergleich zu linearkinematischen Ansätzen. Aufgrund des Fokusdurchmessers des Lasers von unter 100 μm erfordert dieses Verfahren jedoch eine Absolutpositioniergenauigkeit des Gesamtsystems kleiner 100 μm . [41] Noch höhere Anforderungen werden an „On the fly“ durchgeführte Remote-Laserstrahlschweißverfahren gestellt, da bei diesen zeitgleich zur Prozessausfüh-

rung das Scannersystem exakt auf einer dreidimensionalen Trajektorie im Raum bewegt werden muss.

2.5.4 Einsatz im Bereich „Beschichten“

Insbesondere der Bereich der Elektronikproduktion ist konfrontiert mit den Herausforderungen einer fortschreitenden Miniaturisierung und Funktionsintegration. Diesen Umstand adressierend werden zunehmend planare Schaltungsträger durch komplexe dreidimensionale Schaltungsträger ersetzt, welche durch eine direkte Integration mechanischer und elektronischer Funktionalitäten eine hohe Funktionsdichte ermöglichen. Ein herausfordernder Prozessschritt bei deren Herstellung ist ein Aufbringen der Leiterbahnstrukturen, das durch selektive, additive Metallisierungstechnologien realisiert werden kann. Bei dieser Verfahrensklasse erfolgt ein punktueller Materialauftrag auf das Substrat, wobei das eigentliche Leiterbahnlayout durch eine definierte Bewegung der Prozessausrüstung relativ zum Werkstück erfolgt. Besonders relevante Prozesstechnologien sind hierbei das Aerosol Jet Printing sowie das Plasma-Spritzen [42]. Prozessabhängig sind hierbei Leiterbahnbreiten deutlich unter 100 µm realisierbar [43]. Entsprechend hohe Anforderungen werden an ein Handhabungsgerät gestellt, das als Mittel zur Bewegungsausführung notwendig ist. Die Verwendung hochgenauer Knickarmroboter birgt hierbei unter anderem das Potential der einfachen Erreichbarkeit unterschiedlich orientierter Prozessflächen von beliebig ausgeprägten Schaltungsträgern. Ein weiterer Vorteil ist eine komfortable Offline-Programmierbarkeit der komplexen dreidimensionalen Bewegungsbahnen, welche zur Generierung der Leiterbahnstrukturen notwendig sind.

2.5.5 Einsatz im Bereich „Stoffeigenschaften Ändern“

Eine alternative Prozesstechnologie zum Aufbringen von Leiterbahnstrukturen auf dreidimensionale Schaltungsträger ist die Laserdirektstrukturierung mit einer nachgeschalteten Galvanisierung. Die Ausprägung des Leiterbahnlayouts wird hierbei maßgeblich bestimmt über eine definierte Auslenkung eines Laserstrahls durch eine hochpräzise Laserscannereinheit und die damit verbundene selektive Aktivierung des Substratmaterials. Das eigentliche Leiterbahnmaterial wird in einem sich anschließenden galvanischen Prozessschritt in den aktivierten Bereichen abgeschieden. Dieses Verfahren ermöglicht kleinste Leiterbahnbreiten und -abstände von bis zu 75 µm. [44] Eine exakte Positionierung der zu prozessierenden Bauteilbereiche bezüglich der Laserscannereinheit ist bei der Laserdirektstrukturierung eine wesentliche Prämisse zur Gewährleistung einer definierten Leiterbahnausbildung relativ zum Substrat. Große Bauteile und Bauteile mit unterschiedlich orientierten Prozessflächen erfordern zudem eine Umplatzierung und Umorientierung des Bauteils im Arbeitsbereich der Laserscannereinheit. Das ausgeprägte Bewegungsvermögen hochgenauer Knickarmroboterkinematiken kann hierbei ein

flexibles und präzises Positionieren unterschiedlichst ausgebildeter dreidimensionaler Schaltungsträger im Arbeitsraum ermöglichen.

Weitere mögliche Anwendungsbereiche für hochgenaue Industrieroboter sind z. B. Inline-Robotermesstechnik, Medizintechnik, Reibrührschweißen, Bohren, Entgraten, Bahnschweißen, Lichtbogenschweißen, Laserschneiden, Laserhartlöten, Handhabung an Werkzeugmaschinen, Kleber oder Dichtmittelauftrag etc. [6], [16], [20].

2.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Basierend auf ihren vorteilhaften Eigenschaften, wie hohem Bewegungsvermögen, geringen Kosten und zeiteffizienter Programmierbarkeit durch die Nutzung moderner 3D-Kinematik-Simulationstools, qualifizieren sich Knickarmroboter für unterschiedlichste Handhabungs- und Bearbeitungsaufgaben. Aufgrund ihrer eingeschränkten Absolutgenauigkeit, welche durch eine Vielzahl verschiedener Faktoren beeinflusst wird, ist jedoch derzeit eine nur geringe Durchdringung von Einsatzfeldern mit hohen Genauigkeitsanforderungen feststellbar. Die Vielzahl möglicher Applikationen in denen Knickarmroboter mit entsprechender Genauigkeit gewinnbringend eingesetzt werden können, belegt jedoch deren wirtschaftliche Relevanz auch im Bereich hochgenauer Anwendungen.

Eine Möglichkeit, die erforderliche Genauigkeit herzustellen, besteht darin, die Roboterprogrammierung online in der realen Produktionsumgebung vorzunehmen, da hierdurch große Teile der auftretenden Ungenauigkeiten sowohl des Roboters als auch des Bearbeitungsumfeldes kompensiert werden können. Zusätzlich zu einem massiven manuellen Arbeitsaufwand, geht dies jedoch mit einem wirtschaftlich nicht darstellbaren Anlagenstillstand und zudem der eingeschränkten Anwendbarkeit dieses Programmieransatzes bei komplexen Bearbeitungsaufgaben einher. Dementsprechend besteht in der Bereitstellung geeigneter Maßnahmen zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern bzw. der Erfüllung nicht nur hoher Wiederholgenauigkeits- sondern ebenfalls hoher Absolutgenauigkeitsanforderungen durch den Roboter ein deutlicher Handlungsbedarf.

Hierbei gestaltet sich aber bereits die Beschreibung der Absolutgenauigkeit von Robotern als schwierig, da deren Definition gemäß der relevanten Normen einen weiten Interpretationsspielraum ermöglichen. Dies mag eine der Ursachen sein, dass die Absolutgenauigkeit gewöhnlicherweise nicht von Roboterherstellern angegeben wird, wobei dieser Umstand die Eignungsbeurteilung für spezifische Anwendungsfälle weiter erschwert. Eine fundierte Analyse der Genauigkeit von Knickarmrobotern kann jedoch in diesem Kontext das Verständnis über deren Verhalten stärken und eine solide Basis zur Auswahl von Maßnahmen für die Genauigkeitssteigerung bilden.

3 Voruntersuchungen zum bewegungsabhängigen Genauigkeitsverhalten von Knickarmrobotern

Ein Einzelwert zur Definition der Absolutgenauigkeit, ermittelt gemäß einschlägiger Normen, beschreibt das komplexe Genauigkeitsverhalten von Knickarmrobotern nur unzureichend. Vielmehr ist die Roboter Genauigkeit maßgeblich abhängig von der Arbeits- und damit einhergehenden Bewegungsaufgabe. Zentrale Einflussgrößen sind hierbei die Lage der Trajektorie relativ zur Kinematik im Raum, die Roboterkonfiguration, -geschwindigkeit und -beschleunigung sowie zudem die Ausprägung der Bewegungsbahn z. B. in Hinblick auf Ecken und Richtungswechsel. Dies belegen auch die Ergebnisse der nachfolgend erläuterten eigenen Genauigkeitsuntersuchungen.

Abschnitt 3.1 enthält einleitend eine Zusammenfassung über Genauigkeitskennwerte von Industrierobotern, die von Roboterherstellern angegeben werden, sowie eine Darstellung der zentralen Inhalte verfügbarer Roboter Genauigkeitsstudien. Die Versuchsumgebung, deren zentrale Komponenten und die Vorgehensweise zur Durchführung der Genauigkeitsuntersuchungen werden in Abschnitt 3.2 vorgestellt und die Messunsicherheit quantitativ beurteilt. In Abschnitt 3.3 werden die Ergebnisse der Messreihen dargestellt und diskutiert. Abschließend folgt in Abschnitt 3.4 eine zusammenfassende Beurteilung der durchgeführten Analysen. Teile der nachfolgend dargestellten Ergebnisse sind angelehnt an den am Lehrstuhl FAPS entstandenen und vom Autor ko-betreuten Arbeiten [45–49].

3.1 Typische Genauigkeitswerte von Knickarmrobotern

Die Wiederholgenauigkeit ist neben Traglast, Reichweite und Geschwindigkeit eine der zentralen Eigenschaften von Industrierobotern und kann einschlägigen Datenblättern der Hersteller entnommen werden. Die Absolutgenauigkeit wird dahingegen nur sehr selten angegeben. Vereinzelt wissenschaftliche Publikationen adressieren jedoch den Aspekt der Absolutgenauigkeit, zumeist in Zusammenhang mit einer Roboterkalibrierung.

3.1.1 Herstellerangaben

Einen aus Datenblättern entnommenen repräsentativen Überblick der Pose-Wiederholgenauigkeit aktueller Knickarmroboter unterteilt nach Traglastfähigkeiten gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Pose-Wiederholgenauigkeitskennwerte sechssachsiger Knickarmroboter [50], [51], [52], [53], [54], [55]

Hersteller	Wiederholgenauigkeit bei niedriger Traglastfähigkeit (< 10 kg) [mm]	Wiederholgenauigkeit bei mittlerer Traglastfähigkeit (10 - 80 kg) [mm]	Wiederholgenauigkeit bei hoher Traglastfähigkeit (> 80 kg) [mm]
Stäubli Robotics	± 0,03 bis ± 0,04	± 0,04 bis ± 0,06	± 0,06 bis ± 0,10
KUKA Roboter	± 0,02 bis ± 0,05	± 0,05 bis ± 0,06	± 0,05 bis ± 0,10
ABB Automation	± 0,01 bis ± 0,05	± 0,04 bis ± 0,19	± 0,03 bis ± 0,27
Fanuc	± 0,02 bis ± 0,08	± 0,07 bis ± 0,15	± 0,2 bis ± 0,3
Yaskawa Denki	± 0,02 bis ± 0,08	± 0,06 bis ± 0,15	± 0,07 bis ± 0,5
Denso	± 0,015 bis ± 0,02	± 0,05 bis ± 0,07	entfällt
Wertebereich	± 0,01 bis ± 0,08	± 0,04 bis ± 0,19	± 0,03 bis ± 0,5

Aus den Werten ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen Robotertraglast und der Wiederholgenauigkeit ersichtlich. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass höhere Traglasten zumeist mit einer entsprechenden Größendimensionierung der Roboterkomponenten und damit verbundenen Toleranzen, Steifigkeiten, Spiel etc. einhergehen. Unklar bleibt bei den angegebenen Werten jedoch die Berechnungsgrundlage, da gemäß [27] und [17] die Wiederholgenauigkeit nur bezüglich eines spezifischen Punktes definiert ist und nicht für das gesamte Robotersystem. Zu erwarten ist jedoch ein arithmetischer Mittelwert.

3.1.2 Untersuchungen aus Forschung und Entwicklung

Während den Hersteller-Datenblättern lediglich die Pose-Wiederholgenauigkeit entnehmbar ist, sind Absolutgenauigkeitskennwerte vereinzelt in Forschungsberichten aufgeführt. In [5] werden Pose-(Absolut-)Genauigkeiten für kleine Roboter (Nutzlast < 15 kg) von 0,3 bis 1 mm, mittelgroße Roboter (Nutzlast < 60 kg) von 0,4 bis 1,3 mm und große Roboter (Nutzlast > 60 kg) von 0,5 mm bis 2 mm genannt, wobei die Datenbasis nicht erläutert wird. In weiteren Berichten werden Absolutgenauigkeiten von bis zu 10 mm genannt [56]. Auch in [6] sind Absolutgenauigkeiten von bis zu 3 mm aufgeführt und sogar bis zu 12 mm bei älteren Robotern. [4] können ebenfalls Absolutpositioniergenauigkeiten von 2 mm bis 10 mm entnommen werden.

Jenseits der Angabe dieser singulären Absolutgenauigkeitswerte erfolgt im Bereich der Roboterkalibrierung oftmals eine Bestimmung angepasster Denavit-Hartenberg-Parameter mittels einer Ermittlung der Pose-Abweichungen einer Vielzahl von

zumeist stochastisch im Arbeitsraum verteilter Punkte [57]. Bereits bei kleinen Robotern wurden bei diesen Untersuchungen maximale Abweichungen von bis zu 7,8 mm festgestellt [58]. [59] kann für die gewählten Punkte eine deutliche Abhängigkeit der Genauigkeit von der Last, mit welcher der Roboter beaufschlagt wird, mit Abweichungen bis zu 2,45 mm entnommen werden. Alternative Ansätze nutzen genetische Algorithmen zur Bestimmung der optimalen Messpunktpositionen im Arbeitsraum [60] oder vorbestimmter Messvolumina [61]. Für die derart gefundenen Punkte wurden maximale Genauigkeitsabweichungen von 8,37 mm [60] bzw. 2,25 mm [61] gemessen. Die ermittelten Abweichungen sind im Bereich der Kalibrierung maßgeblich für die Parameterermittlung und weniger zur Beschreibung des Robotergenauigkeitsverhaltens gedacht. In [62] wird eine alternative Vorgehensweise zur Vorhersage des Roboter-Bahnverhaltens mittels künstlicher neuraler Netzwerke (Artificial Neural Networks - ANN) vorgestellt. In den Ausführungen sind ebenfalls zu Evaluierungszwecken angestellte Genauigkeitsuntersuchungen eines Knickarmroboters mit einer Traglast von 16 kg insbesondere bei Kreisbahnen dargestellt. Abhängig von aufgebrachtener Last, Geschwindigkeit und Kurvenradius wurden hierbei maximale Bahnabweichungen von bis zu 1,981 mm festgestellt und die Wirksamkeit der erforschten Vorgehensweise nachgewiesen.

Darüber hinaus sind vereinzelte Studien bekannt, welche die Robotergenauigkeit im Arbeitsraum analysieren. In [29] werden Untersuchungen beschrieben, bei denen die Soll-/Ist-Abweichungen dreier baugleicher Industrieroboter für eine Vielzahl statischer Punkte im Arbeitsraum ermittelt und miteinander verglichen werden. Während die Roboter untereinander nur unwesentliche Unterschiede aufweisen, zeigen die untersuchten Punkte eine deutliche Varianz im Bereich von 2 mm bis 10 mm. Weitere Untersuchungen von Berg zeigen für die Bewegung auf einen einfachen linearen Pfad Abweichungen von Soll- zu Ist-Bahn in x-, y- und z-Richtung im Bereich von - 3 mm bis + 4 mm und Winkelabweichungen bis zu 1° [63]. In [64] wird die Genauigkeit dreier Roboter mit hohen Traglasten für fünf statische, auf einer Gerade liegender Punkte miteinander verglichen. Bei diesen Analysen konnten Abweichungen von maximal 1,8 mm festgestellt werden, wobei sich die untersuchten Roboter bei den Punkten hinsichtlich ihres Genauigkeitsverhaltens in den drei Raumrichtungen deutlich voneinander unterscheiden. Weiterführend wird in [65] ein Hochgeschwindigkeitskamerasystem zur Analyse des dynamischen Verhaltens von Industrierobotern bei variierenden Beschleunigungswerten diskutiert. Bei einem linearen Pfad konnte für die unterschiedlichen Beschleunigungsvorgaben ein ähnliches Genauigkeitsverhalten festgestellt werden, wobei im Fokus der Untersuchungen nicht die absolute Abweichung, sondern vielmehr die Bahnlinearität steht. Holden [66] sind im Weiteren Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Konfigurationswechseln bei Bahnbewegungen und der Bewegungsgenauigkeit zu entnehmen. In den dortigen Ausführungen wird zudem quantitativ der Zusammenhang von Handwurzelaußenlenkung abhängig von extern aufgebrachtene Kräfte

diskutiert. Dahingehend sind auch in [7] Untersuchungen beschrieben, welche die Abdrängung des Roboters bei Fräsprozessen erfassen.

Gemein ist den dargestellten Arbeiten, dass diese aufgrund der angegebenen Absolutgenauigkeitswerte die Notwendigkeit einer Genauigkeitssteigerung implizieren, das „absolute“ (Bahn-)Genauigkeitsverhalten abhängig von Arbeits- und Bewegungsaufgabe jedoch zumeist nicht oder nur in Ansätzen adressieren. Vielmehr umfassen bekannte Arbeiten oft lediglich statische Einzelpunktmessungen. Auch fehlt zumeist eine quantitative Beurteilung der Messunsicherheit und Beschreibung der Einmessmethode, was eine fundierte Beurteilung der Werte erschwert. Zu einem besseren Verständnis des Roboterverhaltens sollen in diesem Kontext die nachfolgenden Ausführungen und Untersuchungsergebnisse einen Beitrag leisten.

3.2 Methode zur Evaluierung des Genauigkeitsverhaltens

Vor der Überprüfung des Genauigkeitsverhaltens wird das Robotersystem vorbereitend eingemessen. Bei den eigentlichen Untersuchungen werden charakteristische Robotertrajektorien abgefahren, bei einer zeitgleichen Erfassung der Ist-Bewegung und einem abschließenden Vergleich der aufgenommenen Ist-Bahnen mit den Soll-Bahnen. Die Versuchsumgebung ist in Abbildung 11 dargestellt.

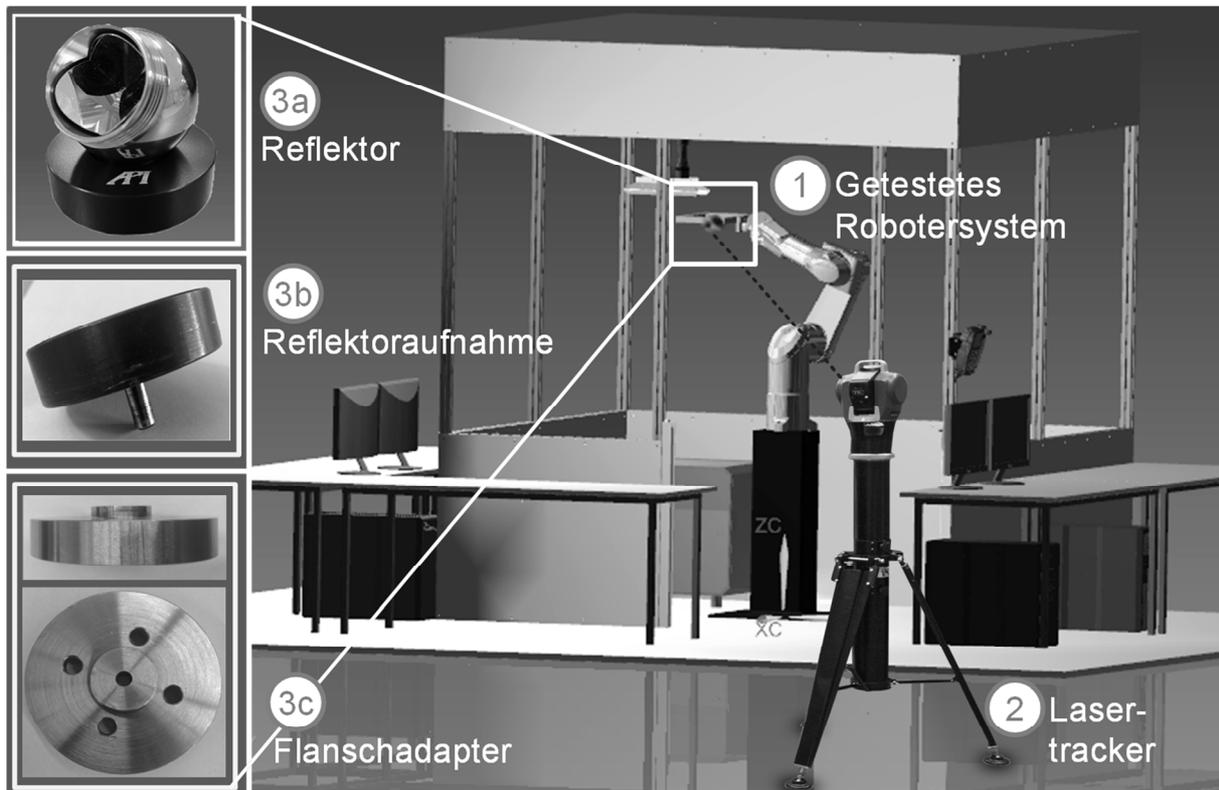


Abbildung 11: Versuchsumgebung Robotergenauigkeitsuntersuchungen

Zentrale Bestandteile der Versuchsumgebung sind die getesteten Robotersysteme (1), deren Genauigkeiten überprüft werden, ein Lasertracker (2) zur hochgenauen

und dynamischen Bewegungserfassung sowie eine robotermontierte Antastinstallation (3a) bis (3c), deren Bewegung ermittelt wird und die zuverlässige Rückschlüsse auf die Bewegung des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems f_{TCP} ermöglicht.

3.2.1 Getestete Systeme zur Überprüfung des Verhaltens kleinskaliger Knickarmroboter

Überprüft wurde im Rahmen der Untersuchungen das Verhalten von drei unkalibrierten Standardknickarmrobotern mit niedrigen Traglasten. Die untersuchten Roboter sind in Abbildung 12 dargestellt und ihre Kennwerte in Tabelle 2 aufgelistet.

Die eingezeichneten Koordinatensysteme $f_{RobotA...C}$ spezifizieren das jeweils relevante Roboterbasis- bzw. Bezugskordinatensystem.

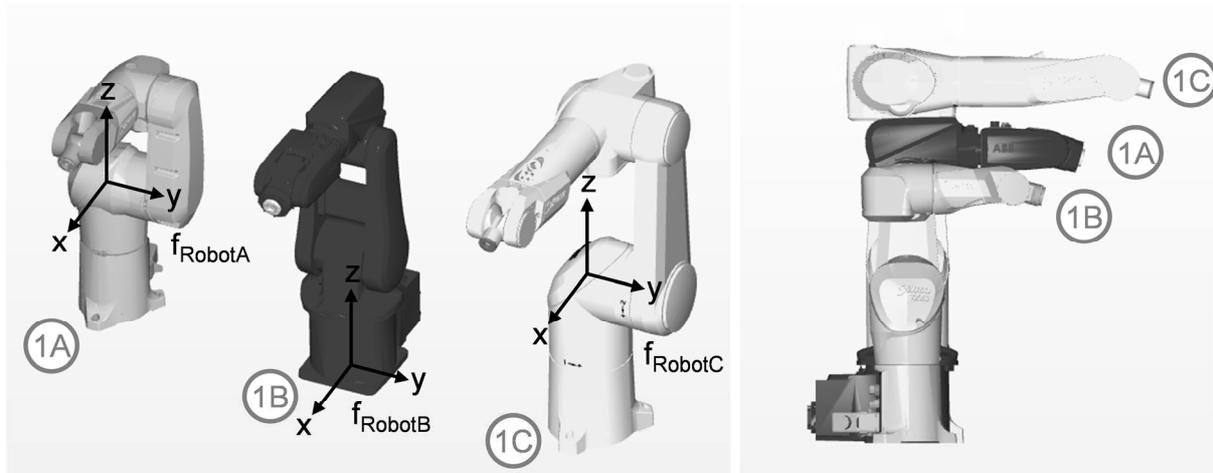


Abbildung 12: Getestete Systeme und deren Referenzkoordinatensysteme

Tabelle 2: Kennwerte der getesteten Systeme gemäß Datenblättern [67], [68], [69]

Getestetes System	1A	1B	1C
Maximale Traglast [kg]	2,3	4	5
Nominale Traglast [kg]	1,7	3	2
Reichweite [mm]	515	580	920
Wiederholgenauigkeit [mm]	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$
Interpolationstakt [ms]	2	dynamisch > 10	4
Historie/Betriebstunden [h]	0 (fabrikneu)	0 (fabrikneu)	700

Das charakteristische Eigenschaftenspektrum der ausgewählten Roboter im Hinblick auf Aufbau, Reichweite, Wiederholgenauigkeit und Interpolationstakt ermöglicht repräsentative Aussagen genauigkeitsbezogener Verhaltensweisen und Effekte bei kleinskaligen Knickarmroboterkinematiken.

3.2.2 Messmittel zur hochgenauen und -dynamischen Erfassung von Robotertrajektorien

Nutzbare Messeinrichtungen zur Überprüfung der Roboter Genauigkeit sind unter anderem taktile Messgeräte, Theodoliten, Ultraschallsensoren, Seilzugaufbauten, Kamerasysteme, Indoor-GPS, Inertialsensoren und auch interferometrische Messsysteme, wie z. B. Lasertracker. Eine strukturierte und ausführliche Gegenüberstellung dieser Möglichkeiten ist in [6] und [5] enthalten.

Lasertracker weisen im Hinblick auf Genauigkeit, Messbereich und Dynamik bei der Erfassung von drei Freiheitsgraden eine universelle Einsetzbarkeit auf, sind jedoch zugleich sehr hochpreisig. Letzteren Umstand mag auch die derzeit nur eingeschränkte Anzahl von verfügbaren Untersuchungen des Roboterbahngenaigkeitsverhaltens geschuldet sein. Der prinzipielle Aufbau eines Lasertrackers und das genutzte System sind in Abbildung 13 dargestellt.

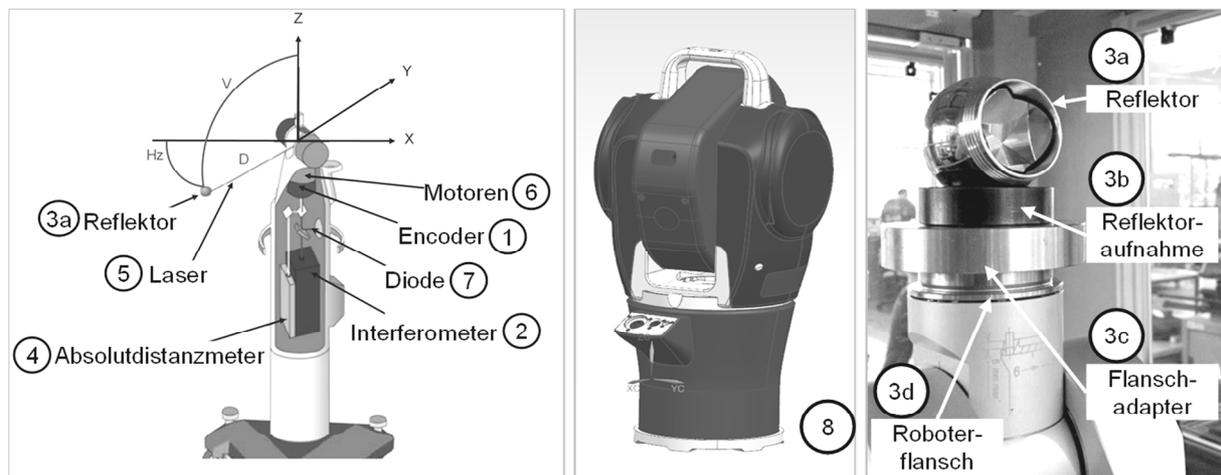


Abbildung 13: Aufbau (angelehnt an [70]), API Radian [71], Reflektoranbindung

Ein Lasertrackersystem arbeitet nach der polaren Messmethode. Bei dieser werden zwei Winkel und eine Distanz gemessen. Die Winkelermittlung (H_z , V) erfolgt über zwei Teilkreise der Winkelencoder (1). Für die Distanzmessung (D) werden ein Laser-Interferometer (2) und ein Absolutdistanzmesser (4) genutzt. Der Lasertracker sendet einen Laserstrahl (5) aus, dieser trifft auf einen Reflektor (3a) und wird von dem Spiegel zurück zum Tracker gespiegelt. Dabei ist der Tracker in der Lage, dem Reflektor zu folgen, wobei jedoch ein kontinuierlicher Sichtkontakt erforderlich ist. Um den Kopf des Trackers mitbewegen zu können, wird dieser von zwei Motoren (6) angetrieben. Je ein Motor ist für die horizontale und die vertikale Bewegung verantwortlich. Eine positionsempfindliche Diode (PSD) (7) unterstützt bei der Reflektorverfolgung. Ergebnis ist eine kontinuierliche Positionserfassung der x -, y - und z -Koordinaten des Reflektors relativ zum Tracker. [72], [73]

Für die Untersuchungen wird der Reflektor (3a) über eine Aufnahme (3b) und einen Adapter (3c) koaxial zur z -Achse des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems f_{TCP}

am Roboterflansch (3d) montiert und zur Bewegungslaufzeit durch den Roboter mitgeführt. Als Messsystem wird ein Lasertracker (8) API R-20 Radian verwendet, dessen zentrale Eigenschaften in [71] dargestellt sind.

3.2.3 Ermittlung des Roboterbasiskoordinatensystems

Zusätzlich zu einer ausreichenden Aufwärmphase des Roboters und Kalibrierung des Lasertrackers ist eine präzise Einmessung bzw. Ermittlung des Roboterreferenzkoordinatensystems $f_{\text{RobotA...C}}$ vor jedem Messvorgang von zentraler Bedeutung. Die Einmessung ist notwendig, um die erfassten Ist-Daten in Relation zum Roboterbasiskoordinatensystem zu setzen und somit einen exakten Vergleich mit den roboterbezogenen Soll-Daten zu gewährleisten. Eine direkte Antastung der Roboterbasiskoordinatensysteme $f_{\text{RobotA...C}}$ ist dabei nicht möglich, da diese innerhalb der Robotersockel lokalisiert sind (siehe Abbildung 12). Die Definitionen dieser Koordinatensysteme sind dabei abhängig vom getesteten System wie folgt:

Roboter 1A und 1C:

- Koordinatenursprung: Schnittpunkt der Drehachsen 1 und 2.
- Positive z-Achsausrichtung: Koaxial zu Drehachse 1, nach oben gerichtet.
- Positive y-Achsausrichtung: Koaxial zu Drehachse 2, in Richtung der Auskrugung mit Drehachse 1 in Nullstellung.
- Positive x-Achsausrichtung: Achsausrichtung definiert durch vorherige Einschränkungen mit positiver Richtung entgegen dem Anschlusspanel.

Roboter 1B:

- Koordinatenursprung: Koaxial zu Drehachse 1 im Durchdringungspunkt der Achse mit der Montageebene.
- Positive z-Achsausrichtung: Koaxial zu Drehachse 1, nach oben gerichtet.
- Positive y-Achsausrichtung: Koaxial zu Drehachse 2, linksseitig bezüglich der Blickrichtung Anschlusspanel mit Drehachse 1 in Nullstellung.
- Positive x-Achsausrichtung: Achsausrichtung definiert durch vorherige Einschränkungen mit positiver Richtung entgegen dem Anschlusspanel.

Eine Antastung physischer Roboterkomponenten, z. B. von Gehäuseteilen, und eine daraus resultierende Ermittlung der Achslagen und -ausrichtungen ist nicht zielführend, da diese Komponenten bereits Abweichungen von den Soll-Daten aufweisen.

Bei der entwickelten Einmessmethode werden die Roboterachsen 1 bzw. 2 isoliert verdreht und gleichzeitig die jeweilige Verdrehbewegung über eine Kreisbahn unter Zuhilfenahme des Trackers erfasst. Die Drehachsen sind zentrisch dieser Kreisbahnen lokalisiert mit orthogonaler Ausrichtung relativ zur Ebene, die von der jeweiligen Kreisbahn aufgespannt wird. Diese bestimmen im Weiteren die Roboterbasiskoordinatensysteme $f_{\text{RobotA...C}}$ entsprechend obiger Definitionen. Gemäß der nominalen Planungsdaten treffen sich die Drehachsen orthogonal in einem Punkt, weisen in der Realität aber bereits einen Versatz bezüglich Winkel und

Abstand auf, der die „Absolutgenauigkeit“ der nachfolgenden Messungen mit bestimmt und durch Achsschiefstände sowie Montageabweichungen bedingt ist.

Technisch ist es nicht möglich, komplett abweichungsfreie Messungen durchzuführen. Entsprechend sind alle vorgenommenen Messungen mit einer Unsicherheit behaftet. Die Messunsicherheit ist dabei definiert als „[...] ein dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise dem Messwert zugeordnet werden“ [74]. Angelehnt an [75] kann die Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen begründet sein in Umgebung, Bediener, Werkstück sowie Messgerät und -strategie, wobei die beiden letztgenannten Faktoren hinsichtlich der durchgeführten Messungen den größten Einfluss besitzen. Quantifiziert sind die Einflüsse in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Quantifizierung des maximal zulässigen Fehlers

Einordnung	Ursache	Größe	Hinweis
Messgerät			
	Lasertracker	$\pm 10 \mu\text{m}$	[71]
	Reflektor (3a)	$\pm 6,35 \mu\text{m}$	[76]
	Aufnahme (3b)	$\pm 6,35 \mu\text{m}$	[77]
	Adapter (3c)	$\pm 10 \mu\text{m}$	Tolerierung Fertigungsteil
Messstrategie			
Durchschnittlicher Achsabstand Einmessung			
	Roboter 1A	$\pm 85 \mu\text{m}$	-
	Roboter 1B	$\pm 67 \mu\text{m}$	-
	Roboter 1C	$\pm 88 \mu\text{m}$	-
Durchschnittlicher Winkelversatz Einmessung			
	Roboter 1A	$\pm 0,0031^\circ$	Längenbezogen $\pm 13 \mu\text{m}$
	Roboter 1B	$\pm 0,0149^\circ$	Längenbezogen $\pm 75 \mu\text{m}$
	Roboter 1C	$\pm 0,00099^\circ$	Längenbezogen $\pm 9 \mu\text{m}$

Aufsummiert weisen die messgerätbezogenen Abweichungen eine Größe von $\pm 32,7 \mu\text{m}$ auf. Intensiver ausgeprägt ist die Messunsicherheit, welche aus dem beim jeweiligen Einmessvorgang festgestellten Achsabstand und Winkelversatz resultiert. Diese Unsicherheit hat keinen Einfluss auf die Ausprägung der erfassten Datensätze an sich, bedingt jedoch für den individuellen Messvorgang eine gleichbleibende Verschiebung der Ist- zu den Soll-Daten von bis zu $\pm 142 \mu\text{m}$ für Kinematik 1B.

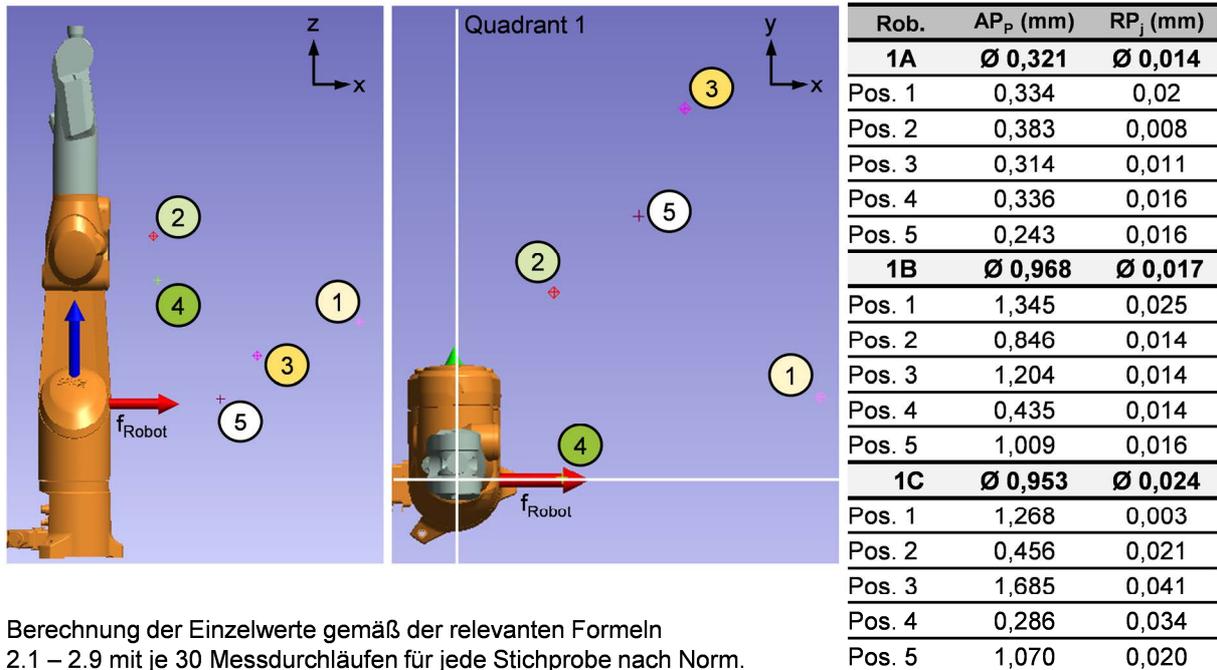
Da unter Berücksichtigung der Absolutgenauigkeitswerte aus Stand der Technik und Forschung deutlich höhere Abweichungen erwartet werden als die ermittelten Unsicherheitseinflüsse und diese zudem systematischer Natur sind, ist der Erhalt aussagekräftiger Ergebnisse gewährleistet. So sollte nach [78] und [79] die Unsicherheit des verwendeten Messmittels zehn Prozent der Toleranz des Messmerkmals nicht überschreiten.

3.3 Experimentell ermittelte Abweichungen beim Bahnverhalten

Zentraler Gegenstand der Untersuchungen ist eine Beschreibung des Roboter-genauigkeitsverhaltens abhängig von der Bewegungsaufgabe. Dies umfasst einleitend eine Ermittlung der zentralen Kennwerte Absolut- und Wiederholgenauigkeit (Abschnitt 3.3.1) und weiterführend eine Genauigkeitsevaluierung unterschiedlicher Arbeitsbereiche (Abschnitt 3.3.2), Arbeitsabstände (Abschnitt 3.3.3), Eck-/Unstetigkeitsbereiche (Abschnitt 3.3.4), den dynamischen Einfluss auf die Bahntreue (Abschnitt 3.3.5), Geschwindigkeitstreue (Abschnitt 3.3.6) sowie abschließend die Untersuchung unterschiedlicher Roboterkonfigurationen (Abschnitt 3.3.7). Bei den Analysen werden jeweils die Ist-/Soll-Abweichungen getrennt für die x-y-Ebene und z-Richtung betrachtet. Die dargestellten Untersuchungsergebnisse stellen ausgeprägte und exemplarische Effekte dar, die systemübergreifend feststellbar und in skalierten Form übertragbar sind. Abweichende Verhaltensweisen der Kinematiken werden entsprechend erläutert. Ein Rückbezug der Effekte auf einzelne Roboterkomponenten ist bewusst nicht zentraler Inhalt der Ausführungen, da die Forschungsarbeiten nicht die Optimierung einer spezifischen Kinematik adressieren, sondern vielmehr die Kompensation von Ungenauigkeiten bei der Bewegungsausführung, welche entsprechend Abschnitt 2.2.4 aus dem Zusammenspiel einer Vielzahl von Ursachen resultieren.

3.3.1 Absolut- und Wiederholgenauigkeit

Eine erste Klassifizierung der getesteten Systeme erfolgt über eine Ermittlung der Absolutgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit anhand von fünf im ersten Quadranten homogen verteilten Stichproben, welche hinsichtlich Ihrer x-,y- und z-Koordinaten charakteristische Arbeitspositionen repräsentieren. Die Punktlokalisierungen und Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt.



Berechnung der Einzelwerte gemäß der relevanten Formeln 2.1 – 2.9 mit je 30 Messdurchläufen für jede Stichprobe nach Norm.

Abbildung 14: Absolut- und Wiederholgenauigkeit der getesteten Systeme

Entsprechend der in Abschnitt 2.3.1 dargestellten normativen Vorgaben erfolgt ein Anfahren der Punkte bei den Untersuchungen aus gleichbleibender Richtung. Während bei den Systemen 1A und 1C die Wiederholgenauigkeit RP_j entsprechend der Herstellerangaben nachvollzogen werden kann, weichen bei System 1B der Mittelwert (+ 0,017 mm) und die Einzelwerte (max. + 0,025 mm) von den Angaben ab. Im Weiteren ist den Messwerten eine abnehmende Absolutgenauigkeit AP_P mit ansteigender Robotergröße entnehmbar sowie eine zunehmende Spreizung der Wertespanne. Zusätzlich ist eine Abnahme der Absolutgenauigkeit bei Punkten mit größerem Abstand relativ zum Roboterbasiskoordinatensystem f_{Robot} festzustellen.

3.3.2 Bereichsabhängiges Genauigkeitsverhalten

Die Quantifizierung bereichsabhängiger Effekte erfolgt über das Verfahren zweier unterschiedlich dimensionierter symmetrischer polygoner Bahnzüge auf Ellenbogen (Bahn 1) und Schulterhöhe (Bahn 2) der getesteten Systeme.

Die Roboter sind zentrisch der Bahnzüge positioniert. Charakteristische Untersuchungsergebnisse zeigen Abbildung 15 (z-Richtung) und Abbildung 16 (x-y-Ebene).

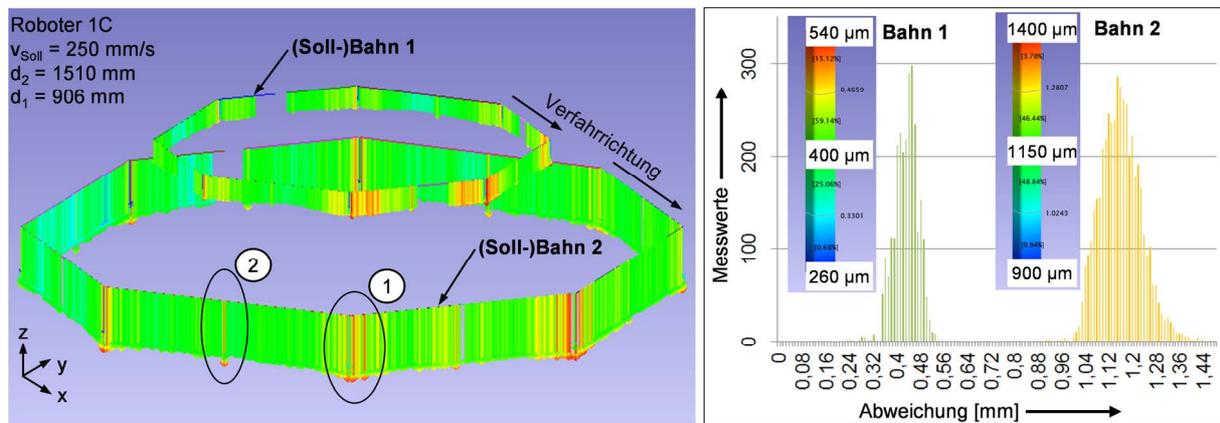


Abbildung 15: Bereichsabhängiges Genauigkeitsverhalten (z-Richtung)

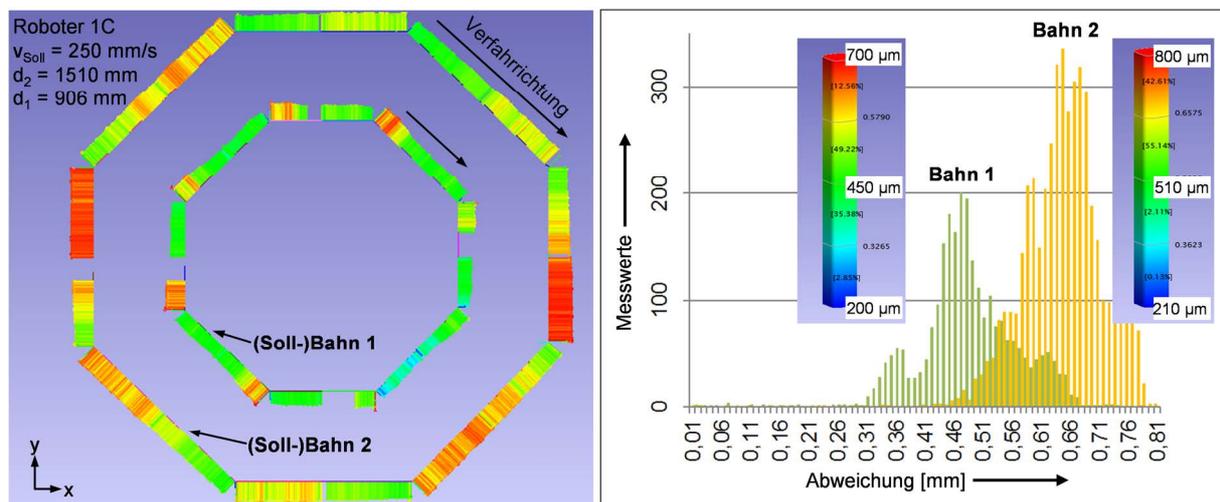


Abbildung 16: Bereichsabhängiges Genauigkeitsverhalten (x-y-Ebene)

Erfasst wurden für Kinematik 1C bei den Bahnen 1 und 2 folgende Abweichungen:

Bahn 1: $\bar{x}_{z1} = 420 \mu\text{m}$, $\sigma_{z1} = 40 \mu\text{m}$, $\bar{x}_{xy1} = 480 \mu\text{m}$

Bahn 2: $\bar{x}_{z2} = 1150 \mu\text{m}$, $\sigma_{z2} = 70 \mu\text{m}$, $\bar{x}_{xy2} = 690 \mu\text{m}$

Ersichtlich ist aus den geringen Standardabweichungen σ_z ein bereichsunabhängiges, näherungsweise symmetrisches Genauigkeitsverhalten mit systematischer Abweichung in negativer z-Richtung gegenüber den Soll-Daten (Abbildung 15), wobei die näher zur Roboterbasis lokalisierte Bahn 1 im arithmetischen Mittel \bar{x}_{z1} deutlich geringere Abweichungen im Vergleich zur weiter entfernten Bahn 2 aufweist. Die Häufigkeitsverteilung der erfassten Werte zeigt eine höhere Standardabweichung der Messwertspanne der weiter beabstandeten Bahn 2 verglichen zu Bahn 1. Ausgeprägte Ausschläge treten bei beiden Ist-Verläufen in den Ecken/Unstetigkeiten (1) auf und antizipieren eine zunehmende Ungenauigkeit bei abrupten

Bewegungsrichtungsänderungen. Auch Bereiche mit Drehrichtungsänderungen einzelner Achsen (2) zeigen erhöhte Abweichungen. Im Rahmen der diskutierten Messunsicherheit sind auch die Abweichungsverläufe in der x-y-Ebene (Abbildung 16) symmetrisch ausgeprägt. Gemein ist beiden Ist-Bahnverläufen eine durchgehend höhere Beabstandung verglichen zu den Soll-Bahnen bezüglich der Roboterbasis. Analog den Untersuchungen in z-Richtung weist die weiter beabstandete Bahn 2 eine im arithmetischen Mittel \bar{x}_{xy} höhere Abweichung auf im Vergleich zu Bahn 1. Schwerkraftbedingt ist der Einfluss in z-Richtung verglichen zur x-y-Ebene stärker ausgeprägt.

3.3.3 Abstandsabhängiges Genauigkeitsverhalten

Ein wesentlicher Zusammenhang, den die vorhergehenden Analysen implizieren, ist eine Abhängigkeit der Roboter Genauigkeit vom Arbeitsabstand relativ zum Roboterbasiskoordinatensystem. Trajektorie zur Verifizierung dieser These ist eine rasterförmige Bahn mit einer sich vom Roboterrumpf entfernenden Hauptausdehnung. Charakteristische Messergebnisse zeigt Abbildung 17.

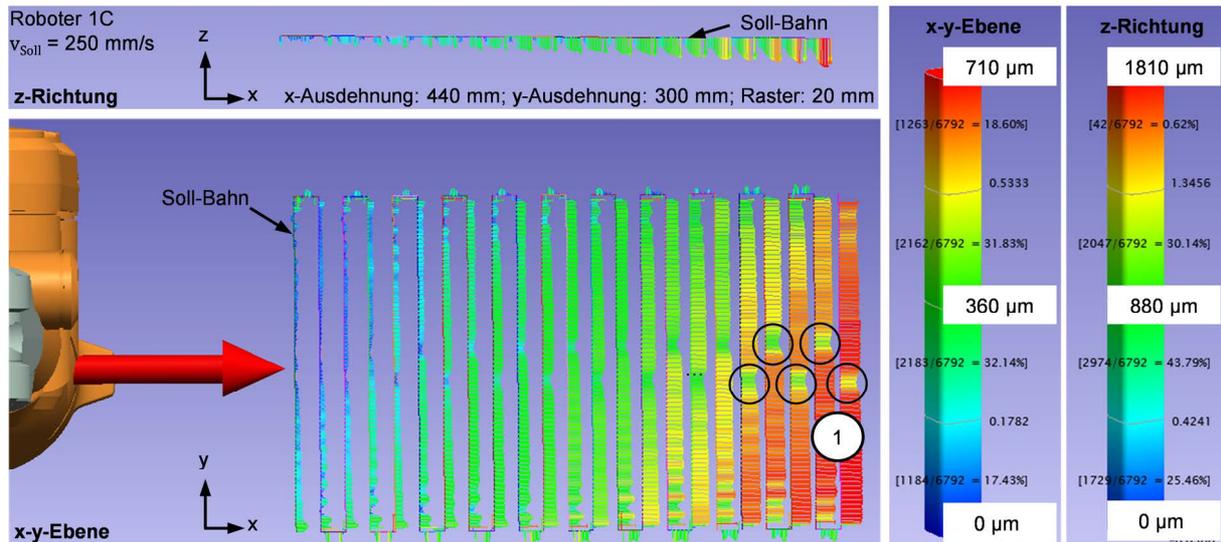


Abbildung 17: Abstandsabhängiges Genauigkeitsverhalten

Ermittelt wurden für das getestete System 1C die nachfolgenden Abweichungswerte:

$$\begin{aligned} \text{z-Richtung:} \quad & \Delta_{z\max} = 1810 \text{ µm}, \quad \bar{x}_z = 700 \text{ µm}, \quad \sigma_z = 300 \text{ µm} \\ \text{x-y-Ebene:} \quad & \Delta_{xy\max} = 710 \text{ µm}, \quad \bar{x}_{xy} = 350 \text{ µm}, \quad \sigma_{xy} = 180 \text{ µm} \end{aligned}$$

Markant ist die abnehmende Absolutgenauigkeit bei einem zunehmenden Abstand der Roboterhandwurzel vom Roboterbasiskoordinatensystem. Die Abweichung ist dabei in z-Richtung deutlich stärker ausgeprägt als in der x-y-Ebene. Eine Begründung für den Unterschied ist eine schwerkraftsbedingte Biegung des Roboterarms. In Zusammenschau resultieren die Abweichungen $\Delta_{z\max}$ und $\Delta_{xy\max}$ gemäß Formel 2.1 in einer maximalen Absolut(un)genauigkeit von $\Delta_{\max} = 1,94 \text{ mm}$. Entsprechend der Untersuchungsergebnisse von [66] ist im Weiteren ein

genauigkeitsbeeinflussender Effekt in Bereichen mit wechselnder Drehrichtungsänderungen einzelner Roboterachsen festzustellen (1). Basierend auf dem weiten Spektrum der Abweichungen von $\Delta_{\max} = 0$ bis 1,94 mm und der hohen Standardabweichungen $\sigma_z = 310 \mu\text{m}$ respektive $\sigma_{xy} = 180 \mu\text{m}$ belegen die Ergebnisse die nur geringe Aussagekraft eines singulären Mittelwerts zur Beschreibung der Absolutgenauigkeit eines Robotersystems. Zu beachten ist, dass ausgeprägte Eckbereichsabweichungen in den Daten nicht enthalten sind um eine Ergebnisverfälschung zu vermeiden. Diese sind Inhalt der folgenden Abschnitte.

3.3.4 Genauigkeitsverhalten in Eck-/Unstetigkeitsbereichen

Wenn nicht durch prozessspezifische Design-Regeln ausgeschlossen oder abgemildert, beinhalten Prozessbahnen unterschiedlich stark ausgeprägte Unstetigkeitsbereiche, die abrupte Bewegungsrichtungsänderungen oder Umorientierungen und damit einhergehende Beschleunigungen der Kinematik erfordern. Im Hinblick auf physikalische Beschränkungen von Beschleunigungsvorgängen sind diese Bereiche besonders herausfordernd. Die Analysen des Roboterhaltens umfassen in diesem Kontext eine Untersuchung von Unstetigkeitsbereichen mit variierenden Winkeln und unterschiedlichen Überschleiffaktoren sowie von Sprungantworten. Einen Auszug charakteristischer Untersuchungsergebnisse zeigt Abbildung 18.

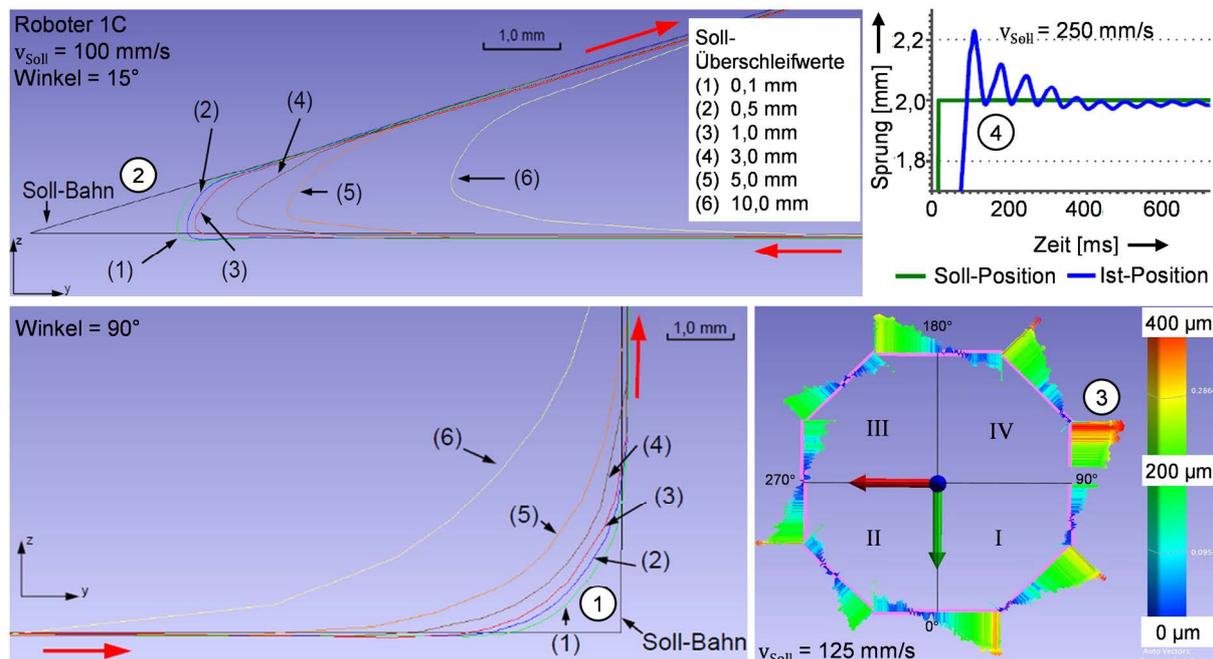


Abbildung 18: Genauigkeitsverhalten in Unstetigkeitsbereichen

Signifikant ist die überproportionale Nichteinhaltung der Überschleifvorgaben bei geringen Überschleifwerten von 0,1 bis 1 mm. Die Überschreitung um das ca. 20-fache bei einer Vorgabe von 0,1 mm resultiert in einer deutlichen Reduzierung der erwarteten Bahntreue (1), (2). Die Überschreitung ist dabei unabhängig von dem

Eckwinkelbetrag, wirkt sich aber bei spitzen Winkeln (2) im Scheitel intensiver aus im Hinblick auf eine Nichterreicherung des vorgegebenen Eckpunktes. Im Gegensatz zu diesem Effekt bedingt ein erzwungenes Anfahren der Eckpunkte bei gleichbleibender Geschwindigkeit Überschwingbewegungen der Kinematik in den Unstetigkeitsbereichen (3). Zusätzlich zu einer reduzierten Bahntreue geht dies aufgrund massiver Beschleunigungen mit einer hohen mechanischen Belastung der Kinematik einher. Überschwingeffekte zeigt der Roboter auch bei einer Beaufschlagung mit eindimensionalen Streckensprüngen (4). In der vorgegebenen Konstellation resultiert dies in einem deutlichen Überschwingen der vorgegebenen Soll-Position.

3.3.5 Dynamikabhängiges Bahngenaugkeitsverhalten

Die vorhergehenden Untersuchungen zeigen, dass insbesondere bei einem erzwungenen Anfahren relevanter Bahnpunkte Überschwingeffekte auftreten, welche die Bahngenaugkeit negativ beeinflussen. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass sich bei verschärften dynamischen Vorgaben die Bahngenaugkeit weiter verschlechtert. In diesem Zusammenhang umfassen die Untersuchungen das Abfahren von Rasterbahnen welche das Reichweitemspektrum umfassend abbilden mit variierenden Geschwindigkeitsvorgaben. Charakteristische Ergebnisse für Abweichungen in z-Richtung sind in Abbildung 19 dargestellt.

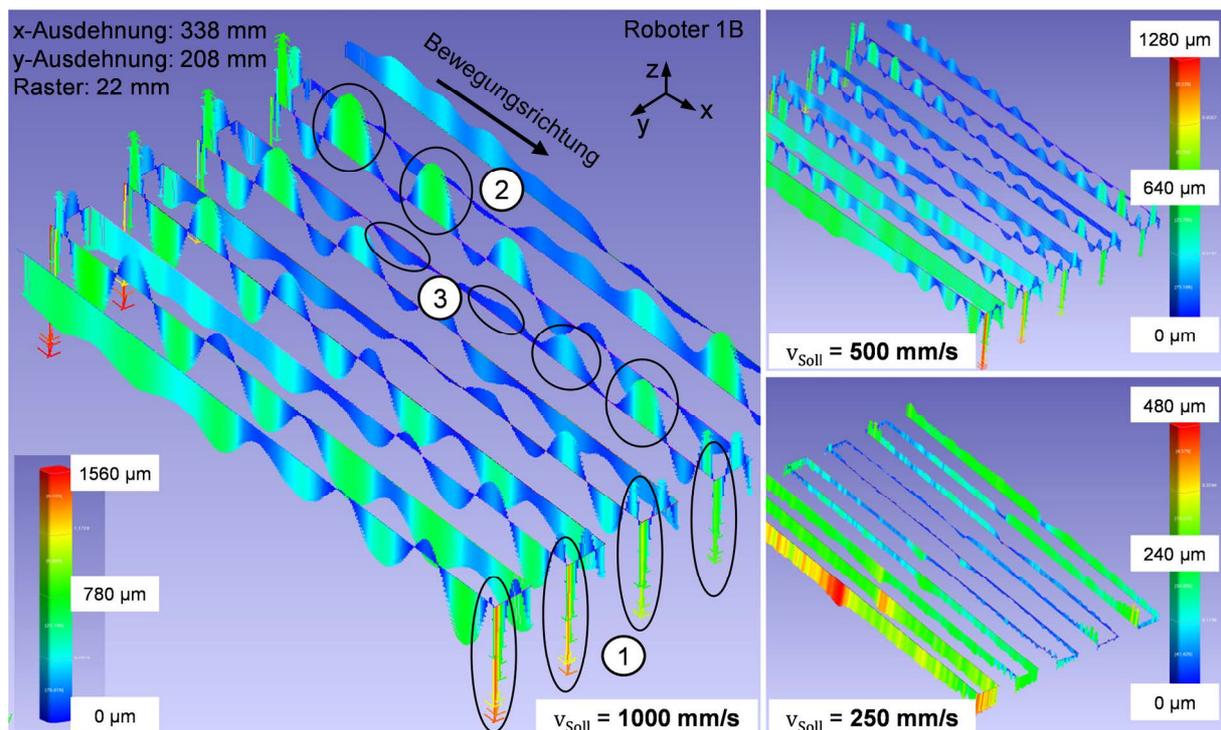


Abbildung 19: Dynamikabhängiges Bahngenaugkeitsverhalten

Abhängig von der Geschwindigkeitsvorgabe wurden folgende Kennwerte erfasst:

$$v_{\text{Soll}} = 250 \text{ mm/s: } \Delta_{z_{\text{max}_250}} = 480 \text{ } \mu\text{m}, \quad \bar{x}_{z_250} = 160 \text{ } \mu\text{m}, \quad \sigma_{z_250} = 110 \text{ } \mu\text{m}$$

$$v_{\text{Soll}} = 500 \text{ mm/s: } \Delta_{z_{\text{max}_500}} = 1280 \text{ } \mu\text{m}, \quad \bar{x}_{z_500} = 230 \text{ } \mu\text{m}, \quad \sigma_{z_500} = 160 \text{ } \mu\text{m}$$

$$v_{\text{Soll}} = 1000 \text{ mm/s: } \Delta_{z_{\text{max}_1000}} = 1560 \text{ } \mu\text{m}, \quad \bar{x}_{z_1000} = 260 \text{ } \mu\text{m}, \quad \sigma_{z_1000} = 190 \text{ } \mu\text{m}$$

Markant ist die Zunahme der maximalen Abweichung $\Delta_{z_{\text{max}}}$ abhängig von der Geschwindigkeitsvorgabe v_{Soll} . Die Abweichungsspitzen treten maßgeblich in den Bahnbereichen auf, in denen eine Phase der Beschleunigung eine Phase ausgeprägter Verzögerung folgt (1). Abhängig vom Abstand des Bahnsegments zum Robotersockel nimmt dieser Effekt zu. Dass es sich hierbei um vereinzelte Abweichungsspitzen handelt, zeigen nicht nur die Visualisierungen sondern ebenfalls die arithmetischen Abweichungsmittelwerte \bar{x}_z , welche deutlich weniger stark ausgeprägt ansteigen. Dessen ungeachtet steigt die mittlere Abweichung \bar{x}_z sowie die Standardabweichung σ_z der Messwerte mit zunehmender Geschwindigkeitsvorgabe an. Deutlich erkennbar ist zudem das interpolationstaktabhängige, interne Regelverhalten (2), welches bei höheren Geschwindigkeitsvorgaben sowohl eine zunehmende Amplitude als auch Wellenlänge der Schwingungen bedingt. Weiterhin ersichtlich ist eine tendenzielle Verbesserung der Bahngenauigkeit bei zunehmendem Bewegungsfortschritt entlang der längeren Bahnflanken (3).

3.3.6 Geschwindigkeitsverhalten

Vorhergehende Analysen zeigen, dass Bahnsegmente mit unstetigen Verläufen hinsichtlich der erreichbaren geometrischen Bahntreue kritisch zu betrachten sind. Mit einzubeziehen ist in diesem Zusammenhang ebenfalls die Einhaltung der vorgegebenen Geschwindigkeit v_{Soll} . Abbildung 20 zeigt die Geschwindigkeitsverläufe bei variierenden Geschwindigkeitsvorgaben v_{Soll} bei Bahnen mit ausgeprägten Eckbereichen.

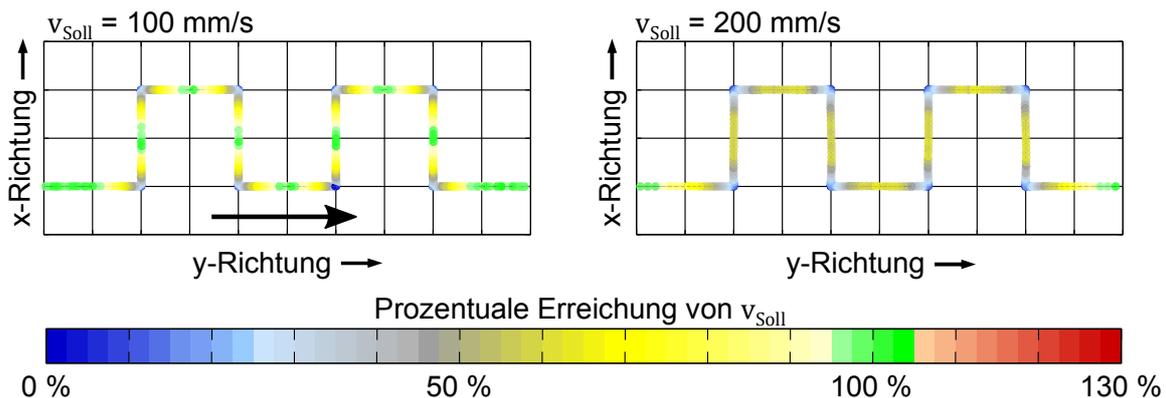


Abbildung 20: Geschwindigkeitsverhalten

Aus den Geschwindigkeitsprofilen sind das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten ableitbar, welche sich vor und nach einer Ecke/Unstetigkeit umgekehrt symmetrisch zueinander verhalten. Während die Geschwindigkeit bei einem Vorgabewert von 100 mm/s auf geraden Teilstrecken noch in kurzen Abschnitten zu

erreichen ist, kann dies der Manipulator bei einem Zielwert von 200 mm/s nicht mehr leisten. Eine Möglichkeit Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten des Roboters zu nehmen, ist ein Abschalten des roboterinternen Bewegungsfilters. Final lösbar ist die Problemstellung durch dieses Vorgehen jedoch nicht, da der Bewegungsfiler als Schutzmechanismus verstanden werden kann, der eine Beschädigung der Kinematik durch nicht einhaltbare Vorgaben verhindert. Unkritisch sind dahingegen stetige Bahnverläufe mit geraden Abschnitten oder sanften Richtungswechseln in denen die Problematik der Absolutgenauigkeit zwar noch immer Bestand hat, die Geschwindigkeitsvorgaben aber eingehalten werden können.

Zusammenfassend legen die Untersuchungsergebnisse der vorhergehenden Abschnitte 3.3.4 bis 3.3.6 nahe, bei genauigkeitskritischen Prozessen ausgeprägte Ecken/Unstetigkeiten in der Prozess- und damit einhergehenden Bewegungsbahn durch fertigungsgerechte Vorgaben zu vermeiden oder deren negative Auswirkungen auf das Genauigkeits- und Geschwindigkeitsverhalten über eine geeignete Bewegungsbahnplanung zu verringern.

3.3.7 Konfigurationsabhängiges Genauigkeitsverhalten

Aufgrund des individuellen Beitrags der in Abschnitt 2.2.4 diskutierten Einflussgrößen zu einer resultierenden Gesamtgenauigkeit ist zu erwarten, dass ebenfalls sich ändernde Konstellationen der Roboterelkenke und Armsegmente zueinander das Genauigkeitsverhalten beeinflussen. Weitere Analysen umfassen eine Untersuchung der Roboterbewegungsgenauigkeit abhängig von der gewählten Roboterkonfiguration. Die Ergebnisse bezogen auf die z-Achse des getesteten Systems zeigt Abbildung 21.

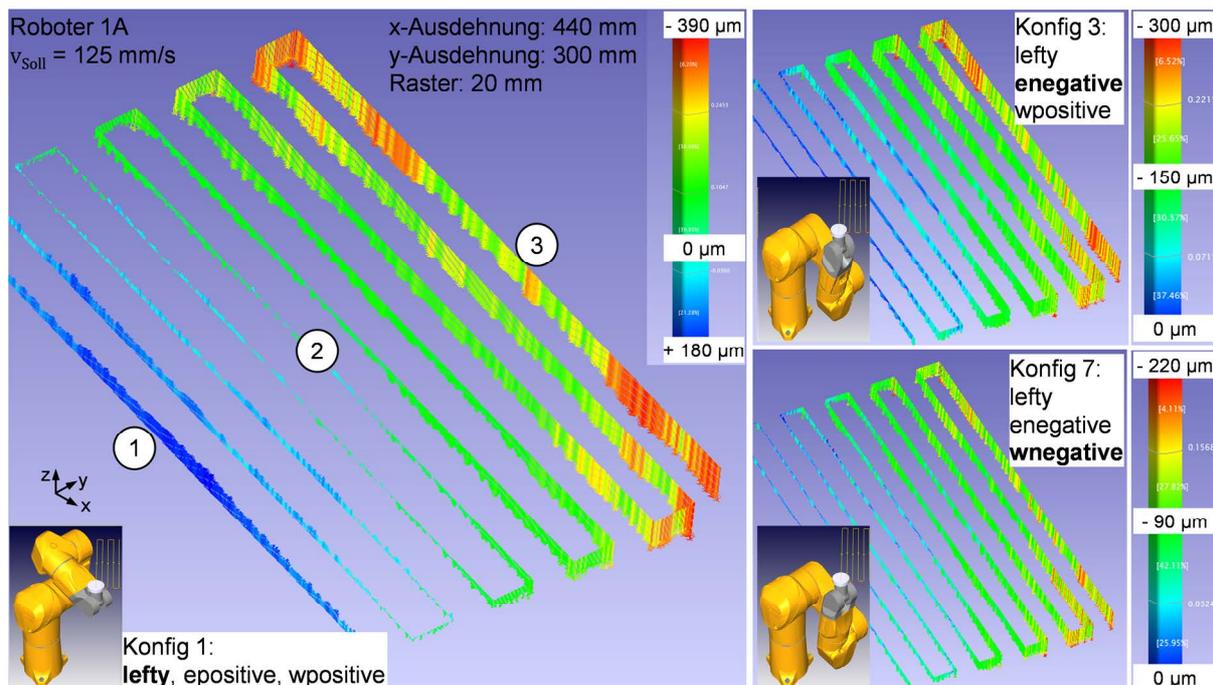


Abbildung 21: Konfigurationsabhängiges Genauigkeitsverhalten (e: elbow w: wrist)

Entsprechend der in Abschnitt 3.3.3 untersuchten Kinematik 1C zeigt Kinematik 1A einen Trend in negativer z-Richtung mit zunehmendem Verfahrabstand zur Roboterbasis, wobei die Abweichung bezüglich des Betrags aufgrund der Größe des getesteten Systems weniger stark ausgeprägt ist. Abweichend von Kinematik 1C, welche am nächsten zur Roboterbasis lokalisierten Bahnsegment keine Bahnabweichung in z-Richtung aufweist, zeigt Kinematik 1A in diesem Bereich bei Konfiguration 1 eine Abweichung von 180 μm in positiver z-Richtung (1). Abhängig vom Verfahrabstand reduziert sich diese Abweichung sukzessive (2) bis zu einer maximalen Abweichung in negativer z-Richtung von $\Delta_{z\text{max}_K1} = -390 \mu\text{m}$ (3). Bei der untersuchten Bewegungsbahn resultiert dies in einer Spreizung der Abweichungsspanne von 590 μm . Im Gegensatz hierzu zeigen die untersuchten Konfigurationen 3 und 7 eine deutlich geringere maximale z-Abweichung und zugleich Spreizung der Werte von $\Delta_{z\text{max}_K3} = -300 \mu\text{m}$ respektive $\Delta_{z\text{max}_K7} = -220 \mu\text{m}$. Der quantitativ betrachtet nur geringe Abweichungsunterschied der Konfigurationen 3 und 7 ist in dem nur untergeordneten Einfluss der Handgelenkskonfigurationen wpositive/wnegative begründet, da vorhandene Längentoleranzen der Roboterglieder vier bis sechs in vergleichbarer Weise in die z-Abweichungen eingehen.

