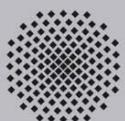
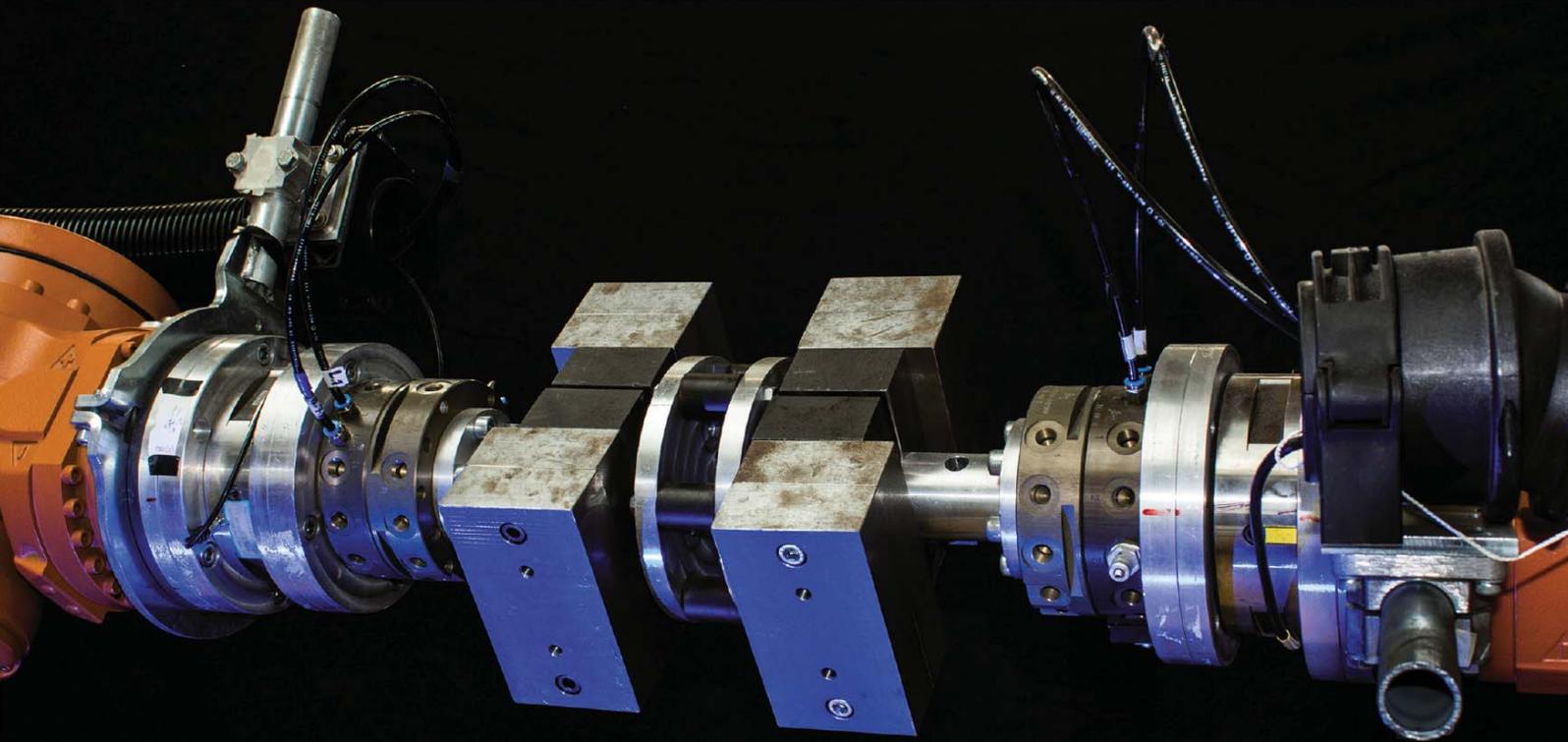


ALEXANDER SPILLER

Unterstützung der Werkstückhandhabung kooperierender Industrieroboter durch Kraftregelung



Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Alexander Spiller

**Unterstützung der Werkstückhandhabung
kooperierender Industrieroboter durch
Kraftregelung**

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-00, Telefax 0711 970-1399
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

Titelbild: © Alexander Spiller

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.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-0711-4

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2014

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

Unterstützung der Werkstückhandhabung kooperierender Industrieroboter durch Kraftregelung

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von

Alexander Spiller

geboren in Frankenthal (Pfalz)

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Arnold Kistner
Jun.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Pott

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Januar 2014

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart

2014

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart. Ich danke Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl für die Übernahme des Hauptberichts und für die sachlichen Diskussionen und hilfreichen Ideen während des Dissertationsverfahrens. Herr Jun.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Pott verfasste den Mitbericht zu dieser Arbeit und war mir zudem ein geschätzter Kollege. Mein Dank gilt seiner Führung und Anleitung zur Promotion, aber auch der hohen Bereitschaft, seine umfangreichen Kenntnisse im Bereich Robotik mit mir zu teilen. Prof. Dr.-Ing. Arnold Kistner war mir bereits aus dem Studium der Technischen Kybernetik bekannt, wo er uns Studenten immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Dafür und für die gewissenhafte Übernahme des Mitberichts danke ich ihm herzlich.

Die Arbeit am Fraunhofer IPA war geprägt vom engen Kontakt zu meinen Kollegen, mit denen ich gemeinsam entwickeln und forschen durfte. Ich danke hiermit allen aktuellen und ehemaligen Kollegen am Institut, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders hebe ich die Mitarbeiter der Gruppe 321 hervor, bei denen die immer offene Bürotür anregenden Gedankenaustausch ermöglichte. Dipl.-Ing. Martin Naumann und Dr.-Ing. Dennis Fritsch danke ich für die Akquise des Projektes Rokoko und für die gute Führung eines jungen Mitarbeiters. Mit Dr.-Ing. Johannes Wößner konnte ich die strukturelle Basis meiner Arbeit besprechen, wofür ich ihm ausdrücklich danke. Meinen Kollegen und Freunden Dipl.-Ing. Manuel Drust, Dr.-Ing. Konstantin Konrad und Dipl.-Ing. Florian Lachner danke ich für die Unterstützung bei der Themenfindung, Rückhalt bei der Promotion und sachliche Kritik in allen Lebenslagen.

Matthias Friedrich, Frank Gogel, Julian Guddat, Eugen Kneisler, Ngoc Mai Lam, Andreas Müller, Benjamin Müller, Diego Peñalosa, Christian Romstöck, Astrid Schlestein, Christopher Strobl, Oliver Thieme und Meike Weisensel danke ich für ihre studentischen Arbeiten und dem damit verbundenen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit.

Die Durchsicht des Manuskripts konnte ich auf mehrere Schultern verteilen. Dr.-Ing. Bernd Hasch, Dr.-Ing. Johannes Wößner, Luzia Schuhmacher, M. A. und Ulrike Fochler gaben wertvolle inhaltliche Anregungen und Hinweise auf die korrekte Einhaltung syntaktischer Regeln. Meiner Schwester Angelika Janneck danke ich nicht nur für Rechtschreibung und Grammatik, sondern vielmehr für dauernde Motivation und Beharrlichkeit. Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern Marianne und Klaus Spiller, ohne deren Unterstützung und Wertschätzung ein Studium weit weg von zu Hause und eine anschließende Promotion nicht möglich gewesen wären.

Meine Frau Andrea gab mir den notwendigen Rückhalt und andauernde Ermutigungen zum Durchhalten und Vorankommen. Ich danke ihr für die Unterstützung und die Rücksichtnahme während einer nicht immer einfachen Zeit.

Kurzzinhalt

Kooperierende Industrieroboter weisen Unzulänglichkeiten bei der Handhabung von gemeinsam getragenen, steifen Werkstücken auf. Werkstücke werden durch Kalibrierfehler, begrenzte Bahntreue und Werkstücktoleranzen beim lastteilenden Transport durch kooperierende Roboter unnötigen Verspannungen ausgesetzt. Darüber hinaus werden die Roboter über das erforderliche Maß hinaus belastet und sind einem größeren Verschleiß unterworfen. Durch Kraftregelung kann dieser Effekt reduziert werden.

In der Arbeit wird zunächst eine Analyse des Gesamtprozesses durchgeführt. Teilprozesse werden identifiziert und klassifiziert. Es erfolgt eine simulative Untersuchung des Einflusses von Kalibrierfehlern, Werkstücktoleranzen und Schleppfehlern auf den Handhabungsprozess. Anschließend wird ein flexibles Kraftregelungsmodul entwickelt, das während des Greifens, des Transports und des Ablegens eines Werkstücks eingesetzt werden kann. Die Arbeit schließt mit experimentellen Untersuchungen, in denen die Wirksamkeit der entwickelten Strategien bewiesen wird.

Abstract

Cooperating industrial robots show insufficient behaviour in cooperatively manipulating rigid payloads. While load sharing the work piece suffers from unnecessary stress, caused by calibration errors, limited trajectory accuracy and work piece tolerances. Furthermore even the robots are strained beyond the essential point and bigger deterioration becomes inherent. By means of force control those effects can be reduced significantly.

The thesis starts with an analysis of the manipulation process. Subprocesses are identified and rated. The influence of calibration errors, work piece tolerances and tracking errors is investigated in a simulation environment. Then a force control module is developed, which can be used while gripping, transporting and placing a work piece. The thesis concludes with extensive experimental tests on a real system, which show the effectiveness of the proposed strategies.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iii
Kurzzinhalt	v
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungen und Formelzeichen	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Kooperierende Industrieroboter	1
1.2 Problemstellung	1
1.3 Lösungsidee	3
1.4 Gliederung	3
2 Grundlagen	5
2.1 Robotik-Grundlagen und Schreibweisen	5
2.1.1 Pose	5
2.1.2 Rotationen	6
2.1.3 Transformationen	7
2.1.4 Gelenkwinkel, Vorwärtskinematik und inverse Kinematik	9
2.2 Kraftregelung	9
2.2.1 Kräfte und Momente im Raum	9
2.2.2 Grundlegende Problematik der Kraftregelung bei steifer Umgebung	11
2.2.3 Indirekte und direkte Kraftregelung	12
2.2.4 Methoden der Kraftregelung	12
2.3 Genauigkeit von Robotern	17
2.3.1 Normung nach DIN EN ISO 9283	17
2.3.2 Genauigkeiten ausgewählter Robotersysteme	18
2.4 Kooperierende Roboter	19
2.4.1 Übersicht	19
2.4.2 Spezifische Eigenschaften kooperierender Robotersysteme	21
2.5 Stand der industriellen Technik	22
2.5.1 Kooperierende Robotersysteme verschiedener Hersteller	23
2.5.2 Kraft-Momenten-Sensorik	24
2.5.3 Kraftregelung und Echtzeitschnittstellen	26

vii

2.6	Stand der Forschung	27
2.6.1	Kraftregelung kooperierender Industrieroboter	27
2.6.2	Ablaufmodelle zur Werkstückhandhabung	28
2.7	Auswertung und Defizite	29
2.7.1	Auswertung des Standes der Technik und der Forschung	29
2.7.2	Defizite und daraus abgeleitete Anforderungen	29
2.7.3	Vorgehensweise	31
3	Analyse der Handhabungsaufgabe	33
3.1	Handhabungsaufgabe	33
3.1.1	Physische und logische Elemente der Handhabungsaufgabe	33
3.1.2	Ablauf der Handhabungsaufgabe mit einem Roboter	35
3.1.3	Ablauf der Handhabungsaufgabe mit mehreren Robotern	38
3.1.4	Kräfte am von kooperierenden Robotern getragenen Werkstück	40
3.1.5	Erkannte Probleme und Hemmnisse	43
3.2	Teilprozesse und Übergangsbedingungen	44
3.2.1	Definition Teilprozess	44
3.2.2	Teilprozesse des Handhabungsprozesses	44
3.2.3	Parallelisierung von Teilprozessen bei kooperierender Handhabung	46
3.2.4	Klassifizierung von Teilprozessen	47
3.3	Zusammenfassung	49
4	Untersuchung von Störgrößen	51
4.1	Modellierung und Simulation	51
4.1.1	Gesamtsystem	51
4.1.2	Robotermodell	51
4.1.3	Werkstückmodell	53
4.2	Fehlereinflüsse	55
4.2.1	Mögliche Störgrößen und Bewertungsmaße	55
4.2.2	Versuchsszenarien und Ablauf	58
4.2.3	Ergebnisse	59
4.2.3.1	Szenario Referenz	60
4.2.3.2	Szenario Kalibrierung	60
4.2.3.3	Szenario Werkstücktoleranzen	61
4.2.3.4	Szenario Schleppfehler	62
4.3	Zusammenfassung und Bewertung	63
5	Entwicklung der Kraftregelung	67
5.1	Modifizierter Impedanzregler	67
5.1.1	Modifikation des Reglers	67
5.1.2	Wesentliche Eigenschaften und Stabilität	72
5.2	Ausweichbewegung und mehrachsige Kraftregelung	76
5.2.1	Kartesische Bewegungsvorgabe	76

5.2.2	Stellwertfusion	77
5.3	Transport	79
5.3.1	Kraftverteilungsproblem	80
5.3.2	Regelung	81
5.3.3	Sollwertgenerierung	82
5.4	Einfahrt ins Werkstück	84
5.4.1	Regelung der Geschwindigkeit in Einfahrrichtung	85
5.4.2	Regelung der verbleibenden Freiheitsgrade und Sollwertvorgabe	88
5.5	Ablegen	88
5.5.1	Kräfte und Momente beim Ablegen	89
5.5.2	Geschwindigkeitsregelung in Ablegerichtung	90
5.5.3	Ausweichbewegung zur Ausregelung externer Kräfte	90
5.6	Zusammenfassung	91
6	Experimentelle Untersuchungen	95
6.1	Versuchsumgebung	95
6.1.1	Roboter	95
6.1.2	Robotersteuerung	95
6.1.3	Greiftechnik	96
6.1.4	Ablage und Testwerkstück	98
6.1.5	Sensorik	99
6.1.6	Regelungsplattform und Zellensteuerung	100
6.1.7	Entwicklungsumgebung und Software-Toolchain	100
6.2	Versuchsszenarien	100
6.2.1	Einfahrt	101
6.2.2	Transport	102
6.2.3	Ablegen	103
6.3	Ergebnisse	104
6.3.1	Verhalten ohne Regelung	104
6.3.2	Einfahrt	107
6.3.2.1	Grundsätzlicher Verlauf	107
6.3.2.2	Szenarien	109
6.3.3	Transport	112
6.3.4	Ablegen	114
6.3.4.1	Grundsätzlicher Verlauf	115
6.3.4.2	Szenarien	117
6.4	Bewertung und Zusammenfassung	117
7	Zusammenfassung und Ausblick	121
7.1	Zusammenfassung	121
7.2	Ausblick	122
	Literaturverzeichnis	123

A	Roboterdynamik	130
B	Kraftregler	132
C	Trajektorienverlauf zur Beeinflussung der Fehlereinflüsse	136
D	Details zur Versuchsumgebung	137
D.1	Roboter	137
D.2	Robotersteuerungen	137
D.3	Testwerkstück	137
D.4	Verriegelung der Werkzeugwechsler	137
D.5	Messdatenerfassung	137
D.6	RTAI-Linux	140

Abbildungsverzeichnis

1.1	Mechanische Spannung im Werkstück.	2
2.1	Frames, Punkte und Vektoren.	7
2.2	Schwingfähige Systeme.	13
2.3	Impedanz- und Admittanzregler.	15
2.4	Struktur des Hybridreglers und Beispiel zur Erläuterung.	15
2.5	Pose-Genauigkeit und Pose-Wiederholgenauigkeit.	17
2.6	Einzelroboter und drei Arten der Roboterkooperation	19
2.7	Gemeinsamer Arbeitsraum kooperierender Roboter.	23
2.8	Industrielle kooperierende Robotersysteme verschiedener Hersteller.	24
2.9	Dehnmessstreifen und eindimensionale Kraftsensoren.	25
2.10	Mehrdimensionale Kraftsensoren.	26
2.11	Anforderungen und Vorgehensweise.	31
3.1	Komplexe und einfache Handhabungszelle	34
3.2	Restriktionen beim Anheben und Ablegen des Werkstücks.	35
3.3	Verschiedene Greifsituationen (Beispiele).	36
3.4	Vereinfachte Darstellung der Handhabungsaufgabe zweier kooperierender Roboter	38
3.5	Greifsituation bei mehreren Robotern.	39
3.6	Veränderung der relativen Position zweier Roboter während des Transports des Werkstücks.	40
3.7	Werkstück-Freischnitte.	41
3.8	Position und Verformung des Werkstücks und der Roboter während des Tragens des Werkstücks.	42
3.9	Zustandsübergangsdiagramm der Handhabungsaufgabe eines einzelnen Roboters.	44
4.1	Gesamtmodell.	52
4.2	Schematische Darstellung des Robotermodells.	52
4.3	Übertragungsverhalten der simulierten Robotersteuerung.	53
4.4	Werkstückmodell.	54
4.5	Kraftverlauf und Kraftfehler.	58
4.6	Soll-Trajektorienverlauf des Werkstückmittelpunkts für x , y und φ über der Zeit.	59
4.7	Eingebrachte Fehler der Simulationsszenarien.	60
4.8	Kraft und Moment am Flansch des Roboters 2 bei der Referenzfahrt.	60
4.9	Vergleich zwischen Referenz- und fehlerbehafteter Fahrt bei Kalibrierfehlern.	61

4.10	Auftretende Kräfte bei fehlerbehaftetem Werkstück in y -Richtung an Roboter 1. . . .	62
4.11	Schleppfehler und Zusammenhang zwischen Kraftfehler und Bahngeschwindigkeit. . .	63
5.1	Impedanzregler als Blockschaltbild.	67
5.2	Impedanzregler, Umstrukturierung in Kraftregler.	68
5.3	Modellstruktur, Impedanz als Kraftregler.	69
5.4	Systemantwort bei Sprung und anschließendem Abfallen in der Führungsgröße F_w . . .	69
5.5	Regelfehler bei Sprung in der Führungsgröße und anschließendem Wegfallen des Regel- fehlers.	71
5.6	Blockschaltbild des Impedanzreglers ohne Sollbahnvorgabe und mit $K_c = 0$	71
5.7	Übertragungsverhalten des geschlossenen Kraft-Regelkreises.	73
5.8	Geschlossener Regelkreis mit modifiziertem Impedanzregler und einachsigem Roboter- modell.	74
5.9	Nyquist-Diagramme bei verschiedenen T_2 - und D_2 -Parameterwerten des geschlossenen Kreises.	75
5.10	Bewegungen aufgrund von Kraft und Moment.	77
5.11	Bewegungsvorgabe durch ${}^k_{k+1}T$	78
5.12	Kraftverteilungsproblem und überlagerte Kraftregelung.	80
5.13	Reglerstruktur beim Transport.	81
5.14	Kräfte beim Load-Sharing.	83
5.15	Einfahrt.	85
5.16	Einfahrtgeschwindigkeit v in Abhängigkeit von F	87
5.17	Einfahrregler.	88
5.18	Interne und externe Kräfte beim Ablegen.	89
5.19	Unterschiedliche Kontaktsituationen am Werkstück beim Ablegen.	90
5.20	Reglerstruktur zum Ablegen des Werkstücks.	91
5.21	Überblick der entwickelten Regler.	92
6.1	Gesamtzelle.	96
6.2	Greifsystem Werkzeugwechsler im Detail.	97
6.3	Beispiel einer vorauseilenden Feder.	98
6.4	Testwerkstück und Ablagestift.	98
6.5	Testwerkstück.	99
6.6	Werkzeugwechsler und Frames P_1 und P_2	101
6.7	Kraft-Momenten-Verlauf im idealen Zustand.	105
6.8	Kraftfehler und Geschwindigkeit in z - und x -Richtung.	108
6.9	Kraft in z -Richtung und Moment in x -Richtung beim Transport.	113
6.10	Kraft-Momentenfehler beim Transport.	114
6.11	Kräfte in x -Richtung beim Ablegen, Kraft und Geschwindigkeit in z -Richtung in Feh- lerszenario 1.	116
B.1	Reglerstrukturen.	133

C.1	Trajektorie für Roboter 1.	136
C.2	Trajektorie für Roboter 2.	136
D.1	Abmessungen des Testwerkstücks sowie Massen und Position der Massenschwerpunkte.	139
D.2	Schnittbild zum Verriegelungsvorgang beim Werkzeugwechsler.	140

Tabellenverzeichnis

2.1	Bezeichnungen für Frames und Indizes zur weiteren Unterscheidung.	9
2.2	Genauigkeiten ausgewählter Roboter.	18
3.1	Herausforderungen und Probleme der Handhabungsaufgabe und Herausforderungen, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden.	43
3.2	Unabhängige und kooperierend durchgeführte Teilprozesse.	47
3.3	Eigenschaften der Teilprozesse.	48
3.4	Teilprozesse sortiert nach Spannung und Dynamik.	49
4.1	Abdeckung der Fehlergrößen durch die eingebrachten Fehler.	57
4.2	Ergebnisse der Simulationsläufe im Vergleich zum Referenzlauf.	64
5.1	Phasenrand φ_R , Amplitudenrand k_R und maximaler Fehlschätzungsfaktor a_{err}	76
6.1	Vorgaben für die Fehler Δ_i^E bei der Einfahrt in Millimeter bzw. Grad.	102
6.2	Bewegungsprofil für die Transportfahrt.	102
6.3	Steifigkeit des Werkstücks bei kartesischer Auslenkung um 2 mm bzw. 2 Grad.	103
6.4	Reglerparameter beim Transport.	103
6.5	Vorgaben für die Fehler Δ_i^A beim Ablegen in Millimeter bzw. Grad. Die Verdrehungen werden nach dem Euler-Schema in der Reihenfolge ZYX durchgeführt.	104
6.6	Kraft-Momentenfehler bei der Einfahrt, Szenario 0 bis 3.	110
6.7	Kraft-Momentenfehler bei der Einfahrt, Szenario 4 bis 6.	111
6.8	Kraft- und Momentenfehler am Ende der Einfahrt.	112
6.9	Maximalwert, Mittelwert und quadrierter Mittelwert von geregelter und ungeregelter Fahrt im Vergleich.	115
6.10	Kraft-Momentenfehler bei der Einfahrt, Szenario 0 bis 3.	118
6.11	Kraft- und Momentenfehler am Ende der Ablagefahrt.	119
D.1	Typenangaben der Roboter und der Steuerungen.	137
D.2	Software-Versionen der KUKA-Roboter-Steuerungen.	138
D.3	Genauigkeit der Messdatenerfassung.	140
D.4	Softwarestände Echtzeitlinux.	140
D.5	Hardwarekomponenten des Linux-Rechners.	141

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
DMS	Dehnmessstreifen
engl.	englisch
KMS	Kraft-Momenten-Sensor
RSI	KUKA Robot Sensor Interface, engl. für KUKA Roboter-Sensor-Schnittstelle
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool Center Point, engl., in etwa „Werkzeugmittelpunkt“
TCP/IP	Transmission Control Protocol auf Basis des Internet Protocols
TWS	Testwerkstück
XML	Extensible Markup Language, engl. für erweiterbare Auszeichnungssprache

Formatierung

Bedeutung	Formatierungsbeispiel
Matrix	M
Skalar	s
Tupel	\underline{t}
Vektor	\vec{v}

Formelzeichen und Operatoren

Zeichen	Erläuterung
φ_R	Phasenreserve
$\sigma_{\Delta F}$	Quadratischer mittlerer Abstand des Kraftfehlers
Δ_d	Positionsfehler zwischen Referenzfahrt und fehlerbehafteter Fahrt in der Simulation
Δ_F	Kraftfehler zwischen Referenzfahrt und fehlerbehafteter Fahrt in der Simulation
$\overline{\Delta_F}$	Mittelwert des Kraftfehlers in der Simulation
$\Delta_{F,max}$	Maximaler Wert des Kraftfehlers in der Simulation
$\Delta_{F,min}$	Minimaler Wert des Kraftfehlers in der Simulation

Zeichen	Erläuterung
Δ_M	Momentenfehler zwischen Referenz- und fehlerbehafteter Fahrt in der Simulation
Δ_θ	Winkelfehler zwischen Referenzfahrt und fehlerbehafteter Fahrt in der Simulation
$\Omega(\vec{a})$	Linksseitiges Vektor-Kreuzprodukt: $\Omega(\vec{a}) \cdot \vec{b} = \vec{a} \times \vec{b}$
a_{err}	Fehlschätzungsfaktor als Maß der Robustheit
$\text{atan2}(y, x)$	Arkustangens $\text{atan}(\frac{y}{x})$ unter Berücksichtigung des Quadranten
D_2	Dämpfung des geschlossenen Regelkreises mit modifiziertem Impedanzregler
$f_{F \rightarrow T}(\cdot)$	Umrechnung von sechsdimensionalem Kraft-Momenten-Stellwert in 4x4-Stellwert-Transformationsmatrix
F_d	Störkraft
F_e	Regelfehler der Kraft
F_n	Kraft in Einfahrrichtung
$F_{n,w}$	Sollkraft in Einfahrrichtung
$F_{n,e}$	Regelfehler der Kraft in Einfahrrichtung
F_t	Betrag der Kräfte in Nicht-Einfahrrichtung
F_w	Sollkraft
F_y	Ist-Kraft
$\text{fkin}(\cdot)$	Vorwärts-Kinematik (von engl. forward kinematics)
G_{Achse}	Übertragungsfunktion der einzelnen linearen Achse
G_e	Übertragungsfunktion der Umgebung (von engl. external)
$G_{Impedanz}$	Übertragungsfunktion des klassischen Impedanzreglers
$G_{mod.Impedanz}$	Übertragungsfunktion des modifizierten Impedanzreglers
G_O	Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises
G_R	Übertragungsfunktion des Reglers
$G_{S,ideal}$	Übertragungsfunktion der idealen Regelstrecke
G_w	Führungsübertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises
$\text{ikin}(\cdot)$	Inverse Kinematik (von engl. inverse kinematics)
j	Imaginäre Einheit bei komplexen Zahlen
K	Verstärkung des modifizierten Impedanzreglers
K_2	Verstärkung des geschlossenen Regelkreises mit modifiziertem Impedanzregler
K_c	Federsteifigkeit des Feder-Dämpfer-Masse-Systems beim Impedanzregler
K_D	Dämpfung des Feder-Dämpfer-Masse-Systems beim Impedanzregler
K_e	Federsteifigkeit der Umgebung (von engl. external)
K_m	Masse des Feder-Dämpfer-Masse-Systems beim Impedanzregler
k_R	Amplitudenrand
$p_{1,e}^i$	Fehlerbehaftete Einfahrposition i ohne Kontakt mit Werkstück
$p_{2,e}^i$	Fehlerbehaftete Einfahrposition i an Greifposition

Zeichen	Erläuterung
p_c, \dot{p}_c	Position und Geschwindigkeit des nachgiebigen Frames und Stellwert des Impedanzreglers
${}^A\vec{p}_m$	Vektor zum Punkt m aus Sicht des Frames A
q	Gelenkwinkel eines Roboters
r	Tupel von Drehwinkeln
R	Rotationsmatrix in Transformationen
s	Komplexe Frequenz bei Übertragungsfunktionen im Frequenzbereich
\vec{t}	Translationsanteil in Transformationen
T	Zeitkonstante des modifizierten Impedanzreglers
T_2	Zeitkonstante des geschlossenen Regelkreises mit modifiziertem Impedanzregler
${}^B_A T$	Transformation mit ${}^B\vec{p} = {}^B_A T \cdot {}^A\vec{p}$
${}^B_A T^f$	Transformation von Kraft-Momenten-Tupeln mit ${}^B\underline{F} = {}^B_A T^f \cdot {}^A\underline{F}$
Y_{el}	Elektrische Admittanz
Y_{mech}	Mechanische Admittanz
Z_{el}	Elektrische Impedanz
Z_{mech}	Mechanische Impedanz

1 Einleitung

1.1 Kooperierende Industrieroboter

In der industriellen Produktion werden Roboter für eine Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben eingesetzt. Dabei können die Roboter einzeln oder als kooperierende Roboter eingesetzt werden. Unter Roboterkooperation wird in dieser Arbeit das gemeinsame und synchrone Verfahren von Robotern verstanden. Als Beispiel sei das gemeinsame Tragen einer Last durch zwei oder mehr Roboter genannt, was als Lastteilung oder engl. „load sharing“ bezeichnet wird. Dabei greifen zwei oder mehr Roboter gemeinsam eine Last und bewegen sie kooperierend durch den Raum. Zur Vermeidung von unerwünschten Kräften und Spannungen in Werkstück und Roboter muss jede Bewegung eines Roboters exakt zeit- und positionssynchron mit den anderen Robotern durchgeführt werden.

Es bestehen hohe Ansprüche an das System hinsichtlich der Kalibrierung der Roboter zueinander, der exakten Synchronisierung der Antriebe der Roboter und einer möglichst hohen Absolutgenauigkeit der Einzelroboter. Handhabungsaufgaben von Robotern, die derart kooperieren, sind Gegenstand dieser Arbeit.

Diese Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung von seriellen, positionsgesteuerten Industrierobotern.

1.2 Problemstellung

Industrieroboter werden überwiegend positionsgesteuert betrieben. Durch entsprechende Sensoren wird die Stellung der Armelemente des Roboters ständig gemessen und über Positionsregelkreise wird die gewünschte Lage eingestellt. Durch die Verwendung hochgenauer Getriebe, präziser Lager, hochauflösender Sensoren und einer aufwendigen Kalibrierung erreichen moderne Industrieroboter Wiederholgenauigkeiten besser als 0,1 mm und Absolutgenauigkeiten besser als 1 mm. Zur Bestimmung der genannten Genauigkeiten kann beispielsweise die DIN EN ISO 9283 [DIN9283] herangezogen werden.

Bei einem allein arbeitenden Roboter sind die genannten Genauigkeiten während des Kontakts mit der Umgebung relevant. Beispielsweise muss ein Roboter einen Schweißpunkt immer an der gleichen Stelle setzen oder ein Werkstück immer an der gleichen Position greifen oder ablegen. Da die meisten Verfahrenprogramme oder wenigstens die Fahrkoordinaten nach wie vor per Teach-In eingelesen werden, ist die Wiederholgenauigkeit des Roboters ausschlaggebend. Ein Wert von 0,1 mm oder besser genügt in der Praxis auch bei hohen Anforderungen. Soll höchste Positionsgenauigkeit erreicht werden, wird je nach Anwendungsfall z. B. mit vibrationsgelagerten Einführhilfen, mit Kraftregelung oder mit anderen sensorgeführten Steuerungssystemen gearbeitet. In vielen Anwendungsfällen und insbesondere dort, wo geteachte Punkte verwendet werden, ist also die Wiederholgenauigkeit eines Roboters die entscheidende Kenngröße.

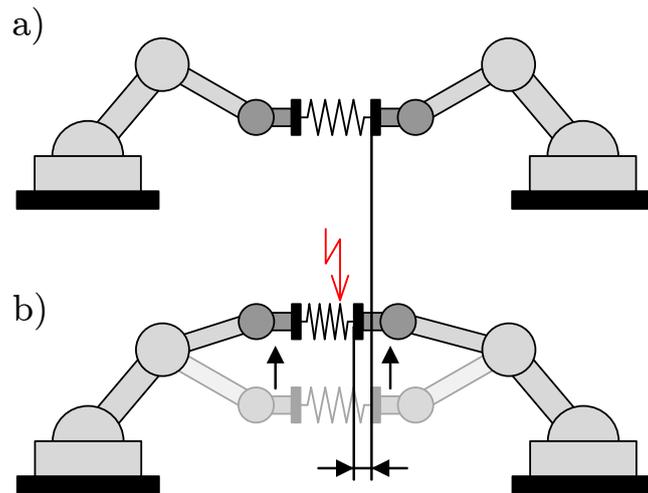


Abbildung 1.1: Mechanische Spannung im Werkstück. Sie wird verursacht durch den bei der Bewegung der Roboter auftretenden Absolutfehler. a) bezeichnet die Situation vor der Bewegung, b) stellt die Situation nach einer Aufwärtsbewegung dar. Die Fehlstellung des rechten Roboters führt zu einer Deformation des Werkstücks.

Dies ist bei kooperierenden Robotern anders. Bei der bereits zuvor skizzierten Handhabungsaufgabe zweier kooperierender Roboter greifen die Roboter gemeinsam ein Werkstück, um es von der Ausgangsposition in die Zielposition zu bewegen. Sobald beide Roboter das Werkstück gegriffen haben, entsteht eine geschlossene kinematische Kette. Dies führt dazu, dass jede Bewegung eines Roboters die Bewegung des jeweils anderen Roboters beeinflusst. Die Roboter sind miteinander über das Werkstück gekoppelt. Für die Kooperation von Robotern ist also nicht die Wiederholgenauigkeit, sondern die um den Faktor zehn schlechtere Absolutgenauigkeit relevant.

Die Auswirkung von Bewegungsfehlern der Roboter soll an einem Beispiel erläutert werden. Durch ein Bewegungsprogramm seien die Roboter veranlasst, ein gegriffenes Werkstück (vgl. Abbildung 1.1a) um 1000 mm anzuheben. Tritt dabei eine fehlerhafte Bewegung eines Roboters innerhalb seiner Absolutgenauigkeit auf (beide Roboter bewegen sich um 1000 mm nach oben, Roboter 2 bewege sich dabei jedoch auch um 1 mm nach links), so wird sich dieser Fehler durch das Werkstück fortpflanzen und den anderen Roboter beeinflussen. Dieser reagiert durch ein entsprechendes Nachregeln seiner Positionsregelung. Nach wenigen Regelzyklen befinden sich die Roboter im Kräftegleichgewicht. In den Robotern und im Werkstück hat sich zu diesem Zeitpunkt eine mechanische Spannung aufgebaut (vgl. Abbildung 1.1b). Durch diese Spannung hat sich der Positionsfehler auf beide Roboter und das Werkstück verteilt. Je größer die Steifigkeit von Robotern und Werkstück, umso größer ist die aufgebaute Spannung.

Der Bewegungsfehler wird von Lagefehlern aufgrund mangelnder Synchronität, Kalibrierfehlern der relativen Position der Roboter und anderen Fehlern überlagert, die alle zu mechanischen Spannungen in Werkstück und Robotern führen. Sie bewirken erhöhten Verschleiß bis hin zu Beschädigungen der Roboter und ihrer Komponenten und verursachen Belastungen, Deformationen oder gar eine Zerstörung des Werkstücks, weshalb sie unerwünscht sind.

1.3 Lösungsidee

Zum kooperierenden Transport eines Werkstücks sollten an den Endeffektoren nur Kräfte und Momente auftreten, die durch die Masse des Werkstücks und damit durch Gewichtskräfte verursacht werden. Wenn die Masse, die Position des Schwerpunkts und die aktuelle Orientierung des Werkstücks bekannt sind, können die erwünschten Kräfte an den Endeffektoren zu jedem Zeitpunkt berechnet werden.

Das Unvermögen, die relative Position der beiden Roboterendeffektoren zueinander während der Fahrt exakt beizubehalten, führt zu den in Abschnitt 1.2 erläuterten Spannungen im Werkstück. Diese Spannungen rufen unerwünschte Kräfte und Momente an den Endeffektoren der Roboter hervor.

Zur Vermeidung dieser unerwünschter Kräfte genügt es, die auftretenden Kräfte und Momente so einzustellen, dass nur noch die gewünschten Kräfte und Momente auftreten.

Um dies zu bewerkstelligen, werden an den Flanschen der Roboter Kraft-Momenten-Sensoren angebracht, die die tatsächlich auftretenden Ist-Kräfte und -Momente erfassen. Mithilfe der aktuellen Endeffektor-Orientierung können die erwünschten Soll-Kräfte und -Momente berechnet werden. Die Differenz zwischen Soll- und Ist-Werten wird einer Regelung zugeführt, die einen Korrekturwert zur Verringerung der unerwünschten Kräfte und Momente für die Roboter berechnet. Über entsprechende Schnittstellen werden den Robotern diese Korrekturwerte online übermittelt, wodurch die aktuelle Position des Roboters angepasst und schließlich eine Reduktion des Regelfehlers erreicht wird.

Dieses prinzipielle Vorgehen betrifft die Phase des Transports des Werkstücks. Neben dieser Phase wird das Vorgehen auch beim Greifen und Ablegen des Werkstücks angewandt, um eine Verbesserung der gesamten Handhabungsaufgabe zu erreichen.

1.4 Gliederung

Im folgenden Kapitel 2 werden die Grundlagen erläutert, die die Basis dieser Arbeit bilden. Es werden einige mathematische Methoden und Schreibweisen skizziert und der Stand der industriellen Technik und der Forschung aufgegriffen. Zudem erfolgt eine Ableitung der Anforderungen anhand der Defizite des Stands der Technik und die Darstellung der Ziele und Vorgehensweise dieser Arbeit.

Im darauffolgenden Kapitel 3 wird die dieser Arbeit zugrunde liegende Handhabungsaufgabe kooperierender Roboter näher untersucht. Es erfolgt eine Analyse des Prozesses und eine Zerlegung in mehrere Teilprozesse. Schließlich wird dargestellt, in welchen Teilprozessen relevante Problemstellungen auftreten und welche Teilprozesse einer Kraftregelung zugänglich sind.

Eine Simulation der Transportphase wird im anschließenden Kapitel 4 durchgeführt. Zunächst wird ein vereinfachtes Simulationsmodell kooperierender Roboter erstellt. In dieses Modell werden in mehreren Simulationsläufen bewusst Fehler eingebracht, deren Auswirkungen Fehlstellungen der Roboter und Kräfte im Werkstück sind. Die anschließende Bewertung der Kräfte und Momente dient zur Abschätzung der zu erwartenden Fehler und Kräfte beim realen Transport.

Die Kraftregelung des Handhabungsprozesses wird in Kapitel 5 entwickelt. Es werden mehrere Module konzeptioniert und umgesetzt, die in je einem Regler für die drei geregelten Teilprozesse des Gesamtprozesses zum Einsatz kommen.

Die Wirksamkeit der entwickelten Regler wird in Kapitel 6 experimentell untersucht. Die Versuchsumgebung und die verwendeten Komponenten werden erläutert und ein Messplan wird verfasst.

Anschließend werden die mit den Reglern erreichten Verbesserungen mit dem Ausgangszustand des unregulierten Systems verglichen.

Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Grundlagen

2.1 Robotik-Grundlagen und Schreibweisen

In diesem Abschnitt werden wesentliche Robotik-Grundlagen erläutert und Schreibweisen festgelegt. Es wird zwischen Matrizen M , Vektoren \vec{v} und Tupeln \underline{t} unterschieden. Ein Bezeichner wird als Vektor geschrieben, wenn typische Vektoroperationen im euklidischen Raum (Addition, Subtraktion, oft auch Kreuzprodukt) einen Sinn ergeben. Bei vielen Bezeichnern, die auch drei Werte in sich tragen, machen solche Operationen keinen Sinn (z. B. bei einem Tupel, das die drei Eulerwinkel trägt). Daher wird dort die Tupel-Schreibweise verwendet. Auch Kombinationen von vektoriellen und nicht-vektoriellen Größen werden als Tupel zusammengefasst. In bestimmten Situationen sind die Übergänge fließend (beispielsweise bei der Anwendung von Jacobi-Matrizen).

2.1.1 Pose

In jeder Stellung nimmt der TCP (engl. tool center point, „Werkzeugmittelpunkt“) eines Roboter-Endeffektors eine bestimmte Lage im Raum ein. Diese Lage ist eine „Pose“ und setzt sich aus Position und Orientierung zusammen. Eine Abfolge von Posen, die ein Roboter während der Bewegung einnimmt, wird Trajektorie genannt (siehe [DIN8373] und für Definitionen der Begriffe „sequentiell“, „Roboter“, „Gelenk“, „Glied“, „Antrieb“, „Pose“, „Position“, „Orientierung“, „TCP“, „Endeffektor“).

Der translatorische Anteil (Position) der Pose wird als

$$\vec{t} = \begin{pmatrix} t_x & t_y & t_z \end{pmatrix}^T \quad (2.1)$$

dargestellt. Für die Darstellung des rotatorischen Anteils (Orientierung) können verschiedene Konventionen verwendet werden (Euler-Winkel in mehreren Varianten, Quaternionen, Drehvektordarstellung, usw.; siehe dazu [Spo06, Cra05] und den folgenden Abschnitt 2.1.2), die zumeist mit drei Parametern auskommen, z. B.

$$\underline{r} = \begin{pmatrix} r_x & r_y & r_z \end{pmatrix}^T \quad (2.2)$$

r_x , r_y und r_z stellen nacheinander ausgeführte Rotationen um die x-, y- und z-Achse dar (Euler-Winkel). Alternativ kann auch eine überbestimmte Fassung in Form einer Drehmatrix (siehe z. B. [Gro10])

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

verwendet werden. Sowohl die Drei-Parameter-Konventionen als auch die Drehmatrix-Konvention können mit dem translatorischen Anteil zusammengefasst werden. Es ergibt sich das Positionstupel

$$\underline{p} = \begin{pmatrix} t_x & t_y & t_z & r_x & r_y & r_z \end{pmatrix}^T \quad (2.4)$$

und die homogene Transformationsmatrix (siehe [Cra05, Sic10])

$$T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & \vec{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} . \quad (2.5)$$

Für den zweidimensionalen Fall ergibt sich analog

$${}^2\underline{p} = \begin{pmatrix} t_x & t_y & \varphi \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} {}^2\vec{t}^T & \varphi \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad (2.6)$$

$${}^2T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & t_x \\ \sin \varphi & \cos \varphi & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^2R & {}^2\vec{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} . \quad (2.7)$$

2.1.2 Rotationen

Im letzten Abschnitt wurde die Beschreibung der Rotation übergangen, die Parameter r_x , r_y und r_z wurden als Euler-Winkel bezeichnet. Sie können mit

$$r_z = \text{atan2}(r_{21}, r_{11}) \quad (2.8)$$

$$r_y = \text{atan2}\left(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}\right) \quad (2.9)$$

$$r_x = \text{atan2}(r_{32}, r_{33}) \quad (2.10)$$

aus R berechnet¹ werden (vgl. [Cra05, Sic10]).

Die dargestellten Winkel entsprechen den „Roll-Pitch-Yaw“-Winkeln, die aus der Luftfahrt stammen und bei denen zuerst um die z-Achse, dann um die neue gedrehte y'-Achse und schließlich um die neue gedrehte x"-Achse gedreht wird. Eine andere Konvention zur Darstellung von Verdrehungen mit vier Parametern ist die Drehvektor- oder Drehzeiger-Darstellung, in der englischen Literatur oft als „Angle and axis“ bezeichnet:

¹atan2(\cdot , \cdot) bezeichnet den Arcustangens unter Berücksichtigung des Quadranten. In der genannten Literatur wird dies näher erläutert. Alle großen Programmiersprachen (C/C++, C#, Java, etc.) und wichtigen Mathematikprogramme (MATLAB, Mathematica, Maple, etc.) unterstützen diese Funktion, meist in der Form atan2(y, x), die an die klassische Formulierung des Tangens $\tan(\alpha) = y/x$ angelehnt ist. Diese Konvention wird auch hier verwendet.

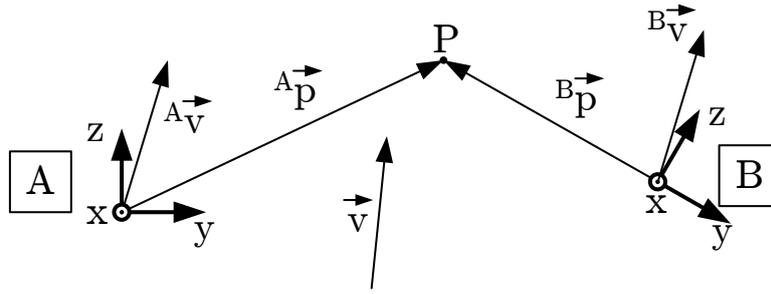


Abbildung 2.1: Frames, Punkte und Vektoren.

$$\theta = \arccos\left(\frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2}\right), \quad (2.11)$$

$$\vec{\varphi}' = \frac{1}{2 \cdot \sin(\theta)} \begin{pmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi'_x \\ \varphi'_y \\ \varphi'_z \end{pmatrix}. \quad (2.12)$$

Der Vektor $\vec{\varphi}'$ bildet die Drehachse der Rotation, der Winkel θ stellt den Verdrehwinkel dar. Für $\theta = 0$ wird die Darstellung von $\vec{\varphi}'$ singularär (Division durch Null). Per Konvention wird dieser Fall abgebildet durch $\theta = 0$, der Drehvektor hat dann keine Bedeutung. Diese Darstellung ist nicht minimal, da sie vier Parameter verwendet. Sie kann in eine minimale Darstellung umgewandelt werden, indem der Vektor $\vec{\varphi}'$ die Länge θ annimmt. Dann gilt:

$$\vec{\varphi} = \theta \cdot \vec{\varphi}' = \begin{pmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{pmatrix}. \quad (2.13)$$

Durch die Berechnung der Länge von $\vec{\varphi}$ kann dann auf θ zurück geschlossen werden. Die Berechnung der Rotationsmatrix aus den Drehwinkeln kann der bereits genannten Literatur entnommen werden.

Im zweidimensionalen Fall ist die Beschreibung der Rotation eindeutig: Es handelt sich dabei um die Rotation um den Vektor, der senkrecht zur Ebene steht. Die Berechnung der Rotation ergibt sich aus (2.7) zu

$${}^2\varphi = \text{atan2}(r_{21}, r_{11}) \quad (2.14)$$

2.1.3 Transformationen

Eine Pose im Raum wird durch ein Dreibein dargestellt (Abbildung 2.1). Solche Dreibeine können fest im Raum fixiert sein oder an Stellen des Roboters befestigt sein und sich mit dem Roboter bewegen (vgl. [DIN9787]). Die Dreibeine werden Koordinatensysteme oder Frames (von engl. frame, „Rahmen“) genannt und erhalten in dieser Arbeit innerhalb von Abbildungen einen Großbuchstaben in einem Rechteck als Bezeichnung. Die Beziehungen zwischen den Frames können über die oben erläuterten Transformationsmatrizen hergestellt werden, wobei die Transformation von Frame A zu Frame B in der

Transformationsmatrix ${}^A_B T$ erfasst wird (siehe Abbildung 2.1). Transformationsmatrizen ermöglichen Punkte im Raum in den Koordinaten eines anderen Frames darzustellen.

Zur Durchführung von Koordinatentransformationen werden homogene Koordinaten eingesetzt. Die drei Raumkoordinaten eines Punktes bzw. die drei Elemente eines Vektors werden um eine vierte Koordinate ergänzt. Der Vektor ${}^A \vec{p}$ zum Punkt P wird zur Koordinatentransformation zum Tupel

$${}^A \underline{p}' = \begin{pmatrix} {}^A \vec{p} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

in homogenen Koordinaten ergänzt, der Vektor \vec{v} wird zum Tupel

$${}^A \underline{v}' = \begin{pmatrix} {}^A \vec{v} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

erweitert. Die Koordinatentransformation kann durch Multiplikation mit der homogenen Transformationsmatrix durchgeführt werden:

$$\begin{aligned} {}^B \underline{p}' &= {}^B_A T \cdot {}^A \underline{p}' \quad \text{und} \\ {}^B \underline{v}' &= {}^B_A T \cdot {}^A \underline{v}' \quad . \end{aligned}$$

Diese Berechnungen werden in der weiteren Arbeit als

$$\begin{aligned} {}^B \vec{p} &= {}^B_A T \cdot {}^A \vec{p} \quad \text{und} \\ {}^B \vec{v} &= {}^B_A R \cdot {}^A \vec{v} \end{aligned}$$

dargestellt. Auf die Transformation von gebundenen Vektoren (Kräfte und Momente) wird in Abschnitt 2.2.1 eingegangen.

Durch die Aneinanderreihung der Transformationsmatrizen können kinematische Ketten beschrieben werden:

$${}^A_C T = {}^A_B T \cdot {}^B_C T \quad . \quad (2.17)$$

Die Frames an Robotern werden in der Arbeit einheitlich entsprechend Tabelle 2.2a bezeichnet. Bei Bedarf werden weitere Buchstaben vergeben. Eine Transformation kann einen Fußindex entsprechend Tabelle 2.2b tragen, um Soll-, Ist- und Stellwerte unterscheiden zu können.

Demnach bezeichnet die Transformation ${}^0_R T_w$ die Sollposition des Roboterflansches relativ zum Weltursprung. Da mehrere Roboter betrachtet werden, können die Frames Zahlen oder Kleinbuchstaben erhalten. Z. B. bezeichnet ${}^{R1}_{R2} T$ die Transformation vom Roboterflansch des ersten Roboters zum Roboterflansch des zweiten Roboters.

Tabelle 2.1: Bezeichnungen für Frames und Indizes zur weiteren Unterscheidung.

Bezeichner	Frame
0 (Null)	Weltursprung
B	Roboterbasis
R	Roboterflansch
K	Kraft-Momenten-Sensor
W	Werkstück
A	Ablage
T	Regelungssystem
M	Schwerpunkt, Massenmittelpunkt

(a) Frame-Bezeichner.

Bezeichner	Erklärung
y	Istwert
w	Sollwert
e	Regelfehler
u	Stellwert

(b) Fußindizes für Ist-, Soll-, Fehler- und Stellwert.

2.1.4 Gelenkwinkel, Vorwärtskinematik und inverse Kinematik

Ein sequentieller (auch: serieller) Roboter besteht aus mehreren miteinander über Gelenke gekoppelten Gliedern. Der Roboter kann über die Antriebe der Gelenke verschiedene Stellungen einnehmen. Für auf Drehgelenke basierende Roboter mit sechs Gelenken wird ein Gelenkwinkeltupel

$$\underline{q} = \left(q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_6 \right)^T \quad (2.18)$$

definiert. Die Vorwärtskinematik $\text{fkin}(\cdot)$ (von engl. forward kinematics) berechnet aus den Gelenkwinkeln die zugehörige Pose des Endeffektors. Umgekehrt kann mithilfe der inversen Kinematik $\text{ikin}(\cdot)$ (von engl. inverse kinematics) die Stellung der Gelenke aus der aktuellen Pose des Endeffektors bestimmt werden

$$\underline{p} = \text{fkin}(\underline{q}) \quad , \quad (2.19)$$

$$\underline{q} = \text{ikin}(\underline{p}) = \text{fkin}^{-1}(\underline{p}) \quad . \quad (2.20)$$

Für serielle Kinematiken ist $\text{fkin}(\cdot)$ eindeutig lösbar, $\text{ikin}(\cdot)$ dagegen meist nicht, es existieren mehrere Lösungen. Für parallele Roboter verhält es sich zumeist umgekehrt (siehe [Mer06]).

2.2 Kraftregelung

Gegenstand der Kraftregelung sind Kräfte und Momente, die entsprechend den Anwenderwünschen eingestellt werden sollen. Dazu existieren verschiedene Regelungsansätze, die am Ende dieses Abschnitts dargestellt werden.

2.2.1 Kräfte und Momente im Raum

Die Mechanik unterscheidet zwischen Kraft und Moment. Eine Kraft ist eine gerichtete vektorielle Größe, die im Körper, auf den sie wirkt, eine Spannung auslöst und/oder zu einer translatorischen Beschleunigung des Körpers führt. Ein (Dreh-)Moment ist eine gerichtete vektorielle Größe, die im

Körper, auf den sie wirkt, eine Scherspannung auslöst und/oder zu einer rotatorischen Beschleunigung des Körpers führt.

Mehrere an einem Körper an unterschiedlichen Stellen angreifende Kräfte und Momente können zu einer einzelnen Kraft und einem einzelnen Moment an einem Angriffspunkt P zusammengefasst werden. Während die Momente einfach addiert werden

$$\vec{M}_{gesamt} = \sum_{j=1}^m \vec{M}_j, \quad (2.21)$$

gilt dies für die Kräfte nicht. Sollen alle Kräfte an einem Punkt P zusammengefasst werden, ergibt sich die Gesamtkraft \vec{F}_{gesamt} und ein aus der Verschiebung der gebundenen Kraftvektoren resultierendes Moment ${}^P\vec{M}_F$ zu

$${}^P\vec{F}_{gesamt} = \sum_{k=1}^n \vec{F}_k \quad \text{und} \quad (2.22)$$

$${}^P\vec{M}_F = \sum_{k=1}^n {}^P\vec{r}_k \times \vec{F}_k. \quad (2.23)$$

${}^P\vec{r}_k$ ist ein beliebiger Vektor von P zur Wirklinie des Kraftvektors \vec{F}_k . Alle n angreifenden Kräfte und m Momente an einem Punkt P zusammengefasst ergibt

$${}^P\vec{F}_{gesamt} = \sum_{k=1}^n \vec{F}_k \quad \text{und} \quad (2.24)$$

$$\vec{M}_{gesamt} = \sum_{j=1}^m \vec{M}_j + {}^P\vec{M}_F = \sum_{j=1}^m \vec{M}_j + \sum_{k=1}^n {}^P\vec{r}_k \times \vec{F}_k. \quad (2.25)$$

Im dreidimensionalen Raum kann jede Kraft und jedes Moment wie jeder Vektor in drei orthogonale Komponenten zerlegt werden. Um beim Freischneiden eines Körpers alle auftretenden Kräfte und Momente darstellen zu können, sind im Allgemeinen sechs Werte erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein allgemeines sechsdimensionales Kraft-Momenten-Tupel $\underline{F} \in \mathbb{R}^6$ definiert (F von engl. force)

$$\underline{F} = \begin{pmatrix} \vec{F} \\ \vec{M} \end{pmatrix} = \left(F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z \right)^T, \quad (2.26)$$

das sowohl Kräfte als auch Momente beinhaltet. Jedes solche Kraft-Momenten-Tupel hat ein Bezugssystem, solche Bezugssysteme sind die im letzten Abschnitt eingeführten Frames (Koordinatensysteme). Daher erhält jedes Kraft-Momenten-Tupel den Bezeichner des Frames, auf das es sich bezieht, z. B. ${}^A\underline{F}$. Dabei sind die Größen in ${}^A\underline{F}$ im Koordinatensystem A ausgedrückt und der Angriffspunkt des Vektors ${}^A\underline{F}$ ist der Ursprung des Koordinatensystems A . Es wurde bereits die homogene Transformationsmatrix T eingeführt. Um ein Kraft-Momenten-Tupel, dessen Elemente sich auf den Frame A beziehen, so zu transformieren, als würde es in B angreifen, kann die Umrechnung

$${}^B \underline{F} = \begin{pmatrix} {}^B \vec{F} \\ {}^B \vec{M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^B R & 0 \\ \Omega \left(\begin{smallmatrix} B \\ A \end{smallmatrix} \vec{t} \right) \cdot {}^B R & {}^B R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^A \vec{F} \\ {}^A \vec{M} \end{pmatrix} = {}^B T^f \cdot {}^A \underline{F} \quad (2.27)$$

$$\text{mit } \Omega(\vec{a}) = \begin{pmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

verwendet werden. Dies ergibt sich, wenn man Gleichung (2.25) auf das Kraft-Momenten-Tupel anwendet und ${}^P \vec{r}$ durch den Translationsanteil $\begin{smallmatrix} B \\ A \end{smallmatrix} \vec{t}$ der Transformationsmatrix T aus Gleichung (2.1) bzw. (2.5) ersetzt (siehe [Spo06, Cra05]). Der rechtsseitige Kopfindex f deutet an, dass es sich bei T^f um eine Transformationsmatrix zur Transformation von Kraft-Momenten-Tupeln handelt. $\Omega(\vec{a})$ ist dabei die Matrixschreibweise des linksseitigen Vektor-Kreuzproduktes mit

$$\Omega(\vec{a}) \cdot \vec{b} = \vec{a} \times \vec{b} \quad . \quad (2.29)$$

Im zweidimensionalen Fall (zwei Kräfte, ein Moment) ergibt sich die Darstellung

$${}^B \underline{F} = \begin{pmatrix} {}^B \vec{F} \\ {}^B M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^B R & 0 \\ {}^2\Omega \left(\begin{smallmatrix} B \\ A \end{smallmatrix} \vec{t} \right) \cdot {}^B R & {}^B R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^A \vec{F} \\ {}^A M \end{pmatrix} = {}^B T^f \cdot {}^A \underline{F} \quad (2.30)$$

mit für den zweidimensionalen Fall veränderten Größen

$${}^2\Omega(\vec{a}) = \begin{pmatrix} a_y & a_x \end{pmatrix} \quad , \\ {}^B R \in \mathbb{R}^{2 \times 2} \quad , \quad {}^B T \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad , \quad {}^B \underline{F}, {}^A \underline{F} \in \mathbb{R}^3 \quad , \quad {}^B \vec{F}, {}^A \vec{F} \in \mathbb{R}^2 \quad , \quad {}^B M, {}^A M \in \mathbb{R} \quad .$$

2.2.2 Grundlegende Problematik der Kraftregelung bei steifer Umgebung

Ein Roboter wird positionsgeregelt, indem eine Zielpose für den Endeffektor vorgegeben wird und die dafür erforderlichen Gelenkstellungen berechnet und durch Lageregler in den Antrieben eingestellt werden. Das Ziel der Positionsregelung ist die möglichst exakte Positionierung des Roboterendeffektors in einer bestimmten Pose. Dabei auftretende Kräfte und Momente am Roboterarm oder am Endeffektor werden als Störgrößen betrachtet und ausgegeregelt. Die Dynamik der Positionsregelung ist so ausgelegt, dass Änderungen der wirkenden Kräfte und Momente am Arm oder am Endeffektor nur eine geringe und zeitlich kurze Wirkung auf die Pose des Endeffektors haben.

Die Kraftregelung in der Robotik hat das Ziel, eine definierte Kraft am Endeffektor des Roboters wirken zu lassen. Die gewünschte Kraft soll beispielsweise auch während der Bewegung des Endeffektors entlang einer wenig nachgiebigen Oberflächenkontur eingehalten werden. Soll ein Roboter mit einer steifen Umgebung in Kontakt treten, dann lösen bereits kleine Abweichungen von der idealen Bahn des Roboters große Kräfte aus. Aufgrund der Trägheit des Roboters kann die Kraft nur mit einer gewissen Verzögerung neu eingestellt werden, so dass ein Zielkonflikt auftritt: Reagiert der Roboter zum Ausgleich seiner Trägheit mit einer schnellen, großen Bewegung, verliert er unter Umständen den Kontakt zur Kontur (oder, bei einer Bewegung hin zur Kontur, taucht er tief in die Kontur ein und löst eine große Kraft aus). Reagiert er hingegen träge, dann entstehen aufgrund der hohen Steifigkeit von Roboter und Umgebung große Kräfte an Endeffektor und Manipulator.

Dieser Konflikt war und ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Das Gebiet der Kraftregelung von Manipulatoren wird bereits seit den 1970er Jahren erforscht. Einen guten Überblick zur frühen Kraftregelungsgeschichte liefert beispielsweise [Whi87], einen aktuelleren Überblick findet man in [Chi99]. Einige der maßgeblichen Arbeiten sind die Untersuchungen von HOGAN zur Impedanzregelung [Hog85a, Hog85b, Hog85c], einen Überblick verschiedener Kraftregelungsalgorithmen bietet die Robotikreferenz [Sic08]. Aktuelle Lehrbücher, in denen auch Kraftregelung angesprochen wird, sind [Spo06] und [Cra05].

2.2.3 Indirekte und direkte Kraftregelung

Unter direkter Kraftregelung sind Regelungsprinzipien zu verstehen, bei denen eine Soll-Kraft vorgegeben wird und das geregelte System versucht, genau diese Kraft einzunehmen. Bei einer indirekten Kraftregelung ist dies nicht möglich; dort wird ein vorher festgelegtes Systemverhalten bei Kontakt mit der Umgebung angestrebt.

Zu den indirekten Kraftreglern werden u. a. die passive und aktive Nachgiebigkeit und die Impedanzregelung gezählt. Direkte Kraftregler sind u. a. die hybride und die parallele Kraftregelung (siehe Abschnitt 2.2.4).

2.2.4 Methoden der Kraftregelung

Passive Nachgiebigkeit Statt einer Kraftmessung und Kraftregelung kann als einfachste Methode zur Reduktion von Kraftspitzen ein nachgiebiger Endeffektor eingesetzt werden. Unter dem Begriff „Remote center of compliance“ (vgl. [Lan80]) wird eine nachgiebige Aufhängung des Werkzeugs verstanden, die beispielsweise durch Federn oder andere nachgiebige Elemente realisiert wird. Bei Krafteinwirkung am Werkzeug gibt die Aufhängung nach und erlaubt ein Ausweichen des Werkzeugs. Eine solche Nachgiebigkeit ist wirtschaftlich, jedoch verliert der Roboter seine Positionstreue in mehreren Achsen und zur Änderung der Nachgiebigkeit müssen mechanische Umbauarbeiten durchgeführt werden, was die Flexibilität begrenzt.

Aktive Nachgiebigkeit Die Soll-Pose eines Roboterendeffektors wird berechnet und durch einen Lageregler eingestellt. Wird der Regler weich eingestellt und die Mechanik nicht-selbsthemmend ausgelegt, dann kann eine Kraft am Endeffektor den Roboter in bestimmtem Maße bewegen, wodurch der Roboter nachgiebig wird. Diese Art der Nachgiebigkeit wird aktiv genannt, weil im Gegensatz zur passiven Nachgiebigkeit die Regelung des Roboters beteiligt ist.

Impedanz- und Admittanzregelung Im Bereich der Mechanik ist der Begriff Impedanz nicht sehr geläufig. Da er für die Impedanz- und Admittanz-Kraftregler relevant ist, wird er hier eingeführt. In [Lin02] ist eine ähnliche Herleitung zu finden, in der die elektrische Impedanz anhand des Verhaltens eines mechanischen Feder-Dämpfer-Masse-Systems erläutert wird.

