



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Felix Hähn

Modellierung und Kompensation der Bahnabdrängung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern

**Schriftenreihe des PTW
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

PTW
TU DARMSTADT

**Modellierung und Kompensation der Bahnabdrängung bei der
spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern**

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigt

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Felix Charles Hähn, M.Sc.

aus Koblenz

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht
Tag der Einreichung:	17. Juni 2020
Tag der mündlichen Prüfung:	03. November 2020

Darmstadt 2020
D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Felix Hähn

**Modellierung und Kompensation der
Bahnabdrängung bei der spanenden Bearbeitung
mit Industrierobotern**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7770-4

ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Industrieroboter übernehmen in der industriellen Fertigung immer mehr Aufgaben, die zuvor von Spezialmaschinen oder in Handarbeit durchgeführt wurden. Die Haupteinsatzfelder liegen hierbei in der Handhabung, dem Schweißen und der Montage. Im Bereich der spanenden Bearbeitung ist das Einsatzfeld des Industrieroboters hingegen limitiert, da aktuelle Robotersysteme die notwendigen Genauigkeitsanforderungen zu Gunsten geringer Investitionskosten nicht erfüllen. Eine Haupteinflussgröße auf die Arbeitsgenauigkeit von Industrierobotern ist auf Grund der wirkenden Prozesskräfte die Nachgiebigkeit und die daraus resultierende Abdrängung des Roboterarms.

Die vorliegende Arbeit greift deshalb die Fragestellung auf, wie die Genauigkeit eines Industrieroboters bei der spanenden Bearbeitung gesteigert werden kann, um Zerspanaufgaben, die bisher auf Grund ihres Anforderungsprofils von CNC-Maschinen durchgeführt werden müssen, zukünftig roboterbasiert zu bearbeiten. Hierzu wird ein Nachgiebigkeitsmodell für Industrieroboter weiterentwickelt und parametrisiert. Das Modell wird verwendet, um prozessparallel Korrekturwerte zur Kompensation der Bahnabdrängung zu generieren. Um die verzögerte Reaktionsfähigkeit des Systems zu steigern, die bisherige Lösungen zur prozessparallelen Kompensation aufweisen, wird ein hybrider Ansatz aus gemessenen und abgeschätzten Prozesskräften verfolgt. Es wird in Zerspanversuchen gezeigt, dass die Arbeitsgenauigkeit des Industrieroboters signifikant gesteigert werden kann.

Herstellern und Anwendern wird ein System zur Verfügung gestellt, das mit wesentlich geringeren Investitionskosten im Vergleich zu Portalmaschinen die Bearbeitung von großen Werkzeugen und Strukturelementen mit einer Arbeitsgenauigkeit im Submillimeterbereich ermöglicht.

Darmstadt, im November 2020

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

VORWORT DES AUTORS

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele danke ich für die wissenschaftliche Betreuung und Diskussion der Arbeit. Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht gilt mein Dank für die bereitwillige Übernahme des Korreferats und die fachlichen Anregungen.

Ich möchte mich herzlich bei meinen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere der Forschungsgruppe Werkzeugmaschinen und Industrieroboter, für die fachlichen Diskussionen, Anregungen und Ratschläge bedanken. Es war eine großartige Zeit am Institut, an die ich mich gerne erinnern werde. Besonderer Dank gilt meinen Bürokolleginnen und -kollegen Kaveh Haddadian, Christian Baier, Stephan Bay und Cornelia Tepper. Sie wissen genau, welches Kopfzerbrechen unser Roboter bereiten kann.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts danke ich für die stete Unterstützung bei der täglichen Arbeit. Angefangen beim Support, über die Buchhaltung hin zur IT, der Mechanischen Werkstatt und Elektronikwerkstatt.

