

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Edgar Mühlbeier

**Mechatronisches Koppelsystem für
die prozessunabhängige, kraftgeregelte
Kopplung von seriellen Roboterkinematiken**

Band 299

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Edgar Mühlbeier

***Mechatronisches Koppelsystem für die
prozessunabhängige, kraftgeregelte
Kopplung von seriellen Roboterkinematiken***

Band 299

Mechatronisches Koppelsystem für die prozessunabhängige, kraftgeregelte Kopplung von seriellen Roboterkinematiken

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Edgar Mühlbeier, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.2025
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2025

Copyright Shaker Verlag 2025

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

Printed in Germany.

Print-ISBN 978-3-8191-0323-0
PDF-ISBN 978-3-8191-0289-9
ISSN 2944-6430
eISSN 2944-6449
<https://doi.org/10.2370/9783819102899>

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer, nachhaltiger und wirtschaftlicher Technologien stellt den entscheidenden Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen dar. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung von Produktionssystemen und -netzwerken. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferates, die wertvollen fachlichen Diskussionen, das entgegengebrachte Vertrauen und die ständige Förderung während meiner Zeit am Institut. Weiter bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl für die Übernahme des Korreferates und das entgegengebrachte Vertrauen. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Arne Rönnau für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich möchte mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des wbk und insbesondere des Bereichs „Maschinen-, Anlagen- und Prozessautomatisierung“ für die lehrreiche und spannende Zeit sowie die gegenseitige Unterstützung bedanken. Mein Dank gilt insbesondere meinen Kollegen und Freunden Nikolas Matkovic, Michael Baranowski und Jan Baumgärtner für den intensiven Austausch und die fachliche Korrektur meiner Dissertation. Außerdem möchte ich mich bei meinen Kollegen und Freunden Benjamin Wirth, Eduard Gerlitz und Tobias Fuchs für die tolle gemeinsame Zeit und die Unterstützung in schwierigen Phasen der Dissertation bedanken. Ich danke ebenfalls allen Studierenden, die durch ihre Beiträge und ihren Einsatz zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. Unter den Studierenden möchte ich insbesondere Vincent Bauer, Simon Binder, Jonathan Kappus und Tim Klein für ihr Engagement danken. Auch möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Sekretariaten, allen Service-Centern und insbesondere der Werkstatt für die Unterstützung sowie die freundschaftliche und gute Zusammenarbeit während meiner Zeit am Institut bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Viktor und Olga, meiner Schwester Elena und meiner Partnerin Julia für die immerwährende bedingungslose Unterstützung und den Rückhalt bedanken, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Karlsruhe, 08. Juli 2025

Edgar Mühlbeier

Kurzfassung

Mit dem gesellschaftlichen und technologischen Wandel einhergehende kürzere Produktlebenszyklen bei gleichzeitig steigender Produktvielfalt führen zu stetig steigenden Anforderungen an die Produktionstechnik. Da etablierte Produktionslösungen mit starren Verkettungen und geringer Flexibilität diesen Anforderungen nicht nachhaltig gerecht werden können, muss die Produktionstechnologie wandlungsfähiger werden. Dieses Ziel kann durch ganzheitlich gedachte universelle Produktionslösungen wie die Wertstromkinematik umgesetzt werden. Der Kern dieses Produktionskonzeptes ist der Einsatz von Robotern als universelle Produktionsmaschine. Um den Ansprüchen eines universellen Einsatzes gerecht zu werden, fehlt Industrierobotern gegenwärtig allerdings noch die notwendige Steifigkeit und Genauigkeit. Auch die starke Abhängigkeit dieser Eigenschaften von der Roboterpose ist herausfordernd. Ein vielversprechender Lösungsansatz für diese Problematik ist die Kopplung von seriellen Roboterkinematiken zu einer geschlossenen parallelkinematischen Kette. Eine solche Parallelschaltung ermöglicht höhere Steifigkeiten und Genauigkeiten sowie eine Reduzierung der Posenabhängigkeit. Da bisherige Kopplungslösungen allerdings noch keinen prozessunabhängigen sowie universellen Einsatz erlauben und noch keine Bewertungen von gekoppelten Systemen für den fertigungstechnischen Einsatz existieren, wird die Technologie gegenwärtig noch nicht in der Industrie eingesetzt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine universell einsetzbare, prozessunabhängige Lösung zur starren Kopplung von Robotern zu entwickeln und zu bewerten. Um dieses Ziel zu erreichen, wird ein universell einsetzbares Kopplungssystem entwickelt. Dieses umfasst das mechanische Koppelmodul und eine Regelung der inneren Kräfte innerhalb einer geschlossenen kinematischen Kette. Das Koppelmodul wird als adapterbasierte und automatisiert ankoppelbare Lösung entwickelt. An das Koppelmodul können beliebige Endeffektoren angebracht werden. Eine mechatronische Schnittstelle erlaubt die Übertragung von Energie und Betriebsstoffen an den Endeffektor. Mit im Koppelmodul integrierten Kraftsensoren kann der Verspannungszustand für die Regelung der inneren Kräfte identifiziert werden. Die Kraftregelung wird als echtzeitfähiges System realisiert und erlaubt eine kraftbasierte Regelung der inneren Kräfte parallel zur positionsbasierten Lageregelung des Roboters. Die Ermittlung der inneren Kräfte erfolgt mithilfe eines Berechnungsmodells und der Zugriff auf die Lageregelung mithilfe eines Nachgiebigkeitsmodells zur Transformation von Kraftdaten in Lagekorrekturwerte.

Zur Validierung werden das Koppelmodul und die Kraftregelung in eine Roboterzelle mit zwei Vertikalknickarmrobotern mit einer Traglast von je 290 kg integriert und in einer systematischen Untersuchung der Steifigkeit und Genauigkeit charakterisiert. Das gekoppelte System weist im Schnitt eine um den Faktor 3,13 höhere Steifigkeit und eine reduzierte Posenabhängigkeit gegenüber einem einzelnen Roboter auf. Die erzielten Genauigkeiten sind hingegen schlechter als bei einem Einzelroboter. Dies kann auf mehrere systematische Störeinflüsse zurückgeführt werden. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse großes Potential, aber auch noch vorhandene Schwächen der Kopplungstechnologie auf. Aus den Ergebnissen der Charakterisierung wird daher ein Entwicklungsplan für die zukünftige Weiterentwicklung der Kopplungslösung abgeleitet und vorgestellt.

Abstract

Shorter product life cycles and an increasing product diversity, both driven by social and technological change, lead to constantly increasing demands on production technology. As established production solutions with rigid chains and low flexibility cannot sustainably meet these requirements, production technology must become more versatile. This challenge can be addressed by holistically designed universal production solutions such as „Wertstromkinematik“. The core idea of this production concept is to use robots as universal production machines. However, industrial robots currently lack the necessary rigidity and accuracy to do justice to universal application. Moreover, the strong dependence of these properties on the robot pose is also challenging. A promising approach to address this problem is to couple serial robot kinematics to form a closed parallel kinematic chain. The parallel connection enables higher stiffness, accuracy and a reduction in pose dependency. However, since current coupling solutions do not allow process-independent nor universal use and additionally, there are no evaluations of coupled systems for manufacturing-related use yet, the technology is not utilized in industry.

Therefore, the aim of this work is to develop as well as evaluate a universally applicable, process-independent solution for rigidly coupled robots. To achieve this goal, a general-purpose coupling system is being developed. The system comprises the mechanical coupling module and a force control system for controlling the internal forces within a closed kinematic chain. The coupling module is being developed as an adapter-based solution that can be coupled automatically. Any end effector can be attached to the coupling module. A mechatronic interface allows energy and operating fluids to be transferred to the end effector. Within the coupling module integrated force sensors, the tension state can be identified to control the internal forces. The force control is developed as a real-time capable system and allows a force-based control of the internal forces in parallel to the position control of the robot. The internal forces are determined using a calculation model. Compatibility to the position control is realized by a compliance model for the transformation of force data into position correction values.

For validation purposes, the coupling module and the force control are integrated into a robotic cell with two vertical articulated robots with a load capacity of 290 kg. The total system is characterized in a systematic investigation of stiffness and accuracy. The coupled system shows an average stiffness increase of a factor of 3.13 as well as a

reduced pose dependency in comparison to a single robot. However, the achieved accuracies tend to be lower than those of a single robot. This can be attributed to several systematic influences. In summary, the results show a great potential but also existing weaknesses of the coupling technology. Therefore, a development plan for the further evolution of the coupling solution is derived from the results of the characterization and presented.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelverzeichnis	V
1 Einleitung	12
1.1 Motivation	12
1.2 Aufbau der Arbeit	16
2 Grundlagen, Stand der Forschung und Technik	18
2.1 Steifigkeit und Genauigkeit von Robotern	18
2.1.1 Statische Steifigkeit von Robotern	18
2.1.2 Genauigkeit von Robotern	20
2.2 Mathematische Grundlagen der Robotik	22
2.2.1 Transformation von Position und Orientierung	22
2.2.2 Transformation von Kräften und Geschwindigkeiten	25
2.2.3 Transformation von Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten	28
2.3 Kraftregelung von Industrierobotern	29
2.3.1 Mechanisch überbestimmte Systeme	29
2.3.2 Indirekte Kraftregelung	30
2.3.3 Direkte Kraftregelung	33
2.4 Kooperation von Robotern	35
2.4.1 Kooperation mit Umwelt und Mensch	35
2.4.2 Kooperation mit weiteren Robotern	37
2.5 Kopplung von Robotern	40
2.5.1 Kopplungsformen	40
2.5.2 Kraftregelung bei dynamischen Kopplungen	42
2.6 Bewertung des Stands der Forschung und Technik	45
2.6.1 Zusammenfassung und Fazit zum Stand der Forschung und Technik	45
2.6.2 Defizite im aktuellen Stand der Forschung und Technik	47
3 Zielsetzung und Lösungsansatz	49

3.1	Zielsetzung	49
3.2	Lösungsansatz	50
4	Anforderungen an die Kopplung und Aufbau der Roboterzelle	52
4.1	Anforderungen an die dynamische Kopplung	52
4.2	Teilsystem Koppelmodul	54
4.3	Teilsystem Verspannungskompensation	55
4.4	Aufbau der Roboterzelle	55
5	Entwicklung des mechatronischen Koppelmoduls	59
5.1	Konzept des Koppelmoduls	59
5.1.1	Anforderungen an das Koppelmodul	59
5.1.2	Formgestaltung und Dimensionierung	61
5.2	Teilsysteme des Koppelmoduls	63
5.2.1	Mechatronische Schnittstelle zum Roboter	64
5.2.2	Erfassung der Kräfte und Momente	65
5.2.3	Zentrale Verbindung der Kopplungsarme	67
5.2.4	Passive Kompensation der inneren Kräfte und Momente	71
5.3	Finales Gesamtsystem des Koppelmoduls	73
5.4	Zusammenfassung zur Entwicklung des Koppelmoduls	74
6	Modellbasierte Regelung der inneren Kräfte	76
6.1	Anforderungen an das Regelungssystem	76
6.2	Steuerungsarchitektur und Datenverarbeitung	78
6.2.1	Steuerungsarchitektur und teilnehmende Geräte	79
6.2.2	Kommunikation mit dem Messsystem	81
6.2.3	Kommunikation mit dem externen Rechner	82
6.2.4	Kommunikation mit der Robotersteuerung	83
6.3	Entwicklung des Regelungssystems	84
6.3.1	Regelungsstrategie des gekoppelten Robotersystems	85
6.3.2	Berechnung der inneren Kraft	87
6.3.3	Nachgiebigkeitsmodell des gekoppelten Systems	93

6.4	Umsetzung des Regelkreises	103
6.4.1	Funktionsweise des Kraftreglers	103
6.4.2	Reglergesetz und Limitierungen	105
6.4.3	Implementierung des Kraftreglers	106
6.5	Charakterisierung und Validierung des Reglers	108
6.5.1	Stabilitätsuntersuchung am offenen Regelkreis	108
6.5.2	Stabilitätsuntersuchung im geschlossenen Regelkreis	112
6.6	Zusammenfassung zur Modellierung und Regelung	115
7	Charakterisierung des gekoppelten Systems	117
7.1	Steifigkeitsuntersuchung	117
7.1.1	Versuchsplanung	118
7.1.2	Auswertung und Interpretation der Ergebnisse	127
7.1.3	Bewertung der Ergebnisse	139
7.2	Genauigkeitsuntersuchung	140
7.2.1	Versuchsplanung	141
7.2.2	Auswertung und Interpretation	144
7.2.3	Bewertung der Ergebnisse	156
7.3	Zusammenfassung zur Charakterisierung des gekoppelten Systems	158
7.4	Entwicklungsplan für das gekoppelte System	160
8	Zusammenfassung und Ausblick	167
8.1	Zusammenfassung	167
8.2	Ausblick	171
	Publikationsliste des Autors	XII
	Literaturverzeichnis	XIV
	Abbildungsverzeichnis	XXX
	Tabellenverzeichnis	XXXVI
	Anhang	XXXVIII

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
CIR	Kooperierende Industrieroboter (engl. Cooperating Industrial Robots)	
Cobots	Kollaborierende Roboter	
DH	Denavit-Hartenberg-Konvention	
DOF	Freiheitsgrade (engl. Degrees of Freedom)	
FEM	Finite-Elemente-Methode	
FTS	Kraft-Momenten-Sensor (engl. Force-Torque-Sensor)	
HBK	Hottinger, Brüel & Kjær; Hersteller von Sensoren	
IPO-Takt	Interpolationstakt	
IRT	Isochronous-Real-Time	
LED	Licht emittierende Diode	
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration	
MW	Mittelwert	
NC	Robotersteuerung (engl. Numerical Control)	
PMX	Messverstärker von HBK	
PROFINET	Process Field Network, echtzeitfähiges Bussystem	
RRK	Roboter-Roboter-Kollaboration	
RT	Real-Time	
SD	Standardabweichung (engl. Standard Deviation)	
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	
SWS	Schnellwechselsystem	
TCP	Tool-Center-Point, Bearbeitungspunkt eines Roboters	
Welt-KOS	Welt-Koordinatensystem	

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
a_c	Anzahl der Lagerreaktionen	
a_i	DH-Translation in x-Richtung	[m]
A	Amplitude	
A_R	Amplitudenreserve	
AP_p	Positionsgenauigkeit/Absolutgenauigkeit	[mm]
AP_x	Positionsgenauigkeit/Absolutgenauigkeit in x-Richtung	[mm]
AP_y	Positionsgenauigkeit/Absolutgenauigkeit in y-Richtung	[mm]
AP_z	Positionsgenauigkeit/Absolutgenauigkeit in z-Richtung	[mm]
AT_p	Positions-Bahn-Genauigkeit/Bahn-Absolutgenauigkeit	[mm]
$C_{ij, Messung}$	Komponenten der experimentell ermittelten Gesamtnachgiebigkeit $C^{Messung}$	[m/N], [rad/Nm], [1/N], [rad/N]
$C_{ij, Modell}$	Komponenten der modellierten Gesamtnachgiebigkeit C^{ges}	[m/N], [rad/Nm], [1/N], [rad/N]
C	Nachgiebigkeitsmatrix	[m/N], [rad/Nm], [1/N], [rad/N]
C^{FS}	Nachgiebigkeitsmatrix eines Federsystems	[m/N], [rad/Nm], [1/N], [rad/N]
$C^{FS,A}, C^{FS,B}$	Nachgiebigkeitsmatrix von Federsystem A/B	[m/N], [rad/Nm], [1/N], [rad/N]
C^{ges}	Nachgiebigkeitsmatrix des gekoppelten Systems	[m/N], [rad/Nm], [1/N], [rad/N]
C_J	Nachgiebigkeitsmatrix im Gelenkwinkelraum	[rad/Nm]
C^K	Nachgiebigkeitsmatrix des Koppelmoduls	[m/N], [rad/Nm], [1/N], [rad/N]
$C^{Messung}$	Experimentell ermittelte Gesamtnachgiebigkeit	[m/N], [rad/Nm], [1/N], [rad/N]
$C^{R,A}, C^{R,B}$	Nachgiebigkeitsmatrix von Roboter A/B	[m/N], [rad/Nm], [1/N], [rad/N]
d_i	DH-Translation in z-Richtung	[m]
E	Allgemeine Einheitsmatrix	
F	Kraftanteil eines Kraftvektors \mathbf{h}	[N]

F_0	Kraft im Betriebspunkt	[N]
F_G	Gewichtskraft	[N]
$F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$	Komponenten eines Kraftvektors \mathbf{h}	[N], [Nm]
\mathbf{G}	Grasp-Matrix aus \mathbf{G}_A und \mathbf{G}_B	
$ G_0(j\omega_f) $	Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises	
$ G_{0,I}(j\omega_f) $	Gesamtübertragungsfunktion aus offenem Regelkreis und I-Regler	
$\mathbf{G}_A, \mathbf{G}_B$	Krafttransformationsmatrizen von Roboter A/B zum Koppelmodulkoordinatensystem	
$ G_I(j\omega_f) $	Übertragungsfunktion des I-Reglers	
$\mathbf{G}_P(s)$	Übertragungsfunktion des Lagereglers	
$\mathbf{G}_R(s)$	Übertragungsfunktion des Kraftreglers	
\mathbf{G}^+	Allgemeine Pseudoinverse der Grasp-Matrix	
\mathbf{G}_W^+	Gewichtete Pseudoinverse	
\mathbf{G}^\dagger	Moore-Penrose-Inverse	
\mathbf{G}_Λ^+	Pseudoinverse nach Walker	
$\Delta\mathbf{h}$	Änderung der Kraft bei experimenteller Steifigkeitsmessung	[N], [Nm]
\mathbf{h}	Allgemeiner Kraftvektor	[N], [Nm]
$\mathbf{h}_A, \mathbf{h}_B$	Kräfte der Roboterendeffektoren auf das Koppelmodul	[N], [Nm]
\mathbf{h}_{AB}	Zusammengesetzter Spaltenvektor aus \mathbf{h}_A und \mathbf{h}_B	[N], [Nm]
\mathbf{h}_e	Endeffektorkräfte	[N], [Nm]
\mathbf{h}^{ext}	Äußere Kräfte	[N], [Nm]
\mathbf{h}^{int}	Innere Kräfte	[N], [Nm]
$\mathbf{h}_{GP,A}^{int}$	Innere Kräfte im Greifpunktkoordinatensystem von Roboter A	[N], [Nm]
$\mathbf{h}_{GP,A,e}^{int}$	Regelabweichung der Kraftregelung im Greifpunktkoordinatensystem von Roboter A	[N], [Nm]
$\mathbf{h}_{GP,A,r}^{int}$	Führungsgröße der Kraftregelung im Greifpunktkoordinatensystem von Roboter A	[N], [Nm]
Δh_j	Kraftkomponenten von $\Delta\mathbf{h}$	[N], [Nm]