Der Begriff der Impedanz Z_{el} ist im Bereich der Elektrotechnik definiert als der komplexe Widerstand

$$Z_{el} = \frac{u(t)}{i(t)} = \frac{u(t)}{\dot{q}(t)} \quad (2.31)$$

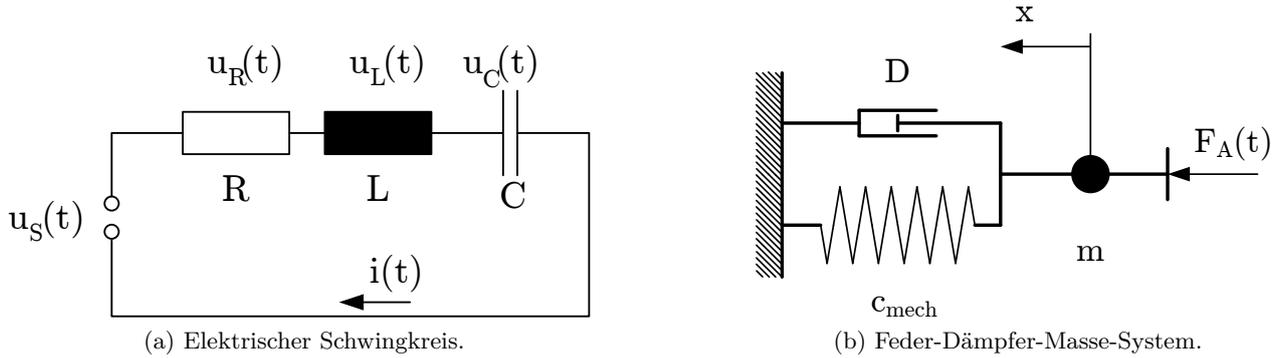


Abbildung 2.2: Schwingfähige Systeme.

mit $u(t)$ als Spannung, $i(t)$ Strom und $q(t)$ als Ladung bzw. $i(t) = \dot{q}(t)$. Qualitativ kann die Impedanz als Widerstand

$$\text{Widerstand} \hat{=} \frac{\text{Spannung}}{\text{Strom}} \hat{=} \frac{\text{Potential}}{\text{Fluss}} \hat{=} \text{Impedanz} \quad (2.32)$$

beschrieben werden.

Zur Übertragung dieses Impedanzbegriffs auf die Mechanik wird ein elektrischer Schwingkreis einem mechanischen Feder-Dämpfer-Masse-System gegenübergestellt. Ein elektrischer Schwingkreis bestehend aus einer Induktivität L , einem ohmschen Widerstand R und einem Kondensator C , der von einer Speisespannung $u_S(t)$ versorgt wird (siehe Abbildung 2.2a), kann mathematisch beschrieben werden durch

$$u_L(t) + u_R(t) + u_C(t) = u_S(t) \quad , \quad (2.33)$$

$$L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + \frac{q(t)}{C_{el}} = u_S(t) \quad , \quad (2.34)$$

$$L \cdot \ddot{q}(t) + R \cdot \dot{q}(t) + \frac{1}{C_{el}} \cdot q(t) = u_S(t) \quad . \quad (2.35)$$

Dabei setzt sich die Speisespannung $u_S(t)$ in Gleichung (2.33) aus den Spannungen $u_L(t)$ (Spannung an der Induktivität), $u_R(t)$ (Spannung am ohmschen Widerstand) und $u_C(t)$ (Spannung am Kondensator) zusammen. In Gleichung (2.34) werden die Spannungen unter Annahme von konstanter Induktivität L , ohmschem Widerstand R und Kapazität C_{el} ersetzt (siehe dazu z. B. [Lin02]). Schlussendlich erhält man in Gleichung (2.35) eine Differentialgleichung in $q(t)$, bei der die Äquivalenz von $i(t)$ und $\dot{q}(t)$ ausgenutzt wurde. In der dargestellten Differentialgleichung ist die Spannung $u_S(t)$ die Ursache, die die Ladungsverschiebungen im Schwingkreis auslöst.

In der Mechanik kann ein ähnlicher Wirkmechanismus (vgl. Abbildung 2.2b) hergeleitet werden:

$$F_T(t) + F_D(t) + F_F(t) = F_A(t) \quad , \quad (2.36)$$

$$m \cdot a(t) + D \cdot v(t) + c_{mech} \cdot x(t) = F_A(t) \quad , \quad (2.37)$$

$$m \cdot \ddot{x}(t) + D \cdot \dot{x}(t) + c_{mech} \cdot x(t) = F_A(t) \quad . \quad (2.38)$$

Es wird dabei in Gleichung (2.36) die Summe der auf eine Masse wirkenden Kräfte aufgestellt, die sich aus der der Beschleunigung entgegengesetzten Trägheitskraft $F_T(t)$, der der Geschwindigkeit entgegengesetzten Dämpfungskraft $F_D(t)$ und der der Positionsabweichung entgegengesetzten Federkraft $F_F(t)$ zusammensetzt. Auf der rechten Seite steht die die Bewegung der Masse beeinflussende Kraft $F_A(t)$. Die folgende Gleichung (2.37) ersetzt die Kräfte unter Annahme konstanter Masse m , Dämpfung D und Federkonstante c_{mech} . Zuletzt werden Beschleunigung $a(t)$ und Geschwindigkeit $v(t)$ durch die entsprechenden Ableitungen der Position $\ddot{x}(t)$ und $\dot{x}(t)$ ersetzt, so dass sich Gleichung (2.38) ergibt. In dieser Differentialgleichung ist die antreibende Kraft $F_A(t)$ die Ursache für die Bewegung der Masse.

Vergleicht man Gleichung (2.35) mit Gleichung (2.38), wird die Ähnlichkeit der Differentialgleichungen und damit auch des erwarteten Schwingungsverhaltens der Systeme deutlich. Somit kann auch im mechanischen Fall eine Impedanz definiert werden. Der Vergleich der Gleichungen (2.35) und (2.38) und die qualitative Definition nach (2.32) legt die Definition

$$Z_{mech} = \frac{F(t)}{\dot{x}(t)} = \frac{F(t)}{v(t)} \quad (2.39)$$

nahe. Die elektrische Admittanz Y_{el} ist als Umkehrwert der Impedanz definiert. Ebenso kann auch die mechanische Admittanz $Y_{mech}(t)$ als

$$Y_{el} = Z_{el}^{-1} = \frac{\dot{q}(t)}{u(t)}, \quad Y_{mech} = Z_{mech}^{-1} = \frac{v(t)}{F(t)} \quad (2.40)$$

definiert werden.

Es wird nun die Impedanzregelung entsprechend den Ausführungen in [Sic08] und [Sic10] erläutert. Tritt das System aus Abbildung 2.2b mit der Umgebung in Kontakt (bildlich gesprochen: stößt der Körper mit der Umgebung zusammen), dann bewegt sich der Körper entsprechend seiner Masse, der wirkenden Dämpfung und der Federkonstanten. Dabei gibt die mechanische Impedanz an, welche Kraft der Körper auf seine Umgebung bei einer bestimmten Geschwindigkeit ausübt. Wird die Impedanz als Übertragungsfunktion betrachtet, ergibt sich:

$$G_{Impedanz} = Z_{mech} = \frac{F(t)}{v(t)} \quad (2.41)$$

Die Geschwindigkeit $v(t)$ des Körpers ist dabei der Eingang des Systems, wohingegen die wirkende Kraft $F(t)$ den Ausgang des Systems darstellt. Diese mechanische Impedanz kann auf einen Roboter übertragen werden, indem eine Reglerstruktur ähnlich der in Abbildung 2.3a verwendet wird. Ziel ist es, dass der Roboter inklusive Regler insgesamt ein Übertragungsverhalten wie in (2.41) aufweist. Diese Art der Regelung wird Impedanzregelung genannt, da der Ausgang des Reglers einer generalisierten Kraft ($\underline{\tau}$, die Stellmomente der Antriebe) und der Eingang des Reglers für $\underline{p}_d \equiv 0$ der Position (\underline{p}_y , Ist-Pose des Roboters) bzw. der Geschwindigkeit entspricht.

Beim Impedanzregler wird keine Sollkraft, sondern eine Solltrajektorie \underline{p}_d vorgegeben. Es wird ein Wunschverhalten entlang der Solltrajektorie als Reaktion auf die Kräfte \underline{F} festgelegt. Die Parametrierung wird dadurch erleichtert, dass die Parameter eine mechanische Bedeutung haben und daher gut zugänglich sind.

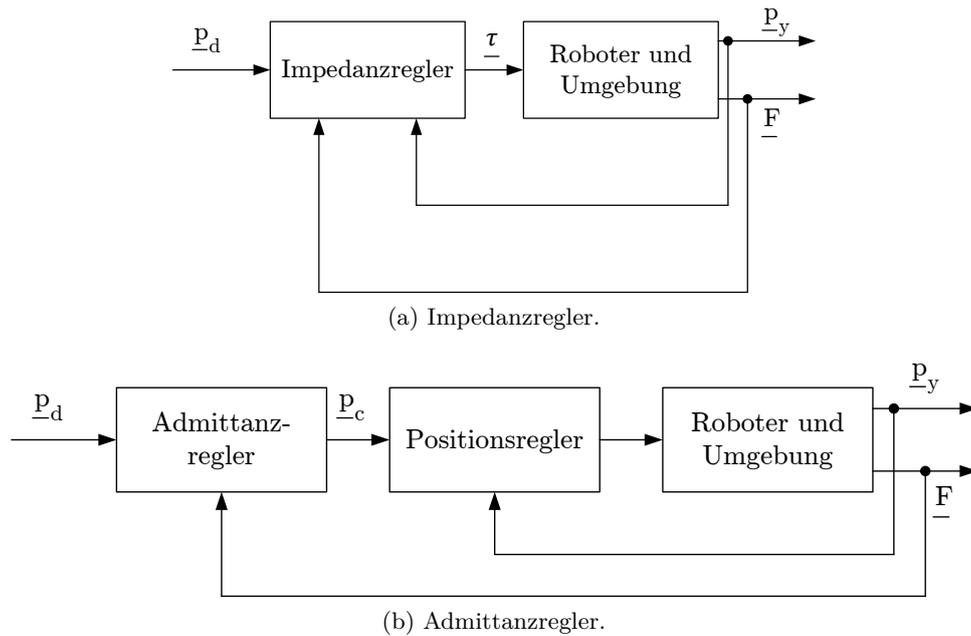


Abbildung 2.3: Impedanz- und Admittanzregler. Aus [Sic10].

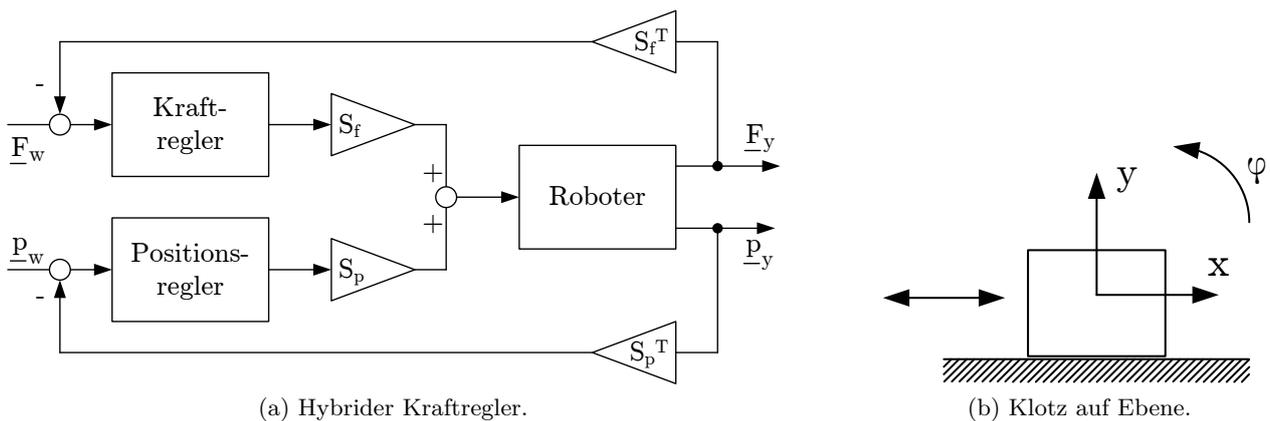


Abbildung 2.4: Struktur des Hybridreglers und Beispiel zur Erläuterung.

Die Theorie der Impedanzregler wurde in [Hog85a, Hog85b, Hog85c] vorgestellt und wird seitdem weitläufig eingesetzt und weiterentwickelt, sowohl bei Einzelrobotern [Sur07], mit stellbaren Endeffektoren [Lop08], als auch bei kooperierenden Robotern [Bon96, Cac00].

Der Impedanzregler unterscheidet sich vom Admittanzregler durch das umgekehrte Ein-/Ausgangs-verhältnis. Der Admittanzregler nach Abbildung 2.3b hat für $\underline{p}_d \equiv 0$ die wirkenden Kräfte am Endeffektor \underline{F} als Eingang und gibt die gewünschte Position des Roboters \underline{p}_c am Ausgang aus. Damit entspricht sein Übertragungsverhalten einer Admittanz.

Weitere Ausführungen zum Thema Admittanz- und Impedanzregelung können Anhang B entnommen werden. [Cac99] enthält ergänzende Ausführungen hinsichtlich der gleichzeitigen Impedanzregelung von sechs Freiheitsgraden und insbesondere der Handhabung von Orientierungen in der Drehvektor-Darstellung.

Hybride Kraftregelung Bei der hybriden Kraftregelung wird unterschieden in Richtungen, in denen die Bewegung des Manipulators beschränkt ist (engl. „natural constraint“, etwa „natürliche Beschränkung“, Bewegungsbeschränkung), und in solche, in denen das Einbringen einer Kraft nur beschränkt möglich ist (engl. „artificial constraint“, etwa „künstliche Beschränkung“, Kraftbeschränkung). In Abbildung 2.4b liegt ein Klotz auf einer Ebene. Es ist unter Annahme reibungsfreien Kontakts nicht möglich, eine Kraft in x -Richtung einzubringen, ohne eine Bewegung des Klotzes hervorzurufen. Ebenso ist es unter Beibehaltung der Kontaktsituation und unter Annahme einer starren Ebene nicht möglich, eine Bewegung in y -Richtung oder um φ einzubringen. Es bietet sich daher an, in x -Richtung eine Positionsregelung einzusetzen und in y - und φ -Richtung eine Kraft- und Momentenregelung anzuwenden. Es werden zwei Selektionsmatrizen S_f und S_p definiert, die diese Situation widerspiegeln.

Es ergibt sich eine Reglerstruktur entsprechend Abbildung 2.4a. Bei dieser Art der Regelung werden Sollvorgaben für Kraft (\underline{F}_w) und Position (\underline{p}_w) angegeben und beide Größen gleichzeitig geregelt. Da es sich weder um eine reine Kraft- noch um eine reine Positionsregelung handelt, wird diese Art der Kraftregelung als hybride Kraftregelung bezeichnet.

Als eigentlicher Kraftregler kann beispielsweise ein PI -Regler oder ein Impedanz-/Admittanzregler eingesetzt werden, der für jede zu regelnde Richtung unabhängig parametrisiert wird und bestimmt, ob es sich um eine direkte oder indirekte Kraftregelung handelt.

Parallele Kraftregelung Die parallele Kraftregelung ist der hybriden Kraftregelung ähnlich, die strikte Trennung in kraft- und positionsgeregelte Richtungen entfällt jedoch. Es gibt somit kraftgeregelter, positionsgeregelter und gemischt-geregelte Richtungen. Die jeweilige Ausgestaltung der Regler entscheidet, welcher Anteil der Regelung dominanter ist. Im Kontaktfall sollte beispielsweise die Kraftregelung dominieren, während in freier Fahrt die Positionsregelung übernimmt, vgl. dazu [Chi93, Sic00].

Fuzzy-Kraftregelung Die bisher vorgestellten Ansätze zur Kraftregelung basieren auf klassischen Regelungsverfahren, die mithilfe von Übertragungsgliedern Reglerstrukturen zusammensetzen. In der Fuzzy-Regelung [Han05] wird die Problemstellung fuzzifiziert. Es wird versucht, die Zustände des Systems in der Fuzzy-Logik zu beschreiben. Dazu werden umgangssprachlichen Begriffen wie „zu niedrig“ oder „zu groß“ unscharfe Mengen zugeordnet. Dies ermöglicht eine allgemeinsprachliche Beschreibung von Regelungsstrategien: „Wenn Kraft groß, dann schnell bewegen“, „Wenn Kraft mittel, dann wenig bewegen“, usw. Durch derartige Beschreibungen kann ein aktueller Zustand bewertet werden und mithilfe einer Defuzzifizierung wieder in einen zahlenmäßigen Stellwert umgewandelt werden.

Derartige Ansätze sind vielversprechend gerade in schwierig mathematisch zu beschreibenden Problemstellungen, wie es die Kontaktsituationen bei Robotern sind. Fuzzy-Regelung wurde im Bereich der Kraftregelung erfolgreich eingesetzt, simulationsbasiert auch für kooperierende Roboter [Kig00, Lia02, Lin98, Wan03].

Kraftsensorlose Kraftregelung Bei elektrisch angetriebenen Robotern sind die in den Motoren fließenden Ströme proportional zu dem vom Motor abgegebenen Drehmoment. Bei genauer Kenntnis des Antriebsstrangs und der Struktur des Roboters kann aus diesen Strömen die am Endeffektor des Roboters wirkende Kraft berechnet werden. Auch eine Kraft, die nicht am Endeffektor, sondern an

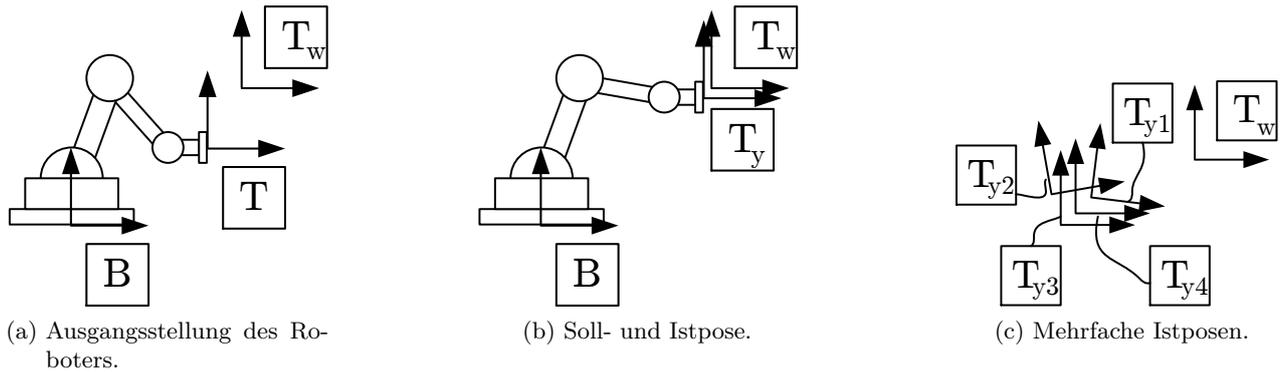


Abbildung 2.5: Pose-Genauigkeit und Pose-Wiederholgenauigkeit.

der Struktur des Roboters selbst wirkt, kann erfasst werden. Werden diese Informationen verarbeitet, kann eine sensorlose Kraft-Momentenregelung implementiert werden. Dieser Ansatz wird in [Win06] näher beschrieben.

2.3 Genauigkeit von Robotern

2.3.1 Normung nach DIN EN ISO 9283

Die Genauigkeit von Industrierobotern ist eine kompliziert zu erfassende Systemeigenschaft. Sie spielt bei kooperierenden Robotern eine wesentliche Rolle. Die Ermittlung entsprechender Leistungskenngrößen wurde in DIN EN ISO 9283 [DIN9283] genormt. Sie definiert „Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethode“ von Industrierobotern. Neben den unten angegebenen Definitionen wurden auch Vorgaben zum Ermitteln der Leistungskenngrößen („Prüfmethode“) genormt.

Die „Pose-Genauigkeit“ ist in [DIN9283] definiert als „die Abweichung zwischen einer Sollpose und dem Mittelwert der Istposen, die sich beim Anfahren der Sollpose aus derselben Richtung ergeben.“ Demgegenüber ist die „Pose-Wiederholgenauigkeit“ definiert als „die Exaktheit der Übereinstimmung zwischen den Istposen nach n wiederholten Anläufen zu derselben Sollpose in derselben Richtung.“

Diese beiden Definitionen sollen an einem kurzen Beispiel erläutert werden. In Abbildung 2.5a bezeichnet B den Basis-Frame des Roboters und T den TCP-Frame in der Ausgangsstellung (vgl. Basis- und Werkzeugkoordinatensystem in [DIN9787]). Es wird dem Roboter vorgegeben, sich so zu bewegen, dass der TCP in die Sollpose T_w überführt wird. Nach Durchführung der Bewegung kommt der TCP des Roboters in der Istpose T_y zum Stehen (vgl. Abbildung 2.5b). Es gibt eine Differenz zwischen Soll- und Istpose, und diese Abweichung von Sollpose zu Istpose ist die Pose-Genauigkeit. Wird hingegen mehrfach versucht, die Sollpose einzunehmen, so werden verschiedene Istposen T_{y1} bis T_{yn} eingenommen (vgl. Abbildung 2.5c). Der mittlere Abstand dieser Istposen zueinander wird Pose-Wiederholgenauigkeit genannt. Umgangssprachlich wird verkürzend von Absolutgenauigkeit (Pose-Genauigkeit) und Wiederholgenauigkeit (Pose-Wiederholgenauigkeit) gesprochen. Die vereinfachte Terminologie wird auch in dieser Arbeit verwendet.

Tabelle 2.2: Genauigkeiten ausgewählter Roboter.

Hersteller	Modell	Typ	Traglast ^a	Reichweite ^b	Genauigkeit ^c	Bemerkung ^d
FANUC	R-2000iB /125L	6-Achs	125	3005	0,2	Wdhg.
ABB	IRB 6640-180	6-Achs	180	2550	0,07/0,7	Pwdhg./ Bahnwdhg.
	IRB 360-1/1130 FlexPicker	Delta	1	1130 ^e	0,1	Pwdhg.
Comau	SMART NJ 130	6-Achs	130	2616	0,07	Wdhg. 9283
KUKA	KR 16-2	6-Achs	16	1611	+/-0,05	Pwdhg. 9283
	KR 180 L130-2	6-Achs	130	3100	+/-0,06	Pwdhg. 9283
	KR 1000 titan	6-Achs	1000	3202	+/-0,2	Pwdhg. 9283
	LBR 4	7-Achs			+/-0,05	Wdhg. 9283
Stäubli	TS80	SCARA	2	800	+/-0,01	Wdhg.

^ain kg

^bin mm

^cin mm. je nach Hersteller absolut (ohne Vorzeichen) oder relativ (+/-)

^dAngabe laut Datenblatt: Wdhg. $\hat{=}$ Wiederholgenauigkeit; Pwdhg. $\hat{=}$ Positionswiederholgenauigkeit; Bahnwdhg. $\hat{=}$ Bahnwiederholgenauigkeit; 9283 $\hat{=}$ nach ISO 9283

^eDurchmesser des Arbeitsbereichs

Überdies werden in der Norm DIN EN ISO 9283 auch die Bahnkenngrößen „Bahn-Genauigkeit“, „Bahn-Wiederholgenauigkeit“ und „Bahn-Genauigkeit bei Umorientierung“ definiert. Diese Kenngrößen geben Abweichungen gegenüber einer Sollbahn vor.

In der Norm wird bei allen Kenngrößen zwischen Positions- in Millimeter und Orientierungsgenauigkeit in Grad unterschieden. Je nach Anwendungsfall muss entschieden werden, welche Genauigkeit den größeren Einfluss auf die zu bewältigende Aufgabe hat. Im Allgemeinen kann dazu keine Aussage getroffen werden.

Es gibt noch keine Normung von Kenngrößen kooperierender Roboter. Im Projekt NormKIR des Fraunhofer IPA [Spi12] wurde eine diesbezügliche Normungsaktivität angestoßen.

2.3.2 Genauigkeiten ausgewählter Robotersysteme

Tabelle 2.2 zeigt Genauigkeitswerte einiger ausgewählter Robotersysteme. Die Angaben sind den Datenblättern der Hersteller entnommen. Die gewählten Systeme decken wesentliche Bauformen ab, zu den sechssachsigen Systemen wurden Typen und Leistungsklassen wesentlicher Hersteller eingebunden. Die typische Positions-Wiederholgenauigkeit übertrifft zumeist 0,1 mm. Roboter mit geringerer Traglast weisen eine höhere Wiederholgenauigkeit auf.

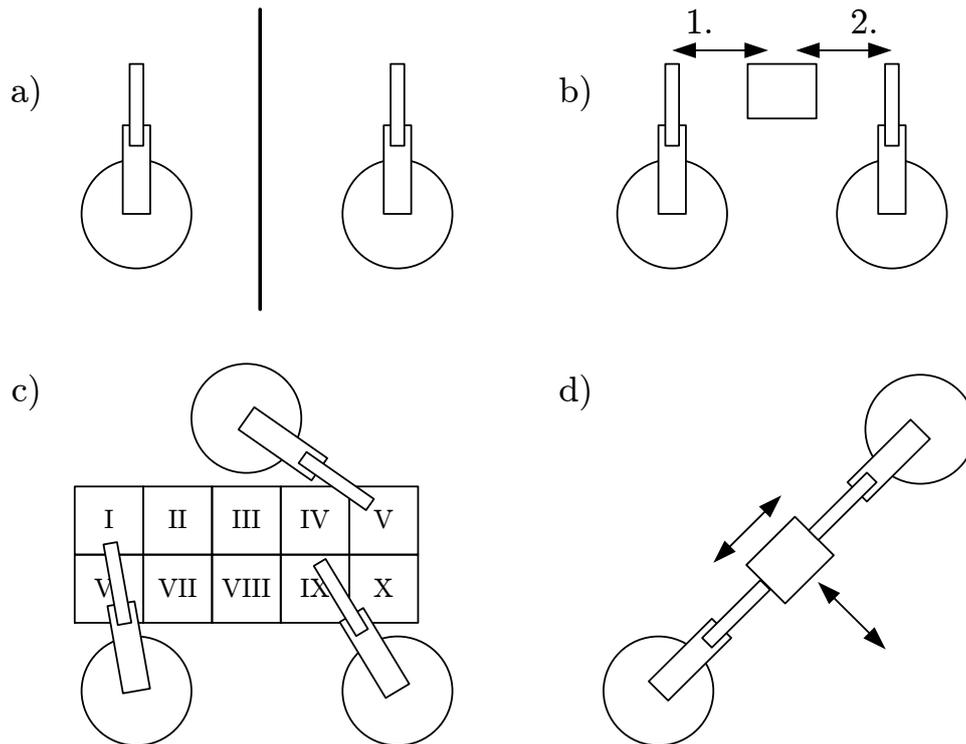


Abbildung 2.6: Einzelroboter und drei Arten der Roboterkooperation

Die Tabelle enthält Standardroboter. Es werden auch Roboter vertrieben, die gegenüber der Standardserie erhöhte Genauigkeiten einhalten sollen und entsprechend teurer sind. Dies wird durch ein komplexeres Kalibrierverfahren, die Verwendung eines in Echtzeit berechneten Genauigkeitsmodells und ausgewählter Maschinenbauelemente erreicht.

2.4 Kooperierende Roboter

2.4.1 Übersicht

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Arten der Roboterkooperation und ihre Anwendungsfälle erläutert.

Einzeln arbeitende Roboter Eine typische Anwendung für einzeln arbeitende Roboter ist z. B. das Punktschweißen einer Karosserie im Automobilbereich. Das Werkstück (die Karosserie) wird dabei über eine Fördereinrichtung in den Arbeitsraum des Roboters bewegt. Hat es eine fest definierte Position erreicht, beginnt der Roboter mit dem Bearbeiten und durchläuft ein fest einprogrammiertes Programm. Dabei bewegt er das Werkzeug (die Schweißzange) entlang festgelegter Bahnen und setzt an einer Reihe von Positionen Schweißpunkte. Nach dem Abschluss seiner Arbeit zieht sich der Roboter zurück und wartet auf den nächsten Einsatz.

Dieses Szenario beschreibt die überwiegende Mehrzahl der weltweit eingesetzten Roboter. Dabei sind keinesfalls alle Roboter Schweißroboter. Jedoch werden viele Roboter unabhängig von anderen Robotern betrieben (vgl. Abbildung 2.6a).

Gegenseitiges Warten Die einfachste Art der Roboterkooperation besteht im gegenseitigen Warten. Sollen zwei Roboter nacheinander das gleiche Werkstück bearbeiten, so holt beispielsweise der erste Roboter das Werkstück und legt es auf einer Bearbeitungsstation ab. Er zieht sich zurück und gibt die Bewegung des folgenden Roboters frei. Nun führt der zweite Roboter seine Bearbeitungsaufgabe durch und gibt anschließend die Bewegung des nächsten Roboters oder einer anderen Automatisierungskomponente frei.

Derartige Roboterkooperationen sind vielfach im Einsatz. Sie werden überall dort eingesetzt, wo mehrere Roboter nacheinander ein Werkstück bearbeiten oder transportieren (vgl. Abbildung 2.6b).

Gemeinsamer Arbeitsraum Die nächste Stufe der Roboterkooperation besteht in einem gemeinsamen Arbeitsraum und einer gegenseitigen Rücksichtnahme der Roboter aufeinander. Beispielsweise kann eine Schweißaufgabe an einem Bauteil auf mehrere Roboter verteilt werden, die gleichzeitig arbeiten. Es gilt eine Kollision der Roboter unter allen Umständen zu vermeiden. Dazu wird der Arbeitsraum der Roboter in mehrere Bereiche aufgeteilt. In jedem Bereich darf sich zu einem Zeitpunkt immer nur ein Roboter aufhalten. Beim Befahren und Verlassen eines solchen Bereichs informieren die Roboter sich gegenseitig, wodurch Kollisionen vermieden werden.

Diese Art der Kooperation wird als Arbeitsraunteilung oder engl. „robots sharing same workspace“ bezeichnet. Sie wird industriell eingesetzt und gilt als hocheffiziente Lösung, aber eher komplexe Art der Roboterprogrammierung (vgl. Abbildung 2.6c).

Bahnsynchrone Kooperation Die komplexeste Art der Kooperation zwischen Robotern ist die genaue Synchronisation der beiden Roboter zueinander. Wenn beispielsweise ein Werkstück von beiden Robotern gegriffen und anschließend gemeinsam zum Zielpunkt verfahren wird, so müssen alle Achsen der Roboter bahnsynchron miteinander arbeiten. Während der gemeinsamen Bewegung muss ständig in die Zukunft geplant werden, da ein reiner Austausch der aktuellen Positionen zu großen Abweichungen der Synchronität führen würde. Diese Art der Kooperation wird bahnsynchrone Kooperation genannt. Außerdem gibt es die Möglichkeit, der reinen Kooperationsbewegung eine zusätzliche Bewegung zu überlagern. Beispielsweise kann ein Werkstück aus einer Bearbeitungsmaschine in die nächste Bearbeitungsmaschine transportiert werden und währenddessen von einem kooperierenden Roboter bearbeitet werden. Die Bearbeitungsbewegung des zweiten Roboters wird dabei der eigentlichen Roboterkooperation überlagert. Dadurch können Nebenzeiten in Hauptzeiten gewandelt werden (vgl. Abbildung 2.6d).

Typische Anwendungsszenarien für derart kooperierende Roboter liegen in den Bereichen

- Handhabung schwerer Bauteile
- Handhabung großer Bauteile
- Nicht destruktives Prüfen von Bauteilen
- Fertigung von Großstrukturen
- Montage großer Baugruppen in der Endmontage

2.4.2 Spezifische Eigenschaften kooperierender Robotersysteme

Beim Einsatz kooperierender Roboter gibt es eine Reihe von Besonderheiten, die beim Einsatz von Einzelrobotern nicht zum Tragen kommen und nun erläutert werden.

Genauigkeit Bei Einzelrobotersystemen ist für die Genauigkeit des Gesamtsystems in vielen Fällen die Wiederholgenauigkeit des Roboters ausschlaggebend, da die Fahrkoordinaten häufig geteilt werden, wodurch die recht präzise Wiederholgenauigkeit zum Tragen kommt. Ausnahmen bilden hochgenaue Bearbeitungsverfahren wie robotergestütztes Fräsen, wo eine Nachjustage prinzipbedingt nicht möglich ist. Dabei und bei kooperierenden Robotern führen selbst kleine Abweichungen von der Sollbahn zu einem Bearbeitungsfehler und zu hohen Kräften an den Robotern, die zur Beschädigung des Werkstücks oder des Roboters führen können. Bei kooperierenden Robotersystemen spielt die Genauigkeit der einzelnen Roboter eine wichtigere Rolle als beim Einsatz von Einzelrobotern.

Steuerungshierarchie In der Regel werden mit einer einzelnen Robotersteuerung vier (z. B. SCARA-Roboter) bis sieben (LBR von KUKA oder SIA20D von MOTOMAN) Antriebe zuzüglich externer Achsen gleichzeitig gesteuert. Bei kooperierenden Robotern müssen mehrere Roboter gesteuert werden, so dass sich die Anzahl der zu steuernden Achsen erhöht. Bei z. B. vier Robotern mit je sechs Achsen müssen 24 Antriebe gleichzeitig angesteuert werden, was eine anspruchsvolle Aufgabe ist. Zur Steuerung werden zwei unterschiedliche Konzepte verfolgt. Einige Hersteller setzen auf eine einzige Steuerung, die gleichzeitig alle Achsverstärker betreibt (u. a. ABB, FANUC, MOTOMAN). Andere Hersteller verwenden für jeden Roboter eine eigene Steuerung, ähnlich wie im Einzelroboterbetrieb, wobei die Steuerungen vernetzt werden, um Positions- und Synchronisierungsdaten auszutauschen (u. a. KUKA). Beide Konzepte haben Vor- und Nachteile. Durch den Verzicht auf mehrere Steuerungen kann beim Ein-Controller-Konzept eine kompakte Bauweise erreicht werden, da lediglich der Bauraum für die zusätzlichen Antriebsverstärker benötigt wird. Hingegen haben die Mehr-Controller-Lösungen den Vorteil, dass mehr Rechenleistung zur Verfügung steht und damit mehr Roboter kooperierend betrieben werden können.

Kalibrierung Die Kalibrierung eines kooperierenden Roboters unterscheidet sich nicht von der Kalibrierung eines einzeln arbeitenden Roboters. Zur Erhöhung der Absolutgenauigkeit können jedoch besondere Kalibrieremethoden eingesetzt werden, die von verschiedenen Herstellern (z. B. „KUKA High-Accuracy Robots“ oder „ABB Absolute Accuracy“) oder von Fremdfirmen (z. B. LaserLab der Firma Wiest AG²) angeboten werden.

Über die Kalibrierung jedes Einzelroboters hinaus muss jeder beteiligte Roboter die Position der anderen Roboter kennen, um der Bewegung eines anderen Roboters folgen zu können. Zu diesem Zweck werden Verfahren verwendet, die den Kalibrierverfahren zum Einlernen des Tool Center Points eines Werkzeugs ähneln. Auch eine Kalibrierung mithilfe von Messhardware ist möglich, wie z. B. mit Lasertrackern, photogrammetrischen Sensoren oder Koordinatenmessmaschinen.

Eine ähnliche Kalibrierung erfolgt im Bereich der offline programmierten Roboter. Diese müssen bei der Inbetriebnahme in der Zelle einen vorher festgelegten Fixpunkt speichern, auf den sich alle offline programmierten Koordinaten beziehen. Um Roboter in solchen Zellen oder kooperierende

²Internetadresse: <http://www.wiest-ag.de>; Abrufdatum: 23.05.2013

Roboter im Fehlerfall schnell ersetzen zu können, gibt es besonders genaue Roboteraufnahmen, die ein wiederholgenaues Einsetzen des neuen Roboters ermöglichen.

Programmierung Bei der Programmierung kooperierender Roboter müssen die hier genannten Besonderheiten beachtet werden. Dadurch wird die Programmierung komplexer als im Fall eines Einzelroboters. Bei Ein-Controller-Hierarchien ergibt sich hinsichtlich der Programmstruktur nur ein geringer Unterschied, da nach wie vor ein einzelnes Programm ausgeführt wird. Bei Mehr-Controller-Hierarchien müssen mehrere Programme auf unterschiedlichen Steuerungsrechnern kommunizieren und korrekt miteinander arbeiten, was u. a. zu Race Conditions und Deadlocks führen kann (siehe dazu z. B. [Tan09]). Offline-Programmiersysteme erleichtern die Programmierung erheblich.

Antriebssynchronisation Eine weitere Herausforderung beim Betrieb kooperierender Roboter liegt in der Synchronisierung der Antriebe von mehreren Robotern. Steuert eine gemeinsame Steuerung alle Roboter auf einmal, so wird dieses Problem durch die gleichzeitige Ansteuerung aller Antriebsverstärker durch den Interpolator des Mastersystems gelöst. Besitzt jeder Roboter eine eigene Steuerung, werden die einzelnen Interpolatoren über entsprechende Echtzeitkommunikation synchronisiert. Dazu ist eine spezielle Verkabelung notwendig. Die genannte Problematik wird von den Herstellern beherrscht.

Singularitäten Ein sechsachsiger serieller Roboter hat typischerweise drei Singularitäten (Überkopf-, Ellenbogen- und Handachssingularität). Beim Einsatz mehrerer Roboter summiert sich die Anzahl der Singularitäten. Während bei der Programmierung eines Einzelroboters im Wesentlichen auf die Handachssingularität Rücksicht genommen werden muss (in der Praxis spielen Überkopf- und Ellenbogensingularität nur selten eine Rolle), müssen bei z. B. drei kooperierenden Robotern mindestens die drei Handachssingularitäten berücksichtigt werden. In Werkzeugen zur offline-Programmierung kann der Roboterprogrammierer unterstützt werden, dennoch stellt die Programmierung kooperierender Roboter höhere Anforderungen an den Programmierer als die Programmierung von Einzelrobotern.

Eingeschränkter Arbeitsraum Der Arbeitsraum (siehe [DIN8373]) eines einzelnen Roboters ergibt sich aus den Abmessungen der Armglieder und der Beweglichkeit der Gelenke. Bei kooperierenden Robotern wird der Arbeitsraum jedoch durch die gemeinsame Bewegung mit den anderen Robotern eingeschränkt. Abbildung 2.7 zeigt eine vereinfachte Darstellung des gemeinsamen Arbeitsraums für drei kooperierende Roboter.

2.5 Stand der industriellen Technik

In diesem Unterkapitel werden bereits genormte Begriffe und heute industriell eingesetzte Technologien erläutert, die im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit behandelten Themenfeldern stehen.

Die heute eingesetzten und erhältlichen Systeme kooperierender Roboter werden in Abschnitt 2.5.1 dargestellt. In Abschnitt 2.5.2 erfolgt ein Überblick über aktuelle Kraftsensorik und deren Aufbau, da diese Messfühler die in Kapitel 5 erarbeiteten Kraftregelungsstrategien erst ermöglichen. Abschlie-

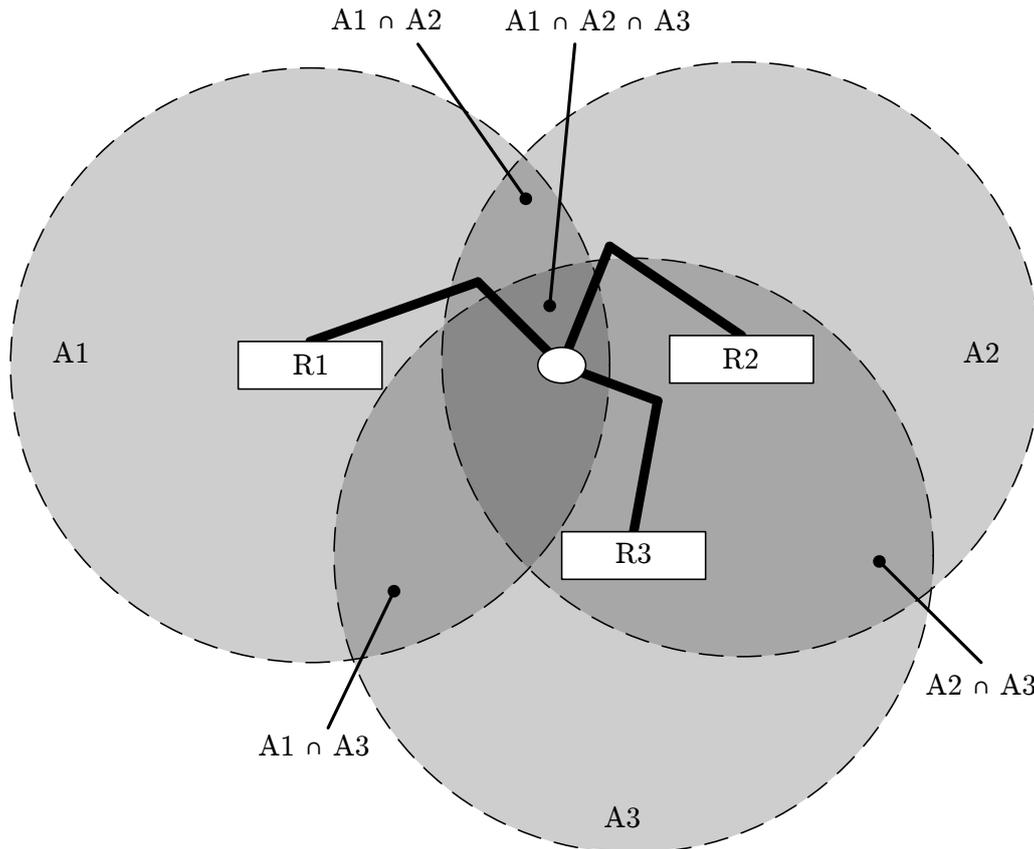


Abbildung 2.7: Gemeinsamer Arbeitsraum kooperierender Roboter. R_1 , R_2 und R_3 bezeichnen die Roboterbasen, A_1 , A_2 und A_3 die Arbeitsräume und die Schnittmengen. Der dunkle Bereich in der Mitte ($A_1 \cap A_2 \cap A_3$) repräsentiert den gemeinsamen Arbeitsraum der Roboter.

hend werden in Abschnitt 2.5.3 industriell verfügbare Kraftregelsysteme und Echtzeitschnittstellen vorgestellt.

2.5.1 Kooperierende Robotersysteme verschiedener Hersteller

Steuerungssysteme, die eine Kooperation von Robotern erlauben, sind bei allen großen Roboterherstellern mit unterschiedlichen Bezeichnungen erhältlich. Hier eine Auswahl von heute erhältlichen Systemen (vgl. Abbildung 2.8):

ABB MultiMove ABB bietet mit der MultiMove-Technologie eine übergeordnete Robotersteuerung, die bis zu 36 Achsen von bis zu vier Robotern simultan ansteuern kann.³

FANUC Multi Robot Control FANUC bietet eine Reihe von Software-Optionen für seine Roboter an. Eine dieser Optionen wird Multi Robot Control genannt. Hierbei werden bis zu vier Roboter mit einer Steuerung synchron oder unabhängig voneinander betrieben.⁴

KUKA RoboTeam KUKA stellt mehrere Querschnittstechnologien zur Verfügung, darunter auch das Applikationspaket RoboTeam. Damit können bis zu 15 Roboter gleichzeitig synchronisiert

³Internetadresse: <http://www.abb.de/robotics>; Abrufdatum: 23.05.2013

⁴Internetadresse: <http://www.fanucrobotics.de/>; Abrufdatum: 23.05.2013



(a) ABB MultiMove.



(b) FANUC Multi Robot Control.



(c) KUKA RoboTeam.



(d) MOTOMAN Multi-Robot Technology: SDA10.

Abbildung 2.8: Industrielle kooperierende Robotersysteme verschiedener Hersteller.

werden. Dabei verfügt jeder Roboter über eine eigene Steuerung. KUKA unterscheidet zwischen ProgramCooperation und MotionCooperation. Zur Gestaltung von Arbeitsbereichsverriegelungen und Programmablaufsynchronisation dient ProgramCooperation, MotionCooperation ermöglicht die Kopplung mehrerer Roboter entlang einer Bahn.⁵

MOTOMAN Multi-Robot Technology Mit der Multi-Robot-Technology bietet auch MOTOMAN eine mehrroboterfähige Industriesteuerung an. Dabei kann eine Robotersteuerung bis zu acht Roboter mit insgesamt 72 Achsen steuern.⁶

2.5.2 Kraft-Momenten-Sensorik

In heute industriell eingesetzten Kraft- und Momenten-Sensoren (Kraft-Momenten-Sensoren, KMS) werden die zu messenden Kräfte in einen mechanischen Körper eingeleitet, dessen Größenänderung

⁵Internetadresse: <http://www.kuka-robotics.com/>; Abrufdatum: 23.05.2013

⁶Internetadresse: <http://www.yaskawa.eu.com/>; Abrufdatum: 23.05.2013

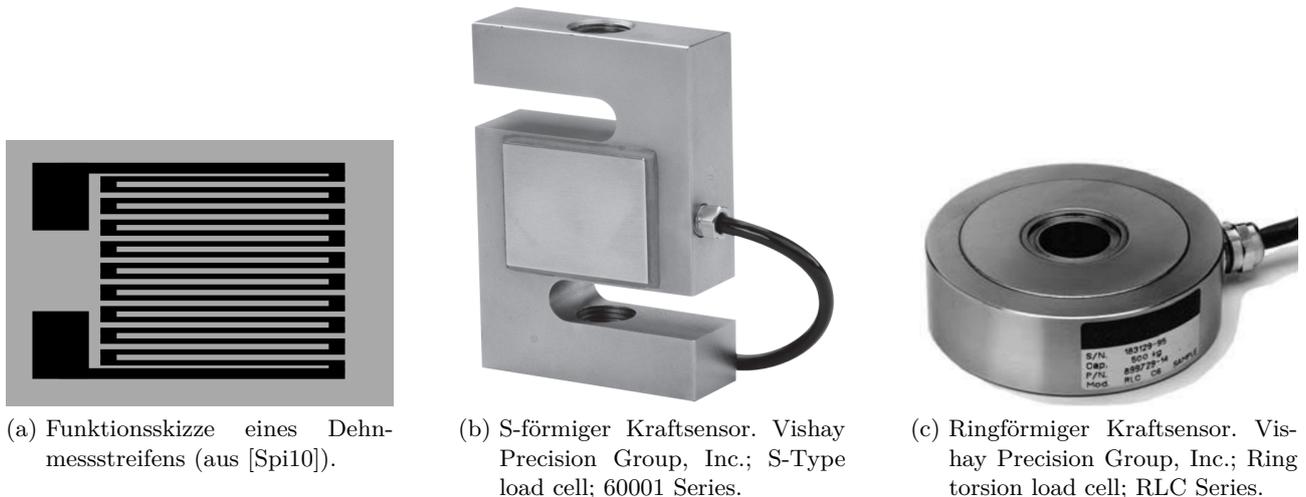


Abbildung 2.9: Dehnmessstreifen und eindimensionale Kraftsensoren.

erfasst und zur Berechnung der wirkenden Kräfte und Momente herangezogen wird. Es gibt ein- und mehrdimensionale Messsysteme.

Bei seriellen Robotern können alternativ zum Einsatz eines KMS am Endeffektor durch Strommessung die Momente in den Antrieben erfasst werden. Dies wird in Abschnitt 2.5.3 behandelt.

Eindimensionale Sensoren Das heute überwiegend eingesetzte Messprinzip zur Erfassung der durch die einwirkende Kraft verursachten Verformung basiert auf der Messung des Widerstandes von Leiterbahnen. Ein stromdurchflossener Leiter hat den elektrischen Widerstand $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ mit dem materialabhängigen spezifischen Widerstand ρ , dem Leiterquerschnitt A und der Leiterlänge l . Wird der Leiter durch Druck gestaucht oder durch Zug verlängert, so verändert sich der Widerstand des Leiters⁷. Dieses Prinzip wird beim Dehnmessstreifen (DMS) verwendet, um die Stauchung oder Längung des Messkörpers zu ermitteln. Dazu wird der Leiter mäanderförmig auf eine Trägerschicht aufgebracht (vgl. Abbildung 2.9a). Entlang der erwarteten Verformungsrichtung ist der Leiter dabei dünner als senkrecht dazu. Verändern sich die Abmessungen des Messkörpers, dann wird auch der Leiter verlängert oder gestaucht. Der DMS muss fest mit dem Messkörper verbunden sein, was in der Regel durch Verklebung erreicht wird. Zu weiteren Messverfahren zur Erfassung von Kräften sei auf [Hof07] verwiesen. Die Abbildungen 2.9b und 2.9c zeigen zwei typische Bauformen industriell eingesetzter, eindimensionaler Kraftsensoren.

Mehrdimensionale Sensoren Zur Erfassung der vollständigen Kraft-Momenten-Information muss sechssachsig gemessen werden (drei Kraft- und drei Momenten-Komponenten). Hersteller solcher Systeme sind u. a. die US-amerikanischen Unternehmen JR3, Inc.⁸ und ATI INDUSTRIAL AUTOMATION, INC.⁹ Beide Hersteller bieten Messsysteme in verschiedenen Bauformen und mit unterschiedlichen Erfassungsbereichen an. Die Sensoren weisen eine hohe Steifigkeit auf, weswegen solche Systeme als

⁷Die Veränderung des Leiterquerschnitts A kann bei entsprechendem Verhältnis von Ausgangslänge l_0 zu gestauchter/verlängerter Länge l vernachlässigt werden: $l/l_0 \ll 1$

⁸In Deutschland vertrieben durch die Firma IPR GmbH, Schwaigern.

⁹In Deutschland vertrieben durch die Firma Schunk GmbH & Co. KG, Lauffen/Neckar.



Abbildung 2.10: Mehrdimensionale Kraftsensoren.

starre KMS bezeichnet werden. Das Gehäuse des Sensors ist über Stege mit einer zentralen Platte im Inneren verbunden. An den Stegen sind DMS angebracht, die die Verformung der Stege erfassen. Durch Modellierung der Nachgiebigkeit und eine Kalibrierung kann aus den Verformungen der DMS auf die an der zentralen Platte wirkenden Kräfte und Momente geschlossen werden (vgl. Abbildung 2.10b).

Demgegenüber steht ein nachgiebiges System, das am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt-technik in Oberpfaffenhofen entwickelt wurde [Koe00]. Es besitzt eine Messplatte, die gegenüber dem Gehäuse durch die wirkenden Kräfte und Momente verschoben werden kann. Im Inneren wird diese Auslenkung durch ein optisch messendes System erfasst. Aus der gemessenen Verschiebung und der bekannten Steifigkeit der die Messplatte lagernden Federn können die wirkenden Kräfte und Momente bestimmt werden (vgl. Abbildung 2.10c).

Werden KMS eingesetzt, um Kräfte und Momente in beschleunigten Systemen zu erfassen (z. B. am beschleunigten Endeffektor eines Roboters), dann überlagern sich statische und dynamische Kräfte und Momente. Daher wurden sechssachsige KMS durch sechssachsige messende Beschleunigungssensoren erweitert. Mit dieser Information können bei Kenntnis der bewegten Masse die statisch wirkenden Kräfte von den dynamischen Massenträgheitskräften getrennt werden.

2.5.3 Kraftregelung und Echtzeitschnittstellen

Industrielle Kraftregelungssysteme ABB bietet ein System mit Namen „Force Control for Machining“ an, das schwerpunktmäßig beim Bearbeiten mit Industrierobotern eingesetzt werden soll. FANUC bietet mehrere Optionen zur Kraftregelung an (Force Sensor, Kraftgesteuertes Fügen & Phase Matching, Force Contouring). Mögliche Anwendungsfelder bei FANUC sind Montage, Schleifen und Polieren. Die Option ForceTorqueControl von KUKA ermöglicht die Reaktion auf äußere Kräfte. Alle Systeme beinhalten Hardware (Sensor, Schlauchpaket und z. T. zusätzliche Steckkarten) und eine parametrierbare Softwarekomponente, die mit der Standardbenutzeroberfläche der Robotersteuerung konfiguriert werden kann.

Kraftregelung durch Strommessung Zur Kraftüberwachung werden die in einer bestimmten Konfiguration fließenden Antriebsströme eines Roboters erfasst und bei einer anschließenden kleinen Bewegung überwacht. Treten unerwartete Stromänderungen auf, kann die Geschwindigkeit reduziert oder eine Alternativbewegung eingeleitet werden. Ein solches Konzept verfolgt u. a. der Hersteller FANUC, der die Option „Collision skip“ und „Soft float“ anbietet [Fan10]. MOTOMAN vertreibt eine ähnliche Funktion unter dem Namen „servo float“ [Yas10].

Echtzeitschnittstellen zur Regelung Roboter werden in einer herstellerspezifischen Roboterprogrammiersprache programmiert. Dabei können Bahnpunkte vorgegeben werden, die der Roboter nacheinander abfährt. Um Signale von außen zu verarbeiten, besitzen alle industriell eingesetzten Roboter Schnittstellen, über die sie mit entsprechenden Signalwandlern verbunden werden können. Diese Signale können im Roboterprogramm ausgewertet werden.

In einigen Situationen wie z. B. der Kraftregelung ist es erforderlich, innerhalb weniger Millisekunden auf Änderungen von Signalen zu reagieren. Daher haben die Roboterhersteller spezielle Schnittstellen oder Programmierbefehle geschaffen, mit denen eine gerade durchgeführte Bewegung angepasst werden kann (z. B. KUKA Robot Sensor Interface, MOTOMAN Real-Time Path Correction Function, Stäubli ALTER-Befehl). Das in dieser Arbeit verwendete KUKA Robot Sensor Interface arbeitet mit einer Zykluszeit von 12 ms. Neuere Varianten erlauben eine Zykluszeit von 4 ms.

2.6 Stand der Forschung

In diesem Unterkapitel wird ein Überblick zum Stand der Forschung bezüglich Kraftregelung kooperierender Roboter präsentiert. Im zweiten Abschnitt werden Prozessmodelle für Handhabungsaufgaben dargestellt.

2.6.1 Kraftregelung kooperierender Industrieroboter

Die Problematik der Kraftregelung kooperierender Roboter wird bereits seit den 1980er Jahren untersucht. Eine der ersten Arbeiten [Hay86] beschäftigt sich rein theoretisch mit der hybriden Impedanzregelung und ersten Reglerstrukturen kooperierender Roboter. Aufgegriffen wird dieses Konzept u. a. in [Uch87, Uch88], wo auch Untersuchungen an realen, vierachsigen Robotern mit eigener Robotersteuerung durchgeführt wurden. BRUHM et al. analysieren die Kraftregelung kooperierender Roboter durch aktive Nachgiebigkeit [Bru89, Bru87a]; der Fokus der Untersuchungen liegt im Bereich der Weltraumrobotik. [Bru87b] zeigt eine Übersicht über die Anwendungsmöglichkeiten und mögliche Steuerungsarchitekturen kooperierender Robotersysteme. In [Wal89, Wal91] und [Uns94b, Uns94a] befassen sich die Autoren mit der Problematik der Lastverteilung auf mehrere Roboter in Theorie und Simulation. Eine adaptive Steuerung unter Messung der Beschleunigung wird in [Hu95] vorgeschlagen und experimentell an vierachsigen Robotern geprüft. Die Trennung in interne Kräfte, die zu einer Verformung des Werkstücks führen, und externe Kräfte, die eine Bewegung des Werkstücks verursachen, wird in [Bon94, Bon96] für verschiedene Greifsituationen analysiert und simulationsbasiert dargestellt. Eine umfangreiche Arbeit zur Lösung kinematischer Planungsprobleme kooperierender Roboter mit Hindernissen im Raum und unter Einhaltung der Leistungsparameter der Roboter stellt [Kog94] dar.

Ein Sprung in der Entwicklung hin zu realen Robotern und deren Verhalten ist in [Kos97] zu sehen. Hier wird eine sechssachsige entkoppelte Impedanzregelung an realen Robotern mit einem platten- und stabförmigen Werkstück dargestellt.

In [Alb98] wurde ein Ansatz verfolgt, der der Lösungsidee dieser Arbeit ähnelt. Es wird das Konzept einer selbsteinstellenden Nachgiebigkeitsregelung für kraftschlüssig kooperierende Industrieroboter vorgestellt. Der Autor führt die Untersuchungen an zwei industriellen Robotern „Manutec R3“ durch und verwendet die dafür vorhandenen Industriesteuerungen. Jedoch muss bei dem eingesetzten Robotersystem bereits die Roboterkooperation durch die externe Regelung durchgeführt und überwacht werden. Heute gibt es industrielle Systeme, bei denen diese Kooperation bereits vom Hersteller implementiert wurde und verwendet werden kann. In [Alb98] wird das zu greifende Objekt durch die Roboter geklemmt und nicht – wie industriell üblich – starr und an fest definierten Punkten gegriffen. Hieraus ergeben sich neue Schwierigkeiten (Normalkraft am Kontaktpunkt muss ausreichen, um Reibung oberhalb der Haftgrenze zu halten), was einen industriellen Einsatz unter praxisnahen Bedingungen kaum vorstellbar macht.

In mehreren Werken [Cac99, Sic99, Sic00, Sic10] wurden von SICILIANO et al. Methoden zur Kraftregelung präsentiert, die in mehreren Arbeiten [Cac00, Cac01] auch an kooperierenden Robotern evaluiert wurden. Dabei wurden Industrieroboter des Herstellers Comau mit einer stark modifizierten Steuerungsarchitektur verwendet [Cac05]. In [Bek01] wird die Roboterkooperation zweier Stäubli-Industrieroboter grundlegend dargestellt, wobei beide Roboter kraftgeregelt betrieben werden und das Impedanzverhalten beispielhaft parametrisiert wird. Die Kraftregelung von mit nachgiebigen Greifern gegriffenen, nachgiebigen Werkstücken behandelt [Don02] mit einer eigenen dreiachsigen Steuerung von Sechs-Achs-Robotern.

Die Fuzzy-Kraftregelung wurde in [Lia02] simulationsbasiert zur Anwendung bei kooperierenden Robotern gebracht. Dabei liegt der Schwerpunkt in einer adaptiven Ausführung der Regelung, so dass auch auf unbekannte Situationen und andere Greifsituationen reagiert werden kann. In [Bra04] wird die erfolgreiche Anwendung von adaptiver Fuzzy-Steifigkeitsregelung an realen Robotern bei translatorischen Bewegungen gezeigt.

Aktuelle Untersuchungen zum Thema kooperierende Roboter wurden in [Rei09, Rei10] durchgeführt. Die Autoren konzentrieren sich insbesondere auf die einfache Programmierung von Systemen kooperierender Roboter und zeigen Wege zur intuitiven Kombination von Kraft- und Positionsregelung auf. Es wird ein ähnliches Setup wie in dieser Arbeit verwendet, jedoch mit kleineren Robotern, einer leichteren Last und einem im Vergleich nachgiebigeren Werkstück.

2.6.2 Ablaufmodelle zur Werkstückhandhabung

Pick-and-Place ist eine der Hauptaufgaben, für die Roboter eingesetzt werden. Darunter versteht man das Aufnehmen eines Werkstücks an einer bestimmten Position, den Transport zur Zielposition und das Ablegen an der dortigen Position. Dieser Zyklus wird ständig wiederholt. Die zugrunde liegende Idee des effizienten Materialflusses wird seit den frühesten Anfängen der Robotik verfolgt. Tatsächlich ist der Übergang von mehrachsigen Materialflussmaschinen zu Robotern auch heute noch fließend.

Die Synthese von Pick-and-Place-Bahnen wird in [Ang88] untersucht. Ziel ist eine von Robotern mit bestimmten Randbedingungen fahrbare Trajektorie. In [Loz89] wird Pick-and-Place als eines von mehreren Szenarien betrachtet, für das Roboter eingesetzt und programmiert werden.

Ablaufmodelle, die den Prozess des Pick-and-Place genauer untersuchen und analysieren, sind nur vereinzelt zu finden. Beispielsweise wird in [Ziv06] eine Gliederung in sechs Schritte vorgeschlagen, die allerdings im Verlauf des Buches nicht weiter verfolgt wird. In [Alb02] wird ein zweiphasiges Modell erwähnt, das bereits in [Alb98] Verwendung fand. Dabei wird ein klemmendes Ergreifen des Werkstücks durch Kraftüberwachung und ein kraft geregelter Transport durchgeführt. Das Ablegen des Werkstücks wird nicht näher erläutert.

2.7 Auswertung und Defizite

2.7.1 Auswertung des Standes der Technik und der Forschung

Die Technologie der kooperierenden Industrieroboter steht heute zur Verfügung und wird in der Industrie angewendet. Überdies sind Kraftregelungssysteme technisch verfügbar und werden bei Einzelrobotersystemen eingesetzt. Eine Verknüpfung beider Technologien als kraftgeregelt kooperierende Industrieroboter zur Überwindung der unerwünschten Kräfte im Werkstück hat industriell noch nicht stattgefunden. Es gibt keinen Hersteller, der eine derartige Technologie heute anbietet oder vertreibt.

Die Forschung im Bereich der kooperierenden Roboter und der Kraftregelung wird bereits seit vielen Jahren fortgeführt. Die Kombination von Kraftregelung und kooperierenden Robotern wurde erstmals in den 1980er Jahren untersucht. Die damaligen Untersuchungen waren simulationsbasiert, da die damals vorhandene Rechnerleistung für eine reale echtzeitfähige Regelung nicht ausgereicht hat. Moderne Umsetzungen einer kraftgeregelter Roboterkooperation finden zumeist im Umfeld der Servicerobotik statt, wo andere Anforderungen an die Systeme gestellt werden als in der Industrierobotik.

Überdies gibt es einige Ansätze, in denen Industrieroboter zur kraftgeregelter Roboterkooperation eingesetzt wurden. In nahezu allen Fällen wurde dabei jedoch eine speziell angepasste Robotersteuerung verwendet, da die meist modellbasierten Regelungsalgorithmen einen direkten Zugriff auf die Motormomente der Roboterantriebe benötigen. Eine Schnittstelle zum Zugriff auf diese Stellmomente bieten Standard-Industriesteuerungen jedoch nicht, was einen Einsatz dieser Regelungsalgorithmen auf typischen Industriesteuerungen erschwert.

2.7.2 Defizite und daraus abgeleitete Anforderungen

Der Stand der Technik und der Forschung weist Lücken und Defizite auf. Es wurde bisher keine Kraftregelung kooperierender Industrieroboter entwickelt, bei der

- eine Standard-Industriesteuerung verwendet wurde,
- die transportierte Last mehr als 50 kg wog,
- eine Lastteilung zwischen den Robotern angestrebt wurde,
- industriell relevante Transport-Geschwindigkeiten größer 0,4 m/s betrachtet wurden,

- der gesamte Handhabungsprozess von Greifen über Transport bis hin zum Ablegen untersucht wurde und
- nicht klemmend gegriffen wurde.

Daher werden folgende Anforderungen an die in dieser Arbeit zu entwickelnde Lösungsstrategie gestellt:

Betrachtung aller wichtigen Schritte des Pick-and-Place-Prozesses Die in der bisherigen Forschung hauptsächlich betrachtete Transportphase des Pick-and-Place-Prozesses ist zwar die entscheidende, aber nur eine Phase des Gesamtprozesses. Auch die Phasen vor und nach der Transportphase, insbesondere Greifen und Ablegen des Werkstücks, müssen betrachtet werden.