Des Weiteren möchte ich mich bei den zahlreichen Studienarbeitern, Bacheloranden, Masteranden und studentischen Hilfskräften, die ich während meiner Zeit am Institut betreuen durfte, bedanken. Ohne die Unterstützung wäre diese Arbeit in vorliegendem Umfang nur schwer möglich gewesen. Ein besonderer Dank gilt hierbei Jonathan Burmester, der in der Endphase meiner Dissertation in vielfältiger Weise zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Mein größter und herzlichster Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern, die mich in meinem beruflichen Werdegang uneingeschränkt unterstützt und mir alle Freiheiten gelassen haben und meiner Frau Marlene. Ohne deine Unterstützung, deine Hilfe beim Korrekturlesen der Arbeit und insbesondere den Verzicht von dir an vielen Wochenenden und Abenden wäre diese Arbeit so nicht möglich gewesen.

Darmstadt, im Mai 2020

Felix Hähn

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort des Herausgebers	
Vorwort des Autors	
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungen und Formelzeichen	IX
1 Einleitung und Motivation.....	1
2 Grundlagen und Stand der Erkenntnisse.....	5
2.1 Zerspanen mit Industrierobotern	5
2.1.1 Aufbau von Zerspanungsrobotern	7
2.1.2 Genauigkeitskenngößen von Robotern.....	9
2.1.3 Einflussgrößen auf die Positionier- und Bahngenaugkeit von Industrierobotern	11
2.1.4 Lösungsansätze zur Steigerung der Absolutgenauigkeit von Industrierobotern in der Zerspanung	13
2.2 Modellierung von Industrierobotern	24
2.2.1 Grundlagen der Koordinaten- und Vorwärtstransformation	24
2.2.2 Modellierung von elastischen Roboterstrukturen.....	26
2.2.3 Parameteridentifikation von Steifigkeiten für Robotermodelle.....	29
2.3 Fazit zum Stand der Erkenntnisse.....	31
3 Problemstellung, Zielsetzung und Aufbau	33
3.1 Problemstellung.....	33
3.2 Zielsetzung	34
3.3 Aufbau der Arbeit	35
4 Versuchs- und Messtechnik	37
4.1.1 Roboterzelle und Steuerungstechnik	37
4.1.2 Abstands- und Positionssensorik.....	39
4.1.3 Versuchswerkstück und –werkzeug	40
5 Voruntersuchungen	43
5.1 Ermittlung der Prozesskräfte.....	43

5.1.1 Messkonzept	43
5.1.2 Signalverarbeitung	45
5.1.3 Konditionierung des Kraftsignals	49
5.1.4 Validierung der Kraftmessung	51
5.2 Genauigkeitsuntersuchungen	52
5.3 Steifigkeitsuntersuchungen	55
5.4 Bearbeitungskräfte und -ergebnis bei der Zerspanung des Versuchswerkstücks	57
5.5 Fazit der Voruntersuchungen	59
6 Auswahl und Weiterentwicklung eines Nachgiebigkeitsmodells	61
6.1 Auswahl des Nachgiebigkeitsmodells	61
6.2 Erweiterung und Aufbau des Modells	62
6.3 Ermittlung der Nachgiebigkeiten	66
6.3.1 Messaufbau	66
6.3.2 Messdatenauswertung	69
6.3.3 Experimentelle Ermittlung der Steifigkeitskennwerte des Industrieroboters	77
6.4 Validierung des Nachgiebigkeitsmodells	80
7 Hybride Abdrängungskompensation	85
7.1 Systemübersicht des Grundkonzepts	85
7.1.1 Projektion des Korrekturwertes	86
7.1.2 Kartesische und achsspezifische Korrekturwertübergabe	87
7.1.3 Regler für Korrekturwerte	88
7.2 Konzept der hybriden Kompensation mittels Kraftvorsteuerung	102
7.3 Validierung der entwickelten Nachgiebigkeitskompensation	105
8 Folgerungen für die Praxis	112
9 Zusammenfassung und Ausblick	115
10 Literaturverzeichnis	119
Anhang	131
Studentische Arbeiten	135
Lebenslauf	137