3.4 Zusammenfassung und Handlungsbedarfe

Während die Wiederholgenauigkeit zentraler Bestandteil von Roboterdatenblättern ist, wird die Absolutgenauigkeit von den Herstellern zumeist nicht angegeben. Einigen Arbeiten aus dem wissenschaftlichen Bereich können zwar Werte für die Absolutgenauigkeit entnommen werden. Deren Datenquellen bleiben jedoch oftmals unklar oder die Untersuchungen beziehen sich auf statische Einzelpunktmessungen.

Die Auswertungen der durchgeführten eigenen Genauigkeitsuntersuchungen zeigen deutlich, dass das Robotergenauigkeitsverhalten maßgeblich von der Bewegungsaufgabe abhängt und dabei signifikante Variationen aufweist. Dies umfasst bereits für die untersuchten kleinskaligen Knickarmroboter maximale Abweichungen der tatsächlich abgefahrenen Trajektorien zu den Planungsdaten von bis zu 1,94 mm (Roboter 1C). Dieser maximale Wert übertrifft die im Datenblatt angegebene Wiederholgenauigkeit von 0,03 mm um das 60-fache. Wird dieses Verhältnis an den im Stand der Technik und Forschung angegebenen Werten gespiegelt, sind die dort aufgeführten Absolutgenauigkeiten deutlich jenseits 10 mm bei Industrierobotern mit hohen Nenntaglasten als realistisch anzusehen. Die ausgeprägte Spanne und Spreizung der erfassten Werte unterstreicht in diesem Zusammenhang die nur geringe Aussagekraft eines Einzelwertes zur Angabe der Absolutgenauigkeit von Industrierobotern gemäß der relevanten Normen.

Dabei ist bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu berücksichtigen, dass bei der entwickelten Methode zur Erfassung der Roboterbasiskoordinatensysteme Montage- und Fertigungsgenauigkeiten des Roboters bereits teilweise

kompensiert werden. Dies ist dadurch bedingt, dass durch die Einmessung die realen Lagen und Ausrichtungen der Achsen 1 und 2 erfasst werden und anhand dessen das Roboterbasiskoordinatensystem definiert wird, auf welches sich die Ist- und Soll-Daten beziehen. Bezogen auf die dargestellten Messauswertungen hat dies die Auswirkung, dass die Ausprägungen der erläuterten Bahnen korrekt sind, darüber hinaus aber noch von weiteren systematischen Verschiebungen und Verdrehungen im Raum ausgegangen werden muss. Im Hinblick auf eine prinzipbedingt nur unzuverlässige Ermittelbarkeit des Roboterbasiskoordinatensystems anhand antastbarer Roboterkomponenten, ist die vorgestellte Methode jedoch als praktikabelste anzusehen. Dies ist auch im Kontext dessen richtig, dass dem Stand der Forschung und Technik Betrachtungen bezüglich der Messzuverlässigkeit nicht entnommen werden können, was die Aussagekraft bekannter Untersuchungen einschränkt.

Dabei sind die dargestellten Untersuchungsergebnisse auf die Offenlegung abweichungsverursachender Mechanismen bedacht, repräsentieren kritisch betrachtet jedoch lediglich eine Auswahl augenscheinlicher und häufig auftretender Fälle. Weitere Faktoren wie z. B. Lasten, Kräfte und Momente; variierende Umgebungs- und Betriebstemperaturen sowie zeitabhängiger Verschleiß beeinflussen die Roboter Genauigkeit zusätzlich. In Kombination mit sämtlichen beliebig im Raum lokalisierten und ausgeprägten Bewegungsbahnen sowie dynamischen Einstellparametern ergibt sich eine schier unendliche Zahl von Bewegungs- und Arbeitssituationen. Diese Vielzahl sich gegenseitig und die Genauigkeit beeinflussender Faktoren unterstreicht umso mehr die Notwendigkeit zur Bereitstellung situationsangepasster und dynamischer Methoden zur Steigerung der Roboter Genauigkeit.

In Gesamtzusammenschau der vorgestellten Absolutgenauigkeitsanalysen erscheint es jedoch zweckmäßig, bereits durch eine geeignete Bahnerstellung in der Planungsphase positiven Einfluss auf das Genauigkeitsverhalten bei der späteren Bewegungsausführung zu nehmen. Zu beachtende Aspekte unter Berücksichtigung der Untersuchungsergebnisse sind hierbei insbesondere:

1. Aufgabenadäquate Roboterwahl unter Berücksichtigung einer zunehmenden Absolut(un)genauigkeit mit ansteigender Roboterbaugröße.
2. Vorzugsarbeitsraum in einem mittleren Abstandsbereich relativ zum Roboterbasiskoordinatensystem bezüglich der maximalen Reichweite des Roboters anordnen.
3. Die Hauptausdehnung der Prozessbahn quer zur vertikalen Hauptachse des Roboterbasiskoordinatensystems wählen.
4. Drehrichtungsänderungen von Roboterachsen in genauigkeitsrelevanten Bahnabschnitten vermeiden.

5. Berücksichtigung einer tendenziell höheren Roboterungenaugkeit in vertikaler (z-)Richtung im Vergleich zur horizontalen (x-y-)Ebene.
6. Nutzung von möglichst geringen Bewegungsgeschwindigkeiten der Roboterhandwurzel in genauigkeitsrelevanten Bahnabschnitten.
7. Vermeidung von Unstetigkeiten, welche abrupte Umorientierungen oder Bewegungsrichtungsänderungen der Roboterhandwurzel erforderlich machen.
8. Berücksichtigung von Geschwindigkeitsvariationen der Roboterhandwurzel in Unstetigkeitsbereichen.
9. Berücksichtigung von Abweichungen des tatsächlichen Roboterüberschleifverhaltens bezüglich vorgegebener Werte.
10. Betrachtung des Steifigkeitsverhaltens des Roboters bei unterschiedlichen Konfigurationen und den damit einhergehenden Einfluss auf die Bahngenaugkeit.

Aufgrund eventueller applikationsabhängiger Randbedingungen ist es jedoch nur eingeschränkt möglich allen genannten Aspektes gerecht zu werden. Dementsprechend ist es sinnvoll, zusätzlich zu einer optimalen Bahnplanung unter Berücksichtigung applikationsspezifischer Restriktionen, auch bei der Aufgabenausführung dynamisch Einfluss auf die Roboter Genauigkeit zu nehmen. Dabei steigt aufgrund der ausgeprägten Genauigkeitsabnahme mit zunehmender Robotergröße (Abschnitt 3.1) der positive Effekt genauigkeitssteigernder Maßnahmen bei größeren Robotern an. Relevante Arbeiten aus Stand der Technik und Forschung, welche diese Aufgabenstellungen adressieren, werden in den Folgeabschnitten vorgestellt und diskutiert.

4 Stand der Technik und Forschung im Bereich der Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern

Bekannte Ansätze, welche die Aufgabenstellung der Robotergenauigkeitssteigerung adressieren, kommen aus den Bereichen der mechanischen Roboter versteifung, Roboterkalibrierung und der Führung der Roboterbewegung über zusätzliche Sensorsysteme. Weiterführend ist auch die Bereitstellung geeigneter Robotersteuerungsprogramme von zentraler Bedeutung, um Bewegungsvorgaben zu vermeiden, welche dynamische Effekte mit negativen Auswirkungen auf die Genauigkeit bedingen. Dahingehend werden in Abschnitt 4.1 die bekannten Ansätze zur angepassten Bahnplanung und Roboterprogrammgenerierung im Bereich dreidimensionaler Bearbeitungsaufgaben diskutiert. Als oft genutzte Herangehensweise zur Genauigkeitssteigerung werden in Abschnitt 4.2 Kalibrierverfahren erörtert und als alternative Herangehensweise in Abschnitt 4.3 die signifikanten Arbeiten im Bereich der sensorbasierten Roboterführung vorgestellt. Eine Zusammenfassung und Darstellung der Handlungsbedarfe in Abschnitt 4.4 rundet das Kapitel ab.

4.1 Angepasste Bahnplanung und Roboterprogrammgenerierung im Bereich dreidimensionaler Bearbeitungsaufgaben

Der Anstieg der Aufgabenkomplexität, mit welcher Industrieroboter konfrontiert sind, in Kombination mit variablen Produktionsbedingungen, erfordern die Bereitstellung geeigneter Methoden und Werkzeuge, um eine effiziente Roboterprogrammierung zu ermöglichen. Aufgrund der deutlichen Vorteile, insbesondere im Hinblick auf zeitlichen Aufwand und Vermeidung von Anlagenstillstandszeiten, sind in diesem Zusammenhang eine Offline-Roboterprogrammgenerierung und Bahnplanung unterstützt durch leistungsfähige Softwaretools von hoher Bedeutung. Abhängig von der jeweiligen Arbeitsaufgabe liegt der Fokus bei diesen Tools auf einer Repräsentation komplexer Produktionsanlagen mit einer Vielzahl von Robotern oder im Bereich der Roboterprogrammierung spezifischer Bearbeitungsaufgaben, oft auch mit einer parallelen Simulation des Bearbeitungsergebnisses [80]. Nicht berücksichtigt wird jedoch derzeit bei der Erstellung von Roboterbewegungsprogrammen und der damit verbundenen Bahnplanung das dynamische Verhalten der Kinematik zur Bearbeitungslaufzeit [33]. Im Vordergrund steht vielmehr die Bearbeitungsaufgabe, aus der sich kausal die notwendige Roboterbahn und damit auch das Roboterbewegungsverhalten ableiten.

4.1.1 Prozess- und werkstückbezogene Bahnplanung

Ein Großteil der bekannten Methoden und Werkzeuge aus Forschung und Anwendung im Bereich der Bahnplanung robotergestützter Bearbeitungsaufgaben setzen den Schwerpunkt auf die Auslegung einer optimalen Prozesswerkzeugbahn

relativ zum Werkobjekt, wobei die Prozessbahn in erster Instanz unabhängig von der zugehörigen Robotertrajektorie betrachtet wird.

Ausgangspunkt für die Planungen ist eine aus den Konstruktionsdaten zumeist verfügbare dreidimensionale CAD-Repräsentation des zu bearbeitenden Werkobjekts [80]. Zusätzlich stehen unterschiedliche Modelle für eine digitale Prozessnachbildung zur Verfügung, z. B. zur realitätsnahen Darstellung von Lackier- oder Beschichtungsprozessen [81]. Basierend auf diesen Informationen in Zusammenschau mit Daten der Fertigungsaufgabe, werden Werkzeugbewegungsbahnen relativ zum Werkobjekt erstellt und deren Einfluss auf das Arbeitsergebnis untersucht. Intensiv wurde dahingehend z. B. der Einfluss von Raster- und Spiralbahnen [82], kombinierten Rasterbahnen [83] oder auch zick-zack-förmigen Prozessbahnen [84] auf das Bearbeitungsergebnis analysiert. Bevorzugt erfolgt die relative Bahnbewegung dabei mit überlappenden Bahnsegmenten und einem möglichst orthogonalen Anstellwinkel der Werkzeughauptachse bezüglich der Bearbeitungsflächen.

Aber nicht nur die Werkzeugbahnplanung roboterbasierter Beschichtungsprozesse steht im Fokus von Wissenschaft und Forschung. Auch Anwendungen aus dem Bereich des Non-Destructive Testings (NDT) großflächiger Leichtbauwerkstücke erfordern eine exakte dreidimensionale Führung des Inspektionswerkzeugs relativ zu komplex geformten Oberflächen und bedarf damit einhergehend geeigneter Methoden zur Planung der Bewegungsbahn [85]. Von großem Interesse ist auch die Werkzeugbahnplanung roboterbasierter Fräsprozesse, da in diesem Bereich eine sehr hohe Anzahl von Prozessbahnpunkten auftritt und verwaltet werden muss. Herausfordernd ist ebenfalls eine geeignete digitale Repräsentation des Halbzeugs, aus welchem das Werkstück durch den abtragenden Fräsprozess gefertigt wird. [86]

Die genannten Methoden und Lösungsansätze werden in verschiedenen kommerziell verfügbaren Softwareprodukten eingesetzt, welche den Planer mit einer realitätsnahen Darstellung des Bearbeitungsergebnisses in Zusammenspiel mit der Werkzeugbewegungsbahn unterstützen. Bekannte Tools mit einer Spezialisierung auf dreidimensionale Bearbeitungsaufgaben sind z. B. Robotmaster [87], Famos Robotics [88], Delcam PowerMill [89], Fastsurf [90] und Robotstudio [91]. Zusätzlich zu den in Kinematik-Simulationstools üblichen Funktionsumfängen wie Kollisions- und Zugänglichkeitsanalysen, ermöglichen diese Tools ebenfalls eine Evaluierung des Einflusses prozessspezifischer Randbedingungen, wie Prozessgeschwindigkeit, Werkzeuganstellwinkel und Werkzeugabstand [81].

Die Festlegung der genannten Prozessbahnparameter zum Erhalt des optimalen Bearbeitungsergebnisses bedingen direkt die notwendige Robotertrajektorie zur Erfüllung der Prozessaufgabe, woraus dann im Weiteren das Bewegungsverhalten der Kinematik im Hinblick auf Achswinkel, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen resultiert. In der Praxis wird auf das Bewegungsverhalten im

Wesentlichen durch eine geeignete Positionierung des Roboters relativ zum Werkobjekt Einfluss genommen. Hierdurch wird die Zugänglichkeit sämtlicher Prozessflächen gewährleistet, vereinzelt aber auch Einfluss auf die Achsgeschwindigkeiten genommen [92].

4.1.2 Kinematik- und dynamikbezogene Bahnplanung

Während die beschriebenen Eigenschaften der genannten Methoden und Softwaretools eine enorme Erleichterung für die Bahnplanung und Roboterprogrammgenerierung darstellen, fehlt ihnen die Möglichkeit einer geeigneten Darstellung und Berücksichtigung dynamischer Effekte des Roboters während der Bewegungsausführung. Auch Chen bemängelt in [33] die derzeit nur unzureichende Verfügbarkeit von Ansätzen, welche diesen Aspekt bei der Bahnplanung dreidimensionaler Bearbeitungsaufgaben mit einbeziehen. Eine begrenzte Anzahl von Arbeiten ist jedoch bekannt, welche spezifische Themen prozessinduzierter dreidimensionaler Roboterbewegungen adressieren.

So wird in [93] die Verschlechterung der Roboter Genauigkeit und damit einhergehend des Bearbeitungsergebnisses aufgrund von Werkzeugverdrängungen bei dreidimensionalen Fräsbearbeitungsaufgaben diskutiert. Um die auftretenden Effekte quantitativ zu beschreiben, wird die Kopplung eines Prozess- und Robotermodells vorgeschlagen, anhand derer die zur Bearbeitungslaufzeit auftretende Verdrängung abgeschätzt wird. Diese vorab ermittelte Information kann verwendet werden, um eine korrigierte Roboterbewegungsbahn zu erstellen, welche den zur tatsächlichen Bearbeitungslaufzeit auftretenden Fehler bereits beinhaltet und kompensiert. Durch diese Vorgehensweise wird die Roboter Genauigkeit bei der Durchführung der Prozessaufgabe mit einem positiven Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis erhöht.

Weitere Arbeiten nutzen polynomische Splines für eine Optimierung und Glättung der Bewegung im Roboterachsraum [94], [95], [96]. Oftmals verwendet werden L2-Splines¹, deren Verlauf aber häufig die Ausprägung der zu optimierenden Bahn nur unzureichend nachbildet [97]. Entsprechend werden splinebasierte Anpassungen zumeist eingesetzt, wenn die tatsächliche Bahn nur von geringer Relevanz ist, z. B. bei punktorientierten Arbeitsaufgaben. Deutlich genauer repräsentieren kubische L1-Splines die ursprüngliche Kurvenausprägung.

¹ L1-Spline: Eindimensionaler kubischer Spline; L2-Spline: Höherwertiger polynomischer Spline

Abbildung 22 visualisiert den Verlauf eines L1-Splines im Vergleich zu einem L2-Spline bei gleichen Via-Punkten und zeigt den deutlichen Unterschied hinsichtlich der Kurvenverläufe

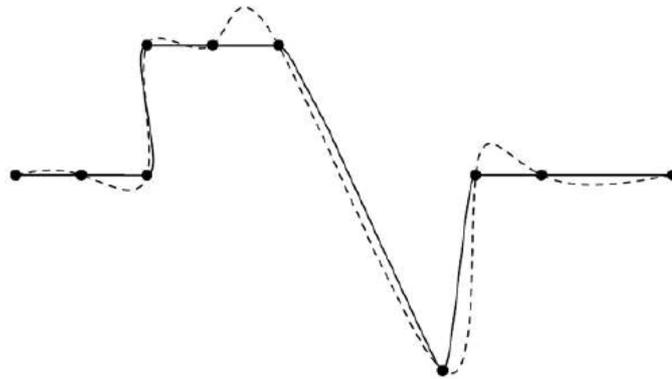


Abbildung 22: L1-Spline (Linie durchgezogen) vs. L2-Spline (Linie gepunktet) [97]

In [97] findet sich ein Ansatz, der eine Optimierung der Bearbeitungsgeschwindigkeit unter Nutzung von L1-Splines ermöglicht, wobei diese Optimierung mit einer Reduzierung der Roboterachs-Parameter Beschleunigung und Ruck einhergeht. Deutliche Abweichungen der optimierten Bewegungsbahn von der geplanten Bahn treten jedoch auch bei diesem geschwindigkeitsoptimierten Ansatz auf. Aus diesem Grund wird eine Verbesserung der Positionierungsgenauigkeit von Olabi als Handlungsbedarf aufgeführt. Auch die in [98] ermittelten Simulationsergebnisse, welche aus einer Bahnoptimierung unter Nutzung eines Polynoms siebter Ordnung resultieren, zeigen ein kontinuierliches Bewegungsverhalten des Endeffektors in Hinblick auf Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck. Nicht im Fokus der Untersuchungen steht jedoch das Erreichen einer hohen Bahngenauigkeit.

Der Artikel [99] stellt ebenfalls die ungenaue Bewegungsausführung splineoptimierter Bahnen im kartesischen Raum als wesentlichen Nachteil dieses Optimierungsansatzes heraus. Vorgeschlagen wird eine Optimierung mit einer Aufteilung des Arbeitsraums in je eine positions- und orientierungsbezogene Riemannsche Metrik. Der erklärte Fokus liegt bei dem vorgestellten Ansatz auf linearen Bewegungen. Hierfür zeigen die Simulationsergebnisse kontinuierliche Bewegungscharakteristiken der Achsen in Hinblick auf Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck.

Während die Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten, die sich mit der Bahnplanung hochgenauer Trajektorien auseinandersetzen, bereits sehr begrenzt ist, sind derzeit noch deutlich weniger praktische Anwendungen bekannt, welche bei der Planung optimierter Robotertrajektorien unter Berücksichtigung dynamischer Effekte unterstützen. Ein kommerziell verfügbares Werkzeug ist das „Thermal Spraying Toolkit“, welches als Add-in des proprietären ABB Roboter-Kinematik-Simulationstools „Robotstudio“ vertrieben wird [100] [101]. Als Erweiterungsmodul mit Fokussierung auf Heiß- und Kaltspritzprozesse erlaubt der Funktionsumfang eine

Abschätzung des Beschichtungsprofils abhängig von den Prozessparametern Werkzeugabstand, -geschwindigkeit, und -bahnausprägung. Abbildung 23 zeigt eine mit dem Thermal Spraying Toolkit angestellte Untersuchung bezüglich des erwarteten Beschichtungsprofils bei sich überlagernden, benachbarten Beschichtungsdurchläufen.

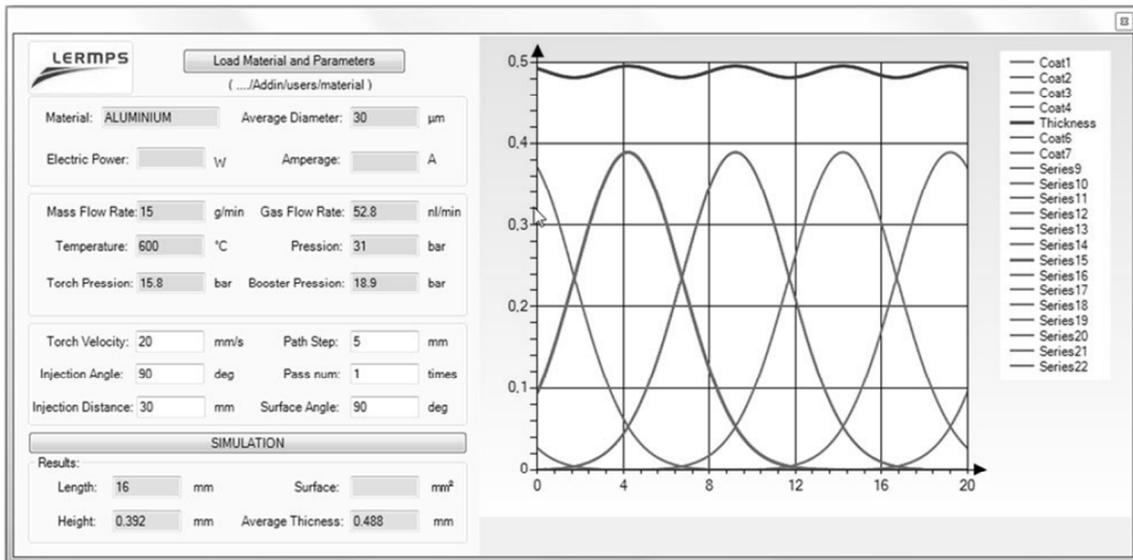


Abbildung 23: Simulation Beschichtungsprofil [102]

Als besonders prozessrelevant wird bei den betrachteten Spritzprozessen eine konstante Relativgeschwindigkeit von Werkzeug zu Werkstück angesehen. Um dies zu gewährleisten, bietet das „Thermal Spraying Toolkit“ Methoden für eine dahingehende Anpassung der Robotertrajektorie. Betrachtet werden abgerundete Werkstückbereiche, welche bei der Bearbeitung Umorientierungen des Roboters und damit einhergehende Geschwindigkeitsvariationen bedingen. Um dies zu vermeiden, wird eine sukzessive Anstellwinkelanpassung des Werkzeugs relativ zum Werkstück vorgeschlagen, wobei besonders bei ausgeprägten Kreisbögen aufgrund des Optimierungsprinzips zwangsläufig sehr flache Anstellwinkel auftreten mit einem entsprechenden Einfluss auf das Prozessergebnis [102]. Eine gleichmäßigere Bearbeitungsgeschwindigkeit wird durch die Anpassungen zwar erreicht, es können jedoch Bearbeitungswinkel zwischen Werkzeug und Werkstück auftreten, die in einer Verschlechterung des Prozessergebnisses resultieren.

Jenseits der dargestellten Arbeiten sind derzeit keine prägnanten Ansätze bekannt, welche eine angepasste Roboterprogrammgenerierung und Bahnplanung unter Berücksichtigung des realen dynamischen Roboterhaltens adressieren.

4.2 Genauigkeitssteigerung durch Kalibrierung

Der überwiegende Teil der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern kann der Kalibrierung zugeordnet

werden. Zentraler Gegenstand dieser Verfahrensklasse ist die Behandlung des Unterschiedes zwischen realem Roboter und nominalen Robotermodell. Vorgehensweisen sind dabei entweder eine Anpassung des in der Robotersteuerung hinterlegten Robotermodells, so dass dieses dem realen Roboter möglichst gleicht, oder alternativ eine Veränderung des Roboterprogramms, um den Unterschied zwischen Simulationsmodell und Roboter zu reduzieren [103]. Während die erste Variante maßgeblich Roboterherstellern vorbehalten ist, kann zweite Herangehensweise auch von Anwendern eingesetzt werden, da kein tiefgreifender Zugriff auf Robotersteuerungsebene notwendig ist. Aufgrund der Vielzahl von Arbeiten, welche die unterschiedlichen Aspekte und Methoden der Industrieroboterkalibrierung intensiv beleuchten, kann dieser Bereich zumindest bezüglich Knickarmrobotern als intensiv erforscht angesehen werden.

4.2.1 Kalibrierung der Einzelachsen

Die Kalibrierung der Einzelachsen umfasst eine selektive Betrachtung und Vermessung der Roboterachsen. Bei diesem Verfahren werden die Achsen nacheinander bewegt und vermessen. Bezüglich einer Knickarmroboterkinematik beschreibt die Bewegung des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems f_{TCP} somit jeweils einen Kreis(bogen). Aus dieser Information lässt sich für jede Achse eine Bewegungsebene sowie ein Koordinatensystem bestimmen. Durch eine Verknüpfung der erstellten Koordinatensysteme für jede Achse wird im Nachgang die Roboterstruktur nachgebildet. Dem geringen Aufwand dieser Methode stehen die Einschränkungen gegenüber, dass sie von der fehlerhaften Annahme entkoppelter Achsen ausgeht und zudem nur geometrische Fehler erfasst werden können [4], [6]. In diesem Kontext kann die in Abschnitt 3.2.3 vorgestellte Methode zur Einmessung der Roboterbasiskoordinatensysteme f_{Robot} auch als partielle Einzelachskalibrierung verstanden werden.

4.2.2 Datengestützte/numerische Kalibrierung

Eine alternative Herangehensweise ist das sequentielle Abfahren einzelner Punkte eines in eine Gitterstruktur zerlegten, dreidimensionalen Raumes, mit einer jeweiligen Messung der tatsächlich erreichten Position des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems f_{TCP} . Im Nachgang werden die erfassten Ist-Positionen mit den jeweils zugehörigen Soll-Positionen verglichen und eine Differenztafel erstellt, welche Korrekturwerte repräsentiert [104]. Wird diese Tabelle in der Robotersteuerung hinterlegt, erlaubt diese nicht nur die Fehlerkompensation der erfassten Positionen, sondern durch zusätzliche Interpolation auch von Zwischenpunkten. Diese Methode kann für kleine Bewegungsräume, aber auch eine eingeschränkte Anzahl von Bahnen eingesetzt werden [105].

Abbildung 24 zeigt beispielhaft die numerische Kalibrierung eines Knickarmroboters für einen begrenzten Arbeitsraum.

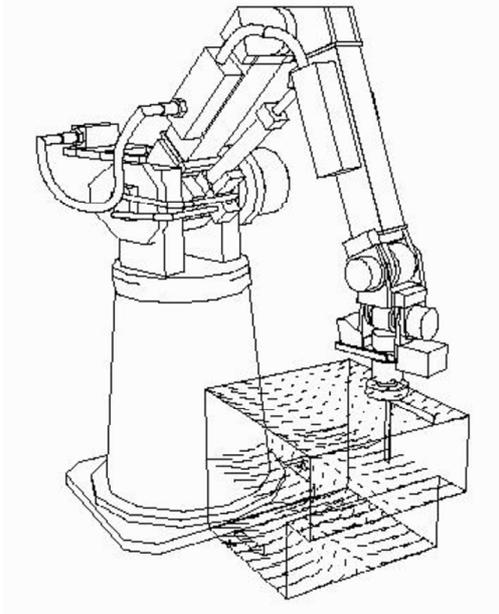


Abbildung 24: Numerische Kalibrierung [4]

Zentraler Vorteil der numerischen Kalibrierung ist, dass Fehler ausgeglichen werden, ohne dass eine gezielte Identifikation des Fehlerursprungs notwendig ist. Nachteilig ist jedoch, dass die erstellte Differenztafel lediglich für die Roboterkonstellation Gültigkeit besitzt, in welcher diese erfasst wurde. Bei einer Änderung, z. B. von Traglast, Konfiguration und Orientierung, verliert diese selbst in dem vermessenen Raum ihre Gültigkeit. Darüber hinaus ist diese Methode für einen kompletten Arbeitsraum eines Knickarmroboters weder in zeitlicher noch in wirtschaftlich, finanzieller Hinsicht darstellbar. In [5] ist in diesem Zusammenhang ein plakatives Berechnungsbeispiel dargestellt, welches beispielhaft den Zeitbedarf zur numerischen Kalibrierung eines kompletten Knickarmroboters auf 556 Stunden beziffert.

4.2.3 Geometrische/statische Kalibrierung

Die meistgenutzte Kalibrieremethode ist eine geometrische oder statische Kalibrierung durch Modellbildung. Eine geringe Auswahl besonders aussagekräftiger Werke, welche Varianten dieser Kalibrierart beschreiben, sind z. B. [4], [5], [6], [57], [58], [59], [60], [61] und [103]. Zunächst wird bei der statischen Kalibrierung in der Modellierungsphase ein parametrisiertes, kinematisches Modell des Roboters aufgestellt, das die wichtigsten Fehlereinflüsse als Parameter beinhaltet. Im Nachgang wird der Roboter an vordefinierte Positionen im Arbeitsraum verfahren und die Position und zumeist auch die Orientierung erfasst. Hierbei ist eine Vorgabe die Anregung aller zu beschreibender Fehlereinflüsse (siehe Abbildung 5 für eine Auflistung).

In Abbildung 25 ist eine Schar an Messpositionen als Ausgangspunkt zum Erhalt eines Fehlermodells eines Knickarmroboters dargestellt.



Abbildung 25: Messpositionen im Roboterarbeitsraum bei einer geometrischen Kalibrierung [106]

Bei der sich anschließenden Identifikation werden anhand der Messdaten die Fehlerparameter ermittelt. Hierbei kommen numerische Schätzverfahren zum Einsatz. Die Identifikation resultiert in einem Robotermodell, welches der Realität besser entspricht als jenes Modell, welches in der Robotersteuerung verwendet wird. Bei der schlussendlichen Kompensation werden mittels numerischer Berechnung der inversen Kinematik anhand des identifizierten Modells die erforderlichen Gelenkwinkel für eine gegebene Pose erneut berechnet. Somit lässt sich eine Annäherung der Ist-Position zur Soll-Position herbeiführen. Durch eine geeignete Modellierung können bei dieser Vorgehensweise eine Vielzahl von Fehlereinflüssen beschrieben und kompensiert werden, wie z. B. geometrische Fehler (Längenabweichungen, Winkel- und Nulllagefehler, Temperaturabweichungen etc.) und nicht-geometrische Fehler (Getriebeelastizitäten, Gelenkelastizitäten, Reibung, Umkehrspiel etc.).

Einschränkungen ergeben sich dadurch, dass für eine exakte Modellierung auch sensible Informationen bezüglich des Roboters notwendig sind, welche elementares Basiswissen des Herstellers bilden und somit zumeist nicht zur Verfügung stehen. Im einfachsten Fall umfasst dies z. B. bereits die Masse der einzelnen Gelenke sowie der Masseschwerpunkte, um die Gelenkelastizitäten modellieren zu können. Dementsprechend sind auch nach [5] die Hauptkritikpunkte derartiger Kalibrieremethoden ihre Unvollständigkeit und mangelnde Übertragbarkeit auf andere Systeme, da diese nur für einen spezifischen Robotertyp entwickelt werden. Problematisch zu bewerten ist ebenfalls der Einfluss zeitabhängiger Effekte, wie z. B. die Änderung des Genauigkeitsverhaltens aufgrund von Verschleiß, aber auch sich ändernde Einsatzbedingungen wie variable Lasten, sich ändernde Temperaturen und

aufgebrachte Kräfte. Diese sind entweder nicht nachbildbar oder erfordern aufwändige Nachkalibrierungen. Können jedoch die signifikanten Fehlerparameter ermittelt werden, ermöglicht die statische Kalibrierung eine Verbesserung der Absolutgenauigkeit in den Bereich weniger zehntel Millimeter hinein. [4], [5],

Auch im Rahmen der eigenen Forschungsarbeiten wurde für das getestete System 1C eine modellbasierte geometrische/statische Roboterkalibrieremethode entwickelt, in einem Softwaretool umgesetzt und dessen Wirksamkeit verifiziert. Dabei wurden 24 Fehlerparameter ermittelt und für 1000 Verifikationsposen die Genauigkeit deutlich gesteigert (kinematische L2-Kalibrierung). [48]

4.2.4 Dynamische Kalibrierung

Eine weiterführende Kalibrierungsmethode umfasst zusätzlich dynamische Effekte. Hierbei werden weitere Einflussfaktoren wie Systemdynamik, Gewicht, Trägheit und Reibung sowie auftretende Kräfte und Momente abhängig von der Verfahrensgeschwindigkeit mit berücksichtigt. Im Gegensatz zur statischen Kalibrierung, bei der lediglich eine Verringerung des Positionierfehlers beim Anfahren einzelner Raumpunkte mit anschließendem Stillstand erreicht wird, soll durch eine dynamische Kalibrierung die Bahngenauigkeit gesteigert werden. Dies erfordert jedoch eine aufwändige kinetische Modellbildung. Oftmals stehen die hierzu notwendigen Dynamikparameter jedoch nicht zur Verfügung und erfordern eine Schätzung derselben. [6]

Eine alternative Herangehensweise zur Steigerung der Roboter Genauigkeit ist eine Roboterführung unter Nutzung zusätzlicher Sensorsysteme. Im Vergleich zu den vorgestellten Kalibrieremethoden birgt diese Methode den Vorteil, dass die spezifischen Fehlerursachen oder Beschreibungsparameter, welche kumuliert in Abweichungen resultieren, nicht bekannt sein müssen, sondern vielmehr der schlussendliche Effekt dieser Einflüsse ausgeglichen wird: Die Abweichung.

4.3 Regelung der Roboterbewegung zur Prozesslaufzeit durch sensorbasierte Ist-Zustandserfassung

Ein wesentlicher Bestandteil von regelungsbasierten Verfahren zur Genauigkeitssteigerung ist ein Sensorsystem, unter dessen Zuhilfenahme die aktuelle Ist-Position zur Prozess- bzw. Bewegungslaufzeit erfasst wird. Durch einen zusätzlichen Regelkreis wird die sensorisch aufgenommene Ist-Position mit der zugehörigen Soll-Position verglichen, Nachstellgrößen berechnet und bei auftretenden Abweichungen die Roboterbewegung kompensatorisch nachgeregelt. Positionierungsfehler werden somit unabhängig von deren Herkunft ermittelt und unmittelbar ausgeglichen. Insbesondere aufgrund dieser vorteilhaften Eigenschaft wird die sensorbasierte Roboterregelung auch von Fachleuten aus dem Bereich der Kalibrierung unter technischen Gesichtspunkten als zuverlässigste bekannte Methode angesehen, um sämtliche Einflüsse auszugleichen und die geforderte Genauigkeit zu gewährleisten

[5], [7]. Die sensorbasierte Roboterführung unter Zuhilfenahme optischer Systeme oder „Visual Servoing“ steht dabei seit mehreren Jahrzehnten im Fokus wissenschaftlicher Bemühung und wird zumeist nach [107] und [108] in positionsbasierte und bildbasierte Verfahren eingeteilt. Alternativ ist auch eine Klassifizierung abhängig von Reglerstruktur (Endpoint Open-Loop vs. Endpoint Closed-Loop) oder Kamerakonfiguration (Eye-in-hand vs. Eye-to-hand) möglich. Detailliert werden die bekannten Verfahren in [8], [109], [110] und auch [12] vorgestellt.

Die nachfolgend gewählte Klassifizierung basiert auf dem verwendeten Sensorsystem, wobei sich das zu nutzende Sensorsystem in der Regel direkt aus den Anforderungen und Gegebenheiten der adressierten Applikation ergibt.

4.3.1 Lichtschnittverfahren

Ein großer Teil der bekannten sensorbasierten Regelungssysteme nutzt Lichtschnittverfahren zur Ermittlung des Ist-Zustandes. Hierbei wird über eine Laser- oder LED-Lichtquelle ein Lichtstreifen auf das Bauteil projiziert. Erfasst wird diese Projektion über ein Monokamerasystem. Die bekannte geometrische Relation der kalibrierten Lichtquelle und des kalibrierten Kamerasystems zueinander wird im Weiteren ausgenutzt, um die geometrische Ausprägung des erfassten Bildmerkmals zu ermitteln. Lichtschnittverfahren erlauben sowohl eine Erfassung der dreidimensionalen Position als auch eines Orientierungswinkels, erfordern aber eine räumliche Ausdehnung des zu detektierenden Merkmals. Aufgrund dieser Eigenschaften können Lichtschnittverfahren zur Erfassung dreidimensionaler Konturen eingesetzt werden, wobei diese zumeist ausgebildet sind als (Schweiß-)Nähte, Kanten oder auch gekrümmte Profile. Die jeweilige Kontur repräsentiert dabei den Prozesseingriffsort (ggf. auch mit einem Offset) und kann dementsprechend im übertragenen Sinne als Vorskizzen des Eingriffsortes verstanden werden. Diese Vorgaben ermöglichen eine relativ einfache Erfassung und Auswertung des Ist-Zustandes. Exemplarische Visual Servoing Systeme zur Nahtverfolgung zeigt Abbildung 26.

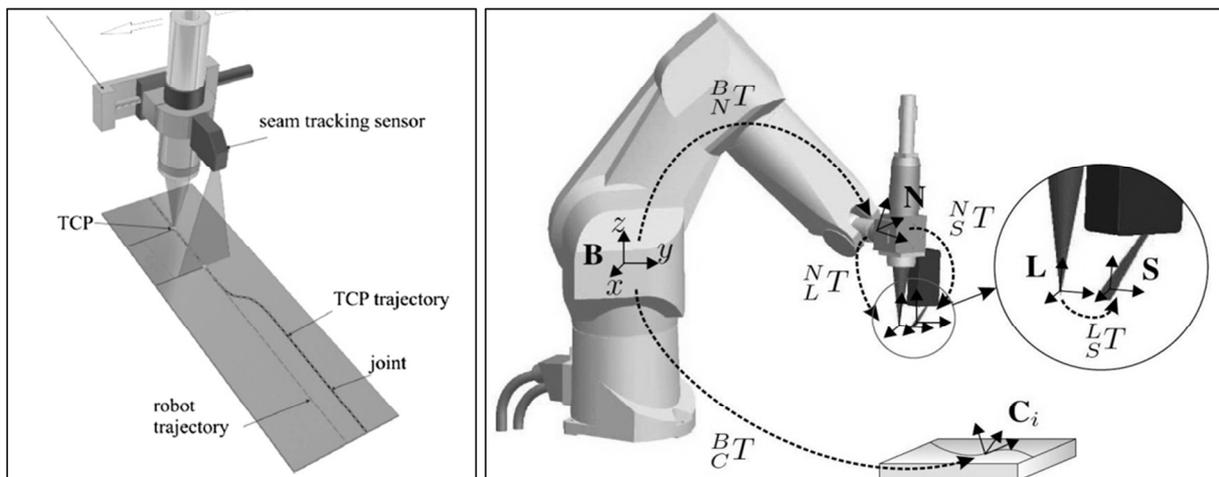


Abbildung 26: Visual Servoing Systeme zur Nahtverfolgung [11] links, [111] rechts

Die auf Lichtschnittsensoren basierenden Visual Servoing Verfahren sind Gegenstand einer Vielzahl von Arbeiten wie z. B. [10], [12], [112], [113], [114] und [111]. [111] und [10] beschreiben ein System zur Roboter-Sensor-Synchronisation für die Konturverfolgung der Nahtführung beim Roboter-Laserschweißen. Es wird eine Kontrollarchitektur vorgestellt, die den groben Bahnverlauf zu Grunde legt. Ein wesentlicher Beitrag der Arbeiten ist eine Synchronisation der Zeitachsen von Robotersteuerung und Sensor, welche über eine UDP-basierte Kommunikation realisiert wird, wobei die im Interpolationstakt erfasste Roboterposition als Auslöser der Ist-Zustandsaufnahme fungiert. Auch die relativ geringe Auflösung des verwendeten Kamerasensors von 0,12 Mpixel ermöglicht hierbei eine zeiteffiziente Ist-Zustandsermittlung von 5 ms. Die Einbindung des Systems auf einer hardwarenahen Roboterebene (Low-Level-Interface [115]) schränkt die Portierbarkeit der proprietären Architektur auf andere Systeme zwar ein, ermöglicht jedoch erreichbare Robotergerauigkeiten im Bereich von 100 μm bei Verfahrgeschwindigkeiten von 250 mm/s. Eine zentrale Eigenschaft des dargestellten Ansatzes ist ein dem eigentlichen Prozesseingriffsort vorausseilender Sensoraufbau, dessen Grundprinzip ebenfalls [12] entnommen werden kann. In den dort dargestellten Forschungsarbeiten wird die Bewegung eines Roboters zur bildgestützten Verfolgung einer beliebig geformten Kontur angepasst. Abhängig von der Vorlauflänge des triangulationsbasierten Sensorsystems besteht bei diesem Messprinzip ein Prädiktionshorizont, bei dem die Form der Kontur bereits vor einem Erreichen durch das Roboterhandwurzel-Koordinatensystem erfasst wird. Prädiktionshorizont bezeichnet hierbei das Zeitfenster, innerhalb dessen die Regelgröße ermittelt und optimiert werden kann, bevor der Roboter den zugehörigen Ort erreicht. Neben einer relativ einfachen geometrischen Erfassung der zukünftig anzufahrenden Bahnpunkte ermöglicht diese Herangehensweise durch die Wahl eines geeignet dimensionierten Prädiktionshorizonts zudem den Ausgleich von Zeitverzögerungen und Latenzen, welche aufgrund des Zeitbedarfs von Ist-Datenerfassung, -verarbeitung, Stellgrößenberechnung, Datenübertragung, Roboterbewegungsfiltreinstellungen etc. auftreten. Positionierungsgenauigkeiten werden bei dem dargestellten System bei leicht gekrümmten Bahnen und Verfahrgeschwindigkeiten von 600 mm/s mit maximal 1 mm angegeben. Implementiert wird das System auf einem konventionellen Desktop-PC mit einem nicht-echtzeitfähigen Windows-Betriebssystem und einer Roboteranbindung über eine Standard-Ethernet-Schnittstelle. Im Gegensatz zu den herkömmlichen, proprietären Ansätzen antizipiert diese Vorgehensweise zumindest eine Übertragbarkeit auch auf Roboter anderer Hersteller.

Aufwändiger gestaltet sich eine Ermittlung der Ist-Situation, wenn die zu erfassenden Merkmale keine räumliche Ausdehnung aufweisen, sondern sich vielmehr durch spezifische Texturen, Färbungen oder Intensitäten auszeichnen. Dies erfordert eine Merkmalsextrahierung anhand der Intensitätsbilder von Kamerasystemen.

4.3.2 Monokamerasysteme

Monokamerasysteme nutzen zur Umgebungserfassung zumeist einen flächigen, matrixförmig ausgebildeten Sensorchip, wobei die Pixelzeilen und -spalten bei der Bildaufnahme synchron beleuchtet und in einen entsprechenden Ladungszustand versetzt werden. Grundsätzlich ermöglicht die Verwendung einer einzelnen Kamera eine nur zweidimensionale Repräsentation des Ist-Zustandes, geometrisches Modellwissen des zu erfassenden Merkmals erlaubt jedoch zusätzliche Rückschlüsse auf die Pose des Merkmals. Aus verarbeitungstechnischen und speicherkapazitiven Gründen erfolgt eine Ist-Zustandserfassung zumeist über Grauwertbilder mit einer kameraabhängigen Bittiefe. Der dem jeweiligen Pixel zugeordnete Grauwert repräsentiert hierbei die Intensität des zugehörigen Erfassungspunktes in der Realität. Eine der Bildaufnahme nachgelagerte Datenverarbeitung dieser Intensitätslandkarte erlaubt die Extraktion der relevanten Merkmale.

In [116] wird ein verteiltes Datenverarbeitungssystem zur Bewegungsverfolgung unter Zuhilfenahme eines Monokamerasystems vorgestellt und verschiedene Roboterregelstrategien hinsichtlich deren Effizienz vergleichend beurteilt. Während die Roboterachsen auf Hardwareebene über ein eigens hierfür entwickeltes Linux-Betriebssystem angesteuert werden, erfolgt die Bildverarbeitung der 0,15 MPixel-Kamera mit einer Taktfrequenz von 120 fps auf einem separaten Desktop-PC. Eine bewegte, zweidimensionale Markerplatte dient hierbei als Trackingobjekt. Trackinggenauigkeiten in der Ebene besser 1 mm konnten experimentell für eine optimierte GPC-Regelstrategie (General-Predictive-Control) bei geringen Geschwindigkeiten von 50 mm/s festgestellt werden. Gangloff stellt in [117] ebenfalls ein System zur Nachführung eines Industrieroboters an einem 3D-Profil mit bekanntem Querschnitt unter Zuhilfenahme eines robotermontierten Monokamerasystems vor. Die Steuerungsstrategie beruht auf der Bestimmung der zum Querschnitt des Profils tangentialen Vektoren an der aktuellen Position. Auch in den dargestellten Untersuchungen wurde über eine GPC-basierte Regelung die beste Nachbildung des dynamischen Roboterhaltens festgestellt. Experimentell konnten bei geringen Verfahrgeschwindigkeiten von 10 mm/s und einer Kamerataktung von 20 ms maximale Abweichungen bis zu 2,9 mm in der Ebene und 0,35 mm in z-Richtung ermittelt werden, wobei die Fehler bei zunehmender Verfahrgeschwindigkeit deutlich ansteigen. Ausblickend wird in den Ausführungen eine wünschenswerte Erhöhung der Genauigkeit bei gleichzeitig höheren Taktfrequenzen der Ist-Zustandserfassung angeführt.

Die Einschränkung der erreichbaren hohen Genauigkeit auf geringe Robotergergeschwindigkeiten wird in [118] aufgegriffen und eine alternative Herangehensweise zur Konturverfolgung bei höheren Geschwindigkeiten unter Nutzung standardisierter Off-the-shelf-Komponenten erörtert. Als Referenz zur Ist-Zustandserfassung werden die Begrenzungslinien eines gebogenen Rohres genutzt. Durch eine prädiktive

Auswertung der Bildinformationen konnte bei Verfahrensgeschwindigkeiten von 700 mm/s ein maximaler Bahnfehler von 1 mm erreicht werden, wobei die Roboteransteuerung über eine Standard-Schnittstelle erfolgt. Abbildung 27 zeigt den von Lange genutzten Versuchsaufbau zur Konturverfolgung unterschiedlicher Objekte unter Nutzung eines robotermontierten Monokamerasystems.

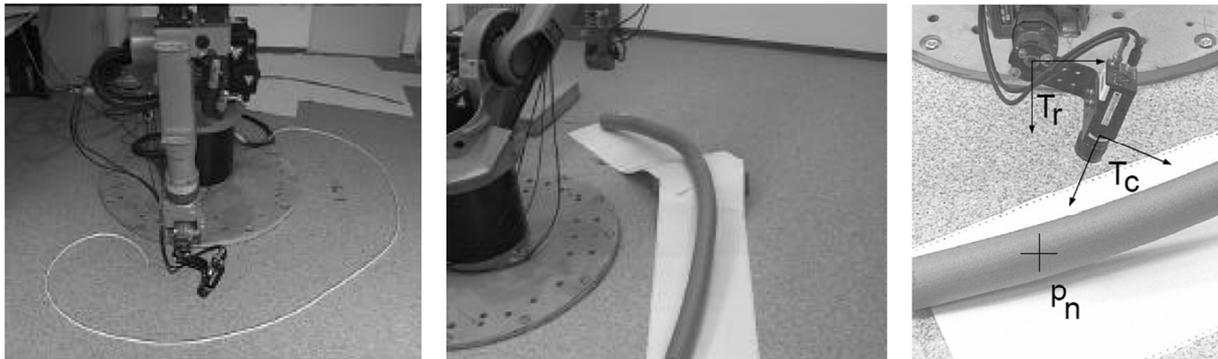


Abbildung 27: Roboterbasierte Konturverfolgung mittels Monokamerasystem [118]

Ausführlich erläutert werden die entwickelten Methoden und erzielten Ergebnisse auch in [9]. Verglichen mit einer konventionellen PD-Regelung lassen sich durch die Prädiktion, also einer Erfassung des zukünftigen Profilverlaufs und somit der erforderlichen Roboterbewegung, deutlich höhere Bewegungsgenauigkeiten realisieren. Besonders deutlich zeigt sich dies bei stark gekrümmten Linienverläufen, bei denen der zu Vergleichszwecken dargestellte konventionelle PD-Regler teilweise sogar versagt. Entsprechend der in Abschnitt 4.3.1 erörterten Visual Servoing Systeme erfordert der dargestellte Prädiktionsansatz jedoch eine Vorskizzierung der Roboterbewegung durch den Verlauf der zu verfolgenden Kontur.

Während ein dem Prozessort vorseilender Sensor die Roboterführung aufgrund des Prädiktionshorizonts auf der einen Seite deutlich erleichtert, birgt diese Vorgehensweise andererseits jedoch auch Fehlerpotentiale, welche in [11] adressiert werden. Mögliche Fehlerquellen sind unter anderem zeitliche Variationen des Vorlaufs aufgrund sich ändernder Vorschubgeschwindigkeiten, Rotationen des Bearbeitungskopfes relativ zur Vorschubrichtung und auch Abweichungen der Roboterbewegung quer zur Bahn, z. B. aufgrund von Getriebespiel, Vibrationen oder thermischen Einflüssen. Vorgeschlagene Ansätze, um diesen Problemstellungen zu begegnen, sind die Nutzung eines zusätzlichen Sensors, welcher den Abstand des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems relativ zum Werkstück erfasst. Dieser Herangehensweise wird mit einer in den Kontrollalgorithmus integrierten Variable verbunden, die dem variierenden Zeitverzug Rechnung trägt. Im Weiteren wird die Nutzung einer zusätzlichen Linearachse zur schnellen Nachführung des Prozesswerkzeug/Sensoraufbaus vorgeschlagen.

Zusätzliche Sensoren in Verbindung mit Monokamerasystemen werden ebenfalls genutzt, um Tiefeninformationen zu erhalten. Eine Möglichkeit ist die Verwendung

eines Kraftsensors, welcher kontinuierlich mit dem Werkstück in Kontakt steht und dessen Daten Rückschlüsse über den Abstand und damit einhergehend der z-Richtung im Kontaktpunkt erlauben [119]. In [120] wird ein System vorgestellt, welches anhand der Daten eines kombinierten Monokamera/Kraftsensorysystems automatisiert eine genaue dreidimensionale Roboterbewegungsbahn erstellt. Als Referenz wird ein vorab auf das Werkstück skizzierter Werkzeugweg genutzt. Generiert wird die eigentliche Robotertrajektorie „offline“ nach einem „Trockenlauf“ ohne eigentlichen Prozesseingriff.

Eine alternative Herangehensweise zur Erfassung räumlicher Ist-Zustandsinformationen ist die Nutzung zweier zueinander kalibrierter Kamerasysteme, welche über das Prinzip des Stereosehens eine Ableitung dreidimensionaler Informationen ermöglichen.

4.3.3 Stereokamerasysteme

Eine besonders vorteilhafte Eigenschaft von Stereokamerasystemen ist die Möglichkeit, Tiefeninformationen zu ermitteln, ohne dass explizites Modellwissen des betrachteten Objektes notwendig ist. Die übliche Vorgehensweise ist eine Ermittlung der Disparität, welche im Weiteren zur Tiefenbestimmung genutzt wird. Die Disparität, oder auch Parallaxe, beschreibt hierbei die Differenzstrecke der Positionen, welche ein Objekt auf zwei verschiedenen Bildebenen einnimmt [121]. Eine zentrale Aufgabe hierbei ist das Zuordnen („Matching“) der korrespondierenden Objekte in den Bildern unterschiedlicher Datenquellen. Üblicherweise wird hierzu ein Matching korrespondierender Bereiche oder Merkmale eingesetzt.

In Verbindung mit einer Regelung der Roboterbewegung werden Stereokamerasysteme eingesetzt, z. B. bei Pick-and-Place-Aufgaben, Oberflächenrekonstruktionen, zur Erfassung der Trajektorie von zu manipulierenden, bewegten Objekten oder auch im Bereich der Greifplanung [8]. Nur wenige Arbeiten sind jedoch bekannt, welche eine exakte Roboterbewegungserfassung und -regelung thematisieren anhand von Stereokamerasystemen. In [122] wird ein Stereokamerasystem zur dreidimensionalen Bewegungserfassung einer Parallelkinematik vorgestellt und dessen Genauigkeit experimentell ermittelt. Als Testtrajektorie wurde hierzu eine sinusförmige Bewegungsbahn untersucht. Bei den Experimenten wurden Abweichungen zwischen der erwarteten und gemessenen Bahn von mehreren Millimetern festgestellt. In den Ausführungen werden die relativ hohen Abweichungen auf systematische Fehler des Stereokamerasystems und Vibrationen des Endeffektors zurückgeführt. Eine hohe Zeiteffizienz steht nicht im Vordergrund der dargestellten Untersuchungen. In [123] wird ein robotergeführtes Stereokamerasystem zur Bewegungserfassung vorgestellt, anhand dessen Rückschlüsse auf die Robotertrajektorie möglich sind. Hierbei wird die Relativbewegung des Kameraaufbaus relativ zu einer ausgeprägt texturierten Oberfläche untersucht. Abhängig von der Bewegungsgröße konnten Genauigkeiten des verwendeten Bildverarbeitungsalgorithmus im Bereich von 50 μm (10 mm

Verfahrlänge) bis 500 μm bei 50 mm Verfahrlänge ermittelt werden. Die verwendeten Kameras (5 fps) antizipieren eine Datenverarbeitung nach der eigentlichen Bilderfassung. In [124] wird eine Vorgehensweise zur 3D-Bahnkorrektur im Bereich von Laserschneidprozessen unter Einsatz eines Stereokamerasystem vorgestellt. Hierbei werden in einem ersten Schritt die Positionen von auf einem Referenzbauteil aufgetragenen Markern erfasst und gespeichert. Bei der tatsächlichen Bearbeitung werden die Positionen der korrespondierenden Marker detektiert und mit den vorab bestimmten Referenzpositionen verglichen. Dies erlaubt eine Ermittlung der tatsächlichen Bauteilpositionen und eine Adaptierung der Roboterbewegungsbahn an die realen Gegebenheiten vor dem eigentlichen Prozess. Mittlere Verarbeitungszeiten von 185 ms sowie eine erreichbare Genauigkeit von 0,5 mm konnten mit dem vorgestellten System erreicht werden. In [125] und [126] wird ein Stereokamerasystem zur Poseerfassung und -regelung einer robotergeführten Patientenliege vorgestellt. Hierzu wird als Erfassungsreferenz ein auf der Liegenunterseite aufgebrachtes Muster genutzt. Diese Muster bestehen aus einer Vielzahl von Datamatrix-Codes, welche von vermessenen Kreislinien umgeben sind. Hinsichtlich der Messgenauigkeit konnten mit dem dort beschriebenen System bezüglich der Translation Werte besser 0,5 mm ermittelt werden. Applikationsbedingt ist hierbei eine hohe Dynamik nur von geringer Relevanz, was sich auch in der geringen Geschwindigkeit der verwendeten Kameras (6,3 fps) widerspiegelt. Einen schematischen Überblick des entwickelten Systems sowie der erreichbaren Genauigkeiten gibt Abbildung 28.

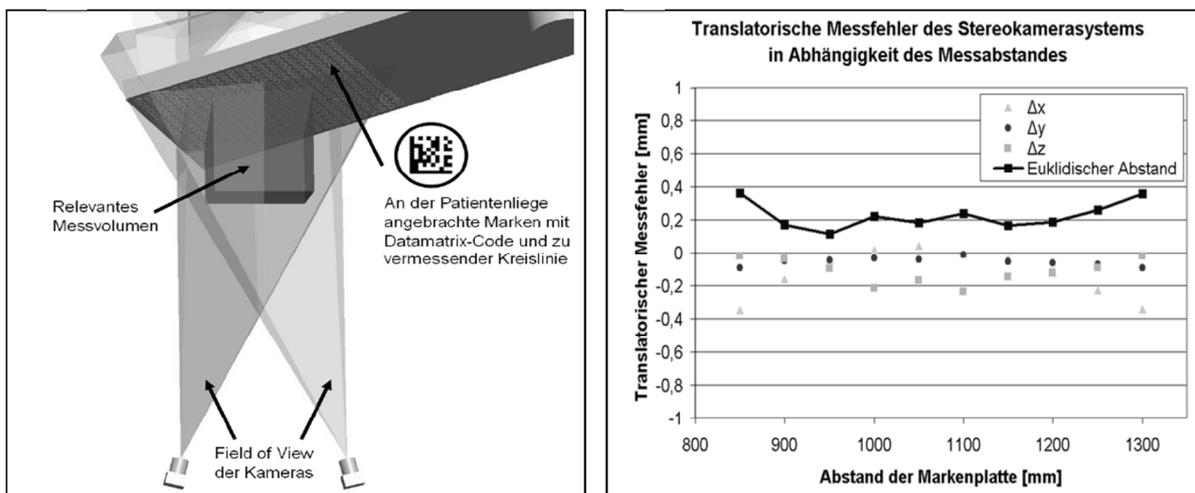


Abbildung 28: Poseregulierung einer Patientenliege und erreichte Genauigkeiten [125]

Der Vollständigkeit halber ist ebenfalls die Möglichkeit zur dreidimensionalen Ist-Zustandserfassung über Kamerasysteme basierend auf Time-of-flight (TOF) Sensoren aufzuführen, welche zunehmend an Relevanz gewinnen. Deren derzeit jedoch noch verhältnismäßig geringe Auflösung (max. 200 x 200 Pixel [127]) in Zusammenschau mit im Verhältnis zu konventionellen 2D-Kameras geringeren

Bilderfassungsgeschwindigkeiten (Max. 160 fps bei 160 x 120 Pixel [128]) schränken ihre Einsetzbarkeit für Anwendungen mit hohen Anforderungen an Genauigkeit und zugleich Dynamik aber noch ein.

4.4 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarfe

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen aus Kapitel 3 zeigen deutlich die Abhängigkeit des Roboter Genauigkeitsverhaltens von der jeweiligen Bewegungsaufgabe. Bei den experimentell ermittelten Genauigkeiten konnte zudem festgestellt werden, dass insbesondere in Bereichen abrupter Bewegungsrichtungsänderungen des Roboters signifikante Genauigkeitsabfälle bei der Bewegungsausführung auftreten können. Es liegt nahe, dass sich solche Effekte zwangsläufig negativ auf das Arbeitsergebnis auswirken. Bereits in der Planungs- und Auslegungsphase von Roboterbewegungen sollten dementsprechend spezifische Randbedingungen eingehalten werden, um massenträgheitsbedingte Negativeinflüsse auf die Roboter Genauigkeit zu vermeiden. Dementsprechend ist es erforderlich, bereits bei der Roboterprogrammerstellung für dreidimensionale Bearbeitungsaufgaben mit hohen Genauigkeitsanforderungen zusätzlich zu prozessspezifischen Randbedingungen und der Werkstückgeometrie auch die Roboterdynamik miteinzubeziehen. Das Einhalten sämtlicher Randbedingungen erfordert jedoch einen ausgesprochen hohen Aufwand bei der Roboterprogrammerstellung. Geeignete Methoden und Softwaretools zur automatisierten Aufbereitung von Roboterbahnen hinsichtlich Ihrer Stetigkeit unter Berücksichtigung prozess- und roboterspezifischer Anforderungen können hierbei unterstützen. Die Analyse des Standes der Technik und Forschung zeigen jedoch die nur sehr eingeschränkte Verfügbarkeit geeigneter Werkzeuge. Bekannte Ansätze thematisieren vielmehr entweder eine Optimierung des Prozessergebnisses oder eine Optimierung der Roboterbewegung ohne Berücksichtigung des Bahnverlaufs.

Diesen Handlungsbedarf aufgreifend, wird in Kapitel 5 eine Methode zur automatisierten Optimierung komplexer Robotertrajektorien unter Berücksichtigung prozess- und roboterspezifischer Randbedingungen bei gleichzeitiger Einhaltung der prozessrelevanten Roboterbewegungsbahn vorgestellt. Dieser Ansatz bildet die Grundlage zur Erstellung von Roboterbewegungsprogrammen, welche eine exakte Bewegungsausführung überhaupt erst ermöglichen.

Dabei ist die Bereitstellung eines geeigneten Robotersteuerungsprogramms eine wesentliche Bedingung, um eine hochgenaue Roboterbewegung zu gewährleisten. Sind jedoch weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Roboter Genauigkeit notwendig, kann dies durch eine effiziente Führung der Bewegung zur Prozesslaufzeit realisiert werden. Dieser zweigeteilte Ansatz aus optimaler Offline-Bahnplanung in Verbindung mit einem Online-Regelsystem wird auch in [94] als besonders zielführend erkannt.

Eine oftmals genutzte Herangehensweise zur Führung der Roboterbewegung ist eine Zustandsvorhersage, welche durch den einfachen Ansatz erreicht wird, dass der Sensor physisch dem Prozesseingriffsort mit einem distanzabhängigen Prädikationshorizont vorausläuft. Praktisch wird hierdurch z. B. die Lage einer Naht oder Kante erfasst, bevor der Prozesseingriffsort die vorauslaufenden sensorischen Erfassungspunkte tatsächlich erreicht (u. a. [9], [10], [12], [111], [129]). Neben der Lösung des Raum-Zeit-Problems [130] ermöglicht es diese Vorgehensweise der zeiteffizienten Datenerfassung, -verarbeitung und -bereitstellung eine nur untergeordnete Rolle zuzuordnen. Im Hinblick auf variierende Vorschubgeschwindigkeiten und starke Richtungsänderungen des Prozessbahnverlaufs weist diese Vorgehensweise jedoch deutliche Einschränkungen auf [11]. Besonders herausfordernd sind in diesem Zusammenhang zudem Prozesse mit einer nicht klaren Definition der prozessrelevanten Zielbahn/Zielpunkte bzw. einer in der Realität nicht darstellbaren geometrisch exakten und zugleich zeiteffizienten Erfassung derselben. So sind die bekannten Ansätze oftmals behaftet mit Defiziten im Bereich der Erfassungsgenauigkeit des Ist-Zustandes und der daraus resultierenden Kompensationsqualität von Bewegungsabweichungen zur Laufzeit. Eine hohe Zeiteffizienz der Datenverarbeitung in Zusammenschau mit einer hohen geometrischen Genauigkeit stellt hierbei einen nur schwer lösbaren Zielkonflikt dar. Ein weiterer Handlungsbedarf besteht in der fehlenden Universalität der bekannten Ansätze, da diese oftmals proprietär oder roboterherstellerspezifisch ausgeführt oder auf eine spezifische Applikation beschränkt sind. Diese Aufgabenstellungen adressierend wird in Kapitel 6 eine Regelungsmethode und Systemarchitektur für Industrieroboter vorgestellt.

Zusammenfassend ergeben sich fünf zentrale Anforderungen an das zu konzipierende System zur Robotergerauigkeitssteigerung:

1. Hohe Universalität bezüglich Robotertyp und Roboterbaugröße in Kombination mit weitreichender Herstellerunabhängigkeit.
2. Größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der adressierten Applikationen und Einsatzbereiche.
3. Hohe Reaktivität bei gleichzeitig ausgeprägter Sensitivität und Genauigkeit.
4. Bevorzugte Nutzung von hardwareseitigen Standardkomponenten und Standard-Betriebssystemarchitekturen.
5. Einfache Nutz- und Anwendbarkeit.

Diesen Anforderungen entsprechende Systeme werden im Folgenden vorgestellt. Während in den Kapiteln 5 und 6 eine Beschreibung der Methoden im Vordergrund steht, folgt in Kapitel 7 eine Diskussion der Implementierungen und eine quantitative, experimentelle Beurteilung. Wesentliche Teile der entwickelten Methoden und erzielten Ergebnisse wurden dem internationalen Fachpublikum in den Konferenzbeiträgen [131], [132], [133], [134], [135], [136] sowie [137] vorgestellt.

5 Methode zur Bahnplanung und Optimierung komplexer 3D-Robotertrajektorien

Eine zentrale Erkenntnis der in Kapitel 3 vorgestellten Untersuchungen ist, dass abrupte Umorientierungen und Richtungsänderungen der Roboterbewegung zu deutlichen lokalen Überschwingeffekten des Manipulators (Abschnitt 3.3.4 und 3.3.5) oder einem überproportionalen Überschleifen (Abschnitt 3.3.4) der Bewegung führen. Dies resultiert in einer verminderten Genauigkeit der Bewegungsausführung und schlussendlich einem verschlechterten Prozessergebnis, aufgrund verringerter Bahnkonturtreue. Darüber hinaus beinhalten diese Eck-/Unstetigkeitsbereiche Geschwindigkeitsvorgaben, welche von der Kinematik aufgrund physikalischer Einschränkungen nicht einhaltbar sind (Abschnitt 3.3.6). Obwohl die in Abschnitt 4.1 erläuterten Tools, Ansätze und Methoden eine repräsentative Simulation der Bearbeitungssituation erlauben sowie nützliche Lösungen für die Bearbeitung planarer oder auch abgerundeter Werkstückbereiche bereitstellen, sind diese im Hinblick auf eine realitätsnahe Darstellung und Berücksichtigung dynamischer Effekte deutlichen Einschränkungen unterworfen. Dies ist insbesondere dann von Relevanz, wenn geometrische Unstetigkeiten oder Unregelmäßigkeiten der Prozessbereiche eine schlagartige Umorientierung oder Bewegungsrichtungsänderung der Roboterhandwurzel erfordern. Eine Möglichkeit, um diesen Effekt zu reduzieren, ist eine Optimierung der Robotertrajektorie, welche eine kontinuierliche und definierte Bewegungsausführung ermöglicht. Konventionellerweise manuell durchgeführt, sind diese Optimierungen ausgesprochen zeit- und arbeitsintensiv.

Diesen Umstand adressierend, ist der Gegenstand des folgenden Kapitels eine Methode zur Bahnoptimierung unter Berücksichtigung prozess- und roboterspezifischer Randbedingungen sowie zudem eine geeignete Auswahl und Anwendung situationsangepasster Optimierungsstrategien. Zusätzlich zu einer Optimierung der Roboterbewegung bezüglich eines stetigen Verlaufs stehen hierbei eine hohe Prozessqualität und Konturtreue der Bewegung im Vordergrund.

Teile der Ausführungen nachfolgender Abschnitt 5.1 bis 5.3 sowie der in Abschnitt 7.2 beschriebenen Umsetzung und Evaluierung sind an den am Lehrstuhl FAPS entstandenen und vom Autor ko-betreuten Arbeiten [138–140] angelehnt. Einzelne Aspekte der nachfolgend erläuterten Methoden wurden vom Autor auch in [137] veröffentlicht, die Abschnitte bzw. Abbildungen sind entsprechend gekennzeichnet.

5.1 Optimierung von Roboterbewegungsbahnen hinsichtlich Stetigkeit

Zentraler Bestandteil einer geeigneten Bahnplanung ist eine kontinuierliche Bewegungsausführung durch den Roboter mit möglichst gering ausgeprägten Beschleunigungsbereichen. Ausgangspunkt der Optimierung ist dabei ein vorab

erzeugtes Robotersteuerungsprogramm, z. B. unter Nutzung vorgestellter Offline-Kinematik-Simulationstools.

5.1.1 Motivation und Hintergrund

Eine exemplarische Bearbeitungssituation, in der abrupte Umorientierungen und Bewegungsrichtungsänderungen während der Bearbeitung auftreten, ist in Abbildung 29 dargestellt.

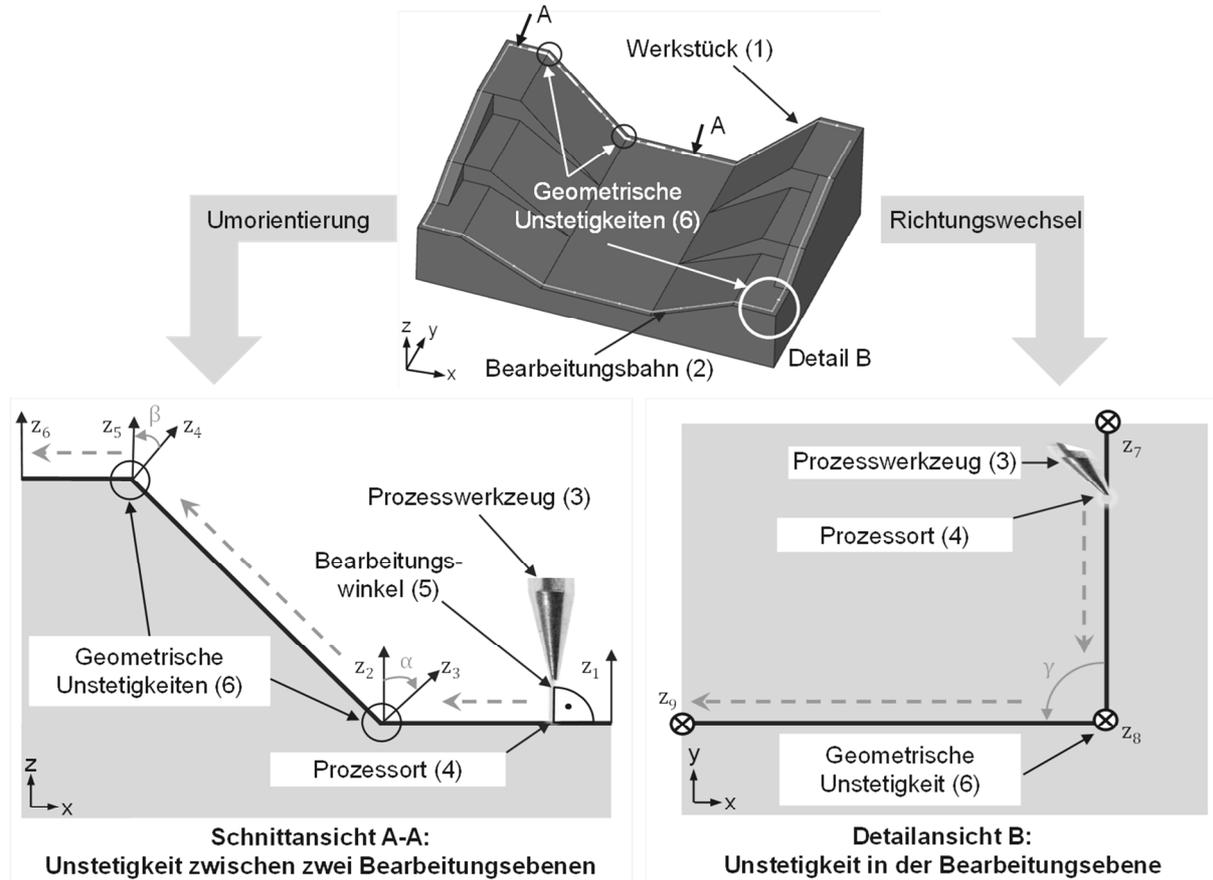


Abbildung 29: Musterbauteil: Bahnorientierte 3D-Oberflächenbearbeitung

Abbildung 29 zeigt ein beispielhaftes Werkstück (1), welches in den Randbereichen auf der Bauteiloberfläche eine dreidimensionale Bearbeitungsbahn (2) aufweist. Ausgehend von einem lokalen, räumlich eingeschränkten Eingriff des Prozesswerkzeugs (3) am Prozessort (4), wird die Ausprägung der Bearbeitungsbahn maßgeblich bestimmt durch eine definierte Relativbewegung von Werkzeug zu Werkstück bzw. Werkstück zu Werkzeug. Besonders bei sensiblen Prozessen kann es hierbei sinnvoll sein, die Prozessausrüstung ortsfest zu installieren und das Werkstück zu bewegen, um negative Einflüsse auf das Prozessergebnis zu vermeiden. Während des Prozesses wird in dem dargestellten Beispiel die Bauteiloberfläche mit einem definierten Bearbeitungswinkel (5) relativ zu dem Prozesswerkzeug bewegt. Zum Erhalt eines gleichmäßigen Prozessergebnisses sollte die Bewegung des Prozesseingriffsortes am Werkstück bevorzugt mit einer gleichbleibenden

Relativgeschwindigkeit erfolgen. Besonders herausfordernd sind in diesem Kontext geometrische Unstetigkeiten (6) des Werkstücks. Diese Unstetigkeiten sind konkave oder konvexe Kanten des Bauteils, über welche die Prozessaufgabe erfüllt werden soll (Schnittansicht A-A: Unstetigkeit zwischen zwei Bearbeitungsebenen) und Unstetigkeitsbereiche der Bahn in der Bearbeitungsebene (Detail B: Unstetigkeit in einer Bearbeitungsebene).