$\mathbf{h}^{komp,A}, \mathbf{h}^{komp,B}$	Gewichtskraft des Schnellwechselkopfs von Roboter A/B	[N], [Nm]
\mathbf{h}_K	Gesamtkraft im Koppelmodulkoordinatensystem	[N], [Nm]
$\mathbf{h}_{S,A}, \mathbf{h}_{S,B}$	Kraftsensordaten von Roboter A/B	[N], [Nm]
\mathbf{I}_3	3x3-Einheitsmatrix	
\mathbf{I}_{12}	12x12-Einheitsmatrix	
\mathbf{J}	Jacobi-Matrix	
k	Steifigkeit	[N/m], [Nm/rad]
k_{11}, \dots, k_{66}	Diagonalelemente einer Steifigkeitsmatrix	[N/m], [Nm/rad]
k_c	Kopplungssteifigkeit einer Steifigkeitsmatrix	[Nm/rad], [N]
k_D	Diagonalelement der Dämpfungsmatrix \mathbf{K}_D	[Ns/m], [Nms/rad]
k_{Dim}	Anzahl der Dimensionen	
k_{env}	Diagonalelement der Umgebungssteifigkeit \mathbf{K}_{env}	[N/m], [Nm/rad]
k_{ij}	Elemente einer Steifigkeitsmatrix	[N/m], [Nm/rad], [N], [N/rad]
k_I	Verstärkungsfaktor des I-Reglers	
k_K	Diagonalelement der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K}_K	[N/m], [Nm/rad]
k_{lim}	Faktor zur Geschwindigkeitslimitierung	
k_M	Diagonalelement der Trägheitsmatrix \mathbf{K}_M	[Ns ² /m], [Nms ² /rad]
k_{sc}	Skalierungsfaktor für Alterungseffekt der Federelemente	
\mathbf{K}	Allgemeine Steifigkeitsmatrix	[N/m], [Nm/rad], [N], [N/rad]
\mathbf{K}_c	Kopplungsmatrix einer Steifigkeitsmatrix	[N], [N/rad]
\mathbf{K}_D	Dämpfungsmatrix der mechanischen Impedanz	[Ns/m], [Nms/rad], [Ns], [Ns/rad]
\mathbf{K}_{env}	Umgebungssteifigkeit	[N/m], [Nm/rad], [N], [N/rad]
\mathbf{K}^E	Steifigkeitsmatrix eines Federelements	[N/m], [Nm/rad], [N], [N/rad]
\mathbf{K}^{FS}	Steifigkeitsmatrix des Federsystems	[N/m], [Nm/rad], [N], [N/rad]
\mathbf{K}_J	Steifigkeitsmatrix im Gelenkwinkelraum	[Nm/rad]

\mathbf{K}^{kt}	Kontaktsteifigkeit aus der Umgebung	[N/m], [Nm/rad], [N], [N/rad]
\mathbf{K}_K	Steifigkeitsmatrix der mechanischen Impedanz	[N/m], [Nm/rad], [N], [N/rad]
\mathbf{K}_M	Trägheitsmatrix der mechanischen Impedanz	[Ns ² /m], [Nms ² /rad], [Ns ²], [Ns ² /rad]
\mathbf{K}_o	Rotatorischer Teil einer Steifigkeitsmatrix	[Nm/rad]
\mathbf{K}_t	Translatorischer Teil einer Steifigkeitsmatrix	[N/m]
l	Substitutionsvariable	[m]
l_s	Blechbreite	[mm]
\mathbf{M}	Momentenanteil eines Kraftvektors	[Nm]
n_c	Grad der Überbestimmtheit	
\mathbf{O}_3	3x3-Nullmatrix	
\mathbf{p}	Allgemeiner Translationsvektor	[m]
$\dot{\mathbf{p}}$	Lineargeschwindigkeitsvektor	[m/s]
\mathbf{p}_e	Position des Endeffektors	[m]
${}^w\mathbf{p}_K$	Messpunkt für Stabilitätsuntersuchung	[mm]
$\dot{p}_x, \dot{p}_y, \dot{p}_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$	Komponenten eines Geschwindigkeitsvektors	[m/s], [rad/s]
\mathbf{q}	Gelenkwinkel eines Roboters	[rad]
$\dot{\mathbf{q}}$	Gelenkwinkelgeschwindigkeiten eines Roboters	[rad/s]
$\Delta\mathbf{q}_e$	Gelenkwinkelabweichungen	[rad]
q_i	Gelenkkoordinate des i-ten Gelenks	[°], [rad]
$\Delta q_{i,e}$	Positionsabweichung des i-ten Gelenks eines Roboters	[°]
$\Delta q_{i,u}$	Stellwert des i-ten Gelenks eines Roboters	[°]
$\Delta q_{i,u,\max}$	Maximal zulässige Gelenkwinkeländerung des i-ten Gelenks der Kompensationsschnittstelle	[°]
$\mathbf{q}_{K,r}$	Führungsgröße des Kraftreglers im Gelenkraum	[°]
$\Delta\mathbf{q}_u$	Stellgröße des Kraftreglers im Gelenkraum	[°]
\mathbf{r}_{ab}	Verbindungsvektor zwischen zwei Bezugssystemen a und b	[m]
$r_{ab,x}, r_{ab,y}, r_{ab,z}$	Komponenten des Verbindungsvektors r_{ab}	[m]

$\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B$	Verbindungsvektoren zwischen Greifpunkt- und Kopplungssystem	[m]
$r_{A,x}, r_{B,x}, r_{A,z}, r_{B,z}$	Komponenten der Verbindungsvektoren \mathbf{r}_A und \mathbf{r}_B	[m]
\mathbf{R}	Allgemeine Rotationsmatrix	
R_m	Zugfestigkeit	[N/mm ²]
RP_i	Positions-Wiederholgenauigkeit	[mm]
RT_P	Positions-Bahn-Wiederholgenauigkeit	[mm]
s_0	Blechdicke	[mm]
S	Sicherheitsfaktor	
\mathbf{S}	Selektionsmatrix	
$\mathbf{S}(\cdot)$	Schiefsymmetrische Matrix	
t_{Obj}	Anzahl der betrachteten Körper	
\mathbf{T}	Allgemeine Transformationsmatrix	
${}^{i-1}_i\mathbf{T}$	Transformation des i-ten Gelenks zum vorherigen Gelenk	
${}^b_e\mathbf{T}$	Transformation vom Endeffektorkoordinatensystem ins Basiskoordinatensystem eines Roboters	
${}^n_e\mathbf{T}$	Transformation vom Endeffektorkoordinatensystem ins letzte Gelenkkoordinatensystem eines Roboters	
\mathbf{T}_f	Transformationsmatrix einer Kraft	
T_m	Periodendauer bei der Stabilitätsuntersuchung	[s]
$T_{Sampling}$	Taktzeit des Reglers	[ms]
\mathbf{T}_v	Transformationsmatrix einer Geschwindigkeit	
\mathbf{v}	Allgemeiner Geschwindigkeitsvektor	[m/s]
$v_{i,max}$	Geschwindigkeitsfaktor der Robotersteuerung des i-ten Gelenks	[1/min]
V_i	Verhältnis zwischen maximal zulässiger Geschwindigkeit und Winkeländerung im aktuellen Reglerdurchlauf des i-ten Gelenks	
w	Gesenkweite	[mm]
w_f	Kreisfrequenz	[rad/s]
w_G	Gewichtungsfaktor	
\mathbf{W}	Gewichtungsmatrix aus \mathbf{W}_A und \mathbf{W}_B	

$\mathbf{W}_A, \mathbf{W}_B$	Teilmatrizen von \mathbf{W}	
\mathbf{x}'	Schnittpunkt der im Betriebspunkt angelegten Tangente mit der x-Achse	[m]
\mathbf{x}_0	Verlagerung im Betriebspunkt	[m]
$\mathbf{x}_a, \mathbf{y}_a, \mathbf{z}_a$	Einheitsvektoren eines Bezugssystems a	
$\mathbf{x}_b, \mathbf{y}_b, \mathbf{z}_b$	Einheitsvektoren eines Bezugssystems b	
\mathbf{x}_d	Gewünschte Soll-Pose	[m]
$\Delta \ddot{\mathbf{x}}_{de}, \Delta \dot{\mathbf{x}}_{de}, \Delta \ddot{\mathbf{x}}_{de}$	Posefehler und zeitliche Ableitungen	[m], [m/s], [m/s ²]
\mathbf{x}_e	Endeffektorpose	[m]
$\Delta \mathbf{x}_i$	Translatorische Verschiebung in Freiheitsgrad i bei experimenteller Steifigkeitsmessung	[m]
$\mathbf{x}_{K,r}$	Führungsgröße des Kraftreglers im kartesischen Raum	[mm]
$\Delta \mathbf{x}_u$	Stellgröße des Kraftreglers im kartesischen Raum	[mm]
y_c	Innere Kraft multipliziert mit Cosinus-Signal	[N], [Nm]
y_s	Innere Kraft multipliziert mit Sinus-Signal	[N], [Nm]
α_i	DH-Rotationswinkel um x-Achse	[rad]
γ	Vernachlässigte Einflüsse der Roboterdynamik	
θ_i	DH-Rotationswinkel um z-Achse	[rad]
Σ	Allgemeines Koordinatensystem/Bezugssystem	
$\Sigma_{6,A}, \Sigma_{6,B}$	Flanschkoordinatensysteme von Roboter A/B	
$\Sigma_{B,A}, \Sigma_{B,B}$	Basiskordinatensystem von Roboter A/B	
Σ_E	Koordinatensystem eines Federelements	
$\Sigma_{FS,A}, \Sigma_{FS,B}$	Federsystemkoordinatensysteme von Roboter A/B	
$\Sigma_{GP,A}, \Sigma_{GP,B}$	Greifpunktkoordinatensysteme von Roboter A/B	
Σ_K	Koppelmodulkordinatensystem	
$\Sigma_{S,A}, \Sigma_{S,B}$	Kraftsensorkoordinatensysteme von Roboter A/B	
τ	Gelenkmomente eines Roboters	[Nm]
${}^b\mathbf{v}_e$	Geschwindigkeitsvektor im Endeffektorraum	[m/s]
$\varphi_0(\omega_f)$	Phase des offenen Regelkreises	[°]

$\varphi_{0,i}(\omega_f)$	Resultierende Phase aus offenem Regelkreis und I-Regler	[°]
$\Delta\varphi_i$	Rotatorische Verschiebung in Freiheitsgrad i bei experimenteller Steifigkeitsmessung	[°]
$\varphi_I(\omega_f)$	Phase des I-Reglers	[°]
φ_R	Phasenreserve	[°]
ω	Winkelgeschwindigkeitsvektor	[rad/s]
ω_e	Winkelgeschwindigkeit des Endeffektors	[rad/s]
ω_{ek}	Eigenkreisfrequenz	[rad/s]
ω_f	Kreisfrequenz bei der Stabilitätsuntersuchung	[rad/s]

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der gesellschaftliche und technologische Wandel geht mit einer kontinuierlichen Veränderung und Steigerung der Anforderungen an die Produktionstechnologie einher, was heutige Produktionssysteme vor große Herausforderungen stellt. Kürzere Produktlebenszyklen und steigende Produktvielfalt sowie Individualisierungsoptionen führen zu immer kleineren Losgrößen (Steedmüller & Zürn 2017, S. 27; Weber 2019, S. 13). Daraus resultiert die Forderung nach größerer Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in den Produktionsanlagen und -prozessen bei gleichbleibender Produktivität und Wirtschaftlichkeit. Die etablierten Produktionskonzepte mit geringer Variantenvielfalt, starren Verkettungen und dem Vorhalten von Kapazitäten können diese stetig steigenden Anforderungen nicht nachhaltig erfüllen (Pott & Dietz 2019, S. 114; Steedmüller & Zürn 2017, S. 39). Es werden neue vollflexible und wandlungsfähige Produktionskonzepte benötigt.

Ein ganzheitlich flexibel gedachtes Produktionskonzept muss alle vier Aspekte der Flexibilität berücksichtigen: Routenflexibilität, strukturelle Flexibilität, Ressourcenflexibilität und Expansionsflexibilität. Als Routenflexibilität wird die Möglichkeit verstanden, vorhandene Produktionseinheiten in unterschiedlichen Abfolgen zu durchlaufen. Dadurch können verschiedene Produkte und Produktvarianten ihre jeweils eigene Route durch das gleiche Produktionssystem nehmen. Strukturelle Flexibilität wiederum meint die Veränderung der Durchlaufreihenfolge durch eine neue Anordnung der physischen Produktionseinheiten. Als Ressourcenflexibilität wird die Möglichkeit bezeichnet, neue Prozesse durch Modifikation von bestehenden Ressourcen, beispielsweise einen Industrieroboter, zu ergänzen. Als Erweiterungsflexibilität wird die Option verstanden, neue Prozesse durch Hinzufügen von neuen Ressourcen zu integrieren. (Makris 2021, S. 5–6)

Das Konzept der Wertstromkinematik bezeichnet ein wandlungsfähiges Produktionssystem, das alle Flexibilitätskriterien berücksichtigt. Die grundlegende Idee der Wertstromkinematik ist der Aufbau eines ganzen Wertstroms in einer Produktion aus einheitlichen, universellen Robotern (siehe Abbildung 1-1). Die Roboter sollen Materialfluss, Handhabung, Fertigung, Montage und Qualitätssicherung übernehmen. Sie dienen als universell einsetzbare Produktionsressourcen und stellen so die Ressourcenflexibilität sicher. Mithilfe von spezialisierten Endeffektoren lassen sich die Roboter an

ihren jeweiligen Einsatzzweck anpassen. Ein Raster aus Spannvorrichtungen umfasst die gesamte Produktionsfläche und erlaubt damit eine schnelle Rekonfiguration des Produktionslayouts durch Neupositionierung von Robotern sowie Spann- bzw. Hilfsvorrichtungen (Mühlbeier et al. 2021). Das Raster ermöglicht einen hohen Grad an struktureller Flexibilität. Gemeinsam mit dem schnellen Austausch von Endeffektoren oder dem Hinzufügen weiterer Roboterstationen trägt es auch zur Erweiterungsflexibilität bei.

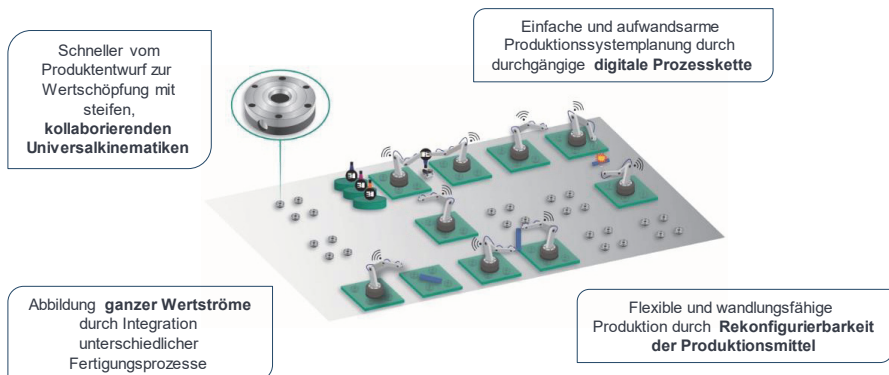


Abbildung 1-1: Produktionskonzept Wertstromkinematik (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2021)

Da ein wesentlicher Teil des Rekonfigurationsaufwands von Produktionssystemen in der Programmierung von Steuerungscode und dem anschließenden Testen und Inbetriebnehmen der Änderungen liegt, wird ein durchgängiges digitales Assistenzsystem, das den kompletten physischen Produktionsprozess abbilden kann, zur Unterstützung von Rekonfigurationsprozessen benötigt (Makris 2021, S. 14; Roth 2016, S. 41–42). Dieses im Konzept der Wertstromkinematik als digitale Prozesskette bezeichnete Assistenzsystem soll eine häufige und schnelle Rekonfiguration wirtschaftlich attraktiv machen. Die digitale Prozesskette umfasst den vollständigen Prozess zum Betrieb einer Produktionsanlage, beginnend bei der Konstruktion des zu produzierenden Bauteils über die Ableitung der passenden Fertigungs- und Montageprozesse bis hin zur darauffolgenden autonomen Generierung von Hardwarestationen (siehe Abbildung 1-2) (Mühlbeier et al. 2021). Ist das geplante Produktionssystem physisch realisiert, soll die digitale Prozesskette als vierter und letzter Schritt automatisiert Programmabläufe und Steuerungscores generieren und den laufenden Betrieb der Anlage überwachen bzw.

optimieren (Mühlbeier et al. 2021). Die daraus resultierende automatische Planung sowie schnelle Anpassung der Route erfüllt damit ebenfalls den Aspekt der Routenflexibilität.

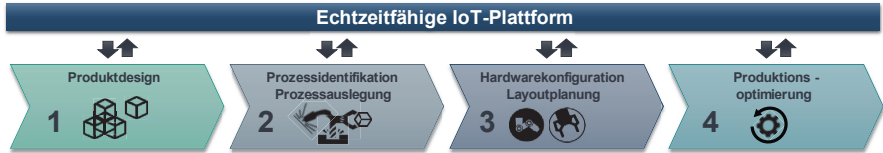


Abbildung 1-2: Durchgängige digitale Prozesskette in der Wertstromkinematik (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2021)

In der gegenwärtigen Produktion werden Roboter trotz ihres Potentials als universelle Produktionsmaschine im Wesentlichen für repetitive Aufgaben eingesetzt (Makris 2021, S. 5). Ein Großteil der Einsatzgebiete sind Handhabungs- und Schweißprozesse (International Federation of Robotics 2020, S. 11). Trotz langjähriger Forschung, Roboter beispielsweise für den Einsatz in der Zerspanung zu befähigen, hat sich eine solche Nutzung in der Industrie bisher nicht etabliert. Als wesentlicher Grund wird die geringe Steifigkeit genannt (Iglesias et al. 2015). Sie ist bei handelsüblichen Industrierobotern deutlich stärker von der Pose abhängig als bei Werkzeugmaschinen und unterliegt daher einer sehr starken Schwankung. Durchschnittswerte werden in der Literatur mit $1 \text{ N}/\mu\text{m}$ im Vergleich zu durchschnittlich $50 \text{ N}/\mu\text{m}$ bei Werkzeugmaschinen angegeben (Iglesias et al. 2015). Vereinzelt existieren auf dem Markt auch Robotermodelle, die speziell für Fräsprozesse ausgelegt sind, wie beispielsweise das Modell MAX-100-2.25-P von MABI (MABI Robotic 2024). Um die notwendige Steifigkeit zu erreichen, sind diese jedoch massiv dimensioniert und besitzen nur geringe Reichweiten. Die Einsatzmöglichkeiten solcher Roboter sind daher stark begrenzt, und ein universeller Einsatz für unterschiedlichste Prozesse von der Handhabung bis zur Zerspanung ist nicht gegeben.

Um die notwendigen Steifigkeiten und Prozesskräfte zu erreichen, ohne gleichzeitig den universellen Einsatz zu beschränken, verfolgt das Konzept der Wertstromkinematik einen anderen Ansatz. Mithilfe einer mechanischen Kopplung sollen mehrere Roboter temporär miteinander verbunden werden und somit für eine zeitlich begrenzte Phase eine Parallelkinematik bilden. Diese Parallelkinematik hat eine deutlich höhere Gesamtsteifigkeit und kann höhere Prozesskräfte ausüben. Das Potential der Steifigkeitssteigerung durch die Kopplung wurde in (Mühlbeier et al. 2021) simulativ untersucht

und ist in Abbildung 1-3 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Nachgiebigkeiten eines Einzelroboters (a) im Vergleich zu drei gekoppelten Robotern (b). Die durchschnittliche Nachgiebigkeit des gekoppelten Systems ist um den Faktor 10 geringer bzw. die Steifigkeit um den Faktor 10 höher.

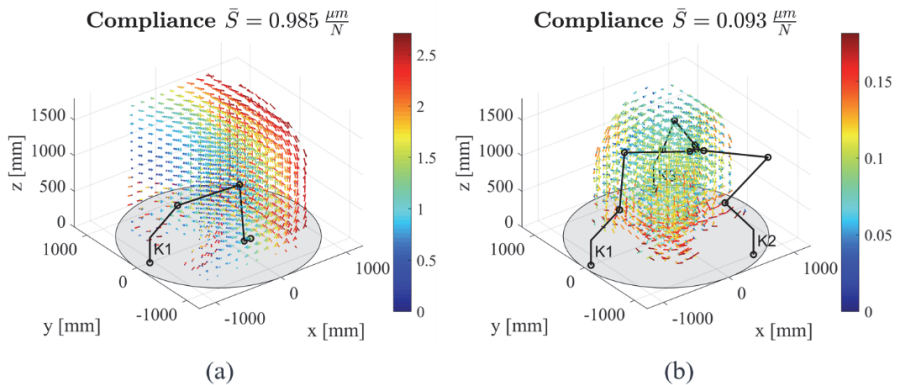


Abbildung 1-3: Vergleich der simulierten Tool-Center-Point-Nachgiebigkeit für (a) einen und (b) drei gekoppelte Roboter, visualisiert in MATLAB (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2021)

Das Potential der simulativen Untersuchung aufgreifend, setzt sich die vorliegende Arbeit im Kontext der universellen Einsetzbarkeit von Robotern mit der Kopplung von zwei Industrierobotern auseinander. Unter dem Begriff „Industrieroboter“ sind in dieser Arbeit serielle Vertikalknickarmroboter, die Kräfte im Kilonewtonbereich aufbringen können, zu verstehen. In der Arbeit sollen die Grundlagen für eine einfachere Nutzung von gekoppelten Robotersystemen und daraus resultierend die Möglichkeit, gekoppelte Robotersysteme ausgiebig in unterschiedlichsten Fertigungsszenarien untersuchen zu können, geschaffen werden. Die Arbeit begrenzt sich auf die Entwicklung und Untersuchung eines gekoppelten Gesamtsystems aus zwei Robotern und einem mechanischen Koppelglied. Im Fokus steht hierbei die Bewegungsfähigkeit des gekoppelten Systems. Das Gesamtsystem wird hinsichtlich der Gestaltung des Koppelglieds, des Umgangs mit inneren Kräften bzw. Verspannungen, der Regelungstechnik und der Eigenschaften des gekoppelten Systems eruiert. Die Arbeit leistet somit einen wesentlichen Beitrag, um die Interaktionsmöglichkeiten und damit die Einsatzgebiete von industriellen Robotern in der Produktion zu verbessern.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in acht Hauptkapitel gegliedert, deren Aufbau in Abbildung 1-4 veranschaulicht wird.