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Vor- und Nachteile sowie Anwendungsbeispiele des Industrieroboters in der Zerspanung -----	1
Abbildung 2: Ziele und Entwicklungsfelder zum Einsatz der roboterbasierten Bearbeitung im Presswerkzeugbau -----	2
Abbildung 3: Abrängung des Roboters auf Grund einer Prozesskraft F_P (links) und Ausschnitt aus einer Presswerkzeugprobegeometrie mit Konturverletzung (rechts) -----	3
Abbildung 4: Anwendungsbeispiele für das Zerspanen mit Industrierobotern -----	5
Abbildung 5: Komponenten und Achssysteme (weiß) eines Knickarmroboters -----	8
Abbildung 6: Positions(absolut)- und Positionswiederholgenauigkeit nach ISO 9283 - 10	
Abbildung 7: Pose(absolut)genauigkeit und Posewiederholgenauigkeit nach [35] -----	10
Abbildung 8: Bahn-Genauigkeit und Bahn-Wiederholgenauigkeit für eine Sollbahn nach ISO 9283 -----	11
Abbildung 9: Stäubli RX 170 hsm (links) und ROBMILL CNC PLUS der Firma Fill GmbH [44] -----	14
Abbildung 10: iMS Messsystem (links) [57] und Wiest Laserlab (rechts) [Quelle: Wiest-AG.de] -----	16
Abbildung 11: Offline Bahnkorrektur zur Abdrängungskompensation [16] -----	17
Abbildung 12: Konzept der positionsgeregelten Ausgleichsaktorik [98] -----	20
Abbildung 13: Abtriebsseitige Encoder und Vergleichsmessung mit einem Lasertracker zwischen einem Standardsystem und der Second Encoder Technologie [99] -----	21
Abbildung 14: Prinzip der Echtzeit Nachgiebigkeitskompensation nach [109] -----	22
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Vorwärts- und Rückwärtstransformation nach [116] -----	24
Abbildung 16: Varianten der Elastizitätsmodellierung einer Achse -----	28
Abbildung 17: Bestimmung der Drehsteifigkeit von Achse 2 [16] -----	31
Abbildung 18: Abgedrängte Fräsbahn und Vorschubnormalkraft bei der Zerspanung von Gusseisen mit Kugelgraphit EN JS2070 mit einem sechsschneidigen Schafffräser ($D = 10 \text{ mm}$) -----	33
Abbildung 19: Anwendungsgebiete und Schnittmengen für Bearbeitungsaufgaben nach [63] vor und nach genauigkeitssteigernden Maßnahmen -----	34
Abbildung 20: Grobstruktur der prozessparallelen Nachgiebigkeitskompensation -----	35
Abbildung 21: Aufbau der Arbeit -----	35
Abbildung 22: Verwendete Roboterzelle für Zerspanversuche -----	37
Abbildung 23: Hard- und Software des Systems -----	38
Abbildung 24: Bestimmung des Werkstück-Koordinatensystems mit Messtaster TC60 (links) und Ermittlung der Werkzeuglänge mit Werkzeugvermessungssystem LaserControl Micro Compact NT (rechts) -----	39
Abbildung 25: Messsystem Typ optoTOP-HE 1080 der Firma Breuckmann GmbH (links) und Scannvorgang (rechts) -----	40
Abbildung 26: Versuchswerkstück aus Aluminium AW-2017A -----	41
Abbildung 27: Vollhartmetallfräser 46J16010TRRD21 der Firma Ingersoll Werkzeuge GmbH -----	41
Abbildung 28: Mögliche Messstellen zur Prozesskraftermittlung -----	43
Abbildung 29: Einbaulage des ATI Omega 160 Kraft-Momenten-Sensors -----	45