In Schnittansicht A-A der beispielhaften Bearbeitungssituation wird das Werkstück mit einer orthogonalen Ausrichtung von der Prozessoberfläche relativ zum Prozesswerkzeug von z_1 nach z_2 bewegt. Im Bereich der geometrischen Unstetigkeit z_2 ist eine abrupte Umorientierung des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems f_{TCP} um den Winkel α notwendig, um eine orthogonale Ausrichtung z_3 auf der benachbarten Prozessebene zu erreichen und zudem eine konstante Relativgeschwindigkeit einzuhalten. Im weiteren Prozessverlauf wird das Werkstück mit gleichbleibender Orientierung von z_3 nach z_4 bewegt. An der geometrischen Unstetigkeit z_4 tritt derselbe Effekt auf: Die Anforderung einer gleichbleibenden Relativgeschwindigkeit in Verbindung mit einer orthogonalen Ausrichtung von Werkzeug zu Werkstückoberfläche bedingt eine schlagartige Umorientierung des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems um den Winkel β . Abschließend wird das Bauteil mit konstanter Ausrichtung von z_5 nach z_6 bewegt. (Angelehnt an [137])

Geometrische Unstetigkeiten treten ebenfalls in Eckbereichen der Bahn in der Bearbeitungsebene auf. Bei der in Detailansicht B dargestellten Bearbeitungssituation, wird das Werkstück relativ zum Werkzeug in negativer y-Richtung von z_7 nach z_8 bewegt. Im Bereich der geometrischen Unstetigkeit z_8 ist eine abrupte Bewegungsrichtungsänderung des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems in negative x-Richtung um den Winkel γ notwendig, um die konstante Relativgeschwindigkeit zu gewährleisten. Im weiteren Bewegungsverlauf wird das Werkstück mit gleichbleibender Bewegungsrichtung von z_8 nach z_9 verfahren.

Diese Umorientierungen und Bewegungsrichtungsänderungen resultieren in sprunghaften Anpassungen der Winkelvorgaben für die Roboterachsen. Dies wiederum führt zu theoretisch unendlich hohen Beschleunigungswerten. Abhängig von dem Betrag der Winkeländerung, resultiert dies bei einem Versuch der Kinematik die Bewegungsvorgaben einzuhalten in temporären Überschwingbewegungen, was wiederum das Prozessergebnis negativ beeinflusst.

Da diese physikalisch bedingten Einschränkungen bekannt sind, nutzen Roboterhersteller Überschleiffaktoren, um diesen Effekt abzumildern. Hierbei wird dem Roboterhandwurzel-Koordinatensystem ermöglicht, an Orten abrupter Richtungs- und/oder Winkelveränderungen die vorbestimmte Prozessbahn zu verlassen. [141] Während das Überschleifen bei weniger relevanten Trajektorienstützpunkten anwendbar ist, zum Beispiel bei Bahnpunkten, die Transferbewegun-

gen beschreiben, kann sich ein Überschleifen negativ auf roboterbasierte Bearbeitungsaufgaben auswirken, bei denen die komplette Trajektorie prozessrelevant ist. Dies belegen anschaulich die in Abschnitt 3.3.4 und 3.3.5 dargestellten deutlichen Abweichungen der Ist-Trajektorie von der Soll-Trajektorie in den Überschleifbereichen sowie zudem die Nicht-Einhaltung der eingestellten Überschleiffaktoren.

5.1.2 Lösungsansatz

Die im Rahmen der Forschungsarbeiten untersuchte Methode, um genauigkeitsbeeinflussende Überschwingeffekte in Eckbereichen der Prozessbahn zu reduzieren, basiert auf einer definierten Modifikation der Trajektorie unter Berücksichtigung prozess- und roboterspezifischer Randbedingungen. Unter stetiger Bewegungsausführung ist in diesem Zusammenhang ein Bewegungsverhalten zu verstehen, welches zur Prozesslaufzeit nur sehr geringe oder bevorzugt keine sprunghaften Orientierungs- und/oder Translationsbewegungsänderung erfordert. Die dem Ansatz zugrundeliegende Idee zur Behandlung von Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen ist in Abbildung 30 dargestellt.

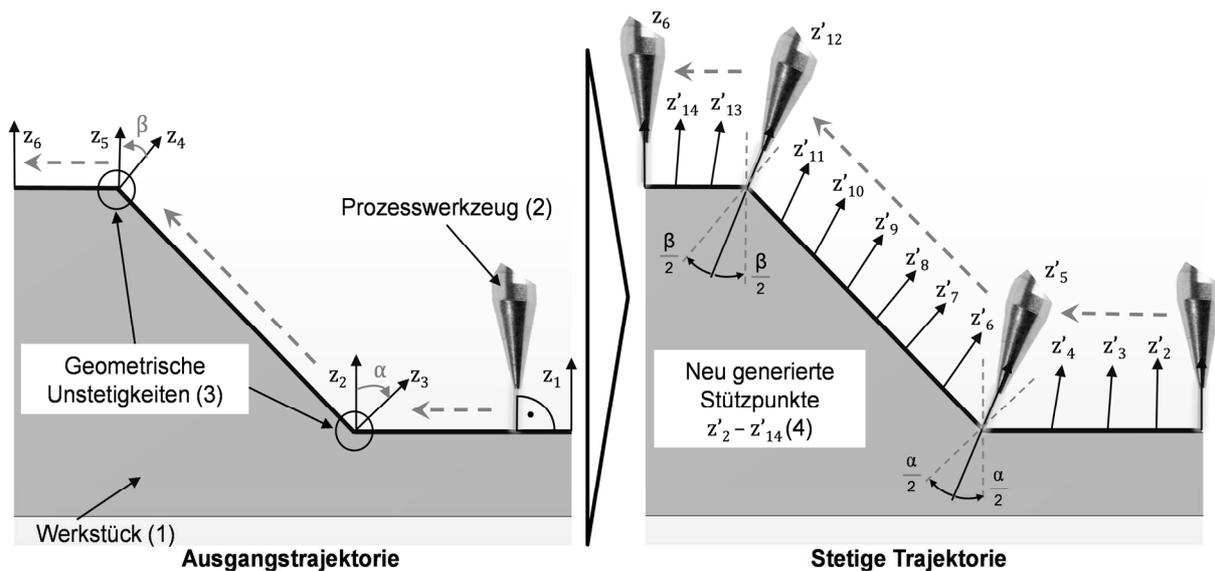


Abbildung 30: Optimierung der Trajektorie bei Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen (angelehnt an [137])

Auf der linken Seite ist die Situation analog Abbildung 29, Schnittansicht A-A visualisiert. Das Werkstück (1) bzw. die Bauteiloberfläche wird orthogonal relativ zum Prozesswerkzeug (2) bewegt. Die Prozessbahn ist definiert durch die drei Segmente z_1 bis z_2 , z_3 bis z_4 und z_5 bis z_6 . Diese Segmente werden wiederum repräsentiert durch drei linear interpolierte Bahnbewegungen des Roboters. Diese Trajektorie umfasst zwei geometrische Unstetigkeiten (3). (Angelehnt an [137])

Auf der rechten Seite ist eine zugehörige optimierte Robotertrajektorie abgebildet. Für die Aufbereitung bezüglich Stetigkeit wird ausgenutzt, dass abhängig von der Bearbeitungsaufgabe eine bestimmte Abweichung von der Orthogonalitätsanforderung tolerabel ist und dennoch Prozessergebnisse innerhalb eines definierten Qualitätsspektrums erreicht werden können [142], [100]. Basierend auf diesem Wissen, können der Trajektorie zusätzliche Feininterpolationspunkte (4) mit sukzessiver Orientierungsänderung der Werkstückoberfläche relativ zum Prozesswerkzeug hinzugefügt werden. In dem spezifischen Beispiel werden die ursprünglichen Stützpunkte z_2 bis z_5 substituiert durch die neuen Feininterpolationspunkte z'_2 bis z'_{14} . Die Feininterpolationspunkte z'_5 und z'_{12} bilden hierbei die Winkelhalbierenden der Normalen von den benachbarten Prozessflächen an den Orten der geometrischen Unstetigkeiten. Diese Ergänzung der Trajektorie durch zusätzliche Stützpunkte, ermöglicht eine graduelle und „weiche“ Umorientierung des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems f_{TCP} zur Bewegungslaufzeit, bei einer konstanten Relativgeschwindigkeit und einer Vermeidung diskutierter Überschwingeffekte. (Angelehnt an [137])

Über eine Erweiterung der Trajektorie durch zusätzliche Feininterpolationspunkte können ebenfalls in Bereichen mit Unstetigkeiten in der Bearbeitungsebene realisierbare Bewegungsvorgaben erzeugt werden. Das Grundprinzip ist in Abbildung 31 illustriert.

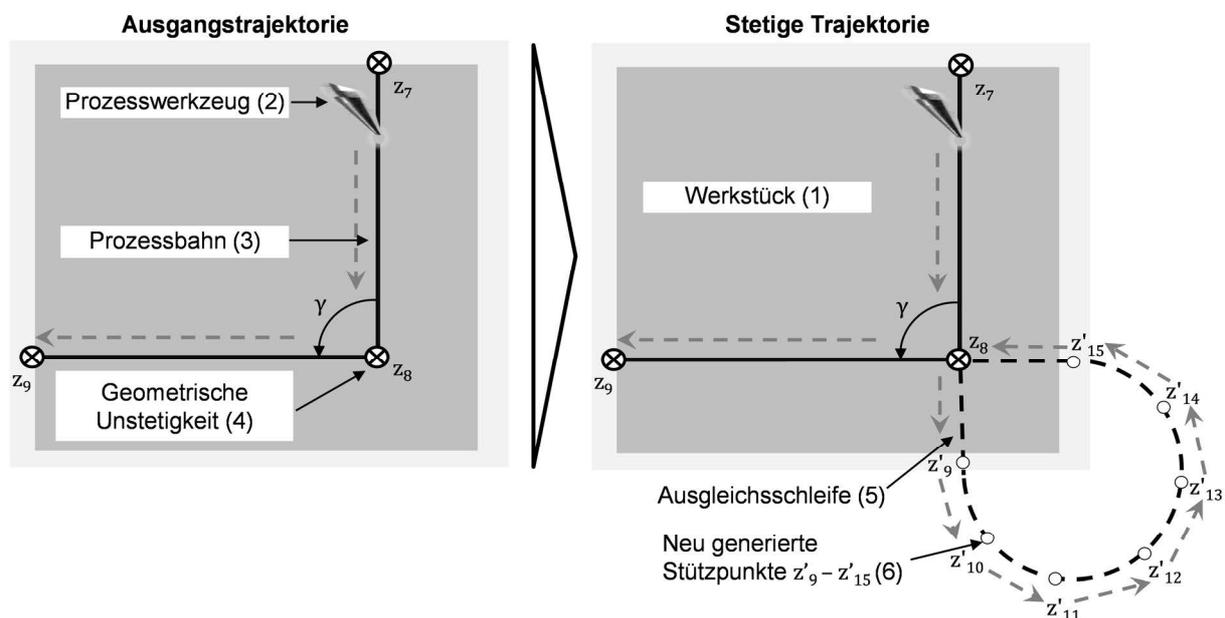


Abbildung 31: Modifikation der Robotertrajektorie bei Unstetigkeiten in der Bearbeitungsebene

Die linke Darstellung visualisiert die anhand von Abbildung 29, Detail B vorgestellte Arbeitssituation. Das Werkstück (1) wird relativ zum Prozesswerkzeug (2) bewegt. Die Prozessbahn (3) ist bestimmt durch die Segmente z_7 bis z_8 und z_8 bis z_9 . Diese Segmente werden wiederum repräsentiert durch zwei linear interpolierte Bahnbewegungen des Roboters. Die Trajektorie umfasst eine geometrische Unstetigkeit (4).

Die zugehörige optimierte Trajektorie zeigt die rechte Darstellung. Für die Aufbereitung wird eine bearbeitungsirrelevante Ausgleichsschleife (5) genutzt. Hierbei überfährt der Roboter die Unstetigkeit an z_8 und geht an dem neu generierten Stützpunkt z'_9 in eine Ausgleichsschleife mit gradueller Bewegungsrichtungsänderung über. Durch die Bewegungsrichtungsänderung wird der Roboter auf einer Kreisbahn sukzessive zurück auf die Bearbeitungsbahn geführt. Dabei wird die Kreisbahn polyedrisch durch die neu generierten Feininterpolationspunkte (6) angenähert. Durch diese Methode werden ausgeprägte Bewegungsrichtungsänderungen vermieden, gleichzeitig ist jedoch eine direkte Einflussnahme auf den Prozess notwendig, da Bahnbereiche erzeugt werden, in denen keine Bearbeitung stattfindet.

Die vorgestellten Optimierungsansätze bieten zwar mögliche Lösungen für das eingangs beschriebene Problem, manuell durchgeführt erfordern diese jedoch zeitaufwändige Anpassungen des Steuerungsprogramms unter Berücksichtigung einer Vielzahl prozess- und roboterspezifischer Randbedingungen wie z. B. prozessabhängiger Orthogonalitätstoleranz, gleichbleibender Abstand Werkzeug/Werkstück, Relativgeschwindigkeit Werkzeug/Werkstück, minimaler Stützpunktstand, Vor-/Nachdrehdistanz, Aktivieren/Deaktivieren Prozess etc.

Forschungsaufgabe ist dementsprechend die Bereitstellung einer Methode zur automatisierten Erstellung optimierter Robotertrajektorien im Bereich komplexer dreidimensionaler Bearbeitungsaufgaben. Dies umfasst eine Optimierung der erforderlichen Bewegung bezüglich stetigem Verhalten zum einen aber auch den geeigneten und effizienten Umgang mit Fällen, in denen eine reine geometrische Modifikation den Prozessanforderungen nicht genügt. Zu beachten ist hierbei zusätzlich zu einer universellen Anwendbarkeit der Methode für unterschiedliche Prozessaufgaben auch deren Variabilität im Hinblick auf unterschiedliche Roboterkinematiken. Die nachfolgenden Abschnitte adressieren diese Aufgabenstellung. Nach einer Erörterung der Bahnoptimierungsalgorithmen in Abschnitt 5.2 werden in Abschnitt 7.2 die Implementierung der Methode in einem Softwaretool dargestellt und die experimentelle Evaluierung erläutert.

5.2 Methode und mathematische Grundlagen

Die erforschte Methode zur Optimierung der Trajektorie umfasst fünf aufeinanderfolgende Schritte:

1. Überführung der Originalbahn in ein Bearbeitungskoordinatensystem (Abschnitt 5.2.1)
2. Auswahl der Optimierungsstrategie (Abschnitt 5.2.2)
3. Modifikation der Trajektorie (Abschnitt 5.2.3)
4. Anpassung der Bewegungsparameter (Abschnitt 5.2.4)
5. Inverse Koordinatentransformation (Abschnitt 5.2.5)

Dabei ist die Methode unabhängig von der Kinematikausprägung und erfordert dementsprechend keine mathematische Beschreibung des Roboters, z. B. basierend auf Denavit-Hartenberg-Parametern. Dies ist möglich, da die Methode auf einer geometrischen Beschreibung der Robotertrajektorie und des Prozesswerkzeugkoordinatensystems relativ zum Roboterbasiskoordinatensystem basiert. Diese Informationen sind elementare Bestandteile von Roboterbewegungsprogrammen und unabhängig von dem Roboteraufbau.

5.2.1 Überführung der Bahn in ein Bearbeitungskoordinatensystem

In einem ersten Schritt werden die Stützpunkte, welche werkstückbezogen die Prozessbahn beschreiben, in ein roboterbezogenes Referenzkoordinatensystem transformiert, in dem die weiteren Anpassungen vorgenommen werden. Diese Koordinatentransformation erleichtert die Identifikation genannter geometrischer Unstetigkeiten, die mit einer sprunghaften Umorientierung oder Bewegungsrichtungsänderung des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems einhergehen. Für eine gezielte anschließende Modifikation ist zudem eine Beziehung von jedem prozessbahnbezogenen Stützpunkt bezüglich des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems notwendig. Insbesondere bei werkstückgeführten Prozessaufgaben relativ zu einem ortsfesten Werkzeug („Externer TCP“) ist diese Information jedoch zumeist nicht explizit in dem Roboterbewegungsprogramm enthalten, da sich das Programm auf das bezüglich der Roboterbasis geometrisch stationäre Koordinatensystem des Werkzeugs K_{Tool} bezieht. Das bedeutet, dass jedem prozessrelevanten Stützpunkt K_{PBP} auf der Werkstückoberfläche eine Roboter-Bahnkoordinate K_{RBP} relativ zum Werkzeugkoordinatensystem K_{Tool} zugeordnet ist, wobei K_{Tool} aus Sicht des Roboters als steuerndes Koordinatensystem fungiert. Dementsprechend muss eine Koordinatentransformation vorgenommen werden, um die Stützpunkte der Prozessbahn in dem Roboterhandwurzel-Koordinatensystem K_{TCP} darzustellen.

Nachfolgende Abbildung 32 veranschaulicht die systematische Vorgehensweise bezüglich eines beispielhaften Stützpunktes.

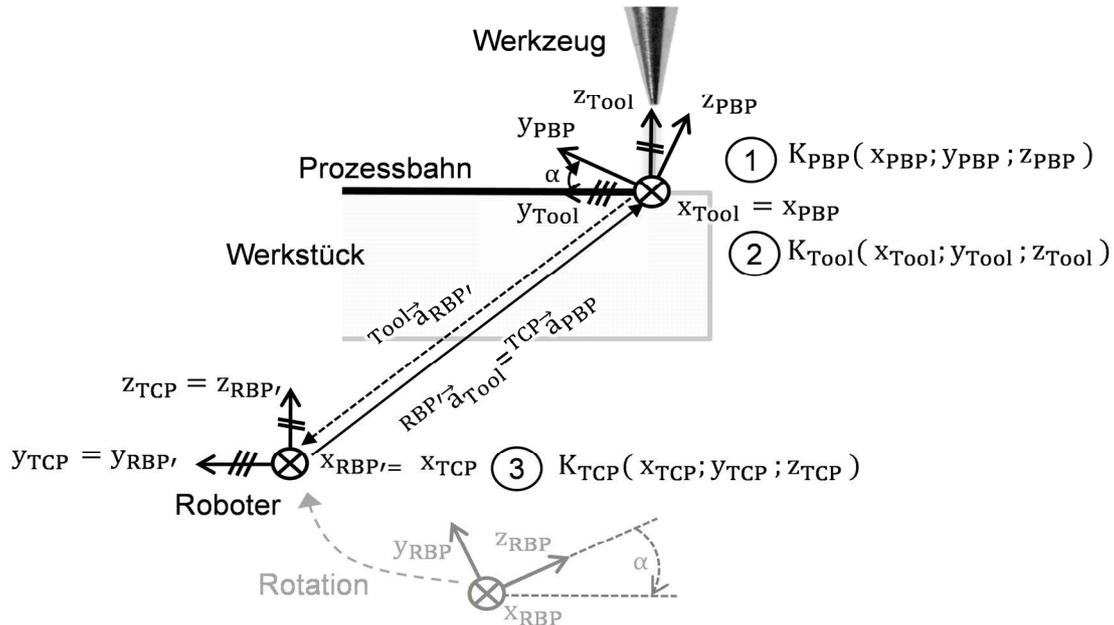


Abbildung 32: Bahntransformation (Angelehnt an [137])

In Abbildung 32 definiert K_{PBP} das Koordinatensystem eines prozessbahnrelevanten Stützpunktes auf der Bauteiloberfläche, wobei K_{PBP} sich auf das werkstückbezogene Koordinatensystem $f_{Workpiece}$ bezieht und zur Prozesslaufzeit mit K_{Tool} in Übereinstimmung gebracht wird (1).

Es gilt:

$${}^{f_{Workpiece}}K_{PBP} = \begin{pmatrix} {}^{f_{Workpiece}}x_{PBP} \\ {}^{f_{Workpiece}}y_{PBP} \\ {}^{f_{Workpiece}}z_{PBP} \end{pmatrix}. \quad (5.1)$$

K_{Tool} ist definiert als das Werkzeugkoordinatensystem (2), wobei die z-Achse in negativer Richtung die Hauptachse des Prozesseingriffs bestimmt. K_{Tool} mit f_{Robot} als Bezugskoordinatensystem ist festgelegt durch

$${}^{f_{Robot}}K_{Tool} = \begin{pmatrix} {}^{f_{Robot}}x_{Tool} \\ {}^{f_{Robot}}y_{Tool} \\ {}^{f_{Robot}}z_{Tool} \end{pmatrix}. \quad (5.2)$$

K_{TCP} bestimmt das Handwurzelkoordinatensystem des Roboters (3) relativ zum Roboterbezugskordinatensystem f_{Robot} über den Zusammenhang

$${}^{f_{Robot}}K_{TCP} = \begin{pmatrix} {}^{f_{Robot}}x_{TCP} \\ {}^{f_{Robot}}y_{TCP} \\ {}^{f_{Robot}}z_{TCP} \end{pmatrix}. \quad (5.3)$$

K_{RBP} definiert einen Roboterbahnpunkt (4) bezüglich K_{Tool} , wobei K_{RBP} und entsprechend K_{PBP} bezüglich K_{Tool} um α , β und γ verdreht sind. Es gilt:

$${}^{Tool}K_{RBP} = \begin{pmatrix} {}^{Tool}x_{RBP} \\ {}^{Tool}y_{RBP} \\ {}^{Tool}z_{RBP} \end{pmatrix}. \quad (5.4)$$

Um K_{PBP} in Relation zu K_{TCP} zu erhalten, werden in einem ersten Schritt die Roboterbahnpunkte K_{RBP} um deren negierte Verdrehungen $-\alpha$ (x_{Tool}), $-\beta$ (y_{Tool}) und $-\gamma$ (z_{Tool}) bezüglich K_{Tool} rotiert. Angewendet wird hierbei:

1. Rotation um x_{Tool} :

$$R_x(-\alpha(x_{Tool})) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\alpha(x_{Tool})) & -\sin(-\alpha(x_{Tool})) \\ 0 & \sin(-\alpha(x_{Tool})) & \cos(-\alpha(x_{Tool})) \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

2. Rotation um y_{Tool} :

$$R_y(-\beta(y_{Tool})) = \begin{bmatrix} \cos(-\beta(y_{Tool})) & 0 & \sin(-\beta(y_{Tool})) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\beta(y_{Tool})) & 0 & \cos(-\beta(y_{Tool})) \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

3. Rotation um z_{Tool} :

$$R_z(-\gamma(z_{Tool})) = \begin{bmatrix} \cos(-\gamma(z_{Tool})) & -\sin(-\gamma(z_{Tool})) & 0 \\ \sin(-\gamma(z_{Tool})) & \cos(-\gamma(z_{Tool})) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

Diese einzelnen Rotationen lassen sich zusammenfassen in einer Gesamtdrehung:

$$R_{xyz}(K_{Tool}) = R_x(-\alpha(x_{Tool})) \cdot R_y(-\beta(y_{Tool})) \cdot R_z(-\gamma(y_{Tool})). \quad (5.8)$$

Daraus folgt:

$${}^{Tool}K_{RBP'} = R_{xyz}(K_{Tool}) \cdot {}^{Tool}K_{RBP}. \quad (5.9)$$

Durch diese Verdrehung von K_{RBP} werden die rotatorischen Komponenten von K_{PBP} eliminiert, der tatsächliche geometrische Ort $K_{RBP'}$ aufgedeckt und $K_{RBP'}$ mit K_{TCP} in Übereinstimmung gebracht.

Als Ergebnis kann ein Vektor ${}^{Tool}\vec{a}_{RBP'}$ berechnet werden, mit Ursprung in K_{Tool} welcher nach $K_{RBP'}$ läuft. ${}^{Tool}\vec{a}_{RBP'}$ ist hierbei bestimmt durch:

$${}^{Tool}\vec{a}_{RBP'} = R_{xyz}(K_{Tool}) \cdot \begin{pmatrix} {}^{Tool}x_{RBP} \\ {}^{Tool}y_{RBP} \\ {}^{Tool}z_{RBP} \end{pmatrix}. \quad (5.10)$$

Um nunmehr die Position von K_{PBP} relativ zu K_{TCP} zu erhalten, wird die Vektorrichtung umgekehrt. Es gilt:

$${}^{TCP}\vec{a}_{PBP} = {}^{RBP'}\vec{a}_{Tool} = - {}^{Tool}\vec{a}_{RBP'} . \quad (5.11)$$

Die dargestellte Koordinatentransformation wird auf sämtliche Prozessbahnstützpunkte PBP_n angewendet und dadurch die Prozessbahn in einen Veränderungsmodus überführt, in dem Stützpunkte gelöscht, modifiziert aber auch zusätzliche Feininterpolationspunkte hinzugefügt werden können.

Dabei ist zu beachten, dass der dargestellte Fall mit externem, ortsfestem Werkzeugkoordinatensystem ${}^{fRobot}K_{Tool}$ und bewegtem Werkstück im Vergleich zu der Variante des bewegten Werkzeugs zu einem ortsfesten Werkstück die allgemeine Darstellung repräsentiert. Dies ist darin begründet, dass im zweiten Fall ein direkter Bezug von dem Roboterhandwurzel-Koordinatensystem ${}^{fRobot}K_{TCP}$ zu den Bahnpunkt-Koordinatensystemen der Prozessbahn ${}^{TCP}\vec{a}_{PBP}$ herstellbar ist. Entsprechend ist die Überführung der Bahn in ein Bearbeitungskoordinatensystem in der Konstellation mit bewegtem Werkstück als erweiterte Ausführung anzusehen, welche im Falle eines bewegten Werkzeugs in weiten Teilen entfallen kann.

5.2.2 Auswahl der Optimierungsstrategie

Nach Überführung der Daten in das Bearbeitungskoordinatensystem, erfolgt eine geeignete Strategiewahl entsprechend des in Abbildung 33 dargestellten strukturierten Entscheidungsbaums, der beliebig erweiterbar ist und vier exemplarische Fälle darstellt.

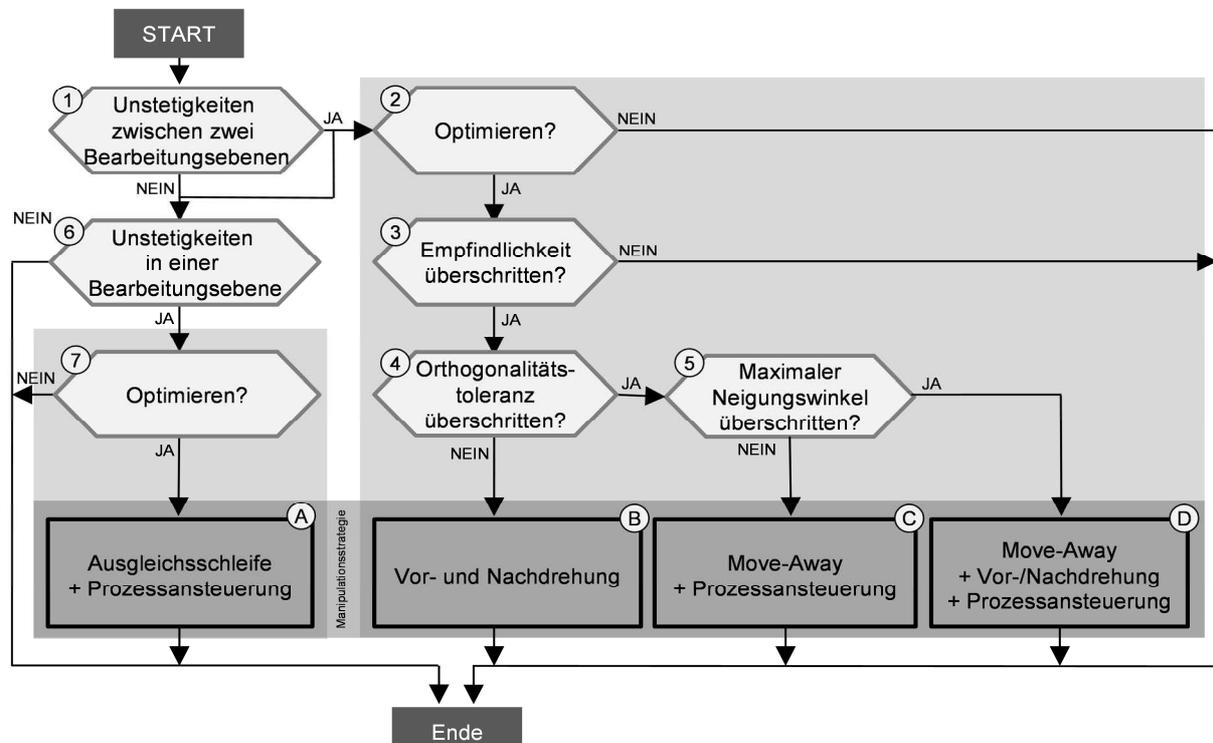


Abbildung 33: Auswahlbaum der Trajektorien-Optimierungsstrategien

Abhängig von der Erfüllung/Nichterfüllung definierter Bedingungen erfolgt eine geeignete Strategieauswahl. Abhängig von den Erfordernissen des jeweils adressierten Prozesses können hierbei die nachfolgend beschriebenen Werte flexibel angepasst werden. Dies gewährleistet die prinzipielle Prozessunabhängigkeit der Methode.

- Bedingung (1) bestimmt das Vorhandensein unterschiedlich orientierter Prozessflächen, also Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen, wobei α den tatsächlich auftretenden Neigungswinkel zweier benachbarter Prozessflächen definiert.
- Bedingung (2) überprüft, ob eine Optimierung bei dem Auftreten von Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen erfolgen soll.
- Bedingung (3) beschreibt, ab welchem Neigungswinkel benachbarter Prozessflächen eine Aufbereitung vorgenommen wird. Dieser Parameter ist auch von Relevanz z. B. für Freiformflächen, da in diesem Fall nur geringe Unterschiede der rotatorischen Ausrichtungen benachbarter Bahnpunkte auftreten und somit eine Bahnoptimierung entfallen kann.
- Bedingung (4) definiert die Orthogonalitätstoleranz $\frac{\delta}{2}$, also die maximal tolerierbare Winkelabweichung des Werkzeugs von der Normalen bezüglich der aktuell zu bearbeitender Prozessfläche, wobei eine Überschreitung dieser Toleranz zu einer Verschlechterung des Prozessergebnisses führt. Analog kann ein prozessabhängig notwendiger Anstellwinkel des Werkzeugs als „Normal“ angesehen werden mit entsprechenden Toleranzen bezüglich dieses Winkels.
- Bedingung (5) repräsentiert einen maximalen Neigungswinkelschwellwert Φ benachbarter Prozessflächen, der insbesondere bei einer konkaven Ausprägung in einer Kollision von Werkstück und Werkzeug resultieren könnte.
- Bedingung (6) überprüft das Vorhandensein ausgeprägter Unstetigkeiten in der Bearbeitungsebene.
- Bedingung (7) definiert einen Auswahlswitcher zur Behandlung auftretender Unstetigkeiten in der Bearbeitungsebene.

Die dargestellten Bedingungen erlauben die Auswahl der situationsabhängigen Optimierungsstrategien A bis D.

5.2.3 Modifikation der Prozessbahn

Untergliedert nach den Methoden zur Behandlung von Unstetigkeiten in einer Bearbeitungsebene und Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen, werden im Folgenden die Optimierungsalgorithmen und -methoden beschrieben.

Strategie A: Ausgleichsschleife bei Unstetigkeiten in einer Bearbeitungsebene

Enthält die Bearbeitungsbahn Unstetigkeiten in einer Bearbeitungsebene (Bedingung 6) und sollen diese entsprechend Bedingung 7 behandelt werden, resultiert dies in

einer Ausgleichsbewegung jenseits der bearbeitungsrelevanten Bahnabschnitte. Dargestellt ist das Grundprinzip in Abbildung 34.

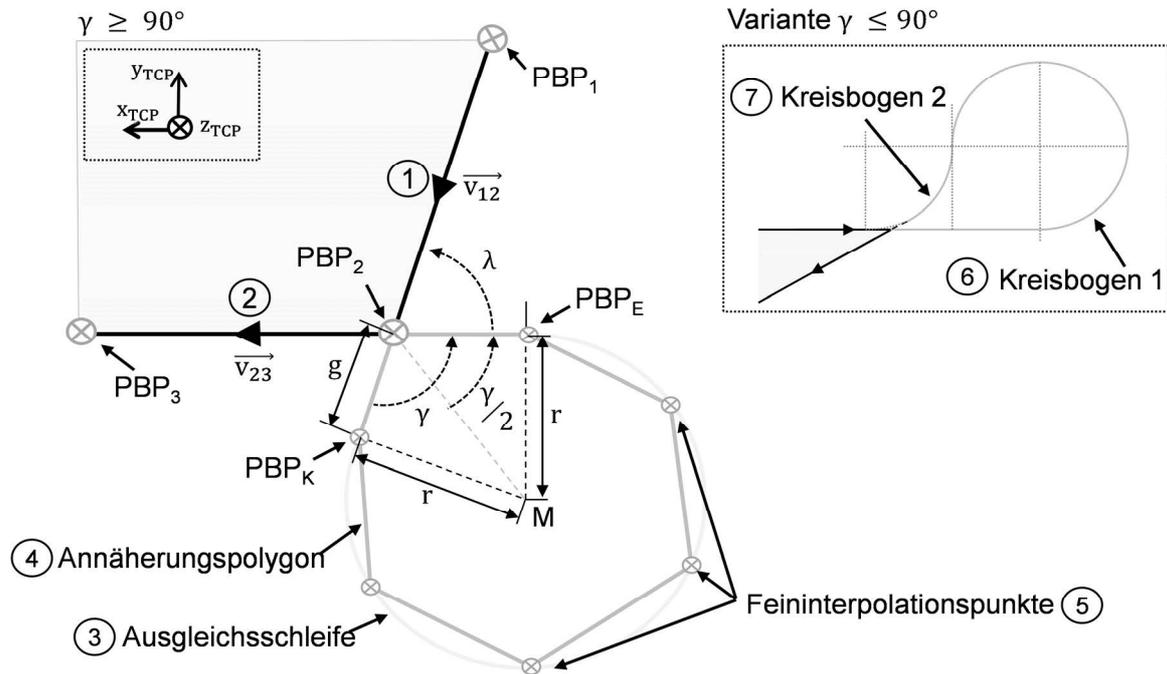


Abbildung 34: Ausgleichsbewegung mit Prozessansteuerung

Der originale Bahnzug ist definiert durch die drei Bahnpunkte PBP_1 bis PBP_3 , wobei deren Verbindungsvektoren \vec{v}_{12} (PBP_1 bis PBP_2) und \vec{v}_{23} (PBP_2 bis PBP_3), welche sich in PBP_2 treffen, einen Winkel γ einschließen. Entsprechend wird der originale Bahnzug bestimmt über die zwei Segmente (1) und (2), deren gemeinsamer Bahnpunkt PBP_2 eine geometrische Unstetigkeit repräsentiert, welche eine abrupte Bewegungsrichtungsänderung induziert. Umgangen wird diese Bewegungsrichtungsänderung durch das Abfahren einer Ausgleichsschleife (3), welche durch einen polygonen Bahnzug (4) aus linearen Segmenten angenähert wird. Der Winkelübergang zwischen diesen Segmenten ist hierbei festgelegt über die Anzahl neu hinzugefügter Feininterpolationspunkte (5), dem Radius r der Ausgleichsschleife sowie dem Winkel γ . Diese Größen bestimmen somit wesentlich den Optimierungseffekt im Bereich der Ausgleichsschleife.

Zur Entkopplung der bearbeitungsirrelevanten Ausgleichsschleife (3) von den bearbeitungsrelevanten Bahnsegmenten (1) und (2) erfolgt der Übergang von Ausgleichsschleife auf die Bearbeitungsbahnabschnitte an den Tangentebahnpunkten PBP_K und PBP_E außerhalb des prozessrelevanten Bahnabschnitts. Reduzierte aber evtl. auftretende Überschwingeffekte in diesen Bereichen wirken sich dementsprechend nicht direkt auf die Bearbeitungsbahn aus.

Abhängig von dem Radius r der Ausgleichsschleife und dem Eckwinkel γ wird die Auslaufstrecke g dynamisch ermittelt über den Zusammenhang

$$g = r \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (5.12)$$

mit

$$\gamma = 180^\circ - \lambda, \text{ und} \quad (5.13)$$

$$\lambda = \cos^{-1}(\vec{e}_{12} \cdot \vec{e}_{23}) \quad (5.14)$$

wobei \vec{e}_{12} und \vec{e}_{23} die Einheitsvektoren zu \vec{v}_{12} respektive \vec{v}_{23} bilden, für welche gilt

$$\vec{e}_{23} = \frac{\vec{v}_{23}}{|\vec{v}_{23}|}, \text{ und} \quad (5.15)$$

$$\vec{e}_{12} = \frac{\vec{v}_{12}}{|\vec{v}_{12}|}. \quad (5.16)$$

Diese dynamische Anpassung der Auslaufstrecke g gewährleistet einen winkelunabhängig weichen Übergang der Bewegung von der Bearbeitungsbahn auf die Ausgleichsschleife und im weiteren Verlauf zurück auf die Bearbeitungsbahn. Gleichzeitig führt dies bei spitzen Winkeln zu einer zunehmenden Entfernung der Ausgleichsschleife von der Bearbeitungsbahn. In diesem Fall kommt eine Variante der Methode zum Tragen, welche in Abbildung 34 illustriert ist. Nach dem Durchfahren eines ersten Kreisbogens (6) erfolgt hierbei ein Übergang auf einen gegenläufig angeordneten zweiten Kreisbogen (7), welcher den TCP sanft auf die Bearbeitungsbahn zurückführt.

Diese Methode ermöglicht zum einen die Kompensation dynamischer Negativeffekte und gewährleistet zugleich eine hohe Konturtreue der Bearbeitungsbahn. Einher geht dies mit der Generierung bearbeitungsirrelevanter Bahnabschnitte, welche eine dynamische Prozessansteuerung erfordern. Eine Überprüfung der Kollisionsfreiheit dieser Ausgleichsbahnabschnitte kann mittels einer Rückspielung und Überprüfung der modifizierten Bahn in ein Kinematik-Simulationstool erfolgen.

Strategie B: Vor- und Nachdrehbewegung bei Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen

Sind entsprechend der Bedingungen des Strategiewahlbaums (Abbildung 33) Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen vorhanden (Bedingung 1), die behandelt werden soll (Bedingung 2) und sind diese größer als die Empfindlichkeit (Bedingung 3) aber gleichzeitig tritt bei einer eventuellen Aufbereitung keine Überschreitung der prozessabhängigen Orthogonalitätstoleranz (Bedingung 4) auf, resultiert dies in einer Vor- und Nachdrehung von Werkzeug zu Bearbeitungsebene und damit in einem stetigen Verlauf der Bewegungsbahn.

Bei Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen werden benachbarte Prozessbahnpunkte, welche eine plötzliche Orientierungsänderung aufweisen,

substituiert durch zusätzliche Feininterpolationspunkte mit einer graduellen Änderung der Roboter-Handwurzelorientierung. In diesem Zusammenhang sind plötzliche Orientierungsänderungen ein Indiz für unterschiedlich orientierte benachbarte Prozessflächen. Abbildung 35 zeigt beispielhaft die Systematik zur Modifikation einer Unstetigkeit zwischen zwei Bearbeitungsebenen im Prozessbahnverlauf.

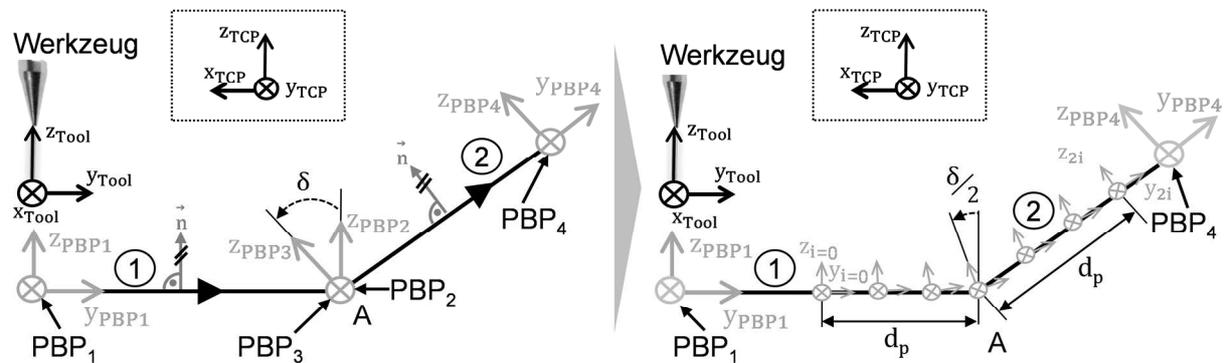


Abbildung 35: Vor- und Nachdrehbewegung (Angelehnt an [137])

Die Darstellung links illustriert eine unmodifizierte Prozessbahn und die rechte Darstellung die entsprechende Prozessbahn nach der Optimierung. Die räumlichen Ebenen zur Klassifikation der Prozessbahn beziehen sich hierbei auf das dargestellte TCP-Koordinatensystem. Die abgebildete Prozessbahn besteht aus zwei Segmenten (1) und (2), die sich im Prozessbahnpunkt PBP₂ beziehungsweise PBP₃ treffen, wobei die Koordinatenrichtungen z_{PBP_2} und z_{PBP_3} einen Winkel δ einschließen. In dem spezifischen Beispiel entspricht der Winkel δ den doppelten Wert der maximal tolerierten prozessabhängigen Orthogonalitätsabweichung $\frac{\delta}{2}$. (Angelehnt an [137])

Durch Anwendung des Optimierungsalgorithmus werden i neue Feininterpolationspunkte in gleichmäßigen Abständen $\frac{d_p}{i}$ vor und nach dem Scheitelpunkt (A) der beiden Segmente (1) und (2) erzeugt und die ursprünglichen Prozessbahnpunkte PBP₂ und PBP₃ eliminiert. Die Rotation bzw. Ausrichtung jedes neu hinzugefügten Feininterpolationspunkts bezüglich dessen x-Achse wird dabei derart berechnet, dass der Gesamtwinkel δ über die Rotationsdifferenz $\frac{\delta}{2 \cdot i}$ gleichmäßig auf alle neuen Feininterpolationspunkte verteilt wird und der neue Prozessbahnpunkt am Scheitelpunkt (A) einen Winkel $\frac{\delta}{2}$ aufweist. Durch dieses Vorgehen erfolgt die zur Erfüllung der Prozessaufgabe notwendige Werkstückverdrehung jeweils hälftig bezüglich der beiden Bearbeitungssegmente (1) und (2). Dementsprechend wird am Ende der Rotation der Winkel δ erreicht. Zusammenfassend wird durch diese Methode die notwendig TCP-Rotation gleichmäßig auf $2 \cdot i$ Feininterpolationspunkte verteilt. Dies resultiert in einem stetigen Bahnverlauf. (Angelehnt an [137])

Fälle, bei denen der Winkel zwischen zwei benachbarten Prozessflächen zu ausgeprägt ist, um eine stetige Aufbereitung unter Einhaltung der Orthogonalitätstoleranz zu ermöglichen, erfordern alternative Bahnoptimierungsstrategien.

Strategie C: Move-Away in Kombination mit Prozessansteuerung

Strategie (C) wird entsprechend Abbildung 33 angewendet, wenn stärker ausgeprägte Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen (Bedingungen 1, 2 und 3) bei einer reinen Vor- und Nachdrehung zu einer Verletzung der Orthogonalitätstoleranz $\frac{\delta}{2}$ (Bedingung 4) führen würden aber ein maximaler Neigungswinkel-schwellwert Φ (Bedingung 5) nicht überschritten wird. Es gilt in diesem Fall

$$\frac{\delta}{2} < \frac{\alpha}{2} < \frac{\Phi}{2} \quad (5.17)$$

Nachfolgende Abbildung 36 illustriert Strategie C für den in Formel 5.17 spezifizierten Fall.

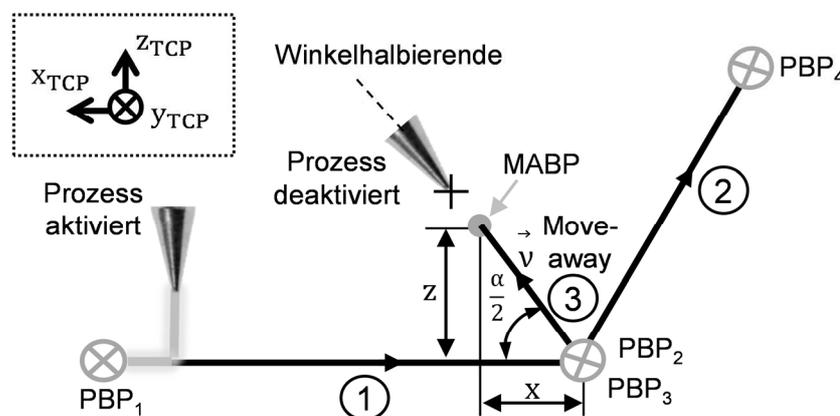


Abbildung 36: Move-Away in Kombination mit Prozessansteuerung (Angelehnt an [137])

Die dargestellte Prozessbahn ist definiert durch die Prozessbahnpunkte PBP_1 bis PBP_4 , wobei die beiden Segmente (1) und (2) einen Winkel α einschließen. Die Grundidee der Behandlung dieses Falls ist eine Umorientierung des Werkstücks relativ zum Werkzeug in einem definierten "Move-Away" Abstand \vec{v} . Hierfür wird ein neuer Bahnpunkt MABP berechnet, welcher sich auf der Winkelhalbierenden des Scheitelpunktes befindet und einen Winkel $\frac{\alpha}{2}$ mit den Prozessbahnsegmenten (1) und (2) einschließt. Die Koordinaten von MABP setzen sich zusammen aus den Koordinaten der ursprünglichen Bahnpunkte $PBP_{2/3}$ im Scheitelpunkt und einem Vektor \vec{v} . Die Ausrichtung des Koordinatensystems von MABP entspricht der mittleren Ausrichtung von PBP_2 und PBP_3 . (Angelehnt an [137])

Durch Anwendung des Optimierungsalgorithmus wird MABP zwischen PBP_2 und PBP_3 in den Programmablauf eingefügt, wobei PBP_2 und PBP_3 unverändert bleiben. Als Ergebnis erfolgt eine orthogonale Relativbewegung (3) zwischen Werkstück und

Werkzeug in den Segmenten (1) und (2). Die notwendige Rotation des Bauteils findet aufgrund der Koordinatensystemausrichtung von MABP hälftig bei der Bewegung von PBP₂ zu MABP und von MABP zu PBP₃ statt. Um eine Prozessunterbrechung in den Umorientierungsabschnitten PBP₂/MABP und MABP/PBP₃ zu ermöglichen, was insbesondere bei auftragenden Prozessen von Bedeutung ist, wird zusätzlich durch den Algorithmus ein Prozesskontrollparameter in den Programmablauf integriert. Dieser unterbricht den Prozess bei dem Erreichen von PBP₂ und reaktiviert diesen an dem Prozessbahnpunkt PBP₃. Geeignete Kommunikationsschnittstellen zur Prozessausrüstung vorausgesetzt, wird die Robotersteuerung durch diese Vorgehensweise zu einer übergeordneten Zellensteuerung, über welche adaptiv Einfluss auf die Bearbeitungsaufgabe genommen wird.

Strategie D: Move-Away in Kombination mit Vor-/Nachdrehung und Prozessansteuerung

Strategie D kommt entsprechend des Strategieauswahlbaums zum Tragen, wenn ein zu behandelnder Winkel α (Bedingungen 1, 2 und 3) zweier benachbarter Prozessflächen sowohl größer als die Orthogonalitätstoleranz $\frac{\delta}{2}$ (Bedingung 4) als auch der Neigungswinkelschwellwert Φ (Bedingung 5) ausgeprägt ist. Es gilt:

$$\frac{\alpha}{2} > \frac{\Phi}{2} > \frac{\delta}{2} \quad (5.18)$$

Unbehandelt könnte dieser Fall zu einer Kollision von Werkstück und Werkzeug führen. Abbildung 37 illustriert diesen Fall sowie dessen Behandlung.

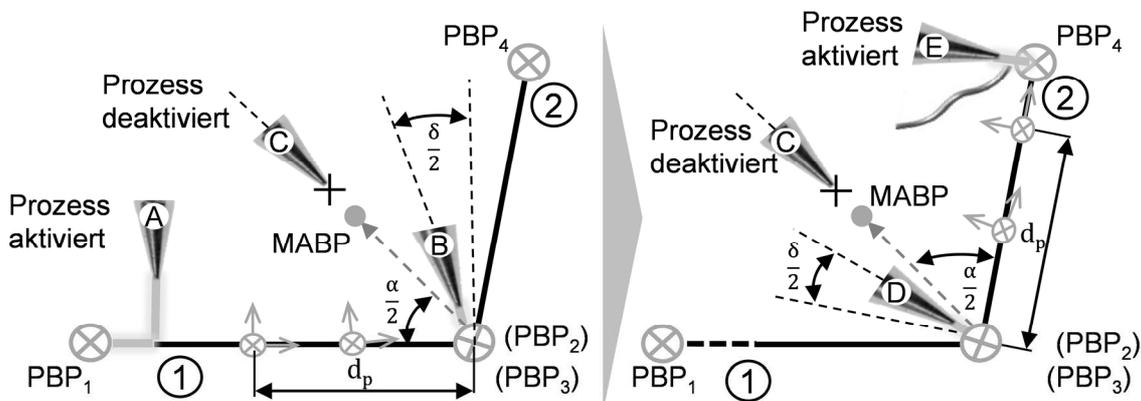


Abbildung 37: Move-Away mit Vor-/Nachdrehung und Prozessansteuerung (Angelehnt an [137])

Linkseitig ist die Behandlung des ersten Bearbeitungssegments (1) dargestellt und rechtsseitig die Behandlung des zweiten Segments (2). (A) bis (E) stellen die aufeinanderfolgenden Bearbeitungsschritte dar, wobei die Schritte (A) bis (B) bezogen sind auf Segment (1), (D) bis (E) auf Segment (2) und (C) eine Move-Away Umorientierung repräsentiert. Bei der Annäherung (1) des Werkzeugs an die Position des ehemaligen Prozessbahnpunkts PBP₂, wird das Werkstück sukzessive rotiert (2),

bis analog Strategie A die maximal erlaubte rotatorische Abweichung von der Orthogonalitätsanforderung $\frac{\delta}{2}$ erfüllt ist. Nach Erreichen dieses Punktes, wird der Prozess automatisch deaktiviert und in Schritt (C) das Werkstück in eine Move-Away Position MABP bewegt. Entsprechend Strategie C wird MABP auf der Winkelhalbierenden zwischen den Segmenten (1) und (2) errechnet. Im Nachgang wird der Prozessbahnpunkt PBP_3 angefahren (D), wobei dessen neu ermittelte Orientierung die Orthogonalitätsanforderung $\frac{\delta}{2}$ relativ zur Bearbeitungsebene erfüllt. Bei Erreichen von PBP_3 wird der Prozess reaktiviert und das Werkstück sukzessive bei der Bewegung in Richtung PBP_4 verdreht, bis sich bei Erreichen von PBP_4 (5) eine orthogonale Ausrichtung von Werkstück zu Werkzeug einstellt. (Angelehnt an [137])

5.2.4 Anpassung der Bewegungsparameter

Nach der geometrischen Trajektorienmodifizierung entsprechend erläuterter Optimierungsstrategien, erfolgt im Weiteren eine Anpassung der Bewegungsparameter des Roboters, um eine kontinuierliche Relativgeschwindigkeit der Bearbeitungsflächen zum Werkzeug zu gewährleisten. Dies ist notwendig, da die Länge der optimierten Trajektorie von der Länge der ursprünglichen Trajektorie abweicht. Ziel einer Anpassung der Bewegungsparameter ist dementsprechend eine gleichmäßige Bearbeitungsgeschwindigkeit auf der Bauteiloberfläche. Diese Anpassungen werden in Relation zu Abbildung 38 und Abbildung 39 erläutert.

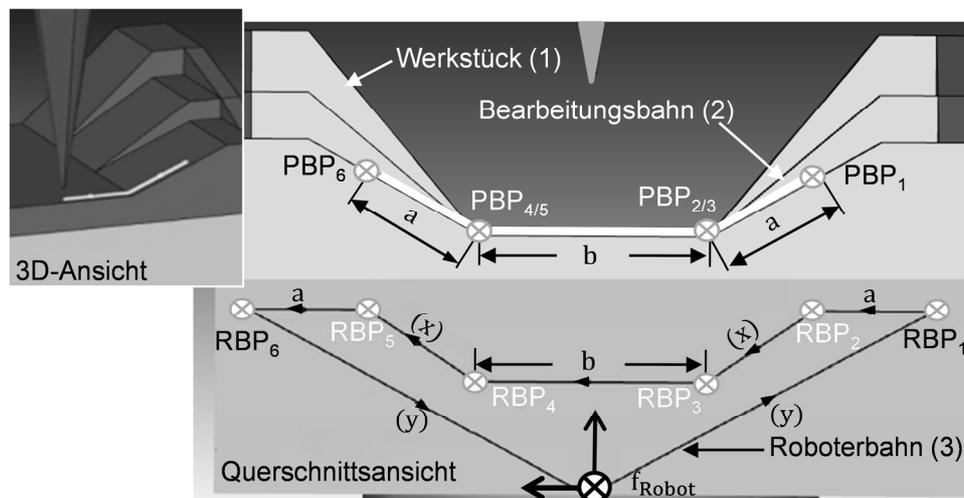


Abbildung 38: Original Pfade (3D-Ansicht und Querschnittsansicht)

Abbildung 38 zeigt ein symmetrisches Werkstück (1) mit einer aus drei Segmenten bestehenden Bearbeitungsbahn (2). Die Segmente sind definiert durch PBP_1/PBP_2 (a), PBP_3/PBP_4 (b) und PBP_5/PBP_6 (a). Die Prozessbahnpunkte PBP_2 und PBP_3 beziehungsweise PBP_4 und PBP_5 nehmen dieselben kartesischen Koordinaten ein, aber ihre Ausrichtungen weichen entsprechend dem jeweils zugehörigen Segment voneinander ab.

Die Roboterbahn (3), welche das Roboterhandwurzel-Koordinatensystem f_{Robot} während der Bearbeitung durchläuft, ist vorgegeben durch die Roboterbahnpunkte RBP_1 bis RBP_6 . Aufgrund der voneinander abweichenden Orientierung von PBP_2 und PBP_3 beziehungsweise PBP_4 und PBP_5 ist eine translatorische Roboterbewegung definiert durch RBP_2 und RBP_3 beziehungsweise RBP_4 und RBP_5 von x mm notwendig. Die Roboterbahnsegmente y repräsentieren nicht bearbeitungsrelevante An- und Abfahrbereiche vor Bearbeitungsbeginn und nach Bearbeitungsende.

Die gleiche Bearbeitungsaufgabe nach einer Optimierung gemäß eingeführter Strategien ist in nachfolgender Abbildung 39 dargestellt.

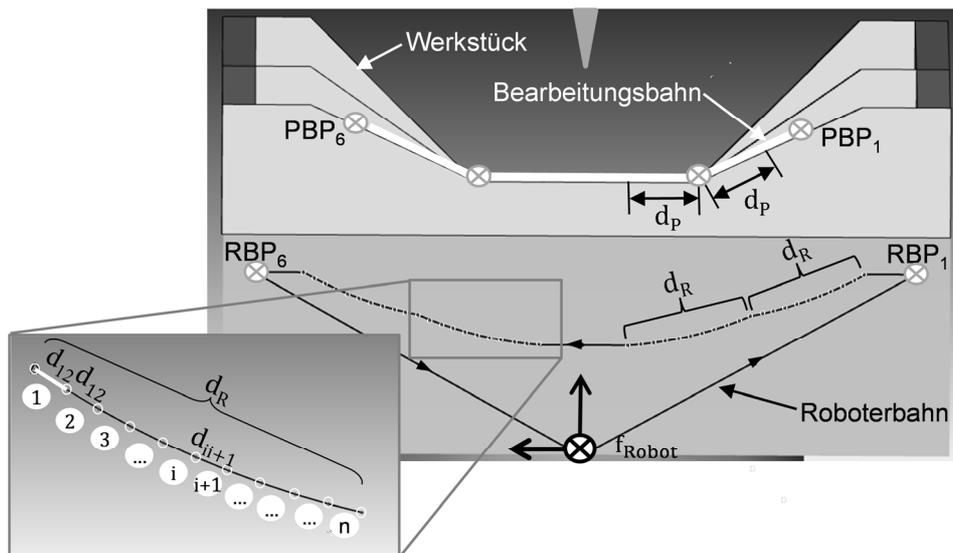


Abbildung 39: Optimierte Roboterbahn

Durch die Optimierung werden die ursprünglichen Roboterbahnpunkte RBP_2 bis RBP_5 in dem Robotersteuerungsprogramm durch eine definierte Anzahl n Feininterpolationspunkte mit einer graduellen Anpassung der Koordinatensystemausrichtung ersetzt. Aus Sicht des Werkstücks resultiert dies in einer Vor- und Nachdrehung der Werkstückoberfläche relativ zum Werkzeugkoordinatensystems K_{Tool} auf einer definierten Prozessbahnlänge d_p . Aus Sicht des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems f_{Robot} , welches die Roboterbahn durchläuft, stellt sich dies anders dar. Um die Länge d_p auf der Werkstückoberfläche zu erreichen, bewegt sich das Roboterhandwurzel-Koordinatensystem f_{Robot} auf der Roboterbahn auf einer Länge d_R , wobei gilt $d_R > d_p$ (In dem spezifischen Beispiel $d_R = \sim 2 \cdot d_p$). Eine konstante Geschwindigkeit von f_{Robot} angenommen, würde dieser Umstand in einer reduzierten Bearbeitungsgeschwindigkeit auf der Werkstückoberfläche im Vergleich zu den planaren Bereichen resultieren. Dies wiederum bedingt Ungleichmäßigkeiten des Prozessergebnisses. Entsprechend ist in diesen Bereichen der Roboterbahn eine erhöhte Geschwindigkeit von f_{Robot} auf der Roboterbahn notwendig, um eine gleichmäßige Bearbeitungsgeschwindigkeit von K_{Tool} am Eingriffsort zu gewährleisten.

Hierzu wird in einem ersten Schritt die Zeit t_{dP} ermittelt, welche das Roboterhandwurzel-Koordinatensystem f_{Robot} benötigen würde, um die Strecke d_P mit gleichmäßiger Bearbeitungsgeschwindigkeit v_P ohne eine Vor-/Nachdrehung zu durchlaufen. Dabei ist t_{dP} identisch mit dem Zeitaufwand t_{dR} zum Durchlaufen der Strecke d_R . Dieser Zeitaufwand $t_{dP} = t_{dR}$ teilt sich nunmehr gleichmäßig auf die von den n neuen Bahnpunkten begrenzten Streckenabschnitte auf. Für jeden der Streckenabschnitte d_{ii+1} wird schlussendlich ein neuer Geschwindigkeitswert v_{ii+1} ermittelt. Werden diese Zusammenhänge in einer Formel zusammengefasst so gilt

$$v_{ii+1} = \frac{n \cdot d_{ii+1} \cdot v_P}{d_P} \quad \text{mit } i = 1 \dots n \quad (5.19)$$

Individuell errechnet und als Geschwindigkeitswert gesetzt für jeden der Streckenabschnitte n , wird eine konstante Bearbeitungsgeschwindigkeit und entsprechend ein gleichmäßiges Prozessergebnis erzielt.

5.2.5 Inverse Koordinatentransformation

Im letzten Schritt des Optimierungsalgorithmus wird die angepasste Trajektorie über eine inverse Koordinatentransformation zurück in das Ursprungs-Koordinatensystem überführt. Dabei werden die in Abschnitt 5.2.1 erläuterten Einzelschritte in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt. Jeder Vektor ${}^{\text{RBP}'_i} \vec{a}_{\text{Tool}}$ wird hierzu invertiert, um die Position der Roboterbahnpunkte RBP'_i im Werkzeugkoordinatensystem K_{Tool} zu erhalten. Im Nachgang werden die Vektoren um Ihre negativen PBP-Rotationen $-\gamma$ (z_{Tool}), $-\beta$ (y_{Tool}) und $-\alpha$ (x_{Tool}) verdreht. Ergebnis dieser Berechnungen ist ein zum Werkzeugkoordinatensystem kongruentes PBP'_n Koordinatensystem.

Nach Abschluss der inversen Koordinatentransformation liegt eine optimierte und stetige Robotertrajektorie vor.

5.3 Zusammenfassung und Beurteilung

In vorangegangenen Ausführungen wurde eine Methode zur Optimierung komplexer dreidimensionaler Robotertrajektorien hinsichtlich ihrer Stetigkeit vorgestellt. Durch die beschriebene, exakt definierte Erweiterung der originalen Trajektorie mit zusätzlichen Feininterpolationspunkten, ist eine deterministische Bewegung sowohl örtlich als auch zeitlich im Hinblick auf die Geschwindigkeit des Roboter-Handwurzelkoordinatensystems möglich. Alternative Bahnoptimierungsansätze, zum Beispiel über B-Splines, weisen in diesem Kontext Nachteile insbesondere bezüglich der Konturtreue der Bahn auf, welche über die vorgestellte Vorgehensweise umgangen werden. Durch die Bewegung des Roboters auf einer Ausgleichsschleife bei Unstetigkeiten in der Bearbeitungsebene, können Ecken exakt ausgefahren und damit eine hohe Konturtreue der prozessrelevanten Bewegung erreicht werden. Abrupte Bewegungsrichtungsänderungen des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems werden umgangen. Ein definiertes Vor- und Nachdrehen in

Unstetigkeitsbereichen senkrecht zur Bearbeitungsebene unter Berücksichtigung prozessspezifischer Randbedingungen, ermöglicht das genaue Abfahren dieser Unstetigkeiten unter Beibehalt einer hohen Prozessqualität. Schlagartige Umorientierungen des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems werden vermieden. Abschließend ermöglicht die Methode eine Berücksichtigung und Behandlung von Fällen, bei denen zusätzlich zu einer geeigneten Bahnplanung auch Einfluss auf die Prozessausrüstung genommen werden muss und die Robotersteuerung dadurch in den Status einer übergeordneten Bearbeitungszellensteuerung überführt wird.

Dabei ist die erforschte Methode unabhängig von der kinematischen Ausführung des eingesetzten Manipulators, da Daten und Koordinatensystembeziehungen genutzt werden, die elementare Bestandteile sämtlicher Robotertrajektorien-Definitionen sind. Eine kinematische Beschreibung des Manipulators z. B. über Denavit-Hartenberg-Parameter ist nicht notwendig. Dies erhöht die universelle Einsetzbarkeit nicht nur für Robotermodelle unterschiedlicher Hersteller sondern ebenfalls für verschiedene Kinematiktypen. Bewusst wird bei den Berechnungen trotz gewisser Vorzüge auf eine Quaternionendarstellung verzichtet und stattdessen Euler-Winkel genutzt, da diese herstellübergreifend als übliche Winkelrepräsentation eingesetzt werden, was die Übertragbarkeit erleichtert. Im Weiteren ist eine Prozessunabhängigkeit der vorgestellten Methode gewährleistet, da das Verhalten der Optimierungsalgorithmen über die Einstellparameter flexibel an die Randbedingungen der jeweiligen Applikation adaptiert werden kann.

Ein Softwaretool, in welches die vorgestellten Algorithmen zur automatisierten Aufbereitung von Robotertrajektorien implementiert wurden, wird in Abschnitt 7.2.1 vorgestellt. In den sich anschließenden Abschnitten 7.2.2 und 7.2.3 werden die experimentellen Untersuchungsergebnisse erläutert.

Zusammenfassend wird der Anwender durch die vorgeschlagene Vorgehensweise deutlich bei einer optimalen automatisierten Neuerstellung von Robotertrajektorien für komplexe dreidimensionale Bearbeitungsaufgaben mit hohen Genauigkeitsanforderungen unterstützt. Dabei bildet die optimierte Trajektorie die wesentliche Voraussetzung für eine konturtreue Bewegungsausführung durch den Roboter, da die in Kapitel 3 aufgezeigten negativen Effekte in Unstetigkeitsbereichen vermieden werden. Sind auch zur Prozesslaufzeit genauigkeitssteigernde Maßnahmen notwendig, kann dies über Regelung der Roboterbewegung erfolgen. Ein entsprechendes Regelungssystem wird im Folgekapitel 6 vorgestellt.

6 Universelles Regelungssystem zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern

Während die Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern bereits seit Jahrzehnten im Fokus wissenschaftlicher Bemühungen steht, sind die bekannten Ansätze oftmals mit Defiziten behaftet. Kalibrierverfahren erfordern ein tiefgreifendes Wissen der spezifischen Kinematik, sind zumeist beschränkt auf einen Robotertyp oder können Effekte wie Verschleiß, Temperatur oder variierende Lasten nur unzureichend abbilden. Diese Handlungsbedarfe werden bei einer sensorbasierten Roboterführung umgangen, da Abweichungen unabhängig von ihrer Herkunft eliminiert werden können. Beschränkungen zeigen bekannte Systeme jedoch zumeist in Hinblick auf dem Zusammenspiel von geometrischer Genauigkeit, Zeiteffizienz oder mangelnder Universalität bezüglich Applikation oder ausführender Kinematik. Diese Aufgabenstellungen werden in den nachfolgend erläuterten Forschungsarbeiten aufgenommen und Lösungsmöglichkeiten erörtert.

Die Architektur des entwickelten Regelungssystems wird in Abschnitt 6.1 vorgestellt und die zentralen funktionalen Komponenten beschrieben. Die Methode zum Ausgleich von Soll-/Ist-Abweichungen bei der Bewegungsausführung ist Inhalt von Abschnitt 6.2 Die Erfassung des Ist-Zustands als Regelgröße wird in Abschnitt 6.3 erläutert und in Abschnitt 6.4 die Ermittlung des Soll-Zustands als Führungsgröße dargestellt. Abschließend zusammengefasst werden die gewonnenen Erkenntnisse in Abschnitt 6.5 und die Übertragbarkeit auf weitere Applikationen aufgezeigt.

Einzelne Aspekte der Ausführungen der Folgeabschnitte 6.1 bis 6.5 sowie der Abschnitte 7.1 und 7.3, welche die Umsetzung und Evaluierung beschreiben, sind an den am Lehrstuhl FAPS entstandenen und vom Autor ko-betreuten studentischen Arbeiten [14], [48], [49], [143–161] angelehnt. Bestandteile und Vorarbeiten der dargestellten Methoden und Erkenntnisse wurden der internationalen Fachwelt auch in den vom Autor erstellten Veröffentlichungen [131] bis [136] und [162] zugänglich gemacht, die Abschnitte und Abbildungen sind entsprechend gekennzeichnet.

6.1 Systemarchitektur

Übergeordnete Anforderung an die Systemarchitektur ist deren prinzipielle Unabhängigkeit von proprietären bzw. herstellerabhängigen Robotersteuerungssystemen einerseits und spezifischen Applikationen andererseits. Daraus resultiert die Erfordernis, wesentliche Teile der Datenverarbeitungsalgorithmen auf separate Berechnungseinheiten auszulagern und damit einhergehend eine Robotertypabhängigkeit zu vermeiden. Applikationsseitig ermöglicht diese Herangehensweise die Nutzung quasi beliebiger Sensortypen mit einer externen, anwendungsbezogenen Datenverarbeitung. Auch die Ausprägung der Berechnungseinheiten sowie der notwendigen Kommunikationsschnittstellen ist möglichst universell zu gestalten um

einerseits den Kostenaufwand zu reduzieren und andererseits die flexible Adaptierbarkeit an neue Gegebenheiten zu gewährleisten. Erläutert wird das erforschte System anhand der Beispielapplikation zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern.

Ein vielversprechender Ansatz diese Anforderungen zu erfüllen ist der Einsatz einer verteilten Anwendung, welche in Abschnitt 6.1.1 diskutiert wird, gefolgt von einer Erörterung der funktionalen Komponenten in den Abschnitten 6.1.2 und 6.1.3.

6.1.1 Aufbau und Funktionsweise der verteilten Anwendung

In der untersuchten verteilten Anwendung werden die etablierten Fähigkeiten proprietärer Robotersteuerungen, wie z. B. Denavit-Hartenberg-Transformation, Sicherheitsmechanismen, Kaskadenregelung, roboterinterne Regelung etc. genutzt und gleichzeitig durch Zusatzfunktionen einer übergeordneten Regelungseinheit ergänzt. Zur Erweiterung des Funktionsspektrums wird die Datenverarbeitung von der Robotersteuerung auf externe Einheiten mit erweiterten Berechnungsmöglichkeiten verlagert. Dies gewährleistet eine größtmögliche Einsetzbarkeit und Übertragbarkeit des Ansatzes auf eine Vielzahl von existierender und erprobter Hardware im Fertigungsumfeld. Der prinzipielle Aufbau des Systems ist in Abbildung 40 illustriert.