In Kapitel 2 werden zunächst die mathematischen und regelungstechnischen Grundlagen der Robotik erläutert. Anschließend folgt eine Darlegung des Stands der Forschung und Technik hinsichtlich Kooperationsformen von Robotern. Das Kapitel schließt mit der Bewertung des Stands der Forschung und Technik und einer Darstellung der daraus abgeleiteten Defizite hinsichtlich gekoppelter Roboter.

In Kapitel 3 wird die Zielsetzung der Arbeit basierend auf den in Kapitel 2 ermittelten Defiziten konkretisiert und der Lösungsansatz vorgestellt. Aus der hieraus entwickelten Vorgehensweise leiten sich die darauffolgenden Hauptkapitel ab.

In Kapitel 4 werden zunächst die Anforderungen an das Kopplungssystem identifiziert und zu entwickelnde Teilsysteme abgeleitet. Außerdem werden die Roboterzelle und ihre physisch und digital relevanten Teilsysteme vorgestellt.

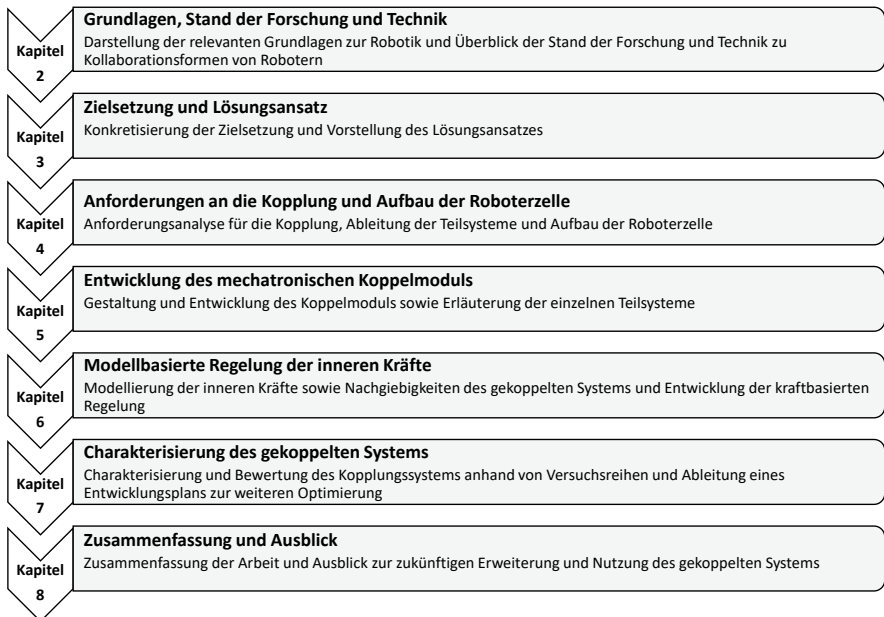


Abbildung 1-4: Aufbau der Dissertation

In Kapitel 5 wird die Entwicklung des Koppelmoduls vorgestellt. Ausgehend von den Anforderungen werden die Konzeptionierung und Gestaltung des Koppelmoduls beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Teilsysteme und das Gesamtsystem des Koppelmoduls vorgestellt.

In Kapitel 6 wird die Verarbeitung der inneren Kräfte erläutert, die bei der Kopplung von Robotern entstehen. Das Kapitel umfasst die Modellierung des gekoppelten Systems, die Entwicklung eines kraftbasierten Regelungssystems und die steuerungstechnische Integration in die bestehende Steuerungsarchitektur der Roboterzelle.

In Kapitel 7 folgt die Charakterisierung und Bewertung des in Kapitel 5 und 6 entwickelten Kopplungssystems. Mithilfe einer systematischen Versuchsplanung und -durchführung werden die Eigenschaften des gekoppelten Systems hinsichtlich Steifigkeit, Genauigkeit und Homogenität im Arbeitsraum ermittelt. Aus den Erkenntnissen der Untersuchung wird ein Entwicklungsplan für die Optimierung des Kopplungssystems abgeleitet.

In Kapitel 8 folgt schließlich die finale Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf zukünftige Nutzungs- und Erweiterungsmöglichkeiten des gekoppelten Systems.

2 Grundlagen, Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel werden die erforderlichen Grundlagen für das Verständnis der vorliegenden Arbeit sowie der Stand der Forschung und Technik zur Kopplung von Robotern dargelegt (siehe Abbildung 2-1). Zunächst werden die grundlegenden Begriffe der Steifigkeit und Genauigkeit von Robotern erläutert. Anschließend werden die mathematischen Grundlagen zu Transformationsoperationen in der Robotik und zur Kraftregelung von Industrierobotern beschrieben. Diese bilden die Basis für die Modellierung und Regelung in Kapitel 6.

Es folgt die Darlegung des Stands der Forschung und Technik zur Kooperation und Kopplung von Robotern. Zunächst wird die Kooperation von Robotern im Gesamten betrachtet. Anschließend erfolgt eine Eingrenzung auf Roboter-Roboter-Kooperationen. Das Kapitel schließt mit der detaillierten Betrachtung der Kopplung von Robotern und der Identifikation der Forschungsdefizite, aus denen sich die konkretisierte Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ableitet.

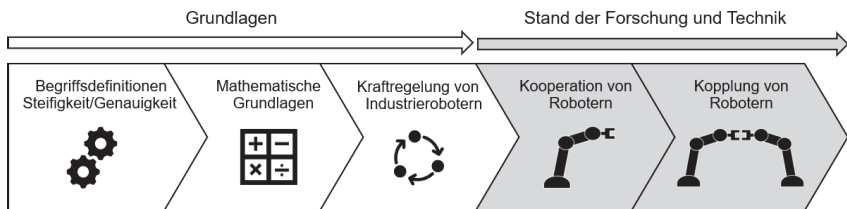


Abbildung 2-1: Inhalte von Kapitel 2

2.1 Steifigkeit und Genauigkeit von Robotern

In diesem Kapitel erfolgt die Definition der Begriffe „Steifigkeit“ und „Genauigkeit“ von Robotern, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden.

2.1.1 Statische Steifigkeit von Robotern

In der vorliegenden Arbeit wird unter dem Begriff der Steifigkeit die statische, mechanische Steifigkeit verstanden. Die statische Steifigkeit ist daher ein Maß für die aus der mechanischen Verformung des Roboters resultierende Verlagerung des Bearbeitungspunkts (engl. Tool Center Point, TCP) bei einer konstanten Belastung. Die Steifigkeit k berechnet sich nach (Brecher & Weck 2017, S. 21) mit

$$k = \left(\frac{dF}{dx} \right) = \frac{F_0}{x_0 - x'}, \quad 2-1$$

wobei x_0 der Verlagerung im TCP bei wirkender Kraft F_0 entspricht und x' dem Schnittpunkt der im Betriebspunkt angelegten Tangente mit der x-Achse. Die Bestimmung der Steifigkeit nach Gleichung 2-1 erfolgt direkt im jeweiligen Betriebspunkt (siehe Abbildung 2-2). Dadurch lassen sich auch bei progressivem oder degressivem Federverhalten präzise Steifigkeitswerte ermitteln. Die Steifigkeit wird in der Robotik üblicherweise als mehrdimensionale Größe betrachtet.

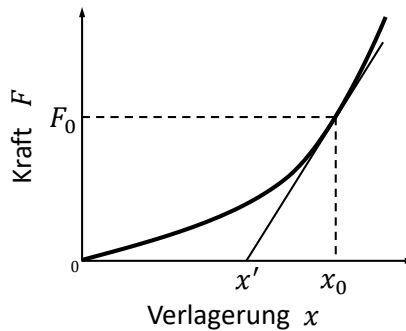


Abbildung 2-2: Bestimmung der Steifigkeit eines Systems im Betriebspunkt (in Anlehnung an Brecher & Weck 2017, S. 21)

Industrieroboter weisen wie die meisten Maschinen ein progressives Steifigkeitsverhalten auf. Dies bedeutet, dass ihre Steifigkeit mit zunehmender Last ebenfalls zunimmt. Verantwortlich hierfür ist im Wesentlichen die Zunahme der Kontaktflächen in den Achsgetrieben bei Initiierung einer Belastung. Die mechanische Steifigkeit des Roboters wird daher auch durch Spiel bzw. Umkehrspiel in den Getrieben negativ beeinflusst. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Betrachtung der mechanischen Steifigkeit liegt, werden regelungstechnische Einflüsse auf die Verschiebung des TCPs sowie modellbasierte Algorithmen zur Kompensation der Verlagerung des TCPs im weiteren Verlauf der Arbeit nicht berücksichtigt. (Brecher & Weck 2017, S. 20–22)

Aufgrund der kinematischen Struktur von Vertikalknickarmrobotern müssen am TCP angreifende Kräfte über Drehmomente an den Roboterachsen kompensiert werden. Die aus den Kräften resultierenden Drehmomente sind wiederum abhängig von den Hebelarmen zwischen TCP und Lage des jeweiligen Gelenks sowie von der

Kraftangriffsrichtung. Unterschiedliche Roboterposen führen daher bei gleichbleibender externer Belastung zu unterschiedlichen Drehmomenten und rotatorischen Verschiebungen. Da sich die Verlagerung des TCP hauptsächlich aus den einzelnen rotatorischen Auslenkungen zusammensetzt, ist die Steifigkeit am TCP wesentlich von der Roboterpose abhängig (Celikag et al. 2018). Der Einfluss der Getriebesteifigkeiten auf die Gesamtsteifigkeit am TCP liegt im Bereich von 50 bis 70 % (Uhlmann et al. 2018).

2.1.2 Genauigkeit von Robotern

Der Begriff der Genauigkeit von Robotern ist in der DIN EN ISO 9283 definiert. Es wird zwischen der Absolutgenauigkeit und der Wiederholgenauigkeit unterschieden. Diese Größen lassen sich sowohl für eine Pose des Roboters als auch für die gefahrene Bahn eines Roboters bestimmen. Zur Ermittlung der Pose-Genauigkeit wird eine gewünschte Soll-Pose mehrmals aus der gleichen Richtung angefahren. Die Absolutgenauigkeit ergibt sich dann aus der Abweichung der Soll-Pose vom Mittelwert aller Ist-Posen. Die Wiederholgenauigkeit wird aus der Streuung der Ist-Posen ermittelt. Sie kann als Kugel beschrieben werden, deren Mittelpunkt der gemittelten Ist-Position und deren Radius dem mittleren Abstand aller Ist-Posen zum Mittelpunkt entspricht (DIN EN ISO 9283). Der Zusammenhang zwischen Absolutgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

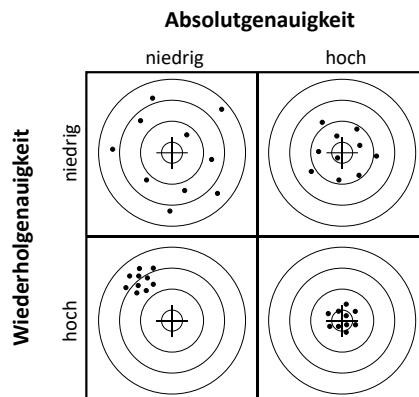


Abbildung 2-3: Zusammenhang zwischen Absolut- und Wiederholgenauigkeit (in Anlehnung an Möller 2019, S. 14)

Die Ermittlung der Bahn-Absolutgenauigkeit und der Bahn-Wiederholgenauigkeit erfolgt analog. Für die Bahn-Genauigkeiten wird zunächst die mittlere Bahn aus allen

gefahrenen Ist-Bahnen ermittelt. Die größte festgestellte Abweichung zwischen der mittleren Bahn und der Soll-Bahn ist die Bahn-Absolutgenauigkeit. Die Bahn-Wiederholgenauigkeit beschreibt die größte Abweichung der einzelnen Ist-Bahnen von der gemittelten Ist-Bahn (DIN EN ISO 9283).

Die Genauigkeit eines Roboters hängt von einer Vielzahl von Einflüssen ab, die sich grundlegend in systematische und stochastische Einflüsse differenzieren lassen. Systematische Einflüsse bestimmen im Wesentlichen die erreichbare Absolutgenauigkeit. Beispiele hierfür sind Fertigungs- und Montagetoleranzen, Schwankungen in den Materialeigenschaften, die Temperatur oder auch die Nachgiebigkeit der Robotergelenke. Die Wiederholgenauigkeit wird hingegen durch stochastische Einflüsse wie unter anderem Getriebespiel und Stick-Slip-Effekte sowie Schwingungen bestimmt. Industrieroboter besitzen in der Regel eine sehr gute Wiederholgenauigkeit im Bereich von wenigen zehntel Millimetern und eine schlechtere Absolutgenauigkeit, die bei unkalibrierten Robotern mehrere Millimeter betragen kann. (Baumgärtner et al. 2023; Bongardt 2004, S. 14–19)

Abbildung 2-4 zeigt eine Übersicht möglicher Einflussgrößen auf die Genauigkeit von Industrierobotern.

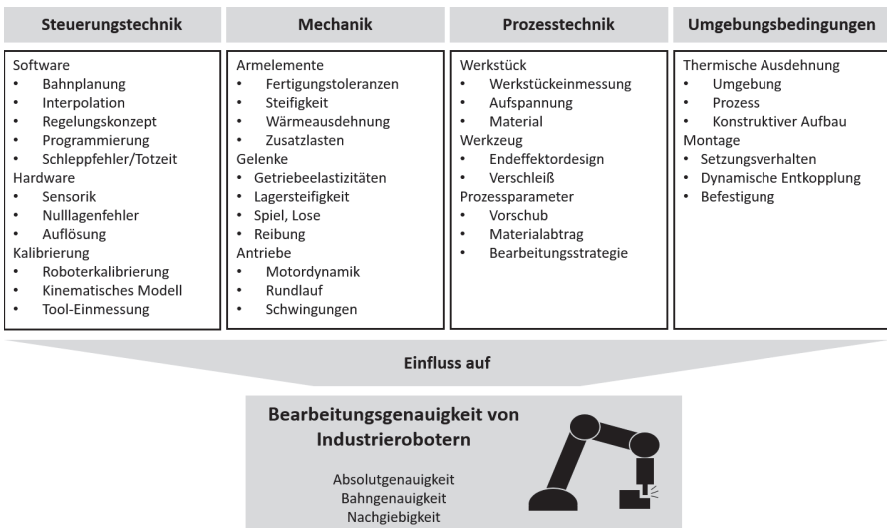


Abbildung 2-4: Einflussgrößen auf die Bearbeitungsgenauigkeit eines Industrieroboters (in Anlehnung an Möller 2019)

2.2 Mathematische Grundlagen der Robotik

In diesem Kapitel werden ausgewählte mathematische Grundlagen zur Transformation von Größen zwischen verschiedenen Bezugssystemen vorgestellt, die für das Verständnis von Kapitel 6 erforderlich sind. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden jeweils Transformationen von Positionen und Orientierungen, von Kräften und Geschwindigkeiten sowie von Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten erläutert.

Die Notation der Vektoren und Matrizen in den folgenden Kapiteln orientiert sich an (Craig 2005) und wird im Folgenden kurz erläutert: Für Kraft- und Geschwindigkeitsvektoren sowie Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrizen beschreibt der Index oben links das Bezugssystem und der Index unten rechts den Bezugspunkt. Eine Kraft ${}^a\mathbf{h}_b$ beschreibt demnach eine im Punkt b angreifende Kraft, beschrieben in einem Bezugssystem Σ_a . Eine Geschwindigkeit ${}^a\mathbf{v}_b$ beschreibt analog dazu die Geschwindigkeit des Punktes b , beschrieben im Bezugssystem Σ_a . Eine Steifigkeitsmatrix ${}^a\mathbf{K}_b$ beschreibt die Steifigkeit im Punkt b bezogen auf das Bezugssystem Σ_a . Eine Steifigkeitsmatrix repräsentiert normalerweise die Steifigkeit eines Objekts, beispielsweise eines Roboters (siehe Berechnungen in Kapitel 6.3.3).

Bei Transformationsmatrizen beschreibt der Index unten links das Ausgangsbezugssystem und der Index oben links das Bezugssystem, in das eine Größe transformiert wird. Eine allgemeine Transformationsmatrix ${}^a_b\mathbf{T}$ transformiert demnach eine Größe vom Bezugssystem Σ_b in das Bezugssystem Σ_a . Da Jacobi-Matrizen (siehe Kapitel 2.2.2) ebenfalls Transformationsmatrizen sind, gilt für sie die gleiche Notation.

2.2.1 Transformation von Position und Orientierung

Die vollständige Beschreibung der Lage eines Objekts in einem dreidimensionalen Raum erfolgt über dessen Position und Orientierung. Die Beschreibung bezieht sich immer auf ein Koordinatensystem als Bezugssystem. Soll das Objekt statt im eigentlichen Koordinatensystem Σ_a in einem anderen Koordinatensystem Σ_b beschrieben werden, ist eine kinematische Transformation notwendig. Diese setzt sich aus einer Translation und einer Rotation zusammen. Die Translation kann über einen Translationsvektor ${}^a\mathbf{p}_b$ beschrieben werden:

$${}^a\mathbf{p}_b = \begin{pmatrix} {}^ap_{b,x} \\ {}^ap_{b,y} \\ {}^ap_{b,z} \end{pmatrix} \quad 2-2$$

Die einzelnen Komponenten des Vektors ${}^ap_{b,x}$, ${}^ap_{b,y}$ und ${}^ap_{b,z}$ beschreiben die Verschiebung in x-, y- und z-Richtung. Die Rotation wird über eine Rotationsmatrix beschrieben:

$${}^a_b\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_b\mathbf{x}_a & \mathbf{y}_b\mathbf{x}_a & \mathbf{z}_b\mathbf{x}_a \\ \mathbf{x}_b\mathbf{y}_a & \mathbf{y}_b\mathbf{y}_a & \mathbf{z}_b\mathbf{y}_a \\ \mathbf{x}_b\mathbf{z}_a & \mathbf{y}_b\mathbf{z}_a & \mathbf{z}_b\mathbf{z}_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad 2-3$$

Die Komponenten der Rotationsmatrix entsprechen den Skalarprodukten der Einheitsvektoren der jeweiligen Koordinatensysteme.