Abbildung 30: Ablauf des ersten Schrittes der Offsetkompensation des Kraft-Momenten-Sensors -----	46
Abbildung 31: Ablauf des zweiten Schrittes der Offsetkompensation -----	46
Abbildung 32: Koordinatensysteme bei der Bestimmung der Prozesskraft -----	48
Abbildung 33: Freikörperbild der Komponenten: Sensor, Spindelhalterung inkl. Spindel und Werkstück -----	49
Abbildung 34: Signalkonditionierung des Kraftsignals zur Nachgiebigkeitskompensation -----	50
Abbildung 35: Verbleibender Kraftoffset nach Schritt 1 und 2 der Offsetkalibrierung des Kraftsensors ATI Omega 160 -----	51
Abbildung 36: Messwerte des Kraft-Momenten-Sensors ATI Omega 160 am Flansch und einem Dynamometer des Typs Kistler 9255A unter dem Werkstück als Referenzsystem (grau) -----	52
Abbildung 37: Prüfbahn nach DIN ISO 9283 -----	53
Abbildung 38: Abweichung zwischen Soll- und Ist-Bahn bei einer Bahngeschwindigkeit von 40 mm/s -----	54
Abbildung 39: Kartesische Nachgiebigkeiten des KUKA KR 300 -----	55
Abbildung 40: Steifigkeitsvermessung des Endeffektors (links ohne/ rechts mit Berücksichtigung des Werkzeugs) -----	56
Abbildung 41: Bearbeitung des Versuchswerkstücks aus AW-2017A -----	57
Abbildung 42: Soll-Ist-Vergleich des Versuchswerkstücks in der Software GOM Inspect sowie Scan des Fräseraustritts -----	58
Abbildung 43: Richtungen und Beträge der wirkenden Prozesskräfte -----	59
Abbildung 44: Transformation mit 5 Parametern -----	62
Abbildung 45: Koordinatensysteme des Nachgiebigkeitsmodells für die spanende Bearbeitung mit Industrierobotern -----	64
Abbildung 46: Aufbau des Nachgiebigkeitsmesssystems -----	66
Abbildung 47: Roboter mit Prüfkörpern ($W_{0a} - W_9$) -----	68
Abbildung 48: Sensorpaket auf Prüfwürfel mit Positionierhilfe -----	68
Abbildung 49: Messpunkte auf einem Messwürfel -----	69
Abbildung 50: Schritte zur Bestimmung der Würfel-Koordinatensysteme -----	70
Abbildung 51: Bestimmung des Robroot-Koordinatensystems in der Roboterbasis ----	72
Abbildung 52: Koordinatensysteme des Nachgiebigkeitsmodells bei der Parameterbestimmung -----	73
Abbildung 53: Vereinfachte Darstellung eines Robotergelenks vor und nach der Belastung -----	74
Abbildung 54: Vereinfachte Darstellung eines Strukturteils vor und nach der Belastung -----	76
Abbildung 55: Eingemessene Koordinatensysteme -----	77
Abbildung 56: Beispielhafte Belastungssituationen zur Kennwertermittlung -----	78
Abbildung 57: Darstellung des Achskoordinatensystems $G1u$ und $G1b$ * von Achse A1 mit 100-fach vergrößerter Verdrehung -----	79
Abbildung 58: Mess- und Simulationswerte des Gesamtmodells in x-Richtung bei Belastung mit 750 N -----	81
Abbildung 59: Mess- und Simulationswerte des Gesamtmodells in y-Richtung bei Belastung mit 750 N -----	81
Abbildung 60: Mess- und Simulationswerte des Gesamtmodells in z-Richtung bei Belastung mit 750 N -----	82

Abbildung 61: Mess- und Simulationswerte des Gesamtmodells in x-Richtung bei Belastung mit 250 N ----- 83

Abbildung 62: Mess- und Simulationswerte des Gesamtmodells in y-Richtung bei Belastung mit 250 N ----- 83

Abbildung 63: Mess- und Simulationswerte des Gesamtmodells in z-Richtung bei Belastung mit 250 N ----- 84

Abbildung 64: Grundkonzept zur Nachgiebigkeitskompensation ----- 85

Abbildung 65: Projektion des Korrekturvektors Δr in die Normalenebene des Vorschubs ----- 86

Abbildung 66: Varianten der Korrekturwertübergabe an die RSI-Schnittstelle ----- 88