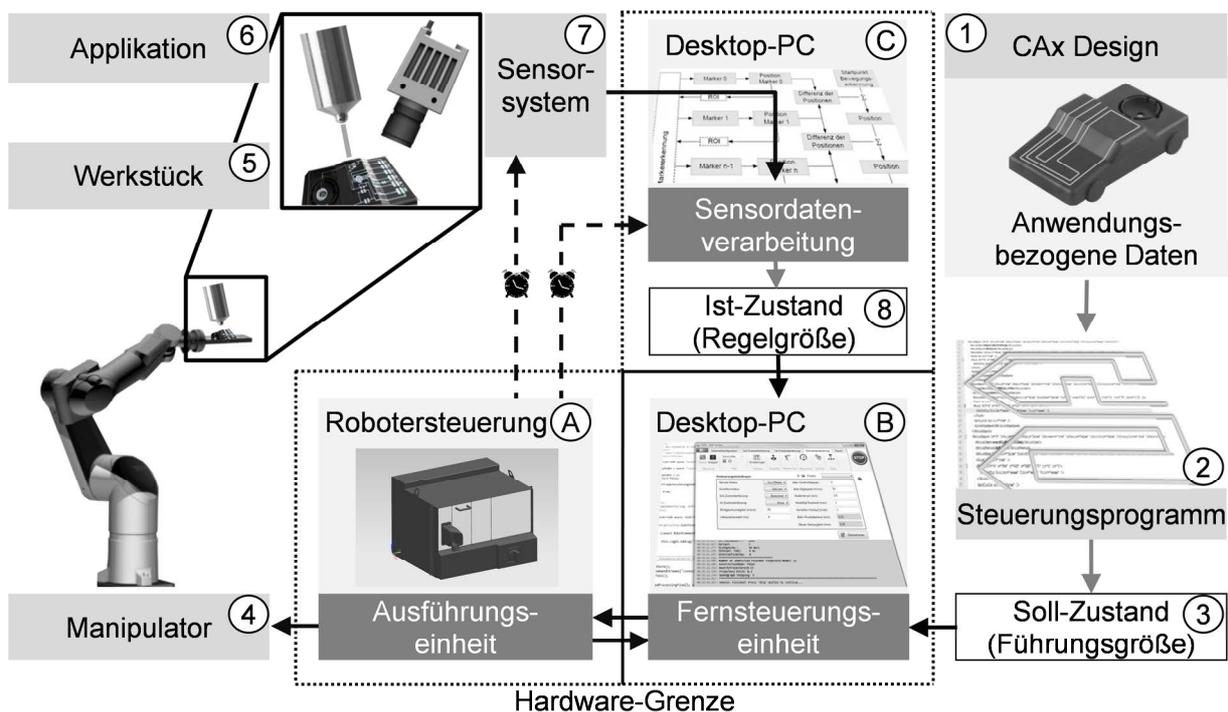


Abbildung 40: Systemarchitektur der verteilten Anwendung (angelehnt an [136])

Wie in Abschnitt 2.4.2 diskutiert, erfolgt die Programmierung komplexer Roboterbewegungsaufgaben zumeist offline in der Arbeitsvorbereitung, entweder durch die Nutzung graphischer Kinematik-Simulationstools (1) mit einer nachgeschalteten Generierung eines Steuerungsprogramms oder direkt textuell (2). Elementarer Bestandteil des Steuerungsprogramms ist hierbei der Soll-Zustand der Bewegung als

Führungsgröße (3). Konventionellerweise wird dieses Steuerungsprogramm auf die Robotersteuerung (A) übertragen und ein verbundener Manipulator (4) entsprechend der hinterlegten Bewegungsanweisungen auf der definierten Trajektorie bewegt, wobei z. B. ein Werkstück (5) relativ zu einem feststehenden Werkzeug (6) verfahren wird oder vice versa. Aufgrund der diskutierten Absolut(un)genauigkeit erfolgt diese Relativbewegung auf einer Ist-Trajektorie, welche von der im Steuerungsprogramm vorgegebenen Soll-Trajektorie abweicht. (angelehnt an [136])

Dieser statische Charakter wird durch die verteilte Anwendung zur Regelung der Roboterbewegung aufgebrochen. Über die Erfassung der realen Bewegung über Sensorsysteme (7) mit nachgeschalteter Sensordatenverarbeitung (C) wird zur Bewegungslaufzeit der Ist-Zustand (8) als Regelgröße ermittelt. Zusammengeführt werden Führungsgröße (3) und Regelgröße (8) in der auf einem separaten Datenverarbeitungssystem laufenden Fernsteuerungseinheit (C), welche basierend auf Soll- und Ist-Daten kontinuierlich angepasste Roboterbewegungsbefehle berechnet. Diese Roboterbewegungsbefehle berücksichtigen z. B. einen Ausgleich der Abweichungen von Ist- zu Soll-Bewegung. Die Kommunikation innerhalb der verteilten Anwendung erfolgt mittels nutzlastoptimierter, universell interpretierbarer Binärdaten sowie vereinzelt im Falle zeitunkritischer Vorgänge als Zeichenketten, welche sukzessive an die auf der Robotersteuerung ablaufende Ausführungseinheit (A) übermittelt werden. Die Ausführungseinheit interpretiert die Daten und setzt diese um. Hierbei ist die Ausführungseinheit in der proprietären, roboterhersteller-spezifischen Metasyntax ausgeführt. Dabei fungiert die Ausführungseinheit nicht nur als Befehlsempfänger, sondern abhängig von der Echtzeitfähigkeit der Komponenten innerhalb der verteilten Anwendung zudem als Taktgeber, wodurch deren zeitliche Synchronisierung erreicht wird. Dies ist möglich, da Robotersteuerungen über eingebettete PC-Systeme mit einem echtzeitfähigen Betriebssystem (z. B. VxWorks, RTLinux) verfügen. Über Rückkanäle zu Sensorsystem (7), Sensordatenverarbeitungsrechner (C) und Fernsteuerungseinheit (B) können unter Ausnutzung dieser Echtzeitfähigkeit gezielt Ereignisse ausgelöst oder Zustände angefordert werden. Dessen ungeachtet sind zeitliche Variationen bei den Datenverarbeitungsaufgaben innerhalb der verteilten Anwendung möglichst gering, bevorzugt mit ausreichend „weichen“ Echtzeitbedingungen zu gewährleisten. Bilden echtzeitfähige Systeme die Basis der Verarbeitungsrechner in der verteilten Anwendung, können diese Rückkommunikationskanäle entfallen und die zeitliche Synchronisierung bevorzugt über die Fernsteuerungseinheit (B) erfolgen.

Diese hybride Architektur verbindet die Verarbeitungsmöglichkeiten externer Berechnungseinheiten mit einer Robotertyp und -hersteller spezifischen Kontrolle des Manipulators. Die Eingangs des Abschnitts genannten Robotergrundfunktionalitäten müssen somit nicht aufwändig nachgebaut werden, sondern werden vielmehr durch eine übergeordnete Steuerung mit genutzt. Das Robotersystem verfügt hierbei

über kein umfassendes Wissen bezüglich der abzufahrenden Trajektorie sondern wird vielmehr durch die Fernsteuerungseinheit ferngesteuert, welche auch die Bahnplanung übernimmt. Ob diese Bahnplanung nunmehr den Bereich der Genauigkeitssteigerung adressiert oder eine alternative Applikation umfasst, wie z. B. Griff in die Kiste oder Gestensteuerung, bleibt für das Robotersystem ebenso irrelevant wie die Datengrundlage der Bahnplanung, welche z. B. auf beliebigen Sensortypen basiert. Ebenso flexibel ist die Architektur im Hinblick auf das ausführende Robotersystem, da die zugehörige Steuerung nur grundlegende Funktionen zur Verarbeitung von Binärdaten bereitstellen muss. Ob eine Verteilung der Berechnungsumfänge auf mehrere externe Berechnungseinheiten (B), (C) erfolgt, ist lediglich abhängig von den zur Verfügung stehenden Berechnungskapazitäten.

Die zentralen Funktionen einer geeigneten PC-seitigen Fernsteuerungseinheit (B) und robotersteuerungsseitigen Ausführungseinheit (A) werden in den Folgeabschnitten kurz beschrieben.

6.1.2 Fernsteuerungseinheit

Funktional setzt sich die Fernsteuerungseinheit aus vier Hauptmodulen zusammen. Diese Module und deren Zusammenwirken ist in Abbildung 41 visualisiert.

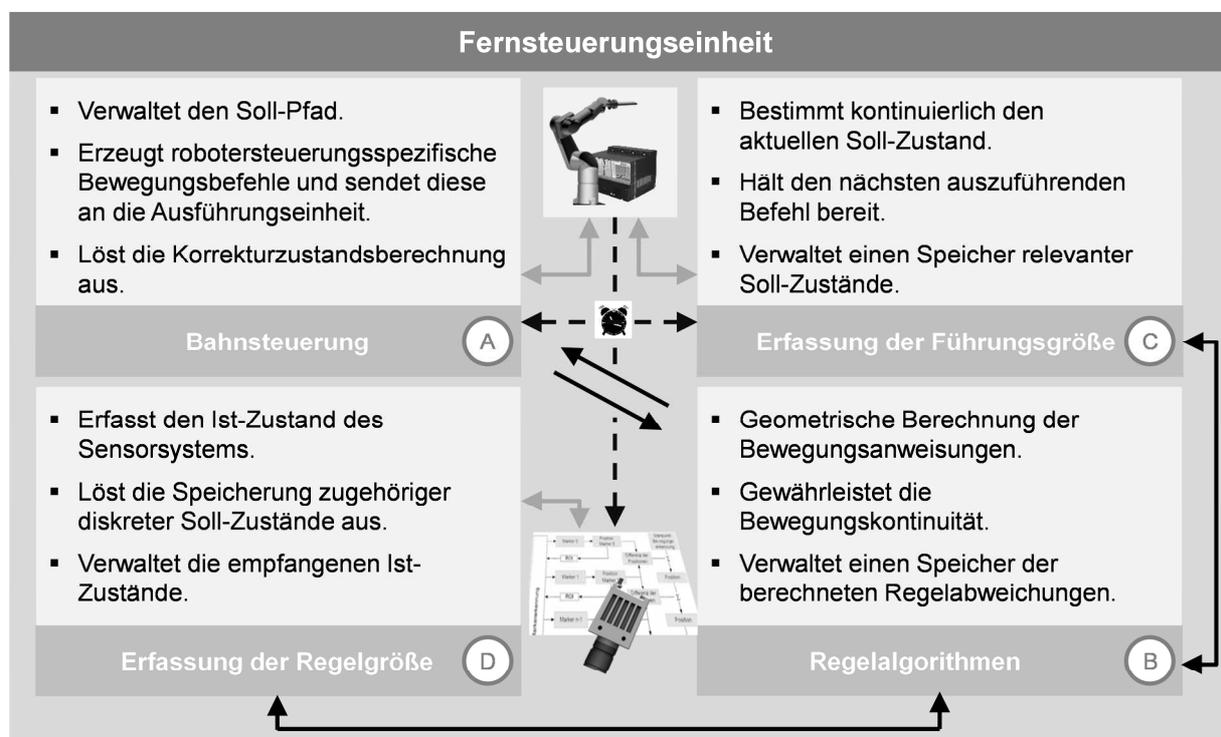


Abbildung 41: Module der Fernsteuerungseinheit

Das Bahnsteuerungsmodul (A) verwaltet die seitens des Steuerungsprogramms vorgegebenen trajektorienrelevanten Stützstellen (z. B. Eckpunkte), arbeitet diese

sukzessive ab und löst die Korrektur-Zustandsberechnung (B) aus. Im Weiteren wandelt die Bahnsteuerung die geometrischen Bewegungsanweisungen der Korrektur-Zustandsberechnung in Binärdaten um und übermittelt diese kontinuierlich an die Ausführungseinheit. Entsprechend kann die Bahnsteuerung als zentraler Schnittstellen- und Treiberbaustein zur proprietären Robotersteuerung angesehen werden. Die Korrektur-Zustandsberechnung (B) stellt im übertragenen Sinne den Algorithmus des eigentlichen Reglers im Regelkreis dar (Abschnitt 6.2). Die wesentlichen Aufgaben dieses Moduls sind die Berechnung geometrischer Vorgabewerte für die kontinuierliche Bewegung der Kinematik basierend auf Ist- und Soll-Zustand. Die Berechnungsalgorithmen sind hierbei applikationsabhängig anpassbar. Zentrale Aufgabe von Funktionsmodul (C) ist eine kontinuierliche Erfassung des aktuell relevanten Soll-Zustands (Abschnitt 6.4) sowie zusätzlich die zeitliche Steuerung der Anweisungszustellung an die Bahnsteuerung und Verwaltung der relevanten Soll-Zustände. Modul D (Abschnitt 6.3) bildet die Schnittstelle zur Erfassung des Ist-Zustands bzw. zu einem Sensorsystem und übernimmt im Weiteren die Ermittlung des jeweils zugehörigen Soll-Zustands zu jedem diskreten Ist-Zustand.

6.1.3 Ausführungseinheit

Die robotersteuerungsseitige Ausführungseinheit dient der Verarbeitung von über das Netzwerk übermittelten Binärdaten und deren Interpretation in robotersteuerungsspezifische Anweisungen bzw. Funktionen. Dabei kann die Ausführungseinheit auf übergeordneter Ebene als roboterspezifische Treiberschnittstelle verstanden werden. Innerhalb der Architektur stellt die Ausführungseinheit zudem eine aktive Komponente dar, welche als Taktgeber für die weiteren Systeme der verteilten Anwendung fungiert. Abbildung 42 skizziert die wesentlichen Schritte der Verarbeitungskette.

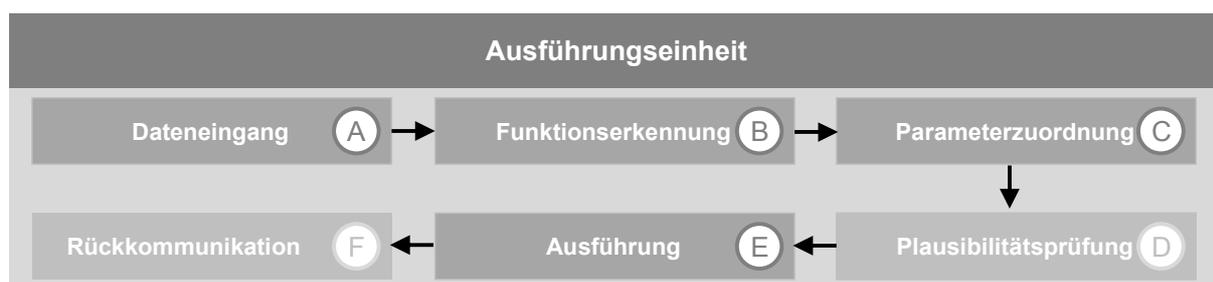


Abbildung 42: Datenverarbeitung der Ausführungseinheit

Am Dateneingang (A) wartet ein Verarbeitungszeiger auf das Eintreffen von Daten. Erfolgt ein Eingang, so liest der Zeiger eine vorgegebene Anzahl an Einzelzeichen aus dem Datenstrom und wandelt die binären/byteweisen Daten wieder in die Zeichenkette um. Im Nachgang werden die Funktionen erkannt (B). Dies dient zur Identifikation der auszuführenden Unterfunktionen. Die Erkennung erfolgt mittels des Suchens nach bestimmten Zeichen. Bei einem Sucherfolg werden die empfangenen

Daten in die zwei Teile Funktionsname und Parameterteil getrennt. In der anschließenden Parameterzuordnung (C) findet – je nach erkanntem Funktionsnamen – eine Wert- und Typzuordnung des Parameteranteils statt, entsprechend der Vorgabe einer implementierten Unterfunktion. Hierbei wird der Parameterteil aufgetrennt und dessen Einzelbestandteile extrahiert. Optional werden im Anschluss die ermittelten Einzelparameter einer Plausibilitätsprüfung (D) unterzogen. Ziel ist es sicherzustellen, dass alle Parameter definiert und deren Werte in einem vorgegebenen Bereich liegen. Im Nachgang wird die angeordnete Funktion ausgeführt (E). Hierbei findet eine Interpretation der erkannten Unterfunktion samt Parametersatz in das robotersteuerungsspezifische Pendant statt. Handelt es sich bei der Funktion um einen Abfragebefehl, z. B. eines Ausführungsberichts, so erfolgt optional eine Rückkommunikation (F).

Bewusst ist die Ausführungseinheit sehr schlank ausgeführt. Dies erleichtert zum einen die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Robotersteuerungstypen und wird zum anderen auch weniger performanten Robotersteuerungen gerecht. Berechnungsintensive Operationen, wie z. B. die nachfolgend beschriebene Bahnsteuerung oder die Ausführung der Regelalgorithmen, werden dementsprechend jenseits der Robotersteuerung ausgeführt.

6.2 Bahnsteuerung und Regelkreissystematik

Kernelemente von Regelungssystemen robotischer Bewegungen sind die Bahnsteuerung zum einen und geeignete Algorithmen zur Ermittlung angepasster Bewegungsbefehle zum anderen. In Abschnitt 6.2.1 werden die Möglichkeiten zur Bahnsteuerung diskutiert und in Abschnitt 6.2.2 eine neue Methode zur externen vektorbasierten Bewegungssteuerung vorgestellt. Die erforschten Feininterpolationsalgorithmen zur Ausregelung von Bewegungsabweichungen, unterteilt nach linearen und zirkularen Bahnabschnitten, sind Inhalt von Abschnitt 6.2.3.

6.2.1 Bahnsteuerung dreidimensionaler Robotertrajektorien

Zentrale Aufgabe der Bahnsteuerung ist die Berechnung der notwendigen Bewegungsabläufe zum Erreichen vordefinierter Positionen. Gängige Methoden der Bewegungssteuerung sind die Punkt-zu-Punkt Steuerung (PTP) sowie die interpolierte Bahnsteuerung (CP). Während bei der PTP-Steuerung das Roboterhandwurzel-Koordinatensystem auf einer nicht exakt definierten Bahn von einem Ausgangs- zu einem Zielpunkt verfahren wird, erfolgt bei CP-Bewegungen eine Definition auch der Trajektorie durch das Hinzufügen von Interpolationspunkten. Aufgrund dieses Unterschiedes qualifizieren sich PTP-Bewegung eher für prozessirrelevante Transferbewegungen oder einfache Handhabungsaufgaben, wohingegen CP-Bahnbewegungen genutzt werden, wenn die Ausprägung der Robotertrajektorie ausschlaggebend für das Prozessergebnis ist.

Maßgebliche Einflussgröße der erreichbaren Konturtreue bei CP-Bewegungen ist der durch die Robotersteuerung vorgegebene Interpolationstakt t_i . Dieser gibt an, in welchen Zeitabständen es der Robotersteuerung aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit möglich ist, bewegungsrelevante Kennwerte wie etwa Position, Beschleunigung oder Geschwindigkeit zu validieren, zu korrigieren und die Korrektur durch die Gelenke der Kinematik auszuführen. Über den elementaren Zusammenhang

$$d_i = t_i \cdot v_{\text{Soll}} \quad (6.1)$$

definiert der Interpolationstakt t_i den Abstand d_i der Stützpunkte S_i bei einer vorgegebenen Sollgeschwindigkeit v_{Soll} . Eine geringere Taktzeit resultiert entsprechend in einer erhöhten Anzahl an Interpolationspunkten und in Folge in einer besseren Konturtreue. Visualisiert ist der Zusammenhang in Abbildung 43.

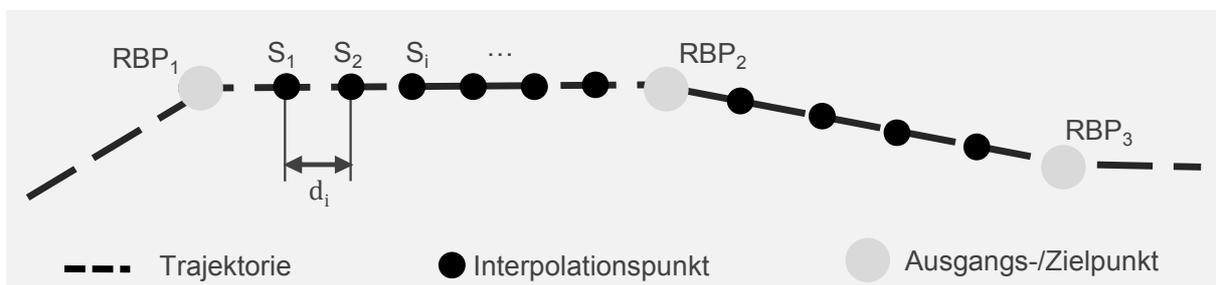


Abbildung 43: Interpolierte Bahnsteuerung (CP-Bewegung) (angelehnt an [136])

Eine weitere, in modernen Robotersteuerungen verfügbare Variante von CP-Bahnbewegungen, ist der Veränderungsmodus (z. B. ABB: EGM; KUKA: RSI; Stäubli: Alter; FANUC: DPM etc.). Beim Veränderungsmodus bietet die Robotersteuerung Schnittstellen, welche eine sensorgeführte Bewegung der Roboterhandwurzel ermöglichen. Bei dieser Verfahrensweise wird durch den Sensor die Abweichung des realen Ist-Zustands vom Soll-Zustand erfasst und ausgeglichen, wobei der Sensor zumeist direkt an der Robotersteuerung angebunden ist. Nachfolgende Abbildung 44 stellt die Funktionsweise anhand einer vorgegebenen und von der Robotersteuerung ausgeführten CP-Bahnbewegung dar.

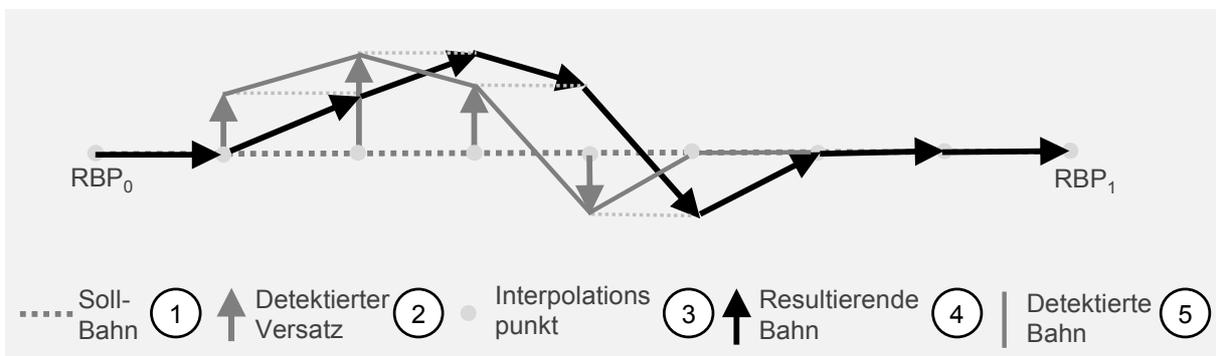


Abbildung 44: Funktionsweise des Veränderungsmodus

Die dargestellte Bahn ist festgelegt über einen linearen CP-Bewegungsbefehl, welche definiert ist durch die zwei Roboterbahnpunkte RBP_0 und RBP_1 . Während der Programmausführung wird das Roboterhandwurzel-Koordinatensystem entlang der geplanten Soll-Bahn (1) bewegt. Zeitgleich erfasst ein Sensor den Ist-Zustand und sendet in kontinuierlicher Abtasttaktung Regelgrößen an die Robotersteuerung. Basierend auf den Regelgrößen wird der geometrische Versatz (2) errechnet und bei jedem nachfolgenden Interpolationstakt berücksichtigt. Der Versatz wird hierzu durch die Robotersteuerung auf den nächsten anzufahrenden Interpolationspunkt (3) aufgeschlagen. Dadurch wird die von der Robotersteuerung ausgeführte geplante Bahn von dem detektierten Versatz überlagert und das Roboterhandwurzel-Koordinatensystem auf der resultierenden Bahn (4) bewegt. Eine beispielhafte Anwendung hierfür ist die Bewegung des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems mit gleichbleibendem Abstand relativ zu einem toleranzbehafteten Werkstück, wobei ein mechanischer Taster permanent mit der Werkstückoberfläche in Kontakt steht und deren tatsächliche Ausprägung (5) erfasst. (angelehnt an [136])

Während der beschriebene Veränderungsmodus eine Online-Positionskorrektur ermöglicht, welche steuerungsinterne Befehlsstacks und Teile roboterinterner Pfadplanungsalgorithmen umgeht, birgt dieser ebenfalls Nachteile. So ist diese Schnittstelle begrenzt auf einfache Sensortypen, welche numerische Werte als Regelgröße liefern, wie z. B. einen Abstand oder kartesische Koordinaten. Für spezifische Applikationen notwendige höherwertige Sensoren, wie z. B. Kamerasysteme, die eine komplexere Datenverarbeitung erfordern, können nicht mit dieser Schnittstelle verwendet werden. Auch ist die robotersteuerungsinterne Datenverarbeitung auf die proprietären, vom jeweiligen Roboterhersteller angebotenen Datenverarbeitungsroutinen und entsprechend freigegebenen bzw. kompatible Sensoren beschränkt. Des Weiteren ist die Datenverarbeitung, welche innerhalb der Robotersteuerung durchgeführt wird, von einer externen Sicht aus im Wesentlichen undurchsichtig. So bleibt für den außenstehenden Betrachter oder Anwender die Zuordnung individueller Führungs- und Regelgrößen unklar.

Zusammenfassend ermöglicht der Veränderungsmodus zwar eine effiziente Manipulation geplanter Soll-Bewegungsbahnen, birgt jedoch Nachteile insbesondere im Hinblick auf Universalität und Transparenz.

6.2.2 Methode zur vektorbasierten Bahnsteuerung

Um die aufgeführten Einschränkungen zu reduzieren und gleichzeitig die hohe Reaktivität des Veränderungsmodus auszunutzen, wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten eine modifizierte Ausführung hin zu einer vektorbasierten Bahnsteuerung entwickelt. Dies wird erreicht durch eine Verlagerung von Pfadplanung und der Berechnungslasten innerhalb der verteilten Anwendung von der Robotersteuerung zu externen Recheneinheiten.

Das Prinzip der entwickelten Bahnsteuerung ist in Abbildung 45 dargestellt.

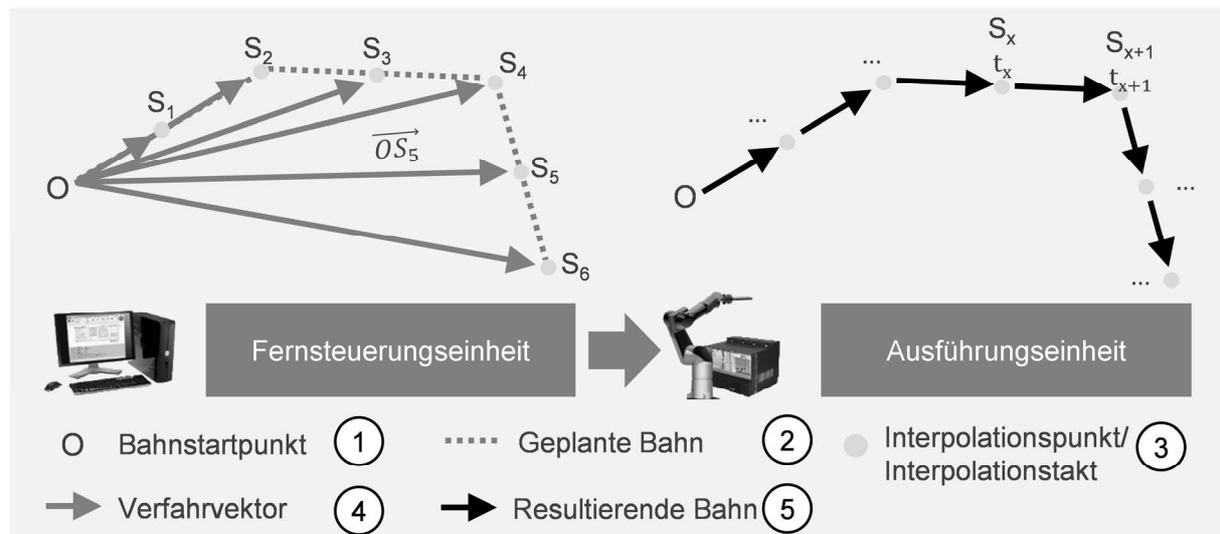


Abbildung 45: Vektorbasierte Bahnsteuerung (angelehnt an [136])

Zu Beginn der Bewegung wird der Bahnstartpunkt 0 (1) der Trajektorie von der Fernsteuerungseinheit an die auf der Robotersteuerung ablaufende Ausführungseinheit übermittelt und die Kinematik über die zugehörige Robotersteuerung in die Startposition verfahren. Anschließend werden von der Fernsteuerungseinheit kontinuierlich Fahrvektoren $\overrightarrow{OS_1}$ bis $\overrightarrow{OS_6}$ (4), ausgehend vom Startpunkt 0 zu dem jeweils nächsten Interpolationspunkt (3) berechnet. Die Interpolationspunkte basieren hierbei auf Führungsgröße, Regelgröße und optionalen Zusatzinformationen, z. B. Daten bezüglich Prozess oder Umgebung. Die ermittelten Fahrvektoren werden sukzessive im Interpolationstakt zur Ausführungseinheit übertragen und dort ausgeführt. Die Robotersteuerung rekonstruiert Vektoren $\overrightarrow{S_x S_{x+1}}$ (5) und bewegt die Roboterhandwurzel derart, dass am Ende jedes Interpolationstakts der jeweilige Interpolationspunkt erreicht wird. Gemäß dem grundlegenden Zusammenhang aus Formel 6.1, hängt die resultierende Geschwindigkeit v_{Soll} direkt von der Vektorlänge $\overrightarrow{S_x S_{x+1}}$ sowie dem, seitens der Robotersteuerung vorgegebenen Interpolationstakt t_x ab. In diesem Zusammenhang steigt somit mit abnehmender Interpolationstaktzeit die Sensitivität bzw. mögliche Taktung der externen Einflussnahme an. (angelehnt an [136])

Durch diese Vorgehensweise wird der Roboter ausgehend von einem Startpunkt durch kleine Inkremente entlang der Bahn „geschoben“, ohne dass die Steuerung über Wissen bezüglich der Gesamtbahn oder auch nur dem Ursprung der vorberechneten Interpolationspunkte verfügt. Dieser Ansatz ermöglicht die Nutzung beliebiger Sensortypen, da die Datenanalyse und Ergebnisauswertung auf dafür geeignete externe Berechnungseinheiten verlagert wird und somit deutlich erhöhte Berechnungskapazitäten und komplexere Berechnungsalgorithmen verfügbar gemacht werden. Darüber hinaus erlaubt die vektorbasierte Bahnsteuerung des

Roboterhandwurzel-Koordinatensystems eine reaktive, präzise und zudem exakt definierte Fernsteuerung des Roboters.

6.2.3 Feininterpolationsalgorithmus zur Ausregelung von Bewegungsabweichungen

Ein Roboterarm stellt als Regelstrecke ein nichtlineares, verkoppeltes Mehrgrößensystem dar. Nichtlinear, weil es von trigonometrischen Funktionen abhängt, wie beispielsweise der relativen Lage der Glieder zur Erdbeschleunigung. Es ist ein Mehrgrößensystem, da bereits bei einfachen Motoren sechs Motorspannungen als Eingangsgrößen vorhanden sind, welche alle die Ausganggröße, die Position des Endeffektors, beeinflussen. Verkoppelt ist das System, da die Zustände der sechs Gelenke von dem Zustand der jeweils anderen abhängen. Dabei stellt die Komplexität der Regelstrecke hohe Anforderungen an die Gelenkregelung. Zum Einsatz kommen hierbei nichtlineare Regelungsverfahren mit adaptiven Eigenschaften. Zudem müssen geeignete Regler unter anderem einen hohen Grad an Robustheit gegenüber veränderlichen Lastmassen aufweisen. [28]

Voraussetzung für die Synthese eines solchen Reglers ist eine detaillierte Kenntnis des Systems. Diese Kenntnis schließt neben den Massen der Manipulatorglieder zusätzlich auch Motor- und Getriebekennwerte mit ein (unter anderem Motorstromkonstante, Motorwiderstände, applizierte Spannung, Motor- und Gelenkträgheitsmomente, Reibungskoeffizienten der Achsantriebe, Gelenksteifigkeiten etc.). Diese Werte stehen jedoch nicht dem Anwender sondern nur dem Roboterhersteller zur Verfügung, da diese Informationen vertrauliches, firmeninternes Basiswissen darstellen. Selbst wenn diese Werte bekannt sind, ist für jeden Robotertypen eine individuelle Auslegung des Reglers notwendig. Dies widerspricht der aus der Forschungsaufgabe abgeleiteten zentralen Anforderung der Bereitstellung einer möglichst universellen Methode zur Regelung unterschiedlichster Robotertypen. Trotz der erreichbaren hohen Effizienz roboterinterner Regler im Hinblick auf hohe Dynamik und erreichbare Genauigkeit, muss somit eine komplexe, robotertypabhängige Reglersynthese ausgeschlossen werden.

Eine alternative Herangehensweise ist eine übergeordnete Eingrößenregelung. In dem untersuchten Fall bilden hierbei nur die in Abschnitt 6.2.2 erläuterten Fahrvektoren die Eingangsgröße des Robotersystems. Bei dieser Vorgehensweise ist kein tiefgreifendes Wissen über die Struktur des Systems und eventuell zu erwartender Störungen notwendig, gleichzeitig ist jedoch im Vergleich zur roboterinternen Regelung eine nur verminderte Dynamik möglich.

Der Eingrößenregler wird immer dann aktiv, wenn am Reglereingang eine Regelabweichung $e(t)$ festgestellt wird, wobei $e(t)$ definiert ist als

$$e(t) = w(t) - r(t) \quad (6.2)$$

mit $w(t)$ als Führungsgröße (Soll-Zustand oder Sollwert) und $r(t)$ als sensorisch erfasste Regelgröße (Ist-Zustand oder Istwert) [163].

Eine grundsätzliche Problematik im Bereich der robotischen Regelung ist dabei das in [130] beschriebene Raum-Zeit-Problem. Zentrale Aussage ist, dass eine Abweichung von Ist- zu Soll-Position nicht unmittelbar ausgeglichen werden kann, ohne dass unendliche Beschleunigungen auftreten. Dies ist auch einer der wesentlichen Gründe, dass im bekannten Stand der Technik und Forschung maßgeblich vorausseilende Sensoren mit einem entsprechenden örtlichen und somit auch zeitlichen Prädiktionshorizont genutzt werden (Abschnitt 4.3 und 4.4). Wird jedoch davon ausgegangen, dass bei stetigen Trajektorien Abweichungen nicht sprunghaft auftreten, sondern sich diese vielmehr schwellend auf- und abbauen, kann es eine geeignete Bahnplanung ermöglichen, den Roboter auf die tatsächlich richtige Soll-Trajektorie zu führen und im weiteren Verlauf exakt auf dieser zu halten. Als stetig sind in diesem Kontext Trajektorien ohne schlagartige Richtungswechsel zu verstehen. Dementsprechend liefern auch die in Kapitel 5 vorgestellten Algorithmen zur Optimierung von Trajektorien einen wertvollen Beitrag zur Gewährleistung eines stetigen Bahnverlaufs.

Der erforschte Bahnplanungsalgorithmus zur Ausregelung von Bewegungsabweichungen wird im Folgenden vorgestellt. Zu beachten sind hierbei die allgemeinen Anforderungen an einen geschlossenen Regelkreis [164]. Dieser muss

1. stabil sein,
2. die Regeldifferenz möglichst klein halten, sowie
3. möglichst schnell,
4. bei ausreichender Dämpfung und
5. geringer Parameterempfindlichkeit sein.

Besonders die Anforderungen 1 und 2 sowie im Weiteren auch 3 und 4 sind hierbei als gegenläufig zu bewerten.

Die konkreten Anforderungen bezogen auf den Forschungsgegenstand sind in Abbildung 46 illustriert.



Abbildung 46: Anforderungen an den Bahnplanungsalgorithmus

Eine zentrale Herausforderung bei der Regelung ist die sogenannte Totzeit. Diese beschreibt die Zeitspanne bzw. Signalverschiebung zwischen Änderung am Systemeingang und Antwort am Systemausgang. Systemglieder mit einer Totzeit werden als Totzeitglieder bezeichnet. Üblicherweise existieren solche Glieder im Bereich der Regelstrecke oder auch des Reglers. Verantwortlich für die Totzeit sind beispielsweise langsame Signalübertragungstrecken, jedoch stellt auch eine langsame Ist-Zustandsaufnahme bzw. deren Berechnung ein Totzeitglied dar. Hohe Totzeiten stören den Regelkreis, da sie Verschiebungen und Überlagerungen verursachen, welche die Stabilität des geschlossenen Regelkreises verschlechtern. [165] Begegnet werden kann dieser Problematik mit einem sanften Reglereingriff. Dessen ungeachtet muss jedoch eine übergeordnete Systemanforderung sein, auftretende Totzeiten auf ein Mindestmaß zu reduzieren (1), um einen zeiteffizienten Ausgleich auftretender Regelabweichungen zu ermöglichen. Eine weitere wesentliche Anforderung an die Bahnplanung ist zudem eine möglichst zeiteffiziente Korrektur von Abweichungen (2). Aus den genannten Gründen und um die Funktion der Regelung im gesamten Arbeitsraum sicherzustellen, darf die Regelung jedoch nur vorsichtig in die Bahnplanung eingreifen. Eine sanfte Regelung ist auch Voraussetzung für eine gleichmäßige, kontinuierliche Bewegung, denn starke Eingriffe des Reglers führen zu ausgeprägten Richtungsänderungen, welche wiederum ruckartige Bewegungen des Roboters verursachen, die zu vermeiden sind (3). Zudem lässt sich durch eine angemessene Auslegung des Regelverhaltens das Überschwingen (4) der Regelgröße reduzieren. Trotz der Notwendigkeit einer stabilen und robusten Regelung bleibt das Ziel einer möglichst effektiven Ausregelung von Bewegungsabweichungen bestehen. Sowohl die schnelle Reaktion auf Regelabweichungen als auch der sanfte Regeleingriff sind daher als

konkurrierende Ziele anzusehen. Ein entscheidendes Kriterium für eine geeignete Regelung des Bewegungsverlaufs ist folglich, dass diese den Roboter schnell aber ohne ruckartige Richtungswechsel auf die richtige Bahn zurückführt. Dies soll mit einer minimalen bleibenden Regelabweichung (5) geschehen. Die Bewegungsgeschwindigkeit (6) ist dabei nahe ihrem Soll-Wert zu halten. Eine weitere Anforderung an die Regelung ist ein gleichbleibendes Verhalten (7) entlang der Bahn unabhängig der Bewegungsrichtung und dem Ort, an dem sich der TCP befindet.

Aufgrund einer Vielzahl sich teils widersprechender Zielgrößen und zudem der universellen Einsetzbarkeit bei sich unterschiedlich verhaltenden Robotertypen, ist schlussendlich eine einfache Einstellbarkeit (8) des Reglers wesentlich. Dies ist insbesondere auch dahingehend von Bedeutung, da zentrale Aufgabenstellung die Entwicklung eines universell nutzbaren Reglers ist. Robotertypabhängige Regler bieten zwar Vorteile, insbesondere hinsichtlich der Dynamik, erfordern aber wie eingangs beschrieben tiefgreifendes Systemwissen, welches maßgeblich dem Roboterhersteller vorbehalten ist, dem Anwender aber nicht zur Verfügung steht. Anforderungen an einen geeigneten universellen Regler sind dahingehend dessen Anschaulichkeit und einer damit einhergehenden einfachen Anpassbarkeit an unterschiedliche Gegebenheiten. Dargestellt ist der prinzipielle Systementwurf der externen Regelung in Abbildung 48, Abbildung 47 visualisiert eine typische roboterinterne Kaskadenregelung.

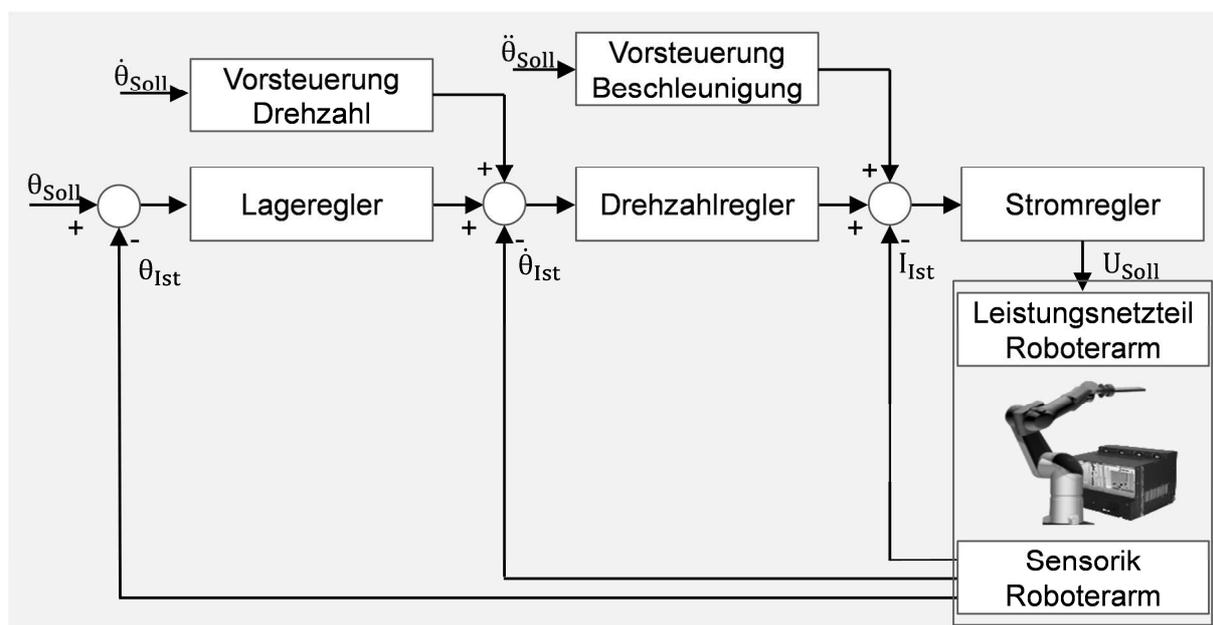


Abbildung 47: Blockschema einer roboterinternen Kaskadenregelung (angelehnt an [166])

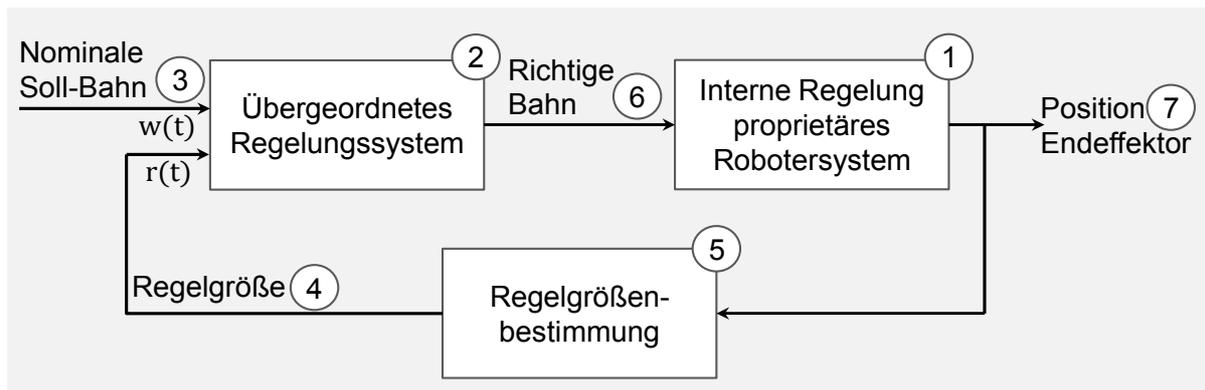


Abbildung 48: Blockschema der externen Regelung

In der Systemarchitektur bleibt die interne Regelung des proprietären Robotersystems (1) (Lageregelung, Drehzahlregelung, Stromregelung (Abbildung 47)) unangetastet. Diese bestimmt maßgeblich das Roboterverhalten bei auftretenden Schwingungen. Vorgeschaltet wird ein übergeordnetes Regelungssystem (2), welches robotertypunabhängig ausgelegt ist und dessen Ausgangsgröße Fahrvektoren für das Robotersystem darstellen, welche auf der nominalen Soll-Bahn (3) sowie der Regelgröße (4, 5) basieren. Diese Fahrvektoren werden als neue Stellgröße für die Robotersteuerung verwendet und leiten den Endeffektor auf die richtige Bahn (6). Das Zusammenspiel aus interner Kaskadenregelung und übergeordneter Regelung definiert dementsprechend die Position des Endeffektors (7).

Durch diesen hybriden Ansatz, werden die Vorteile der internen Roboterregelung mit den Vorteilen einer externen, übergeordneten Sicht verbunden. Dabei beruhen die Feininterpolationsalgorithmen des übergeordneten Regelungssystems maßgeblich auf anschaulichen geometrischen Relationen, welche in den Folgeabschnitten vorgestellt werden. Hierbei übernehmen die erforschten Algorithmen zur Bewegungslaufzeit eine kontinuierliche Interpolation und Neuberechnung der Stützstellen. Aus Gründen der Anschaulichkeit werden für die Erläuterungen 2D-Darstellungen gewählt, wobei die Ausführungen analog im dreidimensionalen Raum Anwendung finden.

Feininterpolation bei linearen Bahnabschnitten

Der erforschte Bahnplanungsalgorithmus basiert auf einer dynamischen Stützstelle D , welche dem Roboterhandwurzel-Koordinatensystem mit konstantem Vorlauf vorausseilt. Dargestellt sind die zentralen Einflussparameter in Abbildung 49.

Das Bewegungsverhalten des Roboters bei dem Eingriff des Reglers ist beispielhaft in Abbildung 50 illustriert.

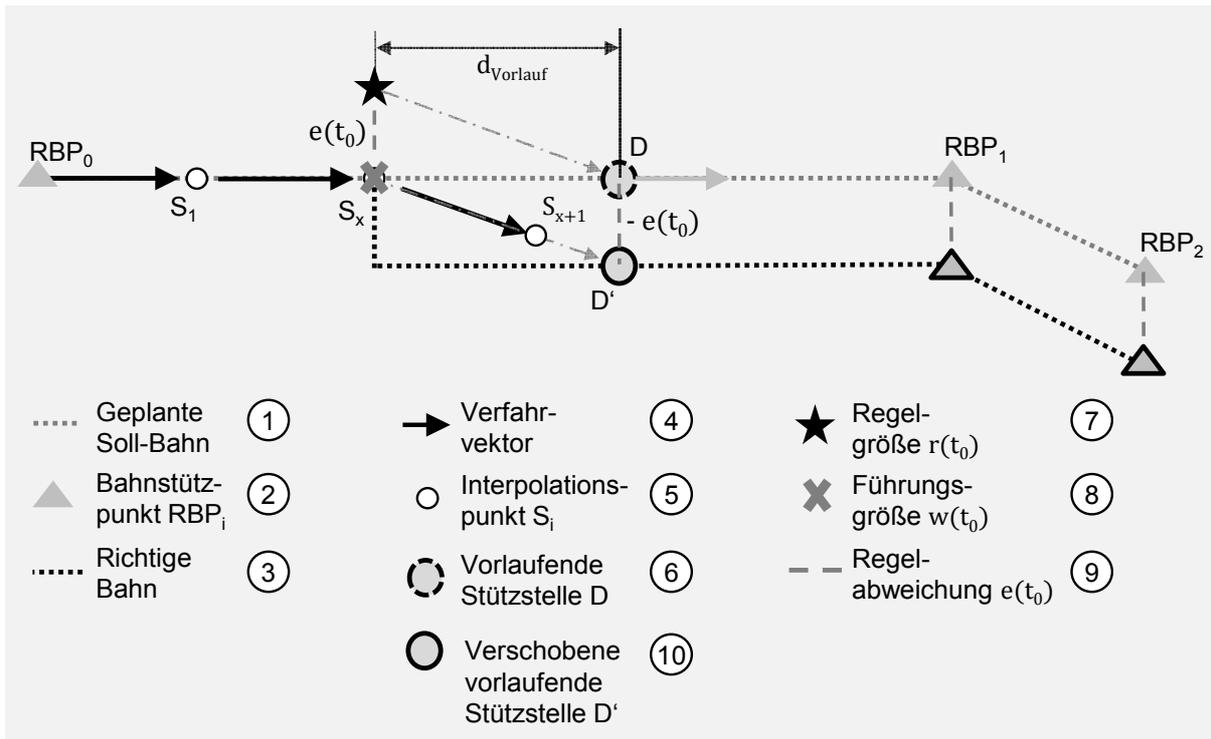


Abbildung 49: Algorithmus zur linearen Feininterpolation (Angelehnt an [162])

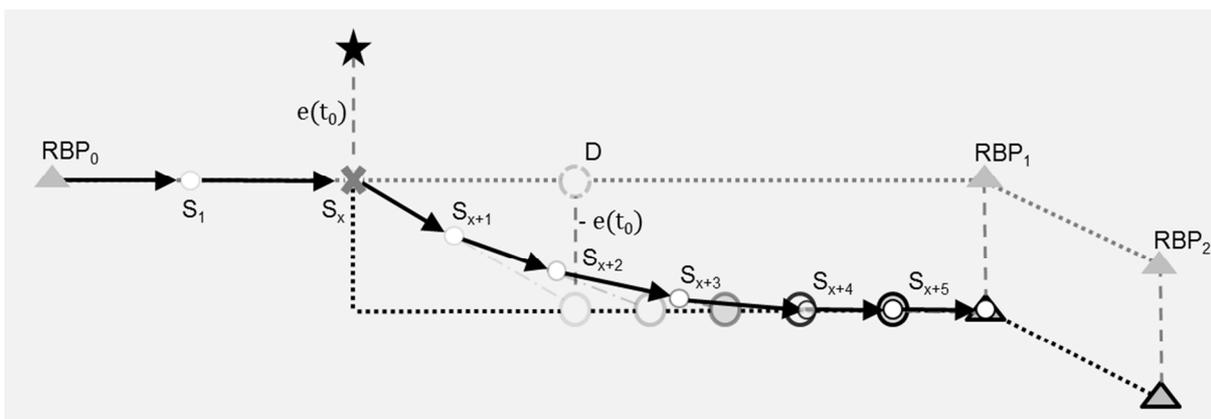


Abbildung 50: Beispielhaftes Bewegungsverhalten (Angelehnt an [162])

Die nominale Soll-Bahn bzw. geplante Bahn (1) ist definiert durch die Bahnstützpunkte RBP_0 bis RBP_2 (2). Aufgrund der in Kapitel 2 dargestellten Ausführungen weicht dies von der richtigen Bahn (3) ab. Die Bewegung des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems erfolgt durch die Fahrvektoren (4), welche bestimmt sind durch kontinuierlich vorinterpolierte Punkte S_i (5). Die Fahrvektoren sind ausgerichtet auf eine vorauslaufende Stützstelle D (6), welche der aktuellen Position des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems mit einem konstanten Abstand d_{vorlauf} vorausleitet. Entspricht die Regelgröße $r(t)$ (7) der

Führungsgröße $w(t)$ (8), bewegt sich die vorauslaufende Stützstelle auf der nominalen Soll-Bahn in Richtung des nächsten Bahnstützpunkts RBP_i . Wird zum Zeitpunkt t_0 eine Regelabweichung $e(t_0)$ (9) ermittelt, wird die vorauseilende Stützstelle um $-e(t_0)$ verschoben, was in erster Näherung einem P-Regler mit Verstärkung 1 entspricht. Dies resultiert in einer Verschiebung der vorlaufenden Stützstelle D' (10) auf die richtige Bahn. Als Konsequenz aus dieser Verschiebung wird ein Interpolationspunkt S_{x+1} errechnet, welcher nicht auf der nominalen Soll-Bahn liegt, sondern zwischen aktueller Position des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems S_x und der verschobenen vorlaufenden Stützstelle D' . Durch den resultierenden Fahrvektor $\overrightarrow{S_x S_{x+1}}$ und die sich anschließenden Fahrvektoren bei gleichzeitigem Vorlauf von D' , wird die Regelabweichung sukzessive abgebaut und das Handwurzel-Koordinatensystem auf die richtige Bahn geführt. Dabei ist die Verschiebung der vorlaufenden Stützstelle kumulativ. Die Vektoren zur Korrektur der nominalen Soll-Bahn addieren sich. Damit nur neu auftretende Änderungen der Regelabweichung $e(t)$ zu einer weiteren Verschiebung der Stützstelle führen, dient die um die bekannte Abweichung der Absolutposition verschobene Bewegungsbahn als Referenzwert zur Ermittlung der Positionsabweichung. Entsprechend Abbildung 50 erfolgt durch diese Methode der Ausgleich der Regelabweichung über einen sanften Übergang der Roboterbewegung auf die korrigierte und somit richtige Bewegungsbahn. (Angelehnt an [162])

Die Intensität des Regeleingriffs lässt sich durch den Abstand d_{Vorlauf} der vorlaufenden Stützstelle einstellen. Je geringer der Abstand zwischen der aktuellen Position des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems und dieser Stützstelle gewählt wird, desto ausgeprägter fällt die Reaktion auf Regelabweichungen $e(t)$ aus. Somit ist es möglich, das Regelverhalten durch Änderung des Stützstellenvorlaufs d_{Vorlauf} an die dynamischen Eigenschaften eines individuellen Manipulators und geforderte Soll-Geschwindigkeit anzupassen (siehe Evaluierung Abschnitt 7.3.3). Dabei nimmt der Anteil der Relativbewegung quer zur Idealbahn mit sinkendem Abstand zwischen Ist-Position und richtiger Bahn ab. Dadurch gleicht die Bewegung des Roboters größere Regelabweichungen zunächst schnell aus und nähert sich dann mittels eines weichen Übergangs hyperbolisch an die korrigierte Bahn an. Dieser Zusammenhang wird beschrieben durch einen Querbewegungsfaktor ε .

Der Einfluss des Stützstellenvorlaufs d_{Vorlauf} auf die Querbewegung sowie der Ausgleich von Regelabweichungen entlang der Bahnrichtung $e_{\text{längs}}(t)$ ist in Abbildung 51 dargestellt.

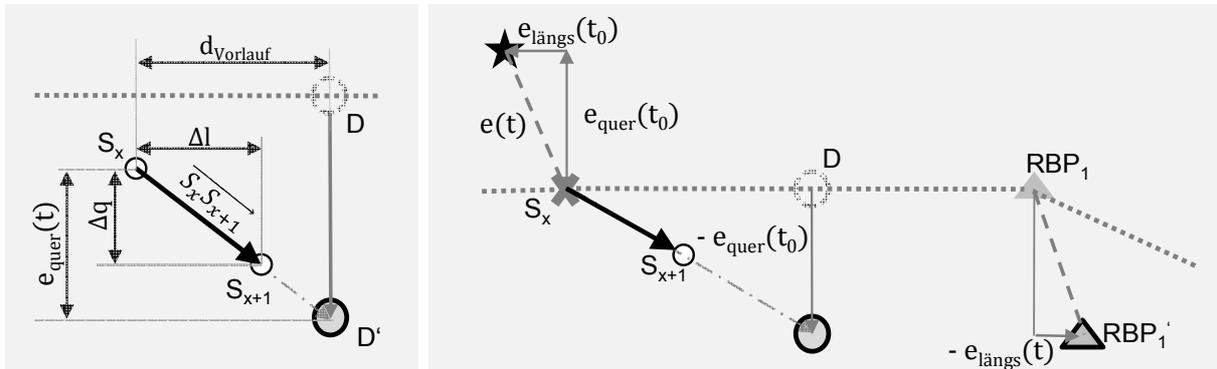


Abbildung 51: Querbewegung und Ausgleich von Längs-Regelabweichungen

Der Fahrvektor $\overrightarrow{S_x S_{x+1}}$ setzt sich zusammen aus einem Bewegungsanteil Δq quer zur Idealbahn und einem Bewegungsanteil Δl in Bahnrichtung. Da sich der Fahrvektor $\overrightarrow{S_x S_{x+1}}$ auf der Verbindungslinie zwischen dem Startpunkt der Relativbewegung S_x und der verschobenen vorlaufenden Stützstelle D' befindet, liegt das geometrische Verhältnis

$$\frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{e_{\text{quer}}(t)}{d_{\text{Vorlauf}}} \quad (6.3)$$

vor. Mit dem Zusammenhang entsprechend (6.2) ergibt sich

$$|\overrightarrow{S_x S_{x+1}}| = \sqrt{\Delta q^2 + \Delta l^2} = v_{\text{Soll}} \cdot t_i \quad (6.4)$$

Wird der Anteil der Querbewegung isoliert folgt

$$\Delta q = \frac{\frac{e_{\text{quer}}(t)}{d_{\text{Vorlauf}}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{e_{\text{quer}}(t)}{d_{\text{Vorlauf}}}\right)^2}} \cdot v_{\text{Soll}} \cdot t_i \quad (6.5)$$

Das Produkt aus Soll-Geschwindigkeit v_{Soll} und Interpolationszeit t_i entspricht dem Betrag des relativen Bewegungsvektors. Der vorangestellte Bruch ist definiert als Querbewegungsfaktor ε , für den somit gilt

$$\varepsilon = \frac{\frac{e_{\text{quer}}(t)}{d_{\text{Vorlauf}}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{e_{\text{quer}}(t)}{d_{\text{Vorlauf}}}\right)^2}} \quad (6.6)$$

Der Wert von ε muss Element des abgeschlossenen Intervalls $[-1, 1]$ sein, da die Intervallgrenzen für eine Bewegung senkrecht zur Idealbahn stehen.

Den Verlauf des Faktors für die Querbewegung für unterschiedliche Vorlaufabstände d_{Vorlauf} der dynamischen Stützstelle zeigt Abbildung 52. (Angelehnt an [162])

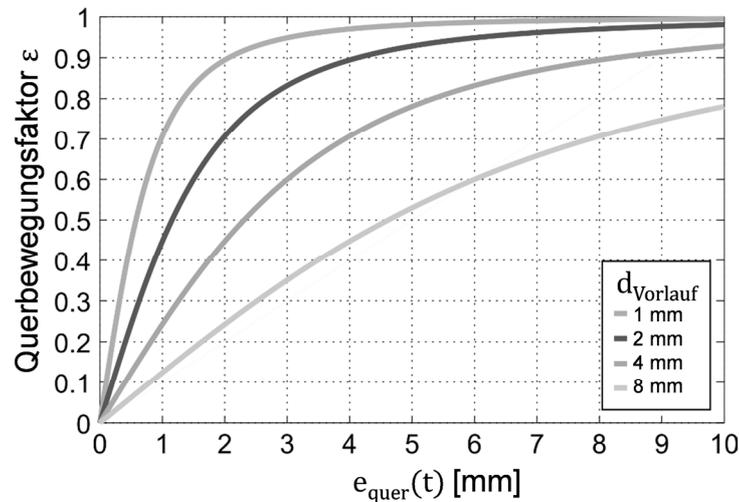


Abbildung 52: Einfluss des Stützstellenvorlaufs auf die Querbewegung

Zu erkennen ist, dass die Funktion mit steigendem Stützstellenvorlauf gegen 1 konvergiert und der Verlauf des Querbewegungsfaktors ε sich zunehmend linear verhält. Bei einem großen Stützstellenvorlauf gleicht der Eingriff der Regelung daher dem Verhalten eines Proportionalglieds. Der Funktionsverlauf bei sehr kleinen Vorläufen weist hingegen zwei näherungsweise lineare Abschnitte auf, wodurch die Korrekturbewegungen schärfer ausfallen. Ein größerer Vorlauf der dynamischen Stützstelle führt folglich bei Regelabweichungen zu weniger ausgeprägten Richtungsänderungen, jedoch auch zu einem langsameren Ausgleich der Regelabweichung.

Eine Sonderrolle nehmen die Bahnstützpunkte RBP_i ein. Da sich diese an Scheitelpunkten von Richtungsänderungen befinden, werden diese als besonders bahnrelevant definiert. Festgestellte Regelabweichungen längs der Bahnrichtung $e_{\text{längs}}(t)$, welche bei dem Bewegungsfortschritt auf geraden Bahnabschnitten nicht von Bedeutung sind, werden bei diesen relevanten Bahnstützpunkten ebenfalls berücksichtigt und die vorlaufende Stützstelle bei deren Erreichen entsprechend verschoben (Abbildung 51, rechts).

Feininterpolation bei zirkularen Bahnabschnitten

Die vorgestellte Regelsystematik basierend auf der vorlaufenden Stützstelle als Orientierungsvorgabe für Relativbewegungen, ist nicht für die Planung von Bewegungsbefehlen in Kurven geeignet, da diese runde Konturen nicht mit der ausreichenden Genauigkeit abbilden. Vielmehr erfolgt in zirkularen Bahnabschnitten die Anpassung anhand einer erfassten Regelabweichung durch das direkte Verschieben von Interpolationspunkten. Der Übergang auf die korrigierte Kreisbahn erfolgt demnach zunächst durch die Veränderung der Schrittweite eines

Bewegungsbefehls. Das grundsätzliche Vorgehen zur Berechnung von Fahrbefehlen während des Durchfahrens kreisförmiger Bahnabschnitte ist in Abbildung 53 illustriert.

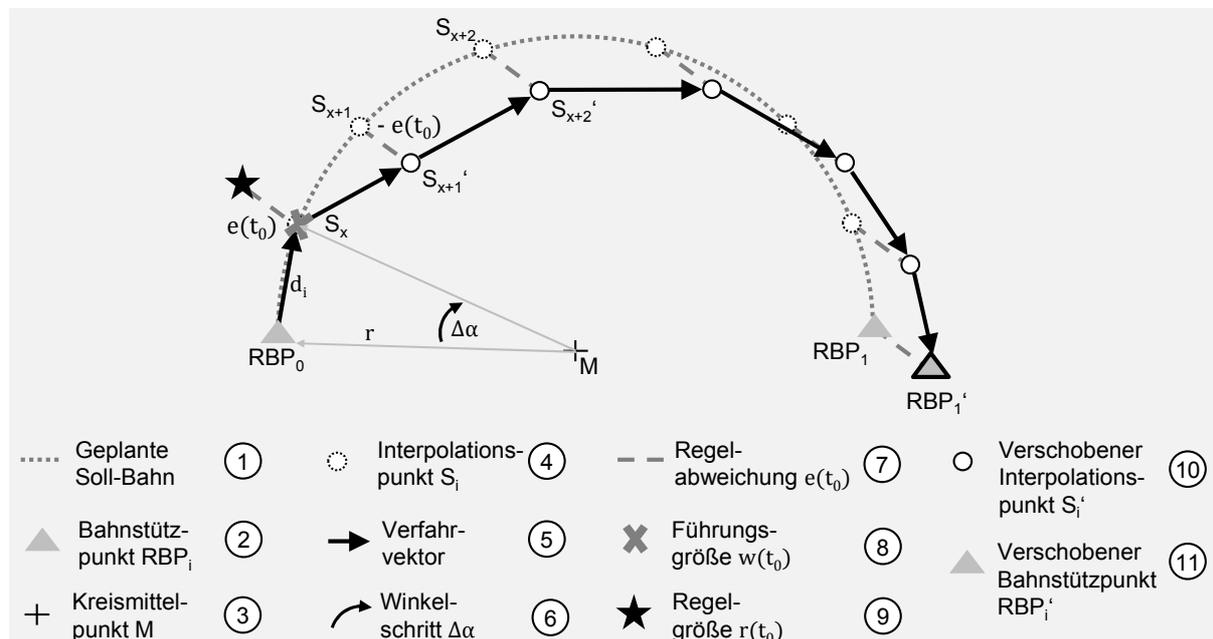


Abbildung 53: Algorithmus zur zirkularen Feininterpolation (Angelehnt an [162])

Dargestellt ist eine nominale Soll-Bahn (1), welche definiert ist durch die Bahnstützpunkte RBP_1 und RBP_2 (2) sowie den Kreismittelpunkt M (3). Entsprechend des Interpolationstaktes t_i und der vorgegebenen Soll-Geschwindigkeit v_{Soll} werden die auf der nominalen Bahn liegenden Interpolationspunkte S_i (4) ermittelt. Es gilt

$$s_{x+1} = \cos(\Delta\alpha) \cdot \overrightarrow{MS_x} + \sin(\Delta\alpha) \cdot (\overrightarrow{MS_x} \times \vec{n}_0) \quad (6.7)$$

mit

$$\Delta\alpha = 2\sin^{-1}\left(\frac{d_i}{2r}\right). \quad (6.8)$$

Hierbei entspricht \vec{n}_0 dem Einheitsnormalenvektor der Kurvenbahn, r dem Radius, d_i der Sehnenlänge und somit der Länge der Verfahrvektoren (5) gemäß Formel 6.1 sowie $\Delta\alpha$ dem Winkelschritt (6). Wird zum Zeitpunkt t_0 eine Regelabweichung $e(t_0)$ (7) basierend auf der Führungsgröße $w(t_0)$ (8) und der Regelgröße $r(t_0)$ (9) ermittelt, erfolgt eine Verschiebung der Interpolationspunkte S_i um $-e(t_0)$. Dies resultiert in neuen Positionen und verschobenen Interpolationspunkten S_i' (10) sowie einer entsprechend neuen Position von RBP_1' (11), welche nunmehr auf der richtigen Bahn liegen.

Abhängig von der Größe und dem auftretendem Zeitpunkt der ermittelten Regelabweichung $e(t)$, führt der Algorithmus der zirkularen Feininterpolation zu einer scharfen Ausregelung der Abweichung. Dies kann vermieden werden durch eine Abbildung großer Winkeländerungen bezüglich der Bewegungsrichtung auf einen

kleineren Winkelbereich. Die Problemstellung und die Vorgehensweise zum Erreichen einer sanften Ausregelung in Kurvenbereichen ist in Abbildung 54 dargestellt.

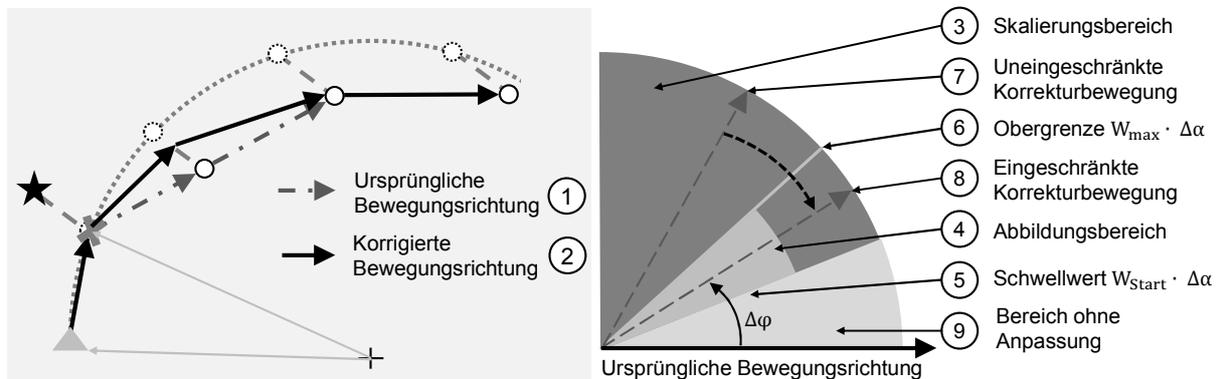


Abbildung 54: Skalierung ausgeprägter Richtungsänderungen

Die Situation entspricht den Erläuterungen bezüglich Abbildung 53. Die ermittelte Regelabweichung $e(t_0)$ resultiert in einer ausgeprägten Änderung der Bewegungsrichtung (1). Um eine zu scharfe Ausregelung von Abweichungen zu vermeiden, wird ein Schwellwert definiert, bei dessen Überschreitung eine Skalierung der Winkeländerung stattfindet. Liegt der Winkel der Richtungsänderung im Skalierungsbereich (3), so wird dieser proportional zur Dimension des Abbildungsbereichs (4) auf den Abbildungswinkel $\Delta\varphi$ skaliert. Ober- und Untergrenze des Abbildungsbereichs sind festgelegt über den Schwellwertfaktor der Winkeländerung W_{Start} (5) und den Obergrenzenfaktor des Abbildungsbereichs W_{max} (6). Die Winkel für die obere und untere Grenze des Abbildungsbereichs gehen aus dem Produkt des jeweiligen Faktors mit $\Delta\alpha$ hervor, also der Multiplikation des Faktors mit dem von der nächsten Relativbewegung zu überstreichenden Winkel. Entsprechend passt sich die Skalierung selbstständig an die Soll-Geschwindigkeit sowie den Radius der Bahn an. In dem abgebildeten Beispiel liegt die Richtung der uneingeschränkten Korrekturbewegung (7) mittig des Skalierungsbereiches. Entsprechend wird die eingeschränkte Korrekturbewegung (8) auf die Mitte des Abbildungsbereichs reduziert. Liegt die Winkeländerung innerhalb des Bereichs ohne Anpassung (9) so wird dieser direkt angewendet.

Durch diese Vorgehensweise nähert sich die Roboterbewegung nach dem Erkennen einer Abweichung in mehreren Schritten (2) der richtigen Bahn an, statt wie in der Basismethode (1) direkt auf diese zu wechseln. Neben einer kontinuierlicheren Bewegungsgeschwindigkeit hat dies den Vorteil einer verbesserten Abbildung der Kontur. Nachteilig ist wiederum ein langsamerer Ausgleich der absoluten Regelabweichung. Entsprechend sind die Anforderungen an Konturtreue und schnelle Korrektur von Abweichungen als konkurrierende Zielgrößen zu bewerten.

Der Funktionserfüllungsgrad der Feininterpolationsalgorithmen sowie der Methode zur vektorbasierten Bahnsteuerung zeigen die in Abschnitt 7.3.3 dargestellten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.

6.3 Ermittlung des Ist-Zustands als Regelgröße

Bei den aus Stand der Technik/Forschung bekannten Lösungen zur sensorbasierten Roboterregelung wird zumeist eine Naht oder eine zu bearbeitende Bauteilkante als Referenz für die sensorische Bestimmung der Regelgröße $r(t)$ genutzt. Dabei repräsentieren diese Merkmale in direkter Weise die Prozessbahn und sind darüber hinaus aufgrund Ihrer geometrischen Ausprägung leicht zur erfassen. Deutlich anspruchsvoller gestaltet sich die Regelgrößenbestimmung, wenn die Prozessbahn nicht in vorskizzierter Form zur Verfügung steht. Eine alternative Herangehensweise, welche diese Einschränkung adressiert, ist die erforschte Regelgrößenbestimmung basierend auf einer vektorbasierten Ist-Bewegungsermittlung.

In Abschnitt 6.3.1 wird der grundsätzliche Aufbau und Ablauf der Methode zur vektorbasierten Ist-Bewegungsermittlung erläutert, gefolgt von einer Beschreibung der Ist-Zustandsermittlung für einen diskreten Zeitpunkt in Abschnitt 6.3.2. In Abschnitt 6.3.3 wird die Ist-Bewegungsermittlung dargestellt, welche anhand aufeinanderfolgender diskreter Ist-Zustände errechnet wird. Inhalt von Abschnitt 6.3.4 ist die Folgereferenzierung, die eine kontinuierliche Bewegungserfassung über den kompletten Bewegungsverlauf ermöglicht.

6.3.1 Methode zur vektorbasierten, translatorischen Ist-Bewegungsermittlung

Ausgangspunkt der Ist-Bewegungsermittlung ist eine „eye-in-hand“ oder „eye-to-hand“ Kamerakonfiguration. Bei der eye-in-hand Konfiguration wird ein am Manipulator montierter Sensor relativ zum Werkobjekt geführt. Der Zusammenhang zwischen Pose des Sensors und Endeffektors ist bekannt und konstant. Dahingegen ist bei der Konfiguration eye-to-hand das Sensorsystem ortsfest im Raum installiert. Bei dieser Anordnung ist der Zusammenhang von Kamerapose und Umgebung bzw. Roboterbasis bekannt und gleichbleibend. [8]

Das der Methode zugrundeliegende Prinzip ist eine Erfassung der Bewegung von Merkmalen des Werkobjekts relativ zum Sensor, wobei diese Merkmale z. B. als kreuzförmige, runde oder rechteckige Passermarken („Fiducial“) des Werkstücks ausgeführt ist. Bei der Bewegungserfassung dieser Merkmale wird davon ausgegangen, dass zur Prozess- und Bewegungslaufzeit zentrale geometrische Relationen der Komponenten zueinander entsprechend der Annahme des vorherigen Abschnitts konstant bleiben. Bevorzugt ist das Sensorsystem dabei derart neben dem Werkzeug angeordnet, dass Bereiche des Werkobjekts benachbart zur Prozesseingriffsstelle erfasst werden. Ist die Zugänglichkeit des Prozessorts durch das Werkzeug gewährleistet, ist dementsprechend ebenfalls eine Erfassbarkeit durch das Sensorsystem gegeben.