Darstellung von typischen Störgrößen Der in dieser Arbeit untersuchte Prozess wurde bisher noch nicht hinsichtlich der typischen Störgrößen untersucht. Zwar werden in nahezu jeder vorangegangenen Arbeit die auftretenden Probleme qualitativ beschrieben, eine systematische Untersuchung im Sinne eines Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs fehlt jedoch.

Einsatz industriell verfügbarer Technologie Viele heute entwickelte Technologien sind wissenschaftlich präzise ausgearbeitet und versprechen eine Verbesserung technischer Systeme und Ansätze. Dennoch treten bei der industriellen Umsetzung und Verfügbarmachung solcher Technologien Schwierigkeiten auf. Solche Probleme können verhindert werden, wenn bereits zu einem frühen Zeitpunkt industrielle Standardkomponenten eingeplant und eingesetzt werden, was ein Ziel dieser Arbeit ist.

Verwendung von form- oder kraftschlüssigen Greifern In der industriellen Praxis wird großer Wert auf stabile Greifsituationen gelegt, so dass ein klemmender Griff mit zwei Robotern nicht industriell eingesetzt wird. Eine derartige Greifsituation verbietet sich bei Gewichten größer 50 kg einerseits aufgrund der großen einzubringenden Klemmkraft und andererseits aus Sicherheitsaspekten (z. B. Not-Aus-Situationen, Verlust des Werkstücks bei hoher Geschwindigkeit). Aus diesem Grund muss eine form- oder kraftschlüssige Greifsituation je Roboter eingesetzt werden.

Betrachtung großer Kräfte und schwerer Werkstücke Die bisherige Forschung beschränkt sich auf Systeme, bei denen die Größe der transportierten Massen und der auftretenden Kräfte unterhalb der in der Industrie relevanten Werte liegen. Dieser Umstand begrenzt die Abschätzung der Einsatzmöglichkeit derartig getesteter Algorithmen. Diese Arbeit soll Kräfte über 1000 N und transportierte Massen größer 40 kg betrachten.

Betrachtung großer Geschwindigkeiten und Bewegungen Viele der bisher durchgeführten experimentellen Untersuchungen beziehen sich auf Geschwindigkeiten und Bewegungsräume, die unterhalb industrieller Maßstäbe liegen. In dieser Arbeit wird eine Transportgeschwindigkeit von 0,5 m/s angestrebt.

In dieser Arbeit sollen Lösungsstrategien erarbeitet werden, die die genannten Anforderungen erfüllen, und die Basis für eine industrielle Weiterentwicklung geschaffen werden.

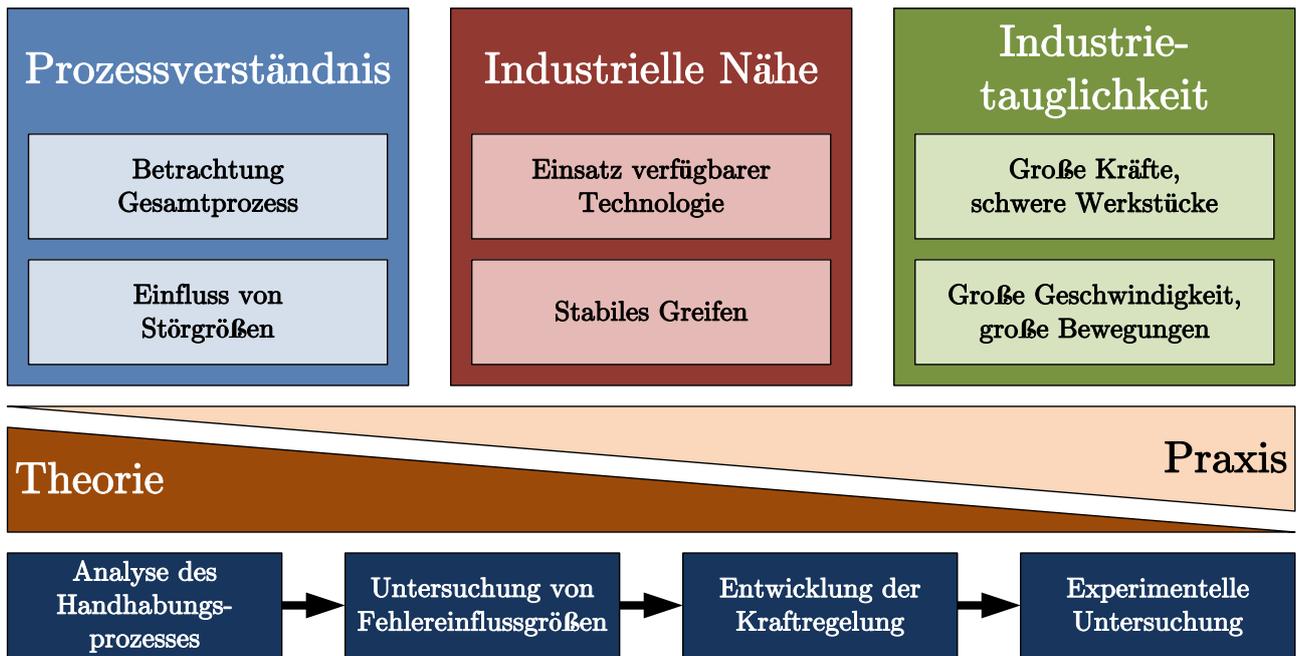


Abbildung 2.11: Anforderungen und Vorgehensweise.

2.7.3 Vorgehensweise

Aus den im letzten Abschnitt aufgeführten Anforderungen leiten sich die Vorgehensweise und die Ziele dieser Arbeit ab, die in Abbildung 2.11 zusammengefasst sind.

Analyse der Handhabungsaufgabe Um die wesentlichen Elemente des Gesamtprozesses zu identifizieren, wird der Gesamtprozess in Teilprozesse zerlegt, und die speziellen Eigenschaften und Problemstellungen dieser Teilprozesse werden dargestellt. Es werden die Möglichkeiten der Regelung unter allgemeinen Aspekten identifiziert und bewertet. Es soll ein grundsätzliches Prozessverständnis geschaffen werden, indem der Gesamtprozess strukturiert und klassifiziert wird.

Untersuchung von Fehlereinflussgrößen Es wird ein Grundsystem modelliert, an dem die typischen Probleme und Fehler eines kooperierenden Robotersystems aufgezeigt und deren Einflüsse bewertet werden können. Die simulative Untersuchung kann an einem vereinfachten System stattfinden, das die wesentlichen Eigenschaften realer Systeme abbildet. Es können in kurzer Zeit viele Untersuchungen mit verschiedenen Fehlern simuliert werden. Die Simulation soll dazu dienen, die Relevanz der Problemstellung zu bestätigen und die durch kleine Störgrößen verursachten Auswirkungen zu verdeutlichen.

Entwicklung der Kraftregelung Einige der in der Analyse der Handhabungsaufgabe herauszuarbeitenden Teilprozesse sollen durch eine Regelung verbessert werden. Für die entsprechenden Teilprozesse werden Regler entworfen. Ziel ist es, die untersuchten Fehlereinflussgrößen ausregeln zu können.

Experimentelle Untersuchung Die gesammelten Erkenntnisse werden an einem realen Demonstrator umgesetzt. Dabei wird großer Wert auf hohe Industrienähe der verwendeten Komponenten

und des gesamten Aufbaus gelegt. Wo möglich, sollen industriell eingesetzte Bauteile verwendet und reale Anforderungen betrachtet werden. Die entworfenen Regler werden implementiert und getestet. Die Untersuchungen sollen die grundsätzliche Funktionalität und die erreichbaren Verbesserungen des Handhabungsprozesses zeigen.

3 Analyse der Handhabungsaufgabe

Der in dieser Arbeit untersuchte Prozess ist die Handhabung von Werkstücken mit kooperierenden Industrierobotern und wird in diesem Kapitel analysiert. Dazu wird die Handhabungsaufgabe im Ein- und Mehrroboterfall vorgestellt und es werden Probleme und Herausforderungen im Prozess erläutert. Anschließend erfolgt eine Zerlegung des Gesamtprozesses in Teilprozesse. Es wird eine Auswahl getroffen, welche Teilprozesse im weiteren Verlauf der Arbeit näher untersucht werden und einer Kraftregelung zugänglich erscheinen.

3.1 Handhabungsaufgabe

3.1.1 Physische und logische Elemente der Handhabungsaufgabe

Laut Definition [DIN8373] ist ein Industrieroboter ein „automatisch gesteuerter (...) Mehrzweck-Manipulator“ und ein Manipulator eine „Maschine (...) mit dem Zweck, Gegenstände (Werkstücke oder Werkzeuge) zu greifen und/oder zu bewegen“. Im Rahmen dieser Arbeit werden Handhabungsaufgaben betrachtet, bei denen ein Werkstück durch mehrere Roboter gegriffen und von einer physischen Position in eine andere bewegt wird. Folgende logische und physische Elemente sind an der Aufgabe beteiligt:

Werkstück Das Werkstück ist das physische Objekt, das bewegt werden soll. Das Spektrum der industriell gehandhabten Werkstücke umfasst Kleinteile (z. B. Elektronikkomponenten wie Widerstände und Kondensatoren) bis hin zu komplexen und/oder massiven Großbauteilen (z. B. Verbrennungsmotoren, Getriebe, schwere Guss- und Schmiedeteile).

Ausgangs- und Endposition Vor der Handhabungsaufgabe befindet sich das Werkstück in der Ausgangsposition, nach Erledigung der Aufgabe in der Endposition. Je nach Anwendungsfall erstrecken sich die physischen Positionen dabei von glatten Flächen, auf denen das Werkstück zum Liegen kommt, über Kisten mit das Werkstück stabilisierenden Einlagen (engl. „Trays“) bis hin zu komplexen Werkstückaufnahmen mit Spannvorrichtungen in Bearbeitungsmaschinen. Nicht aktuierte Halterungen, die das Werkstück tragen, werden als Ausgangs- bzw. Endablage bezeichnet, aktuierte Halterungen als Werkstückaufnahmen. Ein Roboter kann mehrere Ausgangs- und Endpositionen bedienen, wodurch komplexe Abläufe möglich sind.

Greifer Der Greifer tritt in Kontakt mit dem Werkstück. Er ist für das sichere Greifen des Werkstücks, den stabilen Transport und die definierte und präzise Ablage des Werkstücks verantwortlich. Eine Handhabungszelle kann verschiedene Greifer vorhalten, die vor dem Greifen des Objekts gewechselt werden. Es werden nur Greifer betrachtet, die keine zusätzlichen Freiheits-

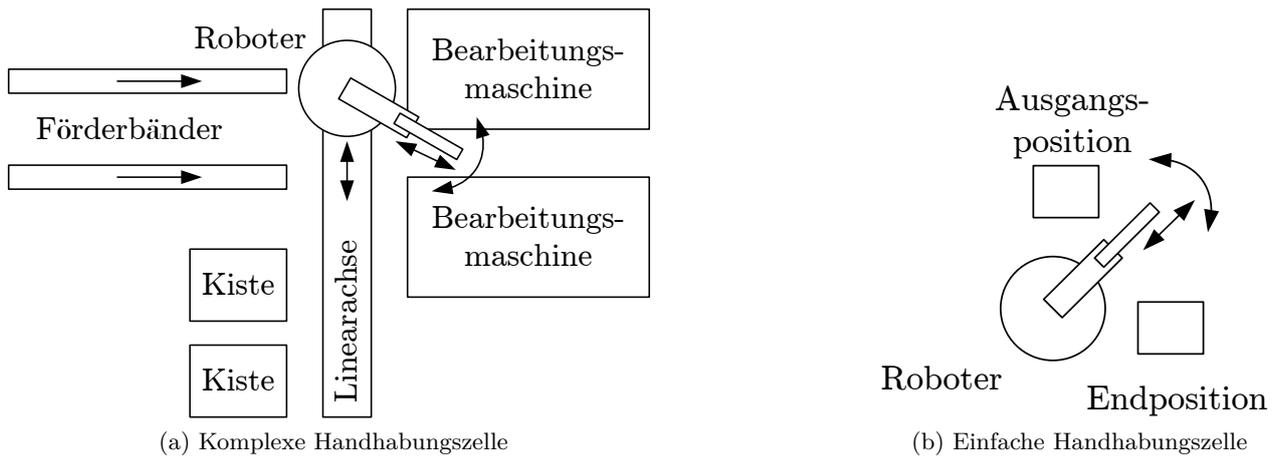


Abbildung 3.1: Komplexe und einfache Handhabungszelle

grade (Freilauf, schwimmende Lagerung, etc.) erlauben; es wird von einer stabilen Verbindung zwischen gegriffenem Werkstück und Greifer ausgegangen (kein „Verrutschen“ im Greifer).

Transportstrecke Die Transportstrecke wird durch eine Trajektorie beschrieben, entlang derer das Werkstück von Roboter und Greifer bewegt wird. Sie kann einige Millimeter oder mit aktuellen Robotern bis zu mehrere Meter (bis zu 6 m), mit Sonderkinematiken und zusätzlichen Achsen praktisch unbegrenzt (größer 100 m) lang sein. Zur Spezifikation der Trajektorie werden nicht nur die Lage und Orientierung im Raum, sondern auch Geschwindigkeit, Beschleunigung und in Ausnahmefällen auch der Ruck (Ableitung der Beschleunigung nach der Zeit) herangezogen. Damit beeinflusst die Trajektorie maßgeblich die Auslegungsparameter von Roboter und Greifer, da je nach gefahrener Bahn unterschiedliche Kräfte auftreten.

Roboter mit Steuerung und übergeordnete Steuerung/SPS Der Roboter trägt den Greifer und wird von der Steuerung betrieben. Die Transportstrecke bzw. die erforderliche Bewegung ist in der Steuerung abgelegt. Die Steuerung kennt die Position der Roboterbasis relativ zur Ausgangs- und Endposition, bei Mehrrobotersystemen auch die Basis-Position und die aktuelle Pose der anderen Roboter. Die Programmierung der Steuerung kann beliebig komplex werden, je nachdem, wie viele Ausgangs- und Endpositionen, wie viele Werkstücke, Greifer, usw. in der Handhabungszelle zum Einsatz kommen. Die Steuerung steht entweder direkt oder über eine übergeordnete Steuerung mit der Umgebung (vor-/nachgelagerte Automatisierungskomponenten, Bearbeitungsmaschinen usw.) in Verbindung. Die Steuerung erhält ein Startsignal und führt daraufhin das eingespeicherte Bewegungsprogramm durch. Entweder die Steuerung selbst oder Sensoren an der Endablage übermitteln der Umgebung die erfolgreiche Erledigung der Handhabungsaufgabe. Die Steuerung wartet dann auf die erneute Durchführung der Handhabungsaufgabe.

Je nach Anwendungsfall entstehen durch Kombination dieser Elemente unterschiedliche Handhabungszellen. Abbildung 3.1a zeigt eine eher komplexe Anordnung, Abbildung 3.1b die einfachste denkbare Variante.

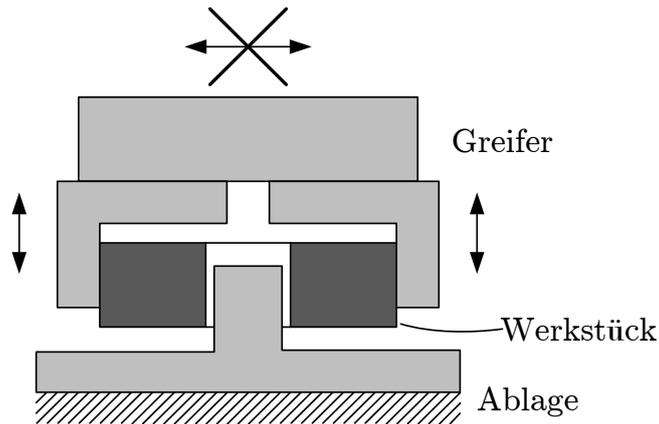


Abbildung 3.2: Restriktionen beim Anheben und Ablegen des Werkstücks. Eine Bewegung quer zum Stift ist nicht möglich, was mit dem durchgestrichenen Doppelpfeil dargestellt ist.

3.1.2 Ablauf der Handhabungsaufgabe mit einem Roboter

In diesem Abschnitt wird der Ablauf der Handhabungsaufgabe in Anlehnung an den einfachen Aufbau in Abbildung 3.1b betrachtet.

Zu Beginn befindet sich der Roboter in der Ausgangspose. Diese Pose nimmt der Roboter ein, während er auf den Start des Bewegungsprogramms wartet. Der Greifer des Roboters kann sich in direkter Nähe zur Ausgangs- oder Endposition des Werkstücks befinden oder an einer weit entfernten Position.

Der erste Schritt ist daher die Bewegung des Roboters zur Ausgangsposition des Werkstücks, wobei sich der Greifer der Ausgangsposition nähert, bis er sich in der Greifposition befindet. Bis zu diesem Zeitpunkt besteht kein Kontakt des Greifers mit der Umgebung. Alle Kräfte, die am Roboter wirken, werden ausschließlich durch den Roboter selbst und den Greifer verursacht.

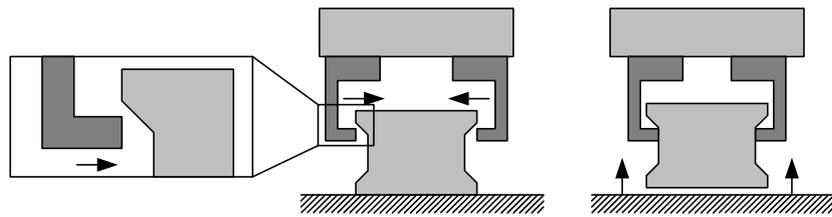
Der Greifer greift das Werkstück. Dabei wird eine form- oder kraftschlüssige Verbindung des Greifers mit dem Werkstück eingegangen. Dieser Greifvorgang läuft im Vergleich zu den Bewegungen des Roboters recht schnell ab (Dauer deutlich kleiner als 0,5 s). Während des Greifens entsteht eine Verbindung zwischen Roboter, Werkstück und durch das Werkstück auch mit der Umgebung. Dabei können Reaktionskräfte auftreten.

Wenn das Werkstück gegriffen ist, bewegt der Roboter den Greifer weg von der Ablage. Bestand Kontakt zur Umgebung, so wird dieser Kontakt gelöst. Dies führt zu Spannungsänderungen im Werkstück. Die Bewegung zum Trennen des Werkstücks von der Umgebung kann Restriktionen unterliegen, die einen Umgebungskontakt während der Ausfahrbewegung verursachen (Abbildung 3.2). Hierbei können erhebliche Kräfte auf das Werkstück, den Greifer und den Roboter wirken. Nach dem Entfernen von der Ausgangsposition wird der Transport zur Endposition eingeleitet.

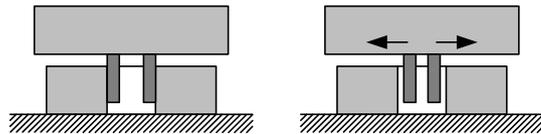
In der Transportphase muss das Werkstück sicher vom Greifer gehalten werden und darf nicht verrutschen. Durch Beschleunigung des Greifers und insbesondere durch Drehbewegungen können Trägheitskräfte auf das Werkstück wirken, weshalb diese Bewegungen und die daraus resultierenden Kräfte wichtige Parameter bei der Auslegung des Greifers darstellen.

Am Ende der Transportphase steht das Ablegen oder Einsetzen des Werkstücks an der Endposition. Entsprechend dem Ausfahren in der Ausgangsposition kann es auch beim Anfahren der Endposition

Greifsituation 1: formschlüssig, kontaktfrei



Greifsituation 2: kraftschlüssig, quasi kontaktfrei



Greifsituation 3: formschlüssig, hohe Kontaktkräfte, hohe Spannungen im Werkstück

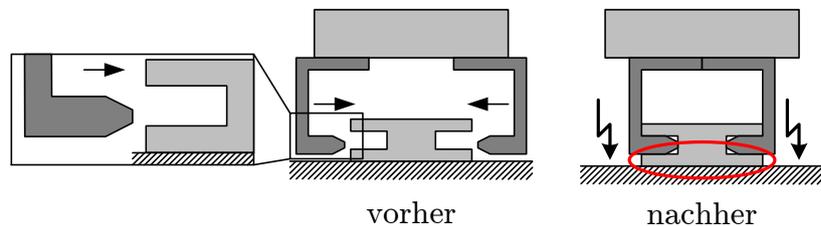


Abbildung 3.3: Verschiedene Greifsituationen (Beispiele).

Restriktionen geben (vgl. Abbildung 3.2). Schließlich bringt der Roboter den Greifer in die Ablegeposition.

Nach dem Ablegen des Werkstücks bewegt der Roboter den Greifer weg von der Endposition in die Ausgangsposition und wartet dort auf den nächsten Einsatz.

Beim Greifen und Ablegen des Werkstücks treten Kräfte aufgrund der Kontaktmechanik auf. Diese beiden Phasen werden nun näher betrachtet.

Greifen In Abbildung 3.3 sind mehrere Greifsituationen dargestellt. Jede Greifsituation besteht aus einer Ablage, dem Werkstück und einem Greifer in der Greifposition. Es zeigt sich, dass sehr unterschiedliche Kontaktsituationen eintreten können:

- Situation 1 ist günstig hinsichtlich der Kontaktkräfte mit der Umgebung, jedoch muss dazu mit Einfahrschrägen oder ähnlichem am Werkstück und/oder am Greifer gearbeitet werden, was zusätzlichen Verschleiß hervorruft und entsprechende Wartung erfordert.
- Die mittlere Darstellung zeigt die Idealsituation, in der quasi keine Kontaktkräfte mit der Umgebung auftreten und das Werkstück durch den Greifvorgang nicht bewegt wird.
- In Situation 3 können erhebliche Kräfte auf Greifer, Werkstück und Umgebung wirken. Im Fehlerfall führt das Greifen des Werkstücks zur Zerstörung einer der beteiligten Komponenten. Die Ursache für die unerwünschten Kräfte und Spannungen liegen in der ungünstigen Greifposition,

die der Greifer vor dem Greifen des Werkstücks eingenommen hat. Diese Fehlstellung des Greifers kann durch Toleranzen des Werkstücks, durch Verschleiß der Greifbacken und der Ablage und durch eine fehlerhafte Programmierung der Greifposition verursacht werden.

Im Allgemeinen muss beim Greifen von Greifsituation 3 ausgegangen werden:

- Die Position des Endeffektors ist beim Greifen nicht exakt.
- Beim Schließen des Greifers tritt Reibung zwischen den Greifbacken und dem Werkstück auf.
- Es entsteht ein Verspannungsverhältnis zwischen Umgebung, Werkstück und Roboter.
- Würde der Endeffektor auf die perfekte Greifposition gebracht werden, könnten Reibung und Spannung reduziert werden.

Es gibt Sonderformen, in denen gänzlich andere Greifsituationen auftreten, die hier aber nicht näher betrachtet werden (z. B. Aufwälz- oder Vakuumgreifen).

Ablegen Beim Ablegen ergeben sich drei prinzipielle Fälle ähnlich der „nachher“-Situation in Abbildung 3.3, solange das Werkstück vom Greifer noch gehalten wird. In Greifsituation 1 tritt das Werkstück noch nicht mit der Umgebung in Kontakt, Greifsituation 2 zeigt den idealen Zustand (Kontakt, aber keine nennenswerten Kräfte oder Spannungen) und Greifsituation 3 beschreibt den ungünstigsten Kontaktfall. Hierbei ist insbesondere der „erste Kontakt“ mit der Umgebung eine kritische Situation, weil sich die Kräfte und Spannungen sprunghaft innerhalb von weniger als 0,1 s ändern.

Zum Ablegen des Werkstücks wird der Greifer geöffnet bzw. die kraft-/formschlüssige Verbindung zwischen Greifer und Werkstück aufgehoben. Bestand zuvor kein Kontakt mit der Umgebung (Situation 1), fällt das Werkstück auf die Ablage. Dies ist nur möglich, wenn Werkstück und Ablage entsprechend ausgerichtet sind. Um das Werkstück definiert abzulegen, sind Ablagen mit Einführschrägen, -nuten oder -flächen versehen. In Greifsituation 2 bleibt das Werkstück an der angefahrenen Position liegen. In der ungünstigen Situation 3 ergibt sich durch das Öffnen des Greifers eine schlagartige Änderung des Spannungs-/Kontaktzustandes. Dies äußert sich durch ein Zurückfedern des Werkstücks, des Greifers und auch des Roboters. In entsprechenden Werkstücken kann das Öffnen des Greifers zum Wegspringen und/oder zur Zerstörung des Werkstücks führen.

Anders als beim Greifen sollten zwei allgemeine Fälle unterschieden werden:

- Sofern möglich, wird das Ablegen ähnlich Situation 1 durchgeführt werden. Das Werkstück hat keinen Kontakt zur Umgebung und wird nach dem Öffnen des Greifers durch z. B. Einführschrägen in die gewünschte Position gebracht. Es entstehen keine oder kaum Reibkräfte und keine Verspannungen. Nachteilig ist die kurze Unkontrolliertheit der Bewegung des Werkstücks beim Fallen.
- Sofern ein kontaktfreies Ablegen nicht möglich ist, muss von einer Verspannung von Umgebung, Werkstück und Roboter ausgegangen werden, die Situation 3 ähnelt. Beim Öffnen des Greifers entstehen Reibkräfte und Spannungsänderungen. Wie beim Greifen können diese Effekte durch ein genaues Positionieren des Roboters reduziert werden.

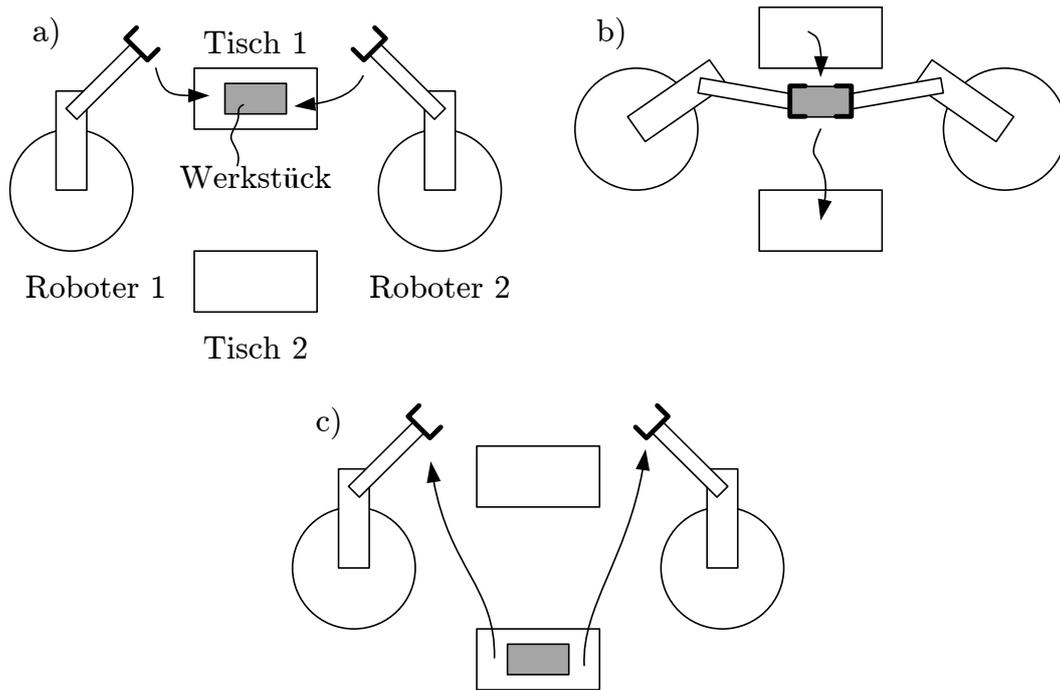


Abbildung 3.4: Vereinfachte Darstellung der Handhabungsaufgabe zweier kooperierender Roboter

Probleme beim Handhabungsprozess mit einem Roboter Zusammenfassend können die folgenden Probleme und Herausforderungen aufgelistet werden, die beim Handhabungsprozess auftreten, solange nur ein Roboter beteiligt ist:

- Kräfte und Spannungen beim Greifen
- Verlust des Umgebungskontakts und Restriktionen beim Anheben des Werkstücks
- Trägheitskräfte während des Transports
- Restriktionen und erster Kontakt mit der Umgebung beim Ablegen
- Spannungsänderungen beim Öffnen des Greifers

3.1.3 Ablauf der Handhabungsaufgabe mit mehreren Robotern

Die Handhabungsaufgabe des Einzelroboters wird erweitert auf den Fall von mehreren kooperierenden Robotern. Der prinzipielle Ablauf bleibt dabei gleich, es ergeben sich jedoch eine Reihe zusätzlicher Probleme und Herausforderungen. Der Einfachheit halber wird von zwei kooperierenden Robotern mit je einem Greifer ausgegangen. Wo nötig, wird auf besondere Problemstellungen bei mehr als zwei kooperierenden Robotern hingewiesen. Abbildung 3.4 zeigt eine vereinfachte Darstellung mit kooperierenden Robotern im Vergleich zu Abbildung 3.1b weiter oben.

Beide Roboter befinden sich am Anfang in ihren Ausgangsposen, sie bewegen sich unabhängig voneinander und zeitgleich zu ihren Greifpositionen. Dabei muss gerade in engen Raumverhältnissen besonderes Augenmerk auf die Vermeidung von Kollisionen der Roboter miteinander gerichtet werden, wozu unter Umständen bereits eine einfache Roboterkooperation im Sinne der Arbeitsraumteilung (siehe Abschnitt 2.4.1) erforderlich ist.

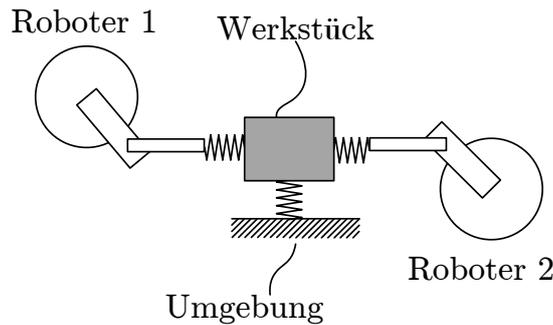


Abbildung 3.5: Greifsituation bei mehreren Robotern.

Nach Erreichen der Greifposition kann das Werkstück sequenziell (die Roboter stellen nacheinander die mechanische Verbindung zum Werkstück her) oder gleichzeitig (alle Roboter stellen gleichzeitig eine kraft-/formschlüssige Verbindung mit dem Werkstück her) gegriffen werden. Beim sequenziellen Greifen gibt es mehrere Möglichkeiten zur Reihenfolge des Greifens, was zu unterschiedlichen Zuständen nach dem Greifen führt.

Am Ende des Greifvorgangs sind alle Roboter mit dem Werkstück und über das Werkstück alle Roboter miteinander verbunden. Es ergibt sich beispielsweise die Situation in Abbildung 3.5. Die Verbindung mit der Umgebung kann entfallen, falls eine Situation ähnlich der Greifsituation 1 in Abbildung 3.3 vorliegt. Die im Einzelroboterfall symbolisch angedeuteten Spannungen und Kräfte zwischen Werkstück und Umgebung (Abbildung 3.3, Greifsituation 3) werden im Mehrroboterfall in Abbildung 3.5 durch Federn angedeutet. Sie repräsentieren die Übertragung von Kräften und Momenten. Die Spannungen im Werkstück sind in der Abbildung nicht dargestellt. Im Vergleich zum Einzelroboterfall wirken die Kräfte und Momente mehrerer Roboter auf das Werkstück.

Im vorangehenden Abschnitt wurden die Ursachen der auftretenden Kräfte und Spannungen beim Greifen auf ungenaues Teachen, auf Verschleiß und auf Toleranzen zurückgeführt. In Erweiterung dazu tritt diese Problematik im Mehrroboterfall für jeden Roboter und Greifer auf. Erschwert wird die Bewertung der Kontaktsituation mit der Umgebung und mit dem Werkstück dadurch, dass nicht immer festgestellt werden kann, welchem Roboter die Fehlstellung und die daraus resultierenden Kräfte und Spannungen zuzuordnen sind. Die iterative Teach-Vorgehensweise durch Ausprobieren und Anpassen wird bei mehreren beteiligten Robotern aufwendig und fehlerträchtig.

Nach dem Greifen wird das Werkstück von der Ausgangsposition wegbewegt. Dazu muss zunächst ein eventuell vorhandener Kontakt mit der Umgebung gelöst werden. Je nach Ablage variiert die Geschwindigkeit dieser Kontaktauflösung. Es ergibt sich eine Situation wie in Abbildung 3.5 ohne Anbindung an die Feder bzw. zur Ablage. Liegen hinsichtlich der Wegfahrbewegung Restriktionen vor, können sich Kräfte durch diese Restriktionen ergeben.

Während des Transports zur Endposition halten die Roboter die Verbindung zum Werkstück. Ungenauigkeiten, mangelnde Zeitsynchronisation und unzureichende Kalibrierung der Roboter führen zu Änderungen der relativen Position der Roboter zueinander. Dies zieht Änderungen der Spannungssituation im Werkstück nach sich, die beispielhaft in Abbildung 3.6 skizziert sind. Die durch diese Fehlstellungen verursachten Kräfte werden im folgenden Abschnitt 3.1.4 erläutert.

Nach dem Transport erfolgt das Ablegen des Werkstücks. Es müssen eventuelle Restriktionen hinsichtlich der Ablegetrajektorie beachtet werden. Die Roboter bringen die Greifer dann in die Able-

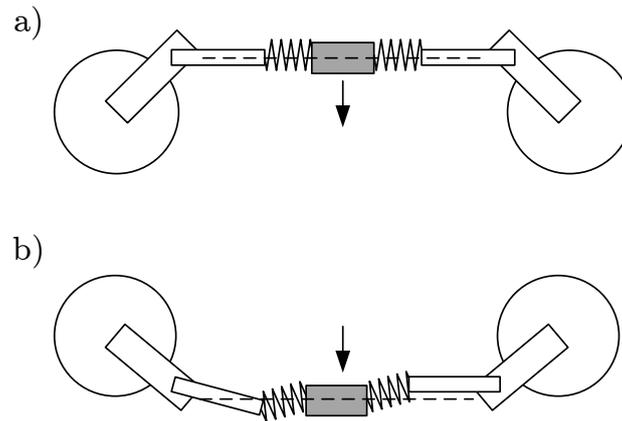


Abbildung 3.6: Veränderung der relativen Position zweier Roboter während des Transports des Werkstücks. Situation a) vor dem Transport, Situation b) nach dem Transport.

geposition. Es tritt wiederum eine Situation wie in Abbildung 3.5 auf; Kontakt mit der Umgebung kann, muss aber nicht vorhanden sein. Das Trennen der mechanischen Verbindung zwischen Greifer und Werkstück kann wie beim Greifen gleichzeitig oder sequenziell erfolgen. Beim sequenziellen Öffnen kann die Reihenfolge des Vorgangs einen Einfluss auf die Situation des Werkstücks nach dem Ablegen haben. Ähnlich wie beim Ablegen im Einroboterfall können auch im Mehrroboterfall große Spannungsänderungen auftreten. Im Mehrroboterfall kann durch die größere Anzahl der Roboter und dadurch erhöhte Kräfte und Verspannungen eine stärkere Reaktion von Werkstück und Robotern auftreten.

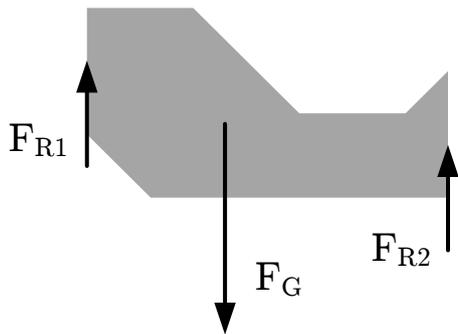
Im Anschluss an das Ablegen des Werkstücks fahren alle beteiligten Roboter zurück in ihre Ausgangsposition und warten auf den nächsten Einsatz.

Probleme beim Handhabungsprozess mit mehreren Robotern In Ergänzung zu den Herausforderungen des Einzelroboterfalls, die im Mehrroboterfall auch auftreten, kommen folgende Herausforderungen zusätzlich zum Tragen:

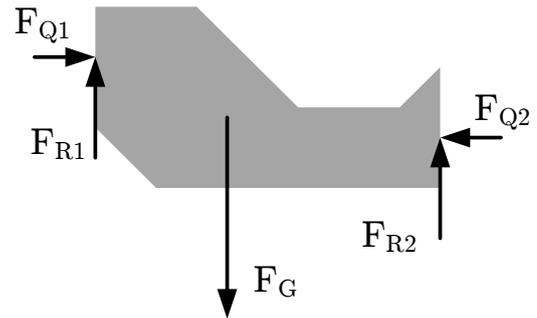
- Gefahr der gegenseitigen Kollision der Roboter bei allen Bewegungen
- Wahl der Greifabfolge (sequenziell, gleichzeitig) und der Reihenfolge
- Erschwertes Verständnis der wirkenden Kräfte in der Praxis durch fehlende Information, welcher Roboter welche Fehlstellung verursacht
- Unerwünschte Änderung der relativen Position der Roboter während Transport und daraus resultierende Kräfte im Werkstück

3.1.4 Kräfte am von kooperierenden Robotern getragenen Werkstück

Auf ein von mehreren Robotern getragenes Werkstück wirken verschiedene Kräfte. Abbildung 3.7a zeigt den Freischnitt eines Werkstücks, das wie in Abbildung 3.5 ohne Kontakt zur Umgebung von zwei Robotern getragen wird. Die Abbildung stellt die ideale Situation dar. Es treten nur Kräfte auf, die das Gewicht des Werkstücks kompensieren und das Werkstück in seiner Lage halten.



(a) Ideale Kraftverteilung, reine Gewichtskompensation. F_{R1} und F_{R2} bezeichnen die Kräfte von den Robotern, F_G die durch die Masse hervorgerufene Gewichtskraft des Werkstücks.



(b) Zusätzliche Querkräfte. Es treten zusätzlich die Querkräfte F_{Q1} und F_{Q2} auf.

Abbildung 3.7: Werkstück-Freischnitte.

Abbildung 3.7b zeigt das gleiche Werkstück in der gleichen Lage, jedoch mit zusätzlichen Querkräften. Diese Querkräfte werden durch die beteiligten Roboter eingebracht. Hierzu wird nun die mechanische Bestimmtheit des Systems betrachtet.

Die Roboter bilden zusammen mit dem Werkstück und dem Boden eine geschlossene kinematische Kette. Ein Roboter kann als sechswertiges Lager betrachtet werden, da ein Roboter das von ihm getragene Werkstück in allen sechs Raumfreiheitsgraden beschränkt. Das Werkstück hat sechs Freiheitsgrade. Daraus ergibt sich durch das gemeinsame Tragen eines Werkstücks durch zwei Roboter eine sechsfache Überbestimmtheit. Diese Überbestimmtheit führt dazu, dass in allen drei Krafrichtungen und allen drei Momentenrichtungen Belastungen in das Werkstück eingebracht werden können. Wird von Verformungen des Werkstücks abgesehen, bewegt sich das Werkstück dabei nicht.

Da alle beteiligten Komponenten mit Fehlern behaftet sind, muss bei einer derartigen Lagerung des Werkstücks von Spannungen in allen Raumrichtungen ausgegangen werden. Wird von ideal starren Körpern ausgegangen, so resultiert aus diesen Spannungen keine Bewegung. Weil jeder reale Körper jedoch eine wie auch immer geartete Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit besitzt, entstehen durch die vorhandenen Spannungen Verformungen der Körper. Diese werden in Abbildung 3.8 für eine Raumrichtung deutlich gemacht:

- Abbildung 3.8 zeigt unter a) die von den Roboterendeffektoren einzunehmende, ideale Position beim Handhaben des Werkstücks.
- Da die Positionierung der Roboter fehlerhaft ist, würden die Roboter ohne Werkstück tatsächlich die Positionen entsprechend b) in Abbildung 3.8 einnehmen. Diese Position ist die Vorgabe für die Positionsregelung der Roboter.
- Die Abbildung 3.8c) wurde unter der Annahme erstellt, dass die Steifigkeit des Werkstücks deutlich geringer ist als die Steifigkeit der Roboter. Dies führt zum Zusammenpressen des Werkstücks durch die Roboter.
- Die Abbildung 3.8d) wurde unter der Annahme erstellt, dass die Steifigkeit des Werkstücks deutlich größer ist als die Steifigkeit der Roboter. Dabei nehmen die Roboter nicht die von ihnen

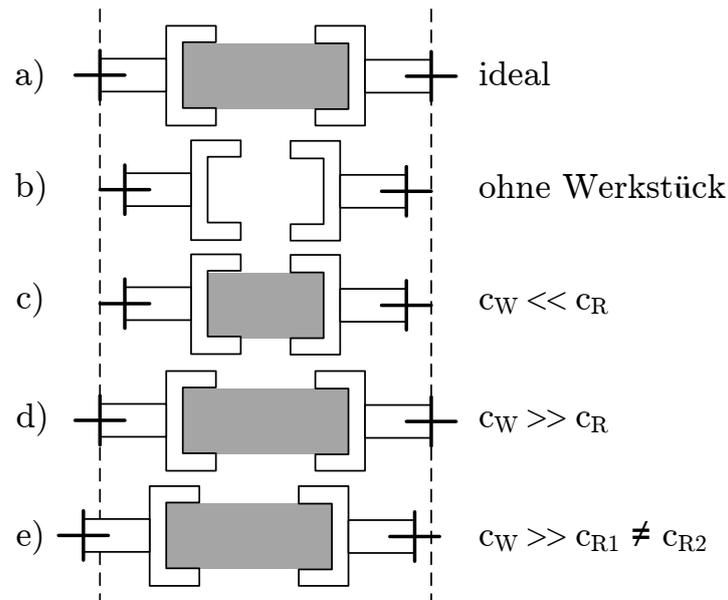


Abbildung 3.8: Position und Verformung des Werkstücks und der Roboter während des Tragens des Werkstücks.

entsprechend b) vorgesehene (falsche) Position ein. Stattdessen nehmen sie die ideale Position ein. Die Positionsregelung der Roboter geht jedoch fälschlicherweise davon aus, dass die Position in b) eingenommen werden soll. Ihr fehlt die Kenntnis über die Fehlerhaftigkeit dieser Annahme. Daher versucht die Positionsregelung die Antriebe der Armglieder so einzustellen, dass die Endeffektoren der Roboter Position b) einnehmen. Aufgrund der hohen Steifigkeit des Werkstücks geschieht dies jedoch nicht. Stattdessen nehmen Elemente der Roboter potentielle Energie auf und verformen sich (z. B. Wellen, Getriebe, Riemen, tragende Struktur der Armglieder). Die Positionsregelung erhält durch ihre Drehgeber schließlich die erwarteten Winkelpositionen und geht davon aus, dass die Endeffektoren die korrekte Position eingenommen haben. Die unter c) vom Werkstück aufgenommene Verformung wird auf mechanische Elemente der Roboter verteilt.

- Die Situation e) in Abbildung 3.8 entspricht der Situation d) mit dem Unterschied, dass die Steifigkeit der Roboter nicht identisch ist, was in praktischen Situationen der Realität entspricht, da die Nachgiebigkeit eines Roboters von seiner Stellung abhängt. Das Werkstück wird in eine Richtung abgedrängt.

Die Fälle c) und d) stellen theoretische Extremfälle dar, die reale Verformung liegt zwischen diesen beiden Extremfällen. Die Verformungen und auftretenden Kräfte sind unerwünscht, da sie zur Zerstörung oder plastischen Verformung des Werkstücks und zu erhöhtem Verschleiß der Roboter führen. Eine Beispielrechnung verdeutlicht die Auswirkung von Fehlstellungen:

Wird bei einem seriellen Industrieroboter von einer Steifigkeit von ca. 1000 N/mm ausgegangen und linear-elastische Verformung und ein starres Werkstück angenommen, ergibt eine Fehlstellung der Roboter von ca. 2 mm eine wirkende Kraft von 1000 N (Steifigkeit der Roboter in Serie). Bei einer angenommenen maximalen Nutzlast der Roboter von jeweils 500 N liegt die durch Fehler hervorgerufene Kraft im Bereich der gemeinsamen Nutzlast von 1000 N.

Tabelle 3.1: Herausforderungen und Probleme der Handhabungsaufgabe und Herausforderungen, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden.

Herausforderung	Einzelroboterfall	Mehrroboterfall	Gegenstand dieser Arbeit
Kräfte und Spannungen beim Greifen	•	•	•
Loslassen des Werkstücks / Öffnen des Greifers	•	•	
Verlust des Umgebungskontakts und Restriktionen beim Anheben/Ausfahren des Werkstücks	•	•	•
Restriktionen und erster Kontakt mit der Umgebung beim Ablegen	•	•	•
Trägheitskräfte während des Transports	•	•	
Unerwünschte Änderung der relativen Position der Roboter während Transport und daraus resultierende Kräfte im Werkstück		•	•
Gefahr der gegenseitigen Kollision der Roboter bei allen Bewegungen		•	
Wahl der Greifabfolge (sequenziell, gleichzeitig) und Reihenfolge		•	
Erschwertes Verständnis der wirkenden Kräfte in der Praxis durch fehlende Information, welcher Roboter welche Fehlstellung verursacht		•	•

3.1.5 Erkannte Probleme und Hemmnisse

Der Handhabungsprozess wurde für den Einzel- und Mehrroboterfall erläutert. Während des Prozesses treten bereits mit einem Roboter mehrere Probleme und Herausforderungen auf, die den Prozess erschweren. Im Mehrroboterfall kommen weitere Probleme hinzu, die die Aufgabenkomplexität weiter erhöhen (siehe Tabelle 3.1). Das Handhaben von Werkstücken gehört zu den Standardaufgaben von Industrierobotern. Die Probleme im Einzelroboterfall sind bekannt und die Anwender können mit ihnen umgehen, wie die Praxis beweist. Die zusätzlichen Probleme, die der Einsatz von mehreren Robotern in der Handhabung mit sich bringt, hemmen den Einsatz dieser Technologie in der Praxis. In den folgenden Kapiteln wird ein tieferes Prozessverständnis und eine Reduktion der auftretenden Kräfte durch kraftgeregeltes Greifen, Ablegen und Transportieren angestrebt, wodurch die in der letzten Spalte von Tabelle 3.1 markierten Herausforderungen angegangen werden.

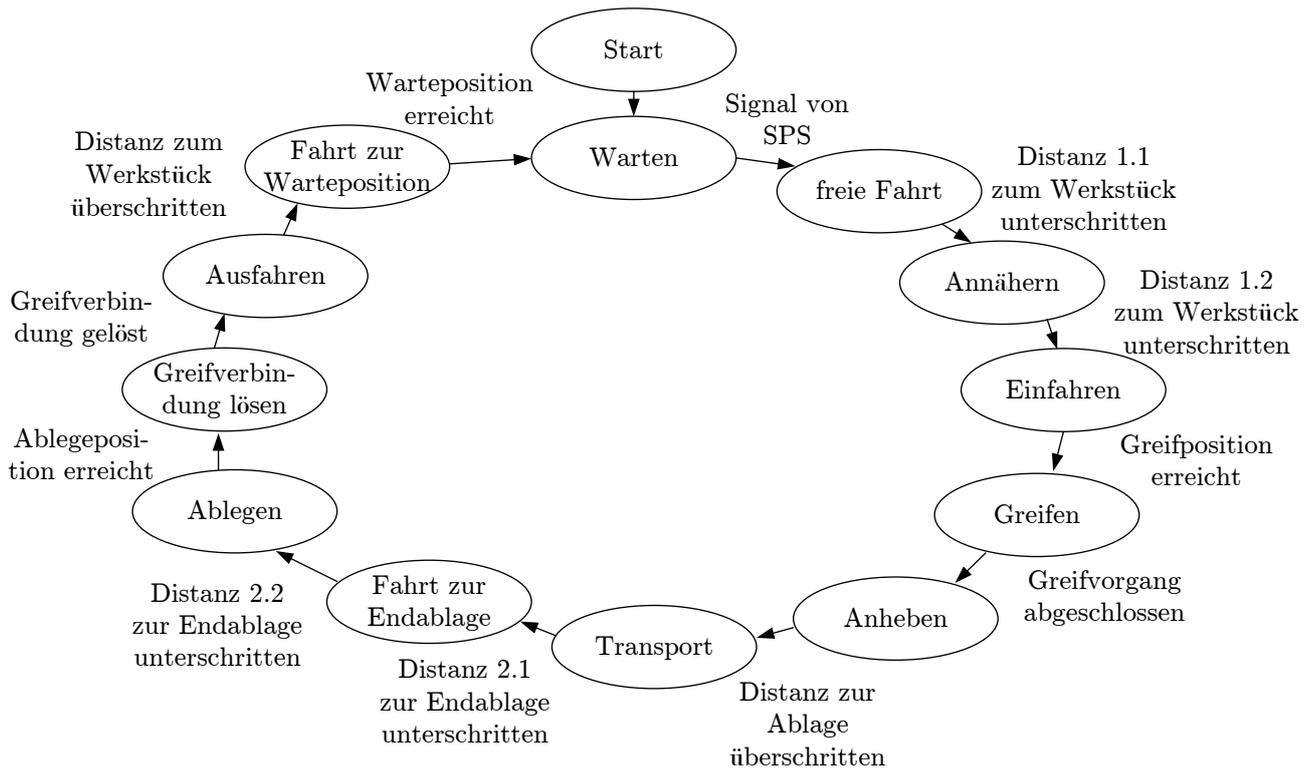


Abbildung 3.9: Zustandsübergangsdiagramm der Handhabungsaufgabe eines einzelnen Roboters.

3.2 Teilprozesse und Übergangsbedingungen

3.2.1 Definition Teilprozess

Die Handhabungsaufgabe stellt einen sequenziellen Ablauf dar, für den ein Zustandsübergangsdiagramm entwickelt wird. Die Handhabungsaufgabe wird dazu in einzelne Phasen zerteilt, die Teilprozesse genannt werden. Es wird eine chronologische Zerlegung durchgeführt, wobei ein Teilprozess aus

- dem Anfangszustand der Systemkomponenten,
- dem Verhalten der Systemkomponenten während des Teilprozesses und
- dem Endzustand der Systemkomponenten

besteht.

Jeder Teilprozess wird so klar wie möglich von dem vorhergehenden bzw. nachfolgenden Teilprozess abgegrenzt. Der Übergang soll in Anlehnung an die Begrifflichkeiten der Automatentheorie als Transition bezeichnet werden, wobei eine Transition den Endzustand des vorherigen Teilprozesses bzw. den Anfangszustand des nächsten Teilprozesses beschreibt. Eine Darstellung der Handhabungsaufgabe für einen einzelnen Roboter als Zustandsübergangsdiagramm kann Abbildung 3.9 entnommen werden.

3.2.2 Teilprozesse des Handhabungsprozesses

Warten Im Teilprozess Warten erwartet die Steuerung des Roboters den Startbefehl zur Ausführung der Handhabungsaufgabe. Dieser Teilprozess hat kein bestimmtes Verhalten. Er stellt die

Ausgangssituation beim Beginn der Handhabungsaufgabe dar. Der Endzustand wird mit dem Eintreffen des Startsignals (z. B. digitales Schaltsignal) hergestellt.

Freie Fahrt zum Werkstück Während der freien Fahrt zum Werkstück bewegt der Roboter den Greifer in Richtung Ausgangsablage und damit in Richtung Werkstück. Die Fahrt ist frei im Sinne einer beliebigen Bewegungstrajektorie, es muss jedoch Kollisionsfreiheit mit den anderen Robotern gewährleistet werden. Die Fahrt endet mit Unterschreiten eines bestimmten, festgelegten Abstandes (Distanz 1.1 in Abbildung 3.9) zum Werkstück.

Annähern ans Werkstück Um das Werkstück greifen zu können, muss der Greifer eine Greifposition und -orientierung einnehmen. Im Allgemeinen muss zum Anfahren der Greifpose eine spezielle Einfahrriechtung eingehalten werden, um Kollisionen zu vermeiden. Während des Annäherns ans Werkstück bewegt der Roboter den Greifer ausschließlich in dieser Richtung. Das Annähern endet, sobald ein bestimmter, geringer Abstand (Distanz 1.2) zum Werkstück eingenommen wurde. Der Abstand ist so gewählt, dass ein Kontakt mit dem Werkstück ausgeschlossen werden kann.

Einfahren ins Werkstück Beim Einfahren nimmt der Greifer die Greifposition ein. Es kann passieren, dass dabei ungewollt Kontakt mit dem Werkstück hergestellt wird. Bei beengten Raumverhältnissen oder beim Eintauchen von Greiferbolzen in Bohrungen im Werkstück kann dies bei jeder Einfahrt geschehen. Um die Einfahrt abschließen zu können, darf keine Selbsthemmung oder Verklemmung auftreten. Der Kontakt während der Einfahrt kann durch ein Entlanggleiten von zumeist metallischen Oberflächen charakterisiert werden. Das Einfahren endet, sobald der Greifer die Greifposition eingenommen hat.

Greifen Während dieses Prozesses wird eine mechanische Verbindung von Greifer und Werkstück eingegangen. Im Fall einer kraftschlüssigen Verbindung wird durch Aufspreizen oder Schließen von Greiferbacken ein flächiger Kontakt zwischen Greiferfingern und Werkstück hergestellt. Durch den reinen Kraftschluss kann nicht sichergestellt werden, dass Greifer und Werkstück eine bestimmte relative Position einnehmen, wodurch Greiffehler toleriert werden, allerdings Probleme beim definierten Ablegen auftreten. Anders beim formschlüssigen Greifen: Dabei tauchen Elemente der Greiferfinger verriegelnd in Strukturen des Werkstücks ein. Durch Einfahrsträgen kann eine bestimmte relative Lage von Greifer zu Werkstück erreicht werden. Es entsteht ebenfalls ein flächiger Kontakt zum Werkstück bei gleichzeitigem Formschluss, wobei Greiffehler zu Spannungen im Werkstück und im Greifer führen; hingegen ist ein sicheres und wiederholgenaues Ablegen des Werkstücks gewährleistet. Das Greifen endet, sobald der Greifvorgang abgeschlossen ist.

Anheben und Wegfahren Das gegriffene Werkstück wird angehoben und der Kontakt zur Ausgangsablage wird aufgelöst. Das Werkstück wird soweit von der Ausgangsablage wegbewegt, bis die Bewegung restriktionsfrei ist (vgl. Abbildung 3.2), wobei das Werkstück während der Restriktion an der Ablage entlang gleiten kann und keine Selbsthemmung auftreten darf. Der Teilprozess endet, sobald das Werkstück restriktionsfrei bewegt werden kann oder – ohne Vorliegen einer Bewegungsrestriktion – sobald der Kontakt mit der Ausgangsablage getrennt wurde.

Transport Während des Transports wird das Werkstück von der Ausgangsablage zur Endablage bewegt. Die Transportphase endet, sobald ein Mindestabstand (Distanz 2.1) zur Endablage unterschritten wurde.

Fahrt zur Endablage An der Endablage können Bewegungsrestriktionen vorliegen und es kann zu einem Entlanggleiten des Werkstücks an der Endablage kommen. Im Allgemeinen muss eine Bewegungsrichtung beim Ablegen des Werkstücks eingehalten werden. Der Teilprozess endet, sobald ein bestimmter Mindestabstand (Distanz 2.2) zur endgültigen Endablageposition erreicht ist. Der Mindestabstand ist so groß, dass der endgültige Kontakt mit der Endablage ausgeschlossen werden kann.

Ablegen Beim Ablegen wird im Allgemeinen ein Kontakt mit der Endablage hergestellt. Die Kontaktdynamik beginnt immer mit einem Punktkontakt, geht über in einen Linienkontakt und endet schließlich in einem flächigen Kontakt. Wenn die Ablage aus mehreren Stempeln besteht und es sich um ein großes Werkstück handelt, kann sich dieser Vorgang an mehreren Stellen des Werkstücks wiederholen oder nahezu gleichzeitig an mehreren Stellen auftreten. In ungünstigen Situationen tritt an einigen Stellen eine hohe Flächenpressung auf, während an anderen Stellen im gesamten Ablegeprozess kein Kontakt entsteht. Der Ablegeprozess endet, sobald der Greifer die Ablageposition erreicht hat.

Greifverbindung lösen Die Verbindung des Greifers zum Werkstück wird gelöst. Die relative Lage von Werkstück und Greifer kann sich dabei ändern, um innere Spannungen in Greifer und Werkstück abzubauen. In ungünstigen Fällen können sich Greifer und Werkstück so zueinander bewegen, dass ein Ausfahren des Greifers in der geplanten Richtung zur Selbsthemmung führt und Greifer oder Werkstück beim Ausfahren beschädigt werden. Sobald der Trennvorgang abgeschlossen ist, endet dieser Teilprozess. Der exakte Zustand hängt vom verwendeten Greifer ab.

Ausfahren aus Endablage Der Greifer kann im Allgemeinen nach dem Lösen der Greifverbindung ohne Kollision nicht beliebig bewegt werden. Er muss in einer bestimmten Vorzugsrichtung bewegt werden. Entlang dieser Vorzugsrichtung gleiten Greiferbacken und Werkstück aneinander entlang, es liegt eine flächige Reibung vor, die erst beendet wird, wenn die Greiferbacken das Werkstück verlassen haben. Sobald ein bestimmter Abstand zur Endablage überschritten ist, ist der Teilprozess beendet.

Fahrt zur Warteposition Am Ende der Handhabungsaufgabe fährt der Roboter zurück in die Warteposition. Sobald die Warteposition eingenommen wurde, endet der Teilprozess und mit ihm die Handhabungsaufgabe.

3.2.3 Parallelisierung von Teilprozessen bei kooperierender Handhabung

Die dargestellten Teilprozesse können die Handhabungsaufgabe für einen einzelnen oder für kooperierende Roboter repräsentieren. Bei kooperierenden Robotern können einige Teilprozesse von den Robotern unabhängig oder in Kooperation durchgeführt werden. Tabelle 3.2 gibt eine Übersicht. Es können zwei Extremfälle des Ablaufs mit zwei kooperierenden Robotern skizziert werden. Im voll

Tabelle 3.2: Unabhängige und kooperierend durchgeführte Teilprozesse. Teilprozesse mit zwei Markierungen können entweder unabhängig oder kooperierend durchgeführt werden.

Nr.	Teilprozess	unabhängig	kooperierend
0	Warten	•	
1	Freie Fahrt zum Werkstück	•	
2	Annähern ans Werkstück	•	
3	Einfahren ins Werkstück	•	•
4	Greifen	•	•
5	Anheben und Wegfahren		•
6	Transport		•
7	Fahrt zur Endablage		•
8	Ablegen		•
9	Greifverbindung lösen	•	•
10	Ausfahren aus Endablage	•	•
11	Fahrt zur Warteposition	•	

kooperierenden Fall wird das Einfahren, das Greifen, das Lösen der Greifverbindung und das Ausfahren synchron durchgeführt. Im weitestgehend unabhängigen Fall werden die genannten Teilprozesse unabhängig oder nacheinander durchgeführt. Die Synchronisation der Roboter ist also nicht nur auf den gemeinsamen Transport des Werkstücks beschränkt, sondern kann auch in anderen Teilprozessen relevant sein.

Je nach Anwendungsfall muss entschieden werden, ob eine parallele oder sequenzielle Ausführung des Greifens und des Ausfahrens gewählt wird. Beide Vorgehensweisen haben Nachteile. Bei paralleliertem Vorgehen werden die Kontaktsituationen verkompliziert, da an mehreren Punkten am Werkstück gleichzeitig Kraft- und Spannungsänderungen auftreten. Hingegen ist das sequenzielle Vorgehen langsamer, da jeder Greif- bzw. Ausfahrvorgang Zeit benötigt, wodurch sich die Taktzeit vergrößert.

In der Praxis ist die Taktzeit ein wichtiger Faktor, weshalb vorwiegend das parallelisierte Vorgehen eingesetzt werden wird. Kann das Greifen und das Öffnen des Greifers ohne große Spannungsänderungen im Werkstück durchgeführt werden, so hat das sequenzielle Vorgehen keine Vorteile mehr gegenüber dem parallelen Vorgehen. Daher sollten Spannungen im Werkstück vor dem Greifen und vor dem Ausfahren vermieden werden.

3.2.4 Klassifizierung von Teilprozessen

Die Teilprozesse weisen zum Teil ähnliche Eigenschaften auf und werden anhand folgender Eigenschaften klassifiziert:

Spannungen: Einfluss auf Kräfte im Werkstück Ein Teilprozess, der nur wenig Einfluss auf die im Werkstück auftretenden Spannungen hat, ist für eine tiefer gehende Betrachtung nicht lohnenswert. Hingegen sollten alle Teilprozesse untersucht werden, die große Fehlstellungen der

Tabelle 3.3: Eigenschaften der Teilprozesse.

Teilprozess	Spannungen	Aggressivität	Bemerkung
0: Warten	n. v.	n. v.	
1: Freie Fahrt	n. v.	n. v.	
2: Annähern	n. v.	n. v.	
3: Einfahren	sehr hoch	hoch	Bei mäßiger Einfahrgeschwindigkeit
4: Greifen	hoch	sehr hoch	Bei schnellem Greifvorgang
5: Anheben	gering	mittel	Bei keiner oder geringer Restriktion
6: Transport	mittel	mittel	
7: Vorpositionieren	gering	mittel	Bei keiner oder geringer Restriktion
8: Ablegen	hoch	hoch	
9: Loslassen	hoch	sehr hoch	Bei schnellem Lösen der Verbindung
10: Ausfahren	sehr gering	mittel	
11: Rückfahrt	n. v.	n. v.	

Roboter beinhalten können bzw. große Kräfte und Spannungen im Werkstück oder den Robotern verursachen können.

Dynamik: Geschwindigkeit/Aggressivität des Teilprozesses In dieser Arbeit wird den auftretenden Positionsabweichungen und dadurch hervorgerufenen Kräften mithilfe von Kraftregelung und -überwachung begegnet. Aufgrund der hohen Trägheiten der bewegten Massen (Roboter, Werkstück) sind zur schnellen Beeinflussung des Verhaltens dieser Massen große Kräfte notwendig. Diese Kräfte müssen durch die Roboterantriebe eingebracht werden, die nur begrenzte Kräfte abgeben können. Es können nur solche Teilprozesse beeinflusst werden, bei denen die Geschwindigkeit der Kraftänderung beherrschbar, also innerhalb der Stellgrößenbeschränkungen regelbar und steuerbar, bleibt. Demnach entziehen sich zu dynamische, also zu schnell ablaufende Teilprozesse der Kraftregelung und werden nicht weiter betrachtet.