Abbildung 67: Ausschnitt der Signalkette zur Übergabe des Korrekturwertes an die Robotersteuerung mit Vorfilter (oben) und Reglerstruktur (unten) ----- 89

Abbildung 68: Sprungantwort der Filter ----- 90

Abbildung 69: Bewegungsverhalten unter Verwendung der Vorfilter auf einen gefilterten Sprung von 1 mm in y-Richtung bei einer Bewegung in x-Richtung mit 25 mm/s im Welt-Koordinatensystem ----- 90

Abbildung 70: Signalverlauf innerhalb der RSI-Schnittstelle zur Positionskorrektur einer kartesischen Achse am Beispiel eines PID-Glieds ----- 91

Abbildung 71: Bewegungsverhalten unter Verwendung eines I-Reglers mit $T_I = 0,075$ s auf einen Sprung von 1 mm in y-Richtung bei einer Bewegung in x-Richtung mit 25 mm/s im Welt-Koordinatensystem ----- 92

Abbildung 72: Bewegungsverhalten unter Verwendung ausgewählter PID-Regler auf einen Sprung von 1 mm in y-Richtung bei einer Bewegung in x-Richtung mit 25 mm/s im Welt-Koordinatensystem ----- 93

Abbildung 73: Versuche der Regelungen beim Fräseraustritt ----- 94

Abbildung 74: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf den Fräseraustritt (Material = AW-2007, $D = 16$ mm, $a_p = 8$ mm, $n = 13.000$ 1/min) ----- 95

Abbildung 75: Signalverlauf innerhalb der RSI-Schnittstelle zur Achskorrektur einer Roboter Achse am Beispiel eines PID-Glieds ----- 96

Abbildung 76: Eingangsgrößen des Robotermodells ----- 98

Abbildung 77: Verhalten von Achse 1 auf einen Sollsprung von $0,02^\circ$ bei einem Massenträgheitsmoment der Achse von 161 m^2kg (links) und 1926 m^2kg (rechts) ----- 100

Abbildung 78: Verhalten des Systems bei $T_I = 0,1$ s auf einen Sprung von $0,02^\circ$ in Achse 1 bei Achsstellungen mit vergleichbarem Massenträgheitsmoment ----- 100

Abbildung 79: Sprungtest an Achse 3 in der Achsstellung $A_1: 0^\circ$ $A_2: -90^\circ$ $A_3: 0^\circ$ (links) 45° (mitte) 90° (rechts) $A_4: 0^\circ$ $A_5: 90^\circ$ $A_6: 180^\circ$ bei einem T_I von $0,045$ s ----- 102

Abbildung 80: Schematisches Konzept der hybriden Nachgiebigkeitskompensation- 103

Abbildung 81: Beispielhafte Kraftsignale beim hybrid kompensierten Fräsen einer Nut ----- 104

Abbildung 82: Fräseraustritt beim Nutenfräsen in y-Richtung des Welt Koordinatensystems an Position 1 und 2 bei einer Vorsteuerung mit 48 ms Zeitversatz ----- 104

Abbildung 83: Bearbeitungspose und Steifigkeitsellipsoid des TCP an Position 1 (links) mit $x = 1405$ mm, $y = -90$ mm, $z = 940$ mm und Position 2 mit $x = 1703$ mm, $y = -1703$ mm, $z = 610$ mm ----- 106

Abbildung 84: Soll-Ist-Vergleich des Versuchswerkstücks bei einer unkompensierten Bearbeitung an Position 2 ----- 106