So gilt für Fall A: Eye-to-hand/Bewegtes Werkstück mit

$f_{\text{Werkpiece}}$ zu f_{TCP} = konstant und

f_{Sensor} zu f_{Tool} zu f_{Robot} zu f_{World} = konstant,

dass die Bewegung der Merkmale in den Sensordaten der Relativbewegung Werkstück ($f_{\text{Werkpiece}}$) zu Sensor (f_{Sensor}) und weiterführend auch der Relativbewegung Manipulator (f_{TCP}) zu Sensor (f_{Sensor}) entspricht.

Weiterführend gilt für Fall B: Eye-in-hand/Ortsfestes Werkstück mit

f_{Sensor} zu f_{TCP} zu f_{Tool} = konstant und

$f_{\text{Werkpiece}}$ zu f_{Robot} zu f_{World} = konstant,

dass die Bewegung der Merkmale in den Sensordaten der Relativbewegung des Sensors (f_{Sensor}) zum Werkstück ($f_{\text{Werkpiece}}$) und weiterführend auch der Relativbewegung des Manipulators (f_{TCP}) zum Werkstück ($f_{\text{Werkpiece}}$) entspricht.

Der prinzipielle Aufbau und Ablauf der Methode zur vektorbasierten Ist-Bewegungsermittlung ist in Abbildung 55 illustriert.

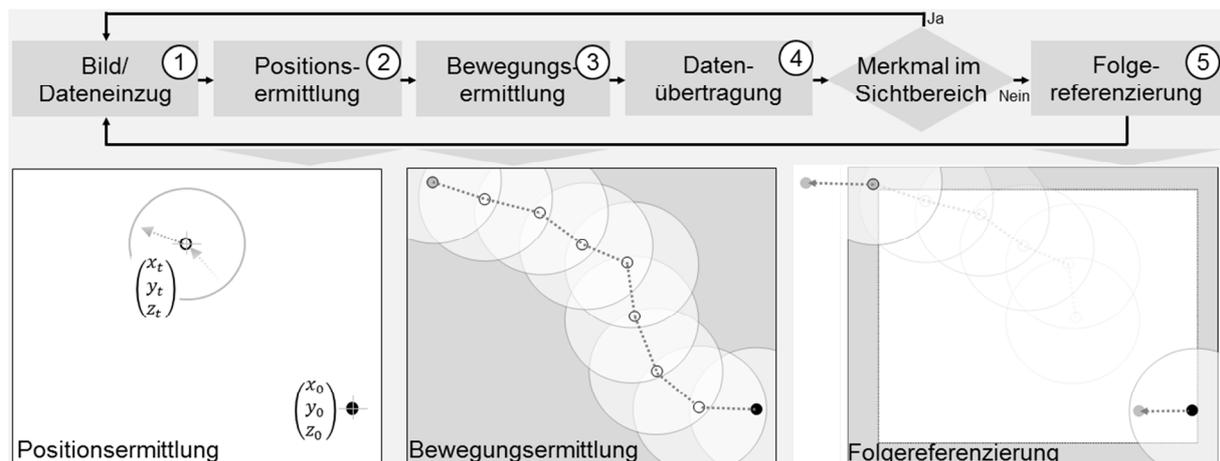


Abbildung 55: Aufbau der Methode zur vektorbasierten Ist-Bewegungsermittlung

Ausgehend von den erfassten Sensordaten (1) wird die Position eines zu verfolgenden Merkmals des Werkstücks in den Bilddaten ermittelt (2). Unterschieden wird hierbei die statische Position des Merkmals vor bzw. zu Beginn der Bewegung (x_0, y_0, z_0) und die sich verändernde Position des Merkmals zur Bewegungslaufzeit (x_t, y_t, z_t). Die Position entspricht hierbei dem Bewegungszustand für einen diskreten Zeitpunkt. Durch Integration über eine Vielzahl aufeinanderfolgender diskreter Positionszustände des beobachteten Merkmals wird dessen Bewegung ermittelt (3). Diese Daten werden als numerische Regelgrößen an den Regelkreis übergeben (4). Aufgrund des eingeschränkten Sichtbereichs des Sensors, ist davon auszugehen, dass das verfolgte Merkmal den Sichtbereich nach einem gewissen Zeitraum verlässt. In diesem Fall wird durch die Folgereferenzierung (5) ein neues Merkmal des

Substrats detektiert, welches im weiteren Verlauf verfolgt wird. Die Schritte (1) bis (5) werden zur Bewegungslaufzeit kontinuierlich wiederholt und ermöglichen eine durchgehende Erfassung der Relativbewegung. Die Algorithmen, welche der Positionsermittlung (2), Bewegungsermittlung (3) und Folgereferenzierung (5) zugrunde liegen, werden in den Folgeabschnitten näher erläutert.

6.3.2 Algorithmus zur Ist-Positionsermittlung

Zur Ist-Positionsermittlung des zu verfolgenden Werkstückmerkmals werden Algorithmen aus dem Bereich der Blob-Analyse genutzt. Bei der Blob-Analyse im Allgemeinen werden Merkmale aus verbundenen Bildpixeln extrahiert, welche den gleichen logischen Zustand teilen. [167] Die entwickelte Blob-Analyse untergliedert sich in die vier Hauptschritte Bildaufbereitung (A), Bildsegmentierung (B), Merkmalsextraktion (C) und abschließender Positionsmessung (D). Der entwickelte Ablauf der Bilddatenanalyse zur Ist-Positionsermittlung ist in Abbildung 56 schematisch dargestellt.

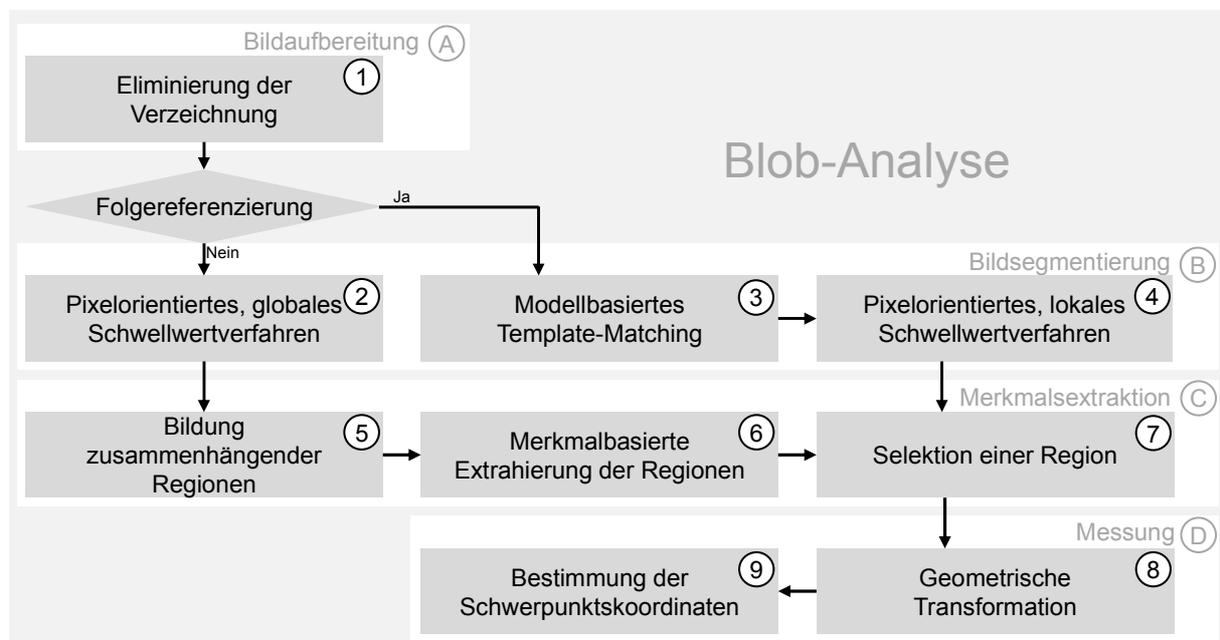


Abbildung 56: Blob-Analyse zur Ist-Positionsermittlung

Bei der Abbildung einer Szene auf einen Kamerasensor erfolgt eine nicht lineare Dehnung oder Stauchung des Bildes, welche als Verzeichnung bezeichnet wird und die zum Erhalt exakter Messergebnisse eliminiert werden muss (1). Eine Korrektur der Verzeichnung erfolgt softwareseitig über einen Rektifizierungsalgorithmus. Dessen Eingangsgröße ist ein mathematisches Modell, welches mit möglichst geringer Abweichung den optischen Fehler nachbildet. Dieses mathematische Modell wird über Parameter bestimmt, welche über eine vorgelagerte Kalibrierung ermittelt werden. Dabei wird der Rektifizierungsalgorithmus auf jedes erfasste Sensorbild angewendet. Dies ist hinsichtlich der Datenverarbeitung zeitaufwändig und kann durch die Nutzung qualitativ hochwertiger Messobjektive (telezentrische Objektive -

Abschnitt 7.1) vermieden werden, da diese eine vernachlässigbare Verzeichnung aufweisen.

Bei einer sich anschließenden Bildsegmentierung (B) werden Bildsegmente bzw. Objekte entsprechend eines definierten Homogenitätskriteriums zusammengefasst. Ziel ist es, ein reduziertes Bild zu erzeugen, das auf die wesentlichen für die weitere Verarbeitung notwendigen Informationen beschränkt ist. Abhängig von der Verfügbarkeit von Modellwissen über das zu verfolgende Merkmal und dem Bewegungsfortschritt (Folgereferenzierung ja/nein) wird ein pixelorientierter (2) oder ein hybrider modellbasierter/pixelorientierter (3), (4) Bildsegmentierungsansatz angewendet. Bei dem pixelorientierten Verfahren unter Nutzung eines globalen Schwellwerts (2) erfolgt die Segmentierung auf Basis von Helligkeitswerten der Bildpunkte, welche über definierte Schwellwerte eingeteilt werden. Bei dem modellbasierten Template-Matchingverfahren (3) werden die Bilddaten mit einem vorab definierten Template des Merkmals verglichen. Der Bildort der besten Übereinstimmung zwischen Template und Bild mit einem Korrelationskoeffizienten als Gütemaß wird als zu verfolgendes Merkmal definiert. Dieser Bildort wird zur weiteren Genauigkeitssteigerung der Merkmalerfassung einem räumlich begrenzten, lokalen Schwellwertverfahren unterworfen. Während modellbasierte Verfahren (3) über eine ausgeprägte Robustheit verfügen, zeichnen sich pixelorientierte Verfahren (2), (4) durch eine besonders hohe Zeiteffizienz bei der Datenverarbeitung aus. Die vorteilhaften Eigenschaften beider Vorgehensweisen können insbesondere bei der Folgereferenzierung zur Detektion neu zu verfolgender Merkmale (Abschnitt 6.3.4) genutzt werden.

Nach der pixelorientierten Bildsegmentierung liegt das Bild in Form einer übergeordneten Region vor, welche alle Merkmalsbildpunkte beinhaltet. Die folgende Merkmalsextraktion (C) ermöglicht den Vergleich der während der Segmentierung generierten Bildobjekte. Hierzu wird die übergeordnete Merkmalsregion in einzelne zusammenhängende Regionen (5) unterteilt, wobei direkt benachbarte Bildpunkte zusammengefasst werden. Im Nachgang werden anhand eines vordefinierten Merkmalsvektors, basierend auf deskriptiven Faktoren, in Frage kommende Merkmale für die Verfolgung extrahiert (6). Nicht in Frage kommende Merkmale werden bei diesem Schritt eliminiert. Im Nachgang liegt ein Array mit mehreren Merkmals-Regionen vor, auf das bei der Selektion des zu verfolgenden Merkmals (7) zugegriffen werden kann.

Das selektierte Werkstückmerkmal wird zur Messung (D) bzw. Ist-Positionsbestimmung verwendet. Handelt es sich bei dem verfolgten Merkmal um eine bekannte Formgeometrie, werden durch eine geometrische Transformation (8) das Messergebnis verfälschende Bildpunkte in den Randbereichen der selektierten Region entfernt und die Region dadurch der Idealgeometrie angenähert. Nunmehr wird der Schwerpunkt der approximierten Merkmalsregion im Bildkoordinatensystem ausgedrückt (9). Ergebnis der Operationen ist die aktuelle Ist-Position des Merkmals

in den Bilddaten für den diskreten Zeitpunkt der Sensordatenerfassung. Kontinuierlich angewendet für die Sensordaten, bildet die Blob-Analyse die Grundlage für die Ist-Bewegungsermittlung.

6.3.3 Algorithmus zur translatorischen Ist-Bewegungsermittlung

Die translatorische Bewegung des Merkmals wird durch einen Vergleich der Ist-Positionen in aufeinanderfolgenden Einzelbildern („frames“ n) ermittelt. Jedes Einzelbild ist hierbei definiert durch dessen Erfassungszeitpunkt t .

Dargestellt ist die Sicht der Sensordatenverarbeitung (A) sowie eine Illustration des Algorithmus zur vektoriellen Bewegungsbeschreibung (B) in Abbildung 57.

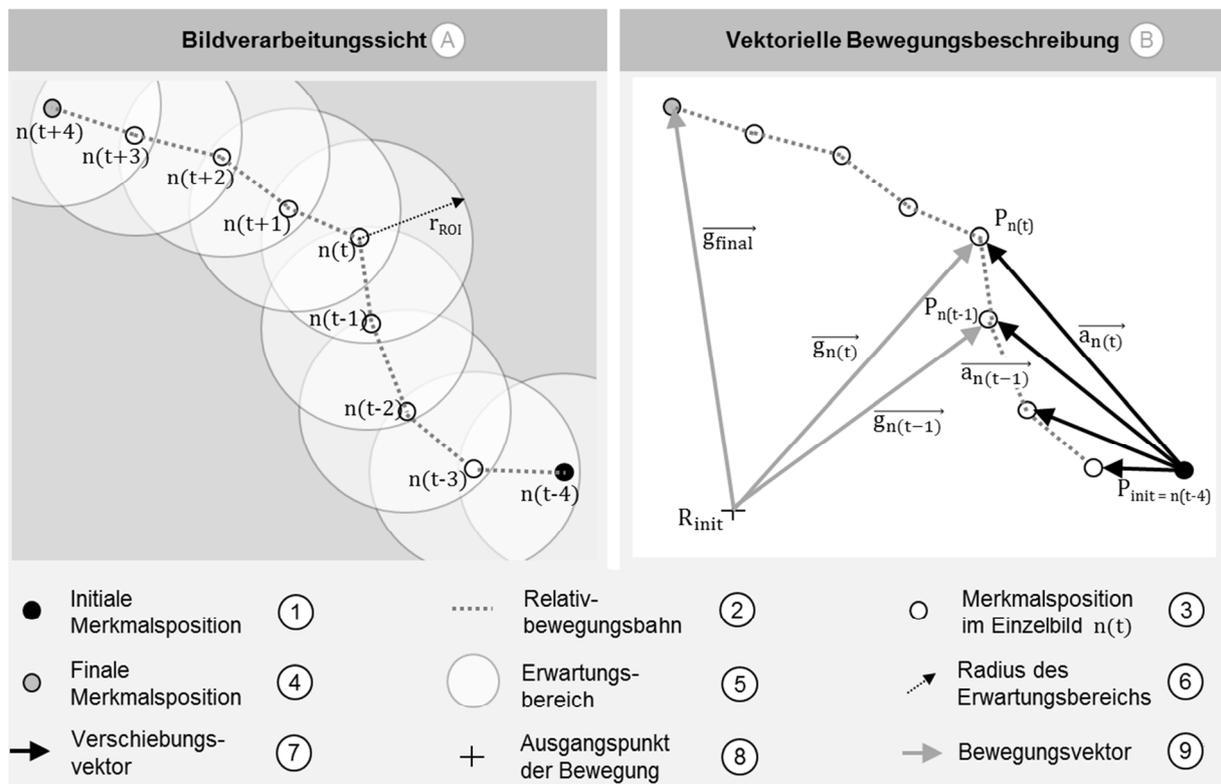


Abbildung 57: Vektorbasierte Bewegungserfassung

Ausgehend von einer initialen Position (1) des verfolgten Merkmals in Einzelbild $n(t-4)$, bewegt sich dieses auf einer Trajektorie (2) entlang der Merkmalspositionen in den Einzelbildern (3) hin zur finalen Merkmalsposition (4) in Einzelbild $n(t+4)$. Für eine hohe Frequenz f der Ist-Positionserfassung, definiert durch einen nur geringen Zeitunterschied Δt aufeinanderfolgender Einzelbilder, kann von einer geringen geometrischen Merkmalsbewegung bei sequentiellen Einzelbildern ausgegangen werden. Ausgehend von dieser Annahme ist es möglich zu präzisieren, dass sich das Merkmal in Einzelbild $n(t)$ innerhalb eines Erwartungsbereichs (5) mit dem Radius r_{ROI} (6) befindet, welcher um die Merkmalsposition $n(t-1)$ aufgespannt ist.

Definiert ist r_{ROI} über den Zusammenhang

$$r_{ROI} = \frac{v_{Soll}}{f} + \frac{d_{Merkmal}}{2}. \quad (6.9)$$

Hierbei bestimmt f die Frequenz der Ist-Positionserfassung, v_{Soll} die Soll-Geschwindigkeit der Roboterbewegung und $d_{Merkmal}$ die Größe des verfolgten Merkmals. (Angelehnt an [135])

Dieser Zusammenhang kann für eine signifikante Erhöhung der Robustheit und Zeiteffizienz der in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Blob-Analyse genutzt werden, indem die betrachteten Bilddaten jeweils auf eine Bildregion („Region-of-Interest“) mit dem Radius r_{ROI} beschränkt werden, der kontinuierlich und dynamisch um den Merkmals-Schwerpunkt im aktuell betrachteten Einzelbild gebildet wird. Nur diese beschränkte Bildregion wird im Folgebild zum Wiederfinden des Merkmals verwendet. Mathematisch wird die translatorische Bewegung des Merkmals in den Bilddaten vektoriell beschrieben werden. Diese Beschreibung setzt sich aus folgenden Elementen zusammen:

R_{init}	Position des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems bei Bewegungsstart,
$P_{init = n(t-4)}$	Initiale Merkmalsposition im Einzelbild $n(t-4)$,
$P_{n(t)}$	Merkmalsposition im Einzelbild $n(t)$,
$P_{n(t-1)}$	Merkmalsposition im Einzelbild $n(t-1)$,
$\overrightarrow{a_{n(t)}}$	Verschiebungsvektor im aktuellen Einzelbild von $P_{init=n(t-4)}$ zu $P_{n(t)}$,
$\overrightarrow{a_{n(t-1)}}$	Verschiebungsvektor im vorhergehenden Einzelbild von $P_{init = n(t-4)}$ zu $P_{n(t-1)}$,
$\overrightarrow{g_{n(t)}}$	Roboterposition im aktuellen Einzelbild $n(t)$,
$\overrightarrow{g_{n(t-1)}}$	Roboterposition im vorherigen Einzelbild $n(t-1)$.

Die gesuchte Ist-Position des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems ausgehend vom Startpunkt der Bewegung berechnet sich zu

$$\begin{aligned} \overrightarrow{g_{n(t)}} &= (\overrightarrow{g_{n(t-1)}} - \overrightarrow{a_{n(t-1)}}) + \overrightarrow{a_{n(t)}} \\ \begin{pmatrix} x_{g_{n(t)}} \\ y_{g_{n(t)}} \\ z_{g_{n(t)}} \end{pmatrix} &= \left(\begin{pmatrix} x_{g_{n(t-1)}} \\ y_{g_{n(t-1)}} \\ z_{g_{n(t-1)}} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{a_{n(t-1)}} \\ y_{a_{n(t-1)}} \\ z_{a_{n(t-1)}} \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} x_{a_{n(t)}} \\ y_{a_{n(t)}} \\ z_{a_{n(t)}} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6.10)$$

Entsprechend wird die Ist-Position des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems $\overrightarrow{g_{n(t)}}$ bestimmt, indem die zuvor ermittelte Merkmalsverschiebung $\overrightarrow{a_{n(t-1)}}$ von der vorhergehenden Position des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems $\overrightarrow{g_{n(t-1)}}$

abgezogen und die aktuell zur initialen Merkmalsposition $P_{\text{init}=n(t-4)}$ erfasste Verschiebung $\vec{a}_{n(t)}$ aufaddiert wird.

Eine Ermittlung der Roboterbewegung in dieser Form ist so lange möglich, wie sich das verfolgte Merkmal des Werkstücks in den Bilddaten befindet. Verlässt das Merkmal jedoch den Sichtbereich der Kamera, muss durch die Folgereferenzierung ein neues Merkmal detektiert werden, welches im weiteren Verlauf zur Bewegungserfassung genutzt wird und somit eine kontinuierliche Bewegungserfassung gewährleistet.

6.3.4 Algorithmus zur Folgereferenzierung

Basis für die Folgereferenzierung ist eine Vorhersage, dass das aktuell verfolgte Merkmal den Bildausschnitt in einem der Folgebilder verlässt. Dargestellt ist das Grundprinzip in Abbildung 58.

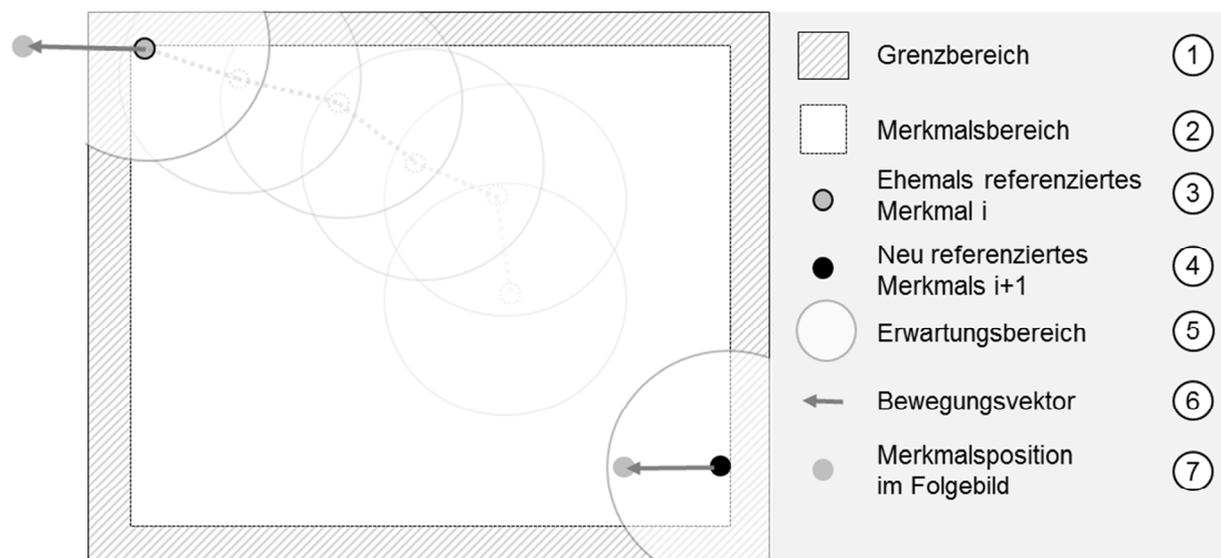


Abbildung 58: Grundprinzip der Folgereferenzierung

Genutzt wird für diese Prädiktion ein parametrierbarer Grenzbereich (1), welcher den Merkmalsbereich (2) von der Bildgrenze trennt. Kontinuierlich wird während der Ist-Bewegungserfassung die Merkmalsposition (3) relativ zur Bildgrenze ermittelt. Unterschreitet der Abstand ein durch den Grenzbereich definiertes kritisches Maß, wird davon ausgegangen, dass das referenzierte Merkmal zeitnah den Bildausschnitt verlässt. Ist dies der Fall, muss ein neu zu referenzierendes Werkstückmerkmal (4) identifiziert werden. Hierzu wird der in Abschnitt 6.3.3 eingeführte beschränkte Erwartungsbereich aufgelöst und die Suche nach einem neuen Merkmal auf den kompletten Merkmalsbereich ausgeweitet. Ist die Ausprägung der Merkmale bekannt, z. B. in Form von kreuzförmigen, runden oder rechteckigen Passermarken, ermöglicht verfügbares geometrisches Modellwissen eine robuste Identifikation eines geeigneten neuen Merkmals. Um die modellbasiert gefundene neue Merkmalsposition wird der bereits eingeführte Erwartungsbereich (5) aufgespannt und innerhalb

dessen pixelorientiert der exakte Schwerpunkt und somit die Position des Merkmals in den Bilddaten identifiziert. Eine geometrische Relation von ehemals verfolgten Merkmal zu neuem Merkmal muss nicht hergestellt werden, basierend auf der Vorgabe, dass sich das neue zu verfolgende Merkmal in gleicher Weise bewegt (6), (7) wie das vormals verfolgte. Dies ist dahingehend richtig, da sich die Merkmale auch während der Bewegung in Ihrer geometrischen Relation bzw. Lage nicht zueinander verändern.

Der Bewegungsfortschritt des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems zu einem beliebigen Zeitpunkt t in Einzelbild $n(t)$ nach x Merkmalswechseln i wird somit vektoriell beschrieben über

$$\vec{g}_{x,n(t)} = (\vec{g}_{x,n(t-1)} - \vec{a}_{x,n(t-1)}) + \vec{a}_{x,n(t)} + \sum_x^{i=1} \vec{a}_{x,final} \quad (6.11)$$

Während der erste Ausdruck den Bewegungsfortschritt bei der Referenzierung des x -ten Merkmals entsprechend Formel 6.10 beschreibt, bestimmt der zweite Ausdruck die kumulierte Bewegung bei den vormals referenzierten Merkmalen. Die hohe erreichbare Genauigkeit der Methode zu vektorbasierten Bewegungserfassung in Verbindung mit einer hohen Zeiteffizienz und Robustheit belegen die in Abschnitt 7.3.2 dargestellten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.

6.4 Ermittlung des Soll-Zustands als Führungsgröße

Der Soll-Zustand beschreibt die durch das ursprüngliche Steuerungsprogramm vorgegebene Pose und Geschwindigkeit des Roboters zu einem Zeitpunkt t . Bezogen auf den Regelkreis stellt der Soll-Zustand somit die Führungsgröße $w(t)$ dar. Ermittelt werden kann die Führungsgröße in zwei Varianten: Durch Berechnung anhand der Vorgaben des Steuerungsprogramms oder durch Nutzung der entsprechenden Informationen aus der Robotersteuerung.

6.4.1 Ermittlung durch Berechnung

Für die Ermittlung des Soll-Zustandes zum Zeitpunkt t wird der elementare Zusammenhang aus Formel 6.1 in Verbindung mit dem bekannten Interpolationstakt der Robotersteuerung t_i und den Informationen des Steuerungsprogramms bezüglich Soll-Geschwindigkeit v_{Soll} und relevanter Bahnpunkte RBP_i genutzt.

Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Ermittlung des Soll-Zustands durch Berechnung ist in Abbildung 59 illustriert.

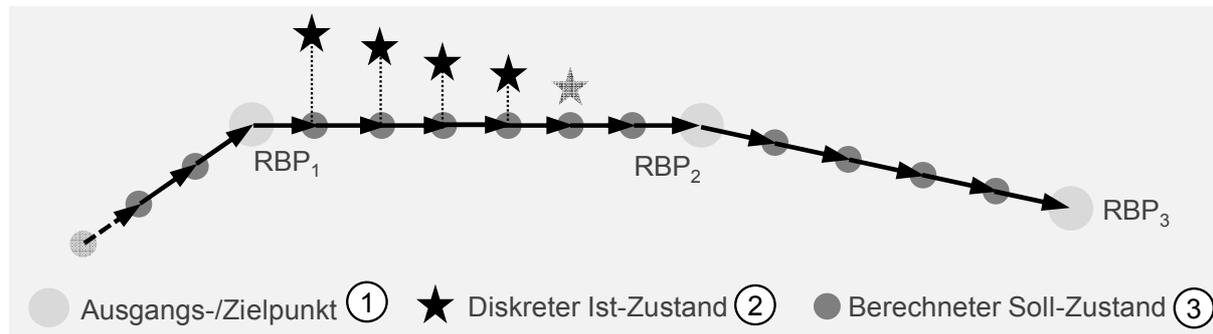


Abbildung 59: Berechnung des Soll-Zustands

Vorgegeben ist die dargestellte nominale Soll-Bahn durch lineare Bahnabschnitte, welche durch die aus dem ursprünglichen Steuerungsprogramm bekannten Bahnpunkte RBP_1 bis RBP_3 (1) definiert sind. Wird die Erfassung eines Ist-Zustand (2) initiiert, z. B. durch die Steuerflanke eines Triggersignals der Ausführungseinheit, wird der entsprechend zugehörige Soll-Zustand (3) anhand der Informationen des Steuerungsprogramms berechnet und mit einem eindeutigen Identifikationsstempel versehen, der seitens der Ausführungseinheit synchron an die Ist-Zustandsermittlung und Soll-Zustandsberechnung übermittelt wird. Bei auftretenden Latenzzeiten, welche z. B. durch eine Aufbereitung der Ist-Zustandsdaten auftreten, ermöglicht dieser eindeutige Identifikationsstempel die Zuordnung von Regelgröße und zugehöriger Führungsgröße für einen diskreten Berechnungszeitpunkt t .

6.4.2 Erfassung aus der Robotersteuerung

Bei der zweiten Variante zur Ermittlung der Führungsgröße werden Zustandsinformationen aus der Robotersteuerung verwendet. Hierbei wird das Unwissen der Robotersteuerung ausgenutzt, dass dieser ein kinematisches Modell des Roboterarms zugrunde liegt, welches von der Realität abweicht. Entsprechend steht zur Bewegungslaufzeit auch in der Robotersteuerung der nominal korrekte Soll-Zustand für jeden Zeitpunkt t als Führungsgröße zur Verfügung.

Eine Erfassung und Zuführung dieser Informationen an den Regelkreis kann in der verteilten Anwendung auf zwei Wegen erfolgen: Eine Abfrage seitens der Fernsteuerungseinheit („Polling“) oder zyklische Zustellung („Pushing“) durch die Robotersteuerung. Beim Polling wird der Informationsfluss aktiv durch den Verarbeitungsstrang der Regelungseinheit ausgelöst, z. B. analog vorherigem Abschnitt durch die Steuerflanke eines Triggersignals. Die Robotersteuerung verarbeitet die Anfrage und übersendet den angefragten Soll-Zustand an die auf Antwort wartende Fernsteuerungseinheit zurück. Zu beachten sind hierbei Latenzen aufgrund des Zeitbedarfs zur Datenverarbeitung der Robotersteuerung zum einen und Informationslaufzeiten für die Kommunikation zum anderen. Bei der Pushing-

Variante sendet die Robotersteuerung zyklisch, nach einem vorgegebenen Takt die aktuellen Soll-Zustandsinformationen an den Regelkreis. Dort löst das Eintreffen des Soll-Zustands ein Ereignis aus, wie z. B. die Akquise des zugehörigen Ist-Zustands. Verknüpft bilden Ist-Zustand und Soll-Zustand den Eingang des in Abschnitt 6.2. beschriebenen Regelkreises zur Ermittlung der Regelabweichung $e(t)$.

Während sowohl die Erfassung des Soll-Zustands aus der Robotersteuerung als auch deren Berechnung eine Regelgrößenbestimmung ermöglichen, ist die Wahl je nach Anwendungsfall und insbesondere abhängig von den Möglichkeiten der Robotersteuerung abzuwägen. Besonders zielführend ist eine Erfassung des Soll-Zustands aus der Robotersteuerung in der Pushing-Variante. Da die Robotersteuerung Echtzeitbedingungen erfüllt, kann diese als Taktgeber für die weiteren Systeme in der verteilten Anwendung genutzt werden (siehe auch Abschnitt 6.1).

6.5 Zusammenfassung und Beurteilung

Grundlage des erforschten Regelungssystems bildet die in Abschnitt 6.1 vorgestellte verteilte Anwendung. Zentrale Eigenschaft der Systemarchitektur ist eine Verlagerung komplexer und rechenintensiver Datenverarbeitungsalgorithmen auf separate Berechnungseinheiten jenseits der Robotersteuerung, bei gleichzeitiger Nutzung der roboterspezifischen Grundfunktionalitäten. Ausführungsseitig ermöglicht diese Herangehensweise eine einfache Adaptierbarkeit der Anwendung an proprietäre Robotersysteme unterschiedlicher Hersteller, ohne die Notwendigkeit mit hohem Aufwand individuelle Robotersteuerungen und deren Regler nachzubilden. Im Weiteren erlaubt der Ansatz eine universelle Entwicklung und flexible Anbindung applikationsabhängiger Funktionsmodule und Sensoren. Exemplarisch untersucht im Bereich der Genauigkeitssteigerung, konnte die Universalität durch die Umsetzung eines gestenbasierten Robotersteuerungsdemonstrators [156] und die Absolutgenauigkeitssteigerung des Roboters über einen 3D-Oberflächenscanner nachgewiesen werden [153], [155], [154], [168].

Kernelemente des in Abschnitt 6.2 vorgestellten Regelungssystems zur Genauigkeitssteigerung sind eine angepasste Bahnsteuerung sowie ein geeigneter Regler zur Ausregelung von Bewegungsabweichungen. Die erforschte Methode zur vektorbasierten Bahnsteuerung gewährleistet eine deterministische Bewegungsausführung durch die Kinematik und bildet die Grundlage zur Verlagerung der Bahninterpolationsalgorithmen auf externe Berechnungseinheiten. Diese Verlagerung ermöglicht die Entwicklung von übergeordneten Reglern, welche robotertypunabhängig eingesetzt werden können. Im Gegensatz zu komplexen modellbasierten Reglern, die prinzipbedingt robotertypabhängig ausgeführt werden müssen und nur für ein spezifisches Robotermodell nutzbar sind, erlaubt die gewählte Vorgehensweise der externen Eingrößenregelung eine herstellerunabhängig breite Nutzbarkeit. Dabei bleibt die interne Roboterregelung weiterhin wirksam

und ermöglicht eine dynamische Ausregelung von schwingungsbedingten Abweichungen in Verbindung mit einem Ausgleich makroskopischer Abweichungen durch den übergeordneten, externen Regler. Aufgrund dessen, dass bei stetigen Bahnverläufen Regelabweichungen $e(t)$ nicht schlagartig auftreten, sondern sich schwellend auf- und abbauen, ist der erforschte Eingrößenregler nutzbar, um eine Roboterkinematik auf die richtige Bahn zu führen und auf dieser zu halten. Die dementsprechend entwickelten Feininterpolationsalgorithmen erfüllen die zentralen Anforderungen an regelungstechnische Systeme im Hinblick auf Stabilität, Genauigkeit, Dämpfung und Schnelligkeit. Die Einführung einer vorlaufenden Stützstelle zur Orientierung der Ausgleichsbewegungen führt zu einem konstanten und vorhersagbaren Regelverhalten auf linearen Bahnabschnitten. Die Veränderung des Stützstellenvorlaufs erlaubt dabei eine Anpassung der Eingriffsstärke. Die Begrenzung des Winkels der Richtungsänderung während des Ausgleichs von Regelabweichungen in zirkularen Bereichen ermöglicht sanfte und kontinuierliche Korrekturbewegungen auch in Kreisabschnitten. Die anschaulichen Parameter zur Einstellung des Verhaltens der Algorithmen erlauben hierbei eine einfache empirische Adaptierbarkeit an unterschiedliche Robotertypen und Applikationen.

Konsequent wird die Herangehensweise einer vektorbasierten Roboterregelung auch im Bereich der sensorischen Regelgrößenbestimmung $r(t)$ aufgegriffen und in Abschnitt 6.3 dementsprechend eine Methode zur vektorbasierten, translatorischen Ist-Bewegungsermittlung vorgestellt. Die erforschte Methode zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass im Gegensatz zum bekannten Stand der Technik und Forschung die Prozessbahn nicht vorskizziert, z. B. in Form einer Naht, zur Verfügung stehen muss. Die Methode basiert dabei auf einer Erfassung der Bewegungen von Merkmalen in den Sensordaten, wobei anhand dieser Information die translatorische Bewegung des Roboters abgeleitet wird. Eine Prädiktion der Merkmalsbewegung für aufeinanderfolgende Sensordaten erlaubt hierbei zum einen eine deutliche Reduzierung der auszuwertenden Sensordaten sowie zum anderen eine kontinuierliche Bewegungsverfolgung. Genutzt werden hierzu dynamische, zur Laufzeit generierte Erwartungsbereiche der Bewegung, welche eine hohe Zeiteffizienz der Algorithmen zur Bewegungsermittlung gewährleisten. Der vektorielle Ansatz der Regelgrößenbestimmung gewährleistet eine nahtlose Integration der Ist-Bewegungsinformationen in den ebenfalls vektorbasierten Regelkreis.

Als weitere Eingangsgröße des Regelkreises werden abschließend in Abschnitt 6.4 die Möglichkeiten zur Führungsgrößenbestimmung $w(t)$ dargestellt. Abhängig von den Eigenschaften der Komponenten in der verteilten Anwendung, kann diese durch eine Berechnung anhand des Steuerungsprogramms erfolgen oder es wird der in der Robotersteuerung zur Verfügung stehende Soll-Zustand genutzt. Durch eine aktive, zyklische Übermittlung des Soll-Zustands seitens der Robotersteuerung, kann diese dabei auch in nicht-echtzeitfähigen Architekturen als Taktgeber verwendet werden.

7 Beispielhafte Umsetzung sowie Evaluierung der Methoden und Algorithmen

Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Methoden umfassen zum einen die Steuerung (Kapitel 5) und zum anderen die Regelung (Kapitel 6) hochpräziser roboterbasierter Prozesse. Um die Funktionsfähigkeit der erforschten Methoden zu untersuchen, wurden diese in intuitiv bedienbaren, graphischen Softwaretools umgesetzt und deren Leistungsfähigkeit quantitativ evaluiert. Ein Softwaretool zur automatisierten Bahnoptimierung wird in Abschnitt 7.2 vorgestellt und die Analyseergebnisse erforschter Bahnoptimierungsmethoden diskutiert. Ein softwarebasiertes Regelungssystem zur hochgenauen und -dynamischen Roboterregelung wird in Abschnitt 7.3 erörtert und die Ergebnisse der experimentellen Funktionsevaluierung dargestellt. Durchgeführt wurden die Analysen in einer während der Arbeiten entwickelten, roboterbasierten Prozesszelle, deren Bestandteile in nachfolgendem Abschnitt 7.1 kurz beschrieben werden.

7.1 Versuchsumgebung

Für die praktische Evaluierung der entwickelten Methoden wurde eine Versuchszelle konstruiert und umgesetzt, deren zentrale Komponenten in Abbildung 60 dargestellt sind.

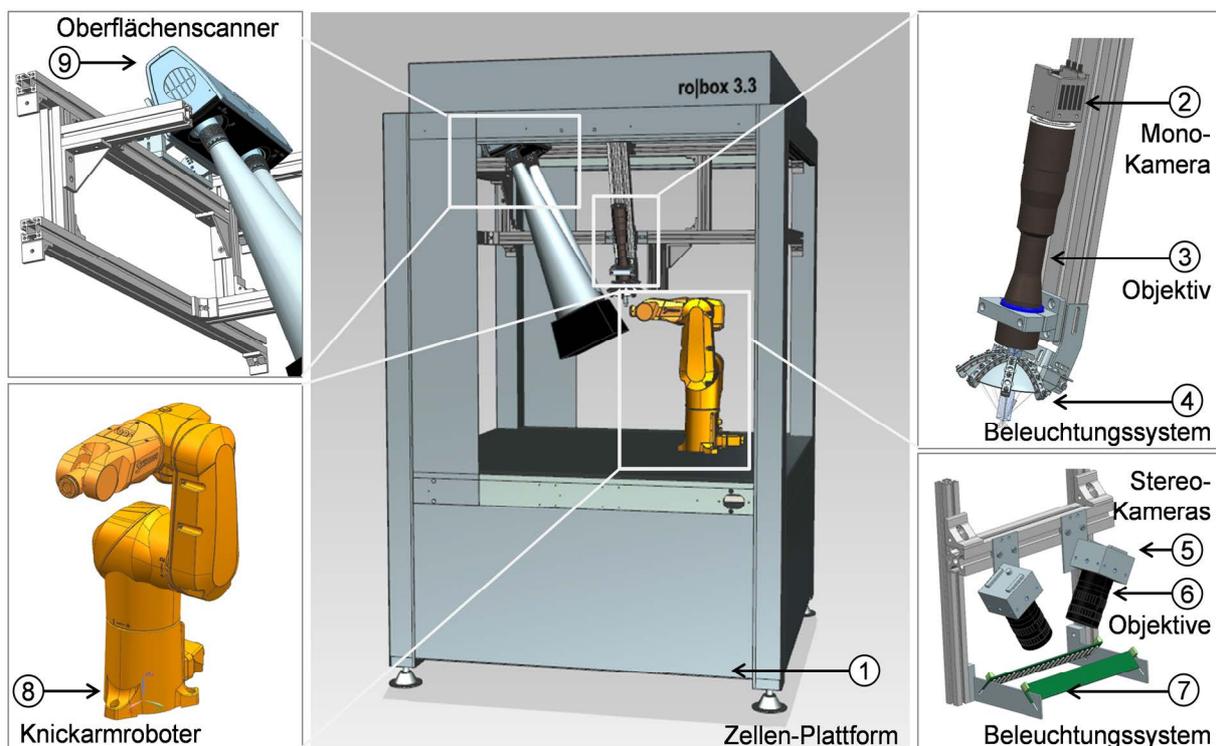


Abbildung 60: Versuchsumgebung

Die Versuchsumgebung ist in neun funktionsrelevante Komponenten untergliedert, deren zentrale Eigenschaften nachfolgend strukturiert dargestellt werden:

1. Zellen-Plattform (*Baumann ro|box 3.3*):
Basis für die Aufbauten bildet eine standardisierte ro|Box 3.3 Zelle. Die Stahlkonstruktion, das hohe Eigengewicht und die Steifheit des Zellenrahmens gewährleisten eine Dämpfung eventueller durch die Roboterbewegung oder der Umwelt induzierter Schwingungen. Damit bildet die Zelle eine optimale Grundlage für hochpräzise Bewegungs- und Messaufgaben. Die Etablierung eines aktiven Sicherheitskreises zur Überwachung beweglicher Schutzeinrichtungen garantiert den Bedienerschutz. [158], [169]
2. Monokamerasystem (Kamera: *IDT Motionscope M3*; Framegrabber: *SiliconSoftware microEnable IV VD4-CL*):
Das verwendete Hochgeschwindigkeitskamerasystem Motionscope M3 ermöglicht eine hochdynamische Zustandserfassung mit einer Bilderfassungsfrequenz von maximal 517 fps bei einer Auflösung von 1,3 MPixel (1.280 x 1.024 Pixel) und einer S/W Bittiefe von 8 Bit/Pixel. Durch Belichtungszeiten des CMOS-(Complementary metal-oxide-semiconductor)-Kamerasensors von minimal 1 μ s werden Bewegungsunschärfeneffekte gering gehalten. Angebunden ist die Kamera an den Rechner zur Sensordatenverarbeitung über einen Cameralink SiliconSoftware microEnable IV VD4-CL Framegrabber, welcher eine Datenübertragungsrate von 900 MB/s erlaubt (Full-Cameralink). Der integrierte FPGA-Chip ermöglicht eine Verlagerung von Datenverarbeitungsoperationen auf den Framegrabber und eine echtzeitfähige Prozessierung der Bilddaten. Die Möglichkeit zur Triggerung des Bildeinzugs über den Framegrabber oder alternativ der Ausführungseinheit der Steuerung ermöglicht eine deterministische Bereitstellung der Bilddaten. [170], [171]
3. Bi-telezentrisches Messobjektiv (*Optoengineering TC16M036*):
Das Objektiv TC16M036 ist für Präzision-Messapplikationen im industriellen Einsatzbereich konzipiert. Das Linsensystem garantiert eine verzeichnungsfreie (Verzerrungsfehler < 0,03 %), realitätsgetreue (Telezentrie 0,05°) und hochwertige Abbildung der Messobjekte mit einer Vergrößerung von $1 \pm 0,2$ % (selbst ermittelt 0,20668 % [147]) und großem Schärfentiefenbereich. [172]
4. LED-Beleuchtungssystem (*Eigenentwicklung*)
Das LED-basierte und mikrocontrollergesteuerte Hochleistungsbeleuchtungssystem ermöglicht durch eine zur Bildaufnahme synchronisierten, gepulsten Ausleuchtung des bewegten Objekts Belichtungszeiten bis minimal 12 μ s. Eine individuelle Ansteuerung unterschiedlicher Belichtungssegmente erlaubt verschiedene Belichtungsmodi im Hell- und Dunkelfeldbereich. Getaktet wird der Mikrocontroller über den Framegrabber oder alternativ der Ausführungseinheit. [148]

5. Stereokamerasystem (Kamera: 2 x *Mikrotron MC1302*; Framegrabber: 2 x *Mikrotron Inspecta-4C*)
Die verwendeten Mikrotron MC1302 Kameras gestatten bei einer Auflösung von 1,3 MPixel (1.280 x 1.024 Pixel) eine Bildfrequenz von 118 fps in S/W bei 8 Bit Farbtiefe/Pixel. Über die genutzten Mikrotron Inspecta-4C Framegrabber werden in der Cameralink Base-Konfiguration je Kamera 255 MB/s Sensordaten an den Verarbeitungsrechner übertragen. Gertriggert wird der Bildeinzug beider Kameras zeitsynchron über einen gemeinsamen Frequenzgenerator. Hierdurch wird ein zeitlicher Versatz der Bilddaten vermieden. [173], [174]
6. Objektiv (2 x *Fujinon Objektive CF25HA-1*)
Das Linsensystem des Universalobjektivs CF25HA-1, mit einer Brennweite von 25 mm, ermöglicht bei geeigneter Einstellung der Blende (Genutzt: F. 11) einen hohen Schärfentiefenbereich und gewährleistet somit eine zuverlässige Bewegungserfassung auch bei größeren Messvolumen. [175]
7. LED-Beleuchtungssystem (*Eigenentwicklung*)
Die durch einen Mikrokontroller angesteuerte Beleuchtung des Stereokamerasystems setzt sich aus zehn Hochleistungs-LEDs zusammen, welche gepulst und synchronisiert zur Bildaufnahme betrieben werden, Belichtungszeiten bis minimal 50 μ s erlauben und somit Bewegungsunschärfeneffekte reduzieren.
8. Knickarmroboter (*Stäubli TX40* und *Stäubli TX60I*)
Die zentralen Kenndaten beider Roboter sind in Tabelle 2 (Getestetes System 1A: Stäubli TX40 und System 1C: Stäubli TX60I) zusammenfassend dargestellt. Der hohe Interpolationstakt beider Roboter ermöglicht eine hocheffiziente externe Regelung, stellt aber ebenfalls entsprechend hohe Anforderungen an die Effizienz und Echtzeitfähigkeit sämtlicher Komponenten der verteilten Anwendung. [67], [68]
9. 3D-Oberflächenscanner (*Steinbichler Comet L3D 5M*)
Der hochgenaue 3D-Oberflächenscanner Comet L3D 5M, welcher auf hybrid kodierter Streifenprojektion basiert, erlaubt eine hochpräzise 3D-Vermessung und Digitalisierung von Werkobjekten mit einer Genauigkeit im Bereich weniger 10 μ m. Das Messsystem unterstützt unter anderem im Bereich der Erstreferenzierung und statischen Ist-Zustandserfassung. [176], [168]

Im Gesamtkontext fungieren die Knickarmroboter (8) als werkstückführende Handhabungsgeräte (eye-to-hand Konfiguration), wobei die Sensorsysteme und -aufbauten (2 bis 7 und 9) ortsfest und flexibel ausrichtbar in der Zelle (1) installiert sind. Umgesetzt wurde die in Abschnitt 6.3 vorgestellte Methode zur Regelgrößenbestimmung mittels Halcon V11 bzw. 12. Als Datenverarbeitungsplattformen dienen im Hinblick auf eine breite Nutzbarkeit konventionelle Desktop-PCs mit Windows 7 Betriebssystemen.

7.2 Umsetzung der Methode zur Bahnoptimierung und Analyse

Zur Analyse der in Kapitel 5 vorgestellten Algorithmen zur Bahnoptimierung wurden diese in einem Softwaretool implementiert und durch einen Vergleich unmodifizierter und optimierter Roboterbewegungsprogramme die Auswirkungen der Modifikationen exemplarischer Steuerungsprogramme evaluiert.

7.2.1 Implementierung in dem Softwaretool „PathTransformer“

Das entwickelte Softwaretool „PathTransformer“ ist eine C#-Anwendung basierend auf dem .NET Framework 4.5. und lauffähig auf Standard Desktop-PCs mit Windows Betriebssystemen. Der „PathTransformer“ ist als eigenständiges Addon-Softwaretool konzipiert. Interaktionsschnittstelle des Programms zum Nutzer ist ein intuitiv zu bedienendes Graphical-User-Interface (GUI). Dargestellt ist diese in Abbildung 61.

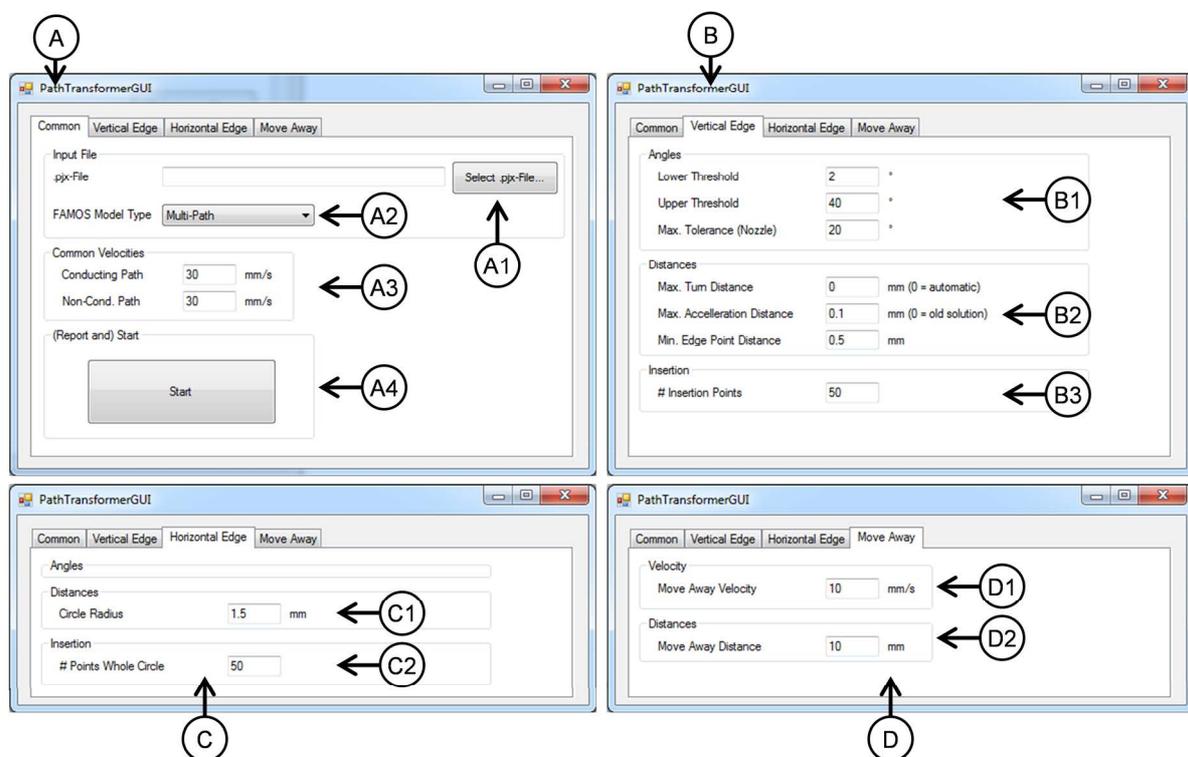


Abbildung 61: Benutzerschnittstelle "PathTransformer"

Strukturiert ist die Benutzerschnittstelle über vier Reiter (A) bis (D). Mittels Reiter (A) werden allgemeine Einstellungen vorgenommen und der Optimierungsvorgang gestartet. Die weiteren Reiter dienen der Parametrierung der Optimierungsalgorithmen für Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen (B), Unstetigkeiten in einer Bearbeitungsebene (C) und der „Move-Away“ Strategie (D).

Im Bereich (A1) wird das zu modifizierende, originale Robotersteuerungsprogramm ausgewählt. Die modulare Softwarearchitektur erlaubt hierbei die Anbindung von Parsinginterfaces zum Einlesen des proprietären Programmcodes unterschiedlicher Roboterhersteller, wobei beispielhaft eine Schnittstelle für die Programmiersprache

VAL3 (Stäubli) implementiert ist. Bereich (A2) ermöglicht die Festlegung, mit welcher Struktur das Robotersteuerungsprogramm erstellt wurde. Mögliche Strukturen sind die Ausführung der Prozessbahn und der daraus resultierenden Robotertrajektorie als einzelner Bahnzug („Single Path“) oder bestehend aus mehreren, z. B. den unterschiedlichen Bearbeitungsflächen zugeordneten Bahnsegmenten („Multiple Paths“). Über Bedienfeld (A3) werden die Prozessgeschwindigkeit auf der Bauteiloberfläche sowie die Geschwindigkeit in Transferbereichen ohne Prozesseingriff festgelegt. Durch Betätigung von „Start“ (A4) wird die Optimierung nach dem Setzen aller Parameter gestartet.

Einen weiteren Hauptbereich des Softwaretools stellt der Reiter „Vertical Edge“ (B) dar, in dem die Parameter des Optimierungsalgorithmus für Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen eingestellt werden. Über (B1) „Angles“ werden die prozessrelevanten Winkel festgelegt. „Lower Threshold“ entspricht dem Minimalwert, ab dem der Optimierungsalgorithmus zum Tragen kommt (Bedingung 1 - Abbildung 33). Einfluss hat dieser Parameter maßgeblich auf Bereiche mit sukzessiver Orientierungsänderung, wie z. B. bei Rundungen oder Freiformflächen, da in diesen Abschnitten eine Aufbereitung der Bahn gegebenenfalls nicht notwendig ist. „Upper Threshold“ definiert den Neigungsschwellwert Φ (Bedingung 5 - Abbildung 33), der maßgeblich die Ausführung von Optimierungsstrategie D auslöst. Der Parameter „Max. Tolerance“ repräsentiert die zulässige, prozessabhängige Winkelabweichung von der Orthogonalitätsanforderung $\frac{\delta}{2}$ (Bedingung 4 - Abbildung 33). Über „Distances“ (B2) wird die Charakteristik des Stetigkeitsverhaltens bestimmt. „Max. Turn Distance“ definiert eine maximal zu nutzende Distanz vor/nach Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen, in dem die Vor-/Nachdrehung beginnt/endet. Dieser Parameter kann ebenfalls auf automatisch gesetzt werden, um eine dynamische Anpassung an beliebige Werkstückgeometrien zu ermöglichen und gleichzeitig ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen (siehe Abschnitt 7.2.3). Über „Max. Acceleration Distance“ wird ein zusätzlicher Feininterpolationspunkt in definierbaren Abstand nach einer Nachdrehbewegung eingefügt, um einen homogenen Geschwindigkeitsanstieg zu erreichen. Die Anzahl der neu zu setzenden Stützpunkte vor und nach Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen wird mittels des Parameters „Insertion Points“ (B3) festgelegt.

Über den Reiter (C) „Horizontal Edge“ wird das Verhalten des Algorithmus bei Unstetigkeiten in der Bearbeitungsebene bestimmt. Im Bereich „Distances“ (C1) wird der Radius der Ausgleichsbewegung mit dem Parameter „Circle Radius“ definiert. Mittels des Bedienfelds „Insertion“ (C2) und des Parameters „Points Whole Circle“ wird die Anzahl neuer Bahnpunkte festgelegt, über die der Ausgleichskreis beschrieben wird.

Das „Move-Away“ Verhalten wird schlussendlich über Reiter (D) bestimmt. „Velocity“ (D1) ermöglicht die Bestimmung der Umorientierungsgeschwindigkeit „Move Away

Velocity“. Im Bedienfeld „Distances“ (D2) wird der „Move-Away“ Abstand von Werkstückoberfläche zu Werkzeug festgelegt. Nach der Parametrierung der Algorithmen wird der Modifikationsvorgang initiiert (A4) und das resultierende Roboterprogramm in einem definierten Ordner abgespeichert.

Zentrale Kriterien zur Beurteilung der Optimierungsalgorithmen sind das dynamische Verhalten der realen Roboterachsen vor und nach der Optimierung sowie die Gleichmäßigkeit der Bearbeitungsgeschwindigkeit und die Prozessbahnkonturtreue auf den Prozessflächen. Von nur geringer Aussagekraft ist dahingegen ein geometrischer Genauigkeitsvergleich der tatsächlich abgefahrenen Robotertrajektorien vor und nach der Optimierung, da sich diese deutlich voneinander unterscheiden (siehe Roboterbahnen in Abbildung 38 und Abbildung 39 im Vergleich).

7.2.2 Analyse des Beschleunigungsverhaltens der Achsen

Die Erprobung der Optimierungsalgorithmen erfolgt anhand zweier Werkstücke mit charakteristischen Ausprägungen der Substrate und der Prozessbahnen. Dargestellt sind die untersuchten Werkstücke in Abbildung 62.

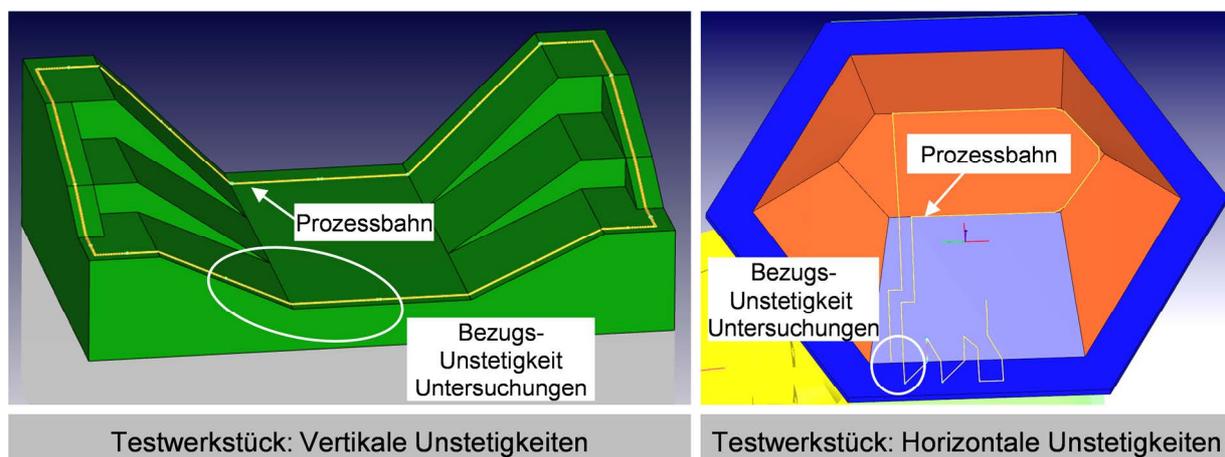


Abbildung 62: Testwerkstücke

Das Testwerkstück zur Analyse von Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen (links) ist im Wesentlichen konkav ausgeprägt und verfügt über mehrere Rampen mit variierenden Steigungswinkeln. Die unterschiedlichen Steigungswinkel ermöglichen eine gezielte Untersuchung der Funktionsweise und Auswirkungen der Optimierungsstrategien B bis D. Das Testwerkstück zur Untersuchung von Unstetigkeiten in der Bearbeitungsebene (rechts) ist dahingegen konvex ausgeformt mit einer Prozessbahn, welche über die unterschiedlichen Prozessflächen hinweg variierende spitze und stumpfe Winkel in der Bearbeitungsebene aufweist. Anhand dieses Werkstücks wird Optimierungsstrategie A analysiert. Hervorgehoben sind in den Abbildungen die Unstetigkeiten, auf welche sich die Untersuchungen beziehen.

Zur Analyse der auftretenden Effekte werden die Geschwindigkeitsverläufe [$^{\circ}/s$] der Einzelachsen des realen Roboters bei der Bewegung aufgezeichnet und durch einfache und zweifache Ableitung die Beschleunigung [$^{\circ}/s^2$] sowie der Ruck [$^{\circ}/s^3$]

ermittelt. Der Ruck entspricht hierbei der Geschwindigkeit der Beschleunigung. Ein Vergleich der originalen und der zugehörigen optimierten Bewegungsbahn ermöglicht eine quantitative Beurteilung der Veränderungen des dynamischen Verhaltens. Für die Analysen wurden jeweils die zwei Roboterachsen ausgewählt, welche als Hauptträger der Bewegung fungieren. Entsprechend fallen die Auswirkungen der Bahnoptimierung bei diesen Achsen besonders ausgeprägt aus.

Unstetigkeiten zwischen zwei Bearbeitungsebenen

Die nachfolgenden Diagramme beziehen sich auf eine konkave Unstetigkeit mit einem Winkel von 155° benachbarter Prozessflächen. Dies entspricht einer Steigung von 25° . Das Beschleunigungs- und Ruckverhalten von Roboterachse 4 für einen optimierten Parametersatz der Algorithmen zeigt Abbildung 63.

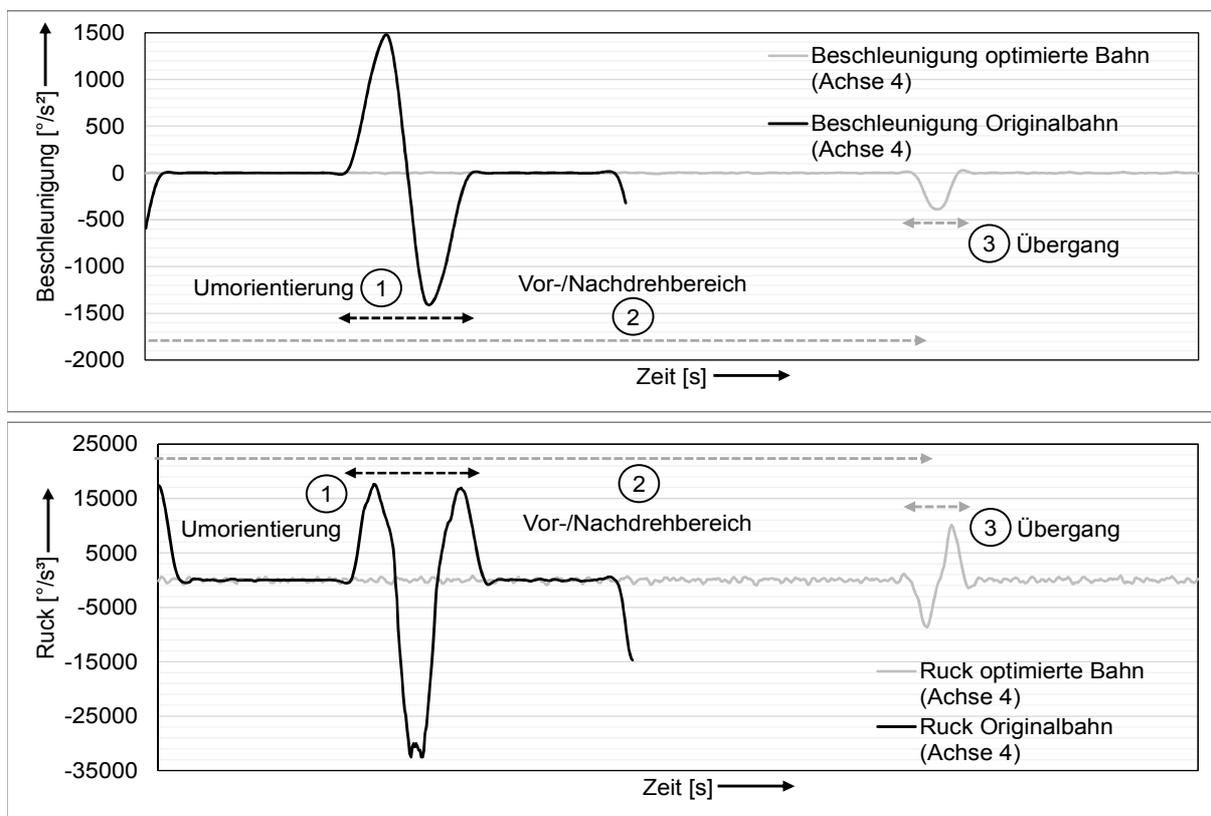


Abbildung 63: Dynamisches Verhalten Roboterachse 4 – Unstetigkeit zwischen zwei Bearbeitungsebenen (155°)

Die Originalbahn weist im Bereich der durch die Unstetigkeit induzierten Umlagerung (1) eine maximale Beschleunigung von $1.500 \text{ }^\circ/s^2$ sowie einen maximalen Ruck von $-33.000 \text{ }^\circ/s^3$ auf. Dahingegen zeigt die optimierte Trajektorie - abgesehen von einem leichten Rauschen - in den Bereichen des Vor-/Nachdrehens (2) keine ausgeprägten Beschleunigungen oder Ruckeffekte der Achse. Festzustellen ist eine Beschleunigungsspitze von $-400 \text{ }^\circ/s^2$ und Ruckspitze von $10.000 \text{ }^\circ/s^3$ am Übergang der Nachdrehbewegung (3) zur orthogonalen Relativbewegung Werkstück zu Werkzeug. Dies hat den Hintergrund, dass im Übergangsbereich

seitens des Optimierungsalgorithmus ein Interpolationspunkt mit geringfügig erhöhtem Abstand zum vorhergehenden Interpolationspunkt eingefügt wird. Dies resultiert in einer lokalen translatorischen Geschwindigkeitsvariation, die sich entsprechend in den Beschleunigungs- und Ruckverläufen widerspiegelt. Handwerkliche Optimierungen des Softwaretools können hierbei Abhilfe schaffen. Unter Berücksichtigung dieser Erhöhungen konnten jedoch im direkten Vergleich der Ruck- und Beschleunigungsspitzen von originaler und optimierter Trajektorie für Roboterachse 4 eine Reduzierung der Beschleunigung von - 75 % und des Rucks von - 70 % erzielt werden. In dem relevanten Vor-/Nachdrehbereich (2) werden ausgeprägte Beschleunigungs- und Ruckspitzen vollständig eliminiert.

Analog verhält sich dies für Roboterachse 6. Die Beschleunigungs- und Ruckverläufe sind in Abbildung 64 aufgetragen.

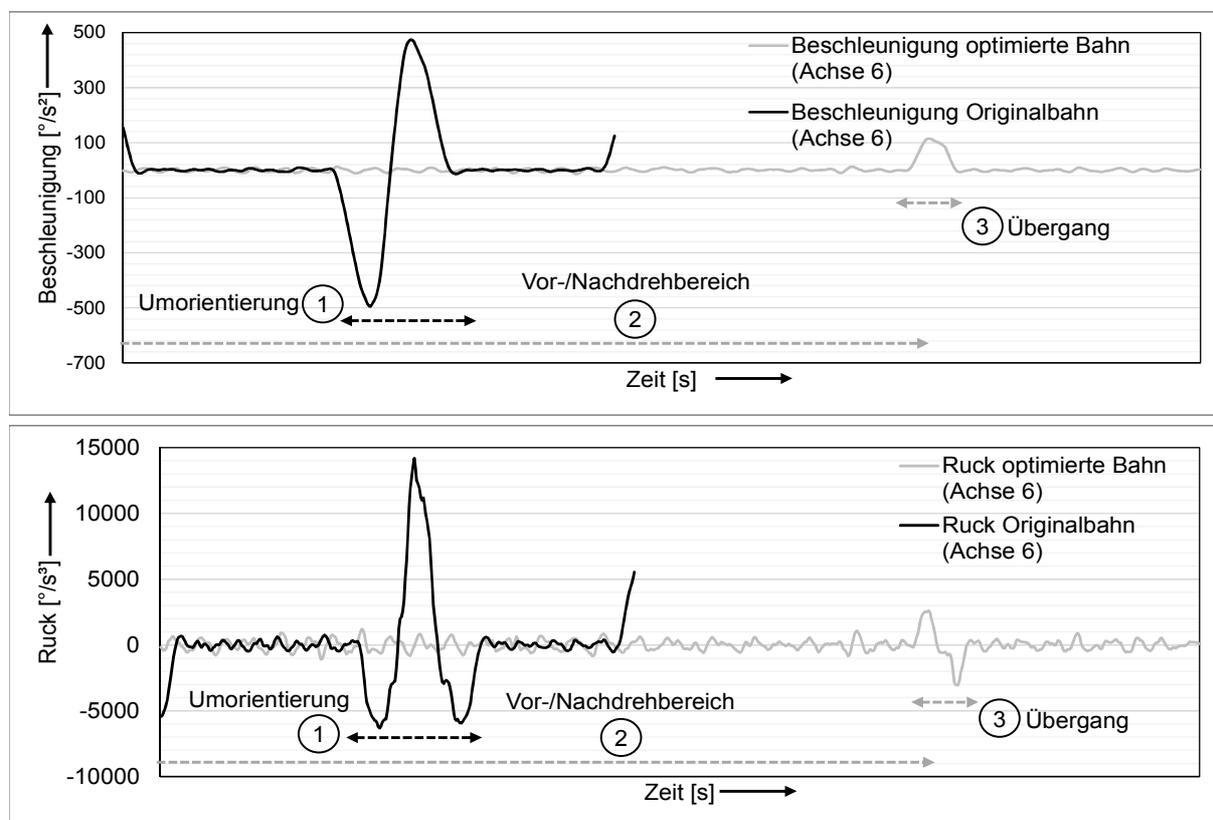


Abbildung 64: Dynamisches Verhalten Roboterachse 6 – Unstetigkeit zwischen zwei Bearbeitungsebenen (155°)

Durch Anwendung der Optimierungsalgorithmen wird die maximale Beschleunigung von - 500 $^{\circ}/s^2$ auf 110 $^{\circ}/s^2$ reduziert. Der maximale Ruck verringert sich von 14.000 $^{\circ}/s^3$ auf - 3.000 $^{\circ}/s^3$. Analog Abbildung 63 ist eine leichte Erhöhung der Werte im Übergangsbereich (3) festzustellen. Ausgeprägte Erhöhungen in dem Vor-/Nachdrehbereichen (2) werden dahingegen ebenfalls komplett beseitigt. Wird die Erhöhung im Übergangsbereich mit berücksichtigt, resultiert die Bahnoptimierung in einer Reduzierung von Beschleunigung und Ruck um jeweils ca. 78 %.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Optimierungsalgorithmen in Bereichen reinen Vor- und Nachdrehens eine Verbesserung des dynamischen Verhaltens der Roboterachsen bewirken, gekennzeichnet durch eine deutliche Reduzierung der Ruck- und Beschleunigungswerte. Bei den dargestellten Roboterachsen, welche als Hauptbewegungsträger fungieren, sind die positiven Auswirkungen besonders markant und treten bei den weiteren Achsen in verminderter Form auf. Keine Verringerung der dynamischen Kennwerte wird dahingegen durch die Move-Away Bewegung erzielt. Dies ist dadurch bedingt, dass durch die zügige Wegorientierung von Werkstück zu Werkzeug ebenfalls Beschleunigungs- und Ruckspitzen auftreten. Durch die Einflussnahme auf die Prozessausrüstung werden diese jedoch maßgeblich in Transferbereiche ohne Prozessausführung verlagert. Handwerklich korrekt umgangen werden können diese Spitzen konsequenterweise ebenfalls durch eine entsprechende Vor- und Nachdrehbewegung in den Move-Away Bereich hinein bzw. aus diesem heraus.