Translation und Rotation lassen sich in einer gemeinsamen Transformationsmatrix kompakt darstellen. Diese homogene 4×4 -Transformationsmatrix setzt sich aus der 3×3 -Rotationsmatrix ${}^a_b\mathbf{R}$, dem 3×1 -Translationsvektor ${}^a\mathbf{p}_b$ und einer vierten Zeile aus Nullen und einer Eins im letzten Element zusammen (Weber 2019, S. 23–25):

$${}^a_b\mathbf{T} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & {}^ap_{b,x} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & {}^ap_{b,y} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & {}^ap_{b,z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^a_b\mathbf{R} & {}^a\mathbf{p}_b \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \quad 2-4$$

Mithilfe der Transformationsmatrix kann ein beliebiger Punkt im Raum von einem Koordinatensystem in ein anderes überführt werden. Mehrere Transformationen können durch die Multiplikation von Transformationsmatrizen durchgeführt werden. Sequenzen von Koordinatentransformationen ermöglichen daher eine einfache Beschreibung von seriellen kinematischen Ketten, wie sie beispielsweise bei Vertikalknickarmrobotern auftreten. (Siciliano & Khatib 2016, S. 12–17; Siciliano et al. 2009, S. 39–84)

Die Berechnung der Endeffektorpose eines Roboters mithilfe der bekannten Gelenkwinkelstellungen der einzelnen Robotergelenke wird als Vorwärtstransformation oder direkte Kinematik bezeichnet. Die n Gelenkkoordinaten q_i der Roboterachsen i können als Vektor \mathbf{q}

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} \quad 2-5$$

zusammengefasst werden. Die Transformation von einem Gelenk zum festen Koordinatensystem des nächsten Gelenks wird durch die Transformationsmatrix ${}^{i-1}_i\mathbf{T}(q_i)$ (für $i=1,\dots,n$) in Abhängigkeit der Gelenkwinkelstellung q_i dargestellt. Die vollständige Transformationsmatrix zur Berechnung der Endeffektorpose im Endeffektorkoordinatensystem Σ_e relativ zum Basiskoordinatensystem Σ_b ergibt sich demnach durch:

$${}^b_e\mathbf{T}(\mathbf{q}) = {}^b_0\mathbf{T}_1(q_1) \cdots {}^{n-1}_n\mathbf{T}(q_n) {}^n_e\mathbf{T} \quad 2-6$$

Die Anzahl der von der Gelenkwinkelstellung abhängigen Transformationen entspricht hierbei der Anzahl der Gelenke n , wobei jedes Gelenk nur einen Freiheitsgrad besitzt. Bei einem Vertikalknickarmroboter handelt es sich bei allen Gelenken um Drehgelenke. ${}^b_0\mathbf{T}$ und ${}^n_e\mathbf{T}$ sind konstante Transformationsmatrizen, die die Transformation des 0-ten Koordinatensystems zum Basiskoordinatensystem und die Transformation vom Endeffektorkoordinatensystem zum letzten Gelenk beschreiben. (Siciliano et al. 2009, S. 58–84)

Die Berechnung der Vorwärtskinematik mithilfe von homogenen Transformationsmatrizen bietet zwar eine kompakte und intuitive Darstellung, ist allerdings nicht recheneffizient, da eine große Anzahl an Multiplikationen erforderlich ist (Siciliano & Khatib 2016, S. 17). In der Robotik hat sich daher die sogenannte Denavit-Hartenberg-Konvention (kurz: DH-Konvention) durchgesetzt (Denavit & Hartenberg 1955). Diese erlaubt es, die Lage eines Koordinatensystems bezüglich eines Referenzsystems mit nur vier statt sechs Parametern zu beschreiben (Weber 2019, S. 36).

Laut der DH-Konvention können zwei benachbarte Koordinatensysteme durch zwei Translationen und zwei Rotationen ineinander überführt werden (siehe Abbildung 2-5) (Weber 2019, S. 37). Daraus ergeben sich vier Parameter zur vollständigen Beschreibung der Transformation:

- θ_i beschreibt den Winkel zwischen x_{i-1} und x_i um die z_{i-1} -Achse
- d_i beschreibt den Abstand zwischen $O_{i'}$ und O_{i-1} , positiv in Richtung von z_{i-1}
- a_i beschreibt den Abstand zwischen O_i und $O_{i'}$, positiv in Richtung x_i
- α_i beschreibt den Winkel zwischen z_{i-1} und z_i um die x_i -Achse

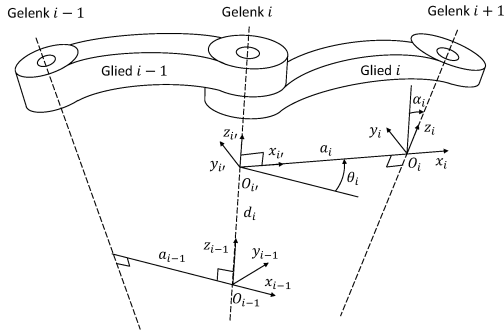


Abbildung 2-5: Überführung von Koordinatensystemen nach DH-Konvention (in Anlehnung an Siciliano et al. 2009, S. 62)

Die Parameter a_i und α_i sind konstant und durch die geometrische Anordnung des i -ten Glieds bestimmt. Bei Drehgelenken entspricht θ_i der Gelenkkordinate q_i und d_i ist konstant. Bei Schubgelenken entspricht d_i der variablen Gelenkkordinate und θ_i ist konstant. Die Transformationsmatrix zwischen dem Koordinatensystem i und $i-1$ in der DH-Konvention kann gemäß

$${}^{i-1}_i\mathbf{T}(q_i) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad 2-7$$

berechnet werden. (Siciliano et al. 2009, S. 61–64)

2.2.2 Transformation von Kräften und Geschwindigkeiten

Analog zur Darstellung der Position und Orientierung eines Objekts in einem gemeinsamen Vektor werden auch Kräfte und Momente sowie Linear- und Winkelgeschwindigkeiten in jeweils einem sechsdimensionalen Vektor zusammengefasst. Die Kräfte und Momente in allen drei Raumrichtungen werden als verallgemeinerter Kraftvektor \mathbf{h} mit

$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{M} \end{pmatrix} = (F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z)^T \quad 2-8$$

bezeichnet. Die Lineargeschwindigkeit $\dot{\mathbf{p}}$ und Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$ bilden den verallgemeinerten Geschwindigkeitsvektor \mathbf{v} mit

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{p}} \\ \boldsymbol{\omega} \end{pmatrix} = (\dot{p}_x \quad \dot{p}_y \quad \dot{p}_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z)^T \quad 2-9$$

ab (Albrichsfeld 1998). Der verallgemeinerte Kraftvektor wird im Englischen auch als „wrench“ und der verallgemeinerte Geschwindigkeitsvektor als „twist“ bezeichnet (Pascali et al. 2022; Erhart & Hirche 2016; Siciliano & Khatib 2016, S. 33). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Begriffe „Kraft“ und „Geschwindigkeit“ stellvertretend für ihre verallgemeinerten sechsdimensionalen Vektoren verwendet.

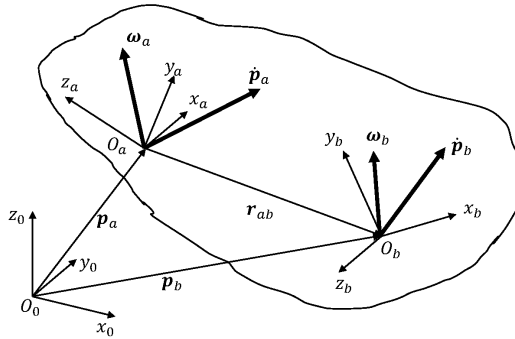


Abbildung 2-6: Linear- und Winkelgeschwindigkeiten in verschiedenen Koordinatensystemen desselben Körpers (in Anlehnung an Siciliano & Khatib 2016, S. 150)

Zur Veranschaulichung der Transformation einer Geschwindigkeit zwischen zwei Koordinatensystemen desselben Körpers kann Abbildung 2-6 betrachtet werden. Der Starrkörper in der Abbildung bewegt sich relativ zum Referenzsystem Σ_0 . Die lineare Geschwindigkeit des Körpers $\dot{\mathbf{p}}_a$ im Koordinatensystem Σ_a ist bekannt. Die Geschwindigkeit $\dot{\mathbf{p}}_b$ im Bezugssystem Σ_b bezogen auf das Referenzsystem Σ_0 kann über

$${}^0\dot{\mathbf{p}}_b = {}^0\dot{\mathbf{p}}_a + {}^0\boldsymbol{\omega}_a \times \mathbf{r}_{ab} \quad 2-10$$

berechnet werden. Für die Winkelgeschwindigkeit ${}^0\boldsymbol{\omega}_b$ gilt:

$${}^0\boldsymbol{\omega}_b = {}^0\boldsymbol{\omega}_a \quad 2-11$$

Dieser Zusammenhang lässt sich auch in Matrixschreibweise als

$$\begin{pmatrix} {}^0\dot{\mathbf{p}}_b \\ {}^0\boldsymbol{\omega}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_3 & -\mathbf{S}({}^a\mathbf{r}_{ab}) \\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{I}_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^0\dot{\mathbf{p}}_a \\ {}^0\boldsymbol{\omega}_a \end{pmatrix} \quad 2-12$$

ausdrücken. Hierfür wird die schiefsymmetrische Matrix S mit

$$S({}^a\mathbf{r}_{ab}) = \begin{pmatrix} 0 & -{}^a r_{ab,z} & {}^a r_{ab,y} \\ {}^a r_{ab,z} & 0 & -{}^a r_{ab,x} \\ -{}^a r_{ab,y} & {}^a r_{ab,x} & 0 \end{pmatrix} \quad 2-13$$

eingeführt. Die schiefsymmetrische Matrix erlaubt es, das Kreuzprodukt des Verbindungsvektors ${}^a\mathbf{r}_{ab}$ als Matrixmultiplikation darzustellen. Damit die Geschwindigkeitsvektoren jeweils im eigenen Bezugssystem angegeben werden können, wird eine zusätzliche Rotationsoperation durchgeführt. Dafür wird die Rotationsmatrix von Σ_b zu Σ_a mit Gleichung 2-12 multipliziert. Die resultierende finale Transformationsgleichung lautet dann:

$$\begin{pmatrix} {}^b\dot{\mathbf{p}}_b \\ {}^b\omega_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^b\mathbf{R} & -{}^b\mathbf{R}S({}^a\mathbf{r}_{ab}) \\ \mathbf{O}_3 & {}^b\mathbf{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^a\dot{\mathbf{p}}_a \\ {}^a\omega_a \end{pmatrix} = {}^b\mathbf{T}_v {}^a\boldsymbol{\nu}_a \quad 2-14$$

Gleichung 2-14 erlaubt demnach die Transformation einer Geschwindigkeit von einem Bezugssystem in ein anderes. Da es sich hier um eine Geschwindigkeitstransformation handelt, wird die Transformationsmatrix \mathbf{T}_v mit einem v im Index dargestellt. Die Transformationsmatrix stellt außerdem eine Jacobi-Matrix dar und wird daher auch als \mathbf{J} geschrieben. Analog hierzu lässt sich auch eine Kraft mit

$$\begin{pmatrix} {}^a\mathbf{F}_a \\ {}^a\mathbf{M}_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^a\mathbf{R} & \mathbf{O}_3 \\ S({}^a\mathbf{r}_{ab}) {}^a\mathbf{R} & {}^a\mathbf{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^b\mathbf{F}_b \\ {}^b\mathbf{M}_b \end{pmatrix} = {}^a\mathbf{T}_f {}^b\mathbf{h}_b \quad 2-15$$

von einem Bezugssystem in ein anderes transformieren. Die Kraft-Transformationsmatrix \mathbf{T}_f lässt sich gemäß

$${}^a\mathbf{T}_f = {}^b\mathbf{T}_v^T = {}^b\mathbf{J}^T \quad 2-16$$

auch über die Jacobi-Matrix der Geschwindigkeit ausdrücken. (Craig 2005, S. 157–158; Siciliano et al. 2009, S. 149–151)

Die Jacobi-Matrix spielt in der Robotik eine zentrale Rolle. Je nach Berechnungsmethode zur Bestimmung der Matrix wird zwischen der analytischen und der geometrischen Jacobi-Matrix unterschieden. Da die analytische Jacobi-Matrix für die vorliegende Arbeit keine Relevanz hat, wird im Folgenden nur noch die geometrische Jacobi-Matrix betrachtet. Mit ihr können die Geschwindigkeiten auf Gelenkebene $\dot{\mathbf{q}}$ in Geschwindigkeiten auf Endeffektorebene ${}^b\boldsymbol{\nu}_e$ transformiert werden. Sie lässt sich als

Kombination von partiellen Ableitungen der Vorwärtskinematikfunktion nach folgender Formel berechnen:

$$\begin{pmatrix} {}^b\dot{\mathbf{p}}_e \\ {}^b\dot{\omega}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial {}^b\mathbf{p}_e}{\partial \mathbf{q}} \\ \frac{\partial {}^b\omega_e}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \end{pmatrix} \dot{\mathbf{q}} = {}^b\mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}. \quad 2-17$$

Mit der geometrischen Jacobi-Matrix kann auch der Zusammenhang zwischen am Endeffektor wirkenden Kräften \mathbf{h}_e und den Gelenkmomenten τ eines Roboters hergestellt werden:

$$\tau = {}^b\mathbf{J}^T(\mathbf{q}) {}^b\mathbf{h}_e. \quad 2-18$$

Die Jacobi-Matrix erlaubt darüber hinaus eine einfache Bestimmung der inversen Kinetik sowie die Analyse von Singularitäten und Redundanzen. (Craig 2005, S. 149–150; Pfeiffer et al. 2008, S. 416; Siciliano et al. 2009, S. 105–148)

2.2.3 Transformation von Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten

In einem dreidimensionalen Raum kann die Steifigkeit eines Objekts als sechsdimensionale Feder mit der 6×6 -Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} ausgedrückt werden. \mathbf{K} erlaubt die Abbildung einer Verschiebung auf eine Kraft mit:

$${}^a\mathbf{h}_b = \mathbf{K} \delta^a \mathbf{x}_b = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_t & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c & \mathbf{K}_o \end{pmatrix} \delta^a \mathbf{x}_b \quad 2-19$$

\mathbf{K} ist symmetrisch und setzt sich aus einer 3×3 -Matrix \mathbf{K}_t für den translatorischen Steifigkeitsanteil, einer 3×3 -Matrix \mathbf{K}_o für den rotatorischen Steifigkeitsanteil und einer sogenannten 3×3 -Kopplungsmatrix \mathbf{K}_c zusammen. Die Inverse der Steifigkeitsmatrix ist die sogenannte Nachgiebigkeitsmatrix $\mathbf{C} = \mathbf{K}^{-1}$. Diese bildet die Kraft auf eine Verschiebung gemäß

$$\delta^a \mathbf{x}_b = \mathbf{C} {}^a\mathbf{h}_b \quad 2-20$$

ab. (Fasse & Breedveld 1998; Siciliano et al. 2009, S. 366)

Eine Steifigkeit ${}^a\mathbf{K}_a$ mit Bezugspunkt a im Bezugssystem Σ_a kann gemäß

$${}^b\mathbf{K}_b = {}^a\mathbf{J}^T {}^a\mathbf{K}_a {}^a\mathbf{J} \quad 2-21$$

bezüglich des Punkts b im Bezugssystem Σ_b beschrieben werden. Die Nachgiebigkeit aC_a kann gemäß

$${}^bC_b = {}^bJ {}^aC_a {}^bJ^T \quad 2-22$$

in bC_b transformiert werden. (Fasse & Breedveld 1998; White et al. 2011)

Mithilfe der Transformationsoperationen lassen sich auch Steifigkeiten bzw. Nachgiebigkeiten der Achsen eines Knickarmroboters im Gelenkwinkelraum als Endeffektorsteifigkeiten bzw. -nachgiebigkeiten im kartesischen Raum beschreiben. Sind die Gelenksteifigkeiten eines 6-Achs-Roboters bekannt, lässt sich für jede Pose des Roboters die Steifigkeit am Endeffektor nach

$$K = J^T K_J J^{-1} \quad 2-23$$

berechnen. K_J ist die Steifigkeitsmatrix im Gelenkwinkelraum. Die Steifigkeitsmatrix ist eine Diagonalmatrix, deren Diagonalelemente den sechs Gelenksteifigkeiten des Roboters entsprechen. Analog dazu lässt sich die Nachgiebigkeit im Gelenkwinkelraum mit

$$C = J K_J^{-1} J^T = J C_J J^T \quad 2-24$$

in die Endeffektornachgiebigkeit transformieren. (Fasse & Breedveld 1998; White et al. 2011; Zhang et al. 2005)

2.3 Kraftregelung von Industrierobotern

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zu mechanisch überbestimmten Systemen wie gekoppelten Robotern vorgestellt. Weiterhin werden die grundlegenden Regelungsstrategien von Kraftregelungen dargelegt, die notwendig sind, um die aus der Überbestimmtheit resultierenden inneren Kräfte zu beherrschen.

2.3.1 Mechanisch überbestimmte Systeme

Als statisch bzw. mechanisch überbestimmte Systeme werden Systeme bezeichnet, bei denen die zur Verfügung stehenden Gleichgewichtsbedingungen, abgeleitet aus der Statik starrer Körper, nicht ausreichen, um alle Lagerreaktionen des Systems zu bestimmen. Der Grad n_c der Überbestimmtheit wird mit

$$n_c = a_c - 3k_{Dim} t_{Obj} \quad 2-25$$

berechnet. a_c beschreibt die Anzahl der Lagerreaktionen, k_{Dim} die Anzahl der Dimensionen und t_{Obj} die Anzahl der betrachteten Körper. Das Produkt aus k_{Dim} und t_{Obj} stellt die Anzahl der Freiheitsgrade dar.



Abbildung 2-7: Beispiel eines überbestimmt gelagerten Balkens im 2D-Raum (in Anlehnung an Meskouris & Hake 2009, S. 44)

Für das in Abbildung 2-7 abgebildete Beispielsystem im zweidimensionalen Raum sind $k_{Dim} = 2$ und $t_{Obj} = 1$. Daraus ergeben sich zwei Freiheitsgrade. Aus der Lagerung des Systems ergeben sich vier Lagerreaktionen. Das Festlager nimmt eine horizontale und eine vertikale Lagerreaktion auf. Die beiden Loslager nehmen jeweils eine weitere vertikale Lagerreaktion auf. Das System ist also einfach überbestimmt. (Meskouris & Hake 2009, S. 43–45)

Bilden zwei Roboter durch Zusammenschaltung eine geschlossene kinematische Kette, entsteht ebenfalls ein überbestimmtes System. Im dreidimensionalen Raum kann jeder Roboter sechs Lagerreaktionen aufnehmen, da die Roboter als Lagertyp einer festen Einspannung entsprechen. Ein Objekt im dreidimensionalen Raum wird über sechs Freiheitsgrade definiert. Diese stehen den insgesamt zwölf Lagerreaktionen der zusammengeschalteten Roboter gegenüber. Ein gekoppeltes Robotersystem bestehend aus zwei Robotern ist daher sechsfach überbestimmt. Die hochgradige Überbestimmtheit des Systems führt zu Verspannungen bzw. inneren Kräften, die wiederum höhere Gelenkbelastungen und Positionsfehler zur Folge haben und die Dynamik des gekoppelten Systems begrenzen (Ye et al. 2023). Eine Regelung der inneren Kräfte kann dem entgegenwirken.

Für die inneren Kräfte gibt es in der Literatur unterschiedliche äquivalente Definitionen. Für die vorliegende Arbeit soll die Definition nach (Bonitz & Hsia 1996) gelten. Innere Kräfte sind demgemäß definiert als diejenigen Endeffektorkräfte, die nicht zur Bewegung des Objekts beitragen.