Abbildung 85: Soll-Ist-Vergleich des Versuchswerkstücks bei einer kartesisch kompensierten Bearbeitung an Position 1 mit den Reglerparametern $KR = 0,075$, $TN = 0,0045$ s, $TV = 0,006$ s -----	107
Abbildung 86: Soll-Ist-Vergleich des Versuchswerkstücks bei einer kartesisch kompensierten Bearbeitung an Position 2 mit den Reglerparametern $KR = 0,055$, $TN = 0,0035$ s, $TV = 0,0065$ s -----	107
Abbildung 87: Soll-Ist-Vergleich des Versuchswerkstücks bei einer achsspezifisch kompensierten Bearbeitung an Position 1 mit den Reglerparametern A1: $KR = 0,079$, $TN = 0,004$ s, $TV = 0,007$ s; A2: $TI = 0,045$ s; A3: $TI = 0,045$ s; A4: $TI = 0,04$ s; A5: $TI = 0,04$ s; A6: $TI = 0,045$ s -----	108
Abbildung 88: Soll-Ist-Vergleich des Versuchswerkstücks bei einer achsspezifisch kompensierten Bearbeitung an Position 2 mit den Reglerparametern A1: $KR = 0,05$, $TN = 0,003$ s, $TV = 0,007$ s; A2: $TI = 0,07$ s; A3: $TI = 0,05$ s; A4: $TI = 0,04$ s; A5: $TI = 0,04$ s; A6: $TI = 0,045$ s -----	109
Abbildung 89: Soll-Ist-Vergleich des Versuchswerkstücks bei einer kartesisch kompensierten Bearbeitung mit Vorsteuerung an Position 1 -----	110
Abbildung 90: Soll-Ist-Vergleich des Versuchswerkstücks bei der achsspezifisch kompensierten Bearbeitung mit Vorsteuerung an Position 1 -----	110
Abbildung 91: Positionen bei den Validierungsversuchen in Orientierung 0° (Position 1: $x = 2084$ mm, $y = -97$ mm, $z = 1524$ mm; Position 2: $x = 1091$ mm, $y = 454$ mm, $z = 1884$ mm; Position 3: $x = 1337$ mm, $y = -538$ mm, $z = 1098$ mm; Position 4: $x = 1595$ mm, $y = -18$ mm, $z = 1099$ mm) -----	131
Abbildung 92: Weitere Orientierungen am Beispiel von Position 4 -----	131
Abbildung 93: Schwingverhalten verschiedener PT_1 -Steuerglieder auf einen Sprung von 1 mm in y-Richtung bei einer Bewegung in x-Richtung mit 25 mm/s im Welt-Koordinatensystem -----	132
Abbildung 94: Schwingverhalten verschiedener I-Regler auf einen Sprung von 1 mm in y-Richtung bei einer Bewegung in x-Richtung mit 25 mm/s im Welt-Koordinatensystem -----	133
Abbildung 95: Ausschnitt des Roboterprogramms in der Programmiersprache KRL zur Vorsteuerung -----	134

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Bearbeitungsprinzipien nach [12] und [16]-----	6
Tabelle 2: Typische Roboterkinematiken nach [30]-----	7
Tabelle 3: Kenngrößen für Industrieroboter nach VDI 2861-----	9
Tabelle 4: Systematische und stochastische Einflussgrößen auf die Positionier- und Bahngenauigkeit [12]-----	12
Tabelle 5: Herstellerspezifische Schnittstellen zur Korrekturwertübergabe-----	19
Tabelle 6: Transformationsvorschriften für Roboterkinematiken-----	26
Tabelle 7: ATI Omega 160 SI-2500-400 [143]-----	38
Tabelle 8: Bewertung von Kraftmessstellen und -methoden-----	44
Tabelle 9: Positionswiederholgenauigkeit des KUKA KR 300 R2500 ultra-----	53
Tabelle 10: Bahngenauigkeit des KUKA KR 300 R2500 ultra-----	54
Tabelle 11: Ermittelte Steifigkeitswerte des Endeffektors-----	57
Tabelle 12: Eignung verschiedener Modellierungsansätze für eine prozessparallele Nachgiebigkeitsberechnung-----	62
Tabelle 13: Transformationsparameter des KUKA KR 300 R2500-----	64
Tabelle 14: Achsstellungen und Belastungen zur Kennwertermittlung-----	78
Tabelle 15: Ermittelte Steifigkeitskennwerte der Achsen und Strukturelemente des KR 300 R2500-----	79
Tabelle 16: Vergleich zwischen Messwerten und Simulation an Würfel 9 in der Achsstellung $A_1: 0^\circ, A_2: -90^\circ, A_3: 90^\circ, A_4: 180^\circ, A_5: 0^\circ, A_6: 0^\circ$ mit je 1000 N und 500 N in z-Richtung-----	80
Tabelle 17: Vergleich zwischen Messwerten und Simulation an Würfel 9 in der Achsstellung $A_1: 0^\circ, A_2: -90^\circ, A_3: 90^\circ, A_4: 180^\circ, A_5: 0^\circ, A_6: 0^\circ$ mit je 1000 N und 500 N in y-Richtung-----	80
Tabelle 18: Abweichungen zwischen Mess- und Simulationswerten bei einer Belastung mit 750 N-----	82
Tabelle 19: Abweichungen zwischen Mess- und Simulationswerten bei einer Belastung mit 250 N-----	84
Tabelle 20: Reglerparameter der Achsen 4 bis 6 bei der achsspezifischen Korrekturwertübergabe-----	97