Unstetigkeiten in einer Bearbeitungsebene

Das Beschleunigungs- und Ruckverhalten für den Ausgleich eines spitzen Winkels der Prozessbahn in der Bearbeitungsebene ist in Abbildung 65 dargestellt. Die Diagramme zeigen das dynamische Verhalten der Roboterachse 3, welche bei dieser Unstetigkeit einen Hauptbewegungsträger bildet.

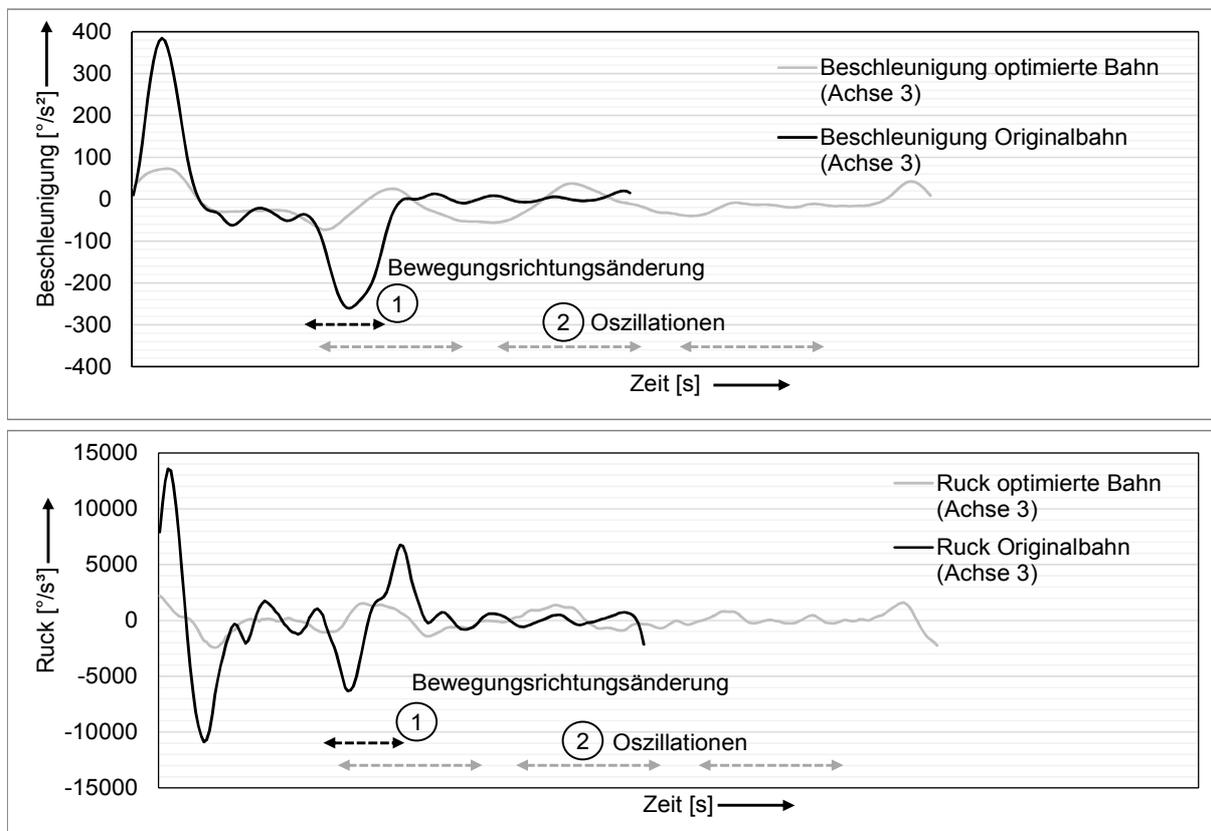


Abbildung 65: Dynamisches Verhalten Roboterachse 3 – Unstetigkeit in einer Bearbeitungsebene (43°)

Im Bereich der Bewegungsrichtungsänderung (1) treten maximale Beschleunigungswerte von $380 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ und Ruckwerte von $13.500 \text{ }^\circ/\text{s}^3$ auf. Durch die Bahnoptimierung wird die Beschleunigung auf $-80 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ und der Ruck auf $2000 \text{ }^\circ/\text{s}^3$ verringert. Charakteristisch sind hierbei das oszillierende Verhalten (2) der erfassten Ruck- und Beschleunigungsverläufe nach der Optimierung. Begründet ist dies in einer polyedrischen Annäherung des Ausgleichsbogens über mehrere lineare Bahnsegmente. Dies ist mit leichten Bewegungsrichtungsänderungen und einer damit einhergehenden temporären Erhöhung der Beschleunigung und des Rucks verbunden. Durch die Bahnoptimierung konnte in den betrachteten Bereich eine Verringerung der Beschleunigung um 79 % und der Ruckwerte um 85 % erreicht werden. Dies bedingt jedoch eine Streckung des Zeitaufwands, aufgrund der zusätzlich abzufahrenden Ausgleichsschleife.

Eine entsprechende Verbesserung des dynamischen Verhaltens ist ebenfalls für den zweiten Hauptbewegungsträger Roboterachse 5 festzustellen. Die Verläufe sind in Abbildung 66 dargestellt.

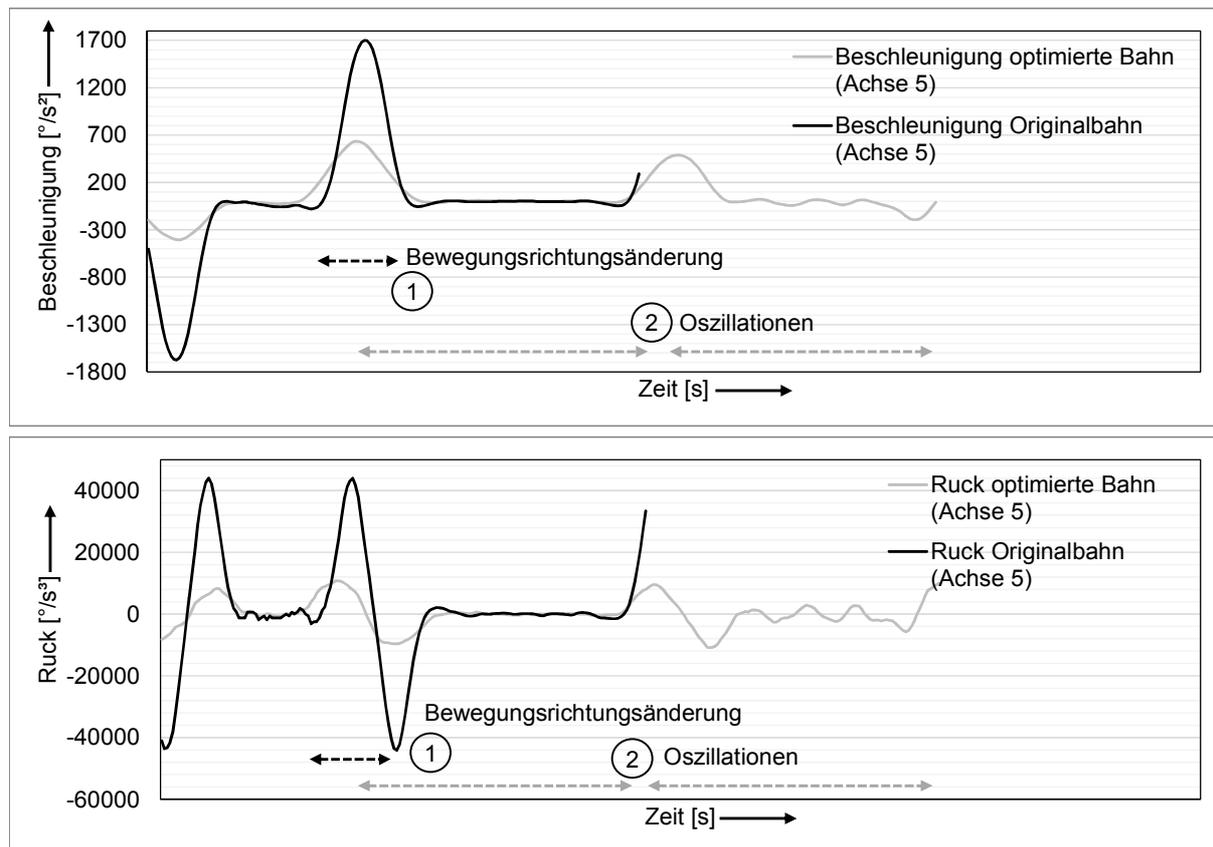


Abbildung 66. Dynamisches Verhalten Roboterachse 5 – Unstetigkeit in einer Bearbeitungsebene (43°)

Durch die Optimierung wird die Beschleunigung von $1.500 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ auf $500 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ reduziert. Der Ruck verringert sich von $44.000 \text{ }^\circ/\text{s}^3$ auf $12.000 \text{ }^\circ/\text{s}^3$. Dies entspricht einer Reduzierung um 66 % bzw. 73 %.

Auch im Bereich von Unstetigkeiten in der Prozessebene lässt sich durch die Optimierung somit eine deutliche Verbesserung des dynamischen Achsverhaltens erreichen. Einher geht dies zudem mit einem exakten Abfahren der vorgegebenen Prozessbahn, da kein Überschleifen entsprechend Abbildung 18 stattfindet, sondern die Ausgleichsbewegung in den Transferbereich verlagert wird. Damit verbunden ist eine Verlängerung der Prozesszeit, um diese Transferbewegung auszuführen. Die positive Wirkung der Optimierung nimmt mit einer zunehmenden Verringerung des Winkelbetrags der durch die Prozessbahn vorgegebenen Unstetigkeiten ab. Begründet ist dies durch die polyedrische Annäherung des Ausgleichsbogens über lineare Bahnabschnitte. Festgestellter Richtwert für einen sinnvollen Einsatz vorgestellter Algorithmen sind dementsprechend Winkelbereiche mit einem Betrag kleiner 135° .

7.2.3 Analyse des Relativgeschwindigkeitsverhaltens

Ein weiteres Qualitäts- und Bewertungskriterium der durchgeführten Programmoptimierungen ist das Erzielen einer möglichst homogenen Bearbeitungsgeschwindigkeit auf den Werkstückflächen sowie ein exaktes Einhalten der Prozessbahn. Dies ist eine Voraussetzung für ein gleichmäßiges Bearbeitungsergebnis. Eine reale Erfassung von Ort und Geschwindigkeit, mit welcher sich der Eingriffsort auf der Werkstückoberfläche bewegt ist jedoch schwierig, da dieser kein physisch vorhandener Ort relativ zum Werkzeug ist und der Eingriffsort zudem prinzipbedingt zur Bearbeitungszeit seine Lage bezüglich des Werkstücks ändert. Zur Veranschaulichung dieses Sachverhalts kann ein Szenario dienen, in dem mittels eines Laserpointers Bereiche eines Tafelbilds hervorgehoben werden. So hängt die effektive Bewegung des Laserpunkts auf der Tafel nicht nur von der rotarischen und translatorischen Bewegung des Laserpointers ab, sondern ebenfalls von den vorherrschenden geometrischen Relationen, wie z. B. dem Abstand des Laserpointers von der Tafel. Analog kann das geometrische und dynamische Verhalten des Prozesseingriffsorts nicht alleine anhand der Bewegung der Roboterhandwurzel ohne Wissen über die geometrischen Relationen der prozessbeteiligten Komponenten beschrieben werden. Zusammenfassend ist somit ein Beobachter im fortschreitenden Prozessort auf den Bearbeitungsflächen notwendig.

Die entwickelte Lösung zur Beurteilung der Bearbeitungsgeschwindigkeit ist aufgrund dieser Problematik deren simulative/rechnerische Ermittlung. Nutzbares Werkzeug hierzu ist das OLP-Kinematik-Simulationstool Famos Robotics, welches eine Visualisierung der Geschwindigkeit und der geometrischen Bahn definierbarer Koordinatensysteme relativ zu Referenzobjekten ermöglicht. In dem spezifischen Fall entspricht dies der Relativgeschwindigkeit von $f^{\text{Robot}}K_{\text{Tool}}$ zum Musterbauteil.

Zur Ruckführung des optimierten Robotersteuerungsprogramms in Famos Robotics dient ein selbstentwickeltes Plugin, welches neben dem Einlesen von Roboterbahn-

punkten (Koordinaten und Orientierungen) aus textuellen Roboterprogrammen ebenfalls das Einlesen von Geschwindigkeitsdaten und E/A-Schnittstellenzuständen erlaubt. Eine exemplarische Visualisierung des Relativgeschwindigkeitsverhaltens von Werkstück zu Prozessort mit einer hinsichtlich Stetigkeit aufbereiteten aber nicht geschwindigkeitsangepassten Trajektorie ist in *Abbildung 67* dargestellt.

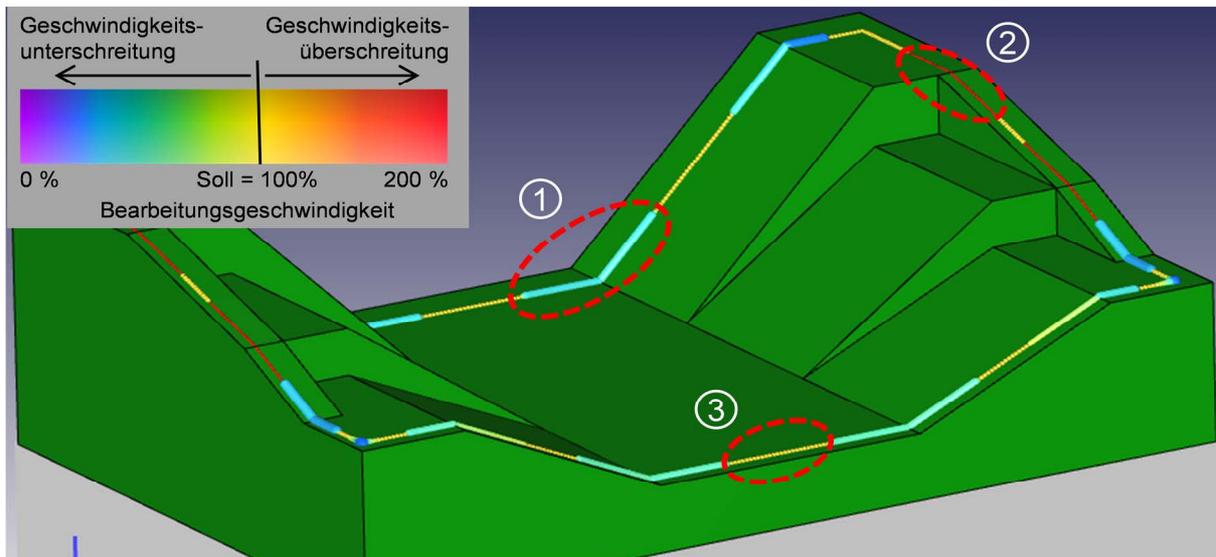


Abbildung 67: Optimierte und nicht geschwindigkeitsoptimierte Roboterbahn

Die Prozessgeschwindigkeit wird über einen „Tracer“ visualisiert, der eine Relativgeschwindigkeitsrepräsentation der Prozessbahn über sphärische Körper mit geschwindigkeitsabhängiger Dimension und Färbung ermöglicht und dadurch das Prozessergebnis simuliert. Erkennbar sind zudem die Bearbeitungsgeschwindigkeitsvariationen abhängig von der Prozessbahnausprägung in den Vor- und Nachdrehbereichen. Bearbeitungsgeschwindigkeiten geringer als die Soll-Geschwindigkeit sind durch blaue Abschnitte (1) und höhere Geschwindigkeiten durch rote Abschnitte (2) gekennzeichnet. Auf geraden Abschnitten (3) entspricht die Bearbeitungsgeschwindigkeit der Soll-Geschwindigkeit der Roboterhandwurzel, da dies rein translatorisch ausgeführt wird. Die Geschwindigkeitsvariationen bezüglich der Soll-Geschwindigkeit liegen bei dem exemplarischen Bahnzug in einem Bereich von - 80 % bis + 100 %. Dies ist den über den Optimierungsalgorithmus neu hinzugefügten Bahnpunkten geschuldet, welche die zurückzulegende Strecke des Werkzeugs relativ zum Werkstück verkürzen oder verlängern.

Durch eine Adaptierung der Geschwindigkeitsparameter gemäß Abschnitt 5.2.4, sowie geeigneter Einstellung der Parameter „Insertion Points“ und „Max. Turn Distance“ in den Vor- und Nachdrehbereichen bei gegebener Orthogonalitätstoleranz „Max. Tolerance“ und Bearbeitungsgeschwindigkeit, wird dahingegen ein deutlich homogeneres Geschwindigkeitsprofil erreicht.

Dargestellt sind exemplarische Simulationsergebnisse in Abbildung 68.

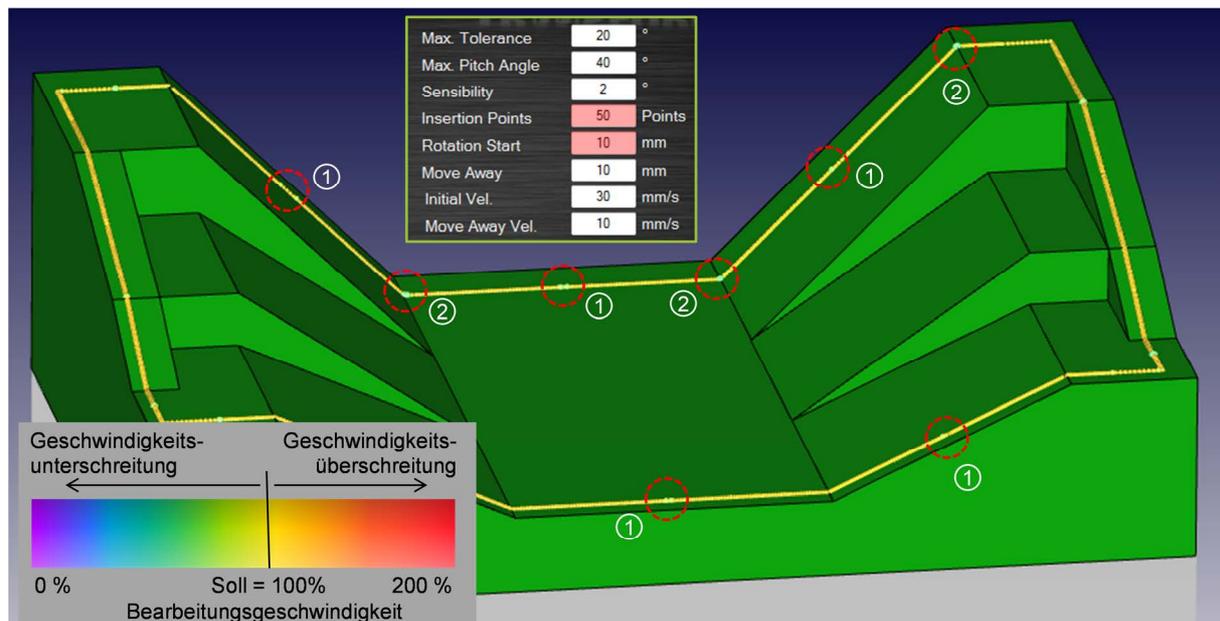


Abbildung 68: Prozessgeschwindigkeitsprofil nach der Geschwindigkeitsoptimierung

Zu erkennen ist ein im Wesentlichen homogenes Geschwindigkeitsprofil auf den Bearbeitungsflächen. Geringfügige Abweichungen von der eingestellten Soll-Geschwindigkeit sind jedoch am Anfang/Ende der Vor-/Nachdrehbereiche (1) erkennbar. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen bezüglich der Beschleunigungs- und Ruckverläufe von Achse 4 (Abbildung 63) und Achse 6 (Abbildung 64). Auch bei den dort dargestellten Ergebnissen konnten Erhöhungen in diesen Übergangsbereichen festgestellt werden. Dies unterstreicht die realitätsnahe Repräsentation des Roboter-Bewegungsverhaltens mittels der Simulation. In diesem Kontext ermöglicht das im Rahmen der Forschungsarbeiten entwickelte Plugin eine frühzeitige Analyse der Parameterauswirkungen und unterstützt dadurch bei der Erstellung eines situationsangepasst optimierten Roboterbewegungsprogramms. Auch an den Unstetigkeiten (2), welche aufgrund der Steilheit der benachbarten Prozessflächen Optimierungsstrategie D auslösen, sind kurze Bereiche mit reduzierter Relativgeschwindigkeit erkennbar. Dieser Effekt resultiert aus einer abrupten Wegbewegung des Werkstücks vom Werkzeug und einer „Move Away Velocity“, welche geringer gewählt ist als die Prozessgeschwindigkeit. Die vorgeschlagene Weiterentwicklung des Hinein- und Hinausdrehens in/aus dem Move-Away Bereich kann helfen diese Auswirkung zu reduzieren. Abschließend belegen die Untersuchungsergebnisse die deutliche Verminderung von Achsruck- und Achsbeschleunigungseffekten durch die automatisierten Bahnoptimierungen in Kombination mit einer hohen Kontur- und Geschwindigkeitstreue des Prozessverlaufs auf den Bearbeitungsebenen.

7.3 Umsetzung des Regelungssystems und Analyse

Zur Analyse der erforschten funktionalen Komponenten des Regelungssystems wurden diese, in dem auf konventionellen Microsoft Windows Betriebssystemen lauffähigen Softwaretool „UniversalRobotControl“ implementiert, welches in Abschnitt 7.3.1 vorgestellt wird. Die experimentellen Untersuchungen umfassen eine Analyse der Regelgrößenermittlung (Abschnitt 7.3.2) und des Regelverhaltens (Abschnitt 7.3.3). Von wesentlicher Bedeutung für die Beurteilung sind jeweils die Zeiteffizienz der erforschten Datenverarbeitungsalgorithmen sowie die geometrische Genauigkeit des Regelungsverhaltens und der Regelgrößenermittlung. Grundlage für eine quantifizierte Bewertung dieser Aspekte bilden unterschiedliche Werkzeuge wie der in Abschnitt 3.2.2 vorgestellte Lasertracker, softwareseitig implementierte Stoppuhren, roboterinterne Zustandsaufnahme-Funktionalitäten sowie ein eigens entwickelter Regelgrößensimulator. Diese Werkzeuge werden kontextbezogen in den jeweiligen Abschnitten kurz vorgestellt.

7.3.1 Implementierung in dem Softwaretool „UniversalRobotControl“

Das im Rahmen der Forschungsarbeiten umgesetzte Softwaretool „UniversalRobotControl“ ist eine C#-Anwendung basierend auf dem .NET Framework 4.5. und lauffähig auf Standard Desktop-PCs mit Windows Betriebssystemen. Zwar sind harte Echtzeitbedingungen mit konventionellen windowsbasierten Betriebssystemen nicht darstellbar, für die Anwendung ausreichende weiche Echtzeitbedingungen können jedoch hergestellt werden. „UniversalRobotControl“ ist als eigenständiges Softwaretool mit intuitiv bedienbarer graphischer Interaktionsschnittstelle, basierend auf mehreren Registerkarten ausgeführt. Dargestellt ist die Programmoberfläche in Abbildung 69.

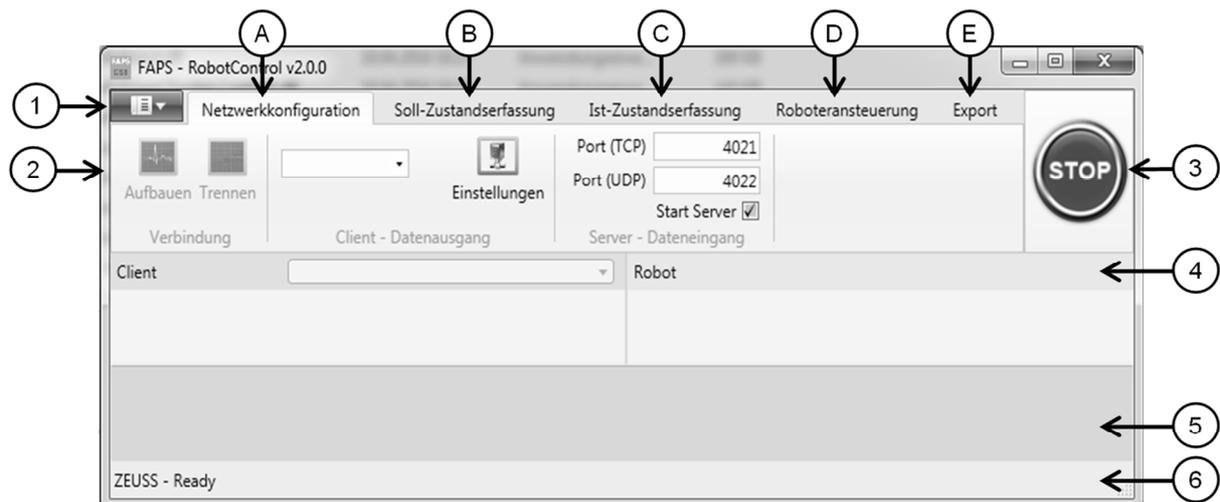


Abbildung 69: Programmoberfläche " UniversalRobotControl "

Die Programmoberfläche untergliedert sich in folgende zentrale Funktionsflächen:

1. Registerkarten basierte Menüleiste:
Mittels Programmreitern wird zwischen den verschiedenen Benutzeroberflächen (A) bis (E) gewechselt, in denen zusammengehörige Funktionen strukturiert sind.
2. Registerkartenabhängiges Untermenü:
Der Inhalt der Untermenüs umfasst Schaltflächen zum Auslösen von Aktionen, zum Öffnen von Einstellungsfeldern auf der Content-Area (4) oder neuen Anwendungsfenstern sowie Eingabefeldern.
3. Stoppfunktion der Ausführungseinheit:
Die Stoppfunktion hält die Kinematik an, löscht den Bewegungsspeichers und setzt die roboterseitige Ausführungseinheit in den Ausgangszustand zurück. Zu beachten ist, dass es sich bei dieser Schaltfläche jedoch um keinen Notauschalter im Sinne der Richtlinien zur Sicherheit von Maschinen [177] handelt.
4. Oberflächen- und funktionsabhängige Content-Area:
Dieser Bereich stellt abhängig von der aktiven Registerkarte oder Benutzerinteraktion die relevanten Inhalte in Form von Eingabe- und Ausgabefeldern, Prozessinformationen sowie Auswertegraphen bereit. Diese Oberfläche dient vorwiegend dem Setzen von Einstellungen und der Information über Prozessvorgänge.
5. Ereignisprotokoll der Benutzeroberfläche:
Das Ereignisprotokoll stellt dem Anwender Informations- und Ereignismeldungen sowie Erfolgs- und Fehlermeldungen zur Verfügung.
6. Statusleiste:
Die Statusleiste informiert den Anwender über aktuelle programminterne Vorgänge und deren Fortschritt.

Abbildung 70 zeigt Registerkarte (A) zur Konfiguration der Kommunikation in der verteilten Anwendung.

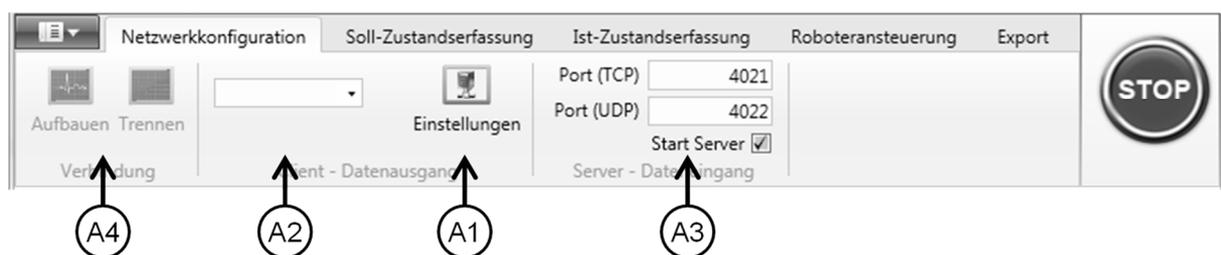


Abbildung 70: Registerkarte (A): Netzwerkkonfiguration

Über die Schaltfläche (A1) werden neue Verbindungen zu Ausführungseinheiten eingerichtet. Das Auswahlfenster (A2) ermöglicht die Auswahl bereits vorkonfigurierter Clients bzw. Ausführungseinheiten. Über (A3) werden die lokalen Ports definiert, über welche Daten externer Server-/Verarbeitungseinheiten eingelesen werden.

Nach Abschluss der Netzwerkeinstellungen wird mittels (A4) die Verbindung zu den Server- und Clienteinheiten aufgebaut oder auch getrennt.

Über die in Abbildung 71 dargestellte Registerkarte (B) „Soll-Zustandserfassung“ werden die Führungsgrößen festgelegt.



Abbildung 71: Registerkarte (B): Soll-Zustandserfassung

Schaltfläche (B1) bildet ein Parsinginterface zum Einlesen des proprietären Programmcodes unterschiedlicher Roboterhersteller, wobei beispielhaft ein Interface für verschiedene Versionen der Programmiersprache VAL3 implementiert ist. Bereich (B2) erlaubt das Einlesen von Roboter-Bewegungsdaten, welche hierarchisch strukturiert vorliegen (.xml). Über Schaltfläche (B3) ist es möglich, innerhalb des Programms eigene Bahnpunkte und Koordinatensysteme zu erstellen sowie diese mit dynamischen Bewegungsparametern zu belegen. Über (B4) werden schlussendlich die gesammelten Führungsgrößen konsolidiert.

Eine Parametrierung der Regelgrößenverarbeitung, soweit nicht vollständig auf eine externe Verarbeitungseinheit in der verteilten Anwendung verlagert (A3), wird über die in Abbildung 72 dargestellte Registerkarte (C) vorgenommen.



Abbildung 72: Registerkarte (C): Ist-Zustandserfassung

Registerkarte (C) ist ausgeführt als modular erweiterbare Schnittstelle zur Anbindung unterschiedlicher Applikationsmodule. Zum aktuellen Zeitpunkt implementiert sind die Anbindung eines Lasertrackers (C1) sowie die in Abschnitt 6.3 vorgestellten Bildverarbeitungsmodule (C2) zur Erfassung der Regelgrößen. Schaltfläche (C3) ermöglicht die Verwendung offline erzeugter Ist-Zustandsdaten, welche z. B. bei einem „Trockenlauf“ entstanden sind. Bereich (C4) „Oberflächenscanner“ ist ein Beispiel für ein separates Applikationsmodul. Unter Nutzung der Daten eines hochgenauen 3D-Oberflächenscanners wird bei statischen Prozessaufgaben die Ist-Lage eines robotergeführten Bauteils in drei translatorischen und drei rotatorischen

Freiheitsgraden erfasst, ein Vergleich mit Referenz-CAD-Daten durchgeführt und aus der daraus resultierenden Transformationsbeziehung Bewegungsbefehle für die Roboterkinematik erzeugt, die das Bauteil in die Soll-Lage überführt.

Den zentralen Programmreiter zur Ansteuerung des Manipulators und Parametrierung der Regelalgorithmen bildet die in Abbildung 73 gezeigte Registerkarte (D).

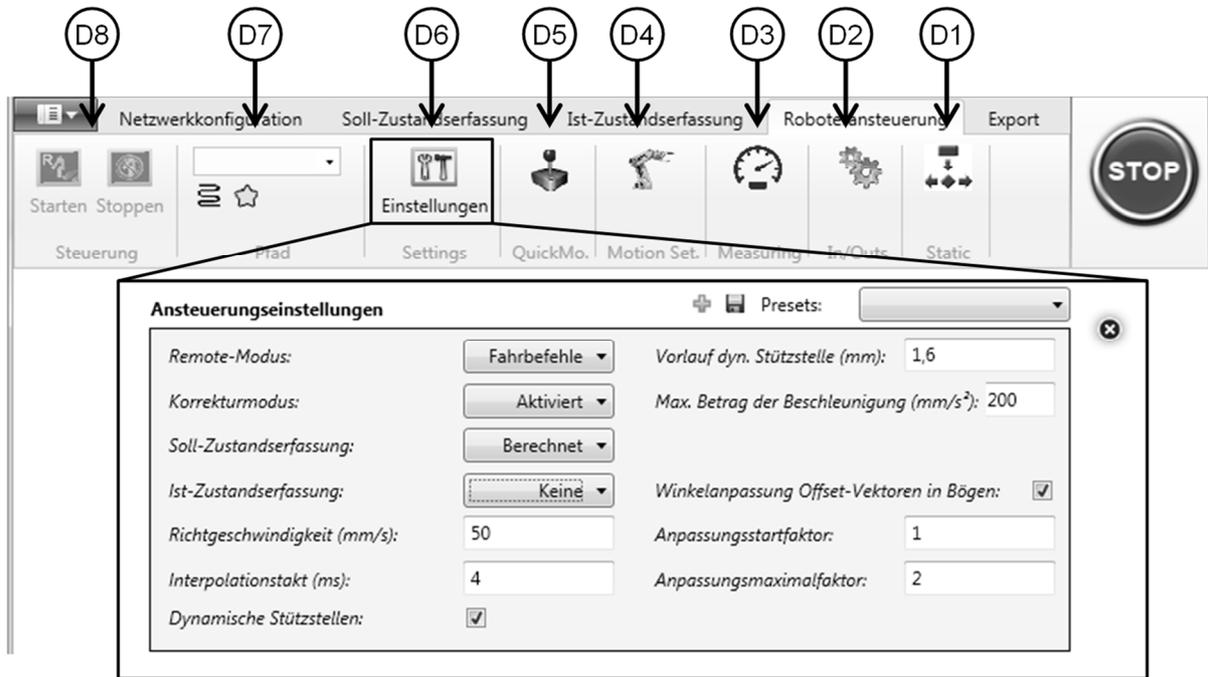


Abbildung 73: Registerkarte (D): Roboteransteuerung

Schaltfläche (D1) ermöglicht ein Laden vorgefertigter Analysebahnen, (D2) das manuelle Schalten digitaler I/Os, (D3) das Anzeigen eines Analyseplots der tatsächlichen Geschwindigkeit, (D4) das Setzen von Bewegungsparametern und (D5) ein manuelles Verfahren des Manipulators im Handbedienmodus. Die in Abschnitt 6.2 beschriebenen Bahnsteuerungsarten und Feininterpolationsalgorithmen werden über (D6) parametrierung. Dies umfasst ein Setzen der erläuterten Parameter v_{Soll} , t_i , $d_{Vorlauf}$, W_{Start} und W_{max} sowie das Einrichten einer Beschleunigungsbegrenzung zum Erhalt eines deterministischen Regelverhaltens auch in ausgeprägten Bahneckbereichen. Im Weiteren kann unter Ist- und Soll-Zustandserfassung die Führungs- und Regelgrößenquelle ausgewählt werden. Vor dem Ausführen der Bewegungsaufgabe wird über (D7) bei evtl. mehreren geladenen Bahnen die abzufahrende ausgewählt. Gestartet und gestoppt wird der Vorgang über (D8).

Über die letzte nicht separat dargestellte Registerkarte „Export“ (E) können zu Analyse Zwecken Daten bezüglich Trajektorien oder aufgezeichneten Geschwindigkeitsmessungen sowohl in Dateiform exportiert oder über vordefinierte Socket-Schnittstellen an andere Datensinken der verteilten Anwendung gesendet werden.

7.3.2 Analyse der Regelgrößenermittlung

Die Untersuchungen umfassen eine Beurteilung der erreichbaren geometrischen Genauigkeit der in Abschnitt 6.3 erläuterten vektorbasierten Ist-Bewegungserfassung zum einen und eine quantifizierte Beurteilung der Datenverarbeitungs-Zeiteffizienz zum anderen. Die Bewertung der erreichbaren Genauigkeit erfolgt über den Vergleich von Referenzmessungen mit Messungen basierend auf dem Mono- und Stereo-Bildverarbeitungssystem. Zentrales Qualitätskriterium ist hierbei die Abweichung einer Referenzmessung zu einer Bildverarbeitungsmessung. Unter Referenzmessung ist hierbei die Messung zu verstehen, welche den wahren Wert widerspiegelt. Als Werkzeug für die Referenzmessungen wird der in Abschnitt 3.2 vorgestellte Lasertracker genutzt. Betrachtet werden bei den Auswertungen jeweils die vorzeichenbereinigten Abweichungsbeträge. Dies entspricht der absoluten Abweichung unabhängig von deren Richtung, da die Richtung nur für Analysezwecke von Bedeutung ist. Durch diese Verfahrensweise wird eine positive Verfälschung der statistischen Werte wie z. B. des arithmetischen Mittels \bar{x}_{Arithm} vermieden, da sich positive und negative Abweichungen nicht gegenseitig kompensieren. Entsprechend handelt es sich bei nachfolgend dargestellten Werten um Absolutgenauigkeiten. Die jeweils genutzte Kamerakonstellation (Mono/Stereo) ist bei den Abweichungsgraphen mit angegeben. Für die Beurteilung der Zeiteffizienz wird der Zeitbedarf der Datenverarbeitungsalgorithmen über hochgenaue, softwarebasierte Stoppuhren erfasst. Basis für die Untersuchungen bildet eine vorgelagerte Einrichtung, Einmessung und Kalibrierung der Kamerasysteme zur exakten Ermittlung der intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter sowie die Berücksichtigung dieser Parameter während der Datenverarbeitungszeit.

Als relativ messendes System, bei dem die Bewegung nicht in Relation zu einem Referenzobjekt erfasst wird und somit die Möglichkeit einer kontinuierlichen Stützung entfällt, ist das Ausmaß einer Fehleraufsummierung von wesentlicher Bedeutung. Die erfassten Abweichungen für Versuchsreihen mit aufsteigender Trajektorienlänge (zehn Versuchsdurchführungen je Parametersatz) sind in Abbildung 74 dargestellt.

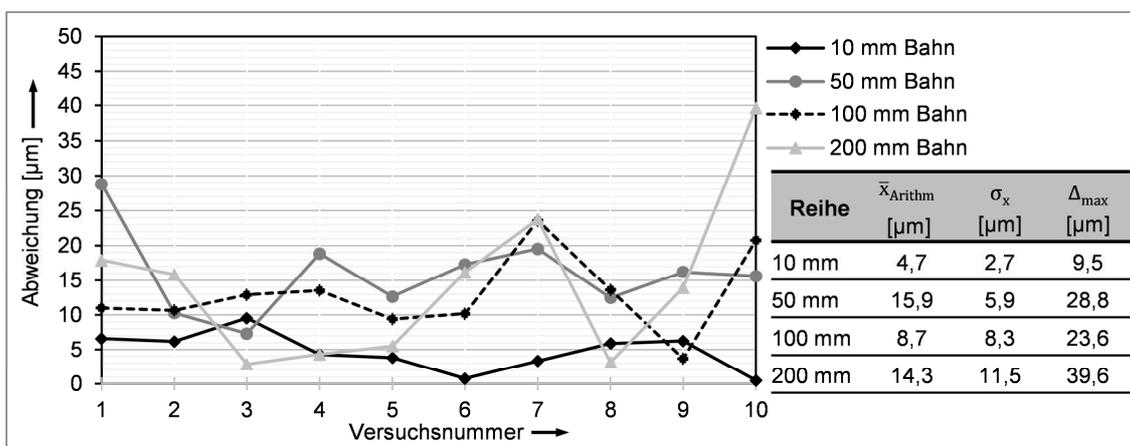


Abbildung 74: Genauigkeit abhängig von Bahnlänge (Mono) (Angelehnt an [135])

Im arithmetischen Mittel \bar{x}_{Arithm} besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen Trajektorienlänge und Abweichung. Festzustellen ist jedoch eine tendenzielle Abnahme der Messwertzuverlässigkeit bei längeren Trajektorien, repräsentiert durch eine unterproportionale Zunahme der Standardabweichung σ_x und der maximal erfassten Abweichung Δ_{max} . Dies legt eine sporadische Messwertstützung nahe, absolut betrachtet sind die Messgenauigkeiten jedoch auch bei längeren Bahnen auf hohem Niveau. Eine mögliche Begründung für den leicht erhöhten arithmetischen Mittelwert bei einer Bahnlänge von 50 mm ist die Sensibilität des Aufbaus für externe Störeinflüsse, aufgrund der ausgesprochen hohen Messgenauigkeiten.

Ebenfalls relevant ist eine Unabhängigkeit der Methode von der Bewegungsrichtung. Abbildung 75 zeigt die erfassten Abweichungen für unterschiedliche Verfahrrichtungen bei gleichbleibender Trajektorienlänge und Verfahrgeschwindigkeit.

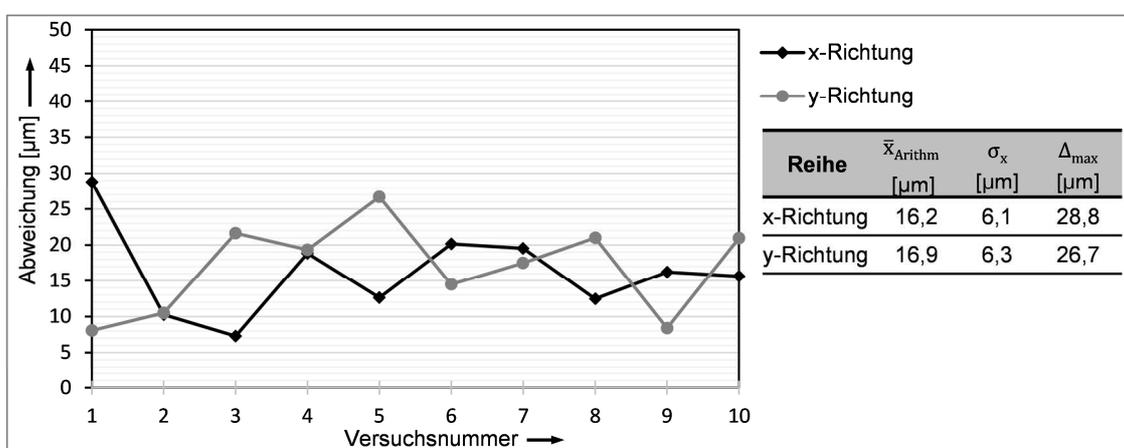


Abbildung 75: Genauigkeit abhängig von der Bewegungsrichtung (Mono)

Die vernachlässigbar unterschiedlichen Werte für \bar{x}_{Arithm} , σ_x und Δ_{max} bei einem isolierten Verfahren in x- und y-Richtung belegen die Unabhängigkeit der vektorbasierten Methode zur Ist-Zustandserfassung von der Bewegungsrichtung in der x-y-Ebene. Das Abweichungsverhalten in z-Richtung zeigt Abbildung 76.

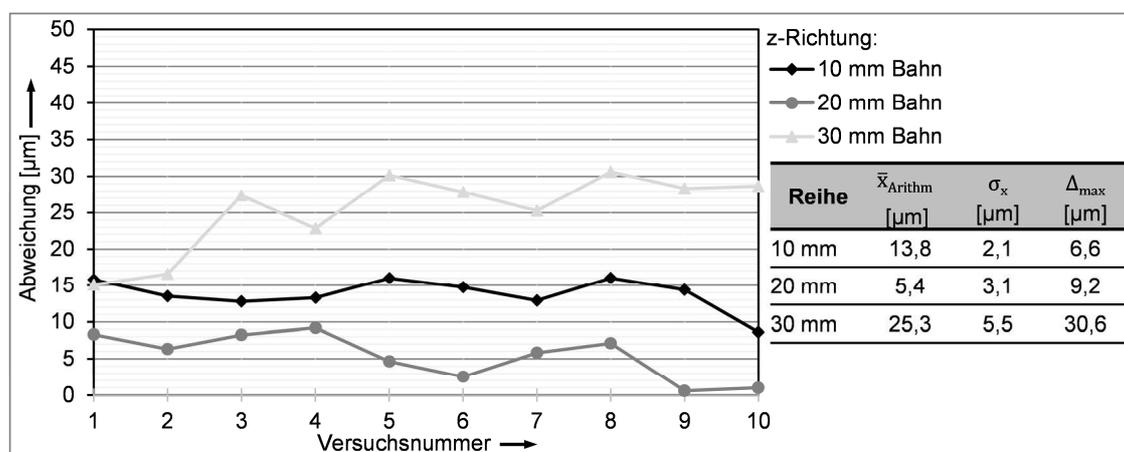


Abbildung 76: Genauigkeit in z-Richtung abhängig von der Bahnlänge (Stereo)

Prinzipbedingt ist bei einem stereoskopischen System abhängig von Abstand (Basislinie) und Anstellwinkel der Einzelkameras die Tiefenauflösung beschränkt. Entsprechend wurde eine Konstellation identifiziert, welche in allen Raumrichtungen eine vergleichbar hohe Genauigkeit der Bewegungserfassung ermöglicht, wobei der durch die Kamerakonstellation bedingte Tiefenschärfebereich die Trajektorienlänge in z-Richtung bestimmt. Auch bei zunehmender Trajektorienlänge in z-Richtung ausgehend von der kalibrierten Höhe lässt sich keine signifikante Zunahme und direkter Zusammenhang zu der mittleren Genauigkeitsabweichung \bar{x}_{Arithm} nachweisen. Die Standardabweichungen σ_x und die maximalen Abweichungen Δ_{max} nehmen jedoch bei höheren Verfahrenslängen geringfügig zu.

Bei der Verwendung eines Monokamerasystems ist eine Ableitung von 3D-Informationen nur sehr eingeschränkt möglich. Entsprechend ist bei der Verwendung einer einzelnen Kamera eine Systemanforderung die Robustheit des Systems auch bei unterschiedlichen Arbeitsabständen (z-Richtung), da diese nicht erfasst werden und entsprechende Regelgrößen für eine Ausregelung von Bewegungsabweichungen nicht zur Verfügung stehen. Abbildung 77 zeigt dementsprechend das Genauigkeitsverhalten bei variierenden Arbeitsabständen.

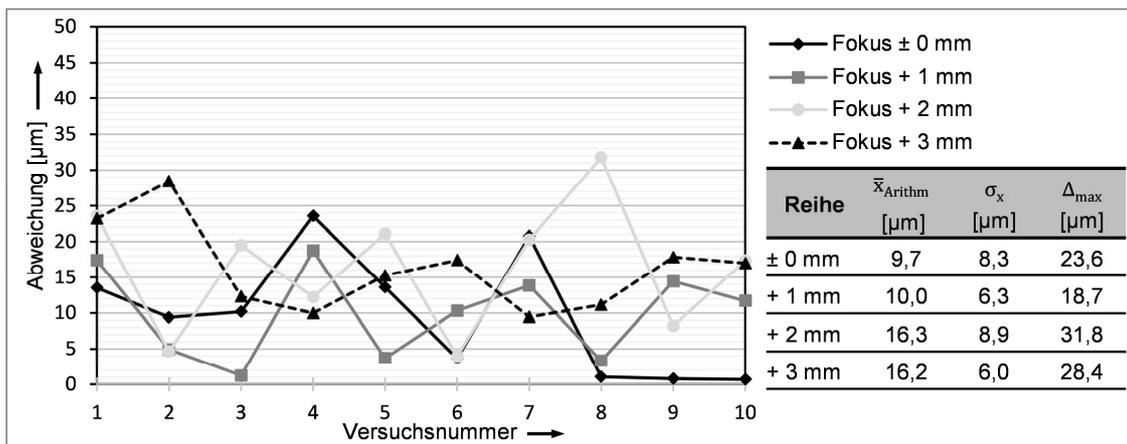


Abbildung 77: Genauigkeit abhängig vom Arbeitsabstand (Mono) (Angelehnt an [135])

Ersichtlich ist aus den Messwerten eine geringe Zunahme der mittleren Abweichung \bar{x}_{Arithm} bei einer Relativbewegung der Messobjektoberfläche außerhalb des Fokusbereichs. Einen nur geringen Einfluss hat ein zunehmender Arbeitsabstand auch auf die Messwertzuverlässigkeit σ_x . Die Methode verhält sich somit auch bei einer Bewegungserfassung außerhalb des Fokus robust.

Bei der Nutzung eines Stereokamerasystems ist aufgrund des Anstellwinkels der Kameras ebenfalls der Bereich von Relevanz, in dem das verfolgte Merkmal den Bildbereich durchfährt. Dies gilt maßgeblich für unterschiedliche Bereiche entlang der Basislinie (Abstandsrichtung der Kameras). Entsprechende Untersuchungsergebnisse zeigt Abbildung 78.

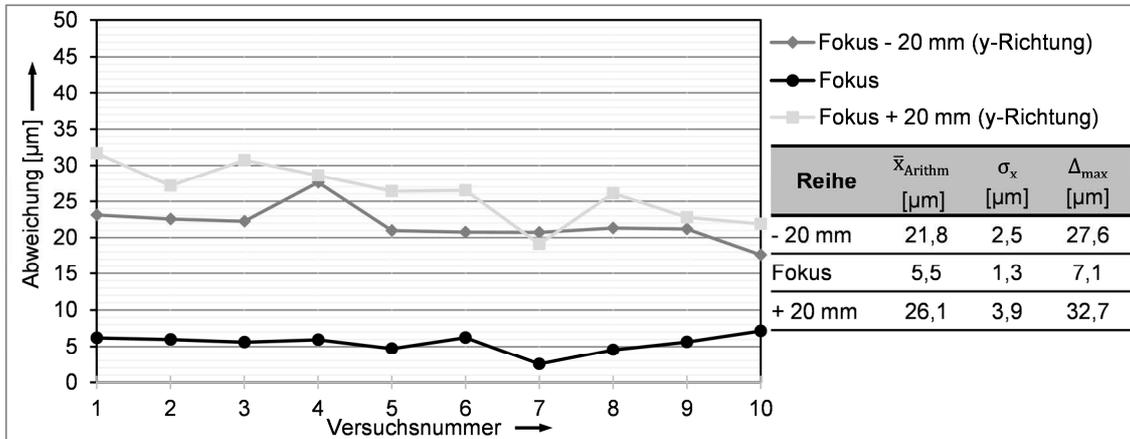


Abbildung 78: Genauigkeit abhängig vom Bildbereich (Epipolarverhalten) (Stereo)

Während bei einem Durchfahren des Merkmals im Fokus des Sichtbereichs sehr hohe Genauigkeitswerte erreicht werden, nehmen die mittleren Abweichungen \bar{x}_{Arithm} und maximalen Abweichungen Δ_{max} bei einem Durchfahren ± 20 mm außerhalb des Fokusbereichs symmetrisch zu. Die geringen Standardabweichungen σ_x belegen die Zuverlässigkeit dieser Feststellung. Vergleichbar verhält sich die Genauigkeit ebenfalls in z-Richtung. Erwartungsgemäß besteht dieser Zusammenhang in x-Richtung nicht. Geeignete Strategie zum Umgang mit diesem Einfluss ist eine entsprechende Reduzierung des betrachteten Merkmalsbereichs bzw. Merkmalsvolumens (siehe Abbildung 58). Dies bedingt jedoch eine erhöhte Anzahl an Merkmalswechseln (Folgerferenzierung). Dargestellt ist der Einfluss des Merkmalswechsels auf die Genauigkeit in Abbildung 79.

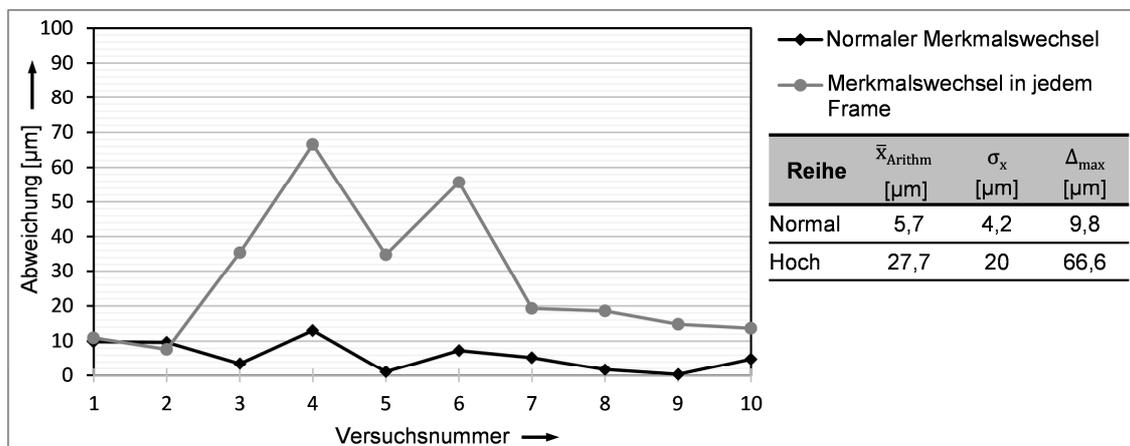


Abbildung 79: Genauigkeit abhängig von der Anzahl Merkmalswechsel (Mono)

In der untersuchten Konstellation erfolgt in der Normalsituation alle 500 Bilder ein Merkmalswechsel. Bei dem Merkmalswechsel in jedem Frame ist die Anzahl im Verhältnis um das 500-fache höher. Dementsprechend sind auch die statistischen Werte für \bar{x}_{Arithm} , σ_x und Δ_{max} zu interpretieren, welche bei der hohen Anzahl von Merkmalswechseln um den Faktor fünf (\bar{x}_{Arithm} , σ_x) bzw. sieben (Δ_{max}) höher liegen. In Zusammenschau mit den Verhältniszahlen ist somit ein marginaler aber messbarer Einfluss der Anzahl Merkmalswechsel auf die Genauigkeit vorhanden.

Im Weiteren von Relevanz ist eine eventuelle Abhängigkeit der Bildverarbeitungs-genauigkeit von der Relativgeschwindigkeit von Messobjekt zu Kamerasystem. Dargestellt sind die Abweichungen für das Monokamerasystem in Abbildung 80 und für das untersuchte Stereokamerasystem in Abbildung 81.

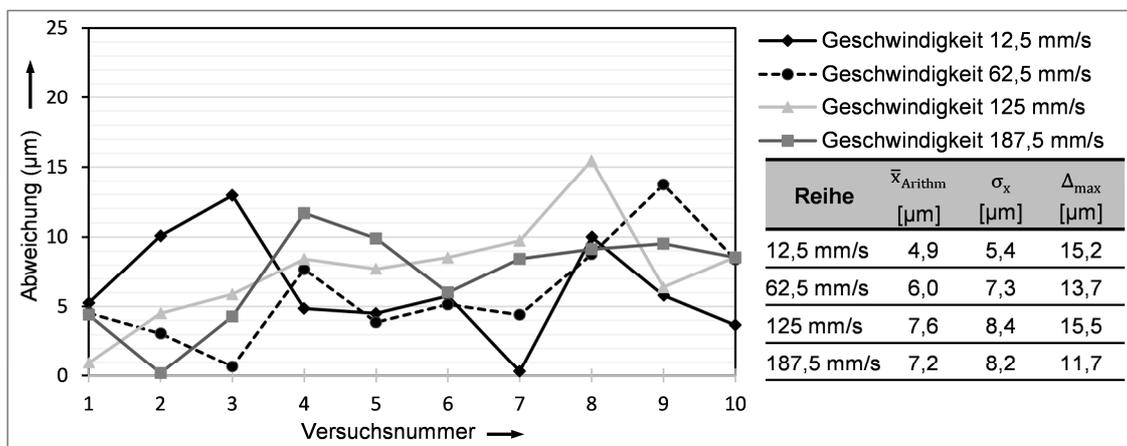


Abbildung 80: Genauigkeit abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit (Mono)

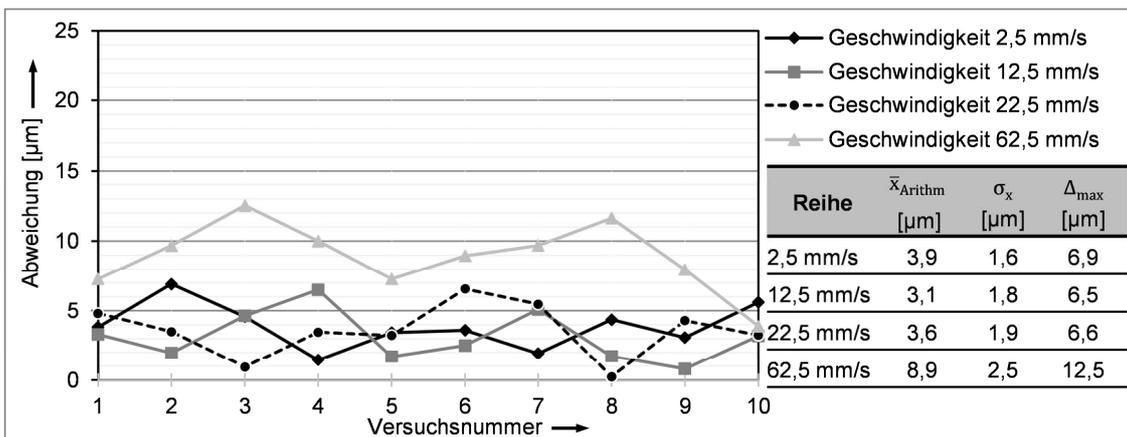


Abbildung 81: Genauigkeit abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit (Stereo)

Während bei dem Monokamerasystem bei einer Erhöhung der Bewegungsgeschwindigkeit die arithmetischen Mittelwerte der Abweichungen \bar{x}_{Arithm} sowie die Standardabweichungen σ_x geringfügig ansteigen, lässt sich bezüglich der maximalen Abweichungen Δ_{max} kein Trend feststellen. Dahingegen steigen bei dem Stereokamerasystem \bar{x}_{Arithm} , σ_x und Δ_{max} mit zunehmender Bewegungsgeschwin-

digkeit tendenziell leicht an. Die zwar nur geringe aber dennoch messbare Zunahme kann auf geringfügige bewegungsbedingte Unschärfeeffekte zurückgeführt werden. So steigen bei höheren Bewegungsgeschwindigkeiten die Anforderungen an ein geeignetes Beleuchtungssystem deutlich an. Höhere Geschwindigkeiten erfordern die Bereitstellung leistungsstarker Beleuchtungsquellen, um geringste Belichtungszeiten zu ermöglichen und somit ein „Verwischen“ der Merkmalsbewegung zu vermeiden, was mit einer fehlerhaften Ermittlung des Schwerpunkts einhergeht. Bedingt durch die Kamerasysteme sind zudem die minimalen Belichtungszeiten endlich, so dass eine vollständige Eliminierung von Unschärfeeffekte nicht möglich ist. Grundsätzlich sind mit Mono- und Stereokamerasystem ähnlich hohe Genauigkeiten festzustellen.

Im Weiteren ist die Zuverlässigkeit der Methode bei Beschleunigungen und Verzögerungen der Bewegung von Bedeutung. Abbildung 82 visualisiert dahingehend den Einfluss von Bewegungsunterbrechungen.

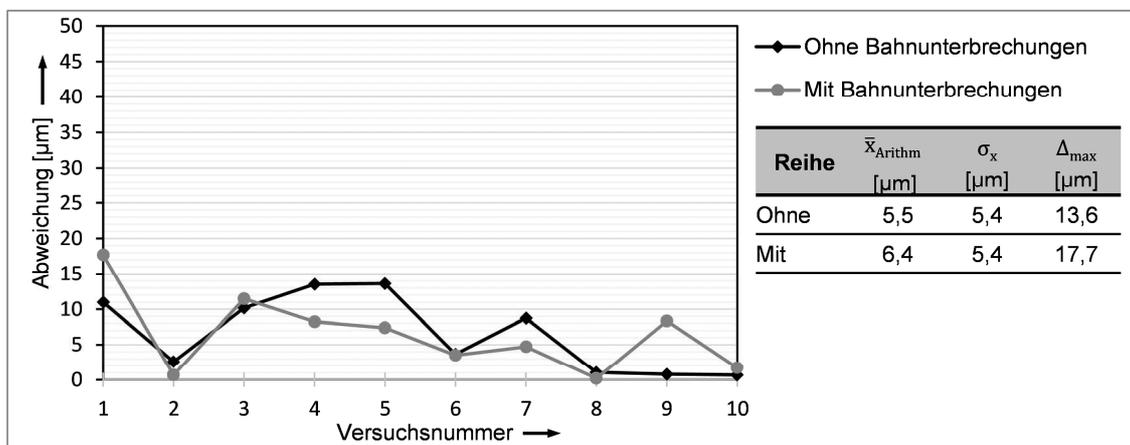


Abbildung 82: Genauigkeit abhängig von Zwischenhalten (Mono)

Bei den Versuchsreihen wird eine geometrisch identische Trajektorie abgefahren, wobei Zweitere geprägt ist von zehn Zwischenhalten. Die Trajektorien mit und ohne Bahnunterbrechungen weisen hierbei einen vergleichbaren Wertebereich der Genauigkeitskenngrößen \bar{x}_{Arithm} , σ_x und Δ_{max} auf. Bewegungsbeschleunigungen und -verzögerungen beeinflussen die Regelgrößenerfassung somit nicht negativ.

Nach Identifikation und isolierter Quantifizierung der zentralen Einflussgrößen wird abschließend die Genauigkeit und das Verhalten der Regelgrößenermittlung bei dem Verfahren komplexer dreidimensionaler Trajektorien untersucht. Genutzt wird hierzu eine Variante der in [27] beschriebenen Testtrajektorie. Kennzeichnend für diese Trajektorie ist das Auftreten verschiedener Winkel- und Bogenarten in Kombination mit unterschiedlichen Streckenlängen. Hierzu gehören stumpfe, rechte und spitze Winkel. Zusätzlich sind ein Bogen und ein Vollkreis Bestandteil der Bahn. Die Modifikation gegenüber der in [27] beschriebenen Ausführung umfasst eine räumliche Ausrichtung des Vollkreises (3) sowie des Mäandermusters (5) im hinteren

Bereich der Bahn. Die untersuchte Testtrajektorie weist hierbei eine Gesamtlänge von 762 mm und spannt ein Volumen von 200 mm x 200 mm x 20 mm auf.

Charakteristische Messergebnisse für optimierte Bildverarbeitungsparameter sind in Abbildung 83 dargestellt. Wiederholungsmessungen in der gleichen Konstellation zeigen ein vergleichbares Spektrum der Abweichungswerte von Referenzmessung zu Bildverarbeitungs-messung ($\bar{x}_{\text{Arithm}} = 30,9 \mu\text{m}$ bis $76,1 \mu\text{m}$; $\sigma_x = 19,1 \mu\text{m}$ bis $44,4 \mu\text{m}$; $\Delta_{\text{max}} = 107,3 \mu\text{m}$ bis $154,0 \mu\text{m}$).

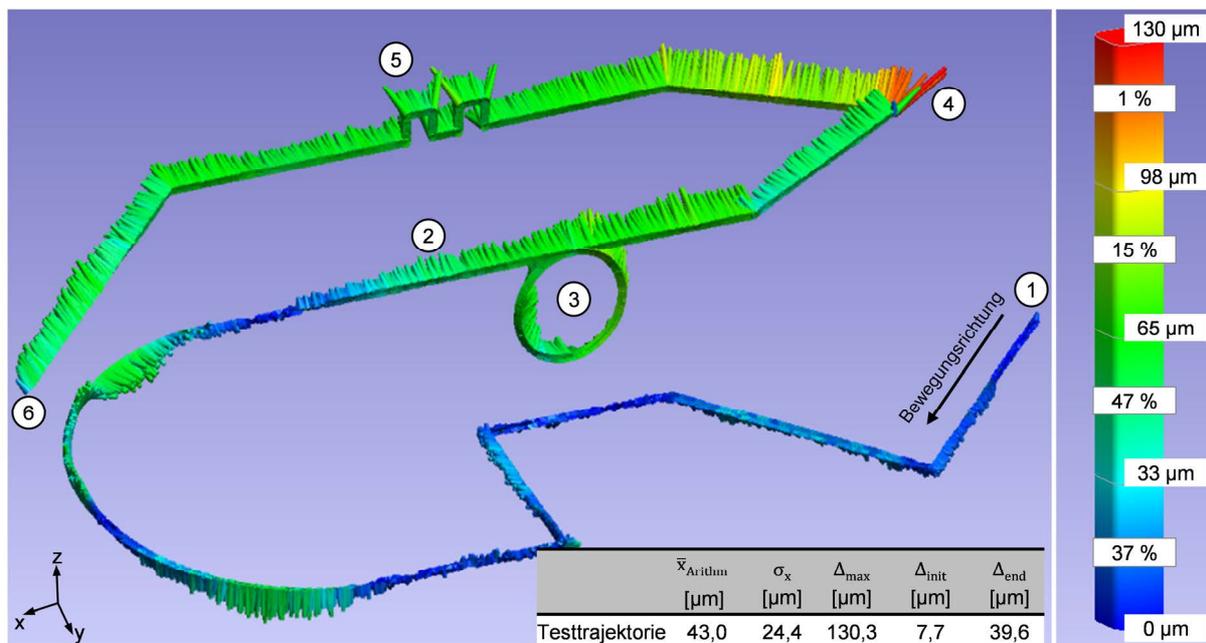


Abbildung 83: Erfassungsgenauigkeit der 3D-Testtrajektorie (Stereo)

Ausgehend vom Startpunkt (1) erfolgt die Bewegung entlang der Trajektorie hin zum Endpunkt (6). Dabei nimmt die Erfassungsgenauigkeit mit zunehmendem Bewegungsfortschritt tendenziell ab, gewährleistet aber auch am Trajektorienendpunkt (6) eine hohe Erfassungsgenauigkeit Δ_{end} besser $40 \mu\text{m}$. Eine Abweichung in der Größenordnung von Δ_{end} ist ab Bahnmitte (2) festzustellen und nimmt bis zum Ende der Bewegungsbahn nur unterproportional zu. Dabei besteht über den kompletten Bahnverlauf kein signifikanter Zusammenhang zwischen Abweichungsrichtung und Abweichungsgröße ($\bar{x}_{\text{Arithm},x} = 12 \mu\text{m}$; $\bar{x}_{\text{Arithm},y} = 33 \mu\text{m}$; $\bar{x}_{\text{Arithm},z} = 14 \mu\text{m}$). Die maximalen Abweichungswerte $\Delta_{\text{max}} = 130,3 \mu\text{m}$ treten im Bereich des spitzen Winkels (4) auf. Eine plausible Erklärung hierfür sind mögliche Schwingungen des Testaufbaus, welche bei abrupten Bewegungsrichtungsänderungen auftreten können. Analog sind erhöhte Abweichungen an den Unstetigkeiten des Mäanderbereichs (5) festzustellen, die aufgrund der flacheren Eckwinkel jedoch weniger stark ausgeprägt sind. Auch der Zusammenhang zwischen Bewegungsrichtungsänderungen und Genauigkeit belegt die Notwendigkeit zur Bereitstellung kontinuierlicher Bewegungsbahnen entsprechend Kapitel 5 und Abschnitt 7.2.

Zusätzlich zu einer hohen geometrischen Genauigkeit der Ist-Bewegungserfassung, ist eine weitere wesentliche Herausforderung die zeiteffiziente Datenverarbeitung und Regelgrößen-Bereitstellung zeitgleich zur Bewegungslaufzeit, mit möglichst geringer Latenzzeit. Die dahingehenden Untersuchungen adressieren bei dem Monokamerasystem eine Erfassung der notwendigen Zeitaufwände zum Prozessieren der Sensordaten auf einer konventionellen CPU eines Desktop-PCs sowie alternativ eine Auslagerung der Algorithmen auf eine FPGA-Chip (Field Programmable Gate Array) basierte Verarbeitungshardware. Die ermittelten Zeitaufwände dieser beiden Herangehensweisen für die übergeordneten, funktionalen Datenverarbeitungsblöcke sind in Abbildung 84 zusammenfassend dargestellt. An diese Verarbeitungsblöcke werden hinsichtlich der Zeiteffizienz besonders hohe Anforderungen gestellt, da diese kontinuierlich während der Roboterbewegung ausgeführt werden.

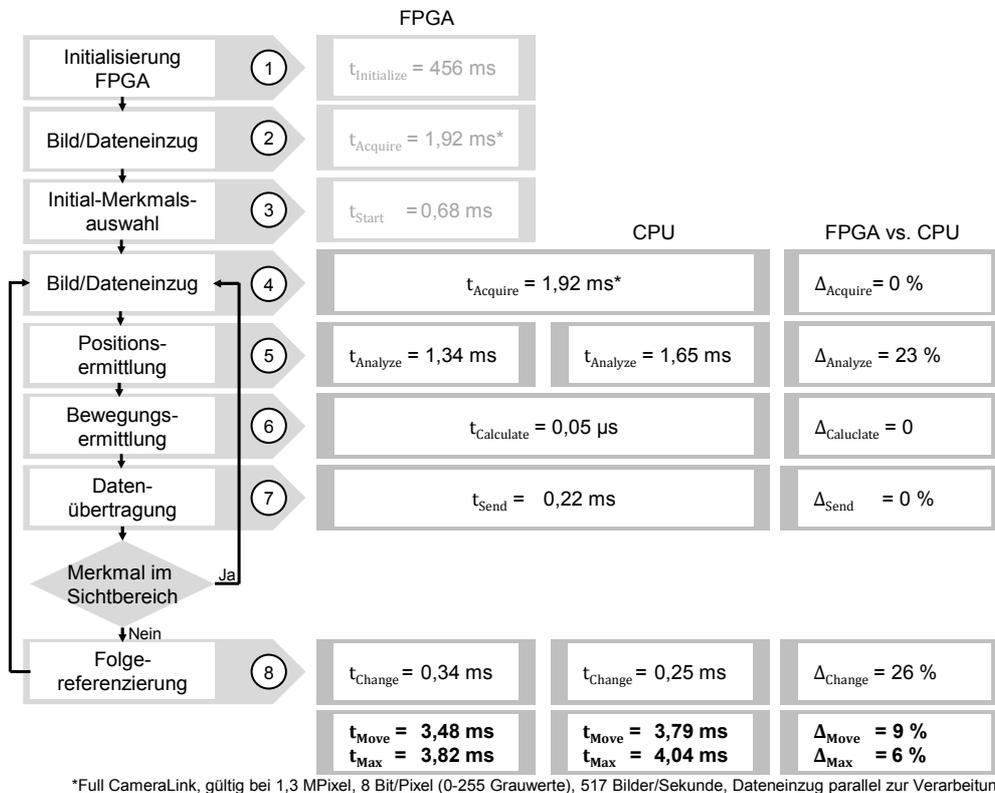


Abbildung 84: Zeiteffizienz der Bildverarbeitung FPGA vs. CPU (Mono)

Der Zeitbedarf für den Bild/Dateneinzug (0) $t_{Acquire}$ ist vorgegeben durch den Bildinformationsgehalt sowie die Bandbreite der Datenübertragungsschnittstelle. Um den Einfluss dieser Komponente möglichst gering zu halten, erfolgt der Bild/Dateneinzug parallel zur weiteren Datenverarbeitung, welche sich aus den Zeitbedarfen zur Positionsermittlung basierend auf der Bildanalyse $t_{Analyze}$ (1), Bewegungsermittlung $t_{Calculate}$ (2), Übertragung der Bewegungsdaten zur Fernsteuerungseinheit t_{Send} (3) sowie den vereinzelt auftretenden Merkmals-Wechseln bei der Folgereferenzierung t_{Change} (4) zusammensetzt.