Für eine nähere Untersuchung bieten sich alle Teilprozesse an, die hohe Kräfte im Werkstück verursachen (hohes Spannungspotenzial). Verursacht ein Teilprozess hohe Kräfte, kann aber nur schwer geregelt werden (hohe Dynamik), so führt dies zu großen Problemen bei der Umsetzung bzw. kann mit Standard-Industriesteuerungen nicht gelöst werden. Die beiden Eigenschaften sind in Tabelle 3.3 den Teilprozessen zugeordnet. Es wurde versucht, eine möglichst allgemeine Zuordnung zu erreichen. Dies hängt jedoch stark vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Die Zuordnung in Tabelle 3.3 entspricht dabei den in dieser Arbeit untersuchten Szenarien.

Den Teilprozessen wurde ein Wert einer fünfstufigen qualitativen Skala mit den Bewertungsstufen „sehr hoch“, „hoch“, „mittel“, „gering“ und „sehr gering“ zugewiesen. Wo eine derartige Bewertung nicht sinnvoll erschien, wurde der Wert „kein Einfluss/nicht sinnvoll/nicht vorhanden (n. v.)“ angegeben. Ordnet man den Skalenwerten von „n. v.“ nach „sehr hoch“ die Zahlenwerte von „0“ bis „5“ zu, kann jedem Teilprozess eine Stelle in einem Spannungs-Dynamik-Diagramm zugewiesen werden (siehe Tabelle 3.4).

Spannungswerte kleiner als drei repräsentieren geringen, sehr geringen oder keinen Einfluss auf die Kräfte im Werkstück. Diese Fälle werden nicht näher untersucht, da sie wenig Verbesserungspotenzial bieten.

Tabelle 3.4: Teilprozesse sortiert nach Spannung und Dynamik.

Dynamik	5					4; 9		
	4					8	3	
	3		10	5; 7	6			
	2							
	1							
	0	0; 1; 2; 11						
		0	1	2	3	4	5	
		Spannungen						

Der Teilprozess 6 liegt im mittleren Dynamikbereich, 3 und 8 im hohen Dynamikbereich. Alle drei Teilprozesse (Einfahren ins Werkstück, Transport und Ablegen) bieten sich für eine nähere Untersuchung an, auch wenn bei 3 und 8 der hohe Dynamikbereich einen Hinderungsgrund darstellen könnte.

Hinsichtlich der Spannungen sind auch die Teilprozesse 4 und 9 („Greifen“ und „Greifverbindung lösen“) interessant. Der Greif- bzw. Löseprozess wird jedoch äußerst schnell durchgeführt, so dass sich eine Kraftregelung aufgrund der erwarteten hohen Dynamik nicht anbietet. Stattdessen sollte versucht werden, bereits vor dem Greifen bzw. vor dem Lösen der Greifverbindung Positionen relativ zum Werkstück einzunehmen, die eine möglichst geringe Krafteinwirkung auf das Werkstück versprechen. Während der Teilprozesse 3 (Einfahren) und 8 (Ablegen) kann dieser Zustand beispielsweise durch eine Kraftregelung hergestellt werden.

Die Teilprozesse Einfahrt, Transport und Ablegen werden auf Basis dieser Beurteilung im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher untersucht.

Die Beurteilung und Klassifikation der Teilprozesse ist von vielen Einflussfaktoren abhängig und unter qualitativen Aspekten nur bedingt allgemeingültig möglich. In den experimentellen Untersuchungen in Kapitel 6 wird das Verhalten einer realen Zelle detailliert untersucht. Im Ausblick auf die später durchgeführten Versuche sei auf Abbildung 6.7 auf Seite 105 verwiesen, die die Kräfte bei einem kompletten Handhabungszyklus zeigt. Die hier gefundenen Teilprozesse werden in diesem Diagramm Zeitabschnitten zugeordnet.

3.3 Zusammenfassung

In der durchgeführten Analyse wurde der Handhabungsprozess erläutert und es wurden Probleme bei der Durchführung des Prozesses mit kooperierenden Industrierobotern herausgearbeitet. Die erkannten Probleme hemmen den Einsatz kooperierender Robotersysteme. Entsprechend Abschnitt 2.7.2 wurden alle Schritte des Handhabungsprozesses betrachtet und Teilprozessen zugeordnet. Mit einer qualitativen Bewertungsmatrix konnten wesentliche Teilprozesse identifiziert werden, die einer genaueren Untersuchung zugänglich erscheinen. Es wurden die drei Teilprozesse „Einfahren ins Werkstück“, „Transport“ und „Ablegen“ hervorgehoben. Diese Teilprozesse werden in der weiteren Arbeit näher untersucht.

4 Untersuchung von Störgrößen

In diesem Kapitel wird zunächst eine vereinfachte Zelle kooperierender Industrieroboter modelliert. Diese Zelle wird dazu verwendet, den Transport eines Werkstücks mit kooperierenden Industrierobotern zu simulieren. Im Wesentlichen soll untersucht werden, welchen Einfluss bestimmte, bewusst in die Simulation eingebrachte Fehler auf den Transport haben. Dieses Kapitel bildet den Ausgangspunkt für die anschließende Entwicklung einer adäquaten Kraftregelung und die experimentellen Untersuchungen, in denen die Regelungsstrategie an realen Robotern geprüft wird.

4.1 Modellierung und Simulation

Für die Simulation wird ein Modell von kooperierenden Robotern benötigt, das eine Handhabungsaufgabe durchführt. Die Modellierung eines realen Systems kooperierender 6-achsiger Roboter, bestehend aus vielen Komponenten, ist aufwendig und müsste, neben dem Verhalten der Robotermechanik auch das Verhalten der Robotersteuerung abbilden. Da keine Informationen zur genauen Funktionsweise der Industriesteuerung der später verwendeten Industrieroboter vorliegen, bleibt nur die Möglichkeit ein vereinfachtes Modell zu erstellen, das es trotz Vereinfachung erlaubt, die Auswirkungen wesentlicher Störgrößen auf den Handhabungsprozess zu untersuchen.

4.1.1 Gesamtsystem

Die zu modellierende Roboterzelle hat den Aufbau entsprechend Abbildung 4.1. Sie enthält zwei kooperierende Roboter, die ein Werkstück gemeinsam tragen. Die Roboter haben einen planaren Arbeitsraum, d. h. eine Bewegung der Roboter und des Werkstücks in z -Richtung der Abbildung 4.1 wird ausgeschlossen¹. Dadurch vereinfachen sich alle Betrachtungen erheblich.

4.1.2 Robotermodell

Im Modell werden zwei identische Roboter verwendet. Die schematische Darstellung eines Roboters kann Abbildung 4.2 entnommen werden. Beginnend an der Basis des Roboters besteht der Roboter aus einer vertikalen Schubachse entlang der y -Richtung, die eine horizontale Schubachse entlang der x -Achse trägt. Am Ende der horizontalen Schubachse befindet sich ein Drehgelenk, an dessen Ausleger sich der Greifer befindet. Insgesamt besitzt der modellierte Roboter drei Freiheitsgrade. Die geometrisch festzulegenden Parameter beschränken sich auf den Abstand l_3 des Greifers vom Drehgelenk.

¹Um die weiteren Darstellungen bei der 2d-Simulation zu vereinfachen, wird das $x/y/z$ -Dreibein entgegen der üblichen in der Robotik verwendeten Konvention (z nach oben) so orientiert, dass in der Seitenansicht die x/y -Achse sichtbar ist.

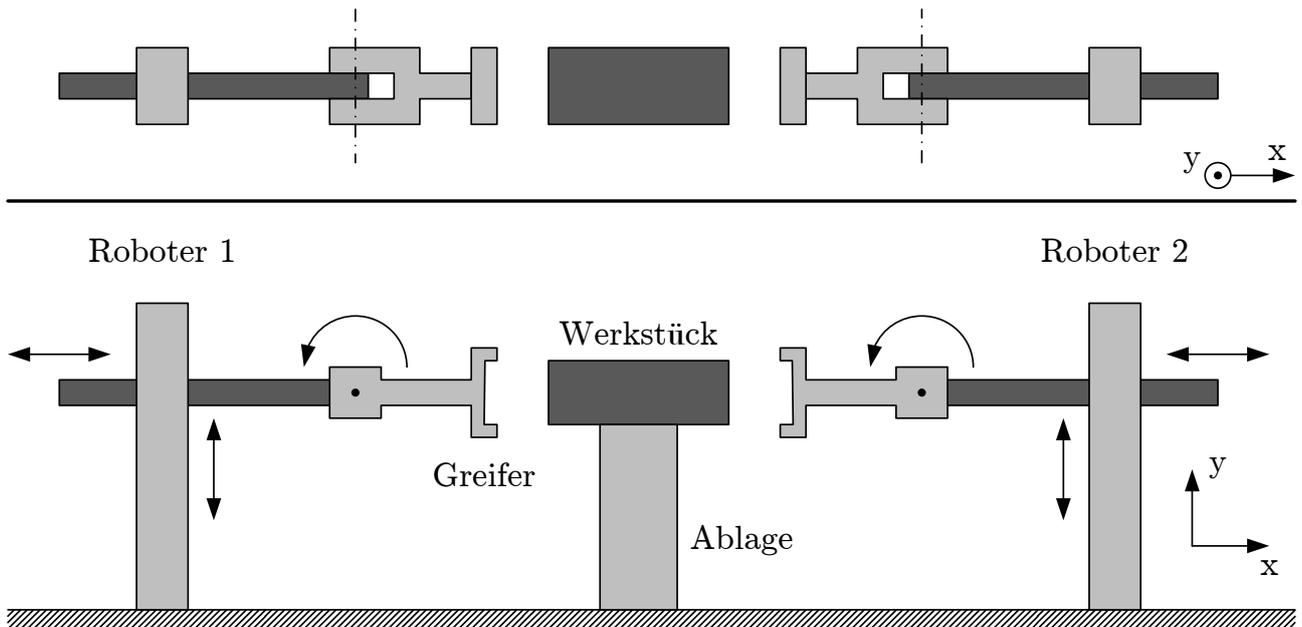


Abbildung 4.1: Gesamtmodell.

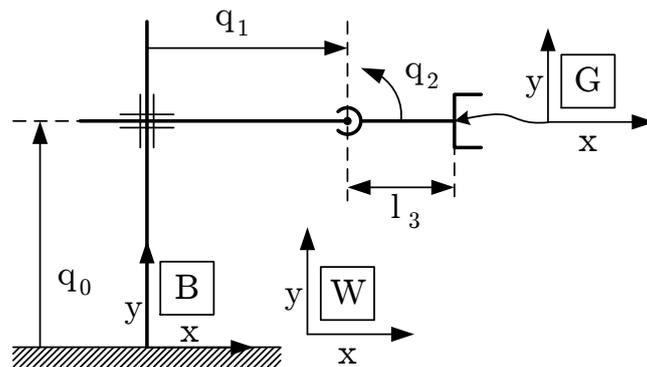


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Robotermodells.

Die Vorwärtskinematik $f_{kin}(\underline{q})$ und die inverse Kinematik $i_{kin}(\underline{p})$ ergeben sich zu

$$\underline{p} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{pmatrix} = f_{kin}(\underline{q}) = \begin{pmatrix} l_3 \cos q_2 + q_1 \\ l_3 \sin q_2 + q_0 \\ q_2 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad (4.1)$$

$$\underline{q} = \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = i_{kin}(\underline{p}) = \begin{pmatrix} y - l_3 \sin \varphi \\ x - l_3 \cos \varphi \\ \varphi \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

wobei \underline{q} die Gelenkkoordinaten mit q_0 und q_1 als Schubkoordinate und q_2 als Winkelkoordinate angibt. \underline{p} bezeichnet die Pose des Endeffektors, bestehend aus den Positionskoordinaten x und y und dem Orientierungswinkel φ .

Zur Simulation des Zeitverhaltens der Antriebe wird jede Achse durch ein Übertragungsglied mit PT_2T_T -Verhalten modelliert. Es handelt sich dabei um ein Übertragungsglied mit PT_2 -Verhalten und

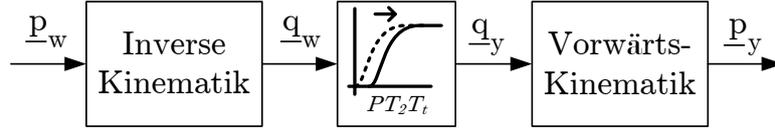


Abbildung 4.3: Übertragungsverhalten der simulierten Robotersteuerung. \underline{p}_w bezeichnet die Soll-Position des Roboter-TCPs, \underline{p}_y die mit der Vorwärtskinematik f_{kin} berechnete aktuelle Ist-Position. \underline{q}_w ist die mit der inversen Kinematik i_{kin} berechnete Soll-Stellung der Achsen, \underline{q}_y die aktuelle Ist-Stellung der Achsen.

zusätzlicher Totzeit T_T . Ein solches Achsmodell wurde in [Peñ11] für die in den späteren Untersuchungen verwendeten Roboter an mehreren Punkten im Arbeitsraum experimentell ermittelt und verifiziert.

Es ergibt sich eine Positionssteuerung der simulierten Roboter entsprechend Abbildung 4.3. Die Mechanik und die bewegten Massen werden nicht abgebildet, da sie in der Praxis durch die Robotersteuerung gehandhabt werden. Alle auftretenden Kräfte und Momente werden durch Steifigkeiten und Massen des Werkstückmodells hervorgerufen.

4.1.3 Werkstückmodell

Das benötigte Werkstückmodell besteht aus einem einzelnen zentralen Federelement. In der Simulation wird damit das Verhalten eines realen Werkstücks nachmodelliert, um Aussagen darüber treffen zu können, welche Auswirkungen Störgrößen haben. Das Modell ähnelt vom Aufbau her dem später in der Realisierung eingesetzten Testwerkstück. Es besteht aus einer zentralen, masselosen Federeinheit, an die zwei starre, massebehaftete Körper angekoppelt sind, die im gegriffenen Zustand starr mit den Robotern verbunden sind.

Für die Anwendung in der Simulation muss das Werkstückmodell die an den Greifpunkten des Werkstücks wirkenden Kräfte zurückliefern. Das Werkstückmodell stellt eine Funktion der Struktur

$$\left({}^{P_1}\underline{F}, {}^{P_2}\underline{F} \right) = f_{Werkstück} \left({}^{P_1}\underline{p}, {}^{P_2}\underline{p} \right) \quad (4.3)$$

dar. Dabei sind ${}^{P_i}\underline{F}$ die Kräfte und Momente an den Greifpunkten im Greifpunkt-Frame und ${}^{P_i}\underline{p}$ die Posen der Greifpunkt-Frames.

Dynamische Effekte (Dämpfung, Reibung, Massenträgheit) werden nicht betrachtet, da die Reaktionen des Werkstücks in der Realität schneller sind als das Reaktionsvermögen der Roboter bzw. der Kraftregelung. Daher ist eine Betrachtung dieser Effekte nicht zwingend erforderlich, das Werkstück wird als quasistatisch modelliert. Das Modell wird ebenso wie die Simulationsumgebung zweidimensional modelliert. Die Vereinfachung in den zweidimensionalen Raum wird durch Auslassen der Terme z , φ_y und φ_z und der dazugehörigen Kräfte und Momente F_z , M_x und M_y erreicht. Somit gilt ${}^{P_i}\underline{F}, {}^{P_i}\underline{p} \in \mathbb{R}^3$.

Abbildung 4.4 zeigt eine strukturelle Darstellung des Modells. Die Frames P_1 und P_2 bilden die Greifpunkte des Werkstücks. Im gegriffenen Zustand fallen diese Frames mit den TCPs der Greifer des Roboters zusammen. An P_i ist ein Vektor $\vec{r}_i \in \mathbb{R}^3$ angekoppelt, der zur Punktmasse m_i führt. Die Masse des Werkstücks teilt sich also auf in zwei Teilmassen, die jeweils punktförmig konzentriert sind. Die Masse wird punktförmig konzentriert dargestellt, da die Einflüsse einer realen verteilten

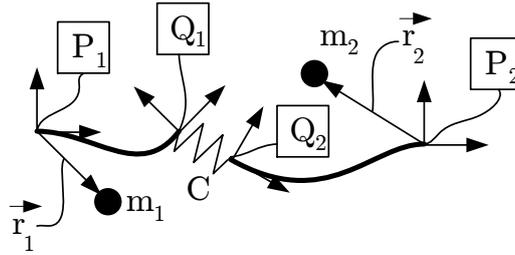


Abbildung 4.4: Werkstückmodell.

Masse bei den hier betrachteten Geschwindigkeiten vernachlässigt werden kann. An die Frames P_i sind die Frames Q_i über die Transformationsmatrix ${}^{P_i}T_{Q_i}$ starr gekoppelt. Die Frames Q_i sind über ein Federsystem gekoppelt.

Dieses Federsystem wird im Modell durch linear-elastische Federn abgebildet. Bei einer solchen Feder wird jeder Verschiebung entlang der drei Raumfreiheitsgrade eine Federsteifigkeit c_i zugeordnet, so dass entsprechend dem Hooke'schen Gesetz

$$\underline{F} = \text{diag}(\underline{c}) \cdot \Delta \underline{p} = C \cdot \Delta \underline{p} = \begin{pmatrix} c_x & 0 & 0 \\ 0 & c_y & 0 \\ 0 & 0 & c_\varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ M_\varphi \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

gilt, wobei Δx und Δy die Verschiebungen entlang der translatorischen Freiheitsgrade und $\Delta \varphi$ die Verdrehung bezeichnen. C ist die Steifigkeits- oder Federmatrix.

In der Realität ist ein solches Federsystem nur schwer konstruierbar, zumal mit linear-elastischem Verhalten. Zudem würde jede Kraft an den Endeffektoren eine Wechselwirkung mit den Antrieben hervorrufen. Für die erwarteten Bewegungen ist die Annahme einer solchen Feder allerdings ausreichend, da die realen Steifigkeiten bei kleinen Verformungen nahezu lineares Verhalten aufweisen. Der Einfluss auf die Antriebe wird vernachlässigt, da Regelkreise in der Robotersteuerung einem solchen Einfluss zeitnah entgegen regeln. Die dadurch entstehende Reaktion wird wie alle Massenträgheiten, Reibungen und Hysteresen nicht abgebildet.

Wenn die Positionen der Frames P_i im Welt-System W bekannt sind, kann die relative Position der beiden Frames Q_i zueinander mit

$$({}^W_{P_1}T \cdot {}^{P_1}_{Q_1}T)^{-1} \cdot ({}^W_{P_2}T \cdot {}^{P_2}_{Q_2}T) = {}^{Q_1}_{P_1}T \cdot {}^{P_1}_W T \cdot {}^W_{P_2}T \cdot {}^{P_2}_{Q_2}T = {}^{Q_1}_{Q_2}T$$

bestimmt werden. Diese Transformation wird umgerechnet in eine Pose

$${}^{Q_1}_{Q_2}\underline{p} = \begin{pmatrix} t_x & t_y & \varphi \end{pmatrix}^T, \quad (4.5)$$

die in diesem Fall den Übergang von einem Frame zu einem anderen Frame beschreibt und daher den entsprechenden Kopf- und Fußindex erhält. Die Komponenten t_x und t_y bezeichnen die Verschiebung der beiden Frames Q_1 und Q_2 zueinander, φ beschreibt die Verdrehung der Frames zueinander. Zur Umrechnung der Rotationsmatrix aus ${}^{Q_1}_{Q_2}T$ in den Drehwinkel wird Gleichung (2.14) verwendet. Die am

Frame Q_1 auftretenden Kräfte und Momente können mit dem Hooke'schen Gesetz berechnet werden zu

$${}^{Q_1}\underline{F} = C \cdot {}^{Q_1}_{Q_2}\underline{p} = \left(I^{3 \times 3} \cdot \underline{c} \right) \cdot {}^{Q_1}_{Q_2}\underline{p} \quad . \quad (4.6)$$

Die an den Greifpunkten aufgrund der Federkräfte auftretenden Kräfte können entsprechend Abschnitt 2.2.1 berechnet werden. Zusätzlich fließen die Gewichtskräfte der Massen ${}^{P_i}\vec{F}_{Gi}$ in die Kräfte und Momente an den Greifpunkten ein. An den Greifpunkten ergibt sich

$${}^{P_i}\vec{F} = \vec{F} \left({}^{P_i}T^f \cdot {}^{Q_i}\underline{F} \right) + {}^{P_i}\vec{F}_{Gi} \quad , \quad (4.7)$$

$${}^{P_i}M = M \left({}^{P_i}T^f \cdot {}^{Q_i}\underline{F} \right) + \vec{r}_i \times {}^{P_i}\vec{F}_{Gi} \quad \text{und} \quad (4.8)$$

$${}^{P_i}\vec{F}_{Gi} = {}^{P_i}\vec{g} \cdot m_i \quad . \quad (4.9)$$

Dabei bezeichnen $\vec{F}(\underline{F})$ und $M(\underline{F})$ den Kraft- bzw. Momentenanteil des Kraft-Momenten-Tupels \underline{F} , ${}^{P_i}\vec{g}$ den ins P_i -System gedrehten Gravitationsvektor ${}^W\vec{g} = (0 \quad -9,81)^T$ und ${}^{P_i}\vec{F}_{Gi}$ die ins P_i -System transformierte Gewichtskraft der Masse m_i .

Zur vollständigen Parametrierung des Modells werden die Parameter $m_1, m_2, \vec{r}_1, \vec{r}_2, {}^{P_1}T, {}^{P_2}T$ und \underline{c} benötigt. Es müssen insgesamt 15 Parameter festgelegt werden.

4.2 Fehlereinflüsse

Die Bewertung des Stands der Technik ergab, dass noch keine Darstellung des Einflusses verschiedener Fehlerzustände auf das System der kooperierenden Industrieroboter durchgeführt wurde. In diesem Abschnitt werden solche Fehlereinflüsse am im letzten Abschnitt modellierten Simulationsmodell untersucht und bewertet.

Zunächst werden die zu untersuchenden Störgrößen und ihre Abbildung im Simulationsmodell festgelegt. Anschließend wird die Trajektorie des Werkstücks definiert. Schließlich erfolgt eine Darstellung und Bewertung der Ergebnisse der Simulation.

4.2.1 Mögliche Störgrößen und Bewertungsmaße

Das zu untersuchende System besteht im Wesentlichen aus den Komponenten Roboter, Steuerung, Werkstück und Greifer. Jede dieser Komponenten ist bestimmten Toleranzen unterworfen. Ebenso gibt es vielfältige Kalibrierungs- und Justageeinstellungen am System. Es wird untersucht, welchen Einfluss Abweichungen von idealen Abmessungen und von idealer Kalibrierung und Justage auf die Roboterkooperation haben. Folgende Fehlergrößen können den einzelnen Komponenten zugeordnet werden:

- Am Roboter treten Abweichungen in den Längen und Winkeln der einzelnen Armglieder auf (kinematische Parameter). Bei großen Lasten treten elastische Verformungen an den Armgliedern und insbesondere in den Getrieben auf.

- Die Steuerung kommandiert die Bewegungen der Roboter. Dabei treten Schleppfehler auf, die ein Vorseilen der Sollpose zur Istpose darstellen. Die Bahntreue der Roboter beim Abfahren einer Trajektorie ist ebenfalls begrenzt. Überdies kann bei der Roboterkooperation die Synchronisation der Bewegung der Roboter abweichen, insbesondere bei schnellen Bewegungen eines oder beider Roboter.
- Bei der Inbetriebnahme der Roboter wird die relative Pose der Roboterbasen zueinander vermessen. Diese Information wird der Steuerung zur Verfügung gestellt, um die Kooperation überhaupt zu ermöglichen. Die Vermessung der relativen Pose ist immer fehlerbehaftet und beeinflusst die Kooperation der Roboter.
- Der Greifer nutzt sich im Laufe der Zeit ab. Der TCP verändert sich daher über die Betriebsdauer hinweg. Überdies kann das Werkstück beim Greifen unbeabsichtigt bewegt werden, wodurch der Greifer unter Umständen nicht an der idealen Greifposition am Werkstück greift.
- Das Werkstück unterliegt in der Produktion gewissen fertigungstechnischen Toleranzen. Dadurch können sich der ideale Greifpunkt und die Kontaktflächen zur Ablage verschieben.

Die durchgeführten Untersuchungen betrachten die genannten Aspekte durch das bewusste Einbringen von folgenden Fehlern ins System:

- Fehlerhafte Kalibrierung: Die Position der Roboter zueinander wird mit einem Fehler in Position und Orientierung beaufschlagt.
- Werkstücktoleranzen: Die Position der Greifpunkte im spannungsfreien Werkstückzustand wird falsch vorgegeben.
- Schleppfehler: Es wird ein geschwindigkeitsabhängiger Fehler eingebaut, indem das Verhalten der simulierten Antriebe angepasst wird.

Mithilfe dieser Fehler können die weiter oben genannten typischen Fehler von kooperierenden Robotersystemen im Wesentlichen abgedeckt werden. In Tabelle 4.1 sind die genannten Fehlergrößen den eingebrachten Fehlern gegenübergestellt:

- Toleranzen am Werkstück haben ähnliche Auswirkungen wie Toleranzen am Greifer. Ohne eine genaue Vermessung von Greifer und Werkstück ist es nicht möglich zu unterscheiden, ob ein Fehler beim Greifen durch Werkstück- oder Greifertoleranzen verursacht wird.
- Fehler in kinematischen Parametern haben ähnliche Auswirkungen wie Fehler in der Kalibrierung der relativen Pose. Sieht man zwei kooperierende Roboter als eine große Kinematik an, so entspricht ein Fehler in der relativen Pose einem Fehler in einem kinematischen Parameter.
- Eine mangelnde Synchronisation entspricht einem Schleppfehler in Bewegungsrichtung. Achsbasierte Schleppfehler verursachen ähnliche Effekte.
- Elastische Verformungen am Roboter entstehen aufgrund der wirkenden Kräfte am Endeffektor. Sie sind von der aktuellen Orientierung und Position sowie von dynamischen Effekten abhängig (Geschwindigkeit und Beschleunigung). Die Armelemente des simulierten Roboters wurden

Tabelle 4.1: Abdeckung der Fehlergrößen durch die eingebrachten Fehler.

Fehlergrößen \ eingebrachte Fehler	Fehlerhafte Kalibrierung	Werkstücktoleranzen	Schleppfehler
Kalibrierung der relativen Pose	•		
Toleranzen am Werkstück		•	
Toleranzen am Greifer		•	
Schleppfehler			•
kinematische Parameter	•		
Synchronisation			•
Elastische Verformungen der Roboter	(•)		(•)

nicht als elastisch verformbar modelliert, jedoch sind die durch eine fehlerhafte Kalibrierung der relativen Lage entstehenden Fehler ebenfalls orientierungs- und positionsabhängig und der Schleppfehler ist abhängig von der Geschwindigkeit. Insofern werden durch die Einbringung dieser Fehler ähnliche Effekte wie bei einer elastischen Verformung der Roboter entstehen, womit auch diese Fehlerart wenigstens näherungsweise (geklammerter Punkt in Tabelle 4.1) abgedeckt werden.

Um die Auswirkungen der eingebrachten Fehler beurteilen zu können, müssen objektive Bewertungsmaße verwendet werden. Dabei sollen die einzelnen Fehlerfälle untereinander und insbesondere mit der fehlerfreien Situation verglichen werden können. Es wird jeweils der Referenzfall mit dem Fehlerfall verglichen, wobei für jede Messgröße der Mittelwert, der quadratische mittlere Abstand vom Mittelwert, das Minimum und das Maximum bestimmt werden. Die Messgrößen sind der Kraftfehler Δ_F , der Momentenfehler Δ_M , der Positionsfehler Δ_d und der Winkelfehler Δ_θ . Sie berechnen sich zu

$$\Delta_F = \sqrt{(F_{ref,x} - F_{err,x})^2 + (F_{ref,y} - F_{err,y})^2} \quad , \quad (4.10)$$

$$\Delta_M = |M_{ref} - M_{err}| \quad , \quad (4.11)$$

$$\Delta_d = \sqrt{(x_{ref} - x_{err})^2 + (y_{ref} - y_{err})^2} \quad \text{und} \quad (4.12)$$

$$\Delta_\theta = |\theta_{ref} - \theta_{err}| \quad . \quad (4.13)$$

Am Beispiel Δ_F ergeben sich die daraus abgeleiteten Größen,

$$\text{der Mittelwert} \quad \bar{\Delta}_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{F,i} \quad ,$$

$$\text{der quadratische mittlere Abstand vom Mittelwert} \quad \sigma_{\Delta_F} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta_{F,i} - \bar{\Delta}_F)^2} \quad ,$$

$$\text{das Minimum} \quad \Delta_{F,min} = \min_i \Delta_{F,i}$$

$$\text{und das Maximum} \quad \Delta_{F,max} = \max_i \Delta_{F,i} \quad .$$

Abbildung 4.5 zeigt alle Größen an einem Beispielverlauf.

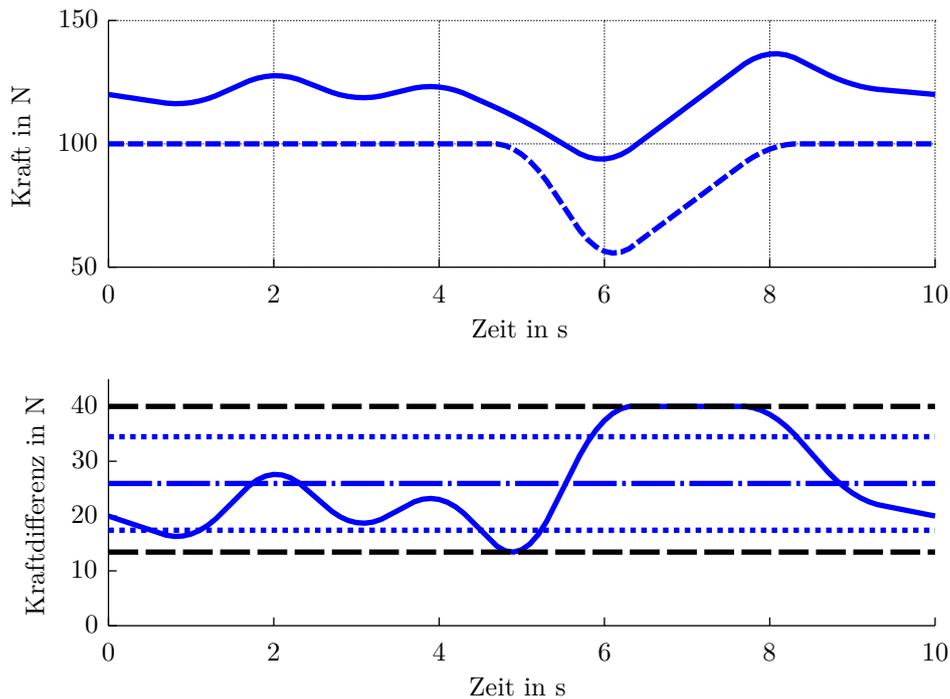


Abbildung 4.5: Kraftverlauf und Kraftfehler. Das obere Diagramm zeigt die Referenz- (gestrichelt) und die Vergleichskraft (durchgezogen), das untere Diagramm zeigt die daraus abgeleiteten Größen. Von oben nach unten wurden folgende Werte eingezeichnet: $\Delta_{F,max}$, $\bar{\Delta}_F + \sigma_{\Delta F}$, $\bar{\Delta}_F$, $\bar{\Delta}_F - \sigma_{\Delta F}$ und $\Delta_{F,min}$.

4.2.2 Versuchsszenarien und Ablauf

Es werden vier Simulationsszenarien betrachtet. In allen Szenarien wird das Robotermodell nach Abschnitt 4.1.2 und das Werkstückmodell nach Abschnitt 4.1.3 verwendet. Es wird eine Solltrajektorie definiert, die in Abbildung 4.6 abgebildet ist. Die angegebene Trajektorie bezieht sich auf den Mittelpunkt des Werkstücks. Sie besteht aus einem translatorischen Bahnabschnitt (Phase I), einem rotatorischen Bahnabschnitt (Phase II) und einem Abschnitt mit sowohl rotatorischer als auch translatorischer Bewegung (Phase III). Der Verlauf der Solltrajektorie aus Sicht des Flansches beider Roboter ist in Anhang C dargestellt.

Die Szenarien sind wie folgt gegliedert:

Szenario Referenz Dieses Szenario dient als Referenz zur Beurteilung der anderen untersuchten Szenarien. Es werden keine Fehler eingebracht. Die Simulationsergebnisse zeigen die Lastverteilung in einer idealen Situation.

Szenario Kalibrierung Die Vermessung der relativen Position der Roboterbasissysteme erfolgt bei den in dieser Arbeit verwendeten Robotern üblicherweise mit Messspitzen, die am Flansch des Roboters montiert werden. Diese Spitzen werden an mehreren Punkten im Raum exakt aufeinander gefahren. Aus der Kenntnis mehrerer Positionen im Raum in den jeweiligen Roboterkoordinaten kann die relative Lage der Roboter zueinander bestimmt werden. Die Genauigkeit der

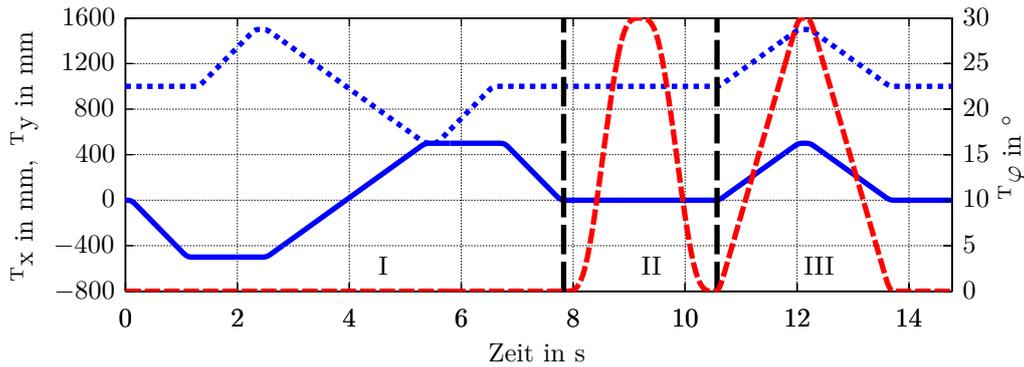


Abbildung 4.6: Soll-Trajektorienverlauf des Werkstückmittelpunkts für x , y und φ über der Zeit in Sekunden. x in blau durchgezogen, y in blau gestrichelt und φ in rot gestrichelt.

Vermessung ist dadurch direkt an die Absolutgenauigkeit der Roboter gekoppelt.

Hinsichtlich der Abweichung vom idealen Vermessungsergebnis muss die Größe der Fehler abgeschätzt werden. Geht man von einer Absolutgenauigkeit der Roboter von 1 mm aus, so kann eine Fehlmessung von 2 mm beim Vermessen auftreten. Dieser Messfehler tritt am Messpunkt auf, dessen Lage in der Mitte zwischen beiden Robotern angenommen wird. Aus der Kenntnis des Messfehlers und seiner Position kann der Winkelfehler an der Basis der Roboter bestimmt werden. Bei einem Roboterabstand von 5000 mm, einer Messlage in der Mitte der Roboter in einer Höhe von 1000 mm und einem Messfehler von 2 mm ergibt sich an der Basis der Roboter ein Winkelfehler von ca. 0,043 Grad. Abbildung 4.7a stellt den eingebrachten Fehler dar.

Szenario Werkstücktoleranzen Die Werkstücktoleranzen in der Produktionstechnik unterliegen einem weiten Spektrum von wenigen Mikrometern bis hin zu einigen Millimetern. Eine verallgemeinernde Abschätzung fällt schwer, ohne willkürliche Abschätzungen durchzuführen. Bei einer Werkstücklänge von $l = 500$ mm wird von einer Längenabweichung von $\Delta l = 2,5$ mm ausgegangen. Wird eine Werkstückhöhe von $1/2$ der Länge, also $h = 250$ mm, festgelegt, dann ergibt eine Längenänderung an der Oberseite des Werkstücks von 2,5 mm und einer Beibehaltung der idealen Länge an der Unterseite eine Verkippung von $\alpha = \text{atan}(\Delta l/h) \approx 0,573$ Grad. Abbildung 4.7b verdeutlicht die eingebrachten Werkstückabweichungen.

Szenario Schleppfehler Der Interpolationstakt heutiger Industrieroboter liegt im Bereich weniger Millisekunden. Geht man von einem Interpolationstakt von 4 ms aus (interner Interpolationstakt bei KUKA-Robotern mit Steuerung KRC 2), so folgt daraus bei einer Sollgeschwindigkeit von 1000 mm/s eine Wegstrecke von 4 mm. Ein so beschaffener geschwindigkeitsabhängiger Schleppfehler wird den beiden translatorischen Achsen des Roboters 2 überlagert. Dazu wird in die Simulation eine Totzeit von 4 ms am Ausgang der Achsen implementiert.

4.2.3 Ergebnisse

Die einzelnen Szenarien werden detailliert betrachtet. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Bewertung und eine quantitativer Vergleich.

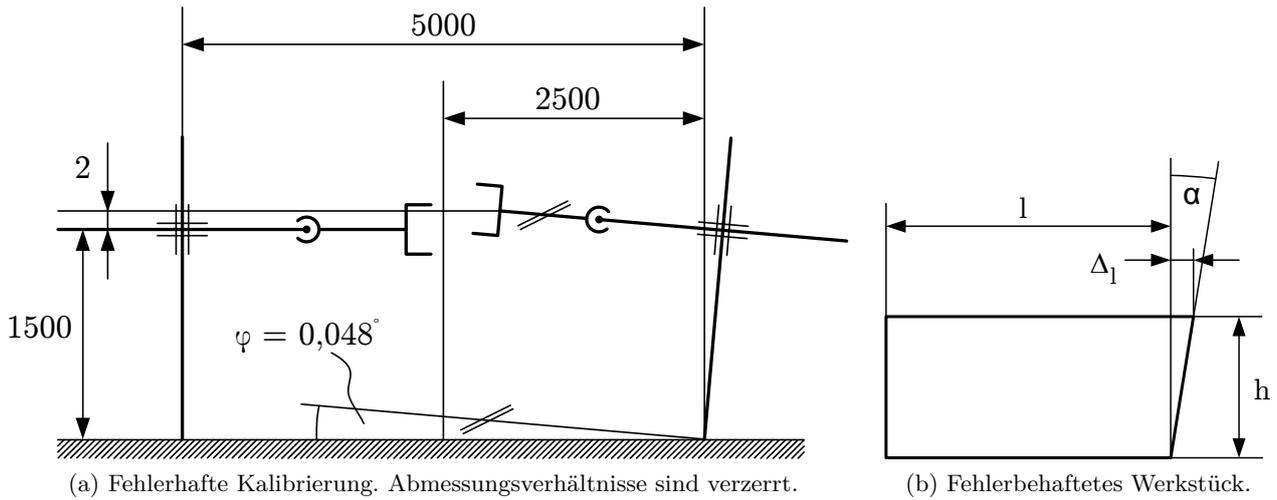


Abbildung 4.7: Eingebroughte Fehler der Simulationsszenarien.

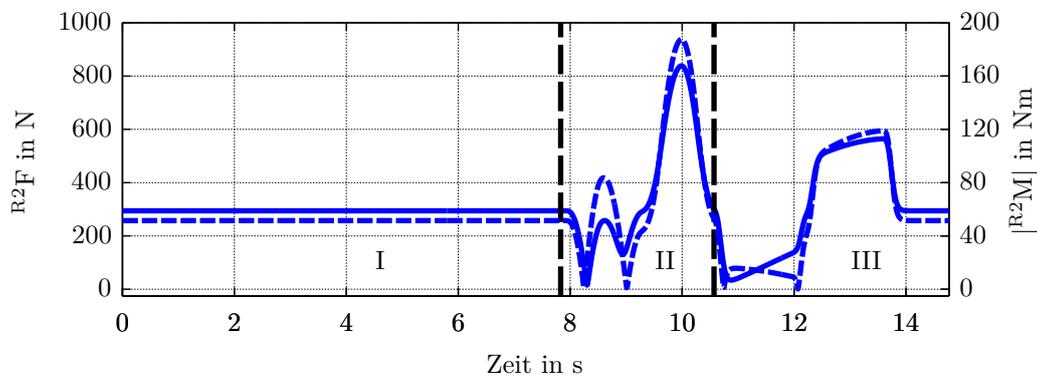


Abbildung 4.8: Kraft und Moment am Flansch des Roboters 2 bei der Referenzfahrt. Zeit in Sekunden. Durchgezogen die Kräftesumme, gestrichelt das Moment.

4.2.3.1 Szenario Referenz

Im Referenzfall werden in das beschriebene System keine Fehler eingebracht. Dennoch treten Kräfte an den Endeffektoren auf, die vom Eigengewicht des Werkstücks herrühren (Abbildung 4.8). Bei den Drehungen in den Phasen II und III verändert sich die Lastsituation am Roboter, weil der Schwerpunkt des Werkstücks seine horizontale Distanz zum Endeffektor verändert. Zusätzlich kommt bei den Rotationsbewegungen in Phase 3 das PT_2 -Verhalten der Roboterachsen zum Tragen, da die Roboter nicht mehr exakt die gleichen Bewegungsabläufe durchführen.

4.2.3.2 Szenario Kalibrierung

In Abbildung 4.9 sind die Ergebnisse der Simulation mit Kalibrierfehlern dargestellt. Die Kraftabweichungen in x - und y -Richtung zwischen Referenzfahrt und fehlerbehafteter Fahrt sind im oberen Diagramm zusammengefasst. Das untere Diagramm zeigt die x -Position und den Orientierungswinkel des Roboters. Anhand der senkrechten Markierungen ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen Position bzw. Orientierung und Kraftdifferenz sichtbar:

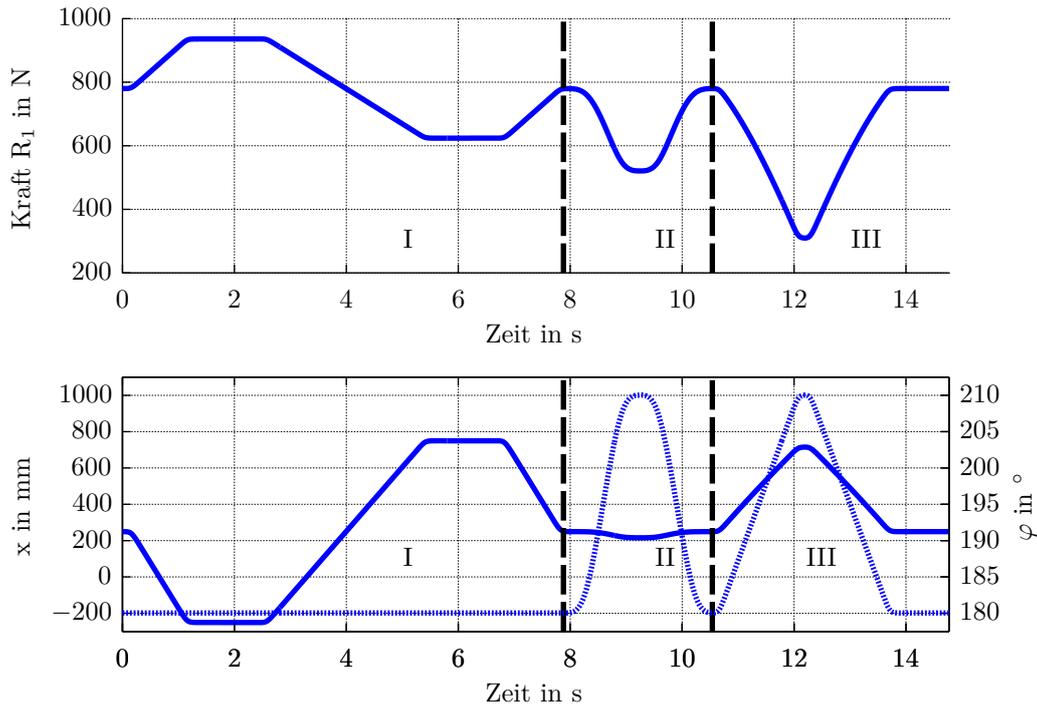


Abbildung 4.9: Vergleich zwischen Referenz- und fehlerbehafteter Fahrt bei Kalibrierfehlern. Das obere Diagramm zeigt die Summe der Kraftdifferenz in x - und y -Richtung an Roboter 2. Im unteren Bild ist die x -Position (durchgezogen) und die Orientierung (feingestrichelt) des Flansches des Roboters 2 dargestellt. Die senkrechten gestrichelten Linien bezeichnen die Übergänge zwischen linearer, rotatorischer und linear-rotatorischer Fahrt.

- In Phase I wird die Kraft fast ausschließlich von der Position in x -Richtung bestimmt. Die Änderungen in y -Richtung haben während der Plateauphasen in x -Richtung keine sichtbaren Auswirkungen.
- In Phase II wird die entstehende Kraft von der Rotationsbewegung beeinflusst.
- In Phase III (kombinierte Linear- und Drehbewegung) überlagern sich beide Effekte.

Die Entstehung des erläuterten Zusammenhangs wird klar, wenn man die geometrischen Beschaffenheiten betrachtet. Der Einfluss des eingebrachten rotatorischen Kalibrierfehlers verstärkt sich, wenn das Werkstück von der Basis des Roboters 2 wegbewegt wird (in negative x -Richtung), eine Bewegung in y -Richtung verändert den Abstand zur Basis 2 nur gering. Die Drehbewegungen in den Phasen II und III verringern den Kraftfehler. In Phase III wird die Kraft durch die Bewegung in Richtung Basis des Roboters 2 zusätzlich verringert, da in der Nähe der Basis des Roboters 2 der Kalibrierfehler weniger stark ins Gewicht fällt.

4.2.3.3 Szenario Werkstücktoleranzen

Es wurde der Transport eines fehlerbehafteten Werkstücks entsprechend Abbildung 4.7b simuliert. Die Abweichungen von den idealen Abmessungen wurden Abschnitt 4.2.2 entnommen.

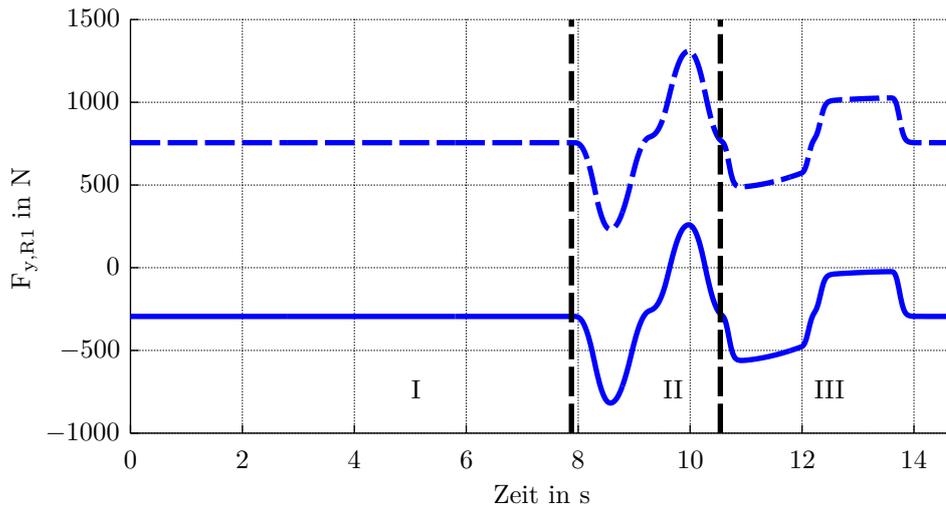


Abbildung 4.10: Auftretende Kräfte bei fehlerbehaftetem Werkstück in y -Richtung an Roboter 1. Der Kraftverlauf der Referenzfahrt ist durchgezogen, der Kraftverlauf beim fehlerbehafteten Werkstück ist gestrichelt dargestellt. Die in x -Richtung auftretenden Fehler sind mit ca. 30 N verhältnismäßig klein.

Die auftretenden Kräfte sind an beiden Roboterflanschen bis auf das Vorzeichen ungefähr gleich. Abbildung 4.10 zeigt die auftretenden Kräfte in y -Richtung für Roboter 1. Die Kraftdifferenz zwischen Referenzfahrt und fehlerbehafteter Fahrt ist über den gesamten Verlauf nahezu konstant, da sich die Greifpositionen am Werkstück während der Fahrt nicht ändern und sonst keine weitere negative Beeinflussung im Vergleich zur Referenzfahrt auftritt.

Beim Greifen des fehlerhaften Werkstücks fahren die Roboter die eingeteachten Greifpunkte am Werkstück an. Geht man von formschlüssigem Greifen aus, so wird das Werkstück durch das Greifen verformt und mechanisch verspannt. Da von nicht nachgiebigen Robotern ausgegangen wird, muss die gesamte Fehlstellung durch das Werkstück selbst und eine entsprechende Verspannung ausgeglichen werden (siehe auch Greifsituation 3 in Abbildung 3.3). Bereits durch die verhältnismäßig kleinen Werkstückabweichungen treten große Kräfte und Momente auf.

4.2.3.4 Szenario Schleppfehler

Zur Untersuchung der Auswirkungen dynamischer Fehler werden die Achsen des Roboters 2 durch einen Schleppfehler beeinflusst. Abbildung 4.11 verdeutlicht die Ergebnisse.

Im oberen Diagramm ist die Auswirkung der 4 ms-Verzögerung aller Achsen des Roboters 2 zu sehen. Der Positionswert in x -Richtung eilt im Fehlerfall der Referenzpose um 4 ms hinterher. Zum Zeitpunkt 4,140 s beträgt die Positionsdifferenz etwa 1,41 mm. Die aus diesem Schleppabstand resultierenden Kräfte verdeutlicht das untere Diagramm.

Es ist die Summe der Kräfte in x - und y -Richtung dargestellt. Gleichzeitig enthält das Diagramm eine Kurve, die die Bahngeschwindigkeit des Roboters 2 beschreibt. Da der Kraftfehler als Totzeit modelliert wurde, entstehen die zusätzlichen Kräfte im Vergleich zum Referenzfall nur in Bewegung, im Stillstand ist kein Unterschied erkennbar. Bei reiner Rotationsbewegung entsteht kein Schlepp-

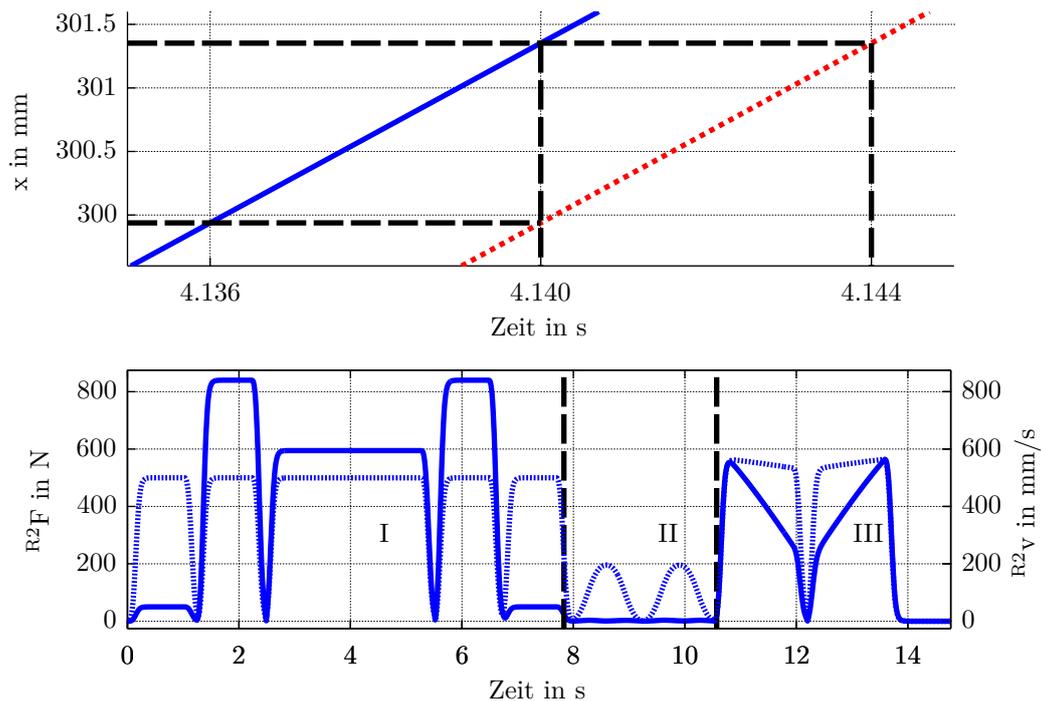


Abbildung 4.11: Schleppfehler und Zusammenhang zwischen Kraftfehler und Bahngeschwindigkeit. Im unteren Diagramm in blau durchgezogen die Gesamtkraft R^2F , in blau gestrichelt die Bahngeschwindigkeit R^2v .

fehler und daher keine vom Referenzfall abweichende Kraft, da für die Drehachse des Roboters kein Schleppfehler implementiert wurde.

4.3 Zusammenfassung und Bewertung

Tabelle 4.2 erlaubt einen quantitativen Vergleich der Fehlerfälle. Die Zahlenwerte resultieren immer aus einem Vergleich zwischen Referenzfahrt und fehlerbehafteter Fahrt. Beispielsweise bedeutet der erste Eintrag in der Tabelle, dass am Roboter 1 bei fehlerhafter Kalibrierung im Vergleich zur Referenzfahrt im Durchschnitt ein Kraftunterschied von etwa 710 N auftritt.

Die auftretenden mittleren Kräfte und Momente ($\bar{\Delta}_F$ und $\bar{\Delta}_M$) nehmen selbst bei den kleinen angesetzten Fehlern und der vergleichsweise geringen Steifigkeit des Werkstücks sehr große Werte an. Bei typischen Industrierobotern mit einer Nutzlast von z. B. 200 kg machen 1000 N ($\bar{\Delta}_F$ im Fehlerfall Werkstücktoleranzen) bereits 50% der verfügbaren Traglast aus. Es ist leicht vorstellbar, dass bei größeren Fehlern oder anderen Werkstücksteifigkeiten die zulässigen Grenzen überschritten werden. Dadurch werden die Roboter enorm zusätzlich belastet, ohne einen weiteren Nutzen aus dieser Zusatzbelastung im Sinne des Prozesses ziehen zu können.

Mit den gewählten Modellparametern liegen die Auswirkungen des Kalibrierfehlers etwa im Bereich der Auswirkungen der Werkstücktoleranzen. Die Auswirkungen des Schleppfehlers fallen geringer aus. Der Vergleich der absoluten Werte ist jedoch nicht zielführend, da durch Änderungen der Modellparameter andere Größen und Verhältnisse entstehen. Es wird jedoch festgestellt, dass alle drei Fehlerfälle

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Simulationsläufe im Vergleich zum Referenzlauf.

Szenario		Kalibrierung		Werkstücktoleranzen		Schleppfehler	
		1	2	1	2	1	2
Δ_F [N]	$\bar{\Delta}_F$	709,56	712,82	1050,42	1055,50	314,20	314,23
	$\sigma_{\Delta F}$	150,36	152,02	0,00	0,56	302,10	302,06
	$\Delta_{F,min}$	310,07	309,63	1050,42	1052,82	0,00	0,00
	$\Delta_{F,max}$	936,49	1185,51	1050,42	1056,46	840,00	840,00
Δ_M [Nm]	$\bar{\Delta}_M$	175,98	179,35	245,30	279,01	77,59	76,63
	$\sigma_{\Delta M}$	37,71	38,12	0,00	0,19	76,80	76,51
	$\Delta_{M,min}$	75,50	77,94	245,30	278,19	0,00	0,00
	$\Delta_{M,max}$	232,74	297,62	245,30	279,31	210,00	210,00
Δ_d [mm]	$\bar{\Delta}_d$	0,00	1,82	0,00	0,00	0,00	1,42
	$\sigma_{\Delta d}$	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,83
	$\Delta_{d,min}$	0,00	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	$\Delta_{d,max}$	0,00	2,33	0,00	0,00	0,00	2,26
Δ_θ [Grad]	$\bar{\Delta}_\theta$	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,03
	$\sigma_{\Delta\theta}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
	$\Delta_{\theta,min}$	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
	$\Delta_{\theta,max}$	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,18

signifikanten Einfluss auf Kräfte und Momente haben; keiner der Fehler sollte in der Praxis missachtet werden.

Die Dynamik der drei Fehlerfälle ist sehr unterschiedlich. Sie kann anhand der σ -Werte beurteilt werden:

- Werkstücktoleranzen haben einen statischen Einfluss auf die Verspannungen im Werkstück, da das Werkstück von Beginn bis Ende der Handhabung „falsch“ gegriffen wird. Durch die in dieser Arbeit erläuterte Einfahrtregelung kann dieser Effekt völlig unterbunden werden.
- Eine fehlerhafte Kalibrierung schlägt sich je nach angefahrterer Position im Arbeitsraum stärker oder weniger stark in den Messwerten nieder. Eine gute Kalibrierung kann beispielsweise durch den Einsatz von Lasertrackern zur Einmessung erreicht werden. Die maximal erreichbare relative Lagegenauigkeit der Roboter wird dann nur noch durch die Absolutgenauigkeit der Roboter begrenzt, die ähnlich wie im Fehlerfall der Kalibrierung auch über den Arbeitsraum der Roboter unterschiedliche Werte annimmt.
- Der Schleppfehler hat erwartungsgemäß nur Auswirkungen in Phasen mit Bewegung. Für heutige Regelungs- und Steuersysteme werden Jitter bei zyklischer Kommunikation von unter 50 μs erreicht [Los11], sodass derartige Effekte kaum auftreten sollten. Das Schleppfehlerszenario ist aber gleichzeitig ein Beispiel für den Einfluss von Fehlern in der Bahntreue. Diese Fehler treten aufgrund unterschiedlich starker Motoren und dynamischer Lastwechsel auch an aktuellen Industrierobotern auf. Sie werden bei kritischen Prozessen für Einzelroboter (Fügeverfahren, Bearbeiten) durch Nach-Teachen der Bahnpunkte oder durch Dynamik-Modelle kompensiert².

²In [Mül10] wurde in einer Lernphase die erforderliche Ausweichbewegung eines Roboters berechnet, die dann in der Durchführungsphase überlagert wird. Die Methode funktioniert zufriedenstellend, erfordert jedoch auch einen Kraft-

Ersteres kann bei kooperierenden Robotern nicht sinnvoll durchgeführt werden, letzteres erfordert ein Modell, welches selbst bei Lastwechseln lediglich Ungenauigkeiten im Bereich unterhalb weniger Zehntel-Millimeter aufweist und nur schwierig realisierbar ist. Der in dieser Arbeit erläuterte Transportregler kann den Einfluss von geringer Bahntreue reduzieren.

Es bleibt festzuhalten, dass kleine Fehlergrößen große Auswirkungen zeigen. Selbst bei guter Kalibrierung und Modellierung des Systems können mit der Zeit Veränderungen am System auftreten, die die Qualität der Handhabung absenken. Die Kraftregelung kann hier aktiv eingreifen und den Handhabungsprozess unterstützen.

Momenten-Sensor während der Lernphase. Soll eine andere Bahn abgefahren werden, muss erneut gelernt werden. Werkstücktoleranzen und Abnutzung der Greifer vermindern die Leistungsfähigkeit des Verfahrens ebenfalls.

5 Entwicklung der Kraftregelung

In Kapitel 3 wurde der Handhabungsprozess kooperierender Industrieroboter analysiert und die drei Teilprozesse „Einfahren ins Werkstück“, „Transport“ und „Ablegen“ zur späteren kraftgeregelten Realisierung ausgewählt. In diesem Abschnitt wird die Regelung aller drei Teilprozesse entwickelt und die Regelungsstruktur dargestellt.

Der entwickelte Regler kann in allen drei Teilprozessen als Basisregler eingesetzt werden. Es handelt sich dabei um einen modifizierten Impedanzregler. Er wird im ersten Abschnitt dieses Kapitels erläutert.

Die drei Teilprozesse, die kraft geregelt werden, unterscheiden sich in ihrem Ablauf und in ihren Eigenschaften (vgl. Kapitel 3). Daher wird für jeden Teilprozess eine eigene Regelungsstruktur aus dem Basisregler abgeleitet und in einem eigenen Abschnitt dieses Kapitels dargestellt.

5.1 Modifizierter Impedanzregler

In Abschnitt 2.2.4 wurde der Impedanzregler erläutert, der aufgrund seiner hohen Robustheit und seiner einfachen Parametrierung als Ausgangspunkt für die Kraftregelung in dieser Arbeit gewählt wurde. Er dient in einer modifizierten Fassung als Basisregler für die drei geregelten Teilprozesse dieser Arbeit. In diesem Abschnitt wird auf die durchgeführte Modifikation und die Eigenschaften des Reglers eingegangen, insbesondere auf dessen Parametrierung.

5.1.1 Modifikation des Reglers

Es sei verwiesen auf Anhang B. Dort wird analog zu den Ausführungen in [Sic10] detailliert erläutert, wie der Impedanzregler strukturiert ist. Der in dieser Arbeit entwickelte Regler ähnelt dem Impedanzregler nach Anhang B in der Admittanzstruktur (vgl. Gleichung (B.11) und Abbildung 5.1). Der übliche Impedanzregler ist kein Kraftregler im eigentlichen Sinne, da keine Kraft vorgegeben wird,

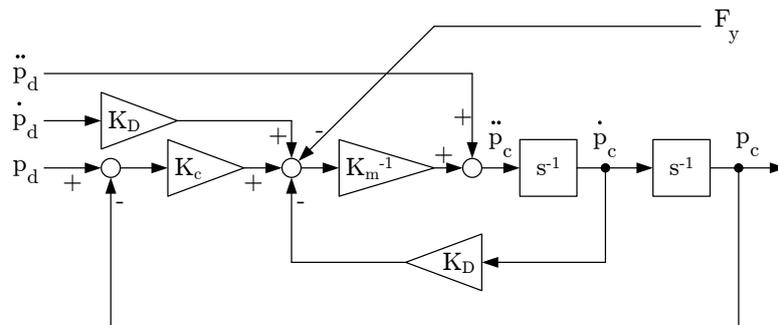
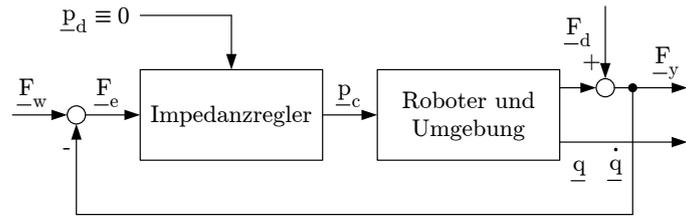
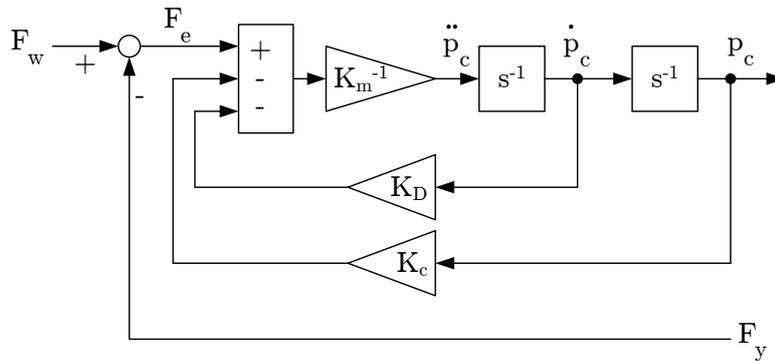


Abbildung 5.1: Impedanzregler als Blockschaltbild (vgl. [Sic10]).