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

Abkürzungen	
Kurzzeichen	Begriff
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
6D	Sechsdimensional (Position und Orientierung)
A/D	Analog/Digital
A1, ... A6	erste, ... sechste Achse des Roboters
AG	Aktiengesellschaft
ARC	Adaptive Robot Control
bez.	bezüglich
bspw.	beispielsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCT	Conservative Congruence Transformation
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computerized Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMS	Dehnmessstreifen
DPM	Dynamic Path Modification
EGM	Externally Guided Motion
EN	Europäischen Normen
FEM	Finite-Elemente-Methode
G _i	i-tes (virtuelles) Gelenk
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung

GPS	Global Positioning System
HSK	Hohlschaftkegel
HSM	High-Speed-Machining
I-Glied/ Regler	Integrierendes Glied / Regler
IIR	Infinite Impulse Response
Inc.	Incorporated
IPO	Input-Processing-Output
IRC	Industrial Robot Controller
ISO	Internationale Organisation für Normung
K _B	Werkstück-Koordinatensystem
K _F	Flansch-Koordinatensystem der mechanischen Schnittstelle
K _L	Lasertracker-Koordinatensystem
KOS	Koordinatensystem
KR	KUKA Robot
KR C	KUKA Robot Control
K _R	Roboterfußpunkt-Koordinatensystem
KRL	KUKA Robot Language
K _{TCP}	Tool Center Point-Koordinatensystem
K _W	Welt-Koordinatensystem
L	Lasertracker
LED	Leuchtdiode
LLI	Low-Level-Interface
Max	Maximum
Min	Minimum
MSA	Matrix Structural Analysis
MXT	Move External
NC	Numerical Control
O ₁ ,...,O ₃	Erste,..., dritte Orientierung

P_1, \dots, P_5	Positionen in DIN ISO 9283 Prüfbahn
P_1, \dots, P_6	Positionen bei der Würfelvermessung
PID-Glied/Regler	Proportional, integral und differential Glied
PT_1 -Glied/Regler	Verzögerungsglied 1. Ordnung
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
q	Stellgröße
R	Robroot
RSI	Roboter-Sensor-Interface
SD	Standard Deviation (Standardabweichung)
SE	Second Encoder
SEN_PREA	Systemvariable zum Austausch von Real-Werten über eine Sensorschnittstelle
SI	Sensorintern
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
SSD	Solid-State-Drive
TCP	Tool Center Point
TwinCAT	The Windows Control and Automation Technology
UDP	User Datagram Protocol
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
W_i	i-ter Würfel
W_i^u	i-ter Würfel im unbelasteten Zustand des Roboters
W_i^b	i-ter Würfel im belasteten Zustand des Roboters
WZM	Werkzeugmaschine
XML	Extensible Markup Language