Eine Verlagerung der Bildanalyse (1) auf einen FPGA-Chip weist hierbei gegenüber einer CPU-basierten Verarbeitung einen geringfügigen Zeitvorteil von $\Delta_{\text{Analyze}} = 23\%$ auf, wohingegen der Zeitaufwand bei einem Merkmals-Wechsel (4) um $\Delta_{\text{Change}} = 26\%$ ansteigt. Entsprechend errechnet sich bei einer FPGA-basierten Datenverarbeitung zur Bewegungslaufzeit für die Verarbeitung der Algorithmen ein Gesamt-Zeitaufwand $t_{\text{Move}} = 1,56$ ms sowie bei einem Merkmals-Wechsel ein maximaler Zeitaufwand $t_{\text{Max}} = 1,90$ ms. Der Zeitvorteil einer FPGA-Implementierung der Algorithmen ist dabei im Verhältnis zu dem Zeitbedarf bei einer konventionellen CPU-Datenverarbeitung von $t_{\text{Move}} = 1,87$ ms respektive $t_{\text{Max}} = 2,12$ ms nur gering. Vorteilhaft ist jedoch bei einer FPGA-basierten Datenverarbeitung der Umstand, dass für die Verarbeitungsblöcke Positionsermittlung (1) und Folgereferenzierung (4), mit den im Verhältnis gesehen hohen Zeitbedarfen (~ 86 bis 88%) am Gesamtzeitaufwand t_{Move} und t_{Max} eine betriebssystemunabhängige harte Echtzeitfähigkeit gewährleistet werden kann. Zeitvariationen treten dementsprechend nur bei den Verarbeitungsblöcken Bewegungsermittlung (2) und Datenübertragung (3) auf, welche hinsichtlich des gesamten Zeitbedarfs deutlich weniger ins Gewicht fallen (~ 12 bis 14%).

Bei dem untersuchten Stereokamerasystem entfällt eine FPGA-basierte Verarbeitung, da derzeit keine Hardware zur Verfügung steht, welche eine Zusammenführung der Daten zweier separater Kameras ermöglicht. Vielmehr werden die Kameradaten über zwei getrennte CameraLink-Schnittstellen an den Desktop-PC übergeben und dort konsolidiert. Die Zeitbedarfe der Verarbeitungsblöcke sind in folgender Abbildung zusammenfassend dargestellt.

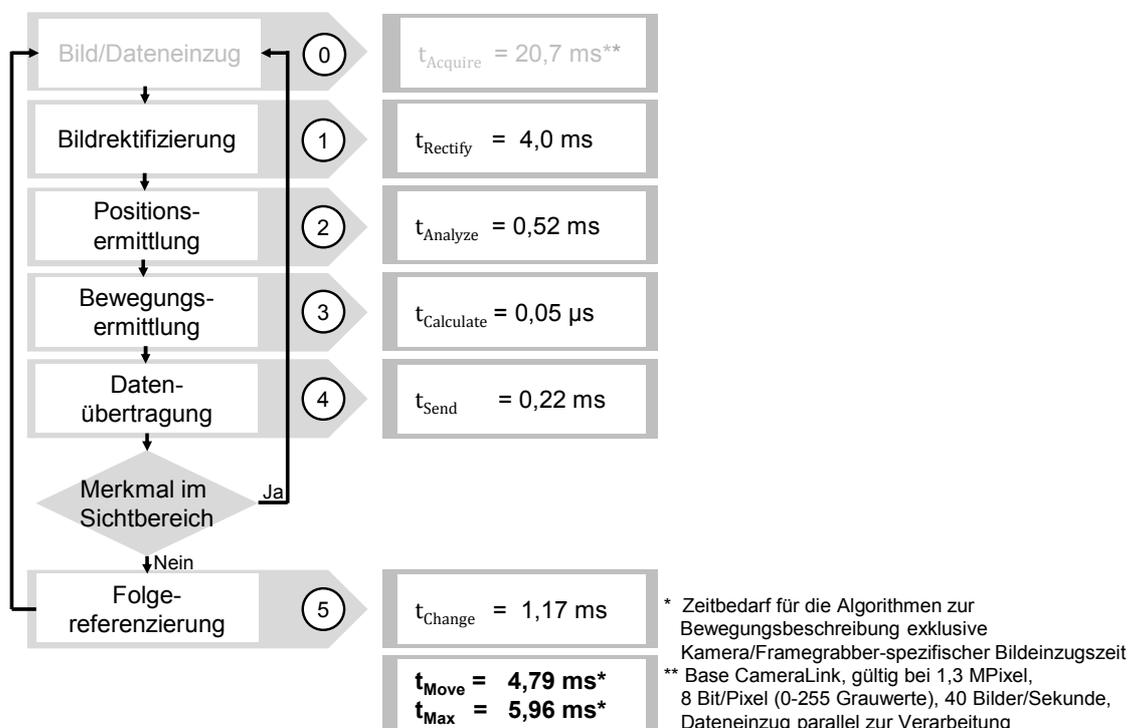


Abbildung 85: Zeiteffizienz der Bildverarbeitung (Stereo)

Zusätzlich zu den bereits erläuterten Zeitbedarfen t_{Acquire} (0), t_{Analyze} (2), $t_{\text{Calculate}}$ (3), t_{Send} (4) und t_{Change} (5), ist bei der Nutzung eines Stereokamerasystems für die Bewegungserfassung ebenfalls der Zeitaufwand t_{Rectify} (1) zur Rektifizierung von Bedeutung. Bei der Rektifizierung erfolgt ein Verzerren der Rohbilddaten, um den Effekt von Verzerrungen zu eliminieren. Anschließend wird eine Bildtransformation durchgeführt, um die Bilddaten beider Kameras auf eine Ebene zu projizieren, welche orthogonal zu den optischen Achsen und parallel zur Basislinie (Abstandsrichtung der Kameras) ausgerichtet ist. Die Rektifizierung weist mit $t_{\text{Rectify}} = 4,0$ ms den deutlich höchsten Zeitbedarf am Gesamtzeitaufwand t_{Move} respektive t_{Max} auf (~ 67 bzw. 82 %). Der Zeitaufwand zum Bild/Dateneinzug (0) ist hardwareseitig durch die verfügbaren Kamerasysteme, den Bildinformationsgehalt sowie die Framegräber vorgegeben mit $t_{\text{Acquire}} = 20,7$ ms. Dahingegen sind die Zeitaufwände für die zentralen Algorithmen der vektoriellen Bewegungsbeschreibung mit $t_{\text{Move}} = 4,79$ ms (t_{Move} exklusive $t_{\text{Rectify}} = 1,79$ ms) und der Folgereferenzierung $t_{\text{Max}} = 5,96$ ms (t_{Max} exklusive $t_{\text{Rectify}} = 1,96$ ms) auch bei der Nutzung eines Stereokamerasystems zur Bewegungsverfolgung zeiteffizient darstellbar.

Zusammenfassend belegen somit auch die experimentellen Untersuchungen der in Abschnitt 6.3 dargestellten Methode zur vektorbasierten Bewegungsbestimmung deren Eignung für eine hochgenaue und zugleich -effiziente Bewegungserfassung.

7.3.3 Analyse des Regelverhaltens

Die Evaluierung des Regelverhaltens erfolgt mittels der Auswertung von Sprungantworten des Manipulators. Hierzu wird ein selbst entwickelter Ist-Zustands- bzw. Regelgrößensimulator genutzt, welcher der Regeleinheit für definierte Zeitfenster vorbestimmte, dreidimensionale Regelabweichungen vorgibt. Während der Roboterbewegung simuliert der Regelgrößensimulator den Ist-Zustands-Eingang, indem er sowohl zeitlich als auch geometrisch exakt einstellbare Regelabweichungen $e(t)$ auf die Soll-Positionen bzw. Führungsgrößen $w(t)$ aufschlägt und diese als Ist-Vorgaben bzw. Regelgrößen $r(t)$ zurück an die Regelungseinheit übermittelt. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Eliminierung von Störeinflüssen und damit eine deterministische Evaluierung der erforschten Feininterpolationsalgorithmen. Vorteilhaft ist zudem die Möglichkeit, Grenzfall- und Stabilitätsbetrachtungen durchzuführen, da besonders ausgeprägte Regelabweichungen simuliert werden können.

Untersuchung linearer Bahnabschnitte

Zentraler Parameter zur Beeinflussung des Regelverhaltens auf geraden Bahnabschnitten ist gemäß Abschnitt 6.2 der Abstand der vorlaufenden Stützstelle d_{Vorlauf} . Eine Beurteilung des Einflusses von d_{Vorlauf} für variierende Einstellungen erfolgt durch eine sprunghafte Aufschaltung einer Regelabweichung $e_{\text{quer}}(t)$ in

negativer y-Richtung während einer Bewegung des Manipulators in positiver x-Richtung des Basiskoordinatensystems.

Aus den Bewegungsverläufen in Abbildung 86 geht hervor, dass bei einem Eingriff des roboterinternen Bewegungsfilters ein ausreichender Stützstellenvorlauf entscheidend für eine kontinuierliche Bewegungsausführung mit gleichbleibender Geschwindigkeit ist.

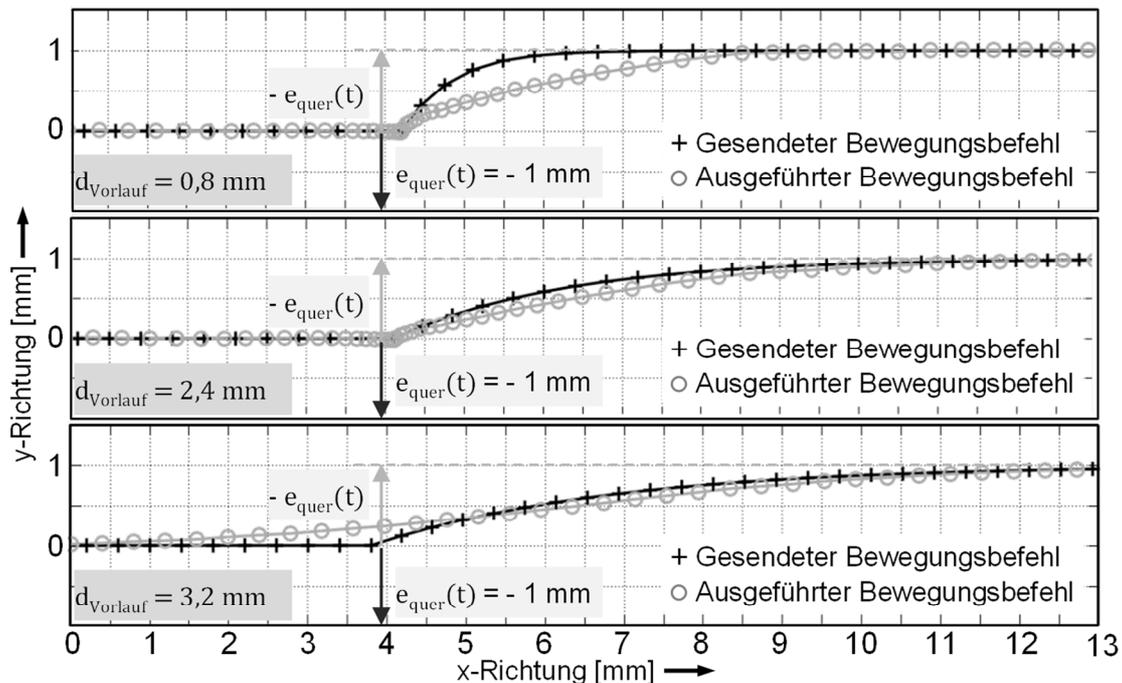


Abbildung 86: Einfluss des Stützstellenvorlaufs d_{Vorlauf} ($e_{\text{quer}}(t) = -1 \text{ mm}$; $v_{\text{Soll}} = 100 \text{ mm/s}$; roboterinterner Filterparameter: Standardeinstellung)

Dargestellt sind bei den Bahnverläufen sowohl die gesendeten Bewegungsvorgaben (schwarz) als auch die zugehörigen, von der Robotersteuerung ausgeführten Bewegungsbefehle (grau). Unabhängig von dem Abstand des Stützstellenvorlaufs ist den Bahnverläufen gemein, dass durch die erforschten Feininterpolationsalgorithmen die Regelabweichung ohne Überschwingen und vernachlässigbarer bleibender Regelabweichung abgebaut wird. Deutlich ersichtlich ist zudem die erwartete schnellere Abnahme der Regelabweichung bei einer Reduzierung des Stützstellenvorlaufs. Wird der dynamische Stützstellenvorlauf im Verhältnis zu den aufgetragenen sprunghaften Regelabweichungen gering gewählt ($d_{\text{Vorlauf}} \leq 2,4 \text{ mm}$), führt dies zu einer ausgeprägten Änderung der Bewegungsrichtung und aufgrund eines Eingriffs des dynamischen, roboterinternen Bewegungsfilters zu einer temporären Reduzierung der Bewegungsgeschwindigkeit, erkennbar an der Verringerung des Abstands der ausgeführten Bewegungsbefehle (Zusammenhang siehe Erläuterungen bzgl. Formel 6.1). Ein größerer Vorlauf ($d_{\text{Vorlauf}} \geq 3,2 \text{ mm}$) bewirkt dagegen einen langsamen und auch im Hinblick auf die Bewegungsgeschwindigkeit stetigen Ausgleich der Regelabweichung. Dabei ist bei einer Änderung des Stützstellenvor-

laufs von $d_{\text{Vorlauf}} = 2,4$ mm auf 3,2 mm eine markante Veränderung des Regelverhaltens festzustellen. So erfolgt bei $d_{\text{Vorlauf}} = 3,2$ mm örtlich gesehen ein früherer Ausgleich der Regelabweichung, da die ausgeführten Bewegungsbefehle den gesendeten Bewegungsbefehlen um die zeitliche Dimensionierung des Bewegungsfilters nacheilen. Der Bewegungsfiler fungiert hierbei als zeitlicher Prädiktionshorizont und Schutzmechanismus der Kinematik, indem der Manipulator bei großen Bewegungsrichtungsänderungen abgebremst wird oder bei geringeren Änderungen diese bereits vorzeitig ausgleicht. Dieses Bewegungsverhalten und der zeitliche Nachlauf reduziert die Reaktionsfähigkeit des Regelsystems.

Die in Abbildung 87 dargestellten Bahnverläufe belegen den direkten Zusammenhang zwischen der geometrischen Relation von Stützstellenvorlauf d_{Vorlauf} zu diskreter Regelabweichung $e_{\text{quer}}(t)$ und einer Änderung des Regelverhaltens.

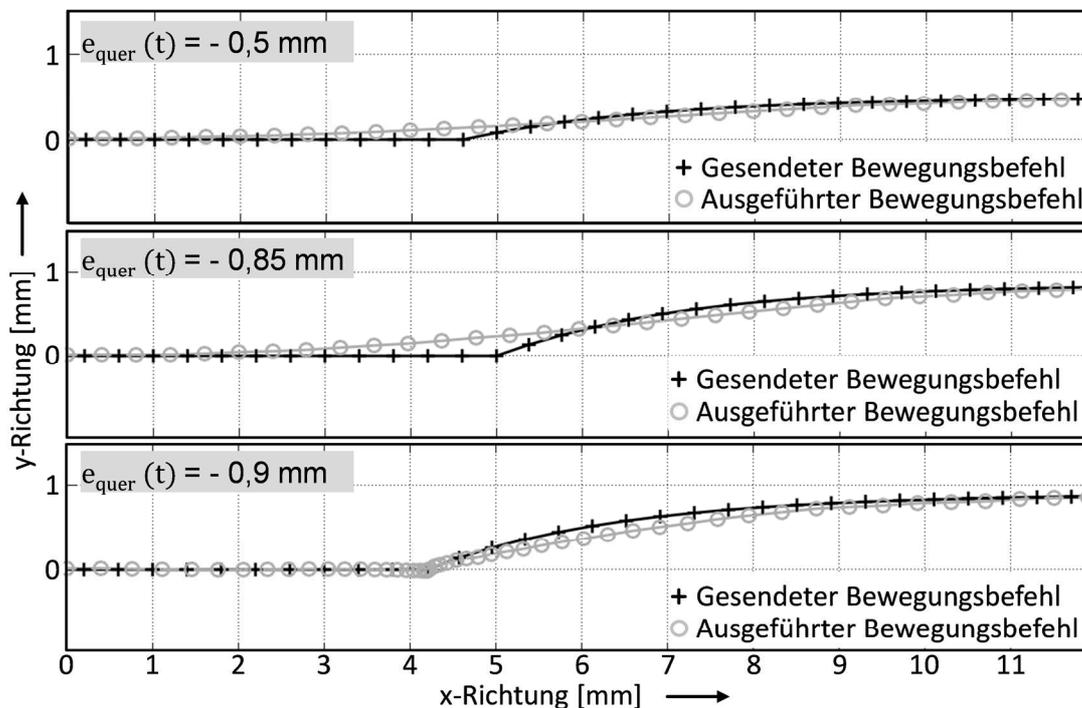


Abbildung 87: Grenzfallbestimmung Regelverhalten ($d_{\text{Vorlauf}} = 2,4$ mm; $v_{\text{Soll}} = 100$ mm/s; roboterinterner Filterparameter: Standardeinstellung)

Während bei gegebenem Vorlaufabstand d_{Vorlauf} geringe sprunghafte Regelabweichungen $e_{\text{quer}}(t)$ eine kontinuierliche Bewegungsausführung sowohl im Hinblick auf Bahnausprägung als auch Geschwindigkeit ermöglichen, resultiert ein Eingriff des roboterinternen Bewegungsfilters bei einer Überschreitung eines diskreten Verhältniswertes von d_{Vorlauf} zu $e_{\text{quer}}(t)$ ($e_{\text{quer}}(t) > -0,85$ mm) in einer Geschwindigkeitsreduktion. Weitere Analysen zeigen, dass dieses Verhältnis unabhängig von der Geschwindigkeitsvorgabe v_{Soll} gültig ist. Eine dahingehende Möglichkeit zur Einflussnahme auf das Roboterverhalten ist eine Modifikation des roboterinternen Bewegungsfilters.

Das Bewegungsverhalten bei einer Modifikation des roboterinternen Filters ist in Abbildung 88 dargestellt.

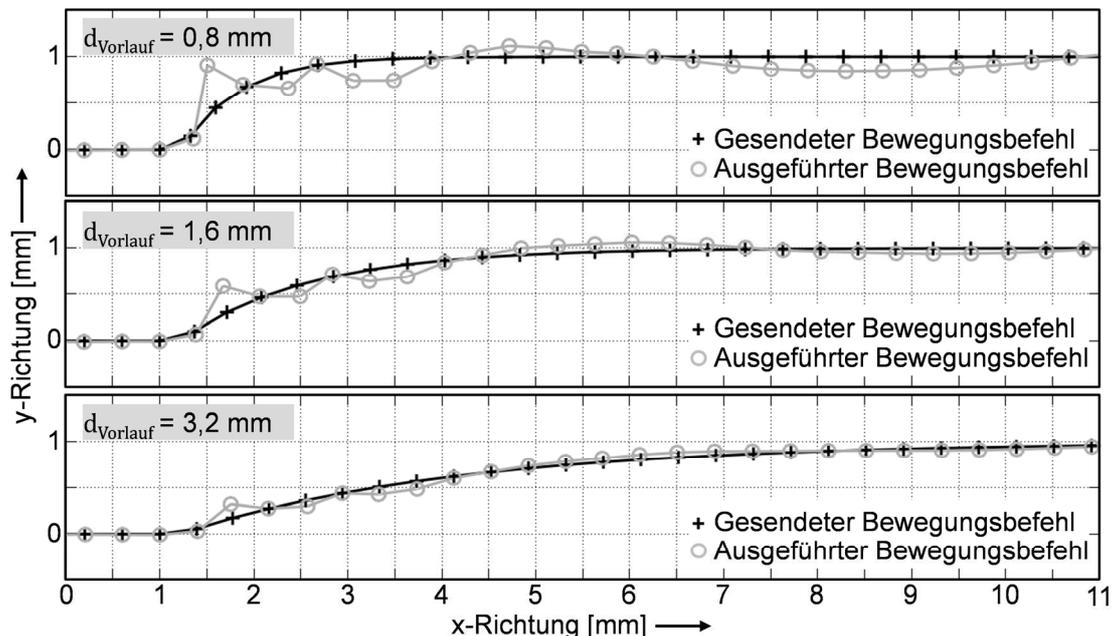


Abbildung 88: Einfluss des Stützstellenvorlaufs d_{Vorlauf} bei gedrosseltem Filterparameter ($v_{\text{Soll}} = 100 \text{ mm/s}$; $e_{\text{quer}}(t) = -1 \text{ mm}$; Filterparameter: 10 %) (Angelehnt an [162])

Durch die Anpassung des Bewegungsfilters wird der robotersteuerungsinterne, zeitliche Prädiktionshorizont auf 10 % reduziert. Entsprechend ist es der Robotersteuerung nicht möglich, bei einem Umschalten der Regelabweichung $e_{\text{quer}}(t) = -1 \text{ mm}$ (bei $x = 1$) die Bewegungsgeschwindigkeit zu reduzieren oder frühzeitig einen Abweichungsausgleich durchzuführen, sondern die ausgeführte Bewegung versucht unmittelbar - bzw. mit der Verzögerung von einem Interpolationsstakt - den vorgegebenen/gesendeten Bewegungsbefehlen zu folgen. Dies hat einerseits den positiven Effekt, dass bei einem geringen Vorlaufabstand d_{Vorlauf} der dynamischen Stützstelle die Anforderungen nach einer im Wesentlichen konstanten Bewegungsgeschwindigkeit und schnellen Abweichungskorrektur erfüllt werden, andererseits jedoch aufgrund ruckartiger Ausgleichsbewegungen Überschwingeffekte auftreten. Der Eingriff des roboterinternen Reglers bedingt hierbei eine Ausregelung des Überschwingens. Durch eine Vergrößerung des Stützstellenvorlaufs d_{Vorlauf} lassen sich diese Negativauswirkungen reduzieren. So wird die Überschwingneigung reduziert und der Einfluss des übergeordneten, externen Reglers überwiegt, welcher das Roboterhandwurzel-Koordinatensystem auf die richtige Bahn führt.

Dabei ist das Regelungsverhalten ebenfalls abhängig von der Geschwindigkeitsvorgabe v_{Soll} . Der Zusammenhang ist in Abbildung 89 dargestellt.

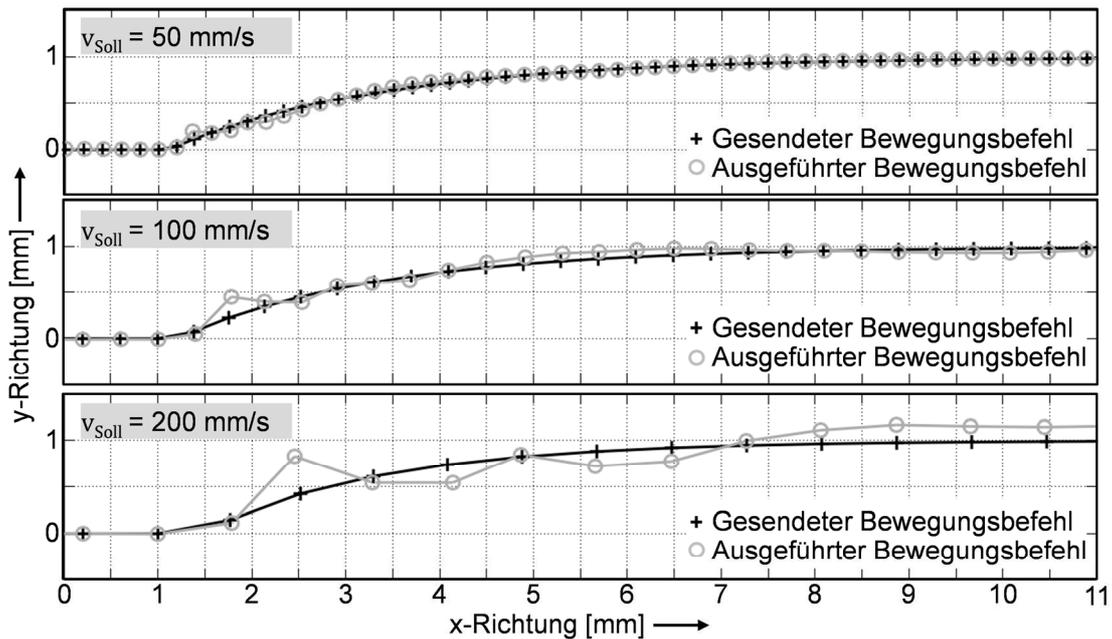


Abbildung 89: Einfluss der Geschwindigkeitsvorgabe v_{Soll} ($d_{Vorlauf} = 2,4 \text{ mm}$; $e_{quer}(t) = -1 \text{ mm}$; Filterparameter: 10 %)

Gemein ist den Bahnverläufen, dass die ausgeführten Bewegungsbefehle den gesendeten Bewegungsbefehlen auch bei zunehmender Geschwindigkeitsvorgabe ohne zeitlichen Versatz zuverlässig folgen. Markant ist die zunehmende Ausprägung der Überschwingneigung bei einer Geschwindigkeitszunahme, bedingt durch abrupte Bewegungsrichtungsänderungen der Kinematik bei sprunghaft auftretenden Regelabweichungen. Hierbei greift der roboterinterne Regler, welcher die Schwingungen ausregelt.

Für lineare Bahnabschnitte kann somit abschließend festgehalten werden, dass der entwickelte Feininterpolationsalgorithmus auftretende Abweichungen zuverlässig ausregelt. Insbesondere die Kombination aus einem sinnvoll dimensionierten Vorlaufabstand mit einer Reduzierung des roboterinternen Filterparameters kann helfen, die Geschwindigkeitsvorgaben einzuhalten, die Reaktionsfähigkeit des Systems auf detektierte Regelabweichungen zu erhöhen, die Determiniertheit des Regelverhaltens zu verbessern und schlussendlich eine hohe Konturtreue zu ermöglichen. Abhängig von dem individuell genutzten Manipulator sind die Parameter des externen Regelungssystems empirisch zu ermitteln. Während bei Robotertypen in Langarm-Ausführungen eher größer gewählte Vorlaufabstände in Verbindung mit einer gemäßigten Reduzierung des roboterinternen Filters hilfreich sind, können diese Einstellgrößen bei steifen Robotervarianten mit geringer Schwingneigung weiter reduziert werden, um einen schnellen Ausgleich von Regelabweichungen zu ermöglichen.

Untersuchung zirkularer Bahnabschnitte

Während in linearen Bahnabschnitten das Verhalten maßgeblich über d_{Vorlauf} bestimmt wird, erfolgt bei zirkularen Abschnitten eine Einstellung des Regelverhaltens über die Winkelanpassungsfaktoren W_{Start} (Schwellwertfaktor der Winkeländerung) und W_{max} (Obergrenzenfaktor des Abbildungsbereichs). Sehr robust, auch bei unterschiedlichen Einstellungen der Regelparameter, verhält sich das System bei größeren Radien. Das Regelverhalten bei einer Kreisbahn mit einem Radius $r = 10 \text{ mm}$ ist in Abbildung 90 dargestellt.

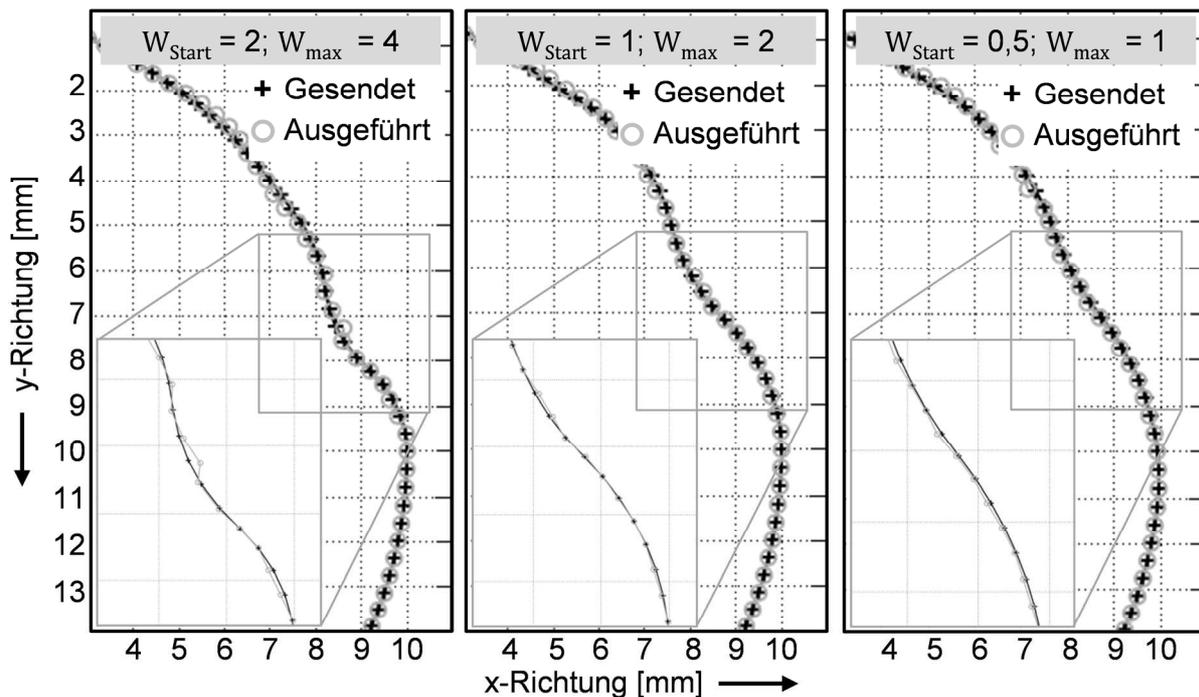


Abbildung 90: Regelverhalten abhängig von W_{Start} und W_{max} bei größeren Radien ($r = 10 \text{ mm}$; $v_{\text{Soll}} = 100 \text{ mm/s}$; $e_{\text{quer}}(t) = -1 \text{ mm}$; Filterparameter: 10 %) (Angelehnt an [162])

Der Vergleich der gesendeten und ausgeführten Bewegungsbefehle zeigt, dass der Roboter bei allen Parameterkombinationen W_{Start} und W_{max} jeweils nach dem Aufschalten einer Regelabweichung $e_{\text{quer}}(t) = -1 \text{ mm}$ orthogonal zur Bahn zuverlässig zurück auf die richtige Bahn geführt wird. Unterschiede zeigen sich jedoch in den vergrößert dargestellten Übergangsbereichen. Große Werte für W_{Start} und W_{max} bewirken einen schärferen Ausgleich detektierter Regelabweichungen und damit einhergehenden starken Richtungsänderungen. Dies hat den Effekt, dass die ausgeführten Bewegungsbefehle den gesendeten geometrisch gesehen nicht exakt folgen und zudem temporäre Geschwindigkeitsvariationen auftreten, repräsentiert durch kurzzeitige Abstandsänderungen der ausgeführten Bewegungsbefehle (Formel 6.1). Ein fließender Bewegungsverlauf ergibt sich bei niedrigen Winkelanpassungsfaktoren. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Untersuchungen, sind W_{Start}

und W_{\max} dementsprechend umso geringer zu wählen, je kleiner die in der Bahn enthaltenen Radien ausgebildet sind. Bewährt hat sich in diesem Zusammenhang ein Verhältnis von $W_{\text{Start}}/W_{\max}$ von 1/2.

Abbildung 91 zeigt das Regelverhalten bei variierenden Winkel Anpassungsfaktoren für einen kleinen Bahnradius $r = 5 \text{ mm}$.

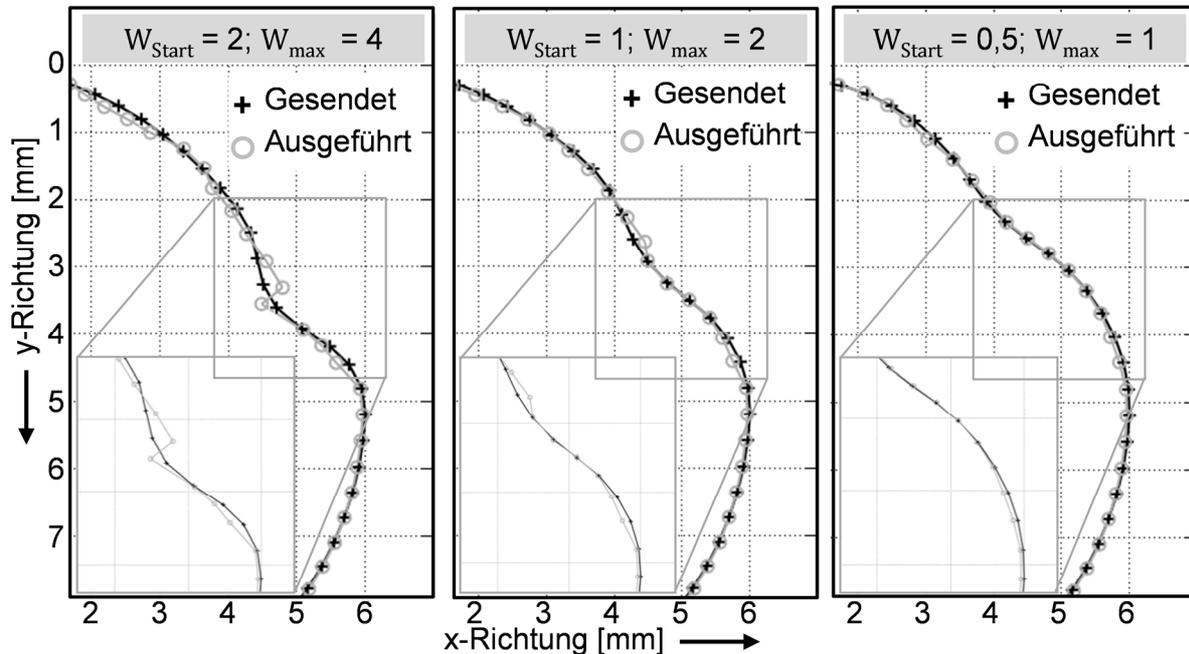


Abbildung 91: Regelverhalten abhängig von W_{Start} und W_{\max} bei kleinen Radien ($r = 5 \text{ mm}$; $v_{\text{Soll}} = 100 \text{ mm/s}$; $e_{\text{quer}}(t) = -1 \text{ mm}$; Filterparameter: 10 %) (Angelehnt an [162])

Analog der vorhergehenden Untersuchungen, wird die Roboterbewegung zuverlässig auf die richtige Bahn zurückgeführt. Deutlich markanter als bei dem größeren Radius $r = 10 \text{ mm}$ fallen jedoch bei hohen Werten für W_{Start} und W_{\max} die Abweichungen der gesendeten von den ausgeführten Bewegungsbefehlen im Übergangsbereich aus. In diesem Fall greift der roboterinterne Regler und gleicht ein Überschwingen des Endeffektors aus. Eine entsprechende Reduzierung der Winkel Anpassungsfaktoren resultiert in einer deutlichen Kontinuitätsverbesserung der Bewegungsbahn, sowohl im Hinblick auf Geometrie als auch Geschwindigkeit. Aufgrund der sanfter eingestellten externen Reglers wird die Überschwingneigung reduziert und der Bedarf zum Eingriff des roboterinternen Reglers verringert, wodurch der Einfluss des übergeordneten Reglers überwiegt.

Abschließend belegen die Untersuchungsergebnisse, dass die entwickelten Feininterpolationsalgorithmen auf linearen und zirkularen Bahnabschnitten die in Abschnitt 6.2.3 diskutierten Anforderungen an einen Regler erfüllen. Dies ist insbesondere dahingehend richtig, da der Regler sich auch bei einer sprunghaften Anregung zuverlässig stabil verhält, eine vernachlässigbare Regeldifferenz aufweist

und Abweichungen bei einer entsprechenden Parametrierung des Reglers mit einer ausreichenden Dämpfung schnell ausregelt.

7.3.4 Synthese des Gesamtsystems

Abschließend wird das Bewegungsverhalten des Industrieroboters mittels Regelgrößenermittlung durch das Bildverarbeitungssystem untersucht. Aufgrund der hardwarebedingten Einschränkungen des vorgestellten Stereokamerasystems hinsichtlich Bildeinzugszeit (Abbildung 85) wird für die Untersuchungen das dahingehend leistungsfähigere Monokamerasystem genutzt, welches entsprechend Abschnitt 7.3.2 bezüglich des Stereokamerasystems vergleichbare Erfassungsgenauigkeiten aufweist.

Eine quantitative Evaluierung erfolgt über einen Vergleich der Abweichungen des Bewegungsverlaufs im ungeregelten (rot dargestellt) und geregelten Zustand (grün dargestellt) bezüglich der jeweils vorgegebenen Soll-Bahn. Um die Stabilität des Gesamtsystems zu erproben, werden hinsichtlich der vorgestellten Regelparameter d_{Vorlauf} , W_{Start} und W_{max} Werte gewählt, welche einen verhältnismäßig intensiven Eingriff des externen Regelkreises bedingen. Entsprechend der Erkenntnisse aus Abschnitt 7.3.3 werden Regelabweichungen somit zwar einerseits zügig ausgeglichen, gleichzeitig erfolgt jedoch auch eine Anregung des roboterinternen Regelkreises. Zentrale Anforderung ist dahingehend trotz des ausgeprägten externen Eingriffs die Gewährleistung der Systemstabilität.

Untersuchung exemplarischer linearer Bahnabschnitte

Nachfolgende Abbildung 92 zeigt das Bewegungsverhalten des Roboters auf einer Rechteckbahn im geregelten und ungeregelten Zustand.

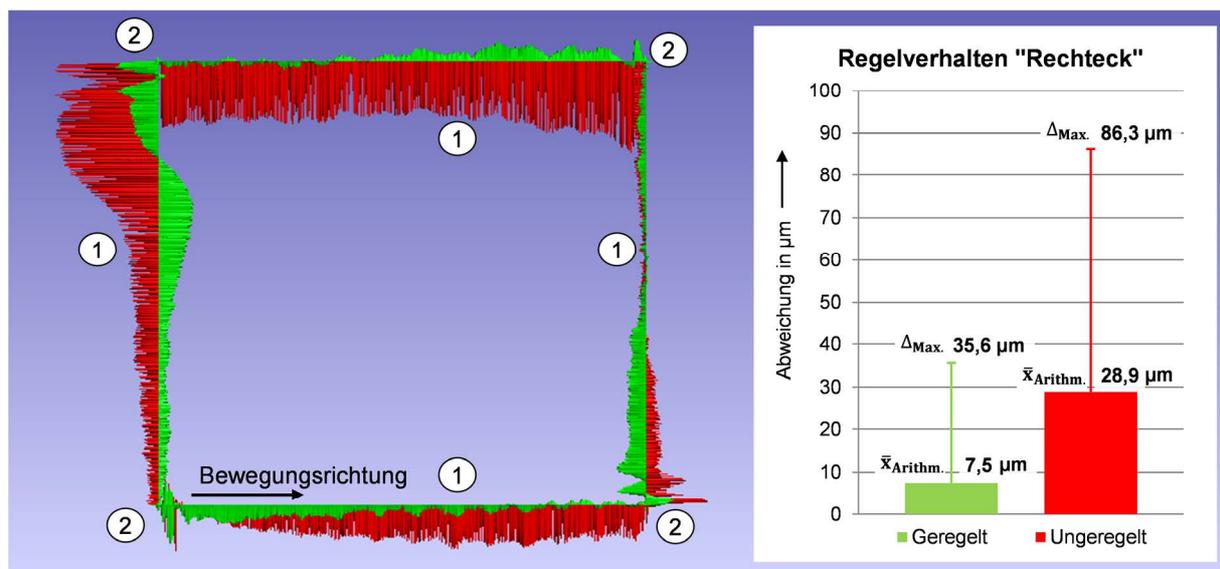


Abbildung 92: Regelverhalten Rechteck (Kantenlänge 10 mm; $d_{\text{Vorlauf}} = 1,6$ mm)

Bezogen auf die Gesamtbahn wird die Bahnabweichung im arithmetischen Mittel $\bar{x}_{\text{Arithm.}}$ durch die Regelung von $28,9 \mu\text{m}$ auf $7,5 \mu\text{m}$ reduziert, die maximal erfassten Abweichungen $\Delta_{\text{Max.}}$ sinken von $86,3 \mu\text{m}$ auf $35,6 \mu\text{m}$. Dies entspricht einer Verringerung der Abweichung auf 26 % respektive 41 % bezogen auf die Bewegungsabweichung im unregelmäßigen Zustand. Ersichtlich ist aus dem geregelten Bahnverlauf eine sukzessive Verringerung der Abweichung mit zunehmendem Bewegungsfortschritt entlang der linearen Segmente (1). Die hinsichtlich des Betrags größten Abweichungen treten sowohl im unregelmäßigen als auch im geregelten Zustand in den Unstetigkeitsbereichen (2) auf. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 3.3.4. Auch diese lokalen Abweichungsspitzen werden durch die erforschte Regelung im weiteren Bewegungsverlauf zuverlässig kompensiert.

Abbildung 93 zeigt das Roboterbewegungsverhalten auf einer Rasterbahn. Durch die geometrische Ausprägung der Bahn zeichnet sich diese im Vergleich zur vorherigen Bahn zum einen durch eine erhöhte Anzahl an Bewegungsrichtungsänderungen und zum anderen durch eine größere Bahnlänge aus.

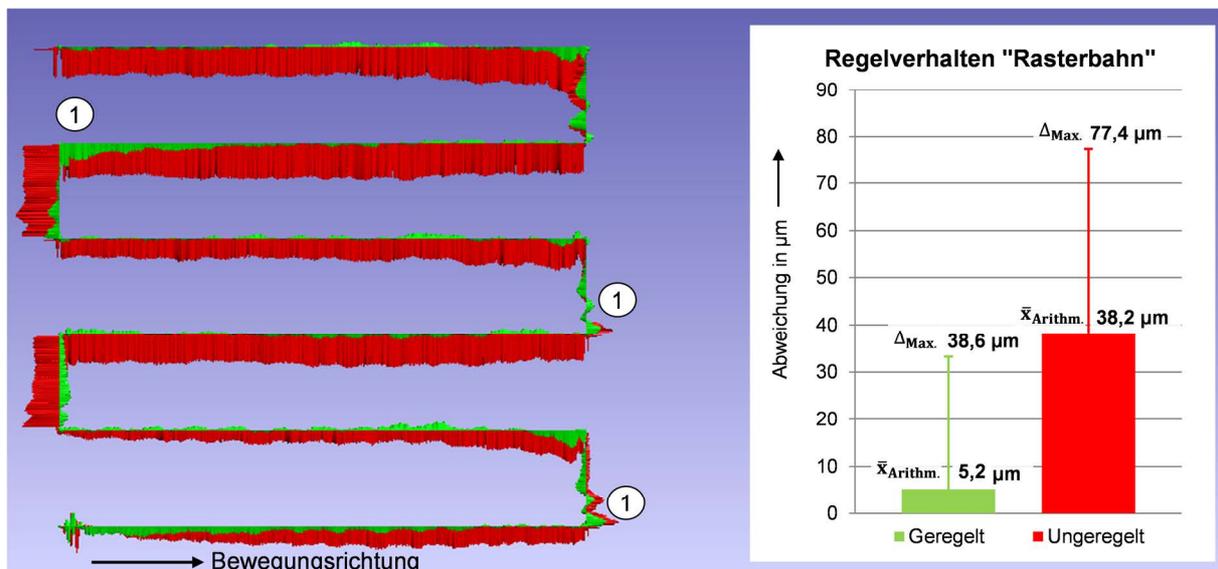


Abbildung 93: Regelverhalten Rasterbahn (Ausdehnung $10 \times 10 \text{ mm}$; Raster 2 mm ; $d_{\text{Vorlauf}} = 1,6 \text{ mm}$)

Analog der Erkenntnisse aus Abschnitt 3.3.3 nimmt die Abweichung von der unregelmäßig abgefahrenen Bahn zu der Soll-Bahn mit zunehmendem Bewegungsfortschritt sukzessive zu. Dieser Effekt wird mittels der Regelung zuverlässig vermieden. Ein Abweichungstrend ist unter Nutzung des erforschten Regelungssystems nicht mehr festzustellen. Im arithmetischen Mittel $\bar{x}_{\text{Arithm.}}$ sinkt die Bewegungsabweichung im geregelten Zustand bezüglich des unregelmäßigen Zustands auf 14 %. Die maximal erfasste Abweichung $\Delta_{\text{Max.}}$ wird auf 49 % reduziert. Analog der vorhergehenden Analyse, treten diese erhöhten Abweichungen maßgeblich in den Eckbereichen (1) der Trajektorie auf, welche im weiteren Bewegungsverlauf ausgeglichen werden.

Abbildung 94 zeigt eine um 45° gedrehte Rechteckbahn, welche das Bewegungsverhalten bei einer überlagerten Bewegung zugleich in x- und y-Richtung illustriert.

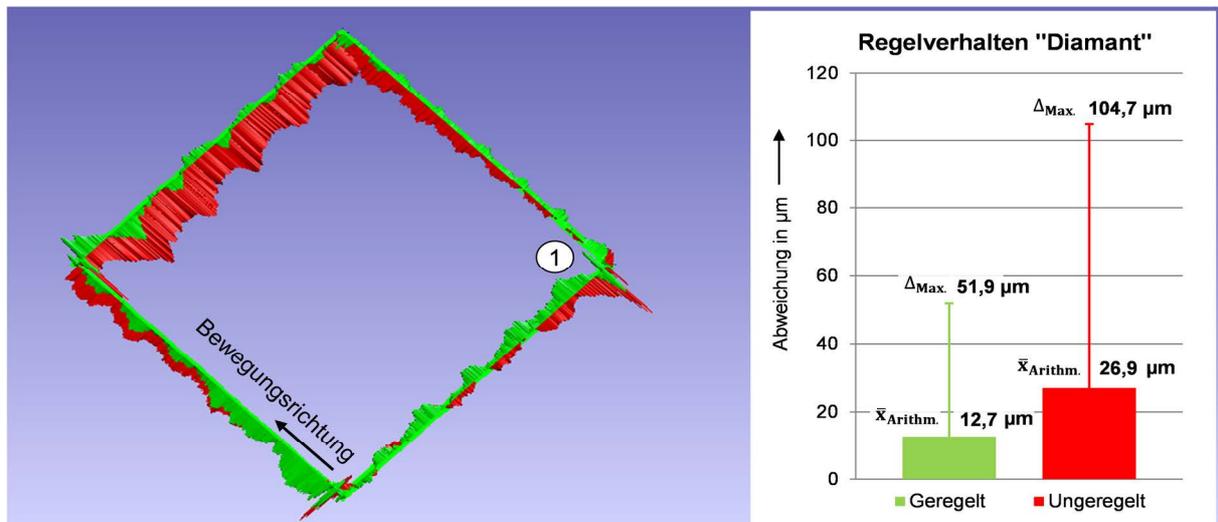


Abbildung 94: Regelverhalten Diamant (Kantenlänge 10 mm; $d_{\text{Vorlauf}} = 1,6$ mm)

Aufgrund der geometrischen Ausprägung der Bahn weist der Abweichungsverlauf bei einer unregelmäßigen Bewegung keinen signifikanten Trend auf. Mittels der Regelung wird die Abweichung im arithmetischen Mittel $\bar{x}_{\text{Arithm.}}$ auf 47 % und bezüglich des maximal erfassten Abweichungswerts $\Delta_{\text{Max.}}$ auf 50 % verringert. Die weniger stark ausgeprägte Verbesserung im Verhältnis zu vorhergehenden Untersuchungen ist darin begründet, dass sich bereits die unregelmäßige Bewegung im zweiten Bahnabschnitt (1) durch eine relativ hohe Genauigkeit auszeichnet.

Untersuchung exemplarischer zirkularer Bahnabschnitte

Abbildung 95 zeigt das Bewegungsverhalten des Roboters auf einer Halbkreisbahn im geregelten und unregelmäßigen Zustand.

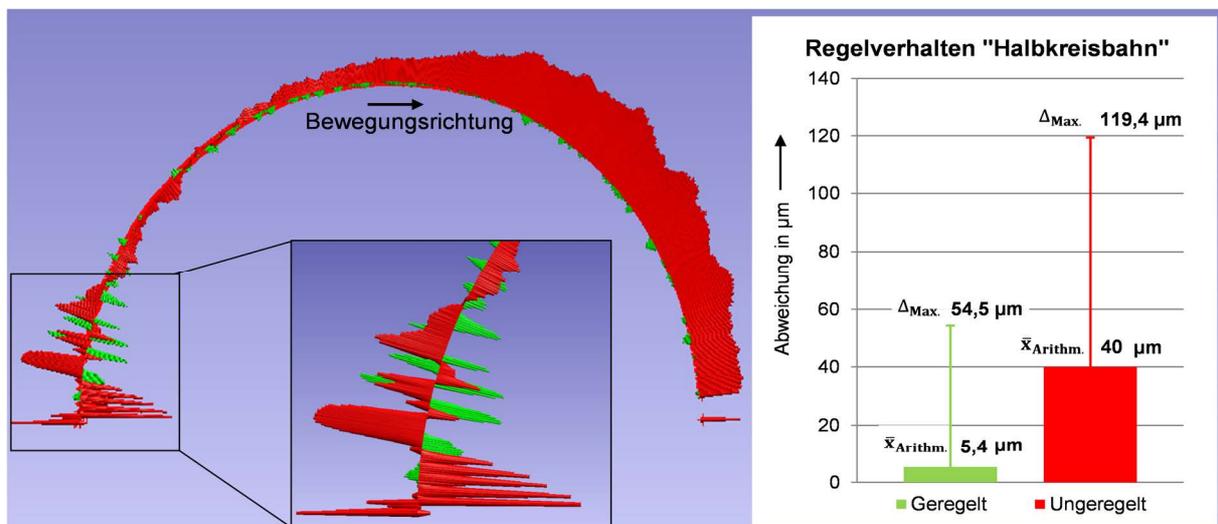


Abbildung 95: Regelverhalten Halbkreis (Durchmesser 10 mm; $W_{\text{Start}}/W_{\text{max}} = 4/2$)

Im unregelmäßigen Zustand zeigt die Bewegung eine deutliche Abweichungszunahme während des Bewegungsfortschritts. Unter Nutzung der Regelung wird dieser Trend vermieden und der Roboter stabil auf der Soll-Bahn gehalten. Die Abweichung wird im arithmetischen Mittel $\bar{x}_{\text{Arithm.}}$ auf 14 % und bezüglich des maximal erfassten Abweichungswerts $\Delta_{\text{Max.}}$ auf 45 % reduziert. Ausgeprägte Abweichungsspitzen treten sowohl im unregelmäßigen Zustand als auch im geregelten Zustand im vergrößert dargestellten Anfangsbereich der Bewegung auf. Plausible Begründung hierfür sind auftretende Schwingungen, bedingt durch die Roboterbeschleunigungen, welche seitens des Bildverarbeitungssystems detektiert und entsprechend als Regelgröße an den Regelkreis übergeben werden. Dies zeigt sich auch im weiteren Bewegungsverlauf, in dem der Roboter mittels der Regelung auf die kommandierte Bahn geführt und auf dieser gehalten wird.

Abschließend illustriert Abbildung 96 das Bewegungsverhalten des Roboters auf einer Vollkreisbahn, wobei Schwingungen durch ein Einfahren des Roboters in den kreisförmigen Bereich mittels eines tangential angelegten, linearen Bahnsegments vermieden werden.

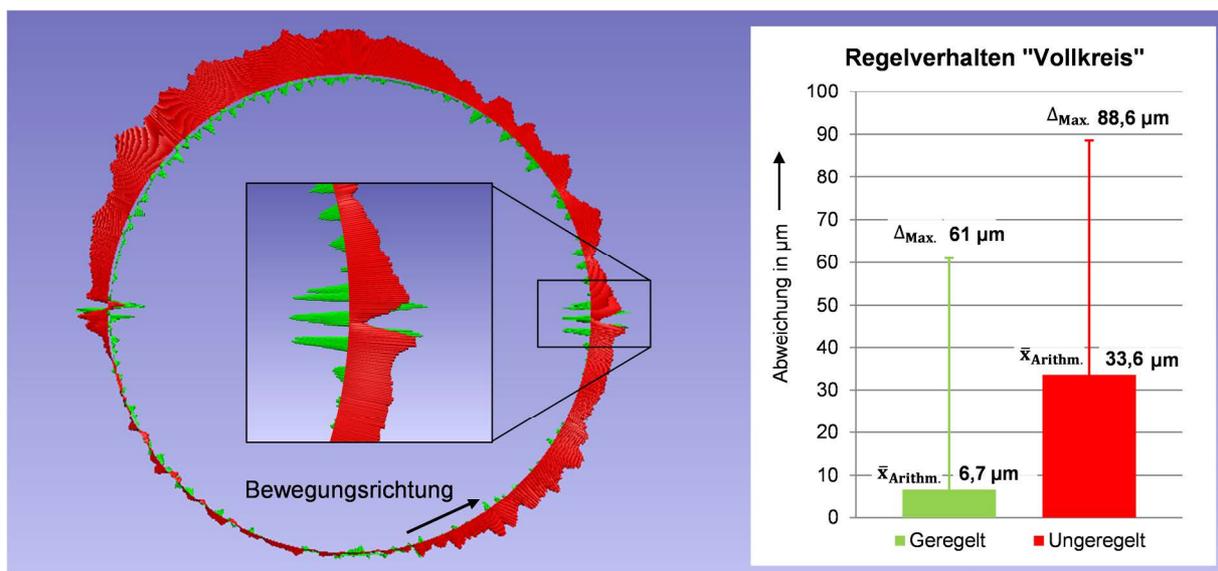


Abbildung 96: Regelverhalten Vollkreis (Durchmesser 20 mm; $W_{\text{Start}}/W_{\text{max}} = 4/2$)

Unter Berücksichtigung der gesamten Bahn wird die Abweichung durch die Regelung im arithmetischen Mittel $\bar{x}_{\text{Arithm.}}$ auf 20 % reduziert, die maximal erfassten Abweichungen $\Delta_{\text{Max.}}$ sinken auf 69 %. Ausgeprägte Abweichungen treten im Bereich der horizontalen Mittelachse der Kreisbahn auf. Ein Vergleich mit der achsbezogenen Roboterbewegung weist in diesem Bahnabschnitt eine Drehrichtungsänderung von Achse 6 auf. Einflüsse auf die Genauigkeit durch Drehrichtungsänderungen von Achsen konnten ebenfalls in den Abschnitten 3.3.2 und 3.3.3 festgestellt werden. Diese Abweichungen werden durch das Regelungssystem im weiteren Verlauf kompensiert, resultieren aber in lokalen Überschwingbewegungen.

Zusammenfassend unterstreichen die Untersuchungen des Roboterbewegungsverhaltens im geregelten Zustand mittels Kamerasystem zur Regelgrößenbestimmung die Ergebnisse der Analysen aus Abschnitt 7.3.3.hinsichtlich des Regelverhaltens mittels des Zustandssimulators. Bewegungsabweichungen werden in linearen und zirkularen Bahnabschnitten zuverlässig kompensiert, wobei der positive Effekt mit zunehmendem Bewegungsfortschritt ansteigt. Auch in Bereichen mit dynamisch auftretenden Abweichungen verhält sich das System stabil, wobei die Ergebnisse bezüglich des Regelverhaltens in zirkularen Bahnabschnitten eine eher konservative Festlegung der relevanten Regelparameter implizieren.

7.4 Zusammenfassung und Beurteilung

Nach einer Einführung der für die Ergebnisevaluierung genutzten roboterbasierten Prozesszelle in Abschnitt 7.1, wurde in Abschnitt 7.2 das während der Forschungsarbeiten entwickelte Softwaretool „PathTransformer“ zur automatisierten Optimierung komplexer dreidimensionaler Robotertrajektorien vorgestellt. Des Weiteren wurden experimentelle Untersuchungen erörtert, welche die Funktionsfähigkeit der in Kapitel 5 vorgestellten Optimierungsalgorithmen belegen. Effektiv werden durch die erforschte Methode negative Auswirkungen reduziert, welche mit abrupten Bewegungsrichtungsänderungen des Roboters zur Prozesslaufzeit einhergehen. Durch eine deutliche Reduzierung der Achsbeschleunigungen und des Achsrucks kann darüber hinaus von einer Verringerung des Roboterverschleißes ausgegangen werden. Zusätzlich wird durch die verminderten Achsbeschleunigungen eine Reduzierung des Energieverbrauchs und Erhöhung des Wirkungsgrads antizipiert. Die Implementierung in dem Softwaretool „PathTransformer“ erlaubt durch eine automatisierte Durchführung der Optimierungsschritte eine signifikante Reduzierung des Zeitaufwands, welche mit einer manuellen Roboterprogrammoptimierung einhergehen würde. Dadurch wird der Anwender bei der Erstellung von Roboterbewegungsprogrammen für komplexe, dreidimensionale Bearbeitungsaufgaben mit hohen Genauigkeitsanforderungen unterstützt. Das durch die Algorithmen optimierte Roboterprogramm zur Steuerung der Bewegung bildet hierbei eine wesentliche Voraussetzung für eine exakte Bewegungsausführung durch den Roboter.

Ganzheitlich betrachtet sind jedoch nicht nur vor der Bewegungsausführung sondern ebenfalls zur Laufzeit Maßnahmen notwendig, um die Roboterbahngenauigkeit zu erhöhen. Um dies zu ermöglichen, wurde während der Forschungsarbeiten das in Abschnitt 7.3 vorgestellte Tool „UniversalRobotControl“ entwickelt. Lauffähig auf konventionellen Desktop-PC-Systemen, ermöglicht „UniversalRobotControl“ eine flexible Anbindung verschiedener Applikationsmodule sowie eine universelle Roboteransteuerung und -regelung. Dabei wird der Nutzer bei der Parametrierung des Regelungssystems durch eine intuitiv bedienbare graphische Benutzeroberfläche unterstützt. Bis zum aktuellen Entwicklungsstand wurden Applikationsmodule zur gestenbasierten Roboterführung, der Steuerung mittels eines 3D-

Oberflächenscanners sowie eine hochgenaue und -dynamische, vektorbasierte Roboterregelung umgesetzt, wobei letzteres Modul im Rahmen der in Abschnitt 7.3 dargestellten Ergebnisse untersucht wurde. Besonders im Fokus der Analysen liegen hierbei die Regelgrößenermittlung basierend eines Mono- und Stereokamerasystem sowie das Regelungsverhalten auf linearen und zirkularen Bahnabschnitten.

Für die erforschte Methode zur Regelgrößenermittlung konnten sowohl in 2D- als auch 3D- Genauigkeiten der Bewegungserfassung im Bereich weniger 10 μm erzielt werden. Dabei verhält sich die Regelgrößenermittlung auch robust bei Variation der unterschiedlichen Einflussparameter wie z. B. Trajektorienlänge, Bewegungsrichtung, Anzahl der Merkmals-Wechsel, Bewegungsgeschwindigkeit etc. Besonders die Regelgrößenermittlung anhand des Monokamerasystems weist hierbei eine sehr hohe Zeiteffizienz auf und ermöglicht die Ermittlung von mehr als 500 Bewegungszuständen pro Sekunde. Dahingehend ist das Stereokamerasystem durch die notwendige Rektifizierung der Bilddaten beschränkt. Ausblickend bietet in diesem Bereich die Entwicklung eines integrierten Stereokamerasystems mit direkter Anbindung und Vorverarbeitung der Sensordaten auf einen FPGA-Chip das Potential den Zeitaufwand für die Rektifizierung massiv zu reduzieren.

Auch die experimentellen Evaluierungen der erforschten Feininterpolationsalgorithmen zur vektorbasierten Roboterregelung mittels Zustandssimulators beweisen deren Wirksamkeit. So führt die vorlaufende dynamische Stützstelle zur Orientierung der Ausgleichsbewegungen zu einem konstanten und vorhersagbaren Regelverhalten auf geraden Bahnabschnitten. Die Kombination eines geeigneten Vorlaufabstands d_{Vorlauf} in Verbindung mit einer Anpassung des roboterinternen Bewegungsfilters gewährleistet hierbei ein kontinuierliches Regelverhalten sowohl im Hinblick auf der Bewegungsbahn als auch -geschwindigkeit. Die Begrenzung des Winkels der Richtungsänderung während des Ausgleichs von Regelabweichungen in Kurven, parametrierbar durch die Winkelanpassungsfaktoren W_{Start} und W_{max} , ermöglicht zudem sanfte und kontinuierliche Korrekturbewegungen in kreisförmigen Bahnabschnitten. Diese anschaulichen Einstellparameter erlauben eine einfache, empirische Anpassbarkeit des Reglers an neue Robotertypen und Gegebenheiten. Dabei werden durch die gewählte Herangehensweise die Vorteile der internen Roboterregelung (hohe Dynamik zur Ausregelung von Schwingungen) mit den Vorteilen einer externen Regelung (übergeordnete Sicht und Universalität) verknüpft. Dies belegen auch die experimentellen Untersuchungen des Gesamtsystems, in welchem der Roboter mittels Bildverarbeitungssystem zur Regelgrößenbestimmung geregelt und zuverlässig mit hoher Genauigkeit auf die Soll-Bahn geführt und auf dieser gehalten wird.

Zusammenfassend stützen die experimentellen Untersuchungen die Funktion und Wirksamkeit der erforschten Methoden und der entwickelten Softwaretools zur hochpräzisen adaptiven Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse.

8 Zusammenfassung

Als Handhabungsgeräte, welche sich durch eine hohe Bewegungsvermögen und Kosteneffizienz auszeichnen, bieten Knickarmroboter das Potential zum Einsatz bei einer Vielzahl von Applikationen. Nicht dazu gehören derzeit Anwendungen, bei denen hohe Genauigkeiten schon beim erstmaligen Abfahren von Bahnen gefordert werden. Begründet ist dies in der verhältnismäßig geringen Absolutgenauigkeit von Knickarmrobotern. Eine Verbesserung gestaltet sich dabei ausgesprochen komplex, da die Absolutgenauigkeit von einer Vielzahl roboterinhärenter und auch externer Einflussgrößen abhängt. Dabei steht die Verbesserung seit Jahrzehnten im Fokus der Bemühungen von Herstellern, Anwendern und auch Forschern. Die zumeist genutzten Methoden kommen aus dem Bereich der Kalibrierung, welche auf eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Manipulators in der Robotersteuerung abzielen. Während mit dieser Herangehensweise deutliche Genauigkeitssteigerungen erreicht werden können, sind Kalibriermethoden prinzipbedingt beschränkt auf einen spezifischen Robotertyp und müssen für jeden Roboter individuell neu durchgeführt werden. Eine alternative Möglichkeit zur Verbesserung der Genauigkeit ist die Nutzung eines regelungstechnischen Systems zum Ausgleich von Abweichungen während der Bewegung. Vorteilhaft an diesem Ansatz ist die Möglichkeit zur Kompensation der Abweichungen unabhängig von deren Herkunft. Die bekannten Systeme weisen jedoch oftmals Defizite entweder im Bereich der Genauigkeit, Zeiteffizienz oder Universalität auf. Im Weiteren wird im bekannten Stand der Technik und Forschung die Erstellung angepasster und hinsichtlich stetigem Verlauf aufbereiteten Roboterbewegungsbahnen nur unzureichend adressiert. Dementsprechend soll vorliegende Dissertationsschrift im Bereich der hochpräzisen adaptiven Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse einen Beitrag leisten.

Die Erkenntnisse grundlegender Untersuchungen des Genauigkeitsverhaltens von Industrierobotern, die Bereitstellung einer Methode zur automatisierten Optimierung komplexer dreidimensionaler Robotertrajektorien, die Vorstellung eines roboterunabhängigen, universellen Regelungssystems sowie einer hochgenauen und -dynamischen Methode zur Regelgrößenbestimmung bilden hierbei die zentralen Forschungsschwerpunkte der Arbeit.

Trotz der hohen Relevanz der Absolutgenauigkeit existieren nur wenige prägnante Arbeiten und Studien, denen das Genauigkeitsverhalten von Industrierobotern entnommen werden kann. Die dahingehend selbst angestellten Untersuchungen unterschiedlicher kleinskaliger Knickarmroboter zeigen deutlich die Abhängigkeit der Absolutgenauigkeit von der Bewegungsaufgabe und belegen gleichzeitig die Komplexität des Themas. Durch die Kombination und Wechselwirkung einer Vielzahl von Einflussfaktoren, wird ein immenser Parameterraum aufgespannt, der die

Definition eines einfachen Kennwerts für die Absolutgenauigkeit gemäß der einschlägigen Normen nur schwer möglich macht. Dieser Umstand in Verbindung mit den ermittelten Absolutgenauigkeitswerten, welche die von den Roboterherstellern angegebene Wiederholgenauigkeit um ein Vielfaches überschreiten, unterstreicht jedoch umso mehr die Notwendigkeit zur Bereitstellung geeigneter Methoden für die Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen leiten sich zwei Handlungsbedarfe ab: Einerseits die Notwendigkeit zur Bereitstellung optimierter Steuerungsprogramme sowie zum anderen der Bedarf einer Ausregelung von Genauigkeitsabweichungen zur Bewegungslaufzeit.

Einen wesentlichen Aspekt der Forschungsarbeiten bildet die Bereitstellung einer Bahnplanungsmethode zur Optimierung dreidimensionaler Robotertrajektorien unter Berücksichtigung prozess- und roboterspezifischer Randbedingungen. Damit verbunden ist eine Entwicklung von Sonderfallbehandlungsstrategien für kritische Prozessbereiche mit übergeordneter Einflussnahme auf die Prozessausrüstung. Die erforschten Algorithmen zur Optimierung der Trajektorie und des Robotersteuerungsprogramms gewährleisteten hierbei eine signifikante Reduzierung der Achsbeschleunigungen und des Achsrucks, welche in Bereichen abrupter Bewegungsrichtungsänderungen und Umorientierung des Roboterhandwurzel-Koordinatensystems auftreten und die Genauigkeit der Bewegungsausführung herabsetzen. Zusätzlich zu einer Genauigkeitssteigerung kann die Reduzierung der dynamischen Roboterachs-Bewegungsparameter einen Beitrag dazu leisten, den Verschleiß der Kinematik zu verringern sowie im Weiteren den Energiebedarf zu vermindern. Wie simulative Analysen zeigen, ermöglicht die Miteinbeziehung prozessspezifischer Randbedingungen bei der Bahnoptimierung einen nur geringen bzw. vernachlässigbaren Einfluss auf das Prozessergebnis.

Nicht nur ein optimiertes Steuerungsprogramm stellt einen zentralen Eckpfeiler zur Erhöhung der Bahngenauigkeit dar, sondern zusätzlich eine geeignete Regelung zum Ausgleich von Soll-Ist-Abweichungen während der Bewegung. Unter Nutzung der entwickelten Systemarchitektur wird dahingehend die Grundlage für die flexible, übergeordnete Regelung unterschiedlicher, proprietärer Roboter geschaffen, wobei sich das System zudem durch eine universelle Einsetzbarkeit hinsichtlich Applikation auszeichnet. Die erforschten Algorithmen zur vektorbasierten Bahnsteuerung und Roboterregelung ermöglichen hierbei einen effizienten Ausgleich von Regelabweichungen. Die anschaulichen Parameter zur Einstellung des Reglers erlauben eine einfache, aufgabenabhängige Gewichtung des Erfüllungsgrads der zentralen Regleranforderungen Stabilität, Genauigkeit, Dämpfung und Schnelligkeit und sind empirisch an neue Robotertypen und Gegebenheiten adaptierbar. Roboterspezifische Funktionalitäten bleiben bei der Herangehensweise unangetastet und müssen nicht aufwändig nachgebildet werden, sondern werden vielmehr mitgenutzt.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Ermittlung von Regelabweichungen in Regelkreisen stellt die Regelgrößenbestimmung dar. Aufgrund des hohen Informationsgehalts von Kamerabilddaten eignen sich Kamerasysteme zur Erfassung des Ist-Zustands als Regelgröße bei verschiedensten Applikationen. Demgegenüber steht jedoch der relativ hohe Zeitaufwand zur Extraktion der relevanten Informationen aus den Bilddaten. Die erforschte Methode zur vektoriiellen Bewegungserfassung liefert in diesem Kontext einen Beitrag zur zeiteffizienten Erfassung translatorischer Bewegungen. Dabei ist ein weiteres experimentell nachgewiesenes Merkmal der Methode deren ausgesprochen hohe Genauigkeit bei der Bewegungserfassung. Besonders diese Kombination aus flexibler Nutzbarkeit, hoher Zeiteffizienz und zugleich hoher Genauigkeit stellt hierbei eine wesentliche Einschränkung bekannter Ansätze aus Stand der Technik und Forschung dar.

Die erforschten Methoden und Algorithmen zur vorgelagerten Bahnoptimierung sowie Roboterregelung während der Bewegung, gehen in die Softwaretools „PathTransformer“ (Bahnoptimierung) und „UniversalRobotControl“ (Roboterregelung) ein. Lauffähig auf konventionellen Desktop-PC-Architekturen mit Windows-Betriebssystemen, erlauben beide Softwaretools durch deren graphische Benutzeroberflächen eine intuitive Bedienbarkeit und einfache Parametrierbarkeit. Der jeweils modular ausgeführte Aufbau gewährleistet eine einfache Erweiterbarkeit sowohl im Hinblick auf die Implementierung weiterer Robotertypen als auch zusätzlicher Applikationen.

Ausblickend bieten beide Softwaretools das Potential zur professionellen Aufbereitung, für punktuelle Optimierungen und schlussendlich einer Verfügbarmachung für den Markt. Eine sukzessive Erweiterung des Funktionsumfangs bildet hierbei die Grundlage für eine nachhaltige und zukunftsfähige Einsetzbarkeit. Bezogen auf das Thema der Genauigkeitssteigerung ist eine mögliche Funktionserweiterung z. B. die Erfassung auch der rotatorischen Ist-Bewegung als Regelgröße. Weiterführende Gespräche mit Fachleuten zeigen, dass dieser Komplex derzeit noch vernachlässigt wird. Aus eigenen Untersuchungen mit hochgenauen, gyroskopischen Sensoren basierend auf MEMS-Technologie (Micro-electromechanical-system) geht hervor, dass diese aufgrund ihres ausgeprägten Driftverhaltens nur für Zeiträume im Bereich weniger Sekunden das Potential zum Ausgleich rotatorischer Regelabweichungen bieten. [178], [179] Optische gyroskopische Sensoren zeigen zwar eine höhere Stabilität und Genauigkeit, aufgrund ihrer Anschaffungskosten von mehreren tausend Euro ist deren Nutzung in diesem Bereich jedoch kaum wirtschaftlich darstellbar. Alternativ ist ebenfalls eine Erfassung der rotatorischen Bewegung anhand der Daten eines Stereokamerasystems denkbar. Bei dieser Herangehensweise steigt jedoch mit konventionellen Kamerasystemen der Zeitaufwand zur Datenverarbeitung deutlich an. [149] Eine Erfassung auch der rotatorischen Freiheitsgrade zur Bewegungslaufzeit bildet jedoch die Grundlage für eine 6D-Pose-

Regelung zur Bewegungslaufzeit. Eine entsprechende Regelung ist auch die Basis für eine Verknüpfung der in Kapitel 5 erläuterten Bahnoptimierungsmethode mit dem in Kapitel 6 erörterten Regelungssystem. Da definierte Rotationen einen zentralen Eckpfeiler der Bahnoptimierung darstellen, welche derzeit aus genannten Gründen nicht mit ausreichender Genauigkeit oder Zeiteffizienz erfassbar sind, ist eine vollumfängliche Nutzung der optimierten Trajektorien bei einer Regelung der Roboterbewegung aktuell noch nicht möglich. Abhilfe schaffen kann hierbei ein integriertes Stereokamerasystem mit direkter FPGA-Anbindung und Implementierung der Datenverarbeitungsalgorithmen auf dem FPGA-Chip. Gespräche mit Forschern und Fachleuten aus diesem Bereich zeigen, dass ein integriertes Stereokamerasystem das Potential für eine hocheffiziente und hochgenaue 6D-Pose Erfassung bietet und zudem zu angemessenen Kosten herstellbar ist. Entsprechende Systeme stehen derzeit nicht zur Verfügung, können aber Gegenstand zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sein.