2.3.2 Indirekte Kraftregelung

Kraftregelungen, auch als Interaktionsregelungen bezeichnet, lassen sich in die indirekte und direkte Kraftregelung unterteilen. Im Folgenden soll zunächst die indirekte Kraftregelung erläutert werden, die auch als nachgiebige Regelung (engl. compliant

control) bekannt ist. Das nachgiebige Verhalten ermöglicht es, den Energietransfer bei Kontakt des Roboters mit seiner Umgebung zu limitieren. Bei der indirekten Kraftregelung wird die Beziehung zwischen Position und Kontaktkraft geregelt. Dies wird als Impedanz bzw. Admittanzregelung bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen Kraft und Position wird durch eine mechanische Impedanz, also ein Feder-Dämpfer-Masse-System, beschrieben. Im dreidimensionalen Fall ergibt sich der Zusammenhang zwischen Kraft und Position gemäß

$$\mathbf{K}_M \Delta \ddot{\mathbf{x}}_{de} + \mathbf{K}_D \Delta \dot{\mathbf{x}}_{de} + \mathbf{K}_K \Delta \mathbf{x}_{de} = \mathbf{h}_e. \quad 2-26$$

$\Delta \mathbf{x}_{de} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e$ entspricht dem Posefehler, der sich aus der Differenz der Endeffektorpose Σ_e und der gewünschten Pose Σ_d , die der Roboter ohne Kontaktkraft einnimmt, ergibt. $\Delta \dot{\mathbf{x}}_{de}$ und $\Delta \ddot{\mathbf{x}}_{de}$ entsprechen den zeitlichen Ableitungen des Posefehlers. \mathbf{h}_e ist die Kontaktkraft am Endeffektor. Das dynamische Verhalten des Roboters wird über die Steifigkeitsmatrix \mathbf{K}_K , die Dämpfungsmatrix \mathbf{K}_D und die Trägheitsmatrix \mathbf{K}_M charakterisiert. (Calanca et al. 2016; Schumacher et al. 2019; Siciliano & Villani 1999; Siciliano & Khatib 2016, S. 197)

Vereinfachte Sonderfälle einer Impedanz- bzw. Admittanzregelung stellen die Steifigkeits- bzw. Nachgiebigkeitsregelung sowie die Dämpfungsregelung dar. Sind Trägheitsmatrix und Dämpfungsmatrix vernachlässigt, spricht man von einer Steifigkeits- (engl. stiffness control) bzw. Nachgiebigkeitsregelung (engl. compliance control). Wird dagegen lediglich die Dämpfung betrachtet, handelt es sich um eine Dämpfungsregelung (engl. damping control). (Schumacher et al. 2019; Siciliano & Khatib 2016, S. 197)

Impedanzregelung

Eine Impedanzregelung als indirekte Kraftregelung erhält Positionswerte als Eingangsinformationen und stellt Kraftwerte als Ausgangsinformationen bereit (siehe Abbildung 2-8). Die Kraftwerte sind in der Regel Stellmomente für die einzelnen Achsen eines Roboters. Solange der Roboter nicht in Kontakt mit seiner Umgebung ist ($\mathbf{h}_e = \mathbf{0}$), folgt der Endeffektor der Soll-Pose asymptotisch. Tritt ein Kontakt auf, verhält sich der Roboter mit dem durch Gleichung 2-26 aufgeprägten Verhalten nachgiebig. Die Kontaktkraft wird dadurch begrenzt. Dies geht allerdings mit einer Abweichung der Pose von der Soll-Trajektorie einher. Die Parametrierung des Impedanzreglers entscheidet über das Verhalten des Roboters sowohl im freien Raum als auch bei Kontakt und Interaktion. Beide Zustände stehen im Zielkonflikt miteinander. Im freien Raum soll der Regler

möglichst robust gegenüber Störungen sein und eine gute Sollwertfolge bieten. Bei Interaktion hingegen ist ein nachgiebiges, kraftbegrenzendes Verhalten erwünscht. (Siciliano & Khatib 2016, S. 201–204)

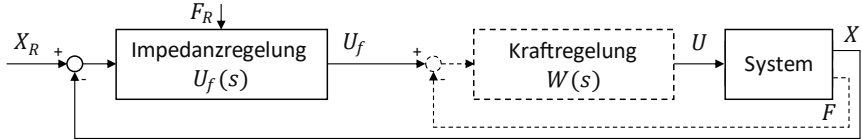


Abbildung 2-8: Konzept der impliziten Impedanzregelung und expliziten Impedanzregelung (gestrichelt) (in Anlehnung an Schumacher et al. 2019)

Zur vereinfachten Parametrierung des Impedanzreglers kann angenommen werden, dass die Steifigkeits-, Dämpfungs- und Trägheitsmatrizen \mathbf{K}_K , \mathbf{K}_D und \mathbf{K}_M diagonal sind. In diesem Fall sind die sechs Komponenten der infinitesimalen Verdrehung und Verschiebung zwischen dem Endeffektor und der Umgebung (beschrieben durch die Umgebungssteifigkeit k_{env}) voneinander entkoppelt. Daher kann das Übergangsverhalten jeder Komponente individuell durch Festlegung einer Eigenkreisfrequenz ω_{ek} und eines Dämpfungsgrads D gemäß

$$\omega_{ek} = \sqrt{\frac{k_K + k_{env}}{k_M}} \quad D = \frac{1}{2} \frac{k_D}{\sqrt{k_M (k_K + k_{env})}} \quad 2-27$$

eingestellt werden. Die Größen k_{env} , k_K , k_D und k_M entsprechen dem jeweiligen Diagonalelement der Matrizen \mathbf{K}_{env} , \mathbf{K}_K , \mathbf{K}_D und \mathbf{K}_M . Aus Gleichung 2-27 ist durch k_{env} ebenfalls der Einfluss der Umgebung auf das Interaktionsverhalten ersichtlich. Für die Ruhelage des Endeffektors gilt:

$$\delta x_{de} = \frac{k_{env}}{k_K + k_{env}} \delta x_{do} + \frac{k_M}{k_K + k_{env}} \gamma. \quad 2-28$$

Die zugehörige Kontaktkraft ergibt sich aus:

$$F = \frac{k_K k_{env}}{k_K + k_{env}} \delta x_{do} - \frac{k_M k_{env}}{k_K + k_{env}} \gamma. \quad 2-29$$

δx_{do} entspricht der infinitesimalen Verdrehung und Verschiebung zwischen der Soll-Pose und der Ruhelage des Endeffektors. Mit γ werden nicht modellierte Einflüsse der Roboterdynamik, beispielsweise die Gelenkreibung, dargestellt. Aus Gleichung 2-28

und 2-29 wird der zuvor erwähnte Zielkonflikt ersichtlich, dass ein gegenüber der Umgebungssteifigkeit k_{env} klein gewähltes k_k einerseits zu einer geringeren Kontaktkraft, andererseits aber auch zu einem größeren Positionsfehler führt. Außerdem wird deutlich, dass auch in der Ruhelage der Positionsfehler sowie die Kraft nicht null werden. (Siciliano & Khatib 2016, S. 201–204)

Admittanzregelung

Ein Admittanzregler erhält umgekehrt zur Impedanzregelung Kraftwerte als Eingangsgröße und liefert Positionswerte als Ausgangsgröße (siehe Abbildung 2-9). Ein solcher Regler besteht aus einer inneren Positionsregelschleife und einer äußeren Kraftregelschleife. Ein Vorteil des Admittanzreglers gegenüber dem Impedanzregler ist die Kompatibilität mit Industrierobotern. Die meisten industriell eingesetzten Roboter nutzen kaskadierte Lageregler und bieten häufig keine Reglerschnittstelle zur direkten Momentenregelung, sondern lediglich zur Lageregelung an. Daher sind Impedanzregelungen an solchen Systemen häufig nicht möglich. (Pott & Dietz 2019, S. 52–53; Siciliano & Khatib 2016, S. 204–205; Spiller 2014, S. 29; Schumacher et al. 2019)

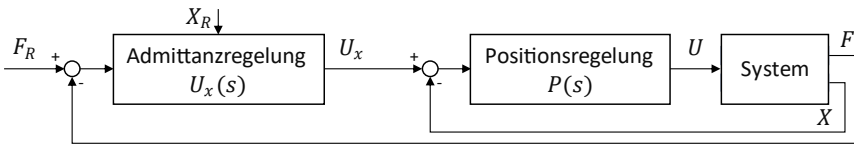


Abbildung 2-9: Konzept der Admittanzregelung (in Anlehnung an Schumacher et al. 2019)

2.3.3 Direkte Kraftregelung

Bei indirekten Kraftregelungen ergibt sich die Kontaktkraft in Abhängigkeit von der Umgebungssteifigkeit. Soll die Kontaktkraft explizit eingestellt werden können, werden direkte Kraftregelungen eingesetzt. (Siciliano & Khatib 2016, S. 378)

Hybride Kraft-Positions-Regelung

Bei der hybriden Kraft-Positions-Regelung werden die Freiheitsgrade des Systems in Unterräume aufgeteilt, die entweder kraft- oder positionsgeregelt werden. In ihrer Bewegung eingeschränkte Freiheitsgrade werden kraftgeregelt. Nicht eingeschränkte Freiheitsgrade werden positionsgeregelt. Mithilfe einer Selektionsmatrix S wird festgelegt, welcher Freiheitsgrad wie geregelt werden soll. Die Selektionsmatrix ist als Diagonalmatrix aufgebaut. Einträge mit einer 1 entsprechen Positionsregelungen. Einträge

mit einer 0 entsprechen Kraftregelungen, da die Selektionsmatrix in der Kraftregelschleife von der Einheitsmatrix E subtrahiert wird. Da ein Freiheitsgrad entweder nur positions- oder nur kraftgeregelt werden kann, sind die Positions- und Kraftregelschleifen voneinander entkoppelt. Die aus dem Positions- und Kraftregler berechneten Drehmomente werden addiert und als Stellgröße an die Roboterachsen weitergegeben. Abbildung 2-10 zeigt das Regelungsschema einer hybriden Kraft-Positions-Regelung. (Raibert & Craig 1981; Schumacher et al. 2019; Siciliano et al. 2009, S. 391–392; Zeng & Hemami 1997)

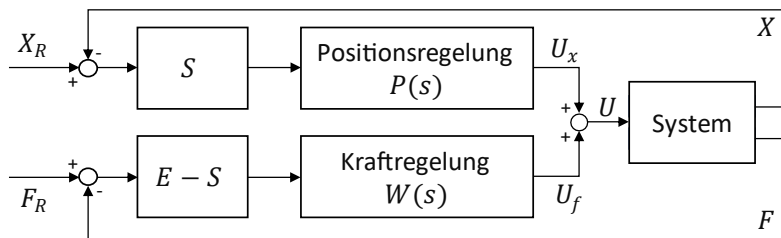


Abbildung 2-10: Konzept der hybriden Kraft-Positions-Regelung (in Anlehnung an Schumacher et al. 2019)

Parallele Kraftregelung

Die parallele Kraftregelung funktioniert analog zur hybriden Kraftregelung nach dem Prinzip, nicht eingeschränkte Freiheitsgrade als Positionssteuerung und eingeschränkte Freiheitsgrade als Kraftregelung zu regeln. Der Unterschied zur hybriden Kraftregelung besteht darin, dass die Kraft- und Positionswerte überlagert werden. Jeder Freiheitsgrad wird daher sowohl kraft- als auch positionsgeregelt betrieben. Abbildung 2-11 zeigt das Regelungsschema eines parallelen Kraftreglers. (Schumacher et al. 2019; Siciliano et al. 2009, S. 382)

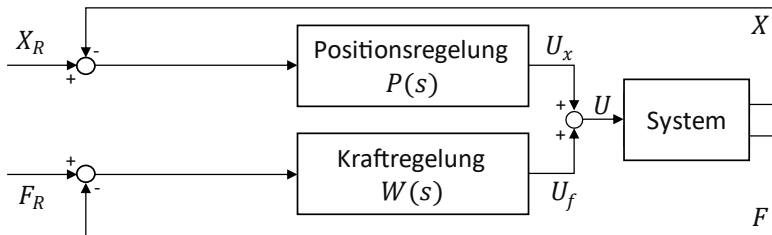


Abbildung 2-11: Konzept der parallelen Kraft-/Positionsregelung (in Anlehnung an Schumacher et al. 2019)

2.4 Kooperation von Robotern

Zur Ermittlung des Forschungsdefizits bei gekoppelten Robotern muss zunächst die Problemstellung der Kopplung weiter eingegrenzt werden. Daher wird zunächst ganzheitlich die Kooperation von Robotern betrachtet und analysiert, welche Herausforderungen bei der Interaktion von Robotern mit ihrer Umwelt, mit dem Menschen und mit weiteren Robotern auftreten (siehe Abbildung 2-12). Es wird untersucht, inwieweit sich diese Herausforderungen und die Lösungsansätze im Stand der Forschung und Technik auf die Kopplung von Robotern übertragen lassen und wie sich die Herausforderungen der Kopplung von Robotern von den vorgestellten Kooperationsformen abgrenzen.



Abbildung 2-12: Übersicht zu Kooperationspartnern von Robotern

2.4.1 Kooperation mit Umwelt und Mensch

Bedingt durch die Großserienproduktion in der Automobilindustrie haben sich Industrieroboter historisch als positionsgesteuerte Maschinen entwickelt und werden größtenteils für Handhabungsaufgaben eingesetzt (Weber 2019, S. 13). Der Einsatz von Robotern in Montage- und Fertigungstätigkeiten erfordert allerdings in der Regel eine stärkere Interaktion der Roboter mit ihrer Umwelt. Kraftgesteuerte Bewegungen von Robotern gewinnen daher zunehmend an Relevanz (Steegmüller & Zürn 2017, S. 36–37). Der essenzielle Aspekt der kraftbasierten Regelung eines Roboters ist die

Bestimmung der Interaktionskräfte, die bei Kontakt des Roboters mit der Umwelt auftreten. Diese werden in der Forschung als Kontaktkräfte bezeichnet. (Winkler 2008) beschäftigt sich mit der sensorbasierten Bestimmung dieser Kontaktkräfte. In der Arbeit werden die Kräfte sowie die Linear- und Winkelbeschleunigungen am Roboterflansch gemessen. Anschließend werden mithilfe der Beschleunigungswerte Trägheitskräfte berechnet und die gemessenen Kräfte um diese Trägheitseffekte bereinigt, um die tatsächlichen Kontaktkräfte zu erhalten. In (Garcia et al. 2005) werden zur Berechnung von Trägheitskräften ebenfalls sensorisch Kräfte und Beschleunigungen gemessen. Mithilfe eines Kalmanfilters werden mit den gemessenen Sensordaten die Kontaktkräfte berechnet. (Song et al. 2020) nutzen einen erweiterten Kalmanfilter an einem Parallelroboter, um Lastparameter zu ermitteln.

Basierend auf der Bestimmung der Kontakt- bzw. Prozesskräfte gibt es in der Forschung eine Vielzahl an Veröffentlichungen zur kraftbasierten Regelung von Robotern. Einen aktuellen Überblick über die Forschungstätigkeiten und die generellen Verfahren der kraftbasierten Regelung liefern (Calanca et al. 2016) und (Schumacher et al. 2019).

Ein großer Anteil der gegenwärtigen Forschungstätigkeiten ist der Domäne der Mensch-Roboter-Kollaboration zuzuordnen (MRK). Im Bereich MRK wird im Forschungsumfeld insbesondere die einfachste Form der Kollaboration mit dem Menschen, nämlich eine Kooperation, betrachtet. Das handgeführte Teach von Robotern mithilfe eines Kraftsensors wird beispielsweise in (Massa et al. 2015) untersucht. In (Rodamilans et al. 2016) wird dieser Ansatz in verschiedenen Bewegungsszenarien mit dem klassischen Teach des Roboters über das Bedienpanel verglichen und eine reduzierte Einteachzeit festgestellt. Die kraftbasierte Regelung wird unter anderem auch zur gemeinsamen kooperativen Ausführung von Tätigkeiten mit Mensch und Roboter eingesetzt. In (Reyes-Uquillas & Hsiao 2021) dient der Roboter als Assistenzsystem, das durch die menschliche Hand entlang einer definierten Bahn geführt wird und gleichzeitig die Bahntreue sicherstellt. Dies wird erreicht, indem der eingesetzte Regler eine Nachgiebigkeit entlang der gewünschten Trajektorie erlaubt und sich in abweichenden Richtungen steif verhält. Ein vergleichbarer Ansatz wird in (Bazzi et al. 2020) verfolgt. Dabei wird die Dämpfung der eingesetzten Admittanzregelung dynamisch angepasst, und zwar abhängig davon, wie groß die Richtungsabweichung zwischen dem ausgeübten Kraftvektor und dem Vektor zwischen Ziel- und Istpunkt ist. Ebenfalls basierend auf einer Admittanzregelung werden in (Haninger et al. 2022) speziell die zusätzlichen Herausforderungen bei hohen Nutzlasten betrachtet. Diese erfordern deutlich

leistungsfähigere Roboter und verlangen daher zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen für den Menschen. Auch der stärkere dynamische Einfluss der Nutzlast muss berücksichtigt werden. Hierfür werden ein zusätzliches Dämpfungsfeedback der Admittanzregelung sowie nachgiebige, weiche Schutzstrukturen, die den Roboter ummanteln, eingesetzt. Unterstützend können bei hohen Nutzlasten auch sensorbasierte Kollisionsüberwachungen eingesetzt werden, die bei Annäherung an den Menschen selbstständig die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters reduzieren oder Kollisionspfade umgehen (Schäfer 2024).

Der aktuelle Entwicklungsstand der MRK-Forschung zeigt einen hohen Reifegrad und häufigen Einsatz von reinen Kooperationstätigkeiten zwischen Mensch und Roboter. Eine tiefgreifendere Kollaboration, die simultane und synchronisierte Aktivitäten am gemeinsamen Objekt erfordert und den komplementären Einsatz der individuellen Fähigkeiten von Mensch und Roboter verlangt, findet in der Regel bisher nur in Ansätzen statt (Wang et al. 2020).

Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Sicherheitsthematik. Die enge Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter erfordert stärkere Sicherheitsmaßnahmen. In der DIN ISO/TS 15066 werden die Sicherheitsanforderungen für die kollaborative Zusammenarbeit mit dem Menschen aufgegriffen. In der Norm werden unter anderem die zulässige Geschwindigkeit, Kraft und übertragene Energie spezifiziert und damit potentielle Schäden durch ungewollte Interaktionen zwischen Mensch und Roboter begrenzt. Obwohl strengere Begrenzungen der zulässigen Geschwindigkeit und Nutzlast von kollaborierenden Robotern (Cobots) die Sicherheit und Akzeptanz der Roboter erhöhen, führen sie gleichzeitig auch zu einer reduzierten Produktivität und beeinträchtigen die Wirtschaftlichkeit von MRK-Produktionsabläufen (Berx et al. 2022).

2.4.2 Kooperation mit weiteren Robotern

Neben der Mensch-Roboter-Kollaboration ist auch die Roboter-Roboter-Kollaboration (RRK) Gegenstand aktueller Forschung. Da hierbei auf die Kooperation mit dem Menschen verzichtet wird, fallen die sicherheitsrelevanten Beschränkungen der Produktivität weg. Gleichzeitig erfordert eine solche Kooperation allerdings einen höheren Synchronisierungsgrad, da der Mensch und seine intuitive Reaktion auf Aktionen des Roboters wegfallen und ein vergleichsweise weniger flexibler, jedoch präziserer zweiter Manipulator zum Einsatz kommt. Für eine RRK ist in der Regel eine Bahn- bzw.

Steuerungstaktsynchronisierung notwendig. Ein typisches Einsatzgebiet von RRK sind Mehrarmroboter und im Speziellen Dual-Arm-Roboter (Smith et al. 2012).

In (Surdilovic et al. 2010) wird eine Nachgiebigkeitsregelung an einem Dual-Arm-Roboter in einer „Peg and Hole“-Aufgabe untersucht. Es ergeben sich deutlich geringere Interaktionskräfte gegenüber der Montage mit Einzelrobotern, da sich beide Arme nachgiebig verhalten können und eine bessere Steuerungsperformance möglich ist. In (Tsarouchi et al. 2014) wird die Performance eines industriellen Dual-Arm-Roboters im Vergleich mit zwei Einzelrobotern am Beispiel der Montage einer Fahrzeugarmatur evaluiert. Der Dual-Arm-Roboter erreicht eine bessere Arbeitsraumausnutzung. Gleichzeitig ist auch die Realisierung von gemeinsamen Aktionen an einem Objekt deutlich einfacher, da die Steuerung des Dual-Arm-Roboters bereits über synchronisierte Bewegungsfunktionen verfügt. In einer weiterführenden Arbeit von (Tsarouchi et al. 2016) konnte außerdem gezeigt werden, dass die maximale Produktivität in der Montage erreicht wird, wenn der Dual-Arm-Roboter den Großteil aller Montagetätigkeiten übernimmt und der Mensch für die verbleibenden hochflexiblen Aufgaben eingesetzt wird.