Formelzeichen		
Kurzzeichen	Einheit	Größe
a	mm	Strecke zwischen zwei Gelenken entlang x-Achse
A_1, \dots, A_n	° bzw. rad	Winkel der Achse 1, ...n
AP	mm	Pose(absolut)genauigkeit
a_p	mm	Axiale Zustellung/ Schnitttiefe
AT	mm	Bahn-Genauigkeit
b	mm	Strecke zwischen zwei Gelenken entlang y-Achse
D	mm	Fräserdurchmesser
d	mm	Strecke zwischen zwei Gelenken entlang z-Achse
\vec{e}	-	Einheitsvektor
F	N	Kraft
\vec{F}	N	Kraftvektor
F_c	N	Schnittkraft
F_{cN}	N	Schnittnormalkraft
\vec{F}_i	N	Kraftvektor im i-ten Koordinatensystem
F_P	N	Prozesskraft
\vec{F}_{TCP}	N	Kraftvektor im TCP-Koordinatensystem
h	m/N	Nachgiebigkeit
J	-	Jakobi-Matrix
J_{ges}	m^2kg	Massenträgheit einer Achse
J_m	m^2kg	Massenträgheit eines Massepunktes
k	N/m bzw. Nm/rad	Steifigkeit
K	-	Steifigkeitsmatrix
K_K	-	Kartesische Steifigkeitsmatrix
KM	Nm	Kippmoment
KR	-	Verstärkungsfaktor eines PID-Reglers

K_0	-	Dreh-Steifigkeitsmatrix
M	Nm	Moment
M_A	Nm	Moment um die z-Achse
M_B	Nm	Moment um die y-Achse
M_C	Nm	Moment um die x-Achse
M_M	Nm	Motormoment
M_W	Nm	Widerstandsmoment
\emptyset	mm	Durchmesser
q	°	Achswinkel
\vec{q}	-	Einheitsquaternionen
Q	-	Quaternionen-Vektor Paar
\vec{r}	mm	Positionsvektor
r_b	Mm	Radius des Bohrbildes des Grundgestells
Rot	-	Rotationsmatrix
RP	mm	Pose-Wiederholgenauigkeit
RT	mm	Bahn-Wiederholgenauigkeit
$r_{x,y,z}$	mm	Komponente des Vektors r
Rz	µm	gemittelte Rautiefe
\vec{t}	mm	Ortsvektor des Quaternionen-Vektor Paares
${}^x y_T$	-	Transformationsmatrix zur Koordinatentransformation eines Positionsvektors vom Koordinatensystem y in das Koordinatensystem x
T_i^y	-	i-te Transformationsmatrix der Vorwärtskinematik
T_i^e	-	i-te Transformationsmatrix der Eulertransformation
Tl	s	Zeitkonstante der Integration bei einem I-Regler
TN	s	Zeitkonstante der Integration bei einem PID-Regler
T_R	-	Transformationsmatrix einer Rotation

Trans	-	Translationsmatrix
T_T	-	Transformationsmatrix einer Translation
TV	s	Zeitkonstante der Differenzierung bei einem PID-Regler
T1	s	Zeitkonstante des Verzögerungsglieds bei einem PT_1 -Regler
\vec{v}	-	Vektor der Vorschubgeschwindigkeit
v_f	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit
\vec{v}_n	-	Normierter Vektor der Vorschubgeschwindigkeit
α	rad	Winkel bei Rotation um x-Achse
β	rad	Winkel bei Rotation um y-Achse
Δ	-	Differenz
Δl	m	Längenänderung
$\Delta \vec{r}$	mm	Positionskorrekturvektor des Nachgiebigkeitsmodells
$\Delta \varphi$	rad	Winkeländerung
Δq	°	Korrekturwert der Achsen
Θ	rad	Winkel bei Rotation um z-Achse
η	-	Zeitkonstante eines Verzögerungsglieds bei einem PT_2 -Regler
ε	-	Zeitkonstante eines Verzögerungsglieds bei einem PT_2 -Regler
ζ	-	Zeitkonstante des Verzögerungsglieds bei einem PT_1 -Regler
$\dot{\omega}$	rad/s ²	Winkelbeschleunigung