(a) Struktur des Regelkreises bei mehrdimensionalen Ein- und Ausgangsgrößen.



(b) Blockschaltbild eines eindimensionalen Impedanzreglers ohne Sollbahnvorgabe.

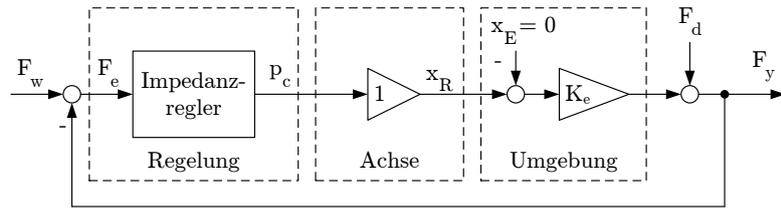
Abbildung 5.2: Impedanzregler, Umstrukturierung in Kraftregler.

sondern eine Bahn (p_d , \dot{p}_d und \ddot{p}_d). Entlang dieser Bahn bestimmt die festgelegte Impedanz bzw. das Verhalten des Feder-Dämpfer-Masse-Systems (K_m , K_D und K_c) das Verhalten des Roboters bei von außen einwirkenden Kräften F_y . Für die Aufgaben in dieser Arbeit wird jedoch ein Kraftregler benötigt, dem eine Sollkraft vorgegeben werden kann. Darüber hinaus wird die Kraftregelung der eigentlichen Roboterkooperation überlagert, sodass keine Solltrajektorie für den Impedanzregler vorgegeben wird (vgl. dazu Abschnitt 5.3).

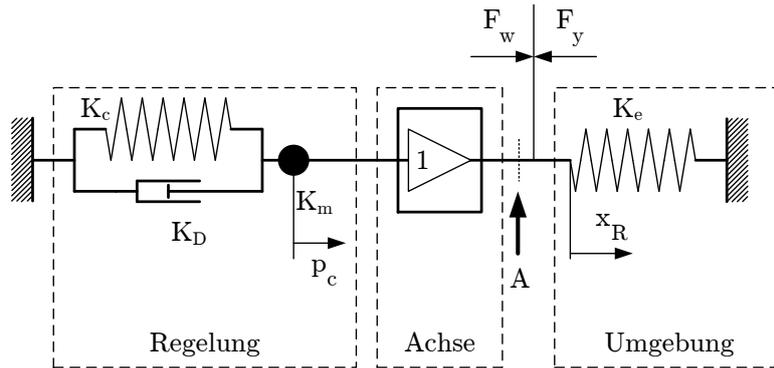
Es ist daher notwendig, die Impedanzregelung in eine Kraftregelung umzubauen. Dies geschieht durch Vorgabe einer Sollkraft und Nullsetzen der Sollbahn, siehe Abbildung 5.2a. Die vom Kraftsensor rückgekoppelte Kraft wird von der Sollkraft subtrahiert und eine Fehlerkraft F_e gebildet, die Eingang in den Regler findet. Durch Nullsetzen der gewünschten Roboterbahn versucht die Impedanzregelung, möglichst an der aktuellen Position zu bleiben und entsprechend der Parametrierung auf die Fehlerkraft zu reagieren. Der Impedanzregler vereinfacht sich durch Wegfall der Sollbahnvorgabe, siehe Abbildung 5.2b.

Das Verhalten des Reglers soll näher untersucht werden. Es wurde eine Simulation durchgeführt, bei der ein Sollkraftsprung auf eine derart kraftgeregelt, eindimensionale Linearachse gegeben wird. Abbildung 5.3 zeigt die Modellstruktur. Bei der Modellierung des Systems wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass die geregelte Achse perfekt jeder Sollwertvorgabe durch den Regler folgt. Darüber hinaus ist die Achse an eine elastische Umgebung gekoppelt, die der Bewegung entsprechend eine Kraft erzeugt.

In Abbildung 5.4 ist die Reaktion des Systems auf den Sprung in der Führungsgröße dargestellt. Ein Sprung in der Führungsgröße führt zu einem Anstieg der Regelgröße. Idealerweise sollte die Regelgröße ohne Verzögerung den Wert der Führungsgröße annehmen, was in der Realität aufgrund der System-



(a) Logische Modellstruktur.



(b) Mechanisches Ersatzschaltbild.

Abbildung 5.3: Modellstruktur, Impedanz als Kraftregler.

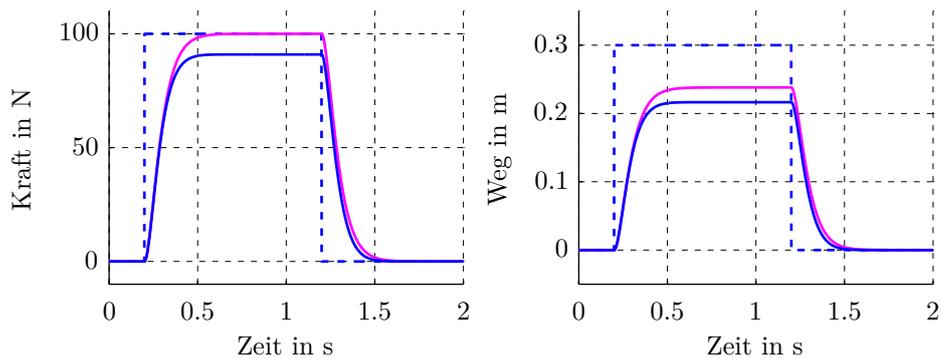


Abbildung 5.4: Systemantwort bei Sprung und anschließendem Abfallen in der Führungsgröße F_w . Links: In blau gestrichelt die Sollkraft F_w , in blau durchgezogen die Antwort des Regelkreises. In magenta die Antwort des Regelkreises bei $K_p = 0$ (siehe Text). Rechts: Zeit-Weg-Diagramm der Linearbewegung. Zur besseren zeitlichen Einordnung in blau gestrichelt der Sprung in F_w (skaliert).

dynamik nicht der Fall ist. Das Diagramm zeigt einen PT_2 -ähnlichen Verlauf (kein Sprung in der Steigung bei Sprung in der Führungsgröße, kein Überschwingen und damit Dämpfungswert ≥ 1). Die Regelgröße erreicht jedoch nicht die Sollgröße, das heißt, es existiert eine bleibende Regelabweichung, für die gilt

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F_e = \lim_{t \rightarrow \infty} (F_w - F_y) = F_{e,stationär} > 0 \quad . \quad (5.1)$$

Die bleibende Regelabweichung soll bestimmt werden. Der Impedanzregler entspricht einem PT_2 -Glied mit

$$G_{Impedanz} = \frac{p_c}{F_e} = \frac{1}{K_m s^2 + K_D s + K_c} \quad . \quad (5.2)$$

Für $t \rightarrow \infty$ verhält sich die Impedanz bei konstantem Eingang wie ein reines P -Glied. Da bei jedem P -Regler eine bleibende Regelabweichung auftritt, entsteht auch beim Impedanzregler eine bleibende Regelabweichung. Zur Untersuchung der bleibenden Regelabweichung wird mit dem Übertragungsverhalten des offenen Kreises $G_o(s)$ das Übertragungsverhalten von Führungsgröße auf Regelabweichung $G_{ew}(s)$ aufgestellt mit

$$\begin{aligned} G_o(s) &= G_{Impedanz}(s) \cdot 1 = \frac{1}{K_m s^2 + K_D s + K_c} \quad , \\ G_{ew}(s) &= \frac{F_e}{F_w} = \frac{1}{1 + G_o(s)} = \frac{K_m s^2 + K_D s + K_c}{K_m s^2 + K_D s + K_c + 1} \quad . \end{aligned}$$

Bei sprungförmiger Anregung $F_w(t > t_{Sprung}) = \overline{F_w}$ ergibt sich die bleibende Regelabweichung für $t \rightarrow \infty$ zu

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} F_e(t) &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \left(\frac{\overline{F_w}}{s} \right) \cdot G_{ew}(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \overline{F_w} \cdot \frac{K_m s^2 + K_D s + K_c}{K_m s^2 + K_D s + K_c + 1} \\ &= \overline{F_w} \cdot \frac{K_c}{K_c + 1} \quad . \end{aligned}$$

Die bleibende Regelabweichung bei sprungförmiger Anregung wird also ausschließlich durch K_c verursacht.

Der K_c -Anteil führt zu einem weiteren unerwünschten Verhalten. In Abbildung 5.5 ist der Einfluss einer Störung auf den Regelkreis dargestellt. Die Störgröße ist eine Störkraft (vgl. \underline{F}_d in Abbildung 5.2a) und verursacht einen Sprung im Regelfehler F_e . Dieser Sprung wird nach kurzer Zeit vom Regler ausgeglichen, sodass der Regelfehler wieder absinkt, wobei die bleibende Regelabweichung bestehen bleibt. Wird der Regelfehler durch Auftrennen der mechanischen Verbindung A in Abbildung 5.3b auf Null gesetzt, so reagiert der Impedanzregler mit einem Zurückfedern des Stellwerts. Dieses Zurückfedern wird durch das Impedanzverhalten und hier durch die Federsteifigkeit entsprechend Parameter K_c in Abbildung 5.3b verursacht, es ist anders als die bleibende Regelabweichung keine Eigenschaft

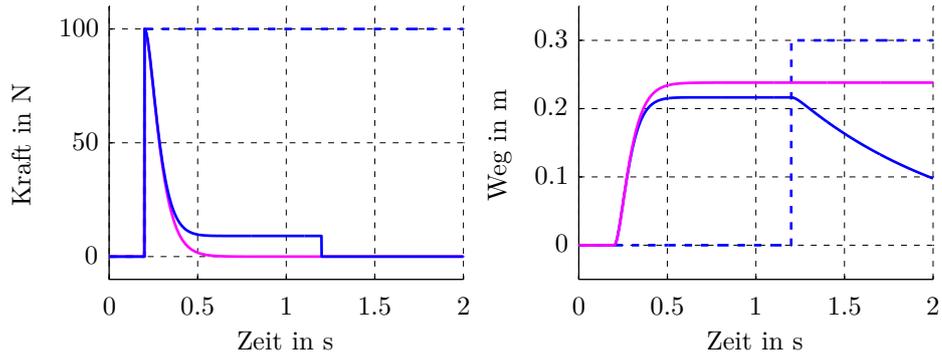


Abbildung 5.5: Regelfehler bei Sprung in der Führungsgröße F_w und anschließendem Wegfallen des Regelfehlers bzw. Trennen der Verbindung bei A in Abbildung 5.3b. Links: In blau gestrichelt die Sollkraft F_w , in blau durchgezogen der Regelfehler. In magenta der Regelfehler bei $K_c = 0$ (siehe Text). Rechts: Zeit-Weg-Diagramm der Linearbewegung. Zur besseren zeitlichen Einordnung in blau gestrichelt der Abfall des Regelfehlers (skaliert).

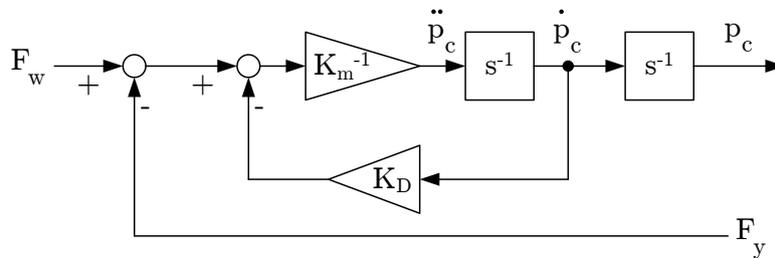


Abbildung 5.6: Blockschaltbild des Impedanzreglers ohne Sollbahnvorgabe und mit $K_c = 0$.

eines reinen P -Reglers. Vielmehr ist es ein gewünschtes Verhalten, das dem Verhalten eines ausgelenkten Feder-Dämpfer-Masse-Systems entspricht: Bei einer Auslenkung aus der Ruheposition liegt eine Federkraft an.

Je kleiner K_c ist, umso geringer ist die bleibende Regelabweichung *und* umso langsamer fährt beim plötzlichen Fehlerabfall die geregelte Achse zurück auf den Ausgangswert bzw. umso kleiner ist die auftretende Federkraft. Um beide Effekte klein zu halten, liegt es nahe, den K_c -Anteil so gering wie möglich zu halten. Es scheint am sinnvollsten, den K_c -Anteil komplett auf Null zu setzen, also

$$K_c = 0 \quad . \quad (5.3)$$

Dies wird in der Literatur so nicht durchgeführt, da dort p_d (und ihre Ableitungen) als Vorgabe in den Impedanzregler einfließen. Setzt man $K_c = 0$, so findet der p_d -Anteil keinen Eingang mehr in den Regler und es kann keine Sollbahn für die Impedanz vorgegeben werden (vgl. Abbildung 5.6). Beim klassischen Einsatz der Impedanzregelung nach Anhang B stellt dies ein Problem dar, beim Einsatz als reiner Kraftregler nach dem Schema in Abbildung 5.2a hingegen nicht.

In den Abbildungen 5.4 und 5.5 sind auch die jeweiligen Systemantworten für $K_c = 0$ dargestellt (magenta). Es tritt keine bleibende Regelabweichung und kein Zurückfedern des Stellwertes auf. Dieser modifizierte Impedanzregler wird im Rahmen dieser Arbeit vielfältig verwendet. Es werden einige Eigenschaften des Reglers erläutert.

5.1.2 Wesentliche Eigenschaften und Stabilität

In diesem Abschnitt werden Übertragungsfunktionen $G(s)$ zur besseren Lesbarkeit abgekürzt als G dargestellt.

Da auf das K_c -Glied der Impedanz verzichtet wird, kann der modifizierte Impedanzregler als PT_1 -Glied mit nachgeschaltetem I -Glied verstanden werden (siehe auch Abbildung 5.6). Es bietet sich an, die Bezeichner für die Reglerparameter entsprechend umzuformen und anzupassen, um intuitiv Parameter für das PT_1 -Modul vorgeben zu können. Ein Koeffizientenvergleich der Übertragungsfunktionen gilt

$$\begin{aligned} G_{\text{Impedanz}} &= \frac{1}{K_m s^2 + K_D s + K_c} \stackrel{K_c=0}{=} \frac{1}{K_m s + K_D} \frac{1}{s} = \frac{\frac{1}{K_D}}{\frac{K_m}{K_D} s + 1} \frac{1}{s} , \\ G_{\text{mod. Impedanz}} = G_R &= \frac{K}{Ts + 1} \frac{1}{s} \end{aligned} \quad (5.4)$$

zeigt eine hohe Ähnlichkeit: Zur Umrechnung von Reglerparametern der Impedanz in PT_1 -Parameter gilt

$$K = \frac{1}{K_D} \quad \text{und} \quad T = \frac{K_m}{K_D} . \quad (5.5)$$

Es soll das Übertragungsverhalten des geschlossenen Regelkreises betrachtet werden. Dazu wird wieder das System nach Abbildung 5.3 betrachtet. Das Übertragungsverhalten des offenen Regelkreises G_O , bestehend aus Regler G_R , idealer Strecke $G_{S,\text{ideal}}$ und Feder G_e (Fußindex von engl. external), hat das Übertragungsverhalten

$$G_o = G_R \cdot G_{S,\text{ideal}} \cdot G_e = \left(\frac{K}{Ts + 1} \frac{1}{s} \right) \cdot 1 \cdot K_e . \quad (5.6)$$

Daraus ergibt sich für den geschlossenen Kreis die Führungsübertragungsfunktion G_w zu

$$\frac{F_y}{F_w} = G_w = \frac{G_O}{1 + G_O} = \frac{K \cdot K_e}{Ts^2 + s + K \cdot K_e} = \frac{1}{\frac{T}{K \cdot K_e} s^2 + \frac{1}{K \cdot K_e} s + 1} . \quad (5.7)$$

Das Übertragungsverhalten mit idealer Regelstrecke kann also durch ein PT_2 -Glied beschrieben werden. Damit wird festgelegt und gilt

$$G_w = \frac{1}{\frac{T}{K \cdot K_e} s^2 + \frac{1}{K \cdot K_e} s + 1} = \frac{K_2}{T_2^2 s^2 + 2D_2 T_2 s + 1} , \quad (5.8)$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{T}{K \cdot K_e}} , \quad (5.9)$$

$$D_2 = \frac{1}{2\sqrt{T \cdot K \cdot K_e}} , \quad (5.10)$$

$$K_2 = 1 , \quad (5.11)$$

$$T = \frac{T_2}{2D_2} \quad \text{und} \quad (5.12)$$

$$K = \frac{1}{2D_2 T_2 K_e} . \quad (5.13)$$

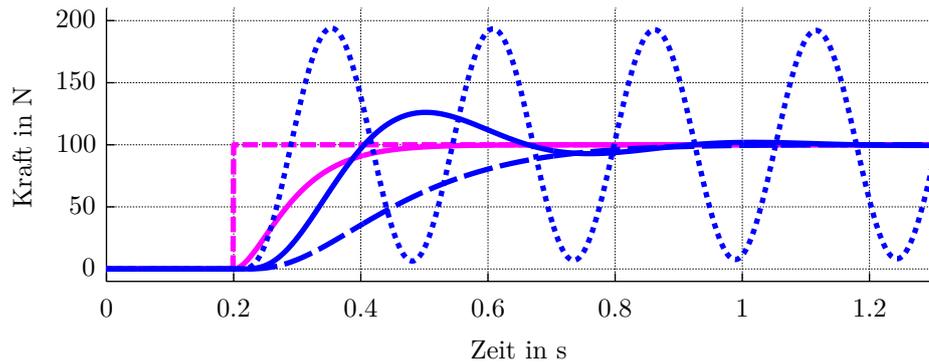


Abbildung 5.7: Übertragungsverhalten des geschlossenen Kraft-Regelkreises bei $K_e = 420 \text{ N/mm}$.

In magenta der Sollwertsprung (gestrichelt) und das Folgeverhalten des idealen Kreises (durchgezogen) für $T_2 = 0,05$ und $D_2 = 1$.

In blau die Antworten des nicht-idealen Kreises für $T_2 = 0,05$ und $D_2 = 1$ (durchgezogen; zum Vergleich mit idealem Kreis), $T_2 = 0,0136$ und $D_2 = 1$ (fein gestrichelt; grenzstabil) und $T_2 = 0,1$ und $D_2 = 1,4$ (gestrichelt; nahezu überschwingfrei).

Mit den Gleichungen (5.12) und (5.13) können die Reglerparameter so eingestellt werden, dass das Führungsübertragungsverhalten des geschlossenen Kreises einem PT_2 -Glied mit den Parametern T_2 , D_2 und K_2 entsprechend Gleichung (5.8), rechte Seite, entspricht. Dadurch kann das Übertragungsverhalten des geregelten Kreises komfortabel eingestellt werden. Das Ziel der Regelung sollte ein überschwingfreies, aber möglichst schnelles Erreichen des Sollwertes sein. Daraus ergibt sich direkt $D_2 = 1$. Die vorgegebene Sollkraft soll immer exakt eingestellt werden, womit sich $K_2 = 1$ ergibt. Der einzig verbleibende Parameter T_2 muss im Hinblick auf Stellgrößenbeschränkung, Stabilität und Robustheit eingestellt werden. Abbildung 5.7 zeigt in magenta einen beispielhaften Verlauf von Führungs- und Regelgröße.

Bei dieser Darstellung wurden jedoch vereinfachende Annahmen getroffen:

- Das Übertragungsverhalten der linearen Achse wurde mit $G_{S,ideal} = 1$ als ideal modelliert.
- Die genaue Steifigkeit K_e der Umgebung wurde als bekannt vorausgesetzt und das Übertragungsverhalten der Steifigkeit wurde als ideal angenommen..

Es wird nun untersucht, wie das Übertragungsverhalten des Kreises auf ein nicht-ideales Übertragungsverhalten der Linearachse und auf Fehlschätzungen von K_e reagiert. Damit können Aussagen hinsichtlich Stabilität und Robustheit des Reglers getroffen werden.

Nicht-ideale Linearachse Es wurde eine Simulation durchgeführt, bei der das bisherige ideale Übertragungsverhalten der Linearachse durch das identifizierte Verhalten einer Roboterachse ersetzt wurde. In [Peñ11] wurde das kartesische Übertragungsverhalten eines seriellen KUKA-Roboters an bestimmten Stellen im Raum identifiziert und durch ein PT_2 -Modell mit Totzeit T_t

$$G_{Achse} = G_S = \frac{1}{T_{Achse}^2 s^2 + 2D_{Achse} T_{Achse} s + 1} \cdot e^{-sT_t, Achse} \quad (5.14)$$

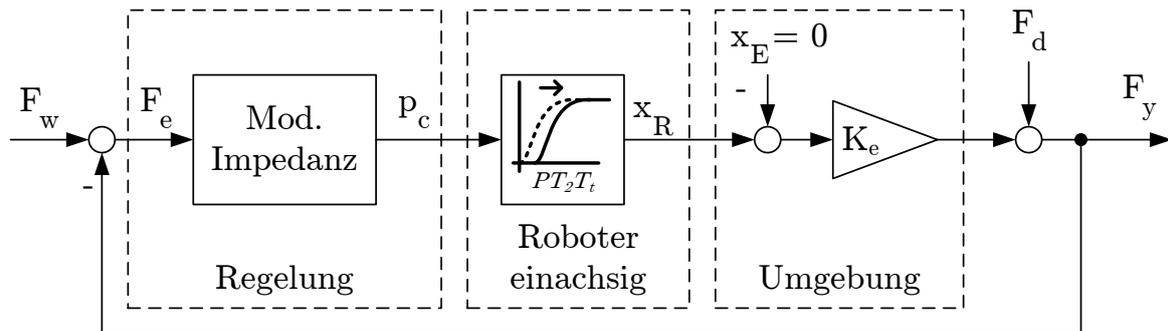


Abbildung 5.8: Geschlossener Regelkreis mit modifiziertem Impedanzregler und einachsigem Robotermodell.

$$\text{mit } T_{Achse} = 0,02828 \text{ s}, \quad D_{Achse} = 0,9838, \quad T_{t,Achse} = 7,566 \text{ ms} \quad (5.15)$$

approximiert. Dieses Modell des realen Roboters wird auch im Rahmen der in Kapitel 4 durchgeführten Untersuchungen verwendet. Es ergibt sich die Modellstruktur in Abbildung 5.8. Die Auswirkungen des nicht-idealen Übertragungsverhaltens sind deutlich sichtbar und können ebenfalls Abbildung 5.7 entnommen werden. Das nicht-ideale Verhalten der Linear- bzw. Roboterachse führt zu einer Verzerrung des Kreisverhaltens, wodurch $D_2 = 1$ nicht mehr zwingend ein überschwingfreies Verhalten hervorruft. Zur Auslegung des Impedanzreglers kann dieser Wert dennoch als erste Näherung verwendet werden.

Die Stabilität des Regelkreises kann mit diesem Modell näher untersucht werden. Die Regelstrecke wird durch ein PT_2T_t -Glied approximiert, das von sich aus stabil ist. Es muss daher nur der Einfluss des Reglers betrachtet werden. Dazu wird der offene Kreis untersucht und das Nyquist-Kriterium für verschiedene Reglerparameter angewandt. Abbildung 5.9 zeigt die zu den Parametervarianten gehörenden Nyquist-Diagramme. Größere T_2 - und D_2 -Werte führen zu einem größeren Abstand der Ortskurve des offenen Kreises vom kritischen Punkt bei $-1 + 0j$ und damit zu einem stabileren Regelkreis. Dies überrascht nicht, da größere Werte ein trägeres Verhalten des geschlossenen Regelkreises bedeuten. Die Stabilität des geschlossenen Regelkreises kann durch entsprechende Wahl von T_2 und D_2 sichergestellt werden.

Parameterfehlschätzungen Nun soll die Robustheit des Reglers bei Parameterfehlschätzungen der Regelstrecke betrachtet werden. Die vier Parameter T_{Achse} , D_{Achse} , T_t und K_e beeinflussen das Verhalten des als einzelne Achse modellierten Roboters und der als einfache Steifigkeit modellierten Umgebung. Der Einfluss von Fehlschätzungen dieser Parameter wird untersucht, indem für beispielhafte Regler-Parameter die Streckenparameter variiert und die entstehende Phasenrand- und Amplitudenranddifferenz im Nyquist-Diagramm ermittelt werden. Zudem wird zu jedem Parameter ermittelt, um welchen Faktor er abweichen darf, bis der Gesamtregelkreis instabil wird. Die Ergebnisse können Tabelle 5.1 entnommen werden.

Eine hohe Stabilität des geschlossenen Kreises zeichnet sich durch einen großen Phasenrand φ_R und einen großen Amplitudenrand k_R aus. Es zeigt sich, dass eine Fehlschätzung der Umgebungssteifigkeit K_e den größten Einfluss auf die Stabilität des Regelkreises hat. Ebenso ist der Fehlschätzungsfaktor a_{err} für K_e am kleinsten.

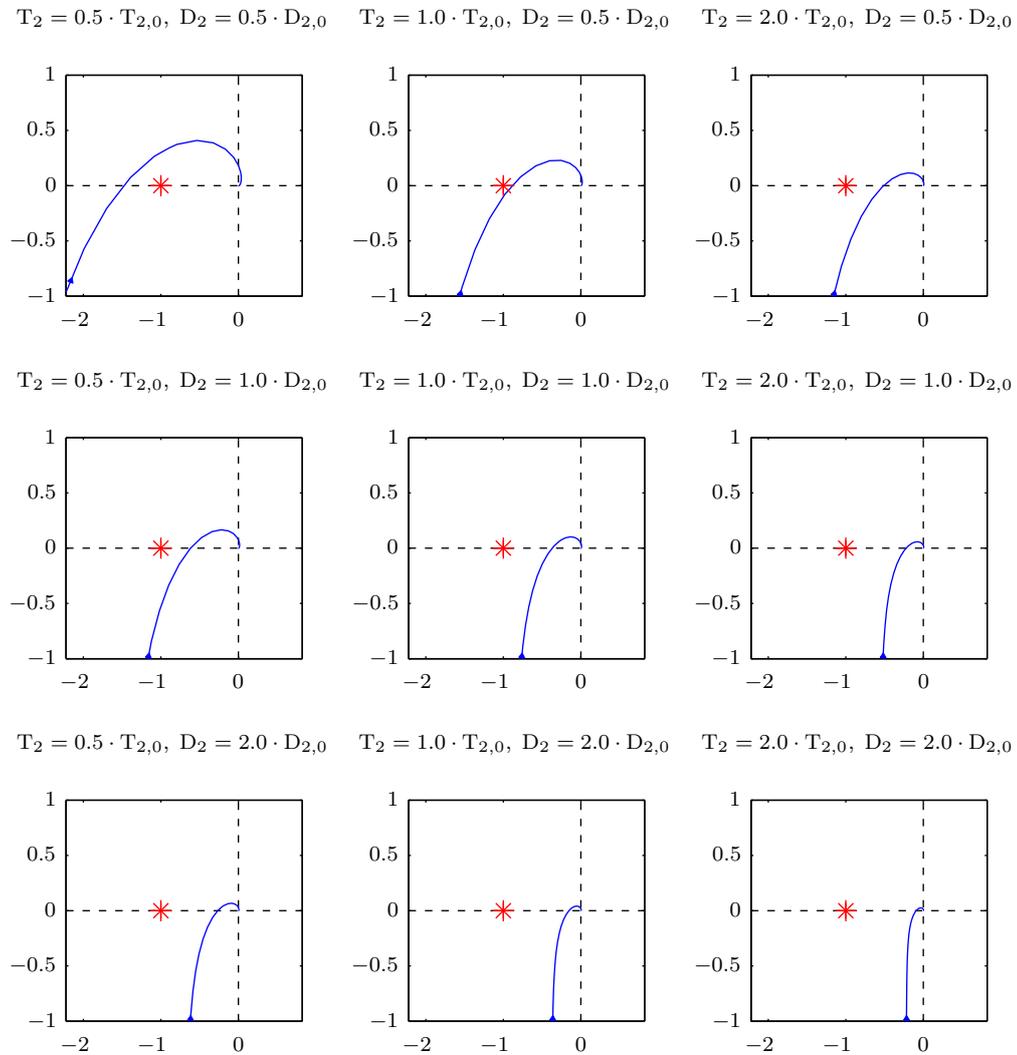


Abbildung 5.9: Nyquist-Diagramme bei verschiedenen T_2 - und D_2 -Parameterwerten des geschlossenen Kreises. Es gilt: $T_{2,0} = 0,05$ und $D_{2,0} = 1,0$. Zur besseren Übersicht fehlen die Achsbezeichnungen: Entlang der Abszissenachse ist der Real- und entlang der Ordinatenachse der Imaginärteil der Nyquist-Kurve aufgetragen. Der rote Stern markiert den kritischen Punkt $-1 + 0j$. Für $T_2 = 0,5 \cdot T_{2,0}$ und $D_2 = 0,5 \cdot D_{2,0}$ (links oben) wird der Regelkreis instabil.

Tabelle 5.1: Phasenrand φ_R , Amplitudenrand k_R und maximaler Fehlschätzungsfaktor a_{err} .

	Ausgangs- zustand	$T_{Achse} \times 2$	$D_{Achse} \times 2$	$T_t \times 2$	$K_e \times 2$
φ_R [°]	44,44°	25,88°	33,94°	40,47°	14,37°
k_R [dB]	8,62	5,15	9,24	7,27	2,60
a_{err}		4,88	> 100	12,17	2,69

Erläuterung zur Tabelle: Im Ausgangszustand entsprechen die Parameter der Linearachse den in Gleichung (5.15) angegebenen Werten und die Steifigkeit der Umgebung entspricht der in der Simulation vorgegebenen Steifigkeit ($K_e = 420$ N/mm). Die anderen Spalten enthalten jeweils in der Kopfzeile denjenigen Parameter, der im Vergleich zum Ausgangszustand verdoppelt wurde ($\times 2$) und die dazugehörigen Stabilitätswerte. Der Fehlschätzungsfaktor a_{err} gibt als Koeffizient an, wie stark der jeweilige Parameter vergrößert werden kann, bis Instabilität auftritt bei Beibehaltung der anderen Parameter.

Die Ermittlung der Parameter der Linearachse bzw. die Modellierung des Verhaltens des Roboters kann durch die Vorgabe eines Stellwertsprungs und der Messung des tatsächlichen Verhaltens der Linearachse bzw. des Roboters erfolgen. In der durchgeführten Untersuchung wurde die Veränderung der Stabilität bei um Faktor zwei falsch geschätzten Modellparametern durchgeführt. Eine derart große Abweichung der identifizierten Parameter vom realen Verhalten kann durch entsprechende Auswertung der Messdaten verhindert werden.

Somit stellt die Parametrierung der Umgebung die größte Schwierigkeit dar. In der Praxis wird die Umgebungssteifigkeit K_e im Wesentlichen durch die Steifigkeit des Werkstücks bestimmt.

5.2 Ausweichbewegung und mehrachsige Kraftregelung

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie Stellwerte des Kraftreglers in Bewegungen des Roboters umgesetzt werden. Dabei wird insbesondere auf Rotationsbewegungen eingegangen. Schließlich erfolgt der Übergang zur mehrachsigen Kraftregelung und die Fusion der unabhängigen Kraft-Momenten-Stellwerte in eine gemeinsame Bewegungstransformation.

5.2.1 Kartesische Bewegungsvorgabe

Jeder Kraftregler liefert am Ausgang einen Stellwert, der an einen unterlagerten Regelkreis weitergegeben wird. Je nach Reglerstruktur, Zugriff auf die Robotersteuerung und Regelungsziel können die unterlagerten Regelkreise beispielsweise Gelenkgeschwindigkeiten, -momente, Motorströme, kartesische Geschwindigkeiten oder Positionen regeln.

Im Rahmen dieser Arbeit steht die industrielle Umsetzbarkeit im Fokus. Daher wird zur Beeinflussung der Roboterbewegung eine Standard-Industriesteuerung verwendet. Sie kann sowohl kartesische Absolutwerte oder Geschwindigkeiten als auch Positionen oder Geschwindigkeiten auf Gelenkebene verarbeiten. Da die Vorgabe von Motorströmen und Gelenkmomenten bei typischen Industriesteuerungen nicht möglich ist und die Verwendung der Schnittstellen auf Gelenkebene die Berechnung einer



Abbildung 5.10: Bewegungen aufgrund von Kraft und Moment.

inversen Kinematik erfordert und sonst keine weiteren Vorteile bietet, soll hier von der Vorgabe der Roboterbewegungen in kartesischen Koordinaten ausgegangen werden.

Der Stellwert $\underline{u} = \begin{pmatrix} u_F & u_M \end{pmatrix}^T$ des Kraftreglers muss in eine Bewegung des Roboters umgerechnet werden. Diese Bewegung soll Ausweichbewegung genannt werden, denn es wird dabei unerwünschten Kräften ausgewichen.

Im Fall einer einachsigen Kraftregelung wirkt entlang der Raumrichtung des Kraftsensors eine Kraft. Aus dem Regelfehler berechnet der Kraftregler einen Stellwert u_F . Dieser Stellwert kann direkt in eine Bewegung x des Roboters entlang der Raumrichtung der Kraft umgerechnet werden. Abbildung 5.10a veranschaulicht den Vorgang. Formal kann

$$x = u_F = f(\vec{F}) \quad (5.16)$$

ausgeführt werden. Bei einer Momentenregelung wird ein Stellwert u_M generiert. Dieser muss jedoch in eine Drehung umgerechnet werden. Bei einem Drehmoment in der Ebene bietet es sich an, eine ebene Drehung α in Richtung des Drehmoments durchzuführen (siehe Abbildung 5.10b). Formal ergibt sich

$$\alpha = u_M = f(\vec{M}_P) \quad . \quad (5.17)$$

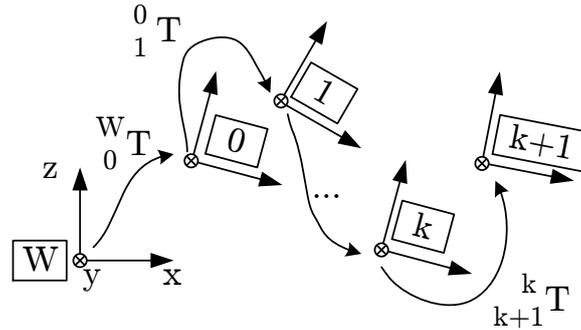
5.2.2 Stellwertfusion

Bisher wurde von einer einachsigen Kraft- oder Momentenregelung ausgegangen. Je nach Anwendungsfall und insbesondere in dieser Arbeit ist es jedoch notwendig, in mehreren Achsen gleichzeitig Kräfte und Momente zu regeln.

Am Eingang eines Kraftreglers liegt eine Regelabweichung in Form eines Kraft-Momenten-Tupels \underline{F}_e vor, für das gilt

$$\underline{F}_e = \underline{F}_w - \underline{F}_y \quad . \quad (5.18)$$

\underline{F}_w bezeichnet dabei das Soll-Tupel, \underline{F}_y das Tupel der gemessenen Werte. Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, setzt sich ein Tupel \underline{F} aus einem Kraftvektor \vec{F} und einem Momenten-Vektor \vec{M} zusammen. Zur mehrachsigen Regelung wird in dieser Arbeit jede Richtung unabhängig geregelt. Für eine sechsachsige Regelung werden sechs Regler parallel geschaltet, die unabhängig von den anderen Reglern arbeiten. Am Ausgang jedes Reglers steht ein Stellwert


 Abbildung 5.11: Bewegungsvorgabe durch ${}^k_{k+1}T$ in Anlehnung an [Spi07], S. 71.

$$\underline{u} = \begin{pmatrix} \underline{u}_F \\ \underline{u}_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{Fx} \\ u_{Fy} \\ u_{Fz} \\ u_{Mx} \\ u_{My} \\ u_{Mz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(F_x) \\ f(F_y) \\ f(F_z) \\ f(M_x) \\ f(M_y) \\ f(M_z) \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

an, der der jeweiligen Kraft bzw. dem jeweiligen Moment zugeordnet ist.

Im vorangehenden Abschnitt wurde dargestellt, dass dem unterlagerten Regelkreis eine kartesische Bewegung vorgegeben wird. Es stellt sich die Frage, wie die einzelnen Stellwerte den kartesischen Koordinaten zugeordnet werden können. Betrachtet wird Abbildung 5.11. Während der Regelung wird die Positionsvorgabe für die unterlagerten Regelkreise des Roboters ständig korrigiert. Der Frame 0 bezeichnet die Ausgangspose des Roboters, der Weltursprung trägt in der Abbildung den Frame W . Der Frame k stellt die letzte, dem Roboter vorgegebene Pose dar, der Frame $k + 1$ ist die nächste, vorzugebende Pose für den Roboter. Somit kann die Transformationskette

$${}^W_{k+1}T = {}^W_0T \cdot {}^0_1T \cdot \dots \cdot {}^k_{k+1}T \quad (5.20)$$

$$\text{mit } {}^k_{k+1}T = \begin{pmatrix} {}^k_{k+1}R & {}^k_{k+1}\vec{t} \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (5.21)$$

aufgestellt werden.

Ein einer Kraft zugeordneter Stellwert kann entsprechend Abschnitt 5.2.1 in eine translatorische Bewegung überführt werden. Im mehrachsigen Fall können diese translatorischen Bewegungen einander überlagert werden, sodass sich

$${}^k_{k+1}\vec{t} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} = \underline{u}_F = \begin{pmatrix} u_{Fx} \\ u_{Fy} \\ u_{Fz} \end{pmatrix} \quad (5.22)$$

ergibt, wobei die Zuweisung zwischen Vektor und Tupel elementweise erfolgt.

Bei den aus den Drehmomenten berechneten Stellwerten ist ein Einsetzen in die Rotationsmatrix nicht ohne Weiteres möglich. Es existieren mehrere Konventionen, wie Rotationswinkel um die

Raumachsen x , y und z in Rotationsmatrizen umgerechnet werden können. Diese Konventionen unterscheiden sich in der Art und Weise, wie die Rotationen miteinander verknüpft werden (aufeinander aufbauend nach Euler oder immer auf die Basisorientierung bezogen) und in welcher Reihenfolge (z. B. XYZ, ZYX, ZYZ, usw.) die Rotationen durchgeführt werden. Alle derartigen Konventionen haben gemeinsam, dass die Rotationen nacheinander ausgeführt werden. Es wird jedoch eine gleichzeitige Überlagerung der Rotationen benötigt. Dies kann die in Abschnitt 2.1.2, Gleichung (2.13), beschriebene Drehvektordarstellung leisten.

Dazu wird der Drehvektor $\vec{\varphi}$ benötigt. Dieser kann aus dem Vektor der Stellmomente mit

$$\begin{aligned}\theta &= |\underline{u}_M| \\ \vec{\varphi}' &= \frac{1}{|\underline{u}_M|} \cdot \underline{u}_M \\ \vec{\varphi} &= \theta \cdot \vec{\varphi}' = \underline{u}_M\end{aligned}\tag{5.23}$$

berechnet werden. Diese Verwendung der Drehvektordarstellung entspricht den Überlegungen zur Umrechnung des einachsigen Stellmoments in eine zugehörige Rotation. Dort (Abbildung 5.10b) zeigte der Drehvektor $\vec{\varphi}'$ aus der Ebene heraus und der Stellwert u_M wurde zum Verdrehwinkel α um diesen Drehvektor.

Aus (5.22) und (5.23) folgt dann

$${}^k_{k+1}T = \begin{pmatrix} {}^k_{k+1}R & {}^k_{k+1}\vec{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^k_{k+1}R(\vec{\varphi}) & \underline{u}_F \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = f_{F \rightarrow T}(\underline{u}) \quad .\tag{5.24}$$

Die aktuelle Sollvorgabe für den unterlagerten Positions-Regelkreis des Roboters wird mit dieser Transformation entsprechend der Stellwerte ständig aktualisiert.

5.3 Transport

Beim Transport wird das Werkstück von der Ausgangsstation zur Zielstation gebracht. Der Transport beginnt erst, nachdem das Werkstück aus der Station gehoben wurde, und endet, bevor das Ablegen in die Zielstation beginnt; insbesondere findet kein Kontakt des Werkstücks mit der Umgebung, der Ausgangs- oder Zielstation während des Transports statt.

Während des Transports sollen nur die Kräfte an den Robotern auftreten, die zum Tragen der Last erforderlich sind. Tatsächlich treten am Werkstück jedoch unerwünschte Kräfte auf, die verschiedene Ursachen haben (vgl. Abschnitte 3.1.4 und 4.2). An beiden Robotern werden die wirkenden Kräfte gemessen, und als Reaktion auf diese Kräfte können die Roboter sich entgegen der Wirkrichtung der unerwünschten Kräfte bewegen bzw. entgegen der Wirkrichtung der unerwünschten Momente drehen. Da an beiden Robotern die gleichen Reaktionskräfte lediglich in unterschiedlichen Koordinatensystemen vorliegen, tritt das Problem der Kraftverteilung auf, das nun kurz erläutert wird.

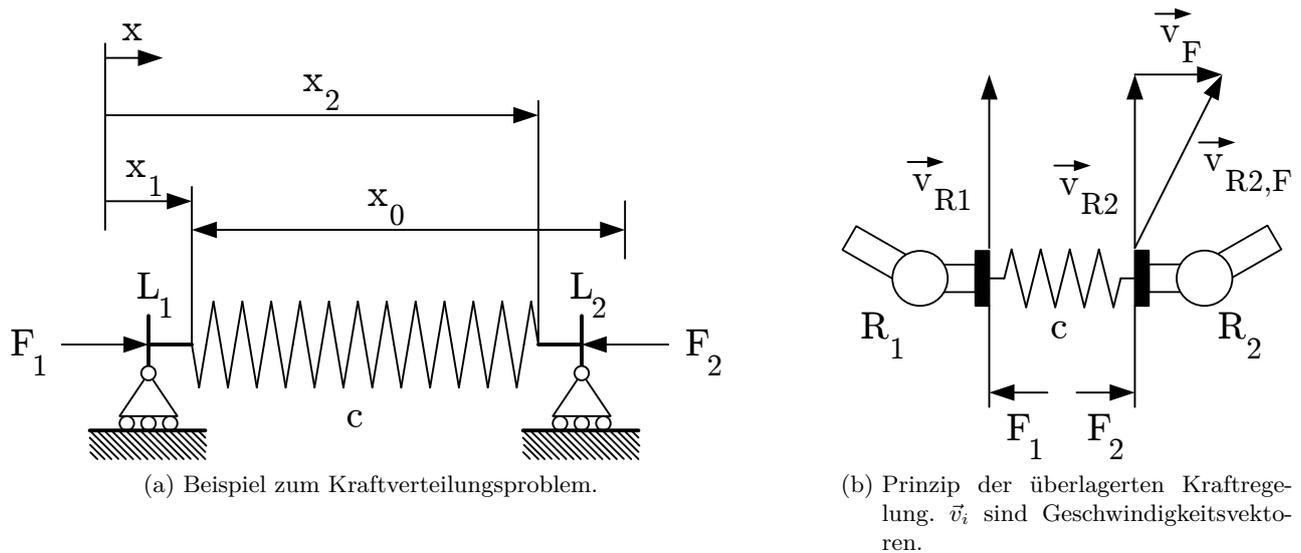


Abbildung 5.12: Kraftverteilungsproblem und überlagerte Kraftregelung.

5.3.1 Kraftverteilungsproblem

In Abbildung 5.12a ist eine Feder dargestellt, deren Enden in x -Richtung frei beweglich gelagert sind. Die Federenden L_1 und L_2 nehmen die Position x_1 und x_2 ein und es wirken dort die Kräfte \vec{F}_1 und \vec{F}_2 . Da sich das System in Ruhe befindet, müssen die Kräfte nach dem Satz „actio = reactio“ gleich groß sein, $F_1 = F_2 = F_F$, ihre Wirkrichtung ist entgegengesetzt. Bei Annahme einer linear elastischen Feder gilt nach dem Hooke'schen Gesetz

$$F_F = c \cdot \Delta x \quad , \quad (5.25)$$

wobei Δx die Längenänderung der Feder im Fall einer Streckung oder Stauchung bezeichne. x_o ist die Länge der ungestreckten bzw. ungestauchten Feder. Im vorliegenden Fall ist die Feder gestaucht, da entsprechend der Angaben in der Abbildung gilt: $x_2 - x_1 < x_o$. Außerdem gilt

$$\Delta x = x_2 - x_1 - x_o \quad . \quad (5.26)$$

Wenn keine Stauchung bzw. Dehnung der Feder vorliegt, ist $F_F = 0$. Daraus folgt

$$F_F = c \cdot \Delta x = c \cdot (x_2 - x_1 - x_o) = 0 \quad (5.27)$$

$$\Rightarrow x_2 = x_1 + x_o \quad . \quad (5.28)$$

Zu jedem x_1 kann also x_2 so gefunden werden, dass die Federkraft zu Null wird. Bezogen auf den hier betrachteten Fall der Roboterkooperation bedeutet dies, dass die relative Lage der Roboter zueinander angepasst werden muss, die absolute Lage der Roboter allerdings nicht vorgegeben ist. Sofern man jedoch die Position eines Roboters festhält und nur einen Roboter kraftregelt, stellt sich das Problem nicht mehr, da zu einem festen x_1 das zugehörige x_2 vorgegeben ist. Eben diese Vereinfachung macht sich die überlagerte Kraftregelung zunutze, die nun näher erläutert wird.

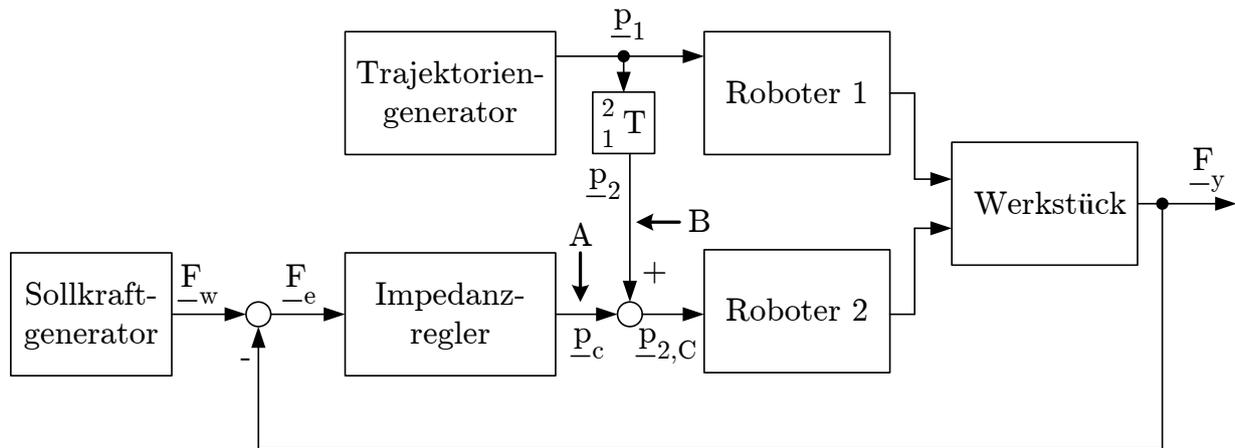


Abbildung 5.13: Reglerstruktur beim Transport. Zur besseren Lesbarkeit gilt (siehe Text):

$$p_1 = {}^{B1}_{R1} T, p_2 = {}^{B2}_{R2} T, p_c = {}^{R2}_C T \text{ und } p_{2,C} = {}^{B2}_C T.$$

Im Block ${}^2_1 T$ findet die folgende Operation statt:

$${}^{B2}_{R2} T = {}^{B2}_{B1} T \cdot {}^{B1}_{R1} T \cdot {}^{R1}_{R2} T$$

Abbildung 5.12b zeigt eine translatorische Bewegung beider Roboter. Die Kraft F_F tritt wie im vorangegangenen Beispiel an beiden Robotern auf. Zur Ausregelung der Kraft wird nur Roboter 2 bewegt, indem er der Kraft ausweicht, sich also nach rechts bewegt. Diese Bewegungsüberlagerung kann vektoriell ausgedrückt werden mit

$$\vec{v}_{R2,F} = \vec{v}_{R2} + \vec{v}_F \quad . \quad (5.29)$$

Dabei sind \vec{v}_{R1} und \vec{v}_{R2} die Geschwindigkeiten der Roboter und \vec{v}_F die überlagerte Geschwindigkeit des Roboters 2 zur Ausregelung der Kraft F_F . Diese Darstellung gilt nur für translatorische Bewegungen, sie kann aber entsprechend Abschnitt 5.2 auf rotatorische Bewegungen und Momente ausgeweitet werden.

5.3.2 Regelung

Es wird die Regelungsstruktur nach Abbildung 5.13 betrachtet. Der Trajektoriengenerator legt die Bewegung des Roboters 1 fest. Er stellt die reine Positionssteuerung des Systems dar. Lässt man Impedanzregler und Sollkraftgenerator weg bzw. löst die Addition des Stellwerts des Kraftreglers auf den Sollwert bei A, so erhält man rein positionsgeregelte kooperierende Roboter. Die Transformation ${}^{B2}_{B1} T$ wird beim Kalibrieren des Systems ermittelt und beschreibt die relative Lage der Roboterursprünge zueinander. Bei Beginn der Kooperationsfahrt wird die Transformation ${}^{R1}_{R2} T$ ermittelt. Sie beschreibt die relative Lage der Roboterendeffektoren während der Kooperation. Die Positionsregelung versucht diese relative Lage ständig beizubehalten. Die Pose des Roboters 2 kann berechnet werden zu

$${}^{B2}_{R2} T = {}^{B2}_{B1} T \cdot {}^{B1}_{R1} T \cdot {}^{R1}_{R2} T \quad . \quad (5.30)$$

Beide Roboter sind über das Werkstück gekoppelt. Es stellt sich eine Kraft \underline{F}_y ein, die an beiden Robotern erfasst werden kann.

Diese Kraft soll entsprechend den Ausführungen im folgenden Abschnitt 5.3.3 eingestellt werden. Zu jedem Zeitpunkt wird dabei eine Sollkraft ${}^{K_2}F_w$ an den Regler des Roboters 2 weitergegeben, die der Regler einstellen soll. Wenn die Vorgabe des Trajektoriengenerators an den Roboter 2 über Verbindung B ausbleibt, kann alleine durch Vorgabe des Kraftsollwerts eine Kraftregelung durchgeführt werden. Durch die Rückführung der Kräfte am Sensor K_2 wird die Position des Roboters 2 so beeinflusst, dass einerseits der Bewegung des Roboters 1 gefolgt wird und andererseits die korrekte Kraft eingestellt wird.

Dabei wird jedoch ein Regler zur Bewältigung zweier Aufgaben eingesetzt (Bewegungsfolge und Kraftregelung) und vorhandene Informationen werden nicht verwendet (Bewegungsvorgabe durch den Trajektoriengenerator). Der Roboter 2 wird nur langsamen Bewegungen des Roboters 1 folgen können, da er aufgrund der Steifigkeit des Werkstücks nur langsam auf Kraftänderungen reagieren darf, um ein Aufschwingen des Systems zu verhindern, andererseits für eine schnelle Bewegungsfolge schnell reagieren müsste.

Daher wurde wie in der Abbildung 5.13 dargestellt eine überlagerte Kraftregelung entwickelt. Dabei wird dem Roboter 2 die grundsätzliche Bewegungstrajektorie vom Trajektoriengenerator vorgegeben. Die eigentliche Kraftregelung wird dieser Bewegung überlagert. Damit muss der Kraftregler nur einer Aufgabe nachkommen und kann entsprechend parametrisiert werden. Die grundsätzliche Bewegung der Roboter beeinflusst zwar die auftretenden Kräfte im Werkstück, wird vom Kraftregler jedoch als Störgröße behandelt. Die Bewegungsvorgaben des Impedanzreglers seien durch die Transformation ${}^R_C T$ bezeichnet, dann gilt

$${}^R_C T = {}^{B_2}_{R_2} T \cdot {}^{R_2}_C T \quad . \quad (5.31)$$

Der verwendete Regler ist der zuvor in Abschnitt 5.1 entwickelte modifizierte Impedanzregler. Die Regelung erfolgt für jede kartesische Achse unabhängig, das heißt der Impedanzregler liegt insgesamt sechs Mal vor. Beim Transport sind die einzelnen Regler voneinander unabhängig, es gibt keine Verknüpfung oder gegenseitige Beeinflussung der Reglerpfade.

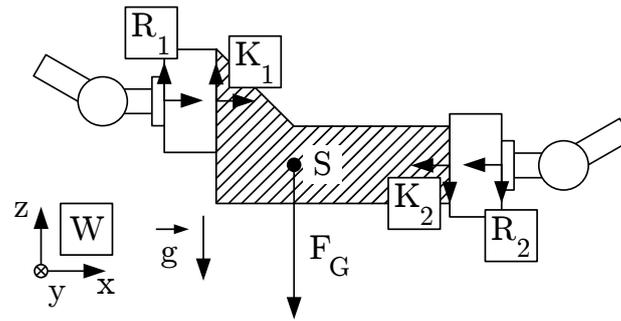
5.3.3 Sollwertgenerierung

Beim Transport soll die Last des Werkstücks auf beide Roboter gleichmäßig verteilt werden, was als Load-Sharing oder Lastteilung bezeichnet wird. Um dem Regler die korrekten Sollwerte vorgeben zu können, muss die Masse des Werkstücks und die Position des Schwerpunkts bekannt sein. Daraus kann die von einem Roboter zu tragende Last berechnet werden.

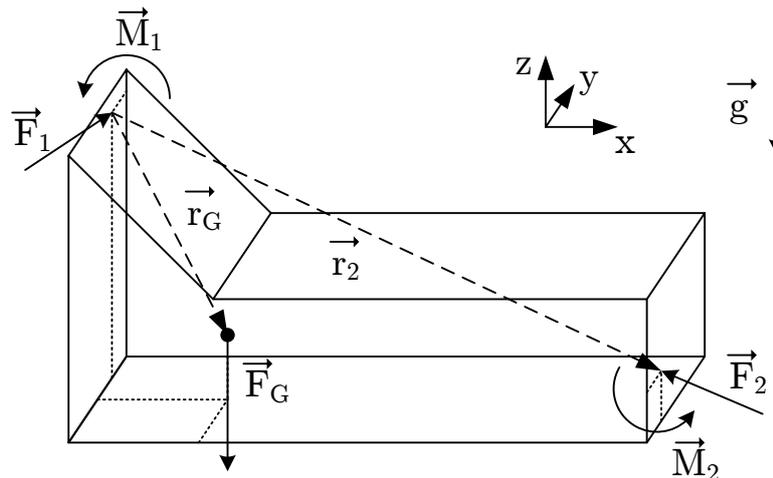
Es soll die Situation in Abbildung 5.14 betrachtet werden. Die Roboter spannen das Werkstück ein, an den Einspannpunkten wirken die Kräfte \vec{F}_i und Momente \vec{M}_i . Das Aufstellen des Kräfte- und Momentengleichgewichts führt zu

$$\sum_i \vec{F}_i = 0 : \quad \vec{F}_1 + \vec{F}_2 - \vec{F}_G = 0 \quad \text{und} \quad (5.32)$$

$$\sum_i \vec{M}_i = 0 : \quad \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{r}_G \times \vec{F}_G + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2 = 0 \quad (5.33)$$



(a) Roboter und Kraftsensoren mit Werkstück.



(b) Freigeschnittenes Werkstück.

Abbildung 5.14: Kräfte beim Load-Sharing.

$$\text{mit } \vec{F}_i = \begin{pmatrix} F_{ix} & F_{iy} & F_{iz} \end{pmatrix}^T, \quad \vec{M}_i = \begin{pmatrix} M_{ix} & M_{iy} & M_{iz} \end{pmatrix}^T$$

$$\text{und } \vec{r}_i = \begin{pmatrix} r_{ix} & r_{iy} & r_{iz} \end{pmatrix}^T.$$

Die Kräfte in x - und y -Richtung und das Drehmoment um die z -Achse sollen an beiden Robotern Null sein und die Gewichtskraft ist $\vec{F}_G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & F_{Gz} \end{pmatrix}^T$. Es verbleiben die drei Gleichungen

$$F_{1z} + F_{2z} - F_{Gz} = 0, \quad (5.34)$$

$$M_{1x} + M_{2x} + r_{2y} \cdot F_{2z} + r_{Gy} \cdot F_{Gz} = 0 \quad \text{und} \quad (5.35)$$

$$M_{1y} + M_{2y} - r_{2x} \cdot F_{2z} - r_{Gx} \cdot F_{Gz} = 0 \quad (5.36)$$

mit den sechs Unbekannten F_{1z} , F_{2z} , M_{1x} , M_{2x} , M_{1y} , und M_{2y} . Zur exakten Lastteilung werden die Randbedingungen

$$F_{1z} = F_{2z} = F_z, \quad M_{1x} = M_{2x} = M_x \quad \text{und} \quad M_{1y} = M_{2y} = M_y \quad (5.37)$$

festgelegt. Die einzustellenden Sollwerte lauten dann

$$F_z = \frac{F_{Gz}}{2} \quad , \quad (5.38)$$

$$M_x = -\frac{1}{4} \cdot r_{2y} \cdot F_{Gz} + \frac{1}{2} \cdot r_{Gy} \cdot F_{Gz} \quad \text{und} \quad (5.39)$$

$$M_y = \frac{1}{4} \cdot r_{2x} \cdot F_{Gz} - \frac{1}{2} \cdot r_{Gx} \cdot F_{Gz} \quad . \quad (5.40)$$

Bei einem wie in den späteren Experimenten verwendeten symmetrischen Werkstück mit $r_{2y} = r_{Gy} = 0$ und $r_{2x} = 2 \cdot r_{Gx}$ vereinfachen sich die Ausdrücke zu

$$F_z = \frac{F_{Gz}}{2} \quad \text{und} \quad M_x = M_y = 0. \quad (5.41)$$

Der zur Messung der auftretenden Kräfte und Momente eingesetzte Sensor K_2 wird vom Roboter R_2 mitbewegt. Der Schwerkraftvektor ändert bei Rotation seine Orientierung im System K_2 . Die bisherigen Betrachtungen wurden im System W durchgeführt, zur Überführung ins System K_2 können die Kraft-Momenten-Sollwerte mit

$$\begin{aligned} {}^{K_2}\vec{F}_w &= \frac{K_2}{W}R \cdot {}^W\vec{F}_w = \frac{K_2}{W}R \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & F_z \end{pmatrix}^T \\ {}^{K_2}\vec{M}_w &= \frac{K_2}{W}R \cdot {}^W\vec{M}_w = \frac{K_2}{W}R \cdot \begin{pmatrix} M_x & M_y & 0 \end{pmatrix}^T \end{aligned}$$

transformiert werden.

Bei Beschleunigung des Werkstücks treten Trägheits- und Corioliskräfte auf. Diese Trägheitskräfte beeinflussen die Kraftregelung, indem sie sich den aufgrund der inneren Spannung des Werkstücks auftretenden Kräften und Momenten überlagern. Sofern Informationen zu den Beschleunigungen vorliegen, können diese Kräfte berechnet und bei der Berechnung der Sollkraft berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde keine Betrachtung von Kräften und Momenten durchgeführt, die aufgrund von Beschleunigungen auftreten, da der Einfluss dieser Kräfte bei den gefahrenen Geschwindigkeiten als gering eingeschätzt wird¹ und die Regelung sich nicht innerhalb der kurzen Beschleunigungszeiträume von $< 0,4$ s auf die neue Situation einstellen kann (Beschleunigung und Beschleunigungsdauer sind der Messung in Abbildung 6.7 entnommen). Die Ermittlung der Beschleunigung durch zweifaches Differenzieren der Position der Roboter führte zu unbefriedigenden Ergebnissen und wurde daher nicht weiter verfolgt.

5.4 Einfahrt ins Werkstück

Zu Beginn des Teilprozesses (Teilprozesse siehe Abschnitt 3.2.2) „Einfahrt ins Werkstück“ besteht kein Kontakt zwischen den Greifern der Roboter und dem Werkstück (Abbildung 5.15a). Der vorangehende Teilprozess „Annähern ans Werkstück“ ist derart ausgelegt, dass sich die Greifer zwar in der Nähe, aber nicht in Kontakt zum Werkstück befinden. Am Ende des Teilprozesses „Einfahrt ins Werkstück“

¹Im späteren Versuchsaufbau wird eine Masse $m = 50$ kg mit einer Beschleunigung von $a = 1,5$ m/s² beschleunigt, wodurch eine Kraft $F_a = m \cdot a = 75$ N auftritt. Dies entspricht ca. 15% der durch das Eigengewicht $F_G = 490,5$ N verursachten Kraft und 18,75% der beim Transport auftretenden Kraftamplitude von ca. 400 N.

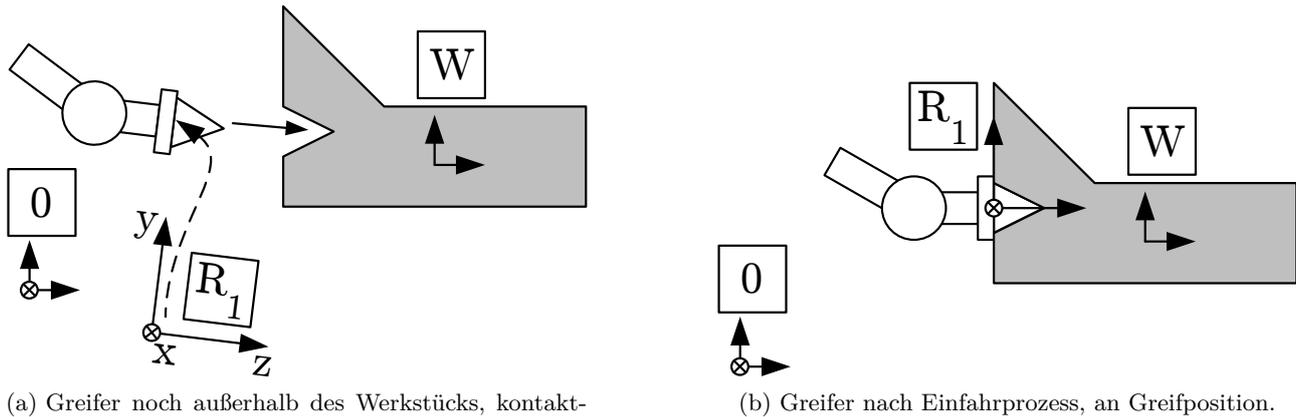


Abbildung 5.15: Einfahrt.

befinden sich beide Greifer an der Greifposition, sodass der nächste Teilprozess „Greifen“ durchgeführt werden kann.