Im industriellen Einsatz ist in der Regel der Einzelarmroboter mit sechs Achsen zu finden. Die Herausforderungen einer RRK mit diesem Standardroboter werden in (Reinhart & Zaidan 2009) untersucht. Der klassische Industrieroboter besitzt in der Regel keinen Kraftsensor am Flansch und häufig keine oder nur eingeschränkt zugängliche Schnittstellen zur Realisierung von Kraftregelungen. Auch Prozesskräfte als zusätzliche Störgröße spielen hier häufig eine Rolle. Daher ist eine RRK mit klassischen Industrierobotern gegenüber der MRK mit zusätzlichen Herausforderungen verbunden. Der Forschungsbereich der RRK, speziell mit industrietauglichen Robotern, wird in der Literatur auch als „Cooperating Industrial Robots“ (CIR) bezeichnet (Reinhart & Zaidan 2009). Im Rahmen der CIR-Forschungsaktivitäten wurde von (Reinhart & Zaidan 2009) ein Framework für eine werkstückbasierte Trajektorienprogrammierung von zwei kollaborierenden Industrierobotern entwickelt. Aufgrund der steigenden Nachfrage in der Industrie nach CIR-Lösungen gibt es inzwischen auch von allen gängigen Roboterherstellern Synchronisierungslösungen. Mit Roboteam (KUKA Deutschland GmbH 2021) können Roboter des Herstellers KUKA synchronisiert werden. ABB bezeichnet ihr Produkt als MultiMove (ABB 2024). Siemens bietet das Softwarepaket SYMO für seine NC-Steuerung (Numerical Control) an (Siemens AG 2021). Fanuc bietet MultiArm an (Fanuc Robotics America 2012). Bei den genannten Softwarelösungen handelt es sich um eine sogenannte geometrische Kopplung. Dies bedeutet, dass die Positionen,

Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aller Roboter dem Steuerungssystem bekannt sind und über diese Parameter eine Synchronisierung erfolgt.

In (Reinhart et al. 2010) wird eine solche geometrische Kopplung genutzt, um die Vorteile von zwei mechanisch zusammengeschalteten Einzelkinematiken auszunutzen. Die geschlossene kinematische Kette bietet eine höhere Steifigkeit und hat damit wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit. Externe und unerwartete Störungen in Form von Kräften und Momenten werden in der geometrischen Kopplung allerdings nicht erfasst. Die Untersuchungen in der Arbeit zeigen, dass eine geschlossene kinematische Kette in Form einer geometrischen Kopplung nur bedingt funktioniert und dass das Potential für starr gekoppelte Roboter mit einer Kraftüberwachung und -regelung stark vergrößert werden kann.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Interaktion von Robotern mit weiteren Robotern deutlich größeres Potential für komplexere Montage- und Fertigungsaufgaben aufweist als die Interaktion mit einer starren Umgebung. Dies liegt insbesondere an der größeren Bewegungsfreiheit durch den zusätzlichen Roboter und der steuerbaren Nachgiebigkeit, die bei einer starren Umgebung vorgegeben ist. Effektiver und leistungsfähiger werden kooperierende Robotersysteme, wenn sie über ein gemeinsames Steuerungssystem betrieben werden. Daher bietet auch die Industrie inzwischen Kooperationslösungen als Zusatzsoftware an. Diese Systeme können als Ausgangsbasis für die Realisierung von weiteren komplexeren Roboterkollaborationsformen dienen.

Aus der Literatur zur MRK und RRK wird außerdem ersichtlich, dass eine saubere Abgrenzung zwischen einfachen Kooperationsaktivitäten und komplexeren Kollaborationen sinnvoll ist, da beide Formen mit sehr unterschiedlichen Herausforderungen konfrontiert sind. In der Literatur ist diese Trennung nicht konsequent gegeben und die Begrifflichkeiten werden oft miteinander vermischt.

Erste Ansätze zur Abgrenzung der Kollaborationsformen sind in der Forschung, trotz Vermischung der Begrifflichkeiten, bereits früh zu finden (Tzafestas et al. 1998). Tzafestas unterteilt zwischen Klasse-1- und Klasse-2-Robotersystemen. In Klasse-1-Robotersystemen führen die Roboter unabhängig voneinander ihre eigene Aufgabe in einem gemeinsamen Arbeitsraum aus. In Robotersystemen der Klasse 2 kooperieren die Roboter hingegen, um eine gemeinsame Aufgabe zu lösen. Es ist jedoch sinnvoll, eine zusätzliche Klasse für Robotersysteme zu definieren, bei der die Roboter nicht nur eine gemeinsame Aufgabe lösen, sondern auch die Robotertrajektorien exakt miteinander

synchronisiert werden müssen, da hierbei, wie bereits erwähnt, gänzlich andere Herausforderungen betrachtet werden müssen. Diese dritte Kollaborationsklasse soll analog zu (Reinhart et al. 2010; Reinhart & Zaidan 2009) im weiteren Verlauf der Arbeit als Kopplung bezeichnet werden.

2.5 Kopplung von Robotern

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, ist es sinnvoll, eine separate Klasse von Robotersystemen für Aufgaben zu definieren, in denen Robotertrajektorien exakt miteinander synchronisiert werden müssen. Diese separate Klasse wird als Kopplung bezeichnet. Je nach Kopplungsart ergeben sich unterschiedliche Herausforderungen. Im Folgenden soll daher auf die beiden Kopplungsformen der geometrischen und dynamischen Kopplung eingegangen werden. Da dynamische Kopplungen mit einer Kraftwechselwirkung einhergehen, wird der Stand der Forschung und Technik außerdem hinsichtlich Kraftregelungen von dynamischen Kopplungen analysiert. Es werden die Grenzen der bisherigen Lösungen, insbesondere hinsichtlich eines flexiblen Einsatzes von Kopplungen, aufgezeigt. In Ergänzung zur Kraftregelung, die aufgrund der starren Verkettung bei der dynamischen Kopplung notwendig ist, werden ebenfalls adaptive Nachgiebigkeiten in der Roboterkinematik betrachtet.

2.5.1 Kopplungsformen

Die in Kapitel 2.4.2 angesprochene stärkste Form der Kollaboration, die Kopplung, kann sowohl nach der Wechselwirkungsgröße (Position oder Kraft) als auch nach der Wechselwirkungsintensität (hoch oder niedrig) untergliedert werden (Reinhart & Zaidan 2009). Handelt es sich bei der Wechselwirkungsgröße um die Position und/oder Geschwindigkeit, wird dies, wie bereits in Kapitel 2.4.2 beschrieben, als geometrische Kopplung bezeichnet (Reinhart & Zaidan 2009). Geometrische Kopplungen werden häufig eingesetzt, wenn mehrere Roboter synchronisiert, aber als zwei separate kinematische Ketten betrieben werden.

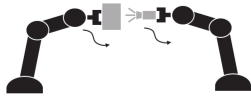


Forschungsarbeiten mit geometrischer Kopplung fokussieren sich häufig, so etwa in (Basile et al. 2013), auf die Vereinfachung der Aufgabenplanung von gekoppelten Systemen. Mithilfe einer zweistufigen Bewegungsplanung werden zuerst die gemeinsame Endeffektortrajektorie und anschließend einzelne Robotertrajektorien im Gelenkwinkelraum ermittelt. Das Robotersystem arbeitet als offene kinematische Kette. In (Ye et al. 2022) wird ein Ansatz zur Aufgabenplanung und Trajektoriengenerierung von zwei

gekoppelten Robotern mit simulativer Optimierung vorgestellt und in einem experimentellen Aufbau validiert. In dem Versuchsaufbau wird eine Blechumformung durch das gemeinsame Drücken beider Roboter auf ein Blech simuliert. Mithilfe einer Kraftmessdose zur Ermittlung der erreichbaren Prozesskraft konnte gezeigt werden, dass das gekoppelte System, insbesondere unter steifigkeitsoptimierter Pose, deutlich höhere Kräfte als ein Einzelroboter aufbringen kann.

Werden die Roboter zu einer geschlossenen kinematischen Kette zusammengeschaltet, entsteht eine kraftbasierte Wechselwirkung (Reinhart & Zaidan 2009). Handelt es sich beim Koppellement um ein nachgiebiges Element, woraus eine niedrige Wechselwirkungsintensität resultiert, wird diese Kraftwechselwirkung oft vernachlässigt und weiterhin eine geometrische Kopplung eingesetzt. Solche Systeme werden als weiche Kopplung bezeichnet und häufig in der Luftfahrtbranche für die Fertigung oder Handhabung großflächiger, biegeschlaffer CFK-Teile verwendet (Eckardt et al. 2016).

Ist die Wechselwirkungsintensität hingegen so hoch, dass die Kraftwechselwirkung eines gekoppelten Robotersystems gemessen und in seiner Regelung berücksichtigt werden muss, wird dies als dynamische Kopplung bezeichnet (Reinhart & Zaidan 2009). Kennzeichnend für diese Form der starren Kopplung ist ein kontinuierlicher Kraftfluss zwischen den Robotern, dessen Einfluss auf die Bewegungsfähigkeit des Robotersystems so groß ist, dass er reguliert werden muss, um die Funktionsfähigkeit des Systems sicherzustellen. Tabelle 2-1 zeigt eine Übersicht der vorgestellten Kopplungsformen.

Tabelle 2-1: Kraftwechselwirkung und Kopplungsformen von gekoppelten Robotern

Skizze	Beschreibung	Kraftwechselwirkung	Lösungsansatz
	Synchrone Bahnbewegung, aber keine geschlossene kinematische Kette	Nicht vorhanden	Geometrische Kopplung
	Geschlossene kinematische Kette mit großflächigem, biegeschlaffem Teil	Vernachlässigbar	Geometrische Kopplung
	Geschlossene kinematische Kette mit starrer Verbindung	Hoch	Dynamische Kopplung

2.5.2 Kraftregelung bei dynamischen Kopplungen

Aufgrund der hohen Kraftwechselwirkung zwischen den Robotern einer dynamischen Kopplung ist eine Regelung der Kräfte notwendig, um die Bewegungsfähigkeit des gekoppelten Systems sicherzustellen. Als Steuerung eines dynamisch gekoppelten Robotersystems wird üblicherweise eine Kraft-/Bewegungs-Regelungsstrategie eingesetzt, bei der die Bewegungssteuerung für die Einhaltung der Bahngenauigkeit und die Kraftregelung für die Regulierung der inneren Kräfte zuständig ist (Siciliano & Khatib 2016, S. 999). Die in der Forschung etablierten Varianten dieser Regelungsstrategie werden unter anderem in (Siciliano & Khatib 2016) und (Calanca et al. 2016) vorgestellt.

Die hybride Regelung der Kraft und Bewegung eines gekoppelten Robotersystems findet beispielsweise in (Sun & Mills 2002) statt. Diese nutzen für die Regelung eine hybride Kraft-/Positionsregelung. Das Robotersystem ist über eine Aluminiumstange gekoppelt, wobei ein Roboter eine starre Verbindung und der andere eine nachgiebige Verbindung zum Koppelobjekt aufweist. Diese zusätzliche Nachgiebigkeit wird durch eine Spiralfeder realisiert und soll sicherstellen, dass die entstehenden inneren Kräfte nicht zu groß werden und zu Beschädigungen der Robotermechanik führen. Weitere Arbeiten zur hybriden Regelung von dynamischen Kopplungen sind unter anderem in (Raibert & Craig 1981) und (Uchiyama & Dauchez 1988) zu finden.

Parallele Kraftregelungen für gekoppelte Roboter sind unter anderem in (Caccavale et al. 1998) und (Caccavale et al. 2000) beschrieben. Hier bilden sich die Stellmomente der Roboterachsen aus der Summe des lagegeregelten Anteils der Lageregelschleife und des kraftgeregelten Anteils der inneren Kräfte. (Hsu 1993) und (Wen & Kreutz-Delgado 1992) verfolgen ebenfalls eine parallele Reglerstruktur. Sie verwenden für die Regelung der inneren Kräfte außerdem einen Integrator. Der Kraftanteil konvergiert daher im stationären Zustand gegen null. Neuere Arbeiten von gekoppelten Robotern mit parallelem Regler sind in (Spiller & Verl 2012) und (Spiller 2014) zu finden. Zwei Industrieroboter sind hierbei über ein Werkstück mit zwei Schnellwechselsystemen gekoppelt. Im Werkstück befinden sich Gummidämpfer, die als Federsystem die auftretenden Kräfte zusätzlich reduzieren. Ziel ist der Transport bzw. die Handhabung des Werkstücks, ohne es durch zu große innere Kräfte zu beschädigen. Das Robotersystem agiert als Master-Slave-System. Ein vergleichbarer Ansatz mit gleichberechtigten Robotern ist in (Albrichsfeld 1998) zu finden.

Auf der in Kapitel 2.4.2 erläuterten Arbeit von (Reinhart et al. 2010) aufbauend wurde die geometrische Kopplung des eingesetzten Robotersystems in (Zaidan 2013) zu einer dynamischen Kopplung mit einer Impedanzregelung, die die Kopplungskräfte kompensiert, erweitert. Das Robotersystem umfasst zwei KUKA-KR6-Industrieroboter, die mit Kraftmomentensensoren und Greifern an jedem Roboterflansch ausgestattet sind. Das System wird über einen Aluminiumquader als Werkstück gekoppelt. Die Programmierung des Systems erfolgt über die Werkstücktrajektorie, aus der die einzelnen Robotertrajektorien ermittelt werden. Bei Bedarf kann die Impedanzregelung auf eine Nachgiebigkeitsregelung reduziert werden. Vergleichbare Ansätze sind bei (Caccavale & Villani 2000) und (Caccavale et al. 2008) zu finden. (Heck et al. 2013) und (Bonitz & Hsia 1996) verfolgen hingegen einen Impedanzansatz, bei dem die inneren Kräfte nicht komplett kompensiert, sondern auf eine Sollvorgabe geregelt werden.

In (Braun et al. 2004) wird eine adaptive Nachgiebigkeit im gekoppelten Robotersystem über einen Fuzzy-Regler realisiert. Das Robotersystem hält mit zwei Greifern eine steife Aluminiumdose und führt lineare Bewegungen aus. Die Messung der inneren Kräfte über einen Kraftmomentensensor zeigt eine Reduzierung von 136 N auf 18 N mithilfe des Reglers.

Eine besondere Form der starren Kopplung wird in (Riedel 2015) beschrieben. Hierbei werden zwei Leichtbauroboter von KUKA nicht über ein Werkstück oder eine separate Einheit, sondern direkt an den Gelenken gekoppelt. Je nach Einsatzzweck kann sich der zweite Roboter an unterschiedliche Gelenke des ersten Roboters koppeln. Die Interaktionskräfte können sowohl über eine Impedanzregelung als auch über eine direkte Kraftregelung gesteuert werden.

Die meisten Arbeiten im Forschungsumfeld verfolgen bei der Kraftregelung den Ansatz, die Nachgiebigkeit durch ein zusätzliches Federelement am TCP zu realisieren. Vereinzelt gibt es allerdings auch Ansätze, bei denen die Nachgiebigkeit direkt in den Roboterjunkten realisiert wird. Diese Nachgiebigkeiten können beispielsweise über einen separaten Aktuator ständig neu eingestellt (Tonietti et al. 2005) oder über den Austausch mechanischer Komponenten angepasst werden (Wolf & Hirzinger 2008). Alternativ realisieren (Perez-Ubeda et al. 2021) eine Nachgiebigkeit ohne zusätzliches Element, indem direkt die Regelungssteifigkeit der Lageregler der einzelnen Achsen eines Roboters angepasst wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine starre dynamische Kopplung von allen Kollaborationsformen die größten Herausforderungen mit sich bringt. Gleichzeitig bietet diese Form auch das größte Potential hinsichtlich einer Steifigkeitssteigerung. In den meisten Fällen wird das zu manipulierende Werkstück selbst als Kopplungselement verwendet. Die vorgestellten Arbeiten sind damit als werkstückspezifische Lösungen nicht für einen universellen Handhabungseinsatz oder den Einsatz in Fertigungs-szenarien geeignet. Die wesentliche Herausforderung der dynamischen Kopplung ist die Verarbeitung der durch das Schließen der kinematischen Kette auftretenden inneren Kräfte. Im Forschungsumfeld haben sich hierfür kraftbasierte Regelungsstrategien, insbesondere hybride und parallele Kraft-/Lageregler, Impedanzregler sowie Nachgiebigkeitsregler auf Basis von am Roboterflansch angebrachten Kraftsensoren etabliert. Trotz der aktiven Kraftregelung greifen die meisten Ansätze auf eine zusätzliche passive Nachgiebigkeit in der kinematischen Kette zurück, die die auftretenden inneren Kräfte generell reduziert. Damit werden sowohl die Spannungen im Werkstück als auch die Belastungen der Robotermechanik, gleichzeitig allerdings auch die Steifigkeitssteigerung und Genauigkeit reduziert. Abbildung 2-13 zeigt den typischen Aufbau einer dynamischen Kopplung aus den vorgestellten Arbeiten.

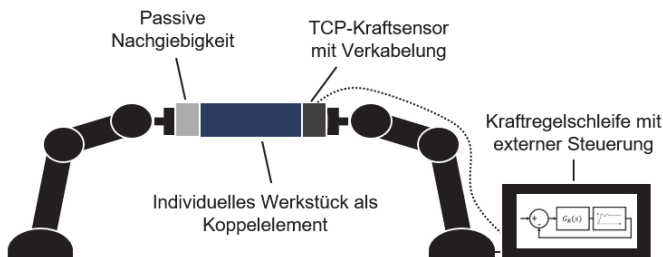


Abbildung 2-13: Aufbau und Komponenten einer dynamischen Kopplung

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Begriff der Kopplung als Synonym für die starre dynamische Kopplung verwendet. Die für die Arbeit konkret geltende Definition des Begriffs lautet wie folgt:

Zwei oder mehr Roboter werden als miteinander dynamisch gekoppelt bezeichnet, wenn eine Kraftwechselwirkung über ein oder mehrere mechanische Glieder zwischen den Robotern stattfinden kann und der Einfluss der Wechselwirkung zu groß ist, um ihn für einen zuverlässigen Betrieb des gekoppelten Systems vernachlässigen zu können.

2.6 Bewertung des Stands der Forschung und Technik

In diesem Kapitel erfolgen die Zusammenfassung des Stands der Forschung und Technik und die Ableitung der Forschungsdefizite.

2.6.1 Zusammenfassung und Fazit zum Stand der Forschung und Technik

Historisch bedingt werden klassische Industrieroboter in der Industrie vor allem als Positioniersteuerung eingesetzt. Komplexere Interaktionen mit der Umgebung, die einen effizienteren Einsatz in der Montage und Fertigung ermöglichen, verlangen allerdings nach kraftbasierten Ansätzen. Hierfür ist es erforderlich, die Kontaktkräfte, die bei der Interaktion von Robotern mit ihrer Umgebung entstehen, zu bestimmen und zu regeln. In der Forschung wird sowohl die rein sensorische Bestimmung als auch die Kombination von sensorisch und analytisch ermittelten Kontaktkräften gezeigt. Hierfür werden Kraft- und Beschleunigungssensoren verwendet. Die ermittelten Kontaktkräfte dienen als Input für kraftbasierte Regelungsansätze, die im gegenwärtigen Stand der Forschung vor allem im Bereich der MRK zu finden sind. Impedanz-, Admittanz- sowie nachgiebigkeitsbasierte Regelungsstrategien haben sich hier als vielversprechende Lösung erwiesen.

Der Stand der Forschung zeigt außerdem, dass es sich bei den MRK-Forschungsarbeiten im Wesentlichen um Kooperationen handelt. Komplexere Kollaborationsformen stellen gegenwärtig weiterhin eine Nische dar. Ein wesentliches Hindernis für die Etablierung der MRK in der Industrie sind Sicherheitsanforderungen. Aufgrund der direkten Interaktion mit dem Menschen werden hohe Anforderungen an dessen Sicherheit und Schutz gestellt. Normen und Leitfäden zum Umgang hierzu befinden sich aktuell im Etablierungs- bzw. Entstehungsprozess. Diese begrenzen zulässige Geschwindigkeiten, Kräfte und Energien und schränken damit die Produktivität solcher Systeme deutlich ein. Daraus folgen die aktuell sichtbare geringe Akzeptanz und Verbreitung von Cobots in der Industrie.