9 Summary

As handling devices offering high flexibility of movement in combination with low investment costs, jointed-arm robots can be used for a broad variety of different tasks. Not among these tasks are applications, which require high path accuracy even when the robot moves on the trajectory the first time. This is due to the relatively low absolute accuracy of jointed-arm robots. Improving the absolute accuracy is especially complex, since it depends on several robot-inherent characteristics in combination with multiple external influencing factors. This issue has been addressed by robot manufacturers, system integrators and scientific institutes since several decades.

The most commonly used methods for absolute accuracy improvement belong to the calibration, which focuses on an accurate representation of the manipulator arm within the robot control. While a significant accuracy improvement can be achieved via this approach, calibration methods are as a matter of principle limited to the addressed, specific robot type and have to be repeated for every robot individually. Alternative approaches for accuracy improvements utilize closed-loop control systems to compensate deviations during the movement of robots. One special advantage of this approach is the possibility to eliminate deviations independent from their origin. The known systems thereby often show deficiencies regarding reachable accuracy, time efficiency or universality. Furthermore, the known state of the art barely involves the generation of optimized robot trajectories, which constitutes a prerequisite for accurate robot movements.

Addressing these matters, this dissertation contributes to the field of highly accurate, adaptive control and closed-loop control of robot-guided processes. The findings of fundamental analyses of jointed-arm robots' accuracy behavior, the provision of a method for an automated optimization and smoothening of complex three dimensional robot trajectories, the introduction of a robot independent universal closed-loop control system as well as the presentation of a highly accurate and time efficient method for feedback variable determination are thereby the main focus of the conducted research work.

Despite the high relevance of the absolute accuracy, only little concise work and studies are available, from which the accuracy behavior of industrial robots can be derived. In this regard, detailed analyses of the accuracy behavior of several small-scale jointed-arm robots have been performed. The results show a strong dependency of the absolute accuracy from the movement task and prove at the same time the high complexity of this subject. Due to the combination and interdependency of multiple influence factors, an immense parameter space is generated, which impedes the definition of a simple specific value for the absolute accuracy according to the relevant industrial standards. This fact, in combination with

the determined absolute accuracy values which exceed the repeatability values given by the robot manufactures by several orders of magnitude, underlines the necessity of providing flexible methods for improving the robot accuracy. Based on the analyses results, two main needs for action have been derived: Firstly the necessity of providing optimized robot control programs and secondly the need for compensating accuracy deviations during the robots' movement.

One main aspect of the research work forms the provision of a path planning method, which is suitable to smoothen robot trajectories and considers process- and robot-specific boundary conditions at the same time. Linked with this subject is the development of strategies for handling special situations in critical process areas with a superior influence and control of the process equipment. In this context, the researched algorithms for automatic optimization of the trajectory and the robot control program have been developed, which ensure a significant reduction of axis accelerations and axis jerks, which occur in path segments of instantaneous reorientation and during directional movement change of the robot-TCP. As the preliminary accuracy investigations show, especially these segments are critical and reduce the movement accuracy if not handled properly. In addition to the accuracy improvement, the reduction of the dynamic robot-axis movement-parameters can contribute to a minimization of the kinematics wear and furthermore a reduction of its energy demand can be anticipated. As shown in simulative analyses, taking process specific boundary conditions into account allows a path optimization with only little or even negligible influence on the process result.

However, not only an optimized robot control program constitutes a main cornerstone for the improvement of the path accuracy, but also a suitable closed-loop control system to compensate movement inaccuracies during the robots' operation. By utilizing the system architecture developed during the research work, the foundation for a flexible, superordinate closed-loop control of different, proprietary robot types has been established, whereby the system can also be universally used for other applications. The researched algorithms for a vector based path control in combination with the vector based closed-loop control thereby ensure an efficient compensation of control deviations. The intuitively understandable parameters for an adjustment of the closed-loop control algorithms allow a comfortable task dependent weighting of the fulfillment degree, regarding the general closed-loop control requirements stability, accuracy, dampening and quickness. Thereby the parameters can be adapted empirically to new robot types and task situations. Robot specific basic functionalities remain untouched via this approach and are not required to be reproduced in a time-consuming way, but are rather exploited.

One main challenge during the control deviation determination in close-loop control systems forms the feedback variable acquisition. Due to the high information content of image data, camera systems are especially suitable for determining the feedback

variables in multiple applications. On the other hand, extracting the relevant information from the image data can be very time-consuming. In this context, the researched method for a vector-based movement determination contributes to a time-efficient determination of translational movements. Another experimentally validated feature of the method is its capability of a highly accurate geometrical movement tracking. Especially this combination of flexible usability, time-efficiency and high accuracy at the same time, represent a main limitation of the conventional methods known from the state of the art.

The researched methods and algorithms for the preliminary path optimization on the one hand and the closed-loop control system on the other hand have been implemented in the software tools “PathTransformer” (path optimization) and “UniversalRobotControl” (closed-loop control). Executable on conventional desktop-PC architectures with windows based operating systems, both software tools allow an comfortable usability and adaption of the algorithm parameters via graphical user interfaces. The modular software design ensures a simple extensibility regarding the implementation of additional robot types or application specific software modules.

As an outlook, both software tools bear the potential for a commercialization after an in-field testing. A successive extension of their functionalities is thereby the foundation of a sustainable usability. One possible extension related to the subject of accuracy improvement is e. g. capturing additionally the actual rotational movement as feedback variable. Discussions with industry experts have shown, that this topic is currently more or less neglected. Own investigations with highly accurate gyroscopic sensors based on MEMS (Micro-electromechanical-systems) technology reveal, that these sensors are only capable of compensating rotational movement deviations for a few seconds, due to their characteristic drifting behavior [172], [173]. Optical gyroscopic sensors exhibit a better stability and accuracy, but their usage seems to be economically not reasonable, because of their high investment costs of several thousand euros. As an alternative, it might be possible to capture the rotational movement with a stereoscopic camera system. However, applied for conventional camera systems, this approach greatly increases the time-consume for data processing [146]. One possibility to overcome this problem is the usage of an integrated stereoscopic camera system with direct FPGA-connection and implementation of the data processing algorithms on the FPGA-chip. Such systems are currently not available on the market, but can be subject of future research and development projects.

10 Abkürzungs- und Variablenverzeichnis

0_c	Soll-Position (Punktbezogen)
α	Kontextbezogener Winkel
A	Scheitelpunkt
ANN	Artificial Neural Network
AP_p	Absolutgenauigkeit (Punktbezogen)
AT_p	Absolutgenauigkeit (Bahnbezogen)
AP_a, AP_b, AP_c	Orientierungsgenauigkeiten
AV	Geschwindigkeitsgenauigkeit
β	Kontextbezogener Winkel
CAD	Computer Aided Design
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CNC	Computer Numerical Control
CP	Continuous-Path (-Bewegung)
CPU	Central Processing Unit
d_i	Interpolationspunktabstand (allgemein)
d_{ii+1}	Spezifischer Interpolationspunktabstand zwischen den Interpolationspunkten i und $i+1$
d_{Merkmal}	Größe des verfolgten Merkmals
d_p	Vor-/Nachdrehdistanz Prozessbahnbezogen
d_R	Vor-/Nachdrehdistanz Roboterbahnbezogen
d_{Vorlauf}	Abstand der vorlaufenden Stützstelle
D	Vorlaufende dynamische Stützstelle

D'	Verschobene vorlaufende Stützstelle
D_{max}	Entfernung zwischen der Mitte der Schnittstelle Nebenachse-Werkzeug und der Mitte des ersten Gelenks des Industrieroboters (ausgehend vom Sockel)
DPM	Dynamic Path Modification
δ	Doppelte Orthogonalitätstoleranz
$\Delta\alpha$	Winkelschritt
Δe_{end}	Abweichung der Bewegungserfassung am Bahnende
Δe_{init}	Abweichung der Bewegungserfassung am Bahnbeginn
Δl	Verfahrvektor Bewegungsanteil längs der Bahnrichtung
Δ_{max}	Maximalwert (Allgemein)
Δq	Verfahrvektor Bewegungsanteil quer der Bahnrichtung
$\Delta_{Analyze}$	Zeitunterschied FPGA vs. CPU bei der Positionsberechnung
$\Delta_{Calculate}$	Zeitunterschied FPGA vs. CPU bei der Bewegungsermittlung
Δ_{Change}	Zeitunterschied FPGA vs. CPU bei der Folgereferenzierung
Δ_{Max}	Zeitunterschied FPGA vs. CPU des Gesamt-Zeitbedarfs bei der Folgereferenzierung
Δ_{Move}	Zeitunterschied FPGA vs. CPU des Gesamt-Zeitbedarfs bei der Bewegungserfassung
Δ_{Send}	Zeitunterschied FPGA vs. CPU beim Übertragen der Bewegungsdaten
$\Delta\varphi$	Abbildungswinkel
$\Delta_{xy_{max}}$	Maximale Soll-/Ist-Abweichung in der x-y-Ebene
$\Delta_{z_{max}}$	Maximale Soll-/Ist-Abweichung in z-Richtung

Δ_{zmax_K1}	Maximale Soll-/Ist-Abweichung in z-Richtung bei Konfiguration 1 (Weitere Konfigurationen analog)
Δ_{zmax_250}	Maximale Soll-/Ist-Abweichung in z-Richtung bei $v_{Soll} = 250$ mm/s (Weitere Geschwindigkeiten analog)
\vec{e}_{xy}	Einheitsvektor zum Verbindungsvektor von x nach y
$e(t)$	Regelabweichung zum Zeitpunkt t
$e_{längs}(t)$	Regelabweichung längs der Bahnrichtung zum Zeitpunkt t
$e_{quer}(t)$	Regelabweichung quer zur Bahnrichtung zum Zeitpunkt t
ε	Querbewegungsfaktor
EGM	Externally Guided Motion
E/A	Eingang/Ausgang
f	Frequenz
$f_{Fixture}$	Vorrichtungskordinatensystem
f_{Robot}	Roboterbasiskordinatensystem
f_{TCP}	Roboterhandwurzel-Kordinatensystem
f_{Tool}	Werkzeugkordinatensystem
$f_{Workpiece}$	Werkstückkordinatensystem
f_{World}	Weltkordinatensystem
fps	Frames-per-second
FPGA	Field Programmable Gate Array
FV	Geschwindigkeitsschwankung
g	Tangentiale Übergangstrecke Prozessbahn/Ausgleichschleife
G	Mittelwert der Ist-Positionen (Punktbezogen)
GPS	Global Positioning System

GPC	General-Predictive-Control
GUI	Graphical User Interface
i	Kontextbezogener Zähler
IFR	International Federation of Robotics
ISO	International Organisation of Standardization
j	Kontextbezogener Zähler
$K_{PBP} = {}^{f_{\text{Workpiece}}}K_{PBP}$	Kontext Bahnoptimierung: Prozessbahnpunktkoordinatensystem auf der Werkstückoberfläche mit Bezug zum Werkstückkoordinatensystem
$K_{RBP'} = {}^{Tool}K_{RBP'}$	Kontext Bahnoptimierung: Roboterbahnpunktkoordinatensystem rotiert mit Bezug zum Werkzeugkoordinatensystem
$K_{TCP} = {}^{f_{\text{Robot}}}K_{TCP}$	Kontext Bahnoptimierung: Roboterhandwurzel-Koordinatensystem mit Bezug zum Roboterbasiskoordinatensystem
$K_{Tool} = {}^{f_{\text{Robot}}}K_{Tool}$	Kontext Bahnoptimierung: Stationäres Werkzeugkoordinatensystem mit festem Bezug zum Roboterbasiskoordinatensystem
I	Strom
l_j	Hilfswert Längenkompensation (Punktbezogen)
l_{ij}	Hilfswert Längenkompensation (Bahnbezogen)
$l_x = l_y = l_z$	Kantenlänge Testkubus
LED	Light Emitting Diode
m	Kontextbezogener Zähler
M	Mittelpunkt Kreissegment
MABP	„Move-Away“ Bahnpunkt
MEMS	Micro-electromechanical-system
MPixel	Megapixel

n	Kontextbezogener Zähler
\vec{n}_0	Einheitsnormalenvektor der Kurvenbahn
NDT	Non Destructive Testing
OLP	Offline-Programmierung
PBP _n	Prozessbahnpunkt n; Bearbeitungsbahnpunkt n
PSD	Positionsempfindliche Diode
PTP	Punkt-zu-Punkt (-Bewegung)
Φ	Maximaler Grenzwinkel
r	Radius
R	Rotatorisch (Achse)
r(t)	Regelgröße zum Zeitpunkt t
RBP _i	Roboterbahnpunkt i
RBP' _i	Verschobener Roboterbahnpunkt i
ROI	Region-of-Interest
RP _a , RP _b , RP _c	Orientierungswiederholgenauigkeiten
RP _j	Wiederholgenauigkeit (Punktbezogen)
RSI	Remote Sensor Interface
RT _p	Wiederholgenauigkeit (Bahnbezogen)
RV	Geschwindigkeitswiederholgenauigkeit
R _x	Rotation um x-Achse
R _y	Rotation um y-Achse
R _z	Rotation um z-Achse
σ_x	Standardabweichung (Allgemein)

σ_{zi}	Standardabweichung der Soll-/Ist-Abweichungen in z-Richtung von Bahn i
$\sigma_{z_{250}}$	Standardabweichung der Soll-/Ist-Abweichungen in z-Richtung bei $v_{Soll} = 250$ mm/s (Weitere Geschwindigkeiten analog)
S_i	Interpolationspunkt
S_j	Häufigkeitsverteilung der Einzelwerte an einem Messort
S_{ij}	Häufigkeitsverteilung der Einzelwerte an einem Messort (bahnbezogen)
S_v	Häufigkeitsverteilung der Einzelwerte an einem Messort (geschwindigkeitsbezogen)
S/W	Schwarz/weiß
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
$t_{Acquire}$	Zeitbedarf zum Bildeinzug
$t_{Analyze}$	Zeitbedarf zur Positionsberechnung
$t_{Calculate}$	Zeitbedarf zur Bewegungsermittlung
t_{Change}	Zeitbedarf für die Folgereferenzierung
$t_{Rectify}$	Zeitbedarf zur Bildrektifizierung
t_i	Interpolationstakt
t_{Max}	Maximaler Gesamt-Zeitbedarf bei der Folgereferenzierung
t_{Move}	Gesamt-Zeitbedarf bei der Bewegungserfassung
t_{Send}	Zeitbedarf zur Übermittlung der Bewegungsinformationen
${}^{Tool}\vec{a}_{RBP'}$	Vektor von K_{Tool} zu rotierten Robotertrajektorien-Bahnpunkt $K_{RBP'}$
${}^{TCP}\vec{a}_{PBP}$	Vektor von K_{TCP} zu Prozessbahnpunkt K_{PBP}
TCP	Tool-Center-Point

TOF	Time-of-Flight
$\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$	Lage, Drehzahl, Beschleunigung (Kaskadenregelung)
T	Translatorisch (Achse)
UDP	User Datagram Protocol
U	Spannung
\bar{v}	Mittlere erreichte Geschwindigkeit nach n Durchläufen
$\overrightarrow{v_{xy}}$	Verbindungsvektor von x nach y
v_{Soll}	Soll-Geschwindigkeit
v_{ii+1}	Spezifische Geschwindigkeit zwischen den Interpolationspunkten i und i+1
v_{ij}	Eingenommene Geschwindigkeit bei der i-ten Messung für die j-te Wiederholung
v_c	Kommandierte Geschwindigkeit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verein Deutscher Maschinenbauer
$w(t)$	Führungsgröße zum Zeitpunkt t
W_{Start}	Schwellwertfaktor der Winkeländerung
W_{max}	Obergrenzenfaktor des Abbildungsbereichs
\bar{x}_{Arithm}	Arithmetisches Mittel (Allgemein)
x_c, y_c, z_c	Koordinaten der vorgegebenen Soll-Position 0_c
x_j, y_j, z_j	Koordinaten der Ist-Position bei Durchlauf j

\bar{x}_{xyi}	Arithmetischer Mittelwert der Soll-/Ist-Abweichungen in der x-y-Ebene von Bahn i
\bar{x}_{zi}	Arithmetischer Mittelwert der Soll-/Ist-Abweichungen in z-Richtung von Bahn i
$\bar{x}_{z,250}$	Arithmetischer Mittelwert der Soll-/Ist-Abweichungen in z-Richtung bei $v_{Soll} = 250$ mm/s (Weitere Geschwindigkeiten analog)

11 Literaturverzeichnis

- [1] IFR Statistical Department, IFR Statistical Department (Hrsg.): *Executive Summary Industrial Robots*.
http://www.worldrobotics.org/uploads/media/Executive_Summary__WR_2015.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2014 – Überprüfungsdatum 2016-07-14
- [2] N.N.; BRODTMANN, T. (Mitarb.); SCHWARZKOPF, P. (Mitarb.) : *Robotik + Automation Portrait der Branche 2013*. Frankfurt, 03.2013
- [3] ZAPKE, M.: *Industrieroboter in der spanenden Bearbeitung: Praxisbeispiel Kantenbearbeitung von Turbinenbauteilen*. Berlin, 21.03.2014
- [4] WIEST, U.: *Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Information. Dissertation:2001
- [5] BONGARDT, T.: *Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern*. München: H. Utz, 2004 (Forschungsberichte IWB Bd. 184)
- [6] BEYER, L.: *Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern: Insbesondere mit Parallelkinematik*. Aachen: Shaker, 2005 (Forschungsberichte aus dem Laboratorium Fertigungstechnik Bd. 1)
- [7] RÖSCH, O.: *Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern*. München: Utzverlag, 2014
- [8] KRAGIC, D.; CHRISTENSEN, H. I.: *Survey on Visual Servoing for Manipulation*. 2002
- [9] LANGE, F.: *Adaptiv vorausplanende Steuerung für schnelle sensorbasierte Roboterbewegungen*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Fakultät für Informatik. Dissertation:2003
- [10] DE GRAAF, M. W.: *Sensor-guided robotic laser welding*. Enschede, University of Twente. Dissertation:2007
- [11] REGAARD, B.; KAIERLE, S.; POPRAWA, R.: *Seam-tracking for high precision laser welding applications—Methods, restrictions and enhanced concepts*. In: *Journal of Laser Applications* 21 (2010), Nr. 4, S. 183–195
- [12] KOCH, H.: *Konturverfolgung mit Industrierobotern: Fusion von Bildverarbeitung, Kraft-und Beschleunigungssensorik*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz. Dissertation:2013
- [13] VDI 2860:2001, *Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*

- [14] BLANK, A.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Entwicklung und Umsetzung eines Regelkreises zur Genauigkeitssteigerung von Knickarmrobotern im Bereich der Herstellung miniaturisierter räumlicher Schaltungsträger*. Erlangen, 2014. – Diplomarbeit
- [15] TRZCIELIŃSKI, S.; KARWOWSKI, W.: *Advances in ergonomics in manufacturing*. Boca Raton, FL: CRC Press; Taylor & Francis, 2013 (Advances in human factors and ergonomics series)
- [16] LINNEMANN, H.: *Robotertechnik*. Berlin, Beuth Hochschule, Fachbereich Technische Informatik. Vorlesungsskriptum:2013
- [17] VDI 2861:09.2001, *Kenngößen für Industrieroboter; Einsatzspezifische Kenngößen*
- [18] SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M.: *Robot modeling and control*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006
- [19] SICILIANO, B.: *Robotics: Modelling, planning and control*. London: Springer, 2009 (Advanced textbooks in control and signal processing)
- [20] HESSE, S.: *Industrieroboterpraxis: Automatisierte Handhabung in der Fertigung*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1998
- [21] WÜST, K.: *Grundlagen der Robotik*. Giessen, Technische Hochschule Mittelhessen, Informatik. Vorlesungsskriptum:2012
- [22] ISHIKAWA, K.: *Introduction to quality control*. Tokyo: 3A Corp, 1990
- [23] SCHRÖER, K.: *Handbook on robot performance testing and calibration: Improvement of robot industrial standardisation ; IRIS*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 1998
- [24] BAUER, L.: *Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen*. Berlin, New York: Springer, 1999 (Forschungsberichte IWB Bd. 119)
- [25] N.N.: *PaintTool (Software)*: Fanuc, 2015
- [26] N.N.: *PaintWare (Software)*: ABB, 2015
- [27] ISO 9283 - 2:01.04.1998, *Manipulation industrial robots - Performance criteria and related test methods*
- [28] WEBER, W.: *Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung : mit ... 33 Übungsaufgaben sowie einer begleitenden Internetseite*. 2., neu bearb. Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2009
- [29] BERG, J. O.: *Robot accuracy: a matter of programming*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 7 (1992), Nr. 4, S. 193–197

- [30] DIN 8580:09.2003, *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*
- [31] WULFSBERG, J. P.; LOITZ, H.; DERFLING, D.: *Kraftgeregeltes Rollfalzen - System und Sensoreinsatzstrategien*. In: *ZWF* 100 (2005), Nr. 03, S. 130–135
- [32] N.N.: *Plug-and-produce COmponents and METHods for adaptive control of industrial robots enabling cost effective, high precision manufacturing in factories of the future: Results*. <http://www.cometproject.eu/results.asp> – Überprüfungsdatum 2016-04-26
- [33] CHEN, Y.; DONG, F.: *Robot machining: recent development and future research issues*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 66 (2013), Nr. 9, S. 1489–1497. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4433-4>
- [34] PANDREMENOS, J.; DOUKAS, C.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSOLOURIS, G.: *Machining with robots: a critical review*. In: *7th International Conference on Digital Enterprise Technology: DET 2011, 2011*
- [35] ABELE, E.; BAUER, J.; FRIEDMANN, M.; PISCHAN, M., et al.: *Einsatz von Robotern in der spanenden Fertigung*. In: *Wissenschaftsmagazin forschen 1* (2011), S. 44–49
- [36] GREITMANN, G.; BUSER, R. A. (Mitarb.); ROOIJ, N. F. d. (Mitarb.): *Micromechanical tactile gripper system for micro assembly*. 1998
- [37] RATHMANN, S.; ELLWOOD, J.; HEMKEN, G.; KECK, C., et al.: *Präzisionsmontage schmelzklebstoffbeschichteter Bauteile mit Hilfe eines 3D-Bildsensors*. In: VOLLERTSEN, F. (Hrsg.): *4. Kolloquium Mikroproduktion: Beiträge der vier SFB der Mikrotechnik, Bremen, 28. - 29. Oktober 2009*. Bremen: BIAS, 2009, S. 151–156
- [38] ELLWOOD, J.; BURISCH, A.; SCHÖTTLER, K.; POKAR, G., et al.: *Size-Adapted Manipulation Robots for Microassembly*. In: BÜTTGENBACH, S.; BURISCH, A.; HESSELBACH, J. (Hrsg.): *Design and Manufacturing of Active Microsystems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011 (Microtechnology and MEMS), S. 269–286
- [39] LOTTER, B.: *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. 2., Aufl. Berlin: Springer Berlin, 2012 (VDI-Buch)
- [40] BECKER, W.; BECK, M.; BERNHARDT, R.: *Potentials of Robot-Guided Remote Laser Welding*. In: GEIGER, M. (Hrsg.): *Laser assisted net shape engineering 4: Proceedings of the 4th LANE 2004*. [Elektronische Ressource]. Bamberg: Meisenbach, 2004, S. 201–204

- [41] ZAEH, M. F.; HATWIG, J.; MUSIOL, J.; ROESCH, O.; REINHART, G.: Analysis of the Accuracy of Industrial Robots and Laser Scanners for Remote Laser Beam-Welding and Cutting. In: *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK): Date, 7-9 June 2010*. [Berlin]: [VDE Verlag], 2010, S. 751–758
- [42] FRANKE, J.; GOTH, C.: *Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID: Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger*. München: Hanser, 2013
- [43] HEDGES, M.: *Printed 3D MIDs via Aerosol Jet: Current Status & Future Applications (MID-Kongress)*. Nürnberg, 24.09.2014
- [44] N.N.: *Dreidimensionale Schaltungen LPKF-LDS: Laser-Direktstrukturierung für 3D-Schaltungsträger*. Garbsen, 2015
- [45] AUDINO, C.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.): *Lasertrackerbasierte Genauigkeitsuntersuchungen serieller Industrieroboterkinematiken*. Erlangen, 2014. – Bachelorarbeit
- [46] WEIß, A.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.): *Quantitative Analyse der Verfahrengenauigkeit von Industrierobotern*. Erlangen, 2015. – Bachelorarbeit
- [47] WILL, C.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.): *Lasertrackerbasierte Genauigkeitsuntersuchungen serieller Industrieroboterkinematiken*. Erlangen, 2015. – Projektarbeit
- [48] RECK, B.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.): *Entwicklung eines Kalibrier- und Regelungsmoduls zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern*. Erlangen, 2015. – Masterarbeit
- [49] Stefan Krusemark; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.): *Entwicklung eines Feininterpolationsalgorithmus für industrielle Roboterarme zur Ausregelung von Prozessabweichungen*. Erlangen, 2016. – Projektarbeit
- [50] N.N., Denso Europe B.B. (Hrsg.): *Ein durchgängiges Portfolio an 4- und 6-achsigen Robotern*. https://www.denso-wave.com/de/robot/download/brochure/index_.html.img/usr_page_files_de_robot_pdf_download_brochure_brochure.pdf – Überprüfungsdatum 2015-11-18
- [51] N.N., Fanuc Ltd. (Hrsg.): *Fanuc Roboter-Produktübersicht: Broschüre*. <https://de.industryarena.com/fanuc/dokumente/fanuc-roboter-produktuebersicht--1487.html> – Überprüfungsdatum 2015-11-18

- [52] N.N., KUKA Roboter GmbH (Hrsg.): *Catalog of Ideas 2010 – Kuka Produktkatalog 2010*. http://www.kuka-robotics.com/res/sps/a737ee03-5832-4c95-9d91-84e0de80c664_Ideenkatalog_en.pdf – Überprüfungsdatum 2014-08-17
- [53] N.N., Staubli Tec-Systems GmbH Robotics (Hrsg.): *Stäubli Robotics - Product Range 2014*. <http://www.staubli.com/en/robotics/6-axis-scara-industrial-robot/all-6-axis-scara-robot/> – Überprüfungsdatum 2015-11-18
- [54] N.N., ABB Robotics (Hrsg.): *ABB Product Range 2010: Datenblatt*. [http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/8b0e1a2fb2a17dabc1257b2f0054c6d5/\\$file/PR10290EN_R12_Mobile.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/8b0e1a2fb2a17dabc1257b2f0054c6d5/$file/PR10290EN_R12_Mobile.pdf) – Überprüfungsdatum 2015-11-18
- [55] N.N., Yaskawa Motoman (Hrsg.): *Robot Overview - Roboterübersicht - 100/DX200*. http://www.motoman.eu/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/pdf/products/eu/Flyer_RobotOverview_FS100_DX200_D_E_06.2015.pdf&t=1447948626&hash=7ccd3fa481be5d8each9f633e2efb928b93faa63 – Überprüfungsdatum 2015-11-18
- [56] Jörg Wollnack; Jörg Wollnack (Mitarb.): *AWA-Dienstleistungen: F&E-Historie in der Robotik*. Hamburg, 28.01.2003
- [57] YE, S. H.; WANG, Y.; REN, Y. J.; LI, D. K.: *Robot Calibration Using Iteration and Differential Kinematics*. In: *Journal of Physics: Conference Series* 48 (2006), S. 1–6
- [58] NUBIOLA, A.; SLAMANI, M.; JOUBAIR, A.; BONEV, I.: *Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker*. In: *Robotica* 32 (2014), Nr. 03, S. 447–466
- [59] LIGHTCAP, C.; HAMNER, S.; SCHMITZ, T.; BANKS, S.: *Improved Positioning Accuracy of the PA10-6CE Robot with Geometric and Flexibility Calibration*. In: *IEEE Transactions on Robotics* 24 (2008), Nr. 2, S. 452–456
- [60] AOYAGI, S.; KOHAMA, A.; NAKATA, Y.; HAYANO, Y.: *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: IEEE (Hrsg.): *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: IROS 2010*, 2010, S. 5660–5665
- [61] GINANI, L. S.; Motta, José Maurício S. T.: *Theoretical and practical aspects of robot calibration with experimental verification*. In: *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 33 (2011), Nr. 1, S. 15–21

- [62] JOHNEN, B.; SCHEELE, C.; KUHLENKOTTER, B.: Learning robot behavior with artificial neural networks and a coordinate measuring machine. In: *2011 5th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA 2011)*, 2011, S. 208–213
- [63] BERG, J. O.: *Path and orientation accuracy of industrial robots*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 8 (1993), Nr. 1, S. 29–33
- [64] YOUNG, K.; PICKIN, C. G.: *Accuracy assessment of the modern industrial robot*. In: *Industrial Robot: An International Journal* 27 (2000), Nr. 6, S. 427–436
- [65] WU, K.; BRUENINGHAUS, J.; JOHNEN, B.; KUHLENKOETTER, B.: Applicability of stereo high speed camera systems for robot dynamics analysis. In: IEEE (Hrsg.): *2015 International Conference on Control, Automation and Robotics: ICCAR 2015*, 2015, S. 44–48
- [66] HOLDEN, R.: *Robot Accuracy: Considerations to make when using robots in high accuracy applications and programming robots off-line*. Nottingham EMA, UK, 15.09.2015
- [67] N.N., Stäubli Tec-Systems GmbH Robotics (Hrsg.): *Industrieroboter Baureihe TX40: Datenblatt*.
http://www.staubli.com/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&g=0&t=1447231285&hash=4ad5f3f47eb7afb4ab4c44afcea0d6249723879a&file=fileadmin/user_upload/staublicom/robotics/PDF-files/TX40_Robot_DE_092013.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2013 – Überprüfungsdatum 2015-11-10
- [68] N.N., Stäubli Tec-Systems GmbH Robotics (Hrsg.): *Industrieroboter Baureihe TX60: Datenblatt*.
http://www.staubli.com/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&g=0&t=1447231310&hash=a888ae7ed92626a6428c8c2ea627f5fdbfa2f2ba&file=fileadmin/user_upload/staublicom/robotics/PDF-files/TX60_Robot_DE_092013.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2013 – Überprüfungsdatum 2015-11-10
- [69] N.N., ABB Robotics (Hrsg.): *Robotics IRB 120 Industrieroboter: Datenblatt*.
https://library.e.abb.com/public/c59809929a48a374c1257de4002cfb8e/Datenblatt_IRB120_lowres.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2015 – Überprüfungsdatum 2015-11-10
- [70] ILLEMANN, J.; Jörg Illemann (Mitarb.): *Aufbau, Funktionsweise Lasertracker und Produktübersicht*. 2007
- [71] N.N., Automated Precision Inc. (Hrsg.): *Radian - Featuring INNOVO™ Technology: Datenblatt*. <http://apitechnical.com/Downloads/2012/Radian-Brochure.pdf>

- [72] DEPENTHAL, C.: *Entwicklung eines zeitreferenzierten 4-D-Kalibrier- und Prüfsystems für kinematische optische Messsysteme*. Karlsruhe, Universität Fridericina zu Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften. Dissertation:2009. <http://dgk.badw.de/fileadmin/docs/c-627.pdf> – Überprüfungsdatum 2015-11-12
- [73] BRAUNSDORF, C.; KIPPER, L.: *Photogrammetrie Seminarvortrag*. Bochum, 2008. http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb_v/labore/photogrammetrie/5._Semester_Vertiefer/API_T3.pdf – Überprüfungsdatum 2016-07-14
- [74] DIN EN ISO 14253-1:2013-12, *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen*
- [75] WECKENMANN, A.: *Einflüsse, die zu Messabweichungen bei Koordinatenmessungen führen können*. Erlangen, 01.11.2010
- [76] N.N., Automated Precision Inc. (Hrsg.): *BREAK-RESISTANT SMRs; Durable Spherically Mounted Retroreflectors: Datenblatt*. http://www.apisensor.com/images/ProductLiterature/SpecSheets/SMR_spec_EN0414_web.pdf – Überprüfungsdatum 2015-11-10
- [77] N.N., Hubbs Machine & Manufacturing (Hrsg.): *1.5 SMT*. <http://hubbsmachine.com/laser-tracker-15-sphere-mount-/86-15-smt.html> – Überprüfungsdatum 2015-11-12
- [78] JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*
- [79] 2011, *Band 5 Prüfprozesseignung, Eignung von Messsystemen, Mess- und Prüfprozessen, Erweiterte Messunsicherheit, Konformitätsbewertung*
- [80] PAN, Z.; POLDEN, J.; LARKIN, N.; VAN DUIN, S.; NORRISH, J.: *Recent progress on programming methods for industrial robots*. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 28 (2012), Nr. 2, S. 87–94
- [81] PIRES, N. J.; HEPING, C.; THOMAS, F.; XIONGZI, L.: *A review of CAD-based robot path planning for spray painting*. In: *Industrial Robot: An International Journal* 36 (2009), Nr. 1, S. 45–50
- [82] KAO, J.-h.: *Optimal Motion Planning For Deposition In Layered Manufacturing*. In: *Proceedings of DETC'98 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences*. Atlanta, GA, 1998, S. 13–16

- [83] DUNCAN, S.; JONES, P.; WELLSTEAD, P.: *A Frequency-Domain Approach to Determining the Path Separation for Spray Coating*. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 2 (2005), Nr. 3, S. 233–239
- [84] HEGELS, D.; MÜLLER, H.: Evolutionary path generation for reduction of thermal variations in thermal spray coating. In: BLUM, C.; ALBA, E. (Hrsg.): *Proceedings of the 15th annual conference on Genetic and evolutionary computation: GECCO 13*. New York, 2013, S. 1277–1284
- [85] MINEO, C.; PIERCE, S. G.; WRIGHT, B.; NICHOLSON, P. I.; COOPER, I.: Robotic path planning for non-destructive testing of complex shaped surfaces. In: *41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Volume 34*: AIP Publishing LLC, 2015 (AIP Conference Proceedings), S. 1977–1987
- [86] WALSTRA, W. H.; BRONSVOORT, W. F.; VERGEEEST, J. S.: *Interactive simulation of robot milling for rapid shape prototyping*. In: *Computers & Graphics* 18 (1994), Nr. 6, S. 861–871
- [87] CHAHE, B., Jabez Technologies (Hrsg.): *Case study: CAD/CAM based robot programming for milling & trimming by using robots*. <http://www.robotmaster.com/assets/data/pdf/success/armatecSurvivabilityOttoBockHealthcare.pdf> – Überprüfungsdatum 2015-03-27
- [88] N.N., carat robotic innovation GmbH (Hrsg.): *FAMOS robotic® - Beschreibung: Dokumentation*. <http://www.famos-robotic.de/index.php?id=product>
- [89] Delcam: *PowerMill*. <http://www.delcam.com/de/software/robotics/overview/index.asp> – Überprüfungsdatum 2015-10-06
- [90] Cenit AG: *Fastsurf: 3D Oberflächen-Prozesse*. http://www.cenit.com/fileadmin/dam/Digital_Factory/PDFs/FASTSURF_CH.pdf – Überprüfungsdatum 2015-03-23
- [91] ABB Robotics: *Software from ABB solves machining problems: The new RobotStudio Machining PowerPac optimizes automated machining*. <http://www.abb.de/cawp/seitp202/83623a316fec38fcc12574d50029dec0.aspx> – Überprüfungsdatum 2015-03-27
- [92] DENG, S.; LIANG, H.; CAI, Z.; LIAO, H.; MONTAVON, G.: *Kinematic Optimization of Robot Trajectories for Thermal Spray Coating Application*. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 23 (2014), Nr. 8, S. 1382–1389
- [93] ABELE, E.; BAUER, J.; ROTHENBÜCHER, J.; STELZER, M.; STRYK, O. von: Prediction of the Tool Displacement by Coupled Models of the Compliant Industrial Robot and the Milling Process. In: *Proceedings of the International Conference on Process Machine Interactions: PMI*, 2008, S. 223–230

- [94] LIN, C.; CHANG, P.; LUH, J.: *Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots*. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 28 (1983), Nr. 12, S. 1066–1074
- [95] GASPARETTO, A.; ZANOTTO, V.: *A technique for time-jerk optimal planning of robot trajectories*. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (2008), Nr. 3, S. 415–426
- [96] WANG, M.; LI, X.; XU, K.; JIANG, R.: *Smooth Trajectory Planing for Manipulator of Cotton Harvesting Machinery Based on Quaternion and B-Splie*. In: IEEE (Hrsg.): *2012 International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation*. Piscataway: IEEE, 2012, S. 134–137
- [97] OLABI, A.; BEAREE, R.; NYIRI, E.; GIBARU, O.: *Enhanced Trajectory Planning For Machining With Industrial Six-Axis Robots*. In: IEEE (Hrsg.): *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, S. 500–506
- [98] GRABOŚ, A.; BORYGA, M.: *Trajectory planning of end-effector with intermediate point*. In: *Maintenance and Reliability 2013* (2013), 15 (2), S. 182–187
- [99] CHEN, Y.; LING, L.; JI, X.: *Smooth and Accurate Trajectory Planning for Industrial Robots*. In: *Advances in Mechanical Engineering* 6 (2014), Nr. 0
- [100] DENG, S.; CAI, Z.; FANG, D.; LIAO, H.; MONTAVON, G.: *Application of robot offline programming in thermal spraying*. In: *Surface and Coatings Technology* 206 (2012), 19-20, S. 3875–3882
- [101] CAI, Z.; DENG, S.; LIAO, H.; ZENG, C.; MONTAVON, G.: *The Effect of Spray Distance and Scanning Step on the Coating Thickness Uniformity in Cold Spray Process*. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 23 (2014), Nr. 3, S. 354–362
- [102] FANG, D.; DENG, S.; LIAO, H.; CODDET, C.: *The Effect of Robot Kinematics on the Coating Thickness Uniformity*. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 19 (2010), Nr. 4, S. 796–804
- [103] ROOS, E.: *Anwendungsorientierte Meß- und Berechnungsverfahren zur Kalibrierung off-line programmierter Roboterapplikationen*. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl., 1998 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik 709)
- [104] DIEWALD, B.: *Über-alles-Kalibrierung von Industrierobotern zur lokalen Minimierung der Posefehler*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes. Dissertation:1995
- [105] DAUSTER, K.: *Prozeßangepaßte, lernende Roboterregelung für Montageprozesse*. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl., 2002 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik 925)

- [106] NUBIOLA, A.; BONEV, A. I.: *Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker*. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2013 (2013), Nr. 29, S. 236–245
- [107] SANDERSON, A.; WEISS, L.: *Image-based visual servo control using relational graph error signals*. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Cybernetics and Society*. Cambridge, 1980, S. 1074–1077
- [108] WEISS, L.; SANDERSON, A.; NEUMAN, C.: *Dynamic visual servo control of robots: An adaptive image-based approach, Bd. 2*. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation: ICRA 1985*, 1985, S. 662–668
- [109] CHAUMETTE, F.; HUTCHINSON, S.: *Visual servo control. II. Advanced approaches: Tutorial*. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 14 (2007), Nr. 1, S. 109–118
- [110] CHAUMETTE, F.; HUTCHINSON, S.: *Visual servo control. I. Basic approaches*. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 13 (2006), Nr. 4, S. 82–90
- [111] AARTS, R. G.; DE GRAAF, M. W.; JONKER, B.; MEIJER, J.: *Robot-sensor synchronization for real-time seamtracking in robotic laser welding*. In: *Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*. München, 2005, S. 419–424
- [112] NITIN, N.; ASOK, R.: *Intelligent Seam Tracking For Robotic Welding*. In: *Robotica* 11 (1993), Nr. 06, S. 585–586
- [113] KIM, J. S.; SON, Y. T.; CHO, H. S.; KOH, K. I.: *A robust method for vision-based seam tracking in robotic arc welding*. In: IEEE (Hrsg.): *Tenth International Symposium on Intelligent Control*, S. 363–368
- [114] KIM, P.; RHEE, S.; LEE, C. H.: *Automatic teaching of welding robot for free-formed seam using laser vision sensor*. In: *Optics and Lasers in Engineering* 31 (1999), Nr. 3, S. 173–182
- [115] PERTIN, F.; BONNET-DES-TUVES, J. M.: *Real time Robot Controller Abstraction Layer*. In: *Proceedings of the International Symposium on Robotics*, 2004
- [116] GANGLOFF, J. A.; DE MATHELIN, M. F.: *High-speed visual servoing of a 6-dof manipulator using multivariable predictive control*. In: *Advanced Robotics* 17 (2003), Nr. 10, S. 993–1021
- [117] GANGLOFF, J. A.; DE MATHELIN, M. F.: *Visual servoing of a 6-DOF manipulator for unknown 3-d profile following*. In: *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* 18 (2002), Nr. 4, S. 511–520
- [118] LANGE, F.; HIRZINGER, G.: *Kameragestützte räumliche Regelung von schnellen Roboterarmen*. In: *VDI-Berichte* 1800 (2003), S. 77–84

- [119] BAETEN, J.; SCHUTTER, J. d.: Combined vision/force control at corners in planar robotic contour following. In: IEEE (Hrsg.): *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings: AIM '01*, 2001, S. 810–815
- [120] ZHANG, H.; HEPING, C.; NING, X.; GEORGE, Z.: On-line path generation for robotic deburring of cast aluminum wheels. In: IEEE (Hrsg.): *International Conference on Intelligent Robots and Systems: IROS 2006*, 2006, S. 2400–2405
- [121] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung: Und Bildgewinnung*. 7., neu bearb. Aufl. Berlin u.a.: Springer Vieweg, 2012
- [122] CHIANG, M.-H.; LIN, H.-T.; HOU, C.-L.: *Development of a stereo vision measurement system for a 3D three-axial pneumatic parallel mechanism robot arm*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 11 (2011), Nr. 2, S. 2257–2281
- [123] FISCHER, N.; Prof. Dr. -Ing. Peter Krzystek (Mitarb.): *Bestimmung des Fehlerverhaltens einer stereobasierten visuellen Odometrie*. Oberpfaffenhofen, 2011. – Bachelorarbeit
- [124] AKHLOUFI, M. A.: *Real-time 3D visual servoing of an industrial cutting robot manipulator*. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET)* 60 (2009), Nr. 12, S. 393–397
- [125] ZIEGLER, C.; FRANKE, J.: Kamerabasiertes Messsystem zur Absolutgenauigkeitssteigerung von Medizinrobotern. In: *Internationales Forum Mechatronik 2010, Winterthur*.
- [126] ZIEGLER, C.: *Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Dissertation:2013
- [127] N.N., pmdtechnologies ag (Hrsg.): *pmd[vision]® CamCube 3.0: Datenblatt*. http://www.pmdtec.com/news_media/video/camcube.php – Überprüfungsdatum 2016-04-01
- [128] N.N., Bluetechnix (Hrsg.): *Argos®3D - P100 Time-of-Flight Smart Camera: Datenblatt*. http://www.mouser.com/ds/2/605/Argos3D_P100_ADAF_OV-257218.pdf – Überprüfungsdatum 2016-04-01
- [129] PRITSCHOW, G.; HORN, A.; GREFEN, K.: Dynamisches Verhalten und Grenzen sensorgeführter Industrieroboter mit vorausblickendem Sensor, Bd. 18. In: *Robotersysteme 1*, 1985, S. 155–161
- [130] HIRZINGER, G.: Reaktionsmöglichkeiten von Industrierobotern auf Sensorsignale — Anwenderbedürfnisse und Strukturen der Sensorrückkopplung. In:

- WARNECKE, H. J. (Hrsg.): *Montage · Handhabung · Industrieroboter*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985, S. 243–255
- [131] BUSCHHAUS, A.; FRANKE, J.: Planning and Control of Robot-Assisted Process Cells for Structuring and Metallization of 3D-MID. In: BIRKICHT, A.; FRANKE, J.; JOHN, W.; KUHN, T. (Hrsg.): *10th International Congress Molded Interconnect Devices*. Nürnberg, 2012 (MID-Kongress), S. 200–2005
- [132] BUSCHHAUS, A.; FRANKE, J.: Industrial Robots Accuracy Optimization in the Area of Structuring and Metallization of Three Dimensional Molded Interconnect Devices. In: NETO, P.; MOREIRA, A. P. (Hrsg.): *Robotics in Smart Manufacturing: FAIM 2013*. Heidelberg: Springer, 2013, S. 179–190
- [133] BUSCHHAUS, A.; FRANKE, J.: Usage of Industrial Robots as Flexible Handling Devices Supporting the Process of Three Dimensional Conductive Pattern Generation, Vol. 1038. In: Trans Tech Publications (Hrsg.): *11th International Congress Molded Interconnect Devices: Scientific Proceedings*, 2014 (Periodical of Advanced Materials Research, 1038), S. 89–94
- [134] BUSCHHAUS, A.; BLANK, A.; FRANKE, J.; ZIEGLER, C.: Highly Efficient Control System Enabling Robot Accuracy Improvement. In: Elsevier (Hrsg.): *Procedia CIRP: 5th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems. CATS 2014*, 2014 (Procedia CIRP), S. 200–205
- [135] BUSCHHAUS, A.; APEL, N.; FRANKE, J.: Method for Vectorial Robot Movement Determination Enabling Accuracy Improvements. In: IEEE (Hrsg.): *2015 IEEE International Conference on Control, Automation and Robotics: ICCAR 2015*, 2015, S. 24–31
- [136] BUSCHHAUS, A.; BLANK, A.; FRANKE, J.: Vector Based Closed-Loop Control Methodology for Industrial Robots. In: IEEE (Hrsg.): *17th IEEE International Conference on Advanced Robotics: ICAR 2015*, 2015, S. 452–458
- [137] BUSCHHAUS, A.; REITINGER, P.; FRANKE, J.: Automated Optimization of Complex Three-dimensional Robot Trajectories. In: IEEE (Hrsg.): *2nd IEEE International Conference on Control, Automation and Robotics: ICCAR 2016*, 2016
- [138] REITINGER, P.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.): *Entwicklung einer Methodik zur Glättung komplexer dreidimensionaler Roboterbewegungsbahnen*. Erlangen, 2014. – Projektarbeit
- [139] EBERLEIN, D.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.): *Umsetzung eines Softwaremoduls zur Aufbereitung komplexer 3D-Robotertrajektorien*. Erlangen, 2015. – Bachelorarbeit

- [140] SCHOTT, M.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Implementierung von Sonderfallbehandlungsstrategien in ein Softwaremodul zur Roboterprogrammoptimierung*. Erlangen, 2016. – Bachelorarbeit
- [141] PAUL, R. P.: *Robot manipulators: Mathematics, programming, and control : the computer control of robot manipulators*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1981 (The MIT Press series in artificial intelligence)
- [142] GOTH, C.: *Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Dissertation:2013
- [143] BLANK, A.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Systementwicklung zur dynamischen Roboteransteuerung in Echtzeit*. Erlangen, 2013. – Studienarbeit
- [144] KARLIDAG, E.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Optimierung und Evaluierung des Regelungsverhaltens eines Knickarmroboters in einer verteilten Anwendung*. Erlangen, 2016. – Bachelorarbeit
- [145] DURST, A.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Kompensation der Ungenauigkeiten von Industrierobotern bei der Strukturierung dreidimensionaler Schaltungsträger durch kameragestützte Bahnkorrektur*. Erlangen, 2012. – Bachelorarbeit
- [146] APEL, N.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Entwicklung eines hocheffizienten Bildverarbeitungssystems zur Prozessüberwachung der Leiterbahngenerierung auf 3D MID*. Erlangen, 2014. – Diplomarbeit
- [147] REITINGER, P.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Entwicklung eines hochgenauen Bildverarbeitungs- systems zur Erfassung und Korrektur der Roboter- trajektorie in Echtzeit*. Erlangen, 2015. – Masterarbeit
- [148] HÄUßERMANN, J.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Entwicklung und Umsetzung eines Beleuchtungssystems im Bereich der Hochgeschwindigkeitsbildverarbeitung*. Erlangen, 2015. – Masterarbeit
- [149] HÄUßERMANN, J.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Aufbau eines 3D-Stereokamerasystems zur hochgenauen dreidimensionalen Bauteillagererkennung*. Erlangen, 2014. – Projektarbeit
- [150] SEIDLING, R.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Entwicklung und Evaluierung eines hochgenauen Stereokamerasystems zur dreidimensionalen Lagebestimmung von Messobjekten*. Erlangen, 2014. – Projektarbeit

- [151] LANG, J.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Entwicklung eines hochgenauen und -effizienten Stereokamerasystems zur Roboterbewegungserfassung*. Erlangen, 2015. – Projektarbeit
- [152] SCHIRBL, M.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Optimierung eines Stereokamerasystems zum hochgenauen und -effizienten 3D-Tracking von Roboterbewegungen*. Erlangen, 2016. – Bachelorarbeit
- [153] FRANZ, M.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Bauteillagekorrektur dreidimensionaler Schaltungsträger mittels oberflächenscannerbasierter Istzustandserfassung*. Erlangen, 2014. – Bachelorarbeit
- [154] WINTER, S.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Kalibrierung eines Korrektursystems zur Absolutgenauigkeitssteigerung von Industrierobotern*. Erlangen, 2015. – Bachelorarbeit
- [155] GRÜNSTEUDEL, H.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Umsetzung eines Systems zur oberflächenscannerbasierten Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern*. Erlangen, 2016. – Projektarbeit
- [156] MILL, L.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Entwicklung und Umsetzung eines Demonstrators zur intuitiven gestenbasierten Robotersteuerung*. Erlangen, 2014. – Bachelorarbeit
- [157] GIERING, E.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Konstruktion und Umsetzung eines Versuchstandes zur robotergestützten Leiterbahngenerierung dreidimensionaler Schaltungsträger*. Erlangen, 2013. – Bachelorarbeit
- [158] KONRAD, T.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Planung und Umsetzung einer Roboterzelle zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern*. Erlangen, 2015. – Bachelorarbeit
- [159] HARRER, M.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Konfiguration einer Aerosol Jet Printing Anlage und Entwicklung eines Algorithmus zur Positionsermittlung von Referenzmerkmalen*. Erlangen, 2015. – Projektarbeit
- [160] AUDINO, C.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Konsolidierung und quantifizierte Analyse eines Bildverarbeitungsmoduls zur Roboterbewegungserfassung*. Erlangen, 2016. – Projektarbeit
- [161] Yik Chen Sii; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Einbindung eines Moduls zur Rückführgrößenbestimmung in einen Regelkreis zur hochpräzisen Roboterführung*. Erlangen, 2016. – Projektarbeit
- [162] BUSCHHAUS, A.; KRUSEMARK, S.; KARLIDAG, E.; FRANKE, J.: *Universal Fine Interpolation Algorithms for Accuracy Improvements of Industrial Robots*. In: IEEE (Hrsg.): *IEEE 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications & Control Systems: ICUMT 2016*, 2016, S. In Drucklegung

- [163] ZACHER, S.; REUTER, M.: *Regelungstechnik für Ingenieure: Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen ; mit 96 Beispielen und 32 Aufgaben ; [mit Online-Service]*. 13., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011 (Studium)
- [164] SCHULZ, G.: *Regelungstechnik: Grundlagen, Analyse und Entwurf von Regelkreisen, rechnergestützte Methoden*. Berlin [u.a.]: Springer, 1995 (Springer-Lehrbuch)
- [165] LUNZE, J.: *Regelungstechnik*. 9., überarb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2012 (Springer-Lehrbuch)
- [166] SICILIANO, B.; KHATIB, O.: *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008
- [167] DUDZIAK, R.; MOOR, D. (Mitarb.): *Technische Bildverarbeitung: Bildauswertung*. Bochum, 2010
- [168] BUSCHHAUS, A.; GRÜNSTEUDEL, H.; FRANKE, J.: Geometry-Based 6D-Pose Visual Servoing System Enabling Accuracy Improvements of Industrial Robots. In: IEEE (Hrsg.): *IEEE 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems: ICAMEchS 2016*, 2016, S. Eingereicht
- [169] N.N., Baumann automation GmbH (Hrsg.): *ro|Box - the Platform for your flexible automation: Datenblatt*. http://www.baumann-automation.com/baumann-cms-wAssets/docs/english/Flyer_robbox_ENG.pdf – Überprüfungsdatum 2016-04-01
- [170] N.N., IDT (Hrsg.): *MotionScope M3: Datenblatt*. <http://www.idtvision.co.uk/cameras-m-series/m3/> – Überprüfungsdatum 2016-04-01
- [171] N.N., SiliconSoftware (Hrsg.): *microEnable IV VD4-CL: Datenblatt*. <http://silicon.software/Produkt/microenable-iv-vd4-cl/?lang=de> – Überprüfungsdatum 2016-04-01
- [172] N.N., OptoEngineering (Hrsg.): *Product Datasheet: TC16M036: Datenblatt*. <http://www.opto-engineering.com/media/pdf/TC16M036-datasheet-en.pdf> – Überprüfungsdatum 2016-04-01
- [173] N.N., Microtron (Hrsg.): *PCI-Bus Frame Grabber für Grau-und Farbbildverarbeitung INSPECTA-SERIE: Datenblatt*. http://microtron.eu/pdf/mikrotron_inspecta_4c_dbl.pdf – Überprüfungsdatum 2016-04-01

- [174] N.N., Microtron (Hrsg.): *MC1302 - Schnelle 1,3 MPixel CMOS Imaging Kamera: Datenblatt*.
http://microtron.eu/index.php?de_cams_mikrotron_mc1302 – Überprüfungsdatum 2016-04-01
- [175] N.N., Stemmer Imaging (Hrsg.): *FUJINON CF25HA-1/1,4: Datenblatt*.
<http://www.stemmer-imaging.de/de/produkte/fujinon-cf25ha-114/> – Überprüfungsdatum 2016-04-01
- [176] N.N., Zeiss Optotechnik GmbH (Hrsg.): *COMET L3D - kompakter 3D-Sensor: Datenblatt*. <http://optotechnik.zeiss.com/produkte/3d-digitalisierung/comet-l3d> – Überprüfungsdatum 2016-04-01
- [177] DIN Norm DIN EN 60204-1:10.2014, *Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*
- [178] PÖLLER, F.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Auswahl und Evalierung eines gyroskopischen Sensors zur TCP-Winkelerfassung von Industrierobotern*. Erlangen, 2015. – Projektarbeit
- [179] APFEL, Q.; BUSCHHAUS, A. (Mitarb.); FRANKE, J. (Mitarb.) : *Quantifizierte Beurteilung gyroskopischer Sensoren zur Regelung von Industrierobotern*. Erlangen, 2016. – Bachelorarbeit

12 Verzeichnis projektbezogener studentischer Arbeiten

Im Rahmen der dissertationsbezogenen Forschungsarbeiten sind untergliedert nach Themenkomplexen folgende studentische Arbeiten entstanden:

Roboterregelung (6)

- [S01] BLANK, A.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Systementwicklung zur dynamischen Roboteransteuerung in Echtzeit*. Erlangen, 2013. – Studienarbeit
- [S02] BLANK, A.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Entwicklung und Umsetzung eines Regelkreises zur Genauigkeitssteigerung von Knickarmrobotern im Bereich der Herstellung miniaturisierter räumlicher Schaltungsträger*. Erlangen, 2014. – Diplomarbeit
- [S03] RECK, B.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Entwicklung eines Kalibrier- und Regelungsmoduls zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern*. Erlangen, 2015. – Masterarbeit
- [S04] KRUSEMARK, S.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Entwicklung eines Feininterpolationsalgorithmus für industrielle Roboterarme zur Ausregelung von Prozessabweichungen*. Erlangen, 2016. – Projektarbeit
- [S05] KARLIDAG, E.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Optimierung und Evaluierung des Regelungsverhaltens eines Knickarmroboters in einer verteilten Anwendung*. Erlangen, 2016. – Bachelorarbeit
- [S06] Yik Chen Sii; Buschhaus, A. (Mitarb.); Franke, J. (Mitarb.) : *Einbindung eines Moduls zur Rückführgrößenbestimmung in einen Regelkreis zur hochpräzisen Roboterführung*. Erlangen, 2016. – Projektarbeit

Kamerabasierte Regelgrößenermittlung (11)

- [S07] DURST, A.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Kompensation der Ungenauigkeiten von Industrierobotern bei der Strukturierung dreidimensionaler Schaltungsträger durch kameragestützte Bahnkorrektur*. Erlangen, 2012. – Bachelorarbeit
- [S08] APEL, N.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Entwicklung eines hocheffizienten Bildverarbeitungssystems zur Prozessüberwachung der Leiterbahngenerierung auf 3D MID*. Erlangen, 2014. – Diplomarbeit
- [S09] MILL, L.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Entwicklung und Umsetzung eines Demonstrators zur intuitiven gestenbasierten Robotersteuerung*. Erlangen, 2014. – Bachelorarbeit

- [S10] HÄUßERMANN, J.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Aufbau eines 3D-Stereokamerasystems zur hochgenauen dreidimensionalen Bauteillageerkennung*. Erlangen, 2014. – Projektarbeit
- [S11] SEIDLING, R.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Entwicklung und Evaluierung eines hochgenauen Stereokamerasystems zur dreidimensionalen Lagebestimmung von Messobjekten*. Erlangen, 2014. – Projektarbeit
- [S12] REITINGER, P.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Entwicklung eines hochgenauen Bildverarbeitungssystems zur Erfassung und Korrektur der Roboter-trajektorie in Echtzeit*. Erlangen, 2015. – Masterarbeit
- [S13] HARRER, M.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Konfiguration einer Aerosol Jet Printing Anlage und Entwicklung eines Algorithmus zur Positions-ermittlung von Referenzmerkmalen*. Erlangen, 2015. – Projektarbeit
- [S14] LANG, J.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Entwicklung eines hochgenauen und -effizienten Stereokamerasystems zur Roboterbewegungs-erfassung*. Erlangen, 2015. – Projektarbeit
- [S15] DEICHSEL, F.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Entwicklung einer Offline Kalibriermethode für hochpräzise Roboterprozesse*. Erlangen, 2016. – Projektarbeit
- [S16] SCHIRBL, M.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Optimierung eines Stereokamerasystems zum hochgenauen und -effizienten 3D-Tracking von Roboterbewegungen*. Erlangen, 2016. – Bachelorarbeit
- [S17] Audino, C.; Buschhaus, A. (Mitarb.); Franke, J. (Mitarb.) : *Konsolidierung und quantifizierte Analyse eines Bildverarbeitungsmoduls zur Roboterbewegungs-erfassung*. Erlangen, 2016. – Projektarbeit

Genauigkeitsuntersuchungen von Industrierobotern (3)

- [S18] AUDINO, C.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Lasertrackerbasierte Genauigkeitsuntersuchungen serieller Industrieroboterkinematiken*. Erlangen, 2014. – Bachelorarbeit
- [S19] WEIß, A.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Quantitative Analyse der Verfahrengenauigkeit von Industrierobotern*. Erlangen, 2015. – Bachelorarbeit
- [S20] WILL, C.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Lasertrackerbasierte Genauigkeitsuntersuchungen serieller Industrieroboterkinematiken*. Erlangen, 2015. – Projektarbeit

Optimierung dreidimensionaler Robotertrajektorien (3)

- [S21] REITINGER, P.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Entwicklung einer Methodik zur Glättung komplexer dreidimensionaler Roboterbewegungsbahnen*. Erlangen, 2014. – Projektarbeit
- [S22] EBERLEIN, D.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Umsetzung eines Softwaremoduls zur Aufbereitung komplexer 3D-Robotertrajektorien*. Erlangen, 2015. – Bachelorarbeit
- [S23] SCHOTT, M. ; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Implementierung von Sonderfallbehandlungsstrategien in ein Softwaremodul zur Roboterprogrammoptimierung*. Erlangen, 2016. – Bachelorarbeit

Oberflächenscannerbasierte Regelgrößenermittlung (3)

- [S24] FRANZ, M.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Bauteillagekorrektur dreidimensionaler Schaltungsträger mittels oberflächenscannerbasierter Istzustandserfassung*. Erlangen, 2014. – Bachelorarbeit
- [S25] WINTER, S.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Kalibrierung eines Korrektursystems zur Absolutgenauigkeitssteigerung von Industrierobotern*. Erlangen, 2015. – Bachelorarbeit
- [S26] GRÜNSTEUDEL, H.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Umsetzung eines Systems zur oberflächenscannerbasierten Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern*. Erlangen, 2016. – Projektarbeit

Gyroskopische Regelgrößenermittlung (2)

- [S27] PÖLLER, F.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Auswahl und Evalierung eines gyroskopischen Sensors zur TCP-Winkelerfassung von Industrierobotern*. Erlangen, 2015. – Projektarbeit
- [S28] APFEL, Q.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Quantifizierte Beurteilung gyroskopischer Sensoren zur Regelung von Industrierobotern*. Erlangen, 2016. – Bachelorarbeit

Konzeptionierung und Umsetzung Versuchsumgebungen (2)

- [S29] GIERING, E.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Konstruktion und Umsetzung eines Versuchstandes zur robotergestützten Leiterbahngenerierung dreidimensionaler Schaltungsträger*. Erlangen, 2013. – Bachelorarbeit
- [S30] KONRAD, T.; A. Buschhaus (Mitarb.); J. Franke (Mitarb.) : *Planung und Umsetzung einer Roboterzelle zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern*. Erlangen, 2015. – Bachelorarbeit

13 Verzeichnis projektbezogener Publikationen

Der internationalen Fachwelt wurden die Methoden und Erkenntnisse in folgenden Publikationen zugänglich gemacht:

- [P01] BUSCHHAUS, A.; FRANKE, J.: Planning and Control of Robot-Assisted Process Cells for Structuring and Metallization of 3D-MID. In: BIRKICHT, A.; FRANKE, J.; JOHN, W.; KUHN, T. (Hrsg.): *10th International Congress Molded Interconnect Devices*. Nürnberg, 2012 (MID-Kongress), S. 200-205
- [P02] BUSCHHAUS, A.; FRANKE, J.: Industrial Robots Accuracy Optimization in the Area of Structuring and Metallization of Three Dimensional Molded Interconnect Devices. In: NETO, P.; MOREIRA, A. P. (Hrsg.): *Robotics in Smart Manufacturing: FAIM 2013*. Heidelberg: Springer, 2013, S. 179–190
- [P03] BUSCHHAUS, A.; FRANKE, J.: Usage of Industrial Robots as Flexible Handling Devices Supporting the Process of Three Dimensional Conductive Pattern Generation, Vol. 1038. In: Trans Tech Publications (Hrsg.): *11th International Congress Molded Interconnect Devices: Scientific Proceedings*, 2014 (Periodical of Advanced Materials Research, 1038), S. 89–94
- [P04] BUSCHHAUS, A.; BLANK, A.; FRANKE, J.; ZIEGLER, C.: Highly Efficient Control System Enabling Robot Accuracy Improvement. In: Elsevier (Hrsg.): *Procedia CIRP: 5th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*. CATS 2014, 2014 (Procedia CIRP), S. 200–205
- [P05] BUSCHHAUS, A.; APEL, N.; FRANKE, J.: Method for Vectorial Robot Movement Determination Enabling Accuracy Improvements. In: IEEE (Hrsg.): *2015 IEEE International Conference on Control, Automation and Robotics: ICCAR 2015*, 2015, S. 24–31; Best Presentation Award
- [P06] BUSCHHAUS, A.; BLANK, A.; FRANKE, J.: Vector Based Closed-Loop Control Methodology for Industrial Robots. In: IEEE (Hrsg.): *17th IEEE International Conference on Advanced Robotics: ICAR 2015*, 2015, S. 452–458
- [P07] BUSCHHAUS, A.; REITINGER, P.; FRANKE, J.: Automated Optimization of Complex Three-dimensional Robot Trajectories. In: IEEE (Hrsg.): *2nd IEEE International Conference on Control, Automation and Robotics: ICCAR 2016*, 2016
- [P08] BUSCHHAUS, A.; KRUSEMARK, S.; KARLIDAG, E.; FRANKE, J.: Universal Fine Interpolation Algorithms for Accuracy Improvements of Industrial Robots. In: IEEE (Hrsg.): *IEEE 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications & Control Systems: ICUMT 2016*, 2016, S. In Drucklegung; Best Paper Award; Best Presentation Award

- [P09] BUSCHHAUS, A.; FRANKE, J.: Steigerung der Absolutgenauigkeit von Industrierobotern bei der Strukturierung dreidimensionaler Schaltungsträger: Erfolgreicher Abschluss des AiF-IGF-Projektes 17980 N. In: PLUS 2016 (2016), Nr. 9, S. In Drucklegung
- [P10] BUSCHHAUS, A.; GRÜNSTEUDEL, H.; FRANKE, J.: Geometry-Based 6D-Pose Visual Servoing System Enabling Accuracy Improvements of Industrial Robots. In: IEEE (Hrsg.): IEEE 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems: ICAMechs 2016, 2016, S. In Drucklegung

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärmreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grapp
Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

- Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.
- Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
- Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
- Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
- Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
- Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.
- Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.
- Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.
- Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2
- Band 54: Thomas Rebhan
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern – Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3
- Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-074-5
- Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1
- Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-079-6

- Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-080-X
- Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-081-8
- Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6
- Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7
- Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4
- Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2
- Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9
- Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3
- Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5
- Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3
- Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1
- Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X
- Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

- Band 71: Michael Steber
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6
- Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4
- Band 73: Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2
- Band 74: Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0
- Band 75: Arthur Meißner
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8
- Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6
- Band 77: Michael Schwind
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4
- Band 78: Manfred Gerhard
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2
- Band 79: Elke Rauh
**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0
- Band 80: Sorin Niederkorn
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9
- Band 81: Stefan Schubert
**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7
- Band 82: Armando Walter Colombo
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1
- Band 83: Otto Meedt
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

Band 84: Knuth Götz

**Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**

212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1

Band 85: Ralf Luchs

**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe
zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**

176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7

Band 86: Frank Pöhlau

**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung
räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes

128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6

Band 88: Gerhard Luhn

**Implizites Wissen und technisches Handeln
am Beispiel der Elektronikproduktion**

252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen

114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2

Band 90: Hans-Jörg Pucher

**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken
und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**

158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung

128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2

Band 92: Doris Schubart

**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung
beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**

133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9

Band 93: Adrianus L. P. Coremans

**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahligesinterter Metallkörper**

184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5

Band 94: Hans-Martin Biehler

**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**

194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1

Band 95: Wolfgang Becker

**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften
excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**

175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X

Band 96: Philipp Hein

**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren:
Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**

129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger
**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl
**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –
Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden
Maßhaltigkeit für das Blechbiegen**

131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –
Materialeinfluss und Materialverhalten**

148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**

138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**

124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-
Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**

166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

**Laserstrahljustieren mittels Aktoren –
Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik**

122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

**Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie**

146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung

282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse

149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur

158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen

186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen

Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile

148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

**Großserientauglichkeit
trockenschmierstoffbeschichteter
Aluminiumbleche im Presswerk**

Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-221-7

- Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-220-9
- Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-222-5
- Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-223-3
- Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-224-1
- Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-226-8
- Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung
146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-227-6
- Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-228-4
- Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-230-6
- Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-231-4
- Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-232-2
- Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-233-0
- Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-234-9
- Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-237-3

- Band 171: Martin Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien – System- und Prozesstechnik
154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-238-1
- Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-239-X
- Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-240-3
- Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9
ISBN 3-87525-243-8
- Band 175: Peter Wöflflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0
ISBN 3-87525-246-2
- Band 176: Attila Komlódi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4
ISBN 3-87525-248-9
- Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1
ISBN 3-87525-249-7
- Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7
ISBN 3-87525-250-0
- Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4
ISBN 3-87525-251-9
- Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8
- Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6
- Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3

Band 183: Stefan Junker
**Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung
permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten**
173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer
**Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung
wirkmedienbasierter Blechumformprozesse**
135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6

Band 185: Klaus Lamprecht
**Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer
Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge**
137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1

Band 186: Bernd Zolleiß
**Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung
mechatronischer Baugruppen**
180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8

Band 187: Michael Kerausch
**Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal
wärmebehandelter Aluminiumplatten**
146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5

Band 188: Matthias Weber
**Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen
durch innovative Softwaresysteme**
183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9

Band 189: Thomas Frick
**Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen
beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen**
104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2

Band 190: Joachim Hecht
**Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte
Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen**
107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5

Band 191: Ralf Völkl
**Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und
Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung**
178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen
164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6

Band 193: Cornelia Hoff
**Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim
Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5**
133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0

Band 194: Christian Alvarez
**Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von
Lötprozessen in der Elektronikproduktion**
149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4

Band 195: Andreas Kunze
**Automatisierte Montage von makromechatronischen
Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze**
160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3

Band 204: Simon Dietrich
Sensoren zur Schwerpunktlagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen
138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
167 Seiten, 98 Bilder, 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahl-schweißen transparenter Polymerbauteile
160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3

- Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7
- Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4
- Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1
- Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff- prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7
- Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5
- Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen
147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2
- Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten
155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6
- Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung
195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3
- Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics
109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6
- Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7
- Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4
- Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9

- Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung
169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2
- Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)
176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5
- Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie
170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9
- Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen
127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3
- Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7
- Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß
145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4
- Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen
153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8
- Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung
165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4
- Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development
124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1
- Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidlinchverfahrens
119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8
- Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9
- Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6
- Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-357-3
- Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-358-0

- Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-360-3
- Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-361-0
- Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-362-7
- Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-363-4
- Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-364-1
- Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-365-8
- Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tabellen 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2
- Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tabellen 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9
- Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tabellen 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6
- Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tabellen 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2
- Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tabellen 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9
- Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tabellen 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3
- Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
151 Seiten, 74 Bilder 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0
- Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tabellen 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7

Band 259: Felix Lütke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tabellen 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-379-5

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-380-1

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-381-8

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-384-9

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-385-6

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen
137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8

- Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5
- Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2
- Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9
- Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6
- Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3
- Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3
- Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0
- Band 279: Fabian Zöllner
Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7
- Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4
- Band 281: Jochen Bönig
Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1
- Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
156 Seiten, 80 Bilder, 27 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8
- Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5
- Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement – Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau
136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung – Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0

Band 291: Christian Roos
Remote Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4

Band 293: Jan Tremel
**Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement/
Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren**
152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-420-4

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tabellen 2016.
ISBN 978-3-87525-422-8

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung – Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tabellen 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5

Band 297: Paryanto
Mechanronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tabellen 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2

Band 298: Peer Stenzel

Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe

239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tabellen 2017.

ISBN 978-3-87525-425-9

Band 299: Mario Lušić

Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess

174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tabellen 2017.

ISBN 978-3-87525-426-6

Band 300: Amd Buschhaus

Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse

202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tabellen 2017.

ISBN 978-3-87525-427-3