Die Aufgabe bei der Einfahrt besteht also darin, den Greifer an die Greifposition zu bringen (Abbildung 5.15b). Dabei wird von einem Kontakt der Greifer mit dem Werkstück bereits während der Einfahrt ausgegangen, weshalb Kontakt- und Verformungskräfte im Werkstück und am Roboter auftreten. Bei einer Einfahrt ohne Kraftregelung können dabei enorme Kräfte auftreten. Das Ziel der Anfahrt der Greifposition wird somit ergänzt um das Ziel geringer auftretender Kräfte.

Die erforderliche Bewegung, um beide Ziele zu erreichen, weist eine Vorzugsrichtung auf: der Greifer muss sich vorwiegend in eine klar definierte Richtung bewegen, die Einfahrrichtung genannt werden soll (vgl. dazu auch die Abschnitte „Annähern ans Werkstück“, „Einfahren ins Werkstück“, „Fahrt zur Endablage“, „Ablegen“ in Abschnitt 3.2.2). In dieser Richtung ist die größte Bewegungsamplitude durchzuführen. In Abbildung 5.15a entspricht die z -Richtung dieser Einfahrrichtung.² Im Weiteren wird für die Kraft in Einfahrrichtung der Bezeichner F_n verwendet werden, während für die Summe der übrigen Kräfte der Bezeichner F_t und für die Summe der Momente der Bezeichner M verwendet wird.

Während Bewegungen entlang der verbleibenden rotatorischen und translatorischen Freiheitsgrade entsprechend den Ausführungen zum Transport in Abschnitt 5.3 geregelt werden können, bedarf die Einfahrrichtung besonderer Aufmerksamkeit.

5.4.1 Regelung der Geschwindigkeit in Einfahrrichtung

Entlang der Einfahrrichtung in das Werkstück (und beim Ablegen des Werkstücks, siehe Abschnitt 5.5) muss Kontakt zum Werkstück (bzw. zur Ablage) hergestellt werden. Dazu sollte der Roboter zügig bewegt werden, damit der Vorgang schnell abgeschlossen werden kann. Andererseits muss die Geschwindigkeit des Roboters bei Kontaktherstellung drastisch reduziert werden, um Kraftspitzen zu

²Im betrachteten Fall ist die Einfahrrichtung konstant. In komplexeren Situationen kann die Einfahrrichtung je nach Position des Roboters relativ zum Werkstück jedoch auch variieren: die Bewegungsrichtung entspricht einer Trajektorie im Raum, der zurückgelegte Weg ist ein Parameter dieser Trajektorie.

vermeiden. Gleichzeitig muss ein plötzliches Zurückspringen des Roboters verhindert werden, weil dies zu unerwünschten Schwingungen und zu Schlägen in den Antrieben führt. Zu diesem Zweck wurde eine Regelungskomponente entwickelt, die die Geschwindigkeit des Roboters bei Kontakt mit der Umgebung anpasst.

Beim Übergang von freier, kontaktfreier Fahrt zu einem Kontakt mit der Umgebung ändert sich das Verhalten am Kontaktpunkt sprunghaft. Wo zunächst kein Hindernis war (Steifigkeit = 0), tritt unvermittelt eine Steifigkeit $\gg 0$ auf. Der im vorangegangenen Abschnitt dargestellte Regler kann jeweils mit einer von beiden Situationen gut umgehen. Ein plötzlicher Wechsel der Umgebungssteifigkeit führt allerdings zu Änderungen im Stabilitätsverhalten (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Die Fahrgeschwindigkeit in Einfahrriichtung muss reduziert werden, sobald der Roboter in Kontakt mit der Umgebung tritt. Es gibt zwei Extremsituationen, die der Regler handhaben muss:

- Kraftregelung bei hergestelltem Kontakt mit Proportionalfaktor K , wie beim reinen Transport
- freie Fahrt mit definierter Geschwindigkeit v_{frei} im kontaktfreien Fall

Zwischen beiden Situationen muss der Regler umschalten. In Abschnitt 2.2.4 wurde die hybride Kraftregelung erläutert. Dort werden mit den beiden Selektionsmatrizen S_f und S_p den Raumrichtungen entweder eine Kraft- (S_f) oder eine Positionsregelung (S_p) zugewiesen. Dabei wird allerdings nicht betrachtet, wie ein Umschalten zwischen Positions- und Kraftregelung bewerkstelligt wird. Ein hartes Umschalten hat einen Sprung in den Stellwerten zur Folge und führt zu unerwünschten und die Roboterstruktur anregenden Schlägen in den Antrieben. Daher muss das Umschalten fließend erfolgen.

In Abbildung 5.6 stellt der Impedanzregler ein PT_1 -Glied dar, dessen Ausgang als Geschwindigkeitsstellwert für die Roboterbewegung verwendet wird. Statisch (ohne Betrachtung des T_1 -Anteils) berechnet sich der Geschwindigkeitsstellwert zu

$$\dot{p}_c = K_n \cdot (F_{n,w} - F_{n,y}) = K_n \cdot F_{n,e} \quad . \quad (5.42)$$

Dies entspricht dem gewünschten Verhalten, wenn der Kontakt zwischen Roboter und Umgebung hergestellt ist. Im Fall der freien Fahrt ist der Stellwert

$$\dot{p}_c = v_{frei} \quad (5.43)$$

gewünscht. Den stetigen Übergang zwischen beiden Zuständen zeigt Abbildung 5.16, links. Auf der Abszisse ist die in Bewegungsrichtung wirkende Kraft $F_n = F_{n,e}$ und auf der Ordinate die dazugehörige Geschwindigkeit $v_n = \dot{p}_c$ dargestellt.³ Im Bereich um $F_n = 0$ ist ein linearer Verlauf zu erkennen. Er entspricht dem Verhalten nach Gleichung (5.42). Im Bereich $|F_n| \gg 0$ wird ein Verhalten entsprechend Gleichung (5.43) erreicht. Dazwischen wurde ein verbindendes Polynom dritten Grades eingefügt:

$$v_n = a_0 + a_1 F_n + a_2 F_n^2 + a_3 F_n^3 \quad . \quad (5.44)$$

Der Grad des Polynoms ergibt sich aus der Anzahl der Randbedingungen

³Bis zum Ende dieses Abschnitts wird für die Regelabweichung in Einfahrriichtung zur besseren Lesbarkeit statt des Bezeichners $F_{n,e}$ der Bezeichner F_n verwendet.

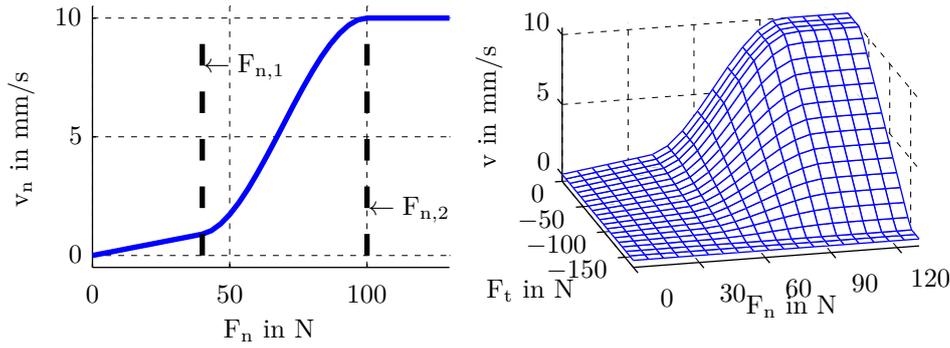


Abbildung 5.16: Links: Einfahrtsgeschwindigkeit v_n in Abhängigkeit von F_n . Die Grenzen $F_{n,1}$ und $F_{n,2}$ sind ebenfalls eingezeichnet.
Rechts: Einfahrtsgeschwindigkeit v in Abhängigkeit von F_n und F_t .

$$\begin{aligned}
 v_n(F_{n,1}) &= K_n \cdot F_{n,1} \quad , & v_n(F_{n,2}) &= v_{frei} \quad , \\
 \frac{dv_n}{dF_n}(F_{n,1}) &= K_n \quad \text{und} & \frac{dv_n}{dF_n}(F_{n,2}) &= 0 \quad .
 \end{aligned} \tag{5.45}$$

Ein stetiger Übergang von Positions- bzw. Geschwindigkeitsregelung zu Kraftregelung bei Berechnung von $a_{0...3}$ aus (5.44) und (5.45) wird mit

$$v_n(F_n) = \begin{cases} K_n \cdot F_n & \text{für } 0 \leq F_n < F_{n,1} \\ a_0 + a_1 F_n + a_2 F_n^2 + a_3 F_n^3 & \text{für } F_{n,1} \leq F_n \leq F_{n,2} \\ v_{frei} & \text{für } F_n > F_{n,2} \end{cases} \tag{5.46}$$

erreicht. Für $F_n < 0$ gilt Entsprechendes. Um dieses fließende Umschalten praktisch anwenden zu können, muss der Übergang zwischen Kontaktfreiheit und vollem Kontakt ebenfalls – zumindest in gewissen Grenzen – stetig erfolgen. Dies kann durch vorauseilende Federn und/oder Einfahrtschrägen realisiert werden (vgl. Abschnitt 6.1.3 und 6.1.4).

In der dargestellten Form reagiert die Geschwindigkeitsregelung jedoch nur auf die Kräfte in der Bewegungsrichtung, alle Momente und die Kräfte, die tangential zur Bewegungsrichtung auftreten, werden nicht beachtet. Sei F_t die Summe der tangential zur Bewegungsrichtung wirkenden Kräfte und M die Summe der Momente, dann kann die Geschwindigkeit durch die Koeffizienten

$$k_F = \begin{cases} 1 & \text{für } 0 \leq |F_t| < F_{t,1} \\ \frac{|F_t| - F_{t,1}}{F_{t,2} - F_{t,1}} & \text{für } F_{t,1} \leq |F_t| \leq F_{t,2} \\ 0 & \text{für } |F_t| > F_{t,2} \end{cases} \quad k_M = \begin{cases} 1 & \text{für } 0 \leq |M| < M_1 \\ \frac{|M| - M_1}{M_2 - M_1} & \text{für } M_1 \leq |M| \leq M_2 \\ 0 & \text{für } |M| > M_2 \end{cases}$$

begrenzt werden. Damit gilt

$$v(F_n, F_t, M) = k_F(F_t) \cdot k_M(M) \cdot v_n(F_n) \quad . \tag{5.47}$$

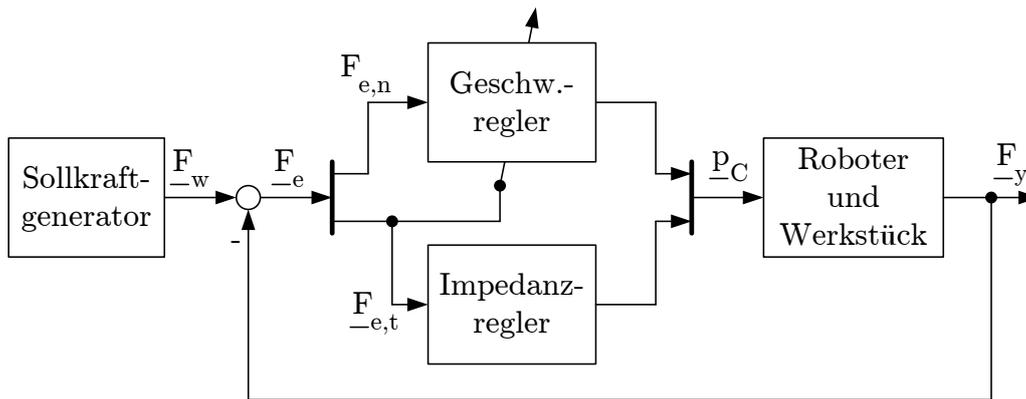


Abbildung 5.17: Einfahrregler.

Abbildung 5.16, rechts, zeigt ein entsprechendes Diagramm mit v über F_n und F_t . Die vom Geschwindigkeitsregler ausgegebenen Werte werden durch ein einfaches T_1 -Glied für die Ausgabe als Stellwert geglättet.

5.4.2 Regelung der verbleibenden Freiheitsgrade und Sollwertvorgabe

Im Vergleich zur Einfahrrichtung sind die zu erwartenden Bewegungen in Richtung der verbleibenden Freiheitsgrade als klein einzuschätzen. Die Regelungsstrategie, die in Abschnitt 5.3 zur Regelung aller sechs Freiheitsgrade entwickelt wurde, kann auch für die verbleibenden Freiheitsgrade im Fall der Einfahrt verwendet werden. Die Sollkräfte und -momente werden dabei auf Null gesetzt, das Load-Sharing spielt hier noch keine Rolle, da eine kraft- und momentenfreie Situation vor dem Greifen hergestellt werden soll.

Für den Geschwindigkeitsregler in Einfahrrichtung muss eine Sollkraft $F_{n,w}$ vorgegeben werden. Tatsächlich findet die Regelabweichung $F_{n,e} = F_{w,e} - F_{n,y}$ Eingang in den Regler (Gleichung (5.42)), die aus Differenzenbildung der Sollkraft und der gemessenen Kraft in Einfahrrichtung $F_{n,y}$ berechnet wird. Die Sollkraft muss so groß sein, dass eine Einfahrbewegung des Roboters stattfindet, im kontaktfreien Fall muss $F_{n,w} > F_{n,2}$ gelten (Fallunterscheidung in Gleichung (5.46)). In Abhängigkeit vom tatsächlichen Greifer und vom Werkstück muss die Sollkraft so eingestellt werden, dass ein sicheres Greifen des Werkstücks möglich ist, sobald die Sollkraft eingestellt ist. Es gilt, eine gute Abstimmung zwischen den Parametern $F_{n,1}$, $F_{n,2}$, K_n , v_{frei} und $F_{n,w}$ zu finden, für die im Allgemeinen

$$0 < F_{n,1} < F_{n,2} < F_{n,w} \quad , \quad 0 < K_n \cdot F_{n,1} < v_{frei} \quad (5.48)$$

gelten muss. Abbildung 5.17 zeigt eine Darstellung des Einfahrreglers.

5.5 Ablegen

Beim Teilprozess Ablegen tritt das Werkstück in Kontakt mit der Ablage und die Roboter geben die getragene Last an die Ablage weiter. Vor dem Ablegen wurde das Werkstück zur Zielstation transportiert. Es wird davon ausgegangen, dass dabei ideales Load-Sharing zwischen den Robotern

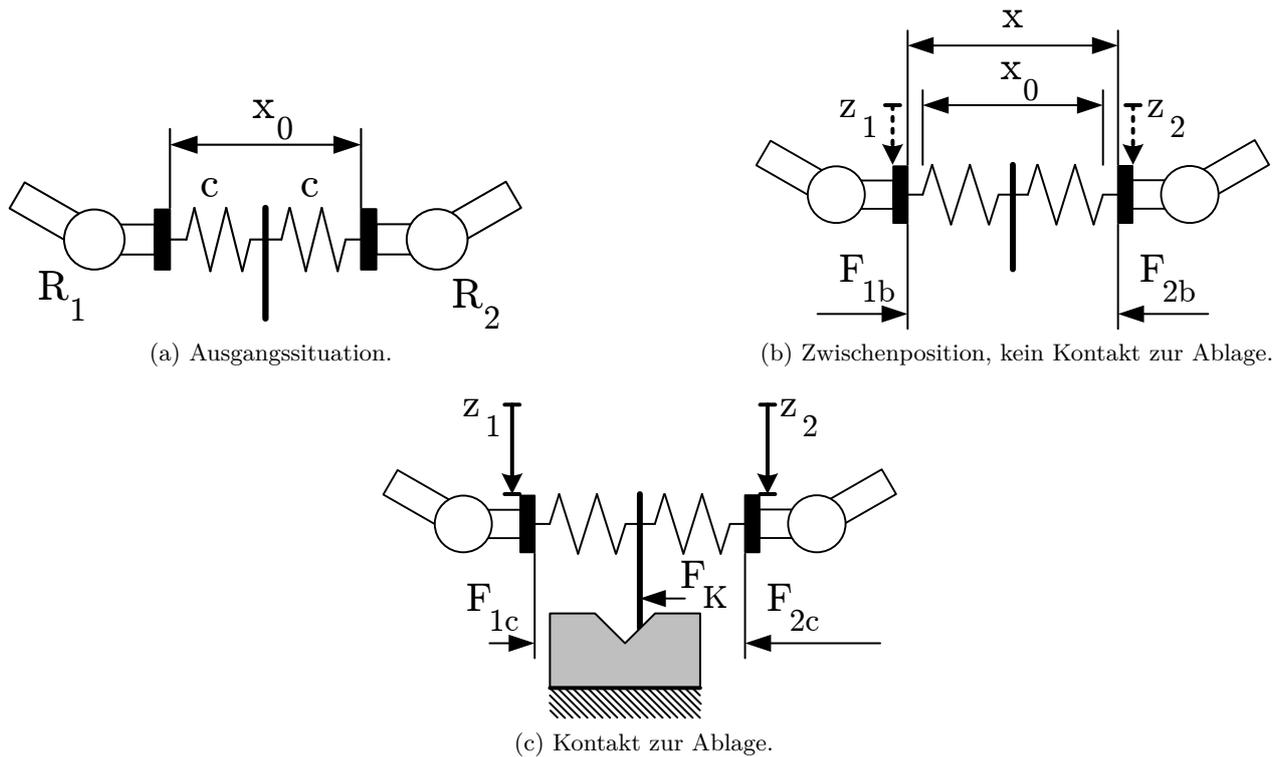


Abbildung 5.18: Interne und externe Kräfte beim Ablegen. Alle eingezeichneten Kräfte sind aus Sicht der Roboter bzw. der Ablage eingezeichnet. x_0 bezeichnet die entspannte Länge der Feder, x die gedehnte Länge. z_1 und z_2 geben die Bewegungsrichtung der Roboter an.

hergestellt wurde, d. h. die aufgrund von Roboterungenauigkeiten sonst auftretenden Spannungen im Werkstück sind weitestgehend ausgeglet. Nach dem Ablegen werden die Greifer geöffnet und die Roboter fahren aus.

Beim Ablegen des Werkstücks werden nur die von außen aufgrund des Kontakts mit der Umgebung wirkenden Kräfte und Momente betrachtet und ausgeglet. Es wird davon ausgegangen, dass die Ablegebewegung zeitlich so kurz ist, dass die durch die Roboterbewegung verursachten Abweichungen der relativen Lage der Roboter zueinander nur geringe Spannungen im Werkstück verursachen und daher ignoriert werden können.

5.5.1 Kräfte und Momente beim Ablegen

Anders als beim Transport wird bewusst Kontakt zur Umgebung hergestellt. Dabei treten Kräfte und Momente auf, die aus der spezifischen Kontaktsituation herrühren. Während beim Transport die Information eines Kraft-Momenten-Sensors genügt, um die gewünschte Lastverteilung herzustellen, muss beim Ablegen die Information beider Kraftsensoren herangezogen werden, da allein aufgrund der Information eines Sensors nicht entschieden werden kann, ob eine Kraft durch Kontakt zur Umgebung oder durch Verformungen im Werkstück aufgrund von Roboterfahrfehlern verursacht wurde. Abbildung 5.18 verdeutlicht die Überlegung.

In Abbildung 5.18a stehen die Roboter in der Ausgangssituation, es treten außer den Gewichtskräften keinerlei Kräfte auf. In Abbildung 5.18b wurde das Werkstück in z -Richtung bewegt, dadurch

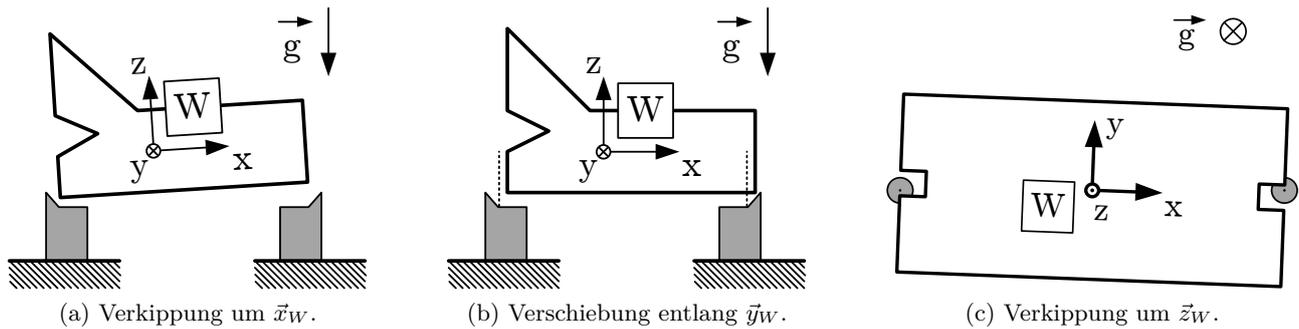


Abbildung 5.19: Unterschiedliche Kontaktsituationen am Werkstück beim Ablegen.

entstand eine innere Verspannung im Werkstück, da die Roboter die relative Lage zueinander nicht exakt einhalten können (F_{1b} und F_{2b}). In Abbildung 5.18c tritt schließlich ein Kontakt zur Umgebung auf, der eine Kraft F_K verursacht, die sich beiden Kräften überlagert. Die Kräfte F_{1b} und F_{2b} haben jeweils den gleichen Betrag, zeigen jedoch in unterschiedliche Richtungen. Die Kraft F_K beeinflusst beide Kräfte in gleicher Richtung, so dass gilt: $F_K = F_{1c} - F_{2c}$. Durch Kenntnis allein von F_{1c} oder F_{2c} kann also nicht auf die Größe von F_K zurück geschlossen werden. Dieser einfache Fall zeigt die Notwendigkeit der Messung mit zwei Kraftsensoren.

5.5.2 Geschwindigkeitsregelung in Ablegerichtung

Ähnlich zur Einfahrt tritt beim Ablegen des Werkstücks eine Hauptbewegungsrichtung auf, wie Abbildung 5.18 zeigt (z_1 und z_2). In diese Ablegerichtung soll ähnlich wie bei der Einfahrtrichtung eine hohe Geschwindigkeit gefahren werden, um das Ablegen möglichst zügig abzuschließen. Dabei tritt die gleiche Situation wie bei der Einfahrt auf: Eine größere Bewegung soll zügig durchgeführt werden, bei Kontakt mit der Umgebung darf jedoch kein Zurückspringen oder eine plötzliche Beschleunigung auftreten, um Kraftspitzen zu verhindern. Daher wird zur Regelung der Geschwindigkeit in Ablegerichtung die gleiche Regelungskomponente wie in Abschnitt 5.4.1, „Regelung der Geschwindigkeit in Einfahrtrichtung“, verwendet. Darüber hinaus wird auch bei der Ablage die Geschwindigkeit in Ablegerichtung aufgrund der in den anderen Richtungen auftretenden Kräfte und Momente beschränkt.

Während bei der Einfahrt jedoch nur ein Kraftsensor die benötigten Informationen liefert, werden bei der Ablage beide Kraftsensoren verwendet. Die Zusammenführung der Informationen beider Sensoren wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

5.5.3 Ausweichbewegung zur Ausregelung externer Kräfte

Bei Einfahrt und Transport werden die auftretenden Kräfte und Momente direkt in den Regler geführt. Beim Ablegen muss aus mehreren Kraft-Momenten-Tupeln eine gemeinsame Ausweichbewegung für das Werkstück berechnet werden.

Je nach Kontaktsituation können die Kontaktkräfte durch Aufstellen des Kräfte- und Momentengleichgewichts berechnet werden. Es stellt sich jedoch die Frage, wie mit den Informationen zu den einzelnen Kontaktkräften umzugehen ist. Es bietet sich an, die gemessenen Kräfte zusammenzufassen und die exakte Ursache der Kräfte und deren Wirkrichtungen zu vernachlässigen.

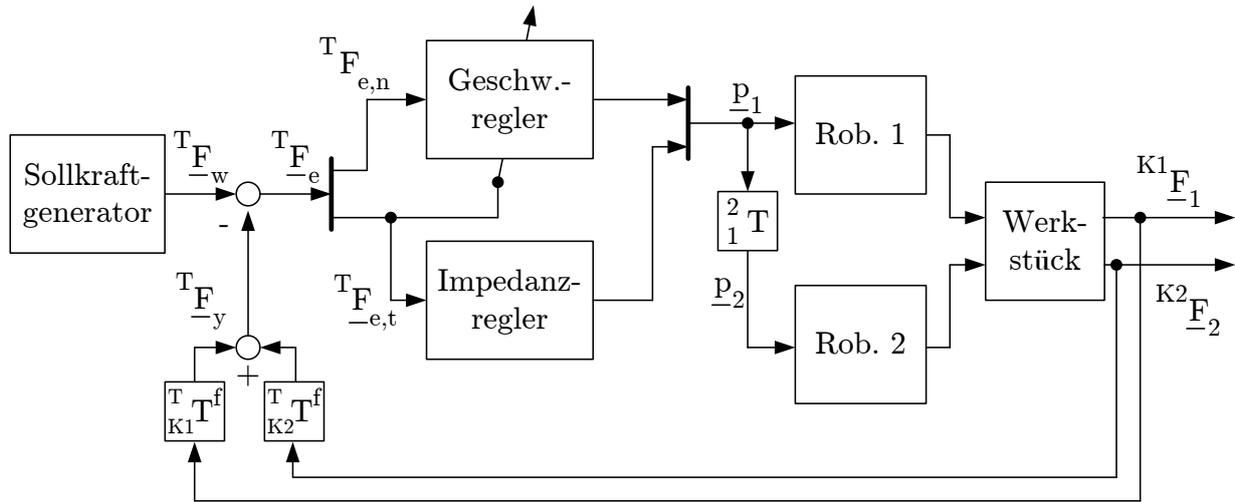


Abbildung 5.20: Reglerstruktur zum Ablegen des Werkstücks.

Zur besseren Lesbarkeit gilt: ${}^p_1 = {}^{B1}_{R1} T$, ${}^p_2 = {}^{B2}_{R2} T$.

Im Block ${}^2_1 T$ findet die Operation ${}^{B2}_{R2} T = {}^{B2}_{B1} T \cdot {}^{B1}_{R1} T \cdot {}^{R1}_{R2} T$ statt.

In den Blöcken ${}^T_{Ki} T^f$ gilt ${}^T F_{-i} = {}^T_{Ki} T^f \cdot {}^{Ki} F_{-i}$ für $i \in \{1, 2\}$. Dadurch werden die Kräfte aus den Sensorkoordinatensystemen ins gemeinsame Zielsystem transformiert.

Dazu wird zunächst Abbildung 5.19 betrachtet. Es sind verschiedene Kontaktsituationen dargestellt. Je nach Richtung der wirkenden Kraft und nach auftretendem Fehler beim Ablegen muss unterschiedlich reagiert werden. Alle auftretenden Kräfte können auf ein gemeinsames, werkstückfestes Regelungskoordinatensystem T bezogen und dort zusammengefasst werden. Bei zwei Kraft-Momenten-Sensoren ergeben sich zwei Kraft-Momenten-Tupel ${}^{K1} F_{-1}$ und ${}^{K2} F_{-2}$, die entsprechend Abschnitt 2.2.1 und Gleichung (2.27) mit

$${}^T F_{-y} = {}^T_{K1} T^f \cdot {}^{K1} F_{-1} + {}^T_{K2} T^f \cdot {}^{K2} F_{-2} \quad (5.49)$$

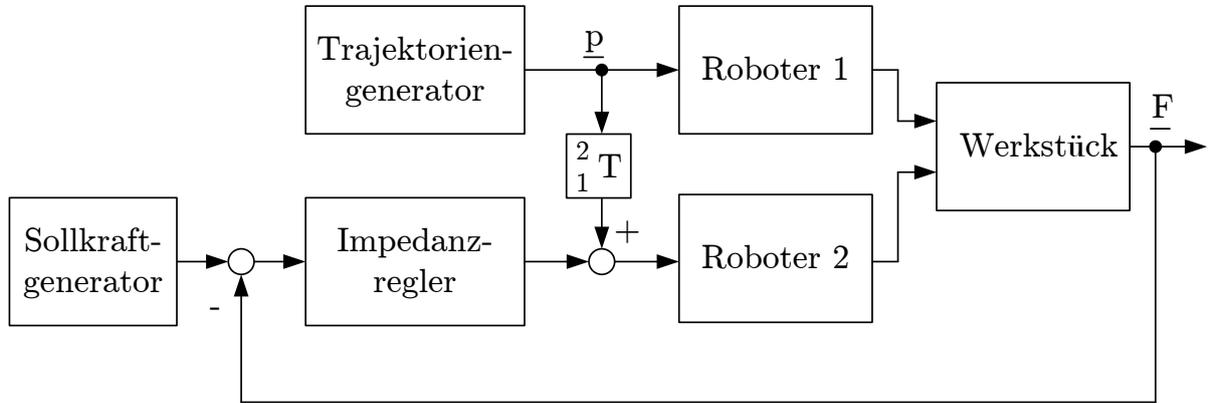
aus den Kraft-Momenten-Sensor-Systemen K_1 und K_2 in ein werkstückfestes Koordinatensystem T transformiert werden.

Die erforderliche Ausweichbewegung kann nach Anwendung der Geschwindigkeits- und Impedanzregelung entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 5.2 berechnet werden. Abbildung 5.20 zeigt die Struktur des Ablagereglers. Der Regelfehler in Ablegerichtung ist mit ${}^T F_{e,n}$ bezeichnet, verbleibende Kräfte und Momente mit ${}^T F_{-e,t}$. Als Sollwert für die Regelung wird das Gewicht des Werkstücks vorgegeben.

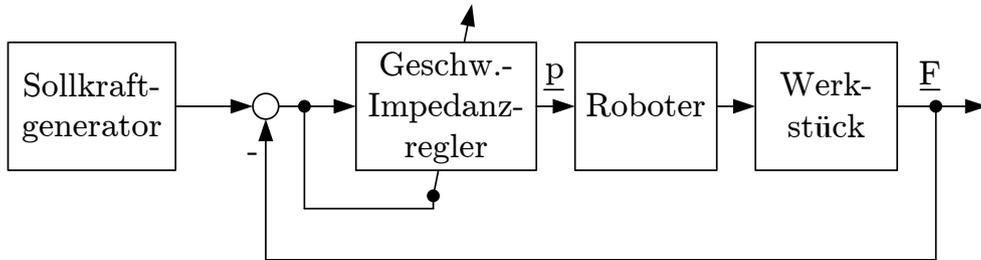
5.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden ein modifizierter Impedanzregler und eine mehrachsige Kraftregelung bei kooperierenden Robotern entwickelt. Für die drei Teilprozesse Einfahrt, Transport und Ablegen wurde je ein Regler ausgearbeitet und detailliert vorgestellt.

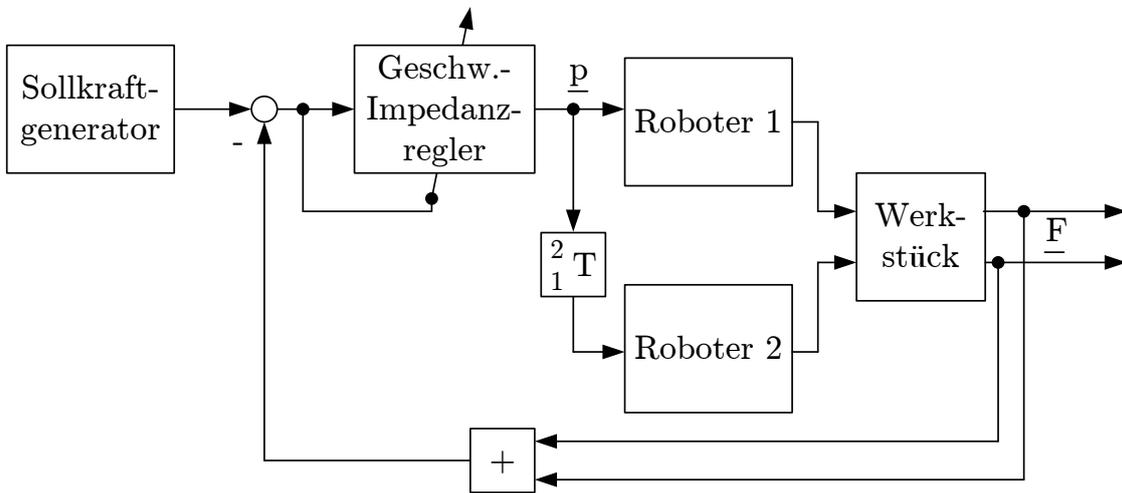
Die drei implementierten Regler sollen nun zusammenfassend verglichen werden. Dies geschieht anhand der Abbildungen 5.21a, 5.21b und 5.21c.



(a) Transport.



(b) Einfahrt.



(c) Ablage.

Abbildung 5.21: Überblick der entwickelten Regler.

In jedem Regler werden Stellwerte für einen oder mehrere Roboter generiert. Diese Roboter sind mit einem Werkstück gekoppelt bzw. wirken auf dieses ein. Der Kraft-Momenten-Sensor generiert ein Kraft-Momenten-Tupel, das zurückgeführt wird.

Bei der Einfahrt wird nur ein Roboter betrachtet, beim Transport und beim Ablegen zwei. Im Fall zweier Roboter ist eine Transformation der generierten Trajektorie ins Basis-System des zweiten Roboters nötig, dargestellt durch den Block 2_1T .

Jede der drei Regelungen basiert auf dem modifizierten Impedanzregler nach Abschnitt 5.1. Er stellt entweder alle oder nur die nicht in Hauptbewegungsrichtung liegenden Kräfte und Momente ein. Der Impedanzregler verfügt über keine Rückführung der Federkraft des simulierten Feder-Dämpfer-Masse-Systems und konnte durch ein PT_1 -Glied vereinfacht werden. Außerdem wurde die normale Krafrückführung durch die Berechnung eines Regelfehlers ersetzt.

Muss im Teilprozess eine Strecke kraftgeregelt zurückgelegt werden (Einfahrt und Ablegen), so wird die Geschwindigkeitsregelung nach Abschnitt 5.4.1 eingesetzt. Sie kann auf die plötzlich wechselnde Kontaktsituation reagieren und besteht aus einem nicht-linearen PT_1 -Glied, dessen Ausgang proportional zu den verbleibenden Kräften und Momenten bedämpft wird.

Beim Ablegen müssen mehrere Kraft-Momenten-Tupel zusammengeführt werden („+“-Glied in der Abbildung; vgl. Abschnitt 5.5.3). Dabei werden alle Kräfte in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert und addiert. In diesem Koordinatensystem findet dann auch die eigentliche Regelung statt.

Es konnte ein modulares Set aus Regelungskomponenten entwickelt werden, das flexibel in den einzelnen Regulationssituationen eingesetzt werden kann. Im folgenden Kapitel wird die praktische Umsetzung der Regler im Rahmen experimenteller Untersuchungen bewertet.

6 Experimentelle Untersuchungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Prozess der Werkstückhandhabung analysiert, der Einfluss von Fehlern auf das Systemverhalten untersucht und eine Kraftregelungsstrategie entwickelt. In diesem Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse in experimentellen Untersuchungen an realen Robotern überprüft und ihre Anwendbarkeit verifiziert.

Dazu wird zunächst die Versuchsumgebung beschrieben und dargestellt. Dann werden ähnlich wie bei den vorangegangenen Simulationen Szenarien definiert und erläutert, in deren Rahmen die Kraftregelung untersucht wird. Abschließend werden die Messergebnisse präsentiert und bewertet.

6.1 Versuchsumgebung

Die Versuchsumgebung besteht aus mehreren Komponenten, die miteinander vernetzt sind und interagieren. Die beiden kooperierenden Roboter sind jeweils mit einem Kraft-Momenten-Sensor und einem Greifsystem ausgestattet. Auf einer Ablage steht ein speziell entwickeltes, variables Testwerkstück zur Handhabung bereit. Die Steuerung der Zelle übernehmen die Steuerungen der Roboter und eine externe Regelungsplattform, die einerseits die Messsignale der Kraft-Sensoren aufnimmt und andererseits mit den Robotern kommuniziert und die Kraftregelung durchführt.

6.1.1 Roboter

Die markantesten Elemente der Versuchsumgebung sind die beiden kooperierenden Roboter der Firma KUKA. Es handelt sich um zwei sechssachsige Knickarmroboter, einen KUKA KR 180 L130-2 und einen KUKA KR 140 L100 comp, die eine maximale Traglast von 130 kg bzw. 100 kg aufweisen. Ihre jeweilige Reichweite kann Abbildung 6.1a entnommen werden, sie zeigt die Gesamtzelle von oben in vereinfachter Darstellung. Es ist ebenfalls der Abstand der Roboter zueinander angegeben, der ca. 5000 mm beträgt. Die Roboter sind absolutgenau vermessen (KUKA-Option „positioniergenaue Roboter“ [Kuk05a]) und die Steuerungen wurden mit den entsprechenden Kalibrierdaten konfiguriert. Beide Roboter verfügen über eine Verlängerung der vierten Achse, um den Arbeitsraum zu vergrößern. Die genaue Auswahl des Robotertyps wurde nicht im Rahmen dieser Arbeit getroffen, sondern bereits vorab festgelegt. An den Robotern wurden keine weiteren Modifikationen durchgeführt, sie könnten ohne Weiteres im industriellen Umfeld eingesetzt werden. Typenangaben zu den Robotern können Anhang D.1 entnommen werden.

6.1.2 Robotersteuerung

Die Roboter werden von zwei KRC 2-Steuerungen kontrolliert. Die verwendeten jeweiligen Softwarestände sind in Anhang D.2 aufgelistet. Die Steuerungen sind über ein Datenkabel miteinander verbun-

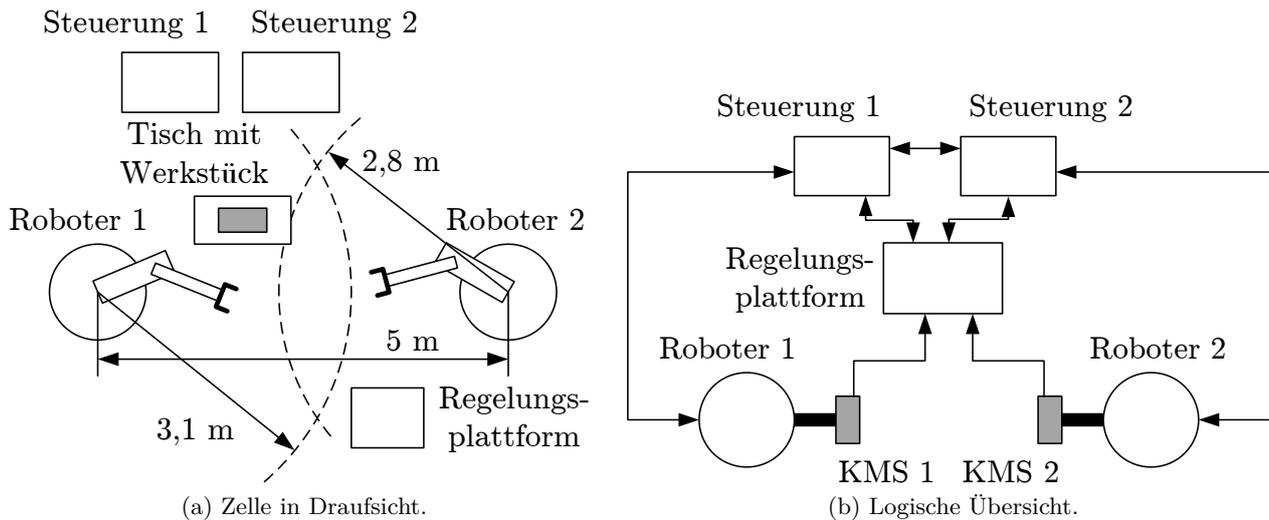


Abbildung 6.1: Gesamtzelle.

den (vgl. Abbildung 6.1b) und arbeiten im kooperierenden Modus nach dem Master/Slave-Prinzip. Die verwendeten KUKA-Optionen heißen KUKA.CR Program Cooperation 2.0 und KUKA.CR Motion Cooperation 2.0. Durch Syntaxerweiterungen der KUKA-Roboter-Programmiersprache KRL können die Roboter in den kooperierenden Modus wechseln und ihre ausgeführten Programme synchronisiert werden. [Kuk05b, Kuk05a]

Zur Vorgabe von Bewegungen wird die RSI-Schnittstelle beider Roboter verwendet. Über sie können mit einer Abtastrate von ca. 83,3 Hz (12 ms-Takt) auf Basis eines XML-Datenprotokolls Vorgaben bezüglich der Position der Roboter übermittelt werden. Die Verbindung wird via Sockets per TCP/IP hergestellt.

6.1.3 Greiftechnik

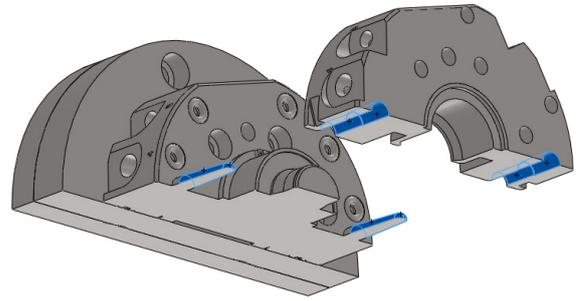
Zum Greifen des Werkstücks sind die Roboter jeweils mit einem Werkzeugwechsler (WZW) ausgestattet. An den Robotern ist dazu das roboterseitige WZW-Element angebracht, am Werkstück das werkzeugseitige Element. Abbildung 6.2a zeigt eine Nahaufnahme von roboterseitigem und werkzeugseitigem Werkzeugwechsler. Die Werkzeugwechsler dienen dem starren Ankoppeln des Werkstücks an die Roboter. WZW werden industriell zum Wechseln des an den Roboter angeflanschten Werkzeugs verwendet, wobei man manuelle und vollautomatische WZW unterscheidet. Sie werden industriell nicht als Greifer verwendet, stellen allerdings eine exakt wiederholbare, präzise und formschlüssige Verbindung zwischen Roboter und Werkzeug (hier: Werkstück) her. Sie sind äußerst starr und übertragen Kräfte und Momente weit über das in dieser Arbeit erforderliche Maß hinaus nahezu verlust- bzw. verformungsfrei. Die Werkzeugwechsler werden mit Druckluft bei ca. 6 bar betrieben. Sie wurden hergestellt von IPR¹ und sind vom Typ TK 80. Zur Verriegelung der Werkzeugwechsler ist jeder Roboter mit einem pneumatischen 4/2-Wegeventil ausgestattet, das per Digital-Ausgangsklemme durch die Robotersteuerung geschaltet werden kann.

Im Sinne dieser Arbeit erfüllt der roboterseitige Werkzeugwechsler die Funktion eines Greifers. Daher wird in dieser Arbeit auch der Begriff „Greifer“ für dieses Peripherieelement verwendet. Das

¹IPR - Intelligente Peripherien GmbH, Schwaigern, <http://www.iprworldwide.com>



(a) Werkzeugwechsler an Roboter (links) und Werkstück (rechts).



(b) Schnittbild eines Werkzeugwechslers (aus [Rom11]). Deutlich sind die beiden konischen Bolzen des roboterseitigen WZW-Elements und die zugehörigen Bohrungen im werkstückseitigen WZW-Element erkennbar.

Abbildung 6.2: Greifsystem Werkzeugwechsler im Detail.

werkzeug- bzw. werkstückseitige WZW-Element wird als Teil des Werkstücks betrachtet und benötigt daher keine eigene Begrifflichkeit.

Der roboterseitige WZW verfügt über zwei konische Bolzen, die in die gegenüberliegenden Bohrungen im werkstückseitigen WZW eingeführt werden müssen (vgl. Abbildung 6.2b). Wenn der roboterseitige in den werkstückseitigen WZW eingetaucht ist, wird per Druckluft im Inneren des WZW eine formschlüssige Verbindung eingegangen (Abbildung D.2 im Anhang). Dieser Vorgang erfolgt innerhalb von ca. 200 ms. Sollte der roboterseitige WZW zu Beginn des Verriegelungsvorgangs nicht an der idealen Position relativ zum werkstückseitigen WZW sein, so sorgt die Verriegelung für eine exakte Positionierung. In der Praxis sind die WZW nie exakt in der passenden Position. Dies führt zu einer Verformung von Roboter und Werkstück, sie werden durch den WZW in die richtige Position gebracht. Dieses Verklemmen von Werkstück und Greifer wird in der Praxis nur mit formschlüssigen Greifern passieren. Bei kraftschlüssigen Greifern ist meist eine gewisse Greiftoleranz möglich.

Die WZW weisen eine Besonderheit auf, die den Einfahrvorgang für die Regelung erleichtert. Der roboterseitige Werkzeugwechsler verfügt über eine Blende, die die innere Mechanik vor Verschmutzung schützt. Diese Blende wird vom werkstückseitigen WZW bei der Einfahrt nach innen gedrückt. Die Blende ist federgelagert. Im komplett eingefahrenen Zustand muss vom werkstückseitigen WZW eine Kraft von ca. 140 N aufgewendet werden, um von der Feder nicht zurückgedrückt zu werden. Daher wird der Sollwert in Einfahrrichtung auf 140 N festgelegt.

In der Praxis kann eine solche Unterstützung der Einfahrtregelung durch eine vorausseilende Feder erreicht werden, die den baldigen Kontakt mit dem Werkstück ankündigt (Abbildung 6.3). Übersteigt die Kraft in Einfahrrichtung eine bestimmte Schwelle, so kann mit dem Kontakt zum Werkstück gerechnet werden. Es bleibt dennoch bei dem grundsätzlichen Problem, dass die Steifigkeit des Werkstücks im Allgemeinen deutlich höher ist als die Steifigkeit der vorausseilenden Feder. Daher muss der Regler dennoch mit dem Sprung der Kräfte im Kontaktfall umgehen können.

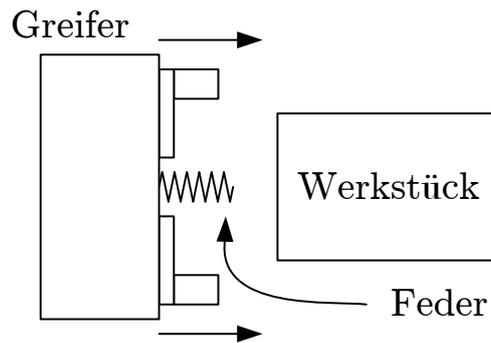
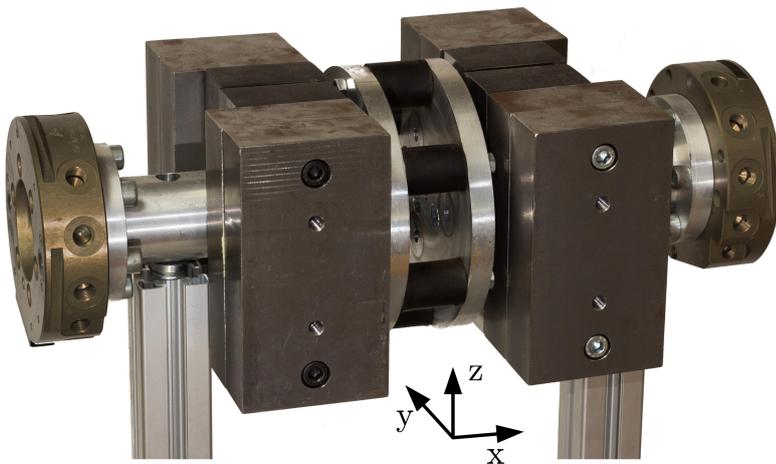


Abbildung 6.3: Beispiel einer vorauselnden Feder.



(a) Testwerkstück auf Ablage.



(b) Detailaufnahme eines Ablagestifts. Deutlich sind der führende Stift und die darunter liegenden Schultern erkennbar.

Abbildung 6.4: Testwerkstück und Ablagestift.

6.1.4 Ablage und Testwerkstück

Abbildung 6.4a zeigt das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte und verwendete Testwerkstück auf der zugehörigen Ablage. Die Ablage besteht aus einem massiven Tisch, auf dessen Tischplatte mit Aluminium-Profilen eine Aufnahme für das Testwerkstück montiert ist. Diese Aufnahme verfügt über zwei konische Bolzen, die das Werkstück an seiner Position halten. Abbildung 6.4b zeigt eine Nahaufnahme eines Bolzens. Durch die Einfahrschräge der Bolzen können auch leichte Fehlpositionierungen des Werkstücks beim Ablegen ausgeglichen werden. Dabei treten jedoch aufgrund der Steifigkeit der Ablage unerwünschte Kräfte im Werkstück auf. In negative z -Richtung, also in Richtung Boden, weist die Ablage die höchste Steifigkeit auf. In x -Richtung (die Längsrichtung des Testwerkstücks entspricht dieser Achse) ist die Steifigkeit höher als in y -Richtung.

Das Testwerkstück (TWS) ist in Abbildung 6.5a als CAD-Modell dargestellt. Die beiden Hälften des TWS sind symmetrisch. Von links beginnend besteht das TWS zunächst aus dem werkzeugeitigen Werkzeugwechsler. Es folgt ein gedrehtes Rundprofil, das auf der rechten Seite an eine Scheibe angeflanscht ist. Das Rundprofil verfügt über eine Bohrung, die einen Bolzen der Ablage aufnehmen

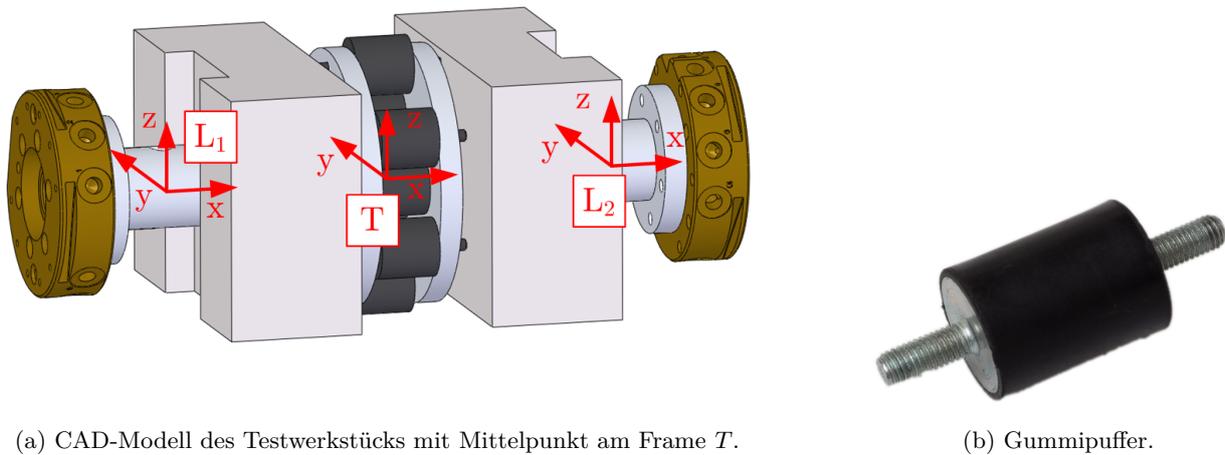


Abbildung 6.5: Testwerkstück.

kann. Am Rundprofil ist darüber hinaus ein Plattenstapel montiert, der kraftschlüssig auf dem Rundprofil sitzt. Die Scheibe besitzt neun Bohrungen, in die Gummipuffer (Abbildung 6.5b) eingesetzt und verschraubt werden können.

Am Plattenstapel kann das Gewicht des Werkstücks durch Abnehmen einzelner Platten in einem weiten Bereich variiert werden (Gewicht gesamter Plattenstapel 22,6 kg). Die Gummipuffer liegen in verschiedenen Ausführungen vor, sodass auch die Steifigkeit des Werkstücks durch Austausch oder Freilassen einzelner Positionen variiert werden kann. Insgesamt (beide Hälften) hat das Werkstück in der dargestellten Variante eine Masse von 57,54 kg. Der Schwerpunkt des Werkstücks liegt in der Mitte des Werkstücks. Die Länge über alles beträgt im nicht verformten Zustand 790,2 mm (siehe dazu Anhang D.3). Die verwendeten Gummipuffer haben nach Herstellerangaben (Typ 685 311 10, Mädler GmbH, Stuttgart) eine Steifigkeit von 85 N/mm bei Druckbelastung und 18 N/mm bei Schubbelastung. Für die Versuche wurden sechs Gummipuffer ins Werkstück auf den äußeren Lochkreis montiert.

Am Testwerkstück gibt es Frames an den Bohrungen, die die Stifte der Ablage aufnehmen (L_1 und L_2) sowie den Frame T , der beim Ablegen das Regulationssystem darstellt.

6.1.5 Sensorik

Die eingesetzten Kraft-Momenten-Sensoren sind jeweils über eine Adapterscheibe mittig auf den Roboterflansch des jeweiligen Roboters montiert. Beide Sensoren sind vom Hersteller ATI Industrial Automation, Inc., aus der Baureihe Theta und haben identische Abmessungen. Der Sensor 1 an Roboter 1 trägt die Bezeichnung SI-2500-400 (Abbildung 2.10b), der Sensor 2 an Roboter 2 ist vom Typ SI-1500-240. Das bedeutet, die Sensoren sind auf SI-Einheiten kalibriert und für einen Messbereich von ± 2500 N und ± 400 Nm bzw. ± 1500 N und ± 240 Nm ausgelegt.

Sensor 1 verfügt über einen eigenen digitalen Controller. Dieser Controller verstärkt die Messsignale des Sensors und stellt sie innerhalb von 0,8 ms in einem Bereich von ± 5 V für jeden der sechs Kanäle (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z) einzeln zur Verfügung.

Sensor 2 verfügt über einen Messverstärker, der ebenfalls sechs Spannungswerte im Bereich ± 5 V zur Verfügung stellt. Durch den analogen Messverstärker tritt keine Totzeit auf. Anders als bei Sensor 1 erfolgt keine Vorverarbeitung der Messwerte, sie müssen zunächst digitalisiert und mit einer Kalibriermatrix multipliziert werden, bevor die Kraft-Momenten-Werte zur Verfügung stehen.

6.1.6 Regelungsplattform und Zellensteuerung

Die Regelungsplattform ist ein Standard-PC, der mit dem Betriebssystem Ubuntu in der Version 10.04 LTS ausgestattet ist. Der Kernel des Betriebssystems wurde durch eine selbst kompilierte Variante ersetzt. Dabei handelt es sich um einen Vanilla-Kernel, der mit dem Patch der freien Echtzeit-Linux-Erweiterung RTAI modifiziert und anschließend kompiliert wurde. Damit steht ein vollwertiges Echtzeitbetriebssystem zur Verfügung.

Im PC ist eine Messkarte der Firma National Instruments vom Typ NI PCI-6040E eingebaut. Sie verfügt über 16 Analog-Digital-Wandler mit einer Auflösung von 12 Bit und mehrere weitere digitale und analoge Ein- und Ausgänge. Die erreichbare Auflösungsgenauigkeit der Kraft-Momenten-Sensor-Werte nach Abschnitt 6.1.5 kann Tabelle D.3 im Anhang entnommen werden. Die maximale Abtastrate liegt bei 10 kHz, die Sensorwerte werden zur Versuchsdurchführung mit 1 kHz abgetastet.

6.1.7 Entwicklungsumgebung und Software-Toolchain

Die Entwicklung des Reglers und der Ablaufsteuerung wurde in Matlab Simulink R2008b durchgeführt. Dabei wurde in umfangreichem Maß Embedded Matlab eingesetzt (in aktueller Matlab-Terminologie wird Embedded Matlab durch den Simulink-Block Matlab-Function umgesetzt). Dadurch müssen Algorithmen, die in wenigen Zeilen Code formuliert werden können, nicht durch umfangreiche Simulink-Diagramme umgesetzt werden. Dennoch besteht die Übersichtlichkeit von Matlab Simulink, um Regelkreise logisch klar zu strukturieren.

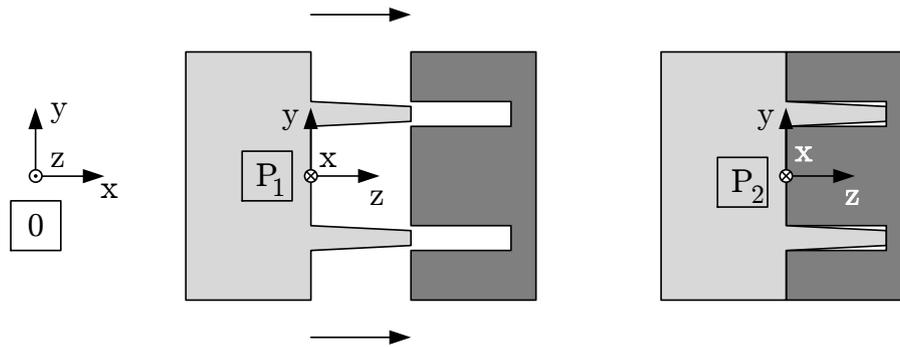
Aus dem Simulink-Modell wurde mit Realtime Workshop C-Code generiert, der im Linux-System in ausführbaren Binärcode übersetzt und ausgeführt wird. Ein Regelungszyklus dauert entsprechend der kürzesten Abtastzeit 1 ms, die tatsächliche Rechendauer liegt bei ca. 260 μ s je Zyklus.

Die Linux-Echtzeiterweiterung bietet als Ergänzung zur Echtzeitfunktionalität eine Schnittstelle, mit der eine grafische Oberfläche auf das aktuell ausgeführte Echtzeitmodul zugreifen kann, wozu das Programm qrtailab verwendet wurde.

6.2 Versuchsszenarien

In diesem Abschnitt werden die Versuchsszenarien für jeden Teilprozess definiert und erläutert. Zur Bewertung der Regler werden vergleichende Versuchsfahrten durchgeführt. Der unregelmäßige wird dabei mit dem geregelten Zustand verglichen. Darüber hinaus werden bewusst Störgrößen bzw. Fehler eingebracht, um die Robustheit des Reglers zu testen.

Während der drei Teilprozesse Einfahrt, Transport und Ablegen werden die Sollwerte entsprechend den in Kapitel 5 entwickelten Sollwertgeneratoren vorgegeben:

Abbildung 6.6: Werkzeugwechsler und Frames P_1 und P_2 .

- Einfahrt** Die Sollkraft in Einfahrrichtung entspricht der entstehenden Kraft durch die im WZW vorhandene Einfederung von 140 N (Abschnitt 6.1.3). Alle anderen Kräfte und Momente sollen auf Null geregelt werden.
- Transport** Roboter 1 wird kraftgeregelt, Roboter 2 gibt die eigentliche Bewegung vor. Für Roboter 1 werden Soll-Kräfte und -Momente je nach Orientierung des Roboters 1 ständig neu berechnet, die sich aus dem halben Werkstückgewicht ergeben.
- Ablegen** Der Sollwert entlang der globalen Schwerkrafttrichtung entspricht dem Werkstückgewicht. Alle anderen Kräfte und Momente werden auf Null geregelt.

6.2.1 Einfahrt

Das Ziel der Einfahrt ist das Einfahren der roboterseitigen Werkzeugwechslerbolzen in die dafür vorgesehenen Öffnungen des werkstückseitigen Werkzeugwechslers (WZW). Am Ende des Vorgangs wird der WZW verriegelt.

Abbildung 6.6 zeigt eine Darstellung des WZW in freiem und eingefahrenem Zustand mit den jeweiligen Frames P_1 und P_2 . Zur Einbringung von Fehlern werden falsche Startframes $P_{1,e}^i$ für die Einfahrtbewegung berechnet. Dazu wird der Frame P_2 um wenige Millimeter verschoben bzw. um wenige Grad (Δ_i^E) verdreht. Daraus wird die zugehörige Startposition $\underline{p}_{1,e}^i$ mit

$$\begin{aligned} \underline{p}_1 &= {}^{P_1}T \cdot \underline{p}_2 \quad , \\ \underline{p}_{2,e}^i &= \underline{p}_2 + \Delta_i^E \quad \text{und} \\ \underline{p}_{1,e}^i &= {}^{P_1}T \cdot \underline{p}_{2,e}^i \end{aligned} \quad (6.1)$$

berechnet. Tabelle 6.1 zeigt die festgelegten Fehleroffsets. Die translatorischen Verschiebungen entsprechen den maximal erlaubten Verschiebungen entsprechend dem Datenblatt der verwendeten Werkzeugwechslers. Die Verdrehungen sind so gewählt, dass keine Selbsthemmung bzw. kein Verklemmen des Wechslers beim Einfahren auftritt. Das Verhalten des Reglers wird für jeden Fehlerfall sowohl mit als auch ohne Regelung untersucht.

Tabelle 6.1: Vorgaben für die Fehler Δ_i^E bei der Einfahrt in Millimeter bzw. Grad. Die Verdrehungen werden nach dem Euler-Schema in der Reihenfolge ZYX durchgeführt.

i	$\Delta_i^E = \begin{pmatrix} x & y & z & r_x & r_y & r_z \end{pmatrix}$
0	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
1	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$
2	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0 \end{pmatrix}$
3	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
4	$\begin{pmatrix} -1,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
5	$\begin{pmatrix} 0 & -1,5 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
6	$\begin{pmatrix} -1,5 & -1,5 & 0 & -0,5 & -0,5 & -0,5 \end{pmatrix}$

 Tabelle 6.2: Bewegungsprofil für die Transportfahrt. Alle Angaben relativ in Millimeter bzw. Grad aus Sicht des Roboters 2. Die jeweiligen Hauptbewegungsrichtungen sind **hervorgehoben**.

Position	Δ_x	Δ_y	Δ_z	Δ_{rx}	Δ_{ry}	Δ_{rz}
Start (absolut)	+2500	-500	1200	+180	0	0
1	+250	-1000	-500			
2	-500		+800			
3	+250	+500	-300			
4						-45
5					-45	
6				+45		
7				-45		
8					+45	
9						+45
10 (zurück zu Start)		+500				

6.2.2 Transport

Der Transport beginnt, nachdem das Werkstück angehoben wurde. Ziel ist es, die Kräfte im Werkstück so gering wie möglich zu halten. Es wurde eine Transportfahrt festgelegt, die durch die in Tabelle 6.2 angegebenen relativen Bewegungen definiert ist. Die Fahrt wurde durch LIN-Fahrten in KRL mit einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s vorgegeben. Je nach Bahnlänge kann diese Geschwindigkeit aufgrund der begrenzten Beschleunigung der Roboter nur teilweise erreicht werden. Um eine durchgängige Fahrt mit hoher Dynamik zu erreichen, werden alle Punkte der Bahn überschiffen. Die Fahrt wird mit 30% und 100% Override durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Geschwindigkeiten auf die Regelung zu zeigen.