Bei der direkten Kooperation und Kollaboration zwischen Robotern fallen die genannten Produktivitätseinschränkungen weg. Gleichzeitig ergeben sich allerdings weitere Herausforderungen, da kleinere Abweichungen des Roboters von seiner Aufgabe nicht mehr durch die flexible Reaktion des Menschen kompensiert werden können. Die RRK stellt daher höhere Anforderungen an die Synchronisierung der Manipulatoren. In der Forschung findet die RRK beispielsweise in Form von Dual-Arm-Robotern Anwendung.

Aus der wissenschaftlichen Literatur wird ersichtlich, dass die Synchronisierung mehrerer Roboter untereinander durch eine gemeinsame Steuerung deutlich vereinfacht werden kann.

In der Industrie werden hauptsächlich industrielle 6-Achs-Vertikalknickarmroboter eingesetzt, die bei der Synchronisation besondere Herausforderungen gegenüber Cobots mit sich bringen. Industrieroboter haben in der Regel keine integrierte Kraftsensorik und nur eingeschränkt verfügbare Schnittstellen zur Kraftregelung. Dass der Bedarf an RRK auch in der Industrie wächst, hat dazu geführt, dass inzwischen flächendeckend auch industrielle Synchronisierungslösungen verfügbar sind. Die Synchronisierung erfolgt allerdings nur durch den Austausch von Positions- und Geschwindigkeitsdaten, was als geometrische Kopplung bezeichnet wird.

Die komplexeste Form der Kollaboration, bei der beide Roboter eine geschlossene kinematische Kette bilden, erfordert hingegen in den meisten Fällen eine dynamische Kopplung. Hierbei werden auch Kraftinformationen ausgetauscht, um die im überbestimmten gekoppelten System entstehenden inneren Kräfte zu regulieren. Das Schließen der kinematischen Kette erfolgt in den Forschungsarbeiten über ein zusätzliches Element, meist das zu handhabende Werkstück. Separate Koppellemente, die unabhängig vom betrachteten Prozess und Werkstück eingesetzt werden können, werden nicht untersucht. Auch die Einwirkung von Prozesskräften aus Fertigungsprozessen bleibt unberücksichtigt, da sich die Forschungsarbeiten ausschließlich mit Handhabungsoperationen befassen.

Zur Regelung der inneren Kräfte haben sich hybride und parallele Kraft-/Lageregler sowie Impedanz-, Admittanz- und Nachgiebigkeitsregler etabliert. Die Regelungen nutzen auf dem Roboterflansch angebrachte Kraftsensoren als Sensorinput. Trotz des Einsatzes der Kraftregelung sind in den Arbeiten mit geschlossener kinematischer Kette und steifem Kopplungselement zusätzliche Federn integriert. Diese begrenzen die mögliche Dynamik und Genauigkeit, sind aber notwendig, da die Kraftregelung die inneren Kräfte allein nicht mit ausreichender Dynamik kompensieren kann. Vereinzelt sind auch Ansätze zu finden, die die zusätzliche Nachgiebigkeit über die Regelungssteifigkeit der Roboterachsen realisieren.

Bei Betrachtung der vorgestellten Arbeiten wird ersichtlich, dass sich die Forschung zur Kopplung von Robotern hauptsächlich mit den bereits in (Kurfess 2005, S. 404) identifizierten Kernfragen beschäftigt:

- Wie greife ich das Objekt?
- Wie wird die Bewegung des Objekts erzeugt?
- Wie wirken sich innere Kräfte und Momente auf das Objekt aus?
- Wie verteilt sich die Last des Objekts auf die Roboter?

Die vorgestellten Forschungsarbeiten betrachten eine oder mehrere dieser Kernfragen. Eine ganzheitliche, anwendungsnahe Betrachtung, die nicht nur die Kopplung und Synchronisierung umfasst, sondern auch Prozesskräfte, die Realisierbarkeit bei Industrierobotern und den Einsatz in Fertigungsszenarien berücksichtigt, findet nicht statt. Da nur Handhabungsoperationen betrachtet werden, spielen die erreichbare Positions- und Bahngenauigkeit nur eine untergeordnete Rolle, obwohl diese für die Fertigungsqualität maßgeblich sind. Weiterhin ist der universelle Einsatz der dargestellten Kopplungslösungen nicht gegeben, da das Werkstück selbst als Koppelement dient und die Lösungen auf die Form und die mechanischen Eigenschaften des jeweiligen Werkstücks zugeschnitten sind. Die vorgestellten Ansätze stellen daher werkstückspezifische Lösungen dar und sind weder mit beliebigen Handhabungsprozessen noch mit Fertigungsprozessen kombinierbar.

2.6.2 Defizite im aktuellen Stand der Forschung und Technik

Aus den vorgestellten Arbeiten und hergeleiteten Grenzen der dargestellten Kopplungslösungen lassen sich drei konkrete Defizite im Stand der Forschung und Technik identifizieren:

- Es existiert keine generell einsetzbare Kopplung, die unabhängig vom Prozess und Werkstück eine gekoppelte Ausführung des Prozesses erlaubt.
- Es existiert kein prozessunabhängiger Ansatz zur Minimierung der aus dem überbestimmten System hervorgehenden inneren Kräfte und Momente.
- Es existieren keine systematischen Untersuchungen der erreichbaren Steifigkeiten und Genauigkeiten von gekoppelten Systemen im Vergleich zu einzelnen Robotern.

Eine systematische Entwicklung, Untersuchung und Wissensgenerierung einer Kopplungslösung unter Berücksichtigung der genannten Defizite kann das gegenwärtige

Potential von gekoppelten Robotersystemen steigern und den Transfer in die Anwendung deutlich beschleunigen. Die Vorteile eines solchen gekoppelten Systems umfassen unter anderem eine erhöhte Systemsteifigkeit, eine Prozesskrafteerhöhung sowie die Möglichkeit der Lastteilung (engl. load sharing). Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht in der Homogenisierung der Steifigkeit im Arbeitsraum des gekoppelten Robotersystems. In der Regel kann die TCP-Steifigkeit eines Einzelroboters in Abhängigkeit seiner Pose um bis zu zwei Größenordnungen schwanken (Siemens AG & Comau 2019). In (Mühlbeier et al. 2021) konnte simulativ anhand eines dreifach gekoppelten Robotersystems nachgewiesen werden, dass neben der generellen Steifigkeitserhöhung insbesondere auch die Posenabhängigkeit der Steifigkeit des gekoppelten TCPs deutlich reduziert wird.

3 Zielsetzung und Lösungsansatz

In diesem Kapitel wird basierend auf den im vorangegangenen Kapitel identifizierten Forschungsdefiziten die finale Zielsetzung der vorliegenden Arbeit abgeleitet. Diese wird anschließend in drei Teilziele zerlegt, auf deren Basis der Lösungsansatz und die Vorgehensweise abgeleitet werden.

3.1 Zielsetzung

Abgeleitet aus den in Kapitel 2.6.2 identifizierten Forschungslücken ergibt sich folgende Gesamtzielsetzung:

Die wissenschaftliche Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines mechatronischen Koppelsystems, das eine prozessunabhängige, kraftgeregelte, synchronisierte und starre Kopplung von zwei Robotern ermöglicht. Die Funktionsfähigkeit des Systems soll mittels Validierungsversuchen nachgewiesen werden.

Aus der Gesamtzielsetzung lassen sich drei Teilziele ermitteln, die sich an den drei konkreten Defiziten aus Kapitel 2.6.2 orientieren:

Teilziel 1

Entwicklung eines prozessunabhängigen, generell einsetzbaren Koppelmoduls, das eine starre Kopplung erlaubt und die gekoppelte Ausführung von Fertigungsprozessen ermöglicht.

Teilziel 2

Entwicklung und Implementierung eines prozessunabhängigen Algorithmus zur Bestimmung der inneren Kräfte/Momente und einer darauf aufbauenden kraftgeregelten Synchronisierung der gekoppelten Roboter.

Teilziel 3

Charakterisierung der statischen Steifigkeit und Genauigkeit des gekoppelten Systems und Bewertung der Ergebnisse im Vergleich mit einzelnen Robotern.

Die Dissertation soll einen Beitrag dazu leisten, die Barriere zur Realisierung von gekoppelten Robotern zu senken sowie den Reifegrad der Technologie zu erhöhen und damit mittelfristig auch die Einführung der Technologie im industriellen Umfeld zu

beschleunigen. Um dies zu gewährleisten, soll die Lösung nicht in einer Laborumgebung mit realitätsfernen Randbedingungen, sondern mit industrieüblicher Hardware realisiert werden.

3.2 Lösungsansatz

Zur Erreichung der Zielsetzung soll im Folgenden die Vorgehensweise zur Erarbeitung der Teilziele sowie die Integration der resultierenden Ergebnisse in ein Gesamtsystem erläutert werden. Eine schematische Darstellung der Vorgehensweise ist in Abbildung 3-1 zu finden.

Für das zu entwickelnde mechatronische Kopplungssystem erfolgt zunächst in Kapitel 4 eine Anforderungsanalyse. Es werden die Anforderungen an das Kopplungssystem identifiziert und anschließend Teilsysteme der Kopplung abgeleitet. Entsprechend den identifizierten Anforderungen und Teilsystemen der Kopplung wird eine Roboterzelle als Testumgebung für die Kopplung vorgestellt.

Anschließend erfolgt zur Erfüllung des ersten Teilziels die systematische Entwicklung des mechatronischen Koppelmoduls in Kapitel 5. Hierfür werden Anforderungen an das Koppelmodul abgeleitet, Teillösungen entwickelt und anschließend das Gesamtsystem entworfen und als Prototyp hergestellt.

Zur Erarbeitung des zweiten Teilziels erfolgt in Kapitel 6 die Modellierung und echtzeitfähige Regelung der inneren Kräfte. Zunächst werden die Anforderungen an das Kraftregelungssystem definiert. Daraus werden die Anforderungen an die Steuerungsarchitektur abgeleitet sowie die notwendigen Schnittstellen zur echtzeitfähigen Kommunikation zwischen dem Regler und den Robotern entwickelt und in die Steuerungsarchitektur integriert. Anschließend erfolgt die detaillierte Ausarbeitung des Reglers, beginnend mit der Festlegung der Regelungsstrategie. Es folgt die Modellierung des inneren Spannungszustands und der Steifigkeit des gekoppelten Systems. Der Regler wird initial parametrisiert und es werden experimentelle Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt, um die finale Parametrierung festzulegen.

Zur Erfüllung des letzten Teilziels wird in Kapitel 7 abschließend eine Charakterisierung des gekoppelten Systems hinsichtlich der statischen Steifigkeit und Genauigkeit vorgenommen. Hierfür werden systematisch Versuchspläne für die Bestimmung der Steifigkeiten und Genauigkeiten nach Prinzipien der Versuchsmethodik gestaltet. Die Messmethoden sowie das Messequipment werden ausgewählt und in die Roboterzelle

integriert. Unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Faktoren und Faktorstufen werden Versuchsreihen durchgeführt und aus den Ergebnissen die Steifigkeiten und Genauigkeiten des gekoppelten Systems bestimmt. Für einen direkten Vergleich unter gleichen Bedingungen werden die Versuche auch für einen einzelnen Roboter durchgeführt und ebenfalls Steifigkeiten und Genauigkeiten ermittelt. Es folgen die Auswertung der Daten, der Vergleich mit dem einzelnen Roboter und die Bewertung der Eigenschaften und des Potentials des gekoppelten Systems.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit wird eine erste qualitative Bewertung der Eigenschaften und Potentiale von gekoppelten Systemen verfügbar.

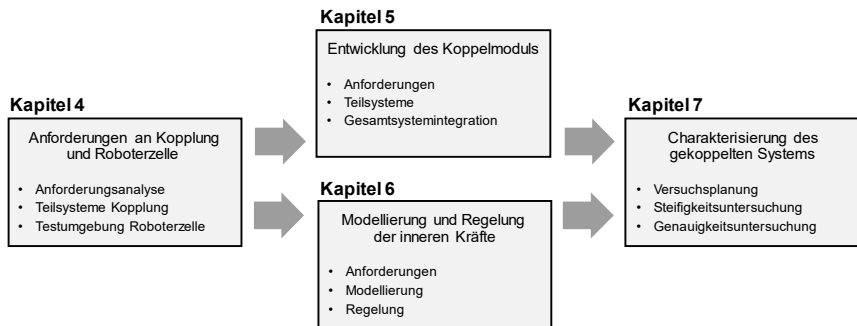


Abbildung 3-1: Vorgehensweise bei der Arbeit

4 Anforderungen an die Kopplung und Aufbau der Roboterzelle

Bevor die Entwicklung des Kopplungssystems erfolgen kann, ist zunächst eine Anforderungsanalyse erforderlich. Mithilfe der FAST-Methode nach VDI 2803 werden die Anforderungen an das Kopplungssystem hergeleitet und daraus die Teilsysteme mit ihren Systemgrenzen abgeleitet, die schließlich in den Hauptkapiteln 5 und 6 erarbeitet werden.

Aufgrund der speziellen Anforderungen des Kopplungssystems hinsichtlich Mechanik, Schnittstellen und Steuerungstechnik wird eine eigene Testumgebung für die Kopplung benötigt. Basierend auf den mechanischen und steuerungstechnischen Anforderungen des Kopplungssystems wurde im Rahmen dieser Arbeit eine eigene Roboterzelle als Testumgebung entwickelt. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Entwicklung der Kopplungslösung liegt, wird auf die Vorstellung des Entwicklungsprozesses verzichtet und lediglich der Aufbau und die Teilsysteme der finalen Roboterzelle in diesem Kapitel vorgestellt.

4.1 Anforderungen an die dynamische Kopplung

Vor der Entwicklung des Kopplungssystems müssen zunächst die Anforderungen an die dynamische Kopplung von Robotern geklärt werden. Hierfür wird eine FAST-Analyse durchgeführt (siehe Abbildung 4-1). Mit der FAST-Analyse nach VDI 2803 wird die Gesamtfunktion der dynamischen Kopplung von Robotern systematisch in die einzelnen Basisfunktionen zerlegt. Anhand der Basisfunktionen wird sichtbar, welche elementaren Fähigkeiten für die Kopplung der Roboter notwendig sind.

Um die dynamische Kopplung zwischen den Robotern zu realisieren, muss einerseits ein Kraftfluss zwischen den Robotern ermöglicht werden und andererseits eine Kompensation der durch die Kopplung auftretenden Verspannungen gegeben sein. Der Kraftfluss basiert auf der Kraftübertragung zwischen den Robotern mittels eines mechanischen Elements. Daraus leitet sich die Basisfunktion der mechanischen Verbindung beider Roboter ab. Als zusätzliche Parallelfunktion muss über die Verbindung auch die Übertragung von Informationen und Energie möglich sein, damit zukünftig angeschlossene Endeffektoren betrieben werden können. Daraus leitet sich die Basisfunktion einer Schnittstelle zur Informations- und Energieübertragung ab.

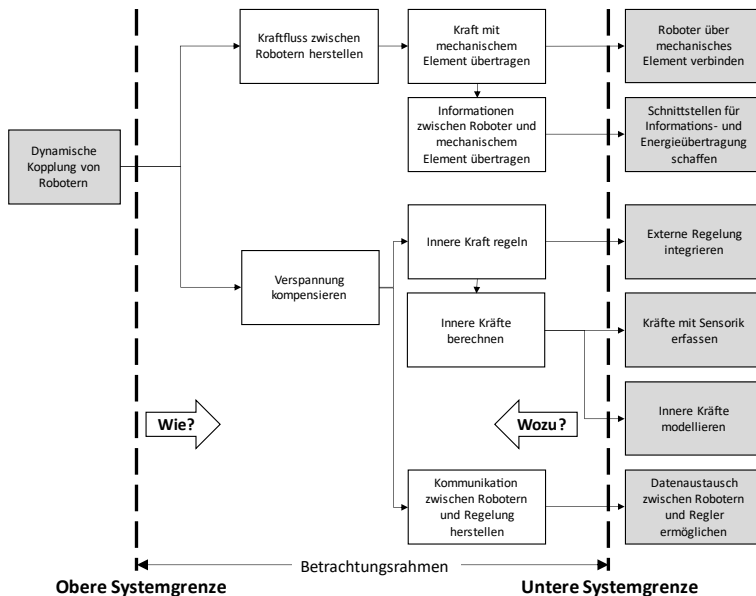


Abbildung 4-1: FAST-Diagramm zur Herleitung der Anforderungen an das Kopplungssystem

Um die Verspannung der gekoppelten Roboter zu kompensieren, muss die innere Kraft geregelt werden. Hierfür müssen zunächst die Kräfte im System erfasst und die inneren Kräfte berechnet werden. Aus diesen Anforderungen ergeben sich die Basisfunktionen der Kräfteerfassung mit Sensorik, der Modellierung der inneren Kräfte und der Integration eines Kraftreglers. Zusätzlich ist als Parallelfunktion die Kommunikation zwischen dem Kraftregler und den Robotern erforderlich, woraus sich die Basisfunktion eines ständigen Datenaustauschs zwischen den Robotern und dem Regler ableitet.

Aus den Fähigkeitsanforderungen an die dynamische Kopplung lassen sich die Teilsysteme des Kopplungssystems herleiten (siehe Abbildung 4-2). Als Kopplungssystem wird dabei die gesamte technische Lösung zur Durchführung von gekoppelten Fertigungsprozessen mithilfe von zwei Robotern bezeichnet. Dieses System beinhaltet das Koppelmodul für die mechanische Kopplung einschließlich Sensorik und die Verspannungskompensation für die steuerungstechnische Kopplung einschließlich Modellierung und Regelung der inneren Kräfte. Nachfolgend sollen die Komponenten und Systemgrenzen des Koppelmoduls und der Verspannungskompensation erläutert werden.

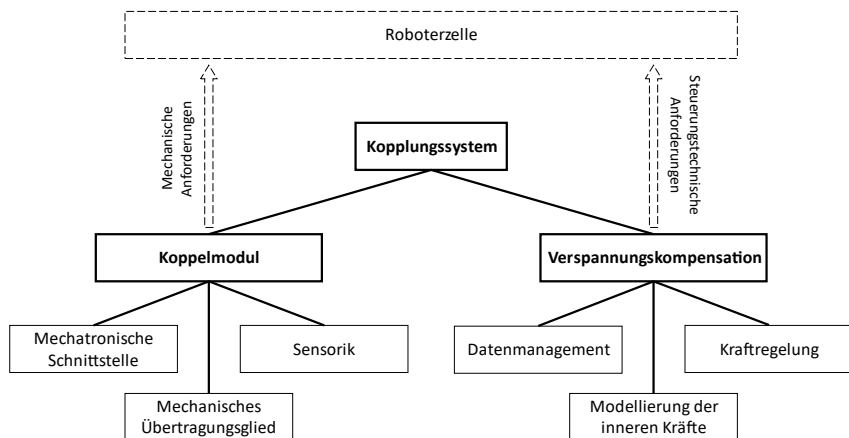


Abbildung 4-2: Teilsysteme des Kopplungssystems

4.2 Teilsystem Koppelmodul

Das Koppelmodul beinhaltet sowohl das physische Glied, das die starre mechanische Verbindung der Roboter herstellt, als auch die integrierte Sensorik für die Kraftregelung. Die Systemgrenzen des Koppelmoduls umfassen nicht nur das temporär verbindende Glied zwischen den Robotern, sondern auch die dauerhaft an den Roboterflanschen angebrachten mechatronischen Schnittstellen (siehe Abbildung 4-3). Die Sensorik kann sowohl in den mechatronischen Schnittstellen als auch im verbindenden Glied des Koppelmoduls integriert sein. Die Vor- und Nachteile der Anordnung der Sensorik werden in Kapitel 5.2.1 beschrieben. Die Entwicklung des Koppelmoduls wird in Kapitel 5 erläutert.