Zur Auslegung des Impedanzreglers werden die Gleichungen (5.12), $T = \frac{T_2}{2D_2}$, und (5.13), $K = \frac{1}{2D_2T_2K_e}$, verwendet. Entsprechend Abschnitt 5.1.2 gilt $D_2 = 1$. Zur Berechnung von T und K wird noch die Steifigkeit der Umgebung K_e benötigt. T_2 ist ein frei zu wählender Parameter.

Tabelle 6.3: Steifigkeit des Werkstücks bei kartesischer Auslenkung um 2 mm bzw. 2 Grad. Die hervorgehobenen Steifigkeiten auf der Hauptdiagonalen wurden zur Reglerauslegung der jeweiligen kartesischen Achse verwendet. Angaben in mm und Grad bzw. N und Nm.

	Δ_{Fx}	Δ_{Fy}	Δ_{Fz}	Δ_{Mx}	Δ_{My}	Δ_{Mz}
Δ_x	-41,73	-2,73	0,50	-2,65	-54,17	0,00
Δ_y	0,96	-34,66	-4,50	39,75	0,96	-0,50
Δ_z	3,46	-2,39	-284,60	-7,41	-8,89	-0,60
Δ_{rx}	-1,82	4,15	-12,50	-100,55	-6,86	-1,00
Δ_{ry}	0,50	-0,87	-33,50	-9,92	-93,48	-0,00
Δ_{rz}	-1,23	-1,87	2,50	-6,61	-4,21	-35,00

Tabelle 6.4: Reglerparameter beim Transport. K_e in N/mm bzw. Nm/Grad und K in mm/(N · s) bzw. Grad/(Nm · s). Der Wert für K in z -Richtung (*) wurde modifiziert, siehe Text.

	K_e	T_2	D_2	T	K
x	41,73	0,40	1,00	0,20	$29,95 \cdot 10^{-3}$
y	34,66	0,40	1,00	0,20	$36,06 \cdot 10^{-3}$
z	284,60	0,40	1,00	0,20	$21,69 \cdot 10^{-3} (*)$
A	100,55	0,40	1,00	0,20	$12,43 \cdot 10^{-3}$
B	93,48	0,40	1,00	0,20	$13,37 \cdot 10^{-3}$
C	35,00	0,40	1,00	0,20	$35,71 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 6.3 zeigt die Steifigkeit des eingesetzten Werkstücks. Zur Ermittlung der Steifigkeit wurde das Werkstück jeweils um 2 mm translatorisch und um 2 Grad rotatorisch in allen sechs Raumfreiheitsgraden bewegt. Es treten Nebenabhängigkeiten auf (z. B. hat eine Auslenkung Δ_x auch eine Wirkung auf das Drehmoment Δ_{My} , siehe Tabelle), die jedoch ignoriert werden, da alle sechs Achsen gleichzeitig geregelt werden und dadurch alle Fehler durch den Einfluss der Regler gegen Null gehen sollten.

Aus den so erzeugten Messdaten wurden die Parameter des Impedanzreglers berechnet, wobei $T_2 = 0,4$ s vorgegeben wurde (Tabelle 6.4). Der Wert für K in z -Richtung wurde zur Erreichung einer besseren Reglerqualität um Faktor fünf erhöht, sodass sich aus dem rechnerischen Wert von $4,39 \cdot 10^{-3}$ mm/(N · s) der Wert in der Tabelle ergibt. Die anderen Reglerparameter führten zu zufriedenstellenden Ergebnissen.

6.2.3 Ablegen

Beim Ablegen muss das Werkstück von den Robotern so auf der Station positioniert werden, dass die Bohrungen am Werkstück die Spitzen der Ablage treffen und möglichst geringe Kräfte auftreten. Wie bei der Einfahrt werden auch hier bewusst Fehler eingebracht, indem die korrekte Ablegepose analog zu Abschnitt 6.2.1 um einen Fehleroffset Δ_i^A verschoben wird. Die entsprechenden Offsets können Tabelle 6.5 entnommen werden. Das Verhalten des Reglers wird für jeden Fehlerfall sowohl mit als auch ohne Regelung untersucht. Die Verschiebung und Verdrehung erfolgt im Koordinatensystem T , welches den Mittelpunkt des Werkstücks beschreibt (siehe Abbildung 6.5a).

Tabelle 6.5: Vorgaben für die Fehler Δ_i^A beim Ablegen in Millimeter bzw. Grad. Die Verdrehungen werden nach dem Euler-Schema in der Reihenfolge ZYX durchgeführt.

i	$\Delta_i^A = \begin{pmatrix} x & y & z & r_x & r_y & r_z \end{pmatrix}$
0	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
1	$\begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
2	$\begin{pmatrix} 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
3	$\begin{pmatrix} 3 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
4	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
5	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
6	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
7	$\begin{pmatrix} +3 & -3 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$

6.3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Dazu wird zunächst der Ausgangszustand ohne Kraft-Momenten-Regelung betrachtet. Anschließend werden die einzelnen Teilprozesse dargestellt und die unregelmäßige Situation mit der geregelten Situation verglichen. Die Bewertung der experimentellen Untersuchungen schließt dieses Kapitel ab.

6.3.1 Verhalten ohne Regelung

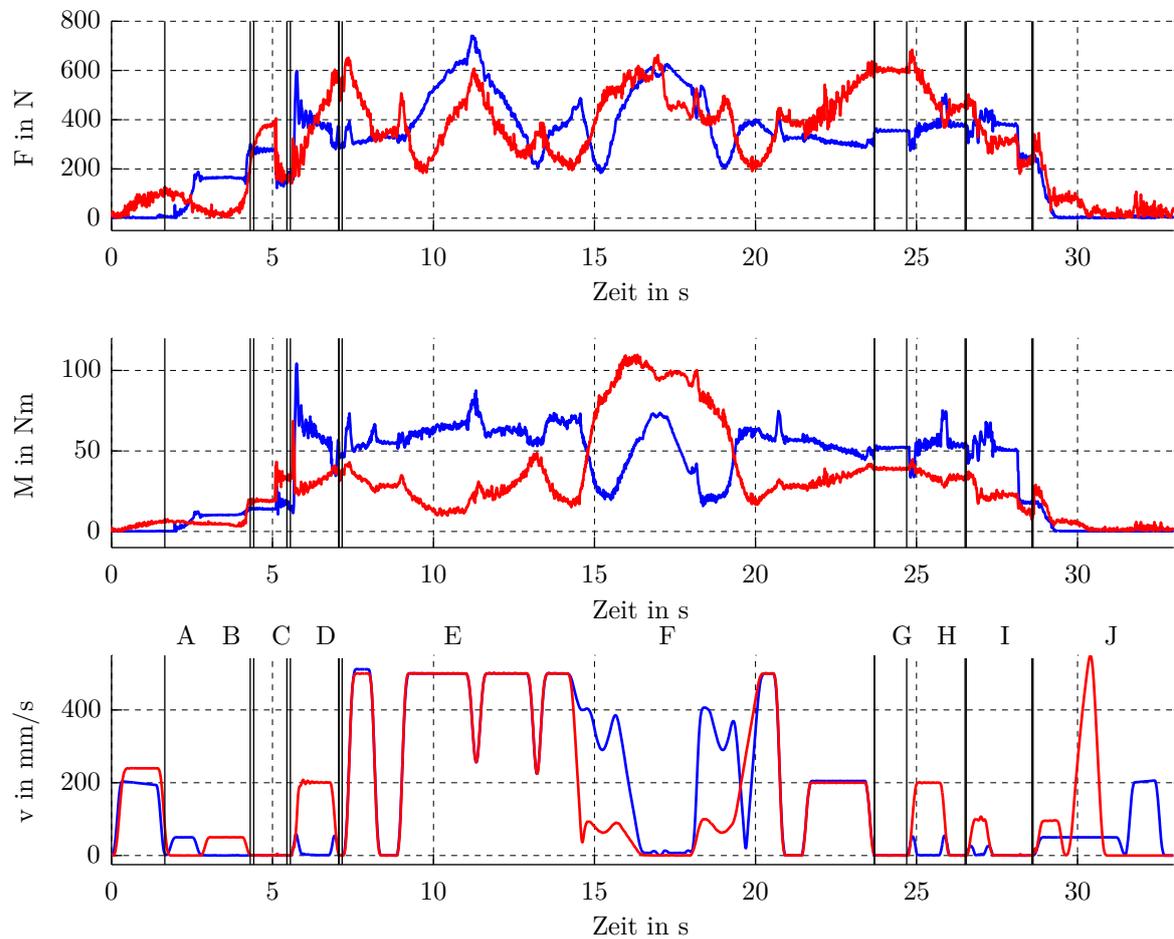
Zur Aufzeichnung des Verhaltens ohne Regelung wurden die Positionen zum Einfahren und Ablegen bestmöglich geteacht. Hierzu werden die Roboter manuell verfahren. Parallel werden die an den Sensoren gemessenen Kräfte und Momente erfasst und grafisch dargestellt. Nahezu kraft- und momentenfreies Einfahren oder Ablegen gestaltet sich als schwierig. Wird der Roboter in eine nach visueller Kontrolle gute Ausgangsposition gefahren und anschließend ohne weitere Korrekturen an die Endposition bewegt, stellen sich bereits hohe Kräfte und Momente ein. Durch langsames Vortasten und ständiges Nachkorrigieren in allen sechs Raumfreiheitsgraden kann das Ziel geringer Kräfte langsam erreicht werden.

Dieser Zustand des Systems wird als idealer Zustand bezeichnet, da es kaum Möglichkeiten gibt, die Positionen besser und exakter anzufahren bzw. einen unregelmäßigen Zustand zu erreichen, in dem geringere Kräfte und Momente auftreten. Die auftretenden Kontaktsituationen können nur durch die Erfassung mit den Kraft-Momenten-Sensoren bewertet werden, ein anderes Messmittel ist aus Sicht einer Kraftregelung nicht sinnvoll.

Abbildung 6.7 zeigt den Kraft-Momenten-Verlauf und die Bahngeschwindigkeit bei Durchführung des gesamten Handhabungsprozesses. In der Abbildung sind mehrere Abschnitte markiert, deren Bezeichnungen der Tabelle neben der Abbildung entnommen werden können.

Abschnitt A und B Die in Kapitel 3 erläuterte Annäherungsphase findet ganz zu Beginn statt.

Abschnitt A zeigt die Einfahrt des Roboters 1, direkt im Anschluss folgt in Abschnitt B die Einfahrt von Roboter 2. Beides kann aus der Bahngeschwindigkeit im unteren Teildiagramm



Abschnitt	Bezeichner	Abschnitt	Bezeichner
A	Einfahrt Roboter 1	F	Transport rotatorisch
B	Einfahrt Roboter 2	G	Warten
C	Schließen WZW	H	Vorpositionieren Ablegen
D	Anheben	I	Ablegen, Öffnen WZW
E	Transport translatorisch	J	Ausfahren

Abbildung 6.7: Kraft-Momenten-Verlauf und Geschwindigkeit im idealen Zustand. Dargestellt sind die um das Eigengewicht des Sensors und des Greifers bereinigten Kräfte- und Momentensummen an Roboter 1 (blau) und Roboter 2 (rot). Die senkrechten schwarzen Linien dienen zur besseren Orientierung und bezeichnen Umschaltvorgänge der Zustandsmaschine, die den gesamten Ablauf steuert.

gelesen werden. Es ergeben sich nur kleine Kräfte und Momente bei der Einfahrt, was den Erwartungen in der idealen Situation mit exakt geteachten Einfahrtspunkten entspricht.

Abschnitt C Vor und nach dem Schließen des WZW wird aus Sicherheitsgründen (korrektes Schließen der WZW) eine Bewegungspause von 0,5 s eingelegt. Beim Schließen sind deutliche Kraft- und Momentensprünge erkennbar. Dies belegt anschaulich die hohe Dynamik dieses Teilprozesses (siehe Abschnitt 3.2.4).

Abschnitt D Das Werkstück wird von beiden Robotern gemeinsam angehoben. Zunächst findet ein sprunghafter Anstieg von Kräften und Momenten statt, was durch das Ausheben des Werkstücks aus der Ablage und die damit an den Robotern auftretenden Kräfte verursacht wird. Dann erfolgt insbesondere an Roboter 2 ein gradueller Anstieg, der auf Kalibrierfehler oder Roboterungenauigkeiten rückschließen lässt. Die Geschwindigkeitsangabe von Roboter 1 ist in Abschnitt D, H und I fehlerhaft, da während kooperierender Fahrten unzuverlässige Positionsdaten von Roboter 1 (Slave) zurückgegeben werden. In Abschnitt E und F wurden Maßnahmen ergriffen, um korrekte Positionsdaten zu erhalten, da der Sollwertgenerator beim Transport die korrekte Orientierung der Roboter-Endeffektoren benötigt (Berechnung der Position des Roboters aus den Achswinkeln mithilfe der Vorwärtskinematik).

Abschnitt E und F Es folgt die Transportphase. Abschnitt E beginnt mit einer kurzen translatorischen Fahrt, die noch nicht zum eigentlichen Transportzyklus gehört. Dann erfolgen translatorische Fahrten (Abschnitt E). Dies wird durch die übereinstimmenden Geschwindigkeiten an beiden Robotern deutlich. Der Fahrzyklus geht nahtlos über in rotatorische Fahrten (Abschnitt F), was durch die auseinanderlaufenden Fahrgeschwindigkeiten deutlich wird. In der Mitte der rotatorischen Bewegungen geht die Bahngeschwindigkeit gegen Null, da die Roboter eine Drehung um Achse 6 durchführen, bei der keine Bahngeschwindigkeit an den Endeffektoren auftritt. Der Fahrzyklus endet und es folgt eine kurze translatorische Fahrt zurück zur Ablage. Es treten beträchtliche Kraft- und Momentenänderungen während der beschriebenen Abschnitte auf (bis zu 550 N bzw. bis zu 99 Nm), die größten Änderungen treten während der rotatorischen Bewegungen auf.

Abschnitt G In diesem Abschnitt warten die Roboter ca. 1 Sekunde. Sie dient während des späteren Reglereinsatzes zur Wiederherstellung der relativen Lage der beiden Roboter zueinander. Dies ist aufgrund einer Einschränkung der KUKA-Steuerung notwendig, bevor die kooperierende Fahrt im Fahrprogramm unterbrochen wird.

Abschnitt H Das Werkstück wird zur Ablegeposition gefahren, es entsteht jedoch noch kein Kontakt zur Ablage.

Abschnitt I Das Werkstück wird abgelegt. Dabei entstehen kaum Kraft- oder Momentenänderungen, da die Ablageposition geteacht wurde und beim Ablegen ein kleiner Abstand zu den Ablageschultern eingehalten wird, um Roboter und Greifer zu schonen. Anschließend erfolgt das Öffnen der WZW. Auch hier ist wieder ein Kraft-Momenten-Sprung auszumachen.

Abschnitt J Die Ausfahrt der WZW aus dem Werkstück schließt die Fahrt ab.

Zusammenfassung Beim Öffnen und Schließen der WZW treten deutliche und schnelle Kraft- und Momentensprünge auf. Dies resultiert aus dem schnellen Verhalten der WZW. Während Einfahrt und Ablegen treten geringe Kräfte auf, was den Erwartungen nach dem Teachen der Punkte entspricht. Hingegen treten während der Transportphase die aus der Ungenauigkeit der Roboter und der fehlerbehafteten relativen Kalibrierung resultierenden Kräfte und Momente auf, die im Vergleich zu den anderen Teilprozessen am größten sind.

6.3.2 Einfahrt

Zunächst wird an einer Beispielmessung der grundsätzliche Verlauf der geregelten Einfahrt beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Fehlerszenarien dargestellt und erläutert.

6.3.2.1 Grundsätzlicher Verlauf

Die Einfahrt des roboterseitigen WZW in den werkstückseitigen WZW folgt immer dem gleichen Muster. Es wird dazu das Diagramm in Abbildung 6.8 betrachtet. Es zeigt gleichzeitig den Kraftfehler und die Geschwindigkeit in x - und z -Richtung. Es wurde ein Fehler nach Szenario 4 vorgegeben (Abweichung vom idealen Einfahrtspunkt in x -Richtung um 1,5 mm). Der Kraftfehler ist die Differenz zwischen Sollkraft (140 N) und Istkraft. Beide Kraftfehler sollen auf Null geregelt werden. Um den Zusammenhang zwischen Kraft und Geschwindigkeit besser erkennen zu können, sind die Geschwindigkeiten mit umgekehrtem Vorzeichen dargestellt.

Die Fahrgeschwindigkeit in x -Richtung ist nur vom Kraftfehler abhängig, was am proportionalen Verlauf von Kraft und Geschwindigkeit deutlich wird. Zur besseren Unterscheidung beider Kurven im unteren Diagramm wurde die Skalierung so gewählt, dass die Kurven nicht übereinander liegen. Die Kurven wären sonst an vielen Stellen kaum unterscheidbar.

Das obere Diagramm zeigt einen grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Kraftfehler und Fahrgeschwindigkeit in z -Richtung: Die Fahrgeschwindigkeit ist annähernd proportional zum Kraftfehler. Zunächst wird mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 mm/s eingefahren.

Zur gleichen Zeit beginnt sich die Fehlstellung in x -Richtung bemerkbar zu machen, was im unteren Diagramm sichtbar wird: Die Kraft in x -Richtung steigt. Sie überschreitet bei Sekunde 2,7 eine Grenze, ab der der Kraftfehler in x -Richtung die Fahrgeschwindigkeit in z -Richtung beeinflusst (siehe Abschnitt 5.4.1). Die Fahrgeschwindigkeit in z -Richtung wird ab diesem Zeitpunkt entsprechend reduziert, was im oberen Diagramm sichtbar wird.

Bis etwa Sekunde 5 wird die Fahrgeschwindigkeit in z -Richtung nur vom Kraftfehler in x -Richtung reduziert. Dann überschreitet der Kraftfehler in z -Richtung die Grenze zum Übergangsbereich zwischen Geschwindigkeits- und Kraftregelung. Ab hier wird entsprechend des Übergangspolynoms die Geschwindigkeit auch vom Kraftfehler in z -Richtung beeinflusst. Bei Sekunde 9,5 verlässt die Kraft in z -Richtung den Übergangsbereich und der Regler befindet sich im reinen Kraftregelungsbereich. Die Geschwindigkeit ist bereits deutlich reduziert und verringert sich bis auf nahe Null.

Die Regelung wird bei Unterschreiten einer (nicht eingezeichneten) Grenze der Einfahrtgeschwindigkeit beendet.

Im Allgemeinen wird die Einfahrt durch folgende Phasen charakterisiert:

- Einfahrt mit konstanter Geschwindigkeit

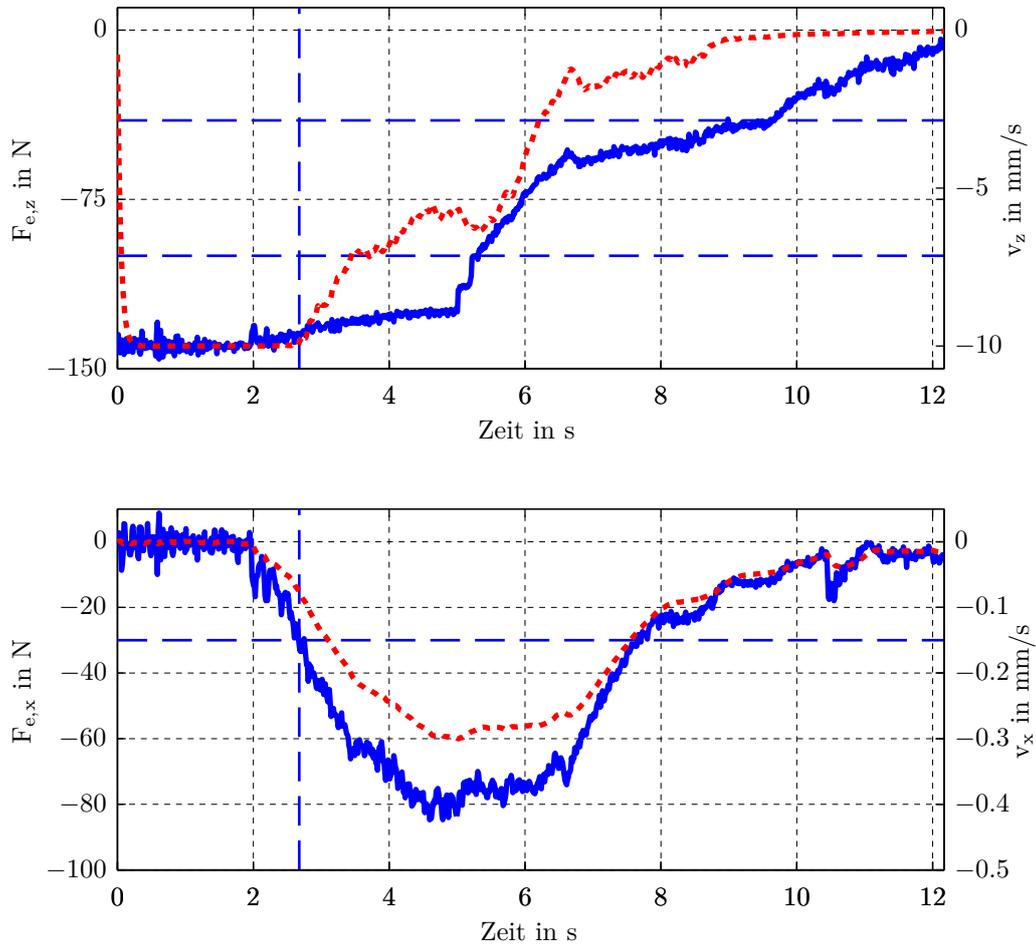


Abbildung 6.8: Kraftfehler (blau durchgezogen) und Geschwindigkeit (rot gepunktet) in z - und x -Richtung. Die horizontalen Linien oben geben den Bereich des Übergangs von geschwindigkeits- zu kraftgeregeltem Verhalten an. Im unteren Diagramm bezeichnet die horizontale Linie den Beginn des Einflusses der x -Kraft auf die Fahrgeschwindigkeit in z -Richtung. Die vertikale Linie in beiden Diagrammen zeigt den Zeitpunkt des Übertretens dieser Grenze in x -Richtung an. Der Einfluss der Kraft in x -Richtung auf die Fahrgeschwindigkeit in z -Richtung ist nach diesem Zeitpunkt im oberen Diagramm deutlich erkennbar.

- Beeinflussung der Einfahrgeschwindigkeit nur durch senkrecht zur Fahrtrichtung wirkende Kräfte und durch Momente
- Beeinflussung der Einfahrgeschwindigkeit nur durch in Fahrtrichtung wirkende Kräfte
- Beeinflussung der Einfahrgeschwindigkeit durch senkrecht und durch in Fahrtrichtung wirkende Kräfte und durch Momente

Dabei muss die dargestellte Reihenfolge nicht eingehalten werden und es können Phasen mehrfach durchlaufen werden.

6.3.2.2 Szenarien

Zur Bewertung des Einfahrtreglers wurden 14 Versuchsläufe durchgeführt. Dabei wurde jedes Szenario sowohl im geregelten als auch im ungeregelten Zustand durchlaufen. Die Tabellen 6.6 und 6.7 geben die wesentlichen Ergebnisse in knapper Form wieder. Es ist jeweils der unregelmäßige dem geregelten Fall gegenübergestellt und es wird je nach Szenario die Kraft bzw. das Moment wiedergegeben, das dem eingebrachten Fehler entspricht. Die Zeit- und Wertskalierung wurde für den unregelmäßigen und den geregelten Fall jeweils gleich gestaltet, um eine direkte visuelle Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Zur quantitativen Beurteilung wurden in Tabelle 6.8 die am Ende der Einfahrtbewegung wirkenden Kräfte und Momente zusammengefasst. Es handelt sich bei den angegebenen Werten um den Mittelwert der letzten zehn Messwerte.

Die Diagramme und Zahlenwerte ergeben ein gemischtes Bild. Die Regelung in x -, y - und z -Richtung kann in allen Situationen überzeugen. Fehlerkräfte in x - und y -Richtung werden ausgeglichen, wie Szenario 4 und 5 beweisen. In z -Richtung wird eine Sollgröße von 140 N vorgegeben, die in allen Szenarien am Ende der Einfahrt erreicht wird.

Ebenso kann die Funktion der Momentenregelung gezeigt werden, jedoch werden durch die gewählten Fehler nur geringe Fehlermomente erzeugt. Aufgrund der Beschaffenheit der Werkzeugwechsler können nur kleine Verdrehungen bis maximal 1 Grad eingestellt werden, ohne dass die Werkzeugwechsler sich beim Einfahren verklemmen. Die geringen Verdrehungen des roboterseitigen WZW erzeugen nur kleine Verschiebungen von wenigen Millimetern des werkstückseitigen WZW. Durch das Spiel zwischen Ablage und Werkstück wird nur ein Teil dieser Verschiebungen in die Ablage selbst eingeleitet. Die Steifigkeit des Werkstücks und der Ablage ist zu gering, um größere Drehmomente zu verursachen. Für die Einfahrt wäre die Verwendung von Zwei- oder Dreibackengreifern sinnvoller und realistischer gewesen.

In den Szenarien 1, 2 und 3 reduziert der Regler die für das jeweilige Szenario provozierten Drehmomente.

Beim Szenario 6 werden verschiedene Fehler überlagert. Der Regler arbeitet stabil und sorgt für ein sauberes Einfahren des WZW. Die Regelung wird abgebrochen, sobald die vom Regler ausgegebenen Stellwerte eine bestimmte Schwelle unterschreiten. Dies erklärt auch, warum der Kraftfehler in z nicht vollständig ausgeglichen wird: Die von ihm ausgelösten Stellbewegungen unterschreiten die Mindestschwelle, wodurch die Regelung beendet wird. Würde sie niedriger gesetzt, so würde auch der Fehler in z -Richtung deutlich stärker reduziert werden. Es wurden verschiedene Abbruchbedin-

Tabelle 6.6: Kraft-Momentenfehler bei der Einfahrt, Szenario 0 bis 3. Entlang der Abszisse ist die Zeit in Sekunden angegeben.

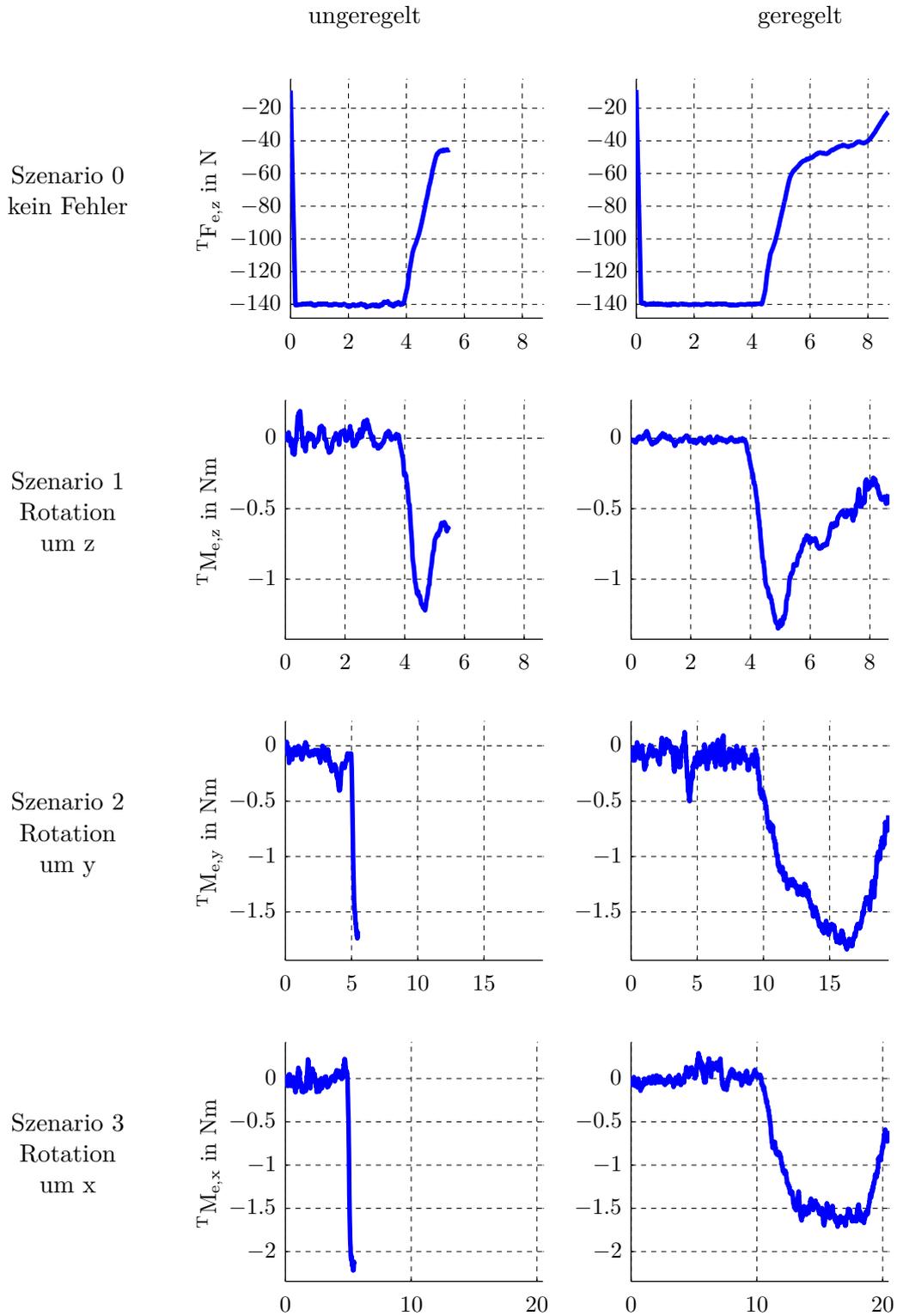
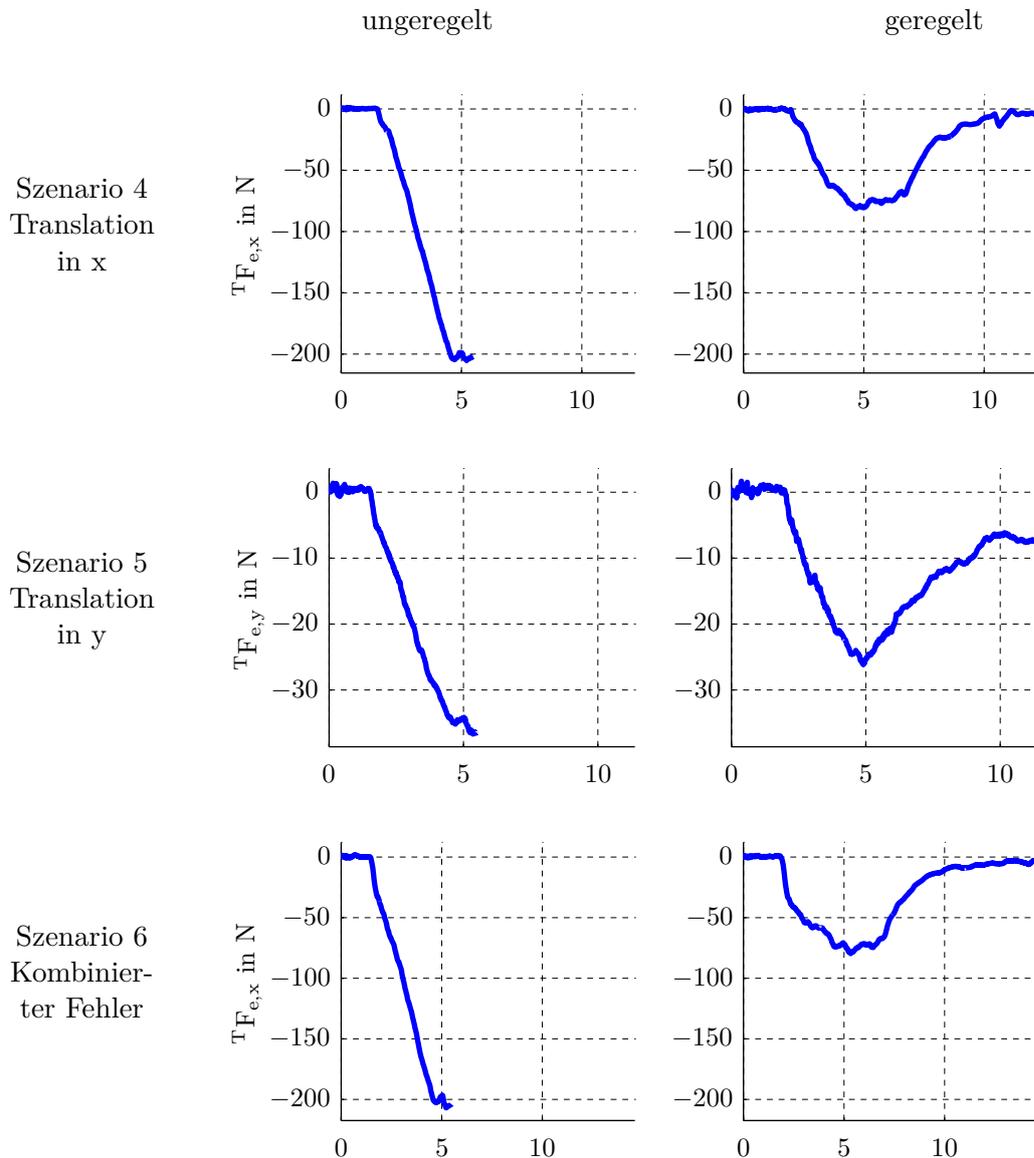


Tabelle 6.7: Kraft-Momentenfehler bei der Einfahrt, Szenario 4 bis 6. Entlang der Abszisse ist die Zeit in Sekunden angegeben.



gungen getestet. Das Unterschreiten einer Stellwertgrenze erzeugte in den meisten Szenarien kürzere Versuchsdauern als das Unterschreiten einer bestimmten Regelfehlergrenze.

Ein Nachteil der Einfahrtregelung ist die Dauer der Einfahrt im Vergleich zum unregulierten Fall, bei welchem die Einfahrt immer nach 5,5 s abgeschlossen ist. Daran ändern auch die kleinen Änderungen aufgrund der Fehlerszenarien nichts. Die Geschwindigkeit der unregulierten Einfahrt wurde entsprechend der Höchstgeschwindigkeit des geregelten Falles mit 10 mm/s vorgegeben, sie könnte beliebig erhöht werden. Die Dauer der geregelten Fahrten schwankt je nach Szenario zwischen 8,7 s und 20,3 s, was einer Fahrzeitverlängerung um 58% bzw. 269% entspricht.

Tabelle 6.8: Kraft- und Momentenfehler am Ende der Einfahrt. Die durch das Szenario provozierten Kraft-Momentenfehler sind **hervorgehoben**.

Szenario		0	1	2	3	4	5	6
Fehler			r_z	r_y	r_x	x	y	kombiniert
${}^T F_{e,x}$	ungeregelt	7,75	5,92	16,25	10,87	202,19	0,50	204,29
	geregelt	0,08	2,35	0,19	0,18	5,02	0,98	4,28
${}^T F_{e,y}$	ungeregelt	2,75	2,90	0,84	5,90	7,38	36,52	40,05
	geregelt	0,30	0,10	3,39	2,60	2,16	7,51	1,29
${}^T F_{e,z}$	ungeregelt	45,59	44,96	3,03	2,12	22,39	31,94	56,19
	geregelt	22,92	17,23	2,68	5,53	7,95	1,10	23,08
${}^T M_{e,x}$	ungerade	0,26	0,25	0,23	2,13	0,24	1,26	0,13
	geregelt	0,23	0,20	0,05	0,64	0,14	0,11	0,56
${}^T M_{e,y}$	ungeregelt	0,06	0,11	1,71	0,10	0,58	0,19	3,25
	geregelt	0,10	0,49	0,68	0,21	0,61	0,04	0,27
${}^T M_{e,z}$	ungeregelt	0,76	0,63	0,60	0,66	0,32	0,38	0,40
	geregelt	0,61	0,43	0,04	0,06	0,11	0,65	0,15

6.3.3 Transport

Die Transportphase unterscheidet sich von der Einfahrt und vom Ablegen, da keine bewussten Fehler eingebracht werden. Vielmehr finden bei jeder Fahrt die dem System immanenten Fehler Eingang ins Messergebnis, ein idealer Zustand kann nicht hergestellt werden.

Daher wurden für die Transportfahrt keine Fehlerszenarien vorbereitet. Stattdessen wird die unregelte mit der geregelten Fahrt bei zwei Bahngeschwindigkeiten verglichen.

Zu Beginn der Transportfahrt ist das Werkstück von beiden Robotern fest gegriffen und es besteht kein Kontakt mehr zur Umgebung. Das Ziel der Transportregelung ist eine möglichst gute Lastverteilung auf beide Roboter. Wird eine gute Lastverteilung erreicht, so werden gleichzeitig unerwünschte Spannungen im Werkstück vermieden. Während der Transportfahrt wird der Sollwert für eine ideale Lastteilung ständig berechnet.

Wie in Abschnitt 5.3 erläutert, wird die Kraftregelung der Roboterkooperation überlagert. Der Roboter 2 übernimmt die Rolle des Masters und gibt damit die Bewegung beider Roboter vor. Der Roboter 1 folgt der Master-Bewegung. Gleichzeitig wird die Kraftregelung dieser Bewegung überlagert. Es werden nur die Kräfte am Roboter 1 geregelt, da sich bei einer zweiseitigen Einspannung und einer idealen Krafteinleitung an einer Seite die zugehörigen idealen Kräfte auf der anderen Seite einstellen.

Der grundsätzliche Verlauf der Transportfahrt wurde bereits in den Abschnitten E und F der zuvor besprochenen Abbildung 6.7 dargestellt. Dort wurden die Kräfte am Roboter-Endeffektor betrachtet.

Für die Kraftregelung ist es jedoch wichtig, Soll- und Ist-Kraft gegenüberzustellen. Dazu wird Abbildung 6.9 betrachtet.

Die Kraftregelung erzielt eine große Wirkung. Der Abstand zwischen Soll- und Ist-Kraft wird durch die Regelung deutlich reduziert. Es bleiben dennoch signifikante Abweichungen übrig. Zur Ausregelung dieser Abweichungen muss der regelnde Roboter stärker bewegt werden, was schnell zu Instabilitä-

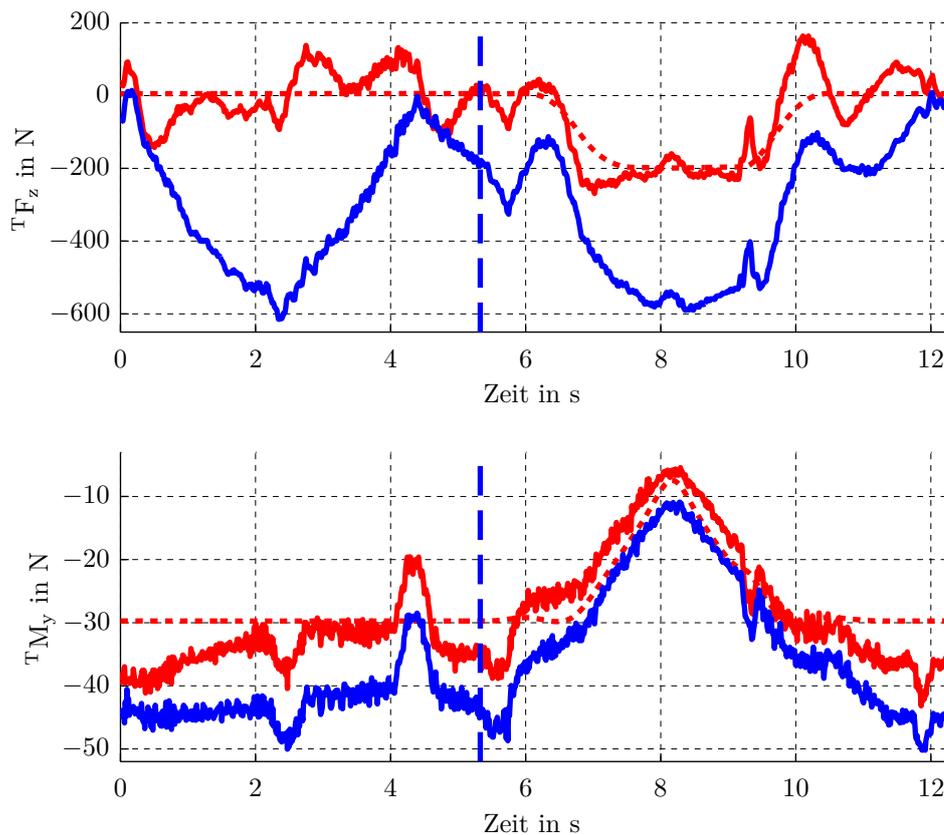


Abbildung 6.9: Kraft in z -Richtung und Moment in x -Richtung beim Transport an Roboter 1. Die Koordinatenachsen entsprechen Abbildung 6.6. In blau die Ist-Kraft bzw. das Ist-Moment im ungeregelten Fall. In rot gepunktet die Soll-Kraft bzw. das Soll-Moment, durchgezogen die Ist-Kraft bzw. das Ist-Moment bei aktiviertem Regler. Die senkrechte Linie bezeichnet den Übergang von translatorischer in rotatorische Fahrt.

ten des geregelten Systems führt. Die gefundenen Reglerparameter stellen in dieser Hinsicht einen Kompromiss aus Stabilität und Regelgüte dar.

Die Momentenregelung bietet ein ähnliches Bild. Dort sind die Auswirkungen jedoch geringer als bei der Kraftregelung. Die gesamte Momentenkurve ist jedoch in positiver Richtung nach oben versetzt, so dass der Offset des ungeregelten Falls durch die Momentenregelung verringert wird.

Abbildung 6.10 stellt die Kraft- und Momentenfehler im ungeregelten und geregelten Fall bei verschiedenen Geschwindigkeiten dar. Die Kurven beschreiben dabei die Länge des Gesamtkraft- bzw. Gesamtmomentenvektors. Insgesamt wird wie in Abbildung 6.9 eine deutliche Reduktion der Kräfte und Momente durch die Regelung erreicht.

Offensichtlich kann bei langsameren Geschwindigkeiten (Override von 30%) ein besseres Regelungsergebnis erzielt werden. Dabei dauert der Fahrzyklus jedoch deutlich länger, was auch die bessere Leistung des Reglers erklärt: Statt auf schnell ändernde Störgrößen reagieren zu müssen, führt das trägere Verhalten der Störeinflüsse zu einem besseren Ergebnis. Darüber hinaus führt die Geschwindigkeitsreduktion zu kleineren Trägheitskräften.

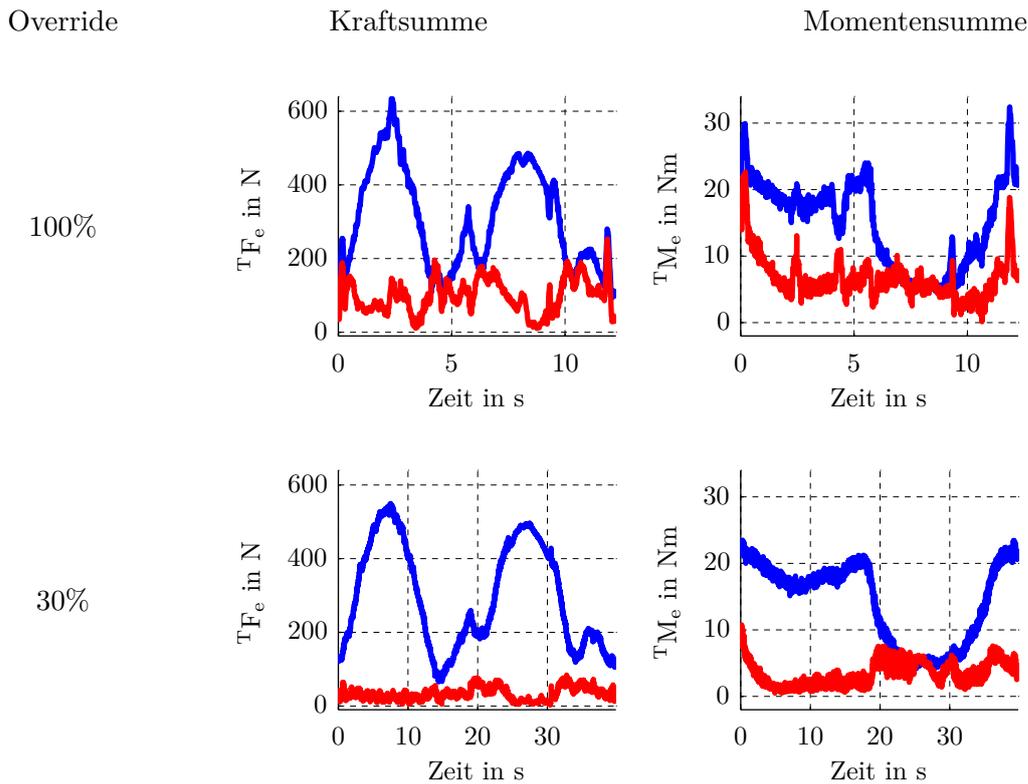


Abbildung 6.10: Kraft-Momentenfehler beim Transport. In blau der unregelte Fall, in rot mit aktiviertem Regler.

Zur quantitativen Betrachtung wurde Tabelle 6.9 erzeugt. Für die Beschreibung der Kurvenverläufe wurden jeweils das Maximum ${}^T F_{e,max}$, der Mittelwert ${}^T \bar{F}_e$ und ein quadratischer Mittelwert

$${}^T \hat{F}_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ({}^T F_{e,i})^2} \quad (6.2)$$

berechnet. Bei diesem fließt ein größerer Abstand zum gewünschten Nullfehler quadratisch in die Gewichtung ein, womit Sprünge und Abweichungen besser beurteilt werden können. Ebenso wurden ${}^T M_{e,max}$, ${}^T \bar{M}_e$ und ${}^T \hat{M}_e$ bestimmt.

In allen Situationen kann der Regler die Ausgangssituation signifikant verbessern. Ein Vergleich der Mittelwerte bei der 100%-Fahrt ergibt eine Verbesserung bei den Kräften um ca. 68% und bei den Momenten um ca. 55%.

6.3.4 Ablegen

Der dritte in dieser Arbeit näher betrachtete Teilprozess ist das Ablegen des Werkstücks. Das Ablegen folgt auf den Transport des Werkstücks.

Anhand einer Beispielmessung wird zunächst der grundsätzliche Verlauf des Ablegens beschrieben. Er ähnelt dem Verlauf beim Einfahren, wobei die Kraftinformationen statt von einem von zwei Sensoren stammen. Diese müssen zunächst verrechnet werden.

Schließlich erfolgt eine vergleichende Darstellung der unterschiedlichen Fehlerszenarien entsprechend Abschnitt 6.2.3.

Tabelle 6.9: Maximalwert, Mittelwert und quadrierter Mittelwert von geregelter und ungeregelter Fahrt im Vergleich.

	Override	Kraft ungeregelt	in N geregelt	Moment ungeregelt	in Nm geregelt
Maximum	100%	634,0	252,9	32,4	22,7
${}^T F_{e,max}, {}^T M_{e,max}$	30%	549,5	84,0	23,5	10,8
Mittelwert	100%	309,9	99,3	14,9	6,6
${}^T \bar{F}_e, {}^T \bar{M}_e$	30%	297,6	33,3	14,2	3,5
Quadratisch	100%	338,8	109,2	16,3	7,4
${}^T \hat{F}_e, {}^T \hat{M}_e$	30%	330,2	37,2	15,5	3,9

6.3.4.1 Grundsätzlicher Verlauf

Der Ablegeprozess beginnt, sobald das Werkstück sich knapp oberhalb der Ablage befindet, jedoch noch kein Kontakt zur Ablage hergestellt wurde. Durch den vorangegangenen Transportprozess sollten Spannungen bereits ausgeglichen worden sein. Eventuell im Werkstück vorhandene Spannungszustände werden beim Ablegen ignoriert.

Der Verlauf beim Ablegen ähnelt dem Verlauf bei der Einfahrt in Abbildung 6.8. Bei der Ablage werden die Informationen von zwei Kraftsensoren herangezogen. Abbildung 6.11 zeigt im oberen Diagramm die Kräfte in x -Richtung. Dabei sind drei Kraftverläufe eingezeichnet: Die Kurve in blau gibt die Kraft im Regelungs-Frame T (siehe Abbildung 6.5a) an. Die Kraft im Werkstück, die an der dem Roboter 1 zugewandten Bohrung auftritt, (Frame L_1) ist in rot, die an der anderen Bohrung (Frame L_2) auftretende Kraft in grün eingezeichnet.

Im unteren Diagramm ist in blau die Fehlerkraft in z -Richtung im Frame T und in rot gepunktet die Fahrgeschwindigkeit in z -Richtung dargestellt. Darüber hinaus gibt die obere, durchgezogene schwarze Linie die Obergrenze des Übergangsbereichs von Geschwindigkeits- zu Kraftregelung an, die mittlere schwarze gestrichelte Linie stellt die Untergrenze dieses Bereichs dar. Die untere schwarze Linie gehört zum negativen Übergangsbereich.

Vor Beginn der Bewegung wurde eine Rekalibrierung der Sensorik durchgeführt, sodass alle Kräfte zu Beginn gleich Null sind. Die resultierende Kraft im Frame T bleibt bis zur Sekunde 2 ungefähr Null, obwohl die Kräfte im Frame L_1 und L_2 sich verändern. Diese Veränderung kann durch eine Verspannung des Werkstücks ausgelöst werden. Da es sich um eine innere Kraft handelt (vgl. Abschnitt 5.5.1), reagiert der Ablageregler nicht darauf. Die erforderlichen Bewegungen zum Ablegen sind kleiner als z. B. die Transportbewegung, sodass die dabei auftretenden Kräfte und Momente nicht relevant hinsichtlich der Verspannung des Werkstücks sein sollten.

Durch die Abwärtsbewegung in z -Richtung (siehe Fahrgeschwindigkeit im unteren Diagramm) trifft das Werkstück bei Sekunde 2 auf die Ablage. In beiden Frames L_1 und L_2 findet ein Zuwachs der gemessenen Kraft statt, was auf eine externe Kraft hindeutet. Damit steigt auch die Kraft im T -System und der Ablageregler reagiert auf die Fehlerkraft, was durch den dem Anstieg folgenden Abstieg der Kraft deutlich wird.

Im unteren Diagramm sinkt durch den Kontakt mit der Ablage die Fehlerkraft in z -Richtung, da ein kleiner Teil der bisher vom Roboter getragenen Last von der Ablage getragen wird. Dies ändert

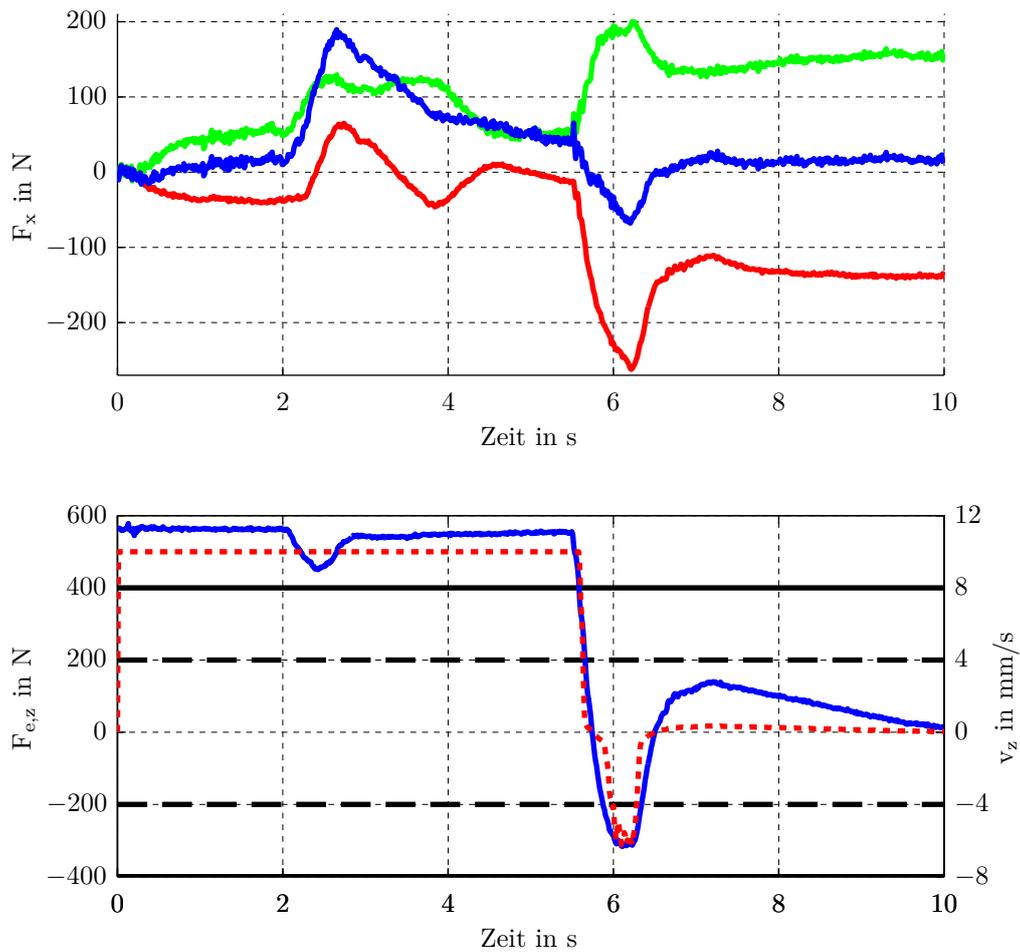


Abbildung 6.11: Kräfte in x -Richtung beim Ablegen und Kraft und Geschwindigkeit in z -Richtung in Fehlerszenario 1. Oberes Diagramm: in rot die Kraft im Frame L_1 , in grün die Kraft in Frame L_2 , in blau die Kraft im Frame T , jeweils in x -Richtung. Unteres Diagramm: in blau die Fehlerkraft und in rot gepunktet die Fahrgeschwindigkeit in z -Richtung

sich wieder, sobald die Löcher im Werkstück wieder korrekt zu den Bolzen der Ablage positioniert sind.

Der weitere Verlauf des Ablegens wird von der z -Kraft dominiert. Etwa zur Sekunde 5,5 beginnt der Regelfehler in z -Richtung stark abzufallen. Zu diesem Zeitpunkt setzt das Werkstück auf den Schultern der Ablage auf. Anders als bei der Einfahrt gibt es beim Ablegen keine vorauseilende Feder, so dass der Kontakt zwischen Ablage und Werkstück erst durch das tatsächliche Aufeinandertreffen detektiert werden kann.

Daher tritt beim Ablegen auch ein Überschwingen der z -Kraft auf: Nach einem einmaligen Überschwingen auf ca. 320 N kann der Regler die Vorwärtsbewegung abfangen und verhindert einen weiteren Kraftanstieg. Die gefundenen Reglerparameter stellen einen Kompromiss zwischen Regelgüte und Stabilität dar. Wesentlich ist, dass der Regelfehler in negativer Richtung nicht größer wird, als er in positiver Richtung zu Beginn der Regelung war.

Die Kräfte in x -Richtung am Ende des Ablegens weisen eine deutlich größere Spreizung auf als zu Beginn der Bewegung: Das Werkstück wird durch die Ablagebolzen in x -Richtung verspannt.

6.3.4.2 Szenarien

Insgesamt wurden zur Auswertung des Ablegens 16 Versuchsläufe durchgeführt. Es werden die Ergebnisse der Fehlerszenarien 0, 3, 6 und 7 erläutert (vgl. Abschnitt 6.2.3), da sie einen guten Überblick über das Verhalten des Reglers geben. Tabelle 6.10 enthält eine vergleichende Darstellung von geregelter und unregelter Fall, Tabelle 6.11 enthält den Endwert der Regelung. Wie bei der Einfahrt wird nur eine Auswahl der Messwerte dargestellt. Die Bezeichnung ${}^T F_e$ bezeichnet die Kräftesumme im Frame T .

Im Ausgangszustand, Szenario 0, wird das Werkstück im unregulierten Fall nicht völlig abgelegt. Dies ist an der Kraft in z -Richtung zu erkennen. Sie bleibt nahezu konstant. Die Ablageposition liegt im unregulierten Fall ca. 1 mm oberhalb der Ablageschultern, um Roboter, Greifer und Sensorik zu schonen. Dadurch berührt das Werkstück die Ablageschultern nicht. Durch das Einteichen einer ungünstigen Position leicht unterhalb der Ablageschultern kann eine beliebig hohe Fehlerkraft beim unregulierten Ablegen eingestellt werden, was jedoch nicht sinnvoll wäre und die Bewertung der Situation verfälschen würde. Sollten am Werkstück große Fertigungstoleranzen in z -Richtung auftreten, so würden sie einen solchen Kontakt des Werkstücks mit den Ablageschultern bei entsprechend hohen Kräften in z -Richtung hervorrufen.

In allen Szenarien wird das Werkstück auf den Ablagestempeln definiert abgelegt, indem die Last des Werkstücks von den Robotern an die Ablage übergeben wird. Die Komplexität der Fehlersituation beeinflusst die Dauer des Ablegevorgangs. Sobald rotatorische Fehler eingebracht werden, verlängert sich die Ablegedauer überproportional.

Das Ablegen wird beendet, sobald die Stellwerte des Reglers einen bestimmten Grenzwert unterschreiten, was die nicht vollständige Ausregelung des Kraftfehlers in z -Richtung erklärt. Es wurde ein Kompromiss zwischen Dauer des Regelvorgangs und Regelgüte getroffen.

Wird der unregulerte mit dem geregelten Fall verglichen, so wird in allen Szenarien eine deutliche Verringerung der Kräfte und Momente erreicht. Insgesamt werden die Kräfte und Momente am Werkstück korrekt eingestellt, die Regelung ist jedoch relativ träge, sodass auf die äußeren Einflüsse nur langsam reagiert wird. Die Maximalfehler im unregulierten Fall sind nur wenig bis kaum größer als im geregelten Fall.

6.4 Bewertung und Zusammenfassung

Für jeden untersuchten Teilprozess wurde ein Regler entworfen und im Rahmen einer experimentellen Untersuchung evaluiert. Zunächst wurde die Versuchsumgebung vorgestellt und es wurden Fehlerszenarien definiert. In der Versuchsdurchführung wurden die Regler mit den Fehlerszenarien konfrontiert und anschließend die Ergebnisse dargestellt.

Die Regler erfüllen die an sie gestellte Aufgabe. In jedem Teilprozess konnten die Kräfte und Momente wie gewünscht eingestellt werden.

Tabelle 6.10: Kraft-Momentenfehler beim Ablegen, Szenario 0, 3, 6 und 7. Entlang der Abszisse ist die Zeit in Sekunden angegeben.

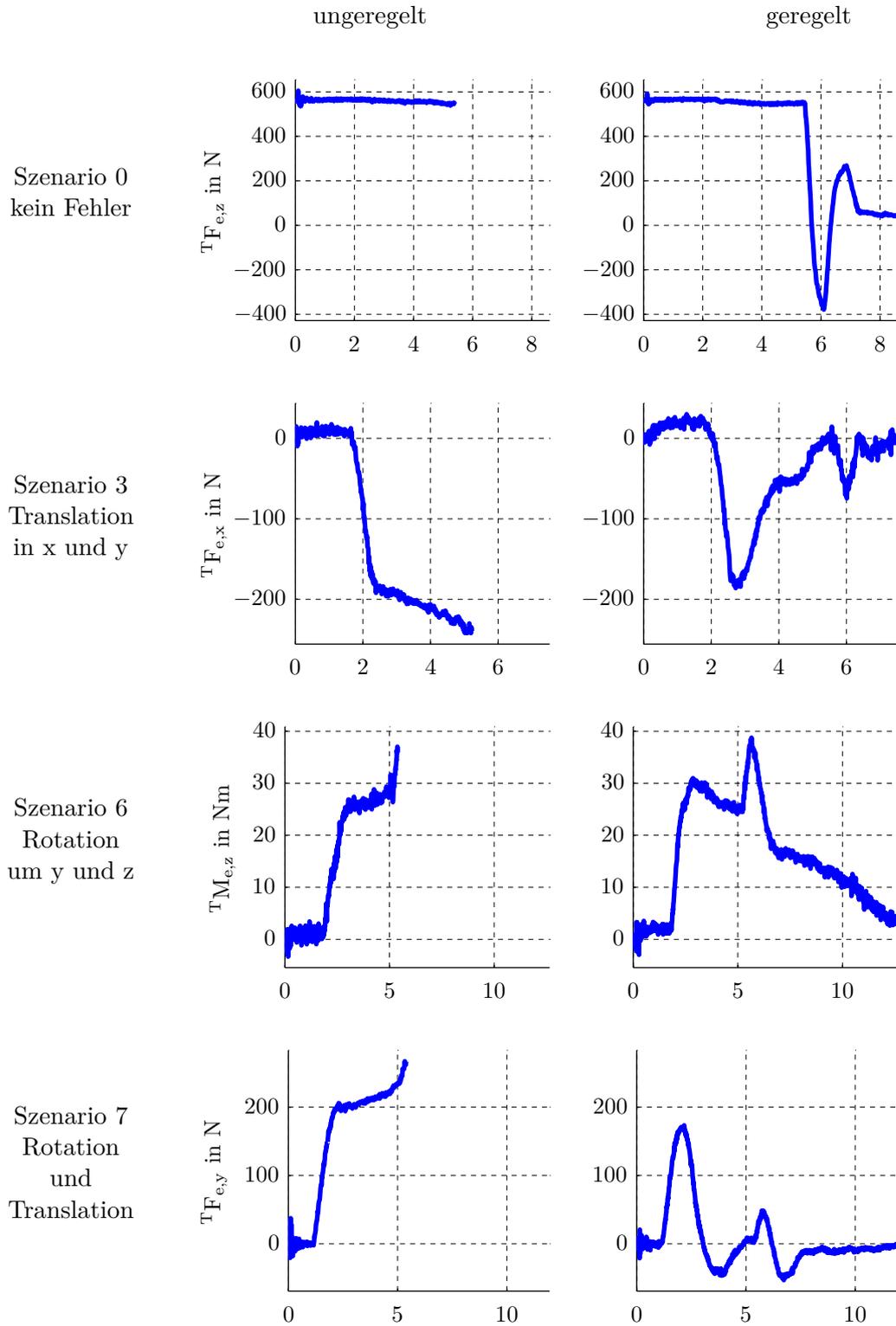


Tabelle 6.11: Kraft- und Momentenfehler am Ende der Ablagefahrt. Die Kraft in x -Richtung und das Moment um x werden nicht geregelt.

Szenario		0	3	6	7
Fehler			x,y	r_y,r_z	kombiniert
${}^T F_{e,x}$	ungeregelt	90,1	237,8	112,9	296,8
	geregelt	28,1	2,5	4,5	8,2
${}^T F_{e,y}$	ungeregelt	19,7	188,4	37,9	263,6
	geregelt	8,7	0,8	2,4	0,6
${}^T F_{e,z}$	ungeregelt	547,4	490,2	246,4	50,2
	geregelt	43,7	70,3	85,1	81,1
${}^T M_{e,x}$	ungeregelt	0,9	4,3	2,6	9,6
	geregelt	0,4	0,2	0,7	0,4
${}^T M_{e,y}$	ungeregelt	1,8	5,6	39,4	46,2
	geregelt	0,9	1,2	1,4	0,7
${}^T M_{e,z}$	ungeregelt	8,1	15,6	35,9	59,9
	geregelt	5,5	3,7	3,9	2,5

Die Teilprozesse Einfahrt und Ablegen sind hinsichtlich des Regelungskonzeptes relativ ähnlich. Beim Ablegen wurden die Informationen von zwei Sensoren zusammengefasst, was sich ähnlich problemlos gestaltete wie die Verwendung eines einzelnen Sensors bei der Einfahrt. Interessant wäre die Untersuchung eines Falles mit drei oder mehr Robotern und Sensoren.

Hingegen fehlt beim Ablegen die vorausseilende Feder der Werkzeugwechsler, die dem Einfahrtregler eine frühe Reaktion auf den bald auftretenden Kontakt mit dem werkstückseitigen Werkzeugwechsler ermöglicht. Erst beim Kontakt des Werkstücks mit den Ablageschultern kann der Regler reagieren. Der Regler muss so träge parametrisiert sein, dass er beim plötzlichen Kontakt mit der Umgebung nicht für ein Zurückspringen oder gar einen Kontaktverlust sorgt. Dies schlägt sich auf die Regelungsperformance nieder, der Regelfehler schwingt stark über.

Beide Regler konnten ihren Teilprozess jedoch stabil und bei großer Reduktion der verbleibenden Kräfte und Momente handhaben, obwohl die Kraft-Momenten-Regelung in 5 bzw. 6 Raumfreiheitsgraden parallel durchgeführt wurde. Bei einer praktischen Anwendung müsste betrachtet werden, ob tatsächlich in allen Raumfreiheitsgraden parallel geregelt werden muss. Es erscheint zudem sinnvoll, das Vorwissen über die ungefähre Position des Vollkontaktes mit der Umgebung (bei der Einfahrt: Kontakt des roboterseitigen mit dem werkstückseitigen WZW; beim Ablegen: Kontakt des Werkstücks mit den Ablagestempeln) in den Regelungsprozess einzubauen. Ein möglicher Ansatz wäre eine reine Positionssteuerung ohne Rücksicht auf wirkende Kräfte in Einfahrt- und Ablegerichtung, die erst wenige Millimeter vor dem Vollkontakt in eine Kraftregelung überwechselt.

Der Transportregler nimmt eine Sonderstellung ein, weil bei ihm keine Fehlerszenarien aufzubauen sind und er überdies mit sich ändernden Sollwerten umgehen muss. Diese Aufgabe kann der Regler sehr gut erfüllen. In den Versuchen konnte eine klare Verbesserung der im Werkstück auftretenden Kräfte durch den Regler gezeigt werden. Darüber hinaus konnte der Ansatz entsprechend den Glei-

chungen (5.12) und (5.13) in Abschnitt 5.1.2 erfolgreich für das Finden von ersten Schätzwerten für Reglerparameter eingesetzt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Werkstückhandhabung durch kooperierende Industrieroboter untersucht und es wurden Möglichkeiten aufgezeigt, diese Aufgabe durch Kraftregelung zu verbessern.

Der Stand der Technik zeigte, dass bisher keine Untersuchung stattfand, bei der Lasten größer als 50 kg mit Geschwindigkeiten größer als 0,4 m/s lastteilend im gesamten Handhabungsprozess von zwei Robotern kraftgeregelt gehandhabt wurden. Eben diese Anforderungen waren der Ausgangspunkt dieser Arbeit.

Die qualitative Analyse des Handhabungsprozesses führte zu einem Prozessmodell mit zwölf Teilprozessen, die über Transitionen miteinander verbunden sind. Die Teilprozesse wurden bezüglich Dynamik und ihrem Einfluss auf die Kräfte im Werkstück klassifiziert. Durch diese Bewertung wurden die drei Teilprozesse Einfahrt, Transport und Ablegen für eine weitere regelungstechnische Betrachtung identifiziert.

Im Rahmen einer Simulation der Mehrroboterkooperation wurde der Einfluss von Störgrößen auf den Prozess deutlich gemacht. Bei Kalibrierfehlern von 0,05 mm, Werkstück- und Greiffehlern von 2,5 mm und Schleppabständen von 4 ms traten während des Transports im Vergleich zur nicht fehlerbehafteten Fahrt Kräfte bis über 1000 N und Momente bis über 250 Nm auf.

Zur Regelung der drei Teilprozesse wurde eine modifizierte Impedanzregelung entwickelt. Sie kann einfach parametrierbar werden und es müssen keine besonderen Kenntnisse über die Eigenschaften des zu regelnden Systems vorliegen, um das Kraftregelungsmodul einzusetzen. Es können mehrere Achsen parallel geregelt werden, wozu eine Stellwertfusion der parallel arbeitenden Regler eingeführt wurde. Für jeden der drei zu regelnden Teilprozesse wurde der Regler entsprechend angepasst. Für die Einfahrt in das Werkstück und das Ablegen des Werkstücks wurde ein Konzept entwickelt, mit dem eine querkraftabhängige Geschwindigkeitsregelung und ein fließender Übergang zur reinen Kraftregelung umgesetzt wurde.

In einer Reihe von experimentellen Untersuchungen wurde die Tauglichkeit der Regler unter Einfluss typischer Störgrößen betrachtet. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die gefundenen Lösungen gut zur Reduktion der in den Werkstücken auftretenden Kräfte und Momente eignen. Die entwickelten Kraftregler konnten so parametrierbar werden, dass stabile und wirksame Regelungsabläufe entstanden. Beispielsweise konnten die während der Transportphase auftretenden Kräfte bei 0,5 m/s Bahngeschwindigkeit um durchschnittlich 68% reduziert werden. Die eingangs durchgeführte Aufgliederung des Gesamtprozesses in Teilprozesse und die in der Simulation gefundenen großen Einflüsse von kleinen Fehlern wurden durch die Experimente ebenfalls bestätigt.

7.2 Ausblick

Die bei der Analyse des Handhabungsprozesses definierten Teilprozesse und Übergänge wurden als interne Zustände einer Zustandsmaschine verwendet, um den Gesamtprozess zu steuern. Die Entwicklung eines erweiterten Frameworks zur flexiblen Nutzung kooperierender Roboter erscheint sinnvoll. Es sollte dazu in der Lage sein, die Roboter je nach Produktionsauslastung und Aufgabenstellung und auf Benutzerwunsch hin entsprechend zu konfigurieren. Dabei könnten verschiedene Anwendungsszenarien vorgesehen werden: als Einzelroboter, als Telemanipulator, zur Mensch-Roboter-Kollaboration, zur reinen Roboter-Roboter-Kooperation oder auch bei komplexen Montagevorgängen mit großen oder sehr schweren Werkstücken zur Roboter-Roboter-Mensch-Kollaboration. Ausschlaggebend für den Nutzen eines solchen Systems wäre eine schnelle und intuitive Bedienung und ein einfaches Programmierinterface.

Zur Komplexitätsverringering wurde die Simulation von Fehlereinflüssen anhand eines 2D-Modells durchgeführt. Zur detaillierten Untersuchung des Verhaltens von zwei und mehr kooperierenden Robotern bietet sich die Modellierung in 3D an. Dazu sind jedoch detaillierte Kenntnisse sowohl der Roboter-Hardware als auch der -Software notwendig. Erstere können durch entsprechende Analysen im Rahmen der erforderlichen Genauigkeit selbst ermittelt werden. Hingegen muss zum tiefen Verständnis der Steuerung Kontakt zum Hersteller der Software gesucht werden. Dann sind auch Aussagen zur optimalen Lagereglerauslegung für kooperierende Roboter möglich. Bei Zugriff auf niedriger Ebene auf alle Komponenten könnten kraftsensorlose Regelungsstrategien untersucht werden.

Die entwickelten Kraftregler haben sich in einer Vielzahl von Experimenten als stabil erwiesen. Eine deutliche Erleichterung des Einsatzes würde eine automatisierte Reglerparametrierung darstellen. Eine solche Methode müsste in – für den Endanwender einfach durchführbaren – Messungen alle notwendigen Umgebungsparameter ermitteln und daraus passende Reglerparameter bereitstellen. Um eine langfristig stabile Regelung zu garantieren, bietet sich der Einsatz von adaptiven Regelungsmethoden oder lernenden Systemen an.

In dieser Arbeit wurden Kraft-Momenten-Sensoren als gegeben vorausgesetzt. In der Praxis schreckt der hohe Preis solcher Komponenten vor dem Einsatz ab. Es gibt jedoch starke Tendenzen in der Roboterindustrie, günstige Kraft-Momenten-Sensorik zu fertigen, sodass Kraft-Momenten-Sensorik zu einer preiswerten Standardkomponente für Industrieroboter werden könnte. Im Hinblick auf eine absehbar weiter zunehmende Automatisierung in vielen Bereichen des Produktionsstandortes Deutschland und Europa würden hierdurch insbesondere im Bereich der Montage viele neue Potenziale entstehen. Der enorme Einfluss billiger Sensorik auf aktuelle Forschungs- und Entwicklungstrends wurde in den letzten Jahren deutlich durch den Einsatz von Entertainment-Produkten auch in der universitären und angewandten Forschung. Die erzielten Ergebnisse in diesem Bereich sind erstaunlich, und die breite Verfügbarkeit günstiger Kraft-Momenten-Sensorik würde vermutlich ähnliche Auswirkungen generieren.

Literaturverzeichnis

- [Alb02] ALBRICHSFELD, C. v.; TOLLE, H.: *A self-adjusting active compliance controller for multiple robots handling an object*. In: Control Engineering Practice 10 (2002), Nr. 2, S. 165–173
- [Alb98] ALBRICHSFELD, C. v.: *Ein Beitrag zur selbsteinstellenden Nachgiebigkeitsregelung für kraftschlüssig kooperierende Roboter*. Düsseldorf: VDI-Verlag (Fortschrittsberichte VDI/8; 691), 1998. Darmstadt, Technische Hochschule, Dissertation, 1998
- [Ang88] ANGELES, J.; ALIVIZATOS, A.; ZSOMBOR-MURRAY, P. J.: *The synthesis of smooth trajectories for pick-and-place operations*. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 18 (1988), Nr. 1, S. 173–178
- [Bek01] BEKALAREK, J.; ZAWAL, R.; KOZLOWSKI, K.: *Hybrid force/position control for two cooperative Staubli RX60 industrial robots*. In: IEEE (HRSG.): Proceedings of the Second International Workshop on Robot Motion and Control, 18. - 20. Oktober 2001, Bukowy Dworek. New York : IEEE Press, 2001, S. 305–310
- [Bon94] BONITZ, R. G.; HSIA, T. C.: *Force decomposition in cooperating manipulators using the theory of metric spaces and generalized inverses*. In: IEEE (Hrsg.): International Conference on Robotics and Automation, 8. - 13. Mai 1994, San Diego. New York: IEEE Press, 1994, S. 1521–1527
- [Bon96] BONITZ, R. G.; HSIA, T. C.: *Internal force-based impedance control for cooperating manipulators*. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation 12 (1996), Nr. 1, S. 78–89
- [Bis98] BISCHOFF, R.: *Neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Servicerobotik*. In: Künstliche Intelligenz (1998), Nr. 3, S. 67–71
- [Bra04] BRAUN, B. M.; STARR, G. P.; WOOD, J. E.; LUMIA, R.: *A Framework for Implementing Cooperative Motion on Industrial Controllers*. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation 20 (2004), Nr. 3, S. 583–589
- [Bru87a] BRUHM, H.; NEUSSER K.: *An Active Compliance Scheme for Robots with Two Arms*. In: ESPIAU, B. (Hrsg.): International Conference on Advanced Robotics, 13. -15. Oktober 1987, Versailles. Berlin: Springer, 1987, S. 469–480
- [Bru87b] BRUHM, H.; TOLLE, H.: *Application Studies and Control System Design for Robots with Cooperating Limbs*. In: MARTIN, T. (Hrsg.): Advanced Robotics Programme Workshop on Manipulators, Sensors and Steps toward Mobility, 11. - 13. May 1987, Karlsruhe. Karlsruhe: Kernforschungszentrum, 1987, S. 115–128

- [Bru89] BRUHM, H.; DEISENROTH, J.; SCHÄDLER, P.: *On the Design and Simulation-Based Validation of an Active Compliance Law for Multi-Arm Robots*. In: Robotics and Autonomous Systems 1989 (5), Nr. 4, S. 307–321
- [Cac00] CACCAVALE, F.; VILLANI, L.: *Impedance Control of Cooperative Manipulators*. In: Machine Intelligence & Robotic Control (2000), Nr. 2, S. 51–57
- [Cac01] CACCAVALE, F.; NATALE, C.; SICILIANO, B.; VILLANI, L.: *Achieving a Cooperative Behavior in a Dual-Arm Robot System via a Modular Control Structure*. In: Journal of Robotic Systems 18 (2001), Nr. 12, S. 691–699
- [Cac05] CACCAVALE, F.; LIPPIELLO, V.; SICILIANO, B.; VILLANI, L.: *RePLiCS: an environment for open real-time control of a dual-arm industrial robotic cell based on RTAI-Linux*. In: MENG, M. Q.-H. (Hrsg.): International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2. - 6. August 2005, Edmonton. Piscataway: IEEE, 2005, S. 2493–2498
- [Cac99] CACCAVALE, F.; NATALE, C.; SICILIANO, B.; VILLANI, L.: *Six-DOF impedance control based on angle/axis representations*. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation 15 (1999), Nr. 2, S. 289–300
- [Chi93] CHIAVERINI, S.; SCIavicCO, L.: *The parallel approach to force/position control of robotic manipulators*. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation 9 (1993), Nr. 4, S. 361–373
- [Chi99] CHIAVERINI, S.; SICILIANO, B.; VILLANI, L.: *A Survey of Robot Interaction Control Schemes with Experimental Comparison*. In: Transactions on Mechatronics 4 (1999), Nr. 3, S. 273–285
- [Cra05] CRAIG, J. J.: *Introduction to robotics. Mechanics and control*. 3. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005
- [DIN9283] Norm DIN EN ISO 9283 1998-04: *Industrieroboter - Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethoden*.
- [DIN9787] Norm DIN EN ISO 9787 1999: *Industrieroboter Koordinatensysteme und Bewegungsnomenklaturen*.
- [DIN8373] Norm DIN EN ISO 8373 2012-03: *Industrieroboter Wörterbuch*.
- [Don02] DONG, S.; MILLS, J. K.: *Manipulating rigid payloads with multiple robots using compliant grippers*. In: Transaction on Mechatronics 7 (2002), Nr. 1, S. 23–34
- [Fan10] FANUC ROBOTICS DEUTSCHLAND GMBH: *Software und Hardware Optionen*. Neuhausen auf den Fildern, 2010 - Firmenschrift. Online abrufbar unter http://www.fanucrobotics.de/~media/Global/Files/Downloads/Datasheets/DE/Software%20und%20Hardware%20Optionen_PRB_FRDE_06_2010_low%20res.ashx (12. Juni 2013)

- [Gro10] GROSS, D.; HAUGER, W.; SCHNELL, W.; SCHRÖDER, J.; WALL, W. A.: *Technische Mechanik. Band 3: Kinetik*. 11. Berlin: Springer, 2010
- [Han05] HANSS, M.: *Applied fuzzy arithmetic. An introduction with engineering applications*. Berlin, New York: Springer, 2005
- [Hay86] HAYATI, S.: *Hybrid position/Force control of multi-arm cooperating robots*. In: BEJCZY, A. K. (Hrsg.): IEEE International Conference on Robotics and Automation, 7. - 10. April 1986, San Francisco. Washington, D. C.: IEEE Computer Society Press, 1986, S. 82–89
- [Hof07] HOFFMANN, J.: *Handbuch der Messtechnik*. 3. Aufl. München: Hanser, 2007.
- [Hog85a] HOGAN, N.: *Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I – Theory*. In: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 107 (1985), Nr. 1, S. 1–7
- [Hog85b] HOGAN, N.: *Impedance Control: An Approach to Manipulation. Part II – Implementation*. In: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 107 (1985), Nr. 1, S. 8–16
- [Hog85c] HOGAN, N.: *Impedance Control: An Approach to Manipulation. Part III – Applications*. In: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 107 (1985), Nr. 1, S. 17–24
- [Hu95] HU, Y.-R ; GOLDENBERG, A. A. ; ZHOU, C.: *Motion and Force Control of Coordinated Robots During Constrained Motion Tasks*. In: International Journal of Robotics Research 14 (1995), Nr. 4, S. 351–365
- [IPR11] IPR INTELLIGENTE PERIPHERIEN FÜR ROBOTER GMBH: *Montageanleitung. Werkzeugwechsler TK-80, -125, -160. Version 1. Stand: Oktober 2011*. Schwaigern, 2011 - Firmenschrift
- [Kig00] KIGUCHI, K.; FUKUDA, T.: *Position/force control of robot manipulators for geometrically unknown objects using fuzzy neural networks*. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics 47 (2000), Nr. 3, S. 641–649
- [Koe00] KOEPPE, R.; MEUSEL, P.; HIRZINGER, G.: *Technologien für die Kraftregelung von Industrie- und Servicerobotern*. In: LÜTH, T. (Hrsg.): VDI/VDE Konferenz für Robotik 2000, 28. und 29. Juni 2000, Berlin. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2012, S. 159–165
- [Kog94] KOGA, Y.: *On Computing Multi-Arm Manipulation Trajectories*. Stanford CA, Stanford University, Dissertation, 1994
- [Kos97] KOSUGE, K.; HASHIMOTO, S.; TAKEO, K.: *Coordinated Motion Control of Multiple Robots Manipulating a Large Object*. In: LAUGIER, C. (Hrsg.): International Conference on Intelligent Robots and Systems, 7. - 11. September 1997, Grenoble. New York: IEEE Press, 1997, S. 208–213
- [Kuk05a] KUKA ROBOTER GMBH: *KR C2. KUKA.CR Motion Cooperation 2.0. Für KUKA System Software (KSS) 5.3/5.4. Stand: 20.05.2005*. Augsburg, 2005 - Firmenschrift

- [Kuk05b] KUKA ROBOTER GMBH: *KR C2. KUKA.CR Program Cooperation 2.0. Für KUKA System Software (KSS) 5.3/5.4. Stand: 20.10.2005*. Augsburg, 20.10.2005 - Firmenschrift
- [Lan80] LANE, J. D.: *Evaluation of a remote center compliance device*. In: *Assembly Automation* 1 (1980), Nr. 1, S. 36–46
- [Lia02] LIAN, K.-Y.; CHIU, C.-S.; LIU, P.: *Semi-decentralized adaptive fuzzy control for cooperative multirobot systems with $H/sup \infty$ motion/internal force tracking performance*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 32 (2002), Nr. 3, S. 269–280
- [Lin02] LINSE, H.; FISCHER, R.: *Elektrotechnik für Maschinenbauer. Grundlagen und Anwendungen*. 11. Aufl. Stuttgart: Teubner, 2002
- [Lin98] LIN, S.-T.; HUANG, A.-K.: *Hierarchical fuzzy force control for industrial robots*. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 45 (1998), Nr. 4, S. 646–653
- [Lop08] LOPES, A.; ALMEIDA, F.: *A force-impedance controlled industrial robot using an active robotic auxiliary device*. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (2008), Nr. 3, S. 299–309
- [Los11] LOSCHMIDT, P.: *On Enhanced Clock Synchronization Performance Through Dedicated Ethernet Hardware Support*. Wien, Technische Universität Wien, Institut für Rechnergestützte Automation, Dissertation, 2011
- [Loz89] LOZANO-PEREZ, T.; JONES, J. L.; MAZER, E.; O'DONNELL, P. A.: *Task-level planning of pick-and-place robot motions*. In: *Computer* 22 (1989), Nr. 3, S. 21–29
- [Mer06] MERLET, J. P.: *Parallel robots*. Dordrecht: Springer, 2006
- [Mül10] MÜLLER, B.: *Referenztrajektorien-basierte Bahnkorrektur zur Genauigkeitssteigerung kooperierender Roboter*. Gießen-Friedberg, Fachhochschule, Diplomarbeit, 2010
- [Peñ11] PEÑALOZA AGUIRRE, D.: *Dynamische Modellierung kooperierender Roboter*. Konstanz, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung, Bachelorarbeit, 2011
- [Rei09] REINHART, G.; ZAIDAN, S.: *A Generic Framework for Workpiece-based Programming of Cooperating Industrial Robots*. In: YU, Y. (Hrsg.): *International Conference on Mechatronics and Automation*, 9. - 12. August 2009, Changchun. New York: IEEE, 2009, S. 37–42
- [Rei10] REINHART, G.; ZAIDAN, S.; HUBELE, J.: *Is Force Monitoring in Cooperating Industrial Robots Necessary?* In: ITG; VDMA; IFR; DGR (Hrsg.): *International Symposium on Robotics / 6th German Conference on Robotics*, 7. - 9. Juni 2010, München. Berlin: VDE-Verlag, 2010, S. 523–530
- [Rom11] ROMSTÖCK, C.: *Analyse und Optimierung eines Handhabungsprozesses zweier kooperierender Industrieroboter mit überlagerter echtzeitbasierter Kraft-/Momentenregelung*. Mannheim, Hochschule, Masterthesis, 2011

- [Sic00] SICILIANO, B. ; VILLANI, L.: *Parallel force and position control of flexible manipulators*. In: IEEE Proceedings - Control Theory and Applications 147 (2000), Nr. 6, S. 605–612
- [Sic08] SICILIANO, B.; KHATIB, O.: *Springer Handbook of Robotics*. Berlin : Springer, 2008
- [Sic10] SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L.; VILLANI, L.: *Robotics. Modelling, Planning and Control*. 1. London : Springer, 2010
- [Sic99] SICILIANO, B.; VILLANI, L.: *Robot force control*. Bd. 540. The Kluwer international series in engineering and computer science. Boston: Kluwer Academic Publ, 1999
- [Spi07] SPILLER, A.: *Konzeption und Implementierung einer echtzeitbasierten, Kraft-Momenten-geregelten Bahnführung kooperierender Roboter*. Stuttgart, Universität, Diplomarbeit, 2007
- [Spi10] SPILLER, A.: *Kraftgeregelte Kooperierende Roboter*. In: FRAUNHOFER IPA (Hrsg.): Jahresbericht 2009. Stuttgart, 2010
- [Spi12] SPILLER, A.: *Leistungskenngrößen kooperierender Industrieroboter und Kraftregelung*. Robotik-Normungssitzung (NA 060-30-02AA), 8. März 2012, Augsburg. Online abrufbar unter http://www.ipa.fraunhofer.de/fileadmin/www.ipa.fhg.de/Robotersysteme/Normung_online.pdf (13. Juni 2013)
- [Spo06] SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M.: *Robot modeling and control*. Hoboken: Wiley, 2006
- [Sur07] SURDILOVIC, D.: *Robust Control Design of Impedance Control for Industrial Robots*. In: FUKUDA, T. (Hrsg.): International Conference on Intelligent Robots and Systems, 29. Oktober - 2. November 2007, San Diego. New York : IEEE, 2007, S. 3572–3579
- [Tan09] TANENBAUM, A. S.: *Moderne Betriebssysteme*. 3. Aufl. München : Pearson Studium, 2009
- [Uch87] UCHIYAMA, M.; IWASAWA, N.; HAKOMORI, K.: *Hybrid position/Force control for coordination of a two-arm robot*. In: HO, Y. C. (Hrsg.): International Conference on Robotics and Automation, 30. März - 3. April 1987, Raleigh. Washington, D. C.: Computer Society Press, S. 1242–1247
- [Uch88] UCHIYAMA, M.; DAUCHEZ, P.: *A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots*. In: IEEE (Hrsg.): International Conference on Robotics and Automation, 24. - 29. April 1988, Philadelphia. Washington, D. C.: Computer Society Press, 1988, S. 350–356
- [Uns94a] UNSEREN, M. A.: *A new technique for dynamic load distribution when two manipulators mutually lift a rigid object. Part 1: The proposed technique*. In: YUH, J. (Hrsg.): Proc. First World Automation Congress, 14. - 17. August 1994, Maui. Volume 2. San Antonio: TSI Press, 1994, S. 359–365

- [Uns94b] UNSEREN, M. A.: *A new technique for dynamic load distribution when two manipulators mutually lift a rigid object. Part 2: Derivation of entire system model and control architecture.* In: YUH, J. (Hrsg.): Proc. First World Automation Congress, 14. - 17. August 1994, Maui. Volume 2. San Antonio : TSI Press, 1994, S. 367–372
- [Wal89] WALKER, I. D.; FREEMAN, R. A.; MARCUS, S. I.: *Internal object loading for multiple cooperating robot manipulators.* In: IEEE (Hrsg.): International Conference on Robotics and Automation, 14. - 19. Mai 1989, Scottsdale. Washington, D. C.: Computer Society Press, 1989, S. 606–611
- [Wal91] WALKER, I. D.; FREEMAN, R. A.; MARCUS, S. I.: *Analysis of Motion and Internal Loading of Objects Grasped by Multiple Cooperating Manipulators.* In: International Journal of Robotics Research 10 (1991), Nr. 4, S. 396–409
- [Wan03] WANG, L.-X: *Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems preceded by unknown backlash-like hysteresis.* In: IEEE Transactions on Fuzzy Systems 11 (2003), Nr. 1, S. 1–8
- [Whi87] WHITNEY, D. E.: *Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control.* In: International Journal of Robotics Research 6 (1987), Nr. 1, S. 3–14
- [Win06] WINKLER, A.: *Ein Beitrag zur kraftbasierten Mensch-Roboter-Interaktion.* Chemnitz, Technische Universität, Dissertation, 2006
- [Yas10] YASKAWA ELECTRIC CORPORATION: *Instructions for Servofloat Function. DX100 Options. Manual No. HW 0485819.* Japan, 02/2010 - Firmenschrift
- [Ziv06] ZIVANOVIC, M. D.; VUKOBRATOVIC, M. K.: *Multi-Arm Cooperating Robots. Dynamics and Control.* Heidelberg : Springer, 2006

Anhang

A Roboterdynamik

Wird ein Roboter als mechanisches System gekoppelter starrer Körper unter dem Einfluss der Schwerkraft beschrieben, kann die Darstellung

$$B(\underline{q})\ddot{\underline{q}} + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}})\dot{\underline{q}} + G(\underline{q}) = \underline{\tau} \quad (\text{A.1})$$

$$B(\underline{q})\ddot{\underline{q}} + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}})\dot{\underline{q}} + g(\underline{q}) + F_v\dot{\underline{q}} + F_S \text{sign}(\dot{\underline{q}}) = \underline{\tau} - \underline{J}^T \underline{F} \quad (\text{A.2})$$

gefunden werden (Methode nach Lagrange, [Sic10]), wobei in (A.1) gilt (Dynamik ohne Reibung und äußere Kräfte):

$B(\underline{q})\ddot{\underline{q}}$	Trägheitseinflüsse
$C(\underline{q}, \dot{\underline{q}})\dot{\underline{q}}$	Flieh- und Corioliseinflüsse
$G(\underline{q})$	Schwerkraft-/Gravitationseinflüsse
$\underline{\tau}$	Gelenk-/Stellmomente

In (A.2) gilt außerdem (Dynamik mit Reibung und äußeren Kräften):

$F_v\dot{\underline{q}}$	viskose, geschwindigkeitsabhängige Reibung
$F_S \text{sign}(\dot{\underline{q}})$	richtungsabhängige Coulomb'sche Reibung
\underline{J}^T	Jacobi-Matrix zur Transformation von Endeffektor- in Gelenkkoordinaten bzw. zur Transformation von Kräften am Endeffektor in Drehmomente an den Gelenkachsen
\underline{F}	Kräfte am Endeffektor

Bei der direkten Dynamik werden aus den Gelenkmomenten $\underline{\tau}$ die Gelenkbeschleunigung, -geschwindigkeit und -position berechnet zu

$$\begin{pmatrix} \underline{q} \\ \dot{\underline{q}} \\ \ddot{\underline{q}} \end{pmatrix} = \text{ddyn}(\underline{\tau}) \quad . \quad (\text{A.3})$$

Bei der inversen Dynamik werden aus der Gelenkbeschleunigung, -geschwindigkeit und -position die Gelenkmomente $\underline{\tau}$ berechnet zu

$$\underline{\tau} = \text{idyn}(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{\ddot{q}}) \quad . \quad (\text{A.4})$$

Die Kinematik beschreibt eine Abbildung zwischen kartesischen und Gelenkraumkoordinaten, während die Dynamik Bewegungsgrößen mit Kräften und Momenten in Verbindung setzt. Die Problemstellungen der Kinematik sind also:

- Direkte Kinematik: Berechnung der Endeffektorpose aus den Gelenkwinkeln
 $\underline{p} = \text{fkin}(\underline{q})$
- Inverse Kinematik: Berechnung der Gelenkwinkel aus der Endeffektorpose
 $\underline{q} = \text{ikin}(\underline{p})$

B Kraftregler

In diesem Anhang wird die Darstellung der Impedanz- bzw. Admittanzregelung nach [Sic10, Sic99] und [Lop08] näher erläutert (siehe Abbildung B.1).

Die reine Impedanzregelung nach [Sic10] ist in eine Trajektorienregelung mit inverser Dynamik integriert.

Sie ähnelt damit stark einer aktiven Nachgiebigkeitsregelung. Bei einer solchen Regelung resultiert die Nachgiebigkeit des Roboters bildlich gesprochen aus einer sehr weich ausgelegten Bahnführung. Treten Störkräfte am Roboterarm auf (aufgrund von Kontaktkräften am Endeffektor, aber auch aufgrund von Kräften, die am Arm selbst auftreten), so werden Abweichungen von der Sollbahn akzeptiert. Die Motorregler sind derart weich ausgelegt, dass die Antriebe festgehalten werden können. Die wirkende Kraft entsteht durch den Versuch des Antriebsreglers auf die Sollposition zu fahren, wobei sehr weich nachgeregelt wird.

Es gibt zwei wesentliche Unterschiede zwischen Nachgiebigkeits- und Impedanzregelung:

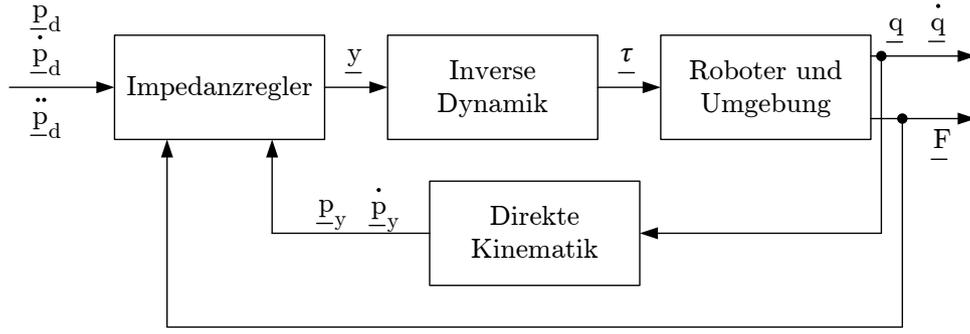
- Bei der Nachgiebigkeitsregelung kann nur ein Parameter je Freiheitsgrad festgelegt werden. Ein einfacher Motorregler, der die Zielposition nicht erreichen kann, generiert ein Drehmoment, das proportional zur Differenz zwischen Soll- und Ist-Position ist. Daher entspricht der festzulegende Parameter bei der Nachgiebigkeitsregelung einer Federsteifigkeit (auch bei einer Feder gilt nach dem Hooke'schen Gesetz: je größer die Stauchung bzw. Dehnung der Feder, desto größer die wirkende Kraft). Beim Impedanzregler wird ein Feder-Dämpfer-Masse-Verhalten eingepreßt, d. h. es können drei Parameter festgelegt und damit das Verhalten des Reglers feiner eingestellt werden. Insbesondere durch die Trägheit und die Dämpfung kann auf schnelle Kraftspitzen träger und damit ruhiger und angemessener reagiert werden.
- Beim Impedanzregler wird die am Endeffektor wirkende Kraft gemessen und zurückgeführt. Dadurch können Störkräfte an der Struktur des Roboterarmes ignoriert werden. Die Kraftregelung bestimmt dann nur die Kräfte direkt am Roboterflansch, was zumeist gewünscht ist.

Der in [Sic10] dargestellte Impedanzregler generiert die Gelenkbeschleunigung $\ddot{\underline{q}}$, die als Ausgang der Impedanzregelung \underline{y} genannt wird, aus der Differenz zwischen Sollbahn und Istbahn unter Einbezug der am Endeffektor wirkenden Kraft mithilfe der analytischen Jacobi-Matrix. Es werden nun in aller Kürze die entsprechenden Gleichungen entsprechend [Sic10], S. 372–377 dargestellt.

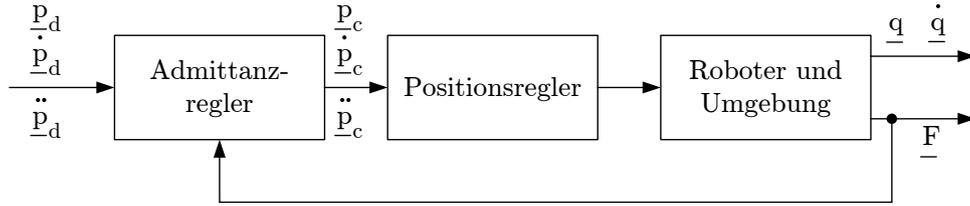
Ausgehend von Gleichung (A.2) unter Auslassung der Coulomb'schen Reibung

$$B(\underline{q})\ddot{\underline{q}} + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}})\dot{\underline{q}} + G(\underline{q}) + F_v\dot{\underline{q}} = \underline{\tau} - J^T \underline{F} \quad (\text{B.1})$$

kann $\underline{\tau}$ gesetzt werden mit



(a) Impedanzregelkreis.



(b) Admittanzregelkreis.

Abbildung B.1: Reglerstrukturen, aus [Sic10].

$$\underline{\tau} = B(\underline{q})\underline{y} + C(\underline{q}, \underline{\dot{q}})\underline{\dot{q}} + G(\underline{q}) + F_v \underline{\dot{q}} + \underline{J}^T \underline{F} \quad . \quad (\text{B.2})$$

Daraus ergibt sich nach Verrechnung

$$\underline{\ddot{q}} = \underline{y} \quad . \quad (\text{B.3})$$

\underline{y} ist der Ausgang des Impedanzreglers, der berechnet wird zu

$$\underline{y} = \underline{J}_{A_d}^{-1} K_m^{-1} \left(K_D \frac{d}{dt} (\underline{p}_d - \underline{p}_y) + K_c (\underline{p}_d - \underline{p}_y) - K_m \underline{J}_{A_d} \underline{\dot{q}} + K_m \underline{\dot{b}} - \underline{F}_d \right) \quad . \quad (\text{B.4})$$

Dabei ist \underline{F}_d die wirkende Kraft am Endeffektor aus Sicht des Frames \underline{p}_d . Eingesetzt in (B.3) erhält man

$$\underline{\ddot{q}} = \underline{J}_{A_d}^{-1} K_m^{-1} \left(K_D \frac{d}{dt} (\underline{p}_d - \underline{p}_y) + K_c (\underline{p}_d - \underline{p}_y) - K_m \underline{J}_{A_d} \underline{\dot{q}} + K_m \underline{\dot{b}} - \underline{F}_d \right) = \underline{y}$$

und nach Umstellen ergibt sich

$$K_m \left(-\underline{J}_{A_d} \underline{\ddot{q}} - \underline{J}_{A_d} \underline{\dot{q}} + \underline{\dot{b}} \right) + K_D \frac{d}{dt} (\underline{p}_d - \underline{p}_y) + K_c (\underline{p}_d - \underline{p}_y) = \underline{F}_d \quad . \quad (\text{B.5})$$

Setzt man $\underline{p}_d - \underline{p}_y = \underline{x}$, folgt

$$K_m \left(-\underline{J}_{A_d} \underline{\ddot{q}} - \underline{J}_{A_d} \underline{\dot{q}} + \underline{\dot{b}} \right) + K_D \underline{\dot{x}} + K_c \underline{x} = \underline{F}_d \quad . \quad (\text{B.6})$$

Umfangreiche Einsetzungen und Umformungen unter Einbezug der Gleichungen (9.8), (9.10), (3.9), (3.10), (3.11), (9.11), (3.64), (3.65), (9.14) aus [Sic10] führen zu Gleichung (9.13) bzw. (9.33) in [Sic10]

$$\dot{\underline{x}} = -J_{A_d}(\underline{q}, \underline{x})\dot{\underline{q}} + \underline{b} \quad . \quad (\text{B.7})$$

J_{A_d} bezeichnet dabei eine transformierte Jacobi-Matrix und \underline{b} einen Summanden, der durch die zeitliche Ableitung der Drehung des Wunsch-Frames \underline{p}_d verursacht wird. Dies abgeleitet nach der Zeit ergibt

$$\ddot{\underline{x}} = -J_{A_d}\ddot{\underline{q}} - \dot{J}_{A_d}\dot{\underline{q}} + \dot{\underline{b}} \quad , \quad (\text{B.8})$$

womit (B.5) schließlich geschrieben werden kann als

$$K_m\ddot{\underline{x}} + K_D\dot{\underline{x}} + K_c\underline{x} = \underline{F}_d \quad . \quad (\text{B.9})$$

Gleichung (B.9) stellt ein Verhalten im Sinne eines Feder-Dämpfer-Masse-Systems dar. Mit dem Reglergesetz aus Gleichung (B.4) kann ein solches Verhalten zwischen der am Endeffektor wirkenden Kraft und der Differenz zwischen Soll- und Istbahn erzwungen werden. Die Reglerstruktur wird als Impedanzregelung bezeichnet, denn die Gesamtheit aus Regler und inverser Dynamik beschreibt für $\underline{p}_d \equiv 0$ eine Impedanz, da am Eingang Position und Geschwindigkeit der direkten Kinematik rückgekoppelt anliegen und am Ausgang Stellmomente ausgegeben werden:

$$G_{\text{Impedanz}} = Z_{\text{mech}} = \frac{\tau}{\dot{p}_y} \quad . \quad (\text{B.10})$$

Beim Impedanzregler wird durch \ddot{p}_d , \dot{p}_d und p_d eine gewünschte Bahn vorgegeben. Der Roboter hat durch die Impedanz eine Vorgabe, wie er auf dabei auftretende Kräfte reagieren soll. Die gewünschte Bahn wird bei auftretenden Kräften nicht erreicht. Stattdessen reagiert der Roboter wie ein mechanisches Ersatzsystem mit vorgegebenem Verhalten.

Die Impedanzregelung ist eingebunden in die Positionsregelung des Roboters, die in der Darstellung mithilfe einer inversen Dynamik realisiert wird. Diese Struktur hat jedoch Nachteile:

- Bei heutigen Industrierobotern besteht oft kein direkter Zugang zur Vorgabe von Stellmomenten der Roboterantriebe.
- Das Störübertragungsverhalten des Roboters kann nicht unabhängig von der Impedanzregelung eingestellt werden. Die Impedanzregelung muss in diesem Fall Störkompensation (Reibung, Modellungenauigkeiten, Störkräfte an den Armgliedern durch Kabel-/Schlauchführungen, usw.) und Kraftregelung garantieren und kann für beide Aufgabenstellungen nicht unabhängig parametrisiert werden.

Diese gemeinsame Aufgabenstellung kann umgangen werden, indem eine kaskadische Regelung aufgebaut wird, bei welcher der innere Kreis einer klassischen Positionsregelung entspricht und der äußere Kreis die Impedanzregelung übernimmt.

Es wird dabei das Schema nach Abbildung B.1b verwendet.

Bei der Admittanzreglerstruktur wird ein zusätzlicher Frame c eingeführt. Er bezeichnet die virtuelle Soll-Pose des Roboters (engl. „compliant frame“). Der Regler wird dann mit der Differentialgleichung

$$K_m(\ddot{\underline{p}}_d - \ddot{\underline{p}}_c) + K_D(\dot{\underline{p}}_d - \dot{\underline{p}}_c) + K_c(\underline{p}_d - \underline{p}_c) = \underline{F} \quad (\text{B.11})$$

beschrieben. Der Unterschied zur vorangehenden Struktur liegt in der fehlenden Einbindung der Ist-Pose und -Geschwindigkeit aus der direkten Kinematik (\underline{p}_y und $\dot{\underline{p}}_y$). Diese werden im inneren Regelkreis verarbeitet, so dass dieser sehr steif ausgeführt werden kann. Damit hat diese Struktur ein besseres Soll-Trajektorie-Folgeverhalten, denn Störungen (z. B. Reibung, Modellungenauigkeiten) können vom unterlagerten Positionsregelkreis ausgeglichen werden.

Als Sollvorgabe für den inneren Regelkreis bzw. für den Industrieroboter wird die Position oder Geschwindigkeit des virtuellen Frames c verwendet (\underline{p}_c oder $\dot{\underline{p}}_c$).

Die Reglerstruktur bezeichnet eher eine Admittanz denn eine Impedanz, da am Eingang für $\underline{p}_d \equiv 0$ nur noch die Kraft \underline{F} rückgekoppelt anliegt und am Ausgang die Position des virtuellen Frames ausgegeben wird:

$$G_{\text{Admittanz}} = Y_{\text{mech}} = \frac{\dot{\underline{p}}_c}{\underline{F}} \quad . \quad (\text{B.12})$$

Aus diesem Grund wird in diesem Zusammenhang auch von einer Admittanzregelung gesprochen.

Die Parameter K_m , K_D und K_c in den obigen Gleichungen sind üblicherweise nur auf den Hauptdiagonalen besetzt. Damit kann das Feder-Dämpfer-Masse-Verhalten für jeden kartesischen Freiheitsgrad unabhängig eingestellt werden. Es gilt:

- Trägt nur K_m Werte $\neq 0$, so spricht man von einer Trägheitsregelung.
- Trägt nur K_D Werte $\neq 0$, so spricht man von einer Dämpfungsregelung.
- Trägt nur K_c Werte $\neq 0$, so spricht man von einer Steifigkeitsregelung.

C Trajektorienverlauf zur Beeinflussung der Fehlereinflüsse

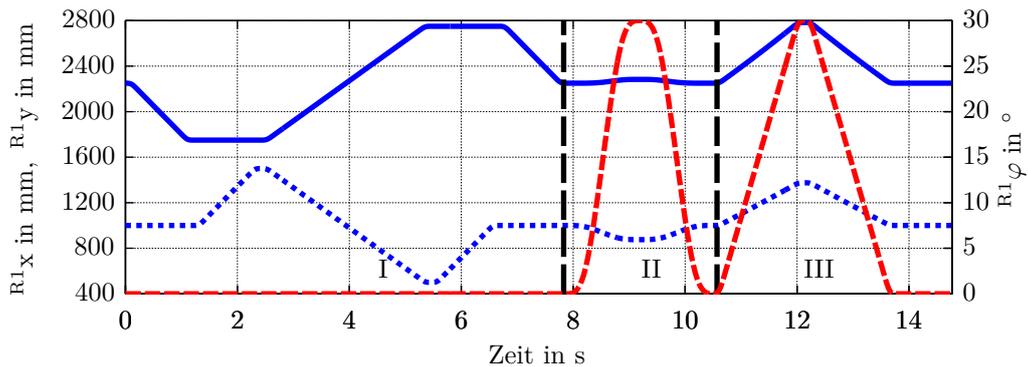


Abbildung C.1: Trajektorie für Roboter 1. x in blau durchgezogen, y in blau gestrichelt und φ in rot gestrichelt.

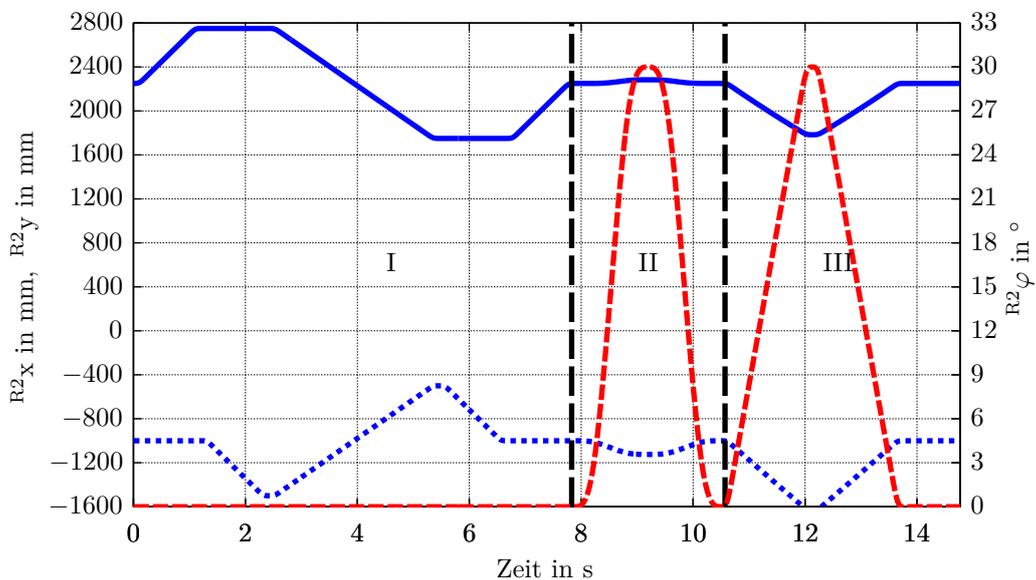


Abbildung C.2: Trajektorie für Roboter 2. x in blau durchgezogen, y in blau gestrichelt und φ in rot gestrichelt.

Die Diagramme geben die Bewegungen des Roboters 1 und des Roboters 2 jeweils aus Sicht des eigenen Basiskoordinatensystems an.

D Details zur Versuchsumgebung

D.1 Roboter

Tabelle D.1 enthält die Typenangaben der Roboter und der Steuerungen.

D.2 Robotersteuerungen

In Tabelle D.2 sind die Software-Versionenstände der verwendeten KUKA-Roboter-Steuerungen aufgelistet.

D.3 Testwerkstück

Die Abmessungen des Testwerkstücks können Abbildung D.1 entnommen werden.

D.4 Verriegelung der Werkzeugwechsler

In Abbildung D.2 ist die Verriegelungsprozedur der Werkzeugwechsler dargestellt.

D.5 Messdatenerfassung

Tabelle D.3 enthält die Angaben zur erreichbaren Auflösung beim Abtasten der Kraft-Momenten-Sensor-Signale. Die Werte zur Sensorauflösung wurden dabei aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen.

Tabelle D.1: Typenangaben der Roboter und der Steuerungen.

	Typ	Artikel-Nr.	Serien-Nr.	Hergestellt	Gewicht
Roboter 1	KR 180 L130-2 2000	0000122539	90953	2007-09	1285 kg
Steuerung 1	(V)KRC2 ed05	11000699	53584	31/2007	185 kg
Roboter 2	KR 140 L10-2 comp	0000139878	889245	2007-09	1300 kg
Steuerung 2	(V)KRC2 ed05	11000908	53353	30/2007	185 kg

Tabelle D.2: Software-Versionen der KUKA-Roboter-Steuerungen.

Angaben	Roboter 1	Roboter 2												
<p>Steuerungsversion</p>	 <p>BOF Version 1.2.5402.0 B84</p> <p>Grundsystem Version: KS V5.4.83 RTAcc (krc1adm@pc40225) #1 Thu Feb 1 12:12:25 WN 2007 RELEASE</p>	 <p>BOF Version 1.2.5402.0 B84</p> <p>Grundsystem Version: KS V5.4.83 RTAcc (krc1adm@pc40225) #1 Thu Feb 1 12:12:25 WN 2007 RELEASE</p>												
<p>Roboter</p>	<p>Roboter Name: RT1</p> <p>Roboter Typ: #KR2180L130 2 S C2 FLR ZH180 Roboter Positioniergenauer Roboter Roboterlaufzeit: 505.85 Std Anzahl Achsen: 6 Anzahl Zusatzachsen: 0</p> <table border="1" data-bbox="512 1081 970 1182"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Name</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <p>R1Mada: V8.1.0/KUKA5.4 Robcor: V8.1.0/KUKA5.4 SteuMada: V8.1.0/KUKA5.4 Custom: V8.1.0/KUKA5.4 Option: V8.1.0/KUKA5.4</p>	Nr.	Name			<p>Roboter Name: RT2</p> <p>Roboter Typ: #KR140L100 2 S C2 FLR ZH05 Roboter Positioniergenauer Roboter Roboterlaufzeit: 378.17 Std Anzahl Achsen: 6 Anzahl Zusatzachsen: 0</p> <table border="1" data-bbox="1007 1081 1465 1182"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Name</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <p>R1Mada: V10.4.0/KUKA5.4 Robcor: V10.4.0/KUKA5.4 SteuMada: V8.1.0/KUKA5.4 Custom: V8.1.0/KUKA5.4 Option: V8.1.0/KUKA5.4</p>	Nr.	Name						
Nr.	Name													
Nr.	Name													
<p>Softwareoptionen</p>	<table border="1" data-bbox="512 1373 970 1462"> <tbody> <tr> <td>ExpertTech</td> <td>V2.4.0</td> </tr> <tr> <td>MotionCoop</td> <td>V2.0.0</td> </tr> <tr> <td>RSI</td> <td>V2.3.0</td> </tr> <tr> <td>UserTech</td> <td>V2.3.0</td> </tr> </tbody> </table>	ExpertTech	V2.4.0	MotionCoop	V2.0.0	RSI	V2.3.0	UserTech	V2.3.0	<table border="1" data-bbox="1007 1373 1465 1417"> <tbody> <tr> <td>MotionCoop</td> <td>V2.0.0</td> </tr> <tr> <td>RSI</td> <td>V2.3.0</td> </tr> </tbody> </table>	MotionCoop	V2.0.0	RSI	V2.3.0
ExpertTech	V2.4.0													
MotionCoop	V2.0.0													
RSI	V2.3.0													
UserTech	V2.3.0													
MotionCoop	V2.0.0													
RSI	V2.3.0													
<p>Systemangaben</p>	<p>Rechner Name: RT1</p> <p>Windows Version: 5.1.2600 XPe: XPe V2.0.0 Build 2, 2006-06-01 Bios Version: Unbekannt</p> <p>Prozessor: Intel(R) Celeron(R) CPU 2.00GHz Arbeitsspeicher: 511MB Belastung: 60 % Festplattengröße: 30517MB</p>	<p>Rechner Name: RT2</p> <p>Windows Version: 5.1.2600 XPe: XPe V2.0.0 Build 2, 2006-06-01 Bios Version: Unbekannt</p> <p>Prozessor: Intel(R) Celeron(R) CPU 2.00GHz Arbeitsspeicher: 511MB Belastung: 48 % Festplattengröße: 28606MB</p>												

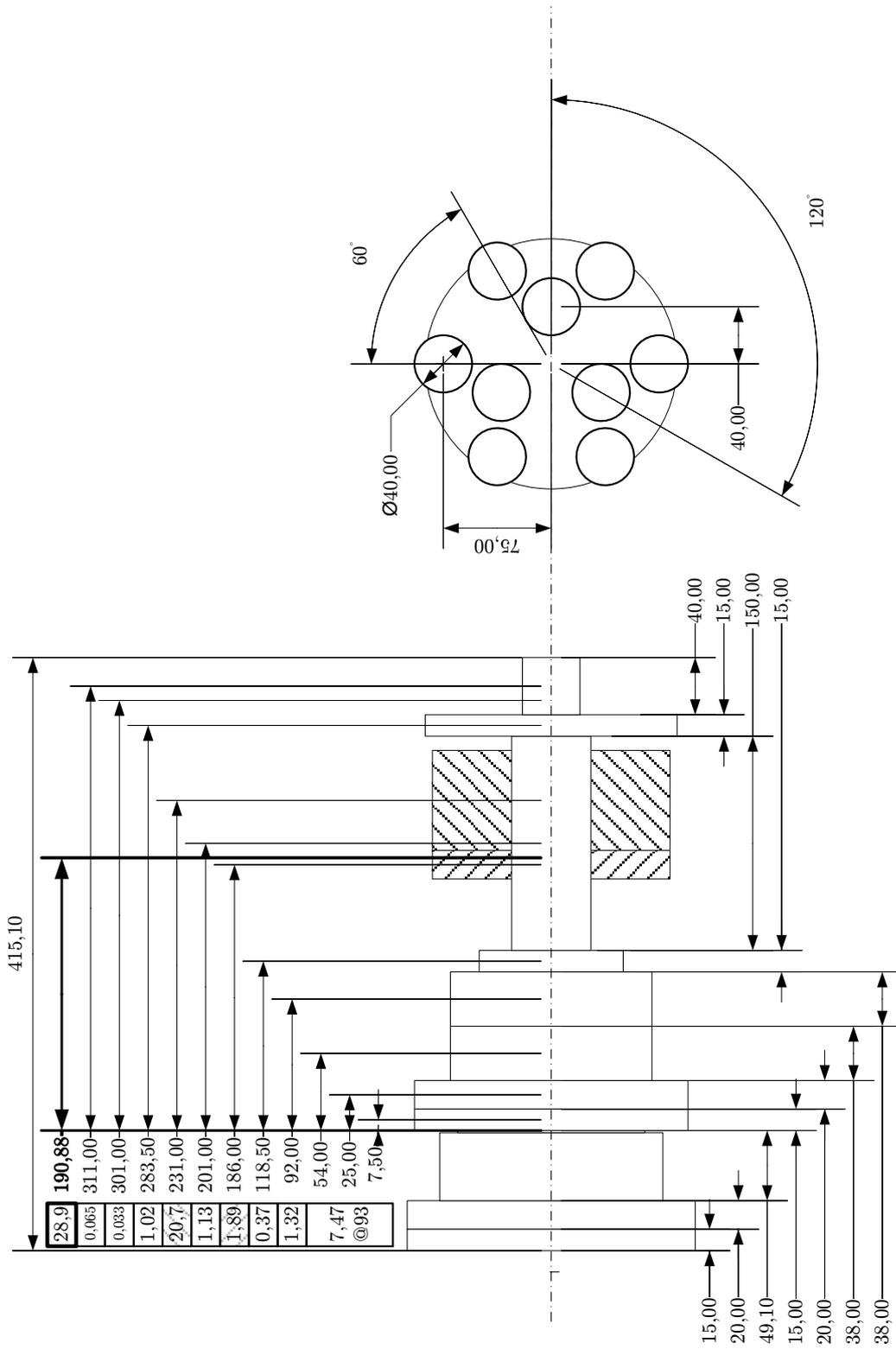


Abbildung D.1: Abmessungen des Testwerkstücks sowie Massen und Position der Massenschwerpunkte.

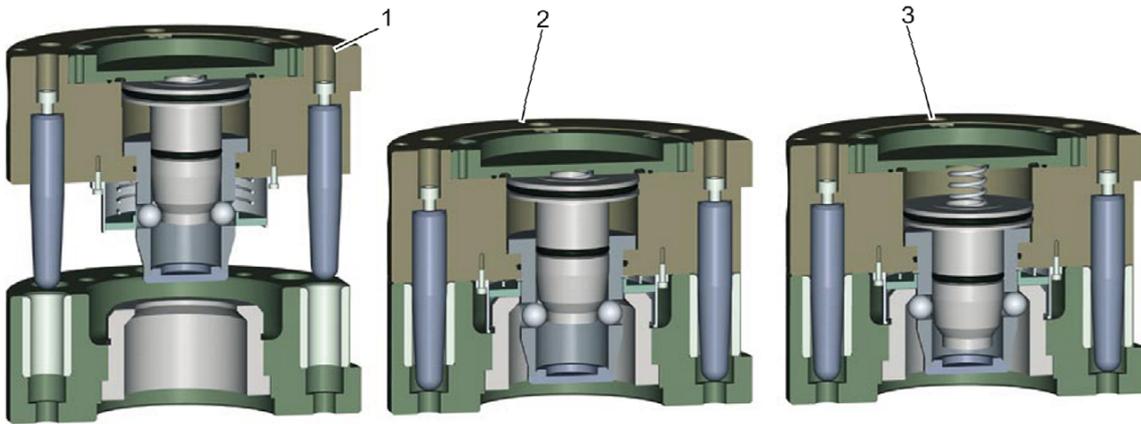


Abbildung D.2: Schnittbild zum Verriegelungsvorgang beim Werkzeugwechsler (WZW). Im Zustand 1 ist der obere, roboterseitige WZW noch nicht in den unteren, werkzeugseitigen WZW eingetaucht. Im Zustand 2 sind die WZW in der Verriegelungsposition. Zustand 3 zeigt den verriegelten Zustand. Der innere Stößel wird per Druckluft und durch die Feder im roboterseitigen WZW nach unten gedrückt und schiebt die Kugeln seitlich in den Kranz des werkstückseitigen WZW. Bild aus [IPR11].

Tabelle D.3: Genauigkeit der Messdatenerfassung. Das Auflösungsvermögen des Sensor-Systems bestehend aus Sensor, Messverstärkung und Messkarte wird durch das Auflösungsvermögen der Messkarte begrenzt.

	SI-2500-400	SI-1500-240
Spannungsbereich	-5...+5 V	
Wandlerauflösung	12 Bit bzw. 4096 Schritte ca. 2,44 mV	
Kraftbereich in N	-2500...+2500	-1500...+1500
Momentenbereich in Nm	-400...+400	-240...+240
Sensorauflösung Kraft in N	1	0,5
Sensorauflösung Moment in Nm	0,05	0,025
Wandlerauflösung Kraft in N	ca. 1,22	ca. 0,73
Wandlerauflösung Moment in Nm	ca. 0,195	ca. 0,117

D.6 RTAI-Linux

Tabelle D.4 enthält die Softwarestände des verwendeten Linux. In Tabelle D.5 sind die wesentlichen Komponenten der PC-Hardware dargestellt. Die Angaben stammen vom Aufruf des Befehls *lspci*.

Tabelle D.4: Softwarestände Echtzeitlinux.

Name	Typ	Version
Ubuntu	Betriebssystem	10.04 LTS
Kernel	Systemkern von Linux	2.6.32.11
RTAI	Echtzeit-System	3.8.1
comedi	Treiberschnittstelle für Messkarten	0.7.76

Tabelle D.5: Hardwarekomponenten des Linux-Rechners.

00:00.0 Host bridge: Intel Corporation 82875P/E7210 Memory Controller Hub (rev 02)
00:01.0 PCI bridge: Intel Corporation 82875P Processor to AGP Controller (rev 02)
00:03.0 PCI bridge: Intel Corporation 82875P/E7210 Processor to PCI to CSA Bridge (rev 02)
00:06.0 System peripheral: Intel Corporation 82875P/E7210 Processor to I/O Memory Interface (rev 02)
00:1d.0 USB Controller: Intel Corporation 82801EB/ER (ICH5/ICH5R) USB UHCI Controller #1 (rev 02)
00:1d.1 USB Controller: Intel Corporation 82801EB/ER (ICH5/ICH5R) USB UHCI Controller #2 (rev 02)
00:1d.2 USB Controller: Intel Corporation 82801EB/ER (ICH5/ICH5R) USB UHCI Controller #3 (rev 02)
00:1d.3 USB Controller: Intel Corporation 82801EB/ER (ICH5/ICH5R) USB UHCI Controller #4 (rev 02)
00:1d.7 USB Controller: Intel Corporation 82801EB/ER (ICH5/ICH5R) USB2 EHCI Controller (rev 02) (prog-if 20)
00:1e.0 PCI bridge: Intel Corporation 82801 PCI Bridge (rev c2)
00:1f.0 ISA bridge: Intel Corporation 82801EB/ER (ICH5/ICH5R) LPC Interface Bridge (rev 02)
00:1f.1 IDE interface: Intel Corporation 82801EB/ER (ICH5/ICH5R) IDE Controller (rev 02) (prog-if 8a [Master SecP PriP])
00:1f.2 IDE interface: Intel Corporation 82801EB (ICH5) SATA Controller (rev 02) (prog-if 8f [Master SecP SecO PriP PriO])
00:1f.3 SMBus: Intel Corporation 82801EB/ER (ICH5/ICH5R) SMBus Controller (rev 02)
00:1f.5 Multimedia audio controller: Intel Corporation 82801EB/ER (ICH5/ICH5R) AC'97 Audio Controller (rev 02)
01:00.0 VGA compatible controller: nVidia Corporation NV25GL [Quadro4 750 XGL] (rev a3)
02:01.0 Ethernet controller: Intel Corporation 82547EI Gigabit Ethernet Controller
03:03.0 FireWire (IEEE 1394): VIA Technologies, Inc. VT6306/7/8 [Fire II(M)] IEEE 1394 OHCI Controller (rev 80) (prog-if 10)
03:04.0 RAID bus controller: Promise Technology, Inc. PDC20378 (FastTrak 378/SATA 378) (rev 02)
03:0a.0 Ethernet controller: Intel Corporation 82541PI Gigabit Ethernet Controller (rev 05)
03:0b.0 Class ff00: National Instruments PCI-MIO-16E-4

Durch kooperierende Industrieroboter getragene Werkstücke werden beim lastteilenden Transport unnötigen Verspannungen ausgesetzt. In dieser Arbeit wird eine Analyse des Transportprozesses durchgeführt und es erfolgt eine simulative Untersuchung des Einflusses von Störungen. Anschließend wird ein flexibles Kraftregelungsmodul entwickelt, das während des Transportprozesses regelnd eingesetzt wird und die auftretenden Belastungen reduziert.

ISBN 978-3-8396-0711-4



FRAUNHOFER VERLAG