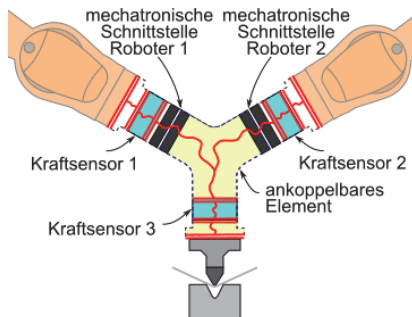


Abbildung 4-3: Teilsysteme des Koppelmoduls

4.3 Teilsystem Verspannungskompensation

Zur Verspannungskompensation müssen drei Funktionen bereitgestellt werden. Zunächst müssen dem Regler Kraftdaten zur Berechnung der inneren Kraft und Positionsdaten zur Bestimmung der Steifigkeit des Robotersystems zur Verfügung gestellt werden. Die Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung der benötigten Daten werden als Datenmanagement zusammengefasst. Als zweite Funktion folgt die Modellierung der inneren Kräfte des Systems. Der Kraftregler bildet die dritte Funktionalität zur Verspannungskompensation ab. Der Prozessablauf wird in Abbildung 4-4 dargestellt. Die Entwicklung der Funktionen der Verspannungskompensation wird in Kapitel 6 erläutert.



Abbildung 4-4: Schematischer Prozessablauf zur Verspannungskompensation der Roboter

4.4 Aufbau der Roboterzelle

Das Robotersystem stellt die Infrastruktur dar, die von der vorliegenden Forschungsarbeit genutzt wird. Es umfasst die Roboter, die Robotersteuerungen sowie das Sicherheitssystem und gibt damit mechanische und steuerungstechnische Randbedingungen für das Kopplungssystem vor. Die mechanischen Randbedingungen resultieren aus den eingesetzten Robotern. Sie geben das dynamische Verhalten der Roboter vor, begrenzen zulässige Massen sowie Prozesskräfte und definieren die mechanische Schnittstelle am Flansch. Weiterhin wird der für das gekoppelte System erreichbare Arbeitsraum durch die kinematische Struktur der Roboter und deren relative Positionierung zueinander festgelegt.

Steuerungstechnische Randbedingungen werden im Wesentlichen durch die Robotersteuerung vorgegeben. Die verfügbaren Schnittstellen für das Kraftmodell des Koppelmoduls sind von der Steuerung abhängig. Auch die Kommunikations- bzw. Netzwerkarchitektur sowie die Möglichkeiten zur Integration von Sensoren in die Architektur sind von der Steuerung abhängig.

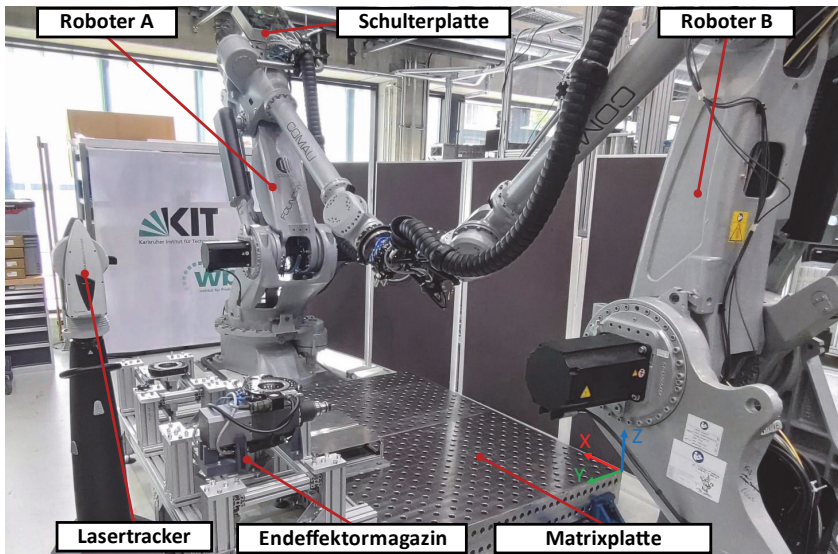


Abbildung 4-5: Roboterzelle und Teilsysteme

Entsprechend den mechanischen und steuerungstechnischen Anforderungen des Kopplungssystems wird die Roboterzelle entworfen und aufgebaut. Abbildung 4-5 zeigt die Roboterzelle. Sie ist als flexibles Design ausgelegt und basiert auf dem Konzept der Wertstromkinematik (Mühlbeier et al. 2021). Die Roboter dienen als Universalmaschinen und sollen alle Prozesse von der Handhabung bis zur Fertigungstechnik übernehmen. Eingesetzt werden zwei Comau NJ290-3.0 mit einer maximalen Nutzlast von 290 kg und 3 m Reichweite. Es handelt sich um Vertikalknickarmroboter mit sechs Achsen. Achse 2 und 3 sind über eine Schwinge miteinander gekoppelt. Dies muss bei der Vorwärts- und Rückwärtstransformation berücksichtigt werden. Die Roboter sind mit einem Abstand von 4250 mm von Turmachse zu Turmachse platziert. Auf den Roboterschultern befinden sich jeweils eine SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) S7-1215 von Siemens, eine Ventilinsel zur Steuerung der Pneumatik am Endeffektor und Halterungen für die Kabelführung von der Schulter zum Flansch (siehe Abbildung 4-6 links). An den Flanschen sind jeweils ein Kraft-Moment-Sensor von HBK (MCS10-100-6C) mit sechs Freiheitsgraden (6-DOF) und ein Schnellwechselsystem SWS-160 von Schunk integriert (siehe Abbildung 4-6 rechts). Das Schnellwechselsystem enthält diverse Durchführmodule für die Weitergabe von Druckluft und weiteren Fluiden, Leistungsströmen, Steuerströmen, Busleitungen sowie Sensordaten.

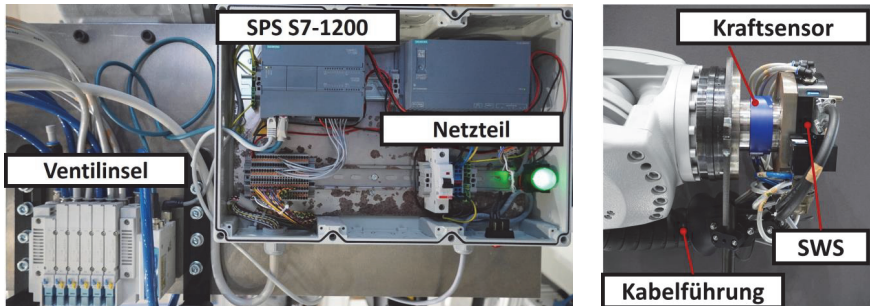


Abbildung 4-6: Roboterschulterplatte (links) und Roboterflansch (rechts)

Die Roboter werden mit einer Sinumerik-One-NC-Steuerung von Siemens betrieben. Beide Roboter sind an eine Steuerung angeschlossen und werden über eine gemeinsame Interpolation und Bahnplanung bewegt. Diese von Siemens als „Synchronized Motion“ bezeichnete Funktion erfüllt den Zweck einer geometrischen Kopplung, also einer Sollwert-Synchronisation. Die NC-Steuerung enthält eine integrierte S7-1500 SPS zur Steuerung der Logikschaltung und eine zusätzliche ET200SP-Baugruppe zur Integration weiterer Peripherie.

Die Arbeitsfläche zwischen den Robotern ist mit einer Bodenplatte mit einem Raster aus äquidistant angeordneten Befestigungsbohrungen ausgestattet. Auf dieser im Folgenden als Matrixplatte bezeichneten Platte können Vorrichtungen mithilfe von Schnellspannbolzen mit hoher Genauigkeit positioniert werden (siehe Abbildung 4-7 links). Dies erlaubt bei einem Wechsel der durchzuführenden Anwendung in der Roboterzelle einen schnellen Austausch der benötigten Vorrichtungen sowie eine wiederholgenaue Positionierung der Vorrichtungen im Arbeitsbereich. Wie in Abbildung 4-5 dargestellt, dient eine Ecke der Matrixplatte als Ursprung des Welt-Koordinatensystems (Welt-KOS) der Roboterzelle.

Ein Magazinsystem ermöglicht den Robotern das automatisierte Aufnehmen und Wechseln von Endeffektoren und damit die Anpassung an den gewünschten Prozess (siehe Abbildung 4-7 rechts). Die Endeffektoren sind mit Schnellwechseladaptern ausgestattet und können daher automatisch über Druckluft mit den Robotern verbunden werden. Die Aufnahmen der Endeffektoren sind schwimmend gelagert, wodurch bei Aufnahme bzw. Ablage eines Endeffektors eine automatische Zentrierung aufgrund der Gewichtskraft erfolgt.

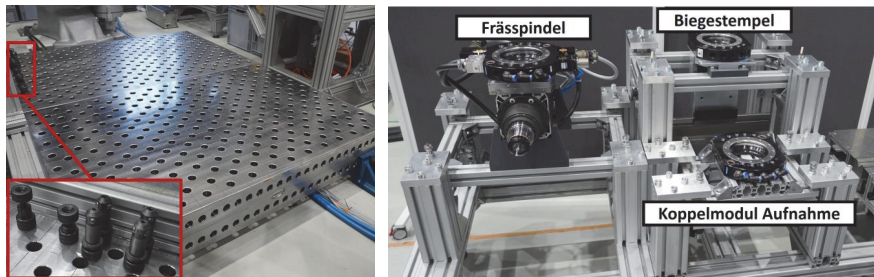


Abbildung 4-7: Matrixplatte mit Schnellspanbolzen (links) und Endeffektormagazin (rechts)

Die Steuerungsarchitektur der Roboterzelle ist als dezentrales, ethernetbasiertes System aufgebaut. Für die Steuerung der Roboter und Prozesse, der Sicherheitstechnik und der Vorverarbeitung von Kraftsensordaten sowie für das echtzeitfähige Kraftmodell und die Kraftregelung sind jeweils eigene Geräte zuständig. Das Kraftmodell und die Kraftregelung werden auf einem Linux-Rechner mit weicher Echtzeitfähigkeit betrieben. Die steuerungstechnische Projektierung der Roboterzelle erfolgt über einen Windows-Rechner im TIA-Portal. Die Datenvorverarbeitung der Kraft-Momentensensoren erfolgt auf einem proprietären Gerät (PMX) von HBK. Die Prozesse sowie die Sicherheitstechnik werden von mehreren SPS gesteuert. Die Bewegungssteuerung der Roboter übernimmt die NC-Steuerung. Die Geräte kommunizieren über einen gemeinsamen PRO-FINET-Bus miteinander. Eine detaillierte Beschreibung der Architektur und der teilnehmenden Geräte ist in Kapitel 6.2 zu finden.

5 Entwicklung des mechatronischen Koppelmoduls

In diesem Kapitel werden die Inhalte zur Erreichung des ersten Teilziels aus Kapitel 3.1 erläutert:

Entwicklung eines prozessunabhängigen, generell einsetzbaren Koppelmoduls, das eine starre Kopplung erlaubt und die gekoppelte Ausführung von Fertigungsprozessen ermöglicht.

Dazu werden zunächst in einer Konzeptphase die Anforderungen hergeleitet und die Gestaltung und Dimensionierung des Koppelmoduls durchgeführt. Es folgt die Entwicklung und Beschreibung der einzelnen Teilsysteme des Koppelmoduls sowie die anschließende Vorstellung des Gesamtsystems. Die Inhalte des Hauptkapitels wurden, soweit nicht anders gekennzeichnet, im Rahmen der Veröffentlichung (Mühlbeier et al. 2023) erarbeitet.

5.1 Konzept des Koppelmoduls

In diesem Kapitel erfolgt die Konzeptionierung des Koppelmoduls. Dazu werden die einzelnen Anforderungen an das Koppelmodul systematisch hergeleitet, bevor anschließend die Formgestaltung und eine erste Dimensionierung des Moduls durchgeführt werden.

5.1.1 Anforderungen an das Koppelmodul

Zunächst sollen die grundlegenden Anforderungen an das Koppelmodul identifiziert werden. Die nachfolgend vorgestellten Anforderungen sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Übersicht der Anforderungen an das Koppelmodul

Anforderungen	
1	Werkstückunabhängige/prozessunabhängige Lösung
2	Kompatibilität mit Endeffektoren für einzelne Roboter
3	Bereitstellung von Betriebsmitteln (Druckluft, Strom etc.) über Koppelmodul
4	Automatisierter Kopplungs-/Entkopplungsvorgang
5	Aktive Kompensation der inneren Kräfte
6	Passive Kompensation der inneren Kräfte
7	Einstellbarkeit und Austauschbarkeit der passiven Kompensation

Aus dem ersten Teilziel geht hervor, dass das Koppelmodul unabhängig vom vorliegenden Werkstück oder Prozess einsetzbar sein soll. Daraus folgt, dass die

Kopplungsfunktion nicht über den Endeffektor oder das Werkstück realisiert werden darf. Das Koppelmodul muss als separater Adapter zwischen Roboter und Endeffektor eingesetzt werden können. Auch die gemeinsame Handhabung eines Objekts darf daher nur über einen einzelnen Greifer erfolgen, der am Koppelmodul angebracht ist. Das gemeinsame Greifen eines Objekts von mehreren Robotern mit jeweils eigenen Greifern wird in der Arbeit nicht betrachtet. Der adapterbasierte Ansatz bietet neben der Unabhängigkeit vom Prozess auch die Möglichkeit, bereits existierende und industriell verfügbare Endeffektoren für einzelne Roboter am gekoppelten Robotersystem einzusetzen.

Üblicherweise werden am Endeffektor benötigte Betriebsmittel (Druckluft, elektrische Ströme etc.) über die Roboterarme entlanggeführt und am Roboterflansch dem Endeffektor bereitgestellt. Damit ist sichergestellt, dass die für die Bereitstellung nötigen Kabel und Schläuche bei Bewegung der Roboter sicher geführt werden. Da das Koppelmodul zwischen Endeffektor und Roboter platziert wird, muss es die notwendigen Betriebsmittel ebenfalls über geführte Kabel und Schläuche transportieren und dem Endeffektor bereitstellen.

Das Koppelmodul erlaubt potentiell anspruchsvollere Prozesse, schränkt aber den nutzbaren Arbeitsraum und damit die Flexibilität der Roboter ein. Es ist demnach naheliegend, Roboter in einer Produktion nur temporär und bei Bedarf zu koppeln und anschließend wieder zu entkoppeln. Häufige Kopplungs- und Entkopplungsvorgänge sind daher in einem potentiellen Einsatzszenario denkbar. Ein automatisierter Kopplungs- bzw. Entkopplungsprozess ohne manuellen Eingriff ist also sinnvoll, um ein schnelles und auch sicheres Koppeln und Entkoppeln zu ermöglichen. Dabei muss ebenfalls die regelmäßige Verbindung bzw. Trennung der Schläuche und Kabel für die Weiterführung der Betriebsmittel berücksichtigt werden.

Um die Verspannung des überbestimmten gekoppelten Systems regulieren zu können, muss eine passende Kraftsensorik bestimmt und im Koppelmodul integriert werden. Die im Stand der Forschung und Technik analysierten Arbeiten zur Kraftregelung dynamischer Kopplungen (Kapitel 2.5.2) zeigen außerdem, dass eine zusätzliche passive Kompensation beispielsweise durch integrierte Federelemente sinnvoll ist. Die passive Kompensation begrenzt die Dynamik und Steifigkeit des Gesamtsystems, erlaubt jedoch damit zugleich eine gewisse Fehlertoleranz für den Fall, dass ein noch nicht vollständig ausgereiftes Kraftregelungssystem in der Entwicklungsphase auf entstehende Kräfte fehlerhaft oder erst verzögert reagiert. Da davon auszugehen ist, dass die

Kraftregelung mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt eine schnellere und robustere Ausregelung der Verspannung ermöglicht, kann die eingebrachte Nachgiebigkeit Schritt für Schritt reduziert werden. Daraus ergibt sich die zusätzliche Anforderung der Wechselbarkeit der Federelemente.

5.1.2 Formgestaltung und Dimensionierung

Obwohl das Koppelmodul in einem möglichst breiten Einsatzbereich Anwendung finden soll, muss für dessen Dimensionierung eine Eingrenzung des Lastbereichs erfolgen. Hierfür wurden in einer theoretischen Voruntersuchung exemplarisch die entstehenden Prozesskräfte beim Außendrehen, Planfräsen, Bohren und Biegeumformen von unterschiedlichen Stahlwerkstoffen bestimmt (A_Bauer 2021). Da die Prozesskräfte wesentlich von den gewählten Prozessparametern und Materialien abhängen, erhebt die Voruntersuchung nicht den Anspruch, eine vollständige systematische Untersuchung aller potentiell geeigneten Fertigungsverfahren darzustellen, sondern soll lediglich sicherstellen, dass mit dem zu entwickelnden ersten Prototyp des Koppelmoduls eine breite Anzahl an Zerspanungsprozessen sowie erste einfache Umformprozesse ausführbar sind. Die Untersuchung zeigt, dass mit einer Prozesskraft von 8106 N sowohl im Bereich der Blechumformung als auch im Bereich der Zerspanung vielfältige Fertigungsprozesse möglich sind.

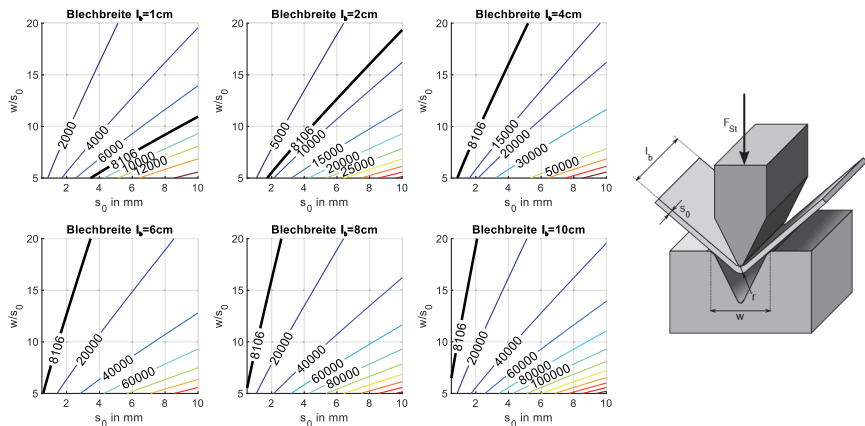


Abbildung 5-1: Stempelkraft in N für verschiedene Blechbreiten l_s , Blechdicken s_0 und Gesenkweiten w beim Freibiegen von C45-Stahl mit $R_m = 650 \text{ N/mm}^2$, Referenzkraft von 8106 N in Schwarz dargestellt (links), Parameter im Freibiegeprozess (rechts) (A_Bauer 2021)

Aus den Anforderungen an das Koppelmodul in Kapitel 5.1.1 geht hervor, dass dieses zur Anbindung eines Endeffektors an beide Roboter als grundlegende Form drei Arme benötigt, die miteinander verbunden sind. Die Anordnung dieser Arme zueinander beeinflusst die Lastübertragung vom Prozessangriffspunkt zum Roboterflansch und die Belastung aller dazwischenliegenden Komponenten wesentlich. Daher werden vier unterschiedliche Gestaltungsformen des Koppelmoduls hinsichtlich der Übertragung der Last und der resultierenden Lasten am Roboterflansch untersucht (siehe Abbildung 5-2). Die Formen sind durch den Winkel zwischen den beiden oberen Kopplungsarmen definiert, die für die Verbindung mit den Robotern zuständig sind.

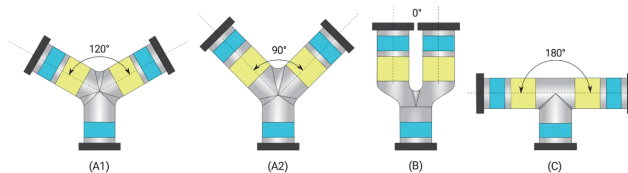


Abbildung 5-2: Formgestaltungskonzepte des Koppelmoduls (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2023)

Aufgrund der Überbestimmtheit ist die Verteilung der Lasten nicht ohne weitere Annahmen möglich. Daher erfolgt die Bestimmung der Flanschbelastungen mithilfe einer FEM-Analyse (Finite-Elemente-Methode). Für jedes Konzept werden die Kraft- und Momentenlasten an den oberen Flanschpunkten bestimmt (siehe Abbildung 5-3 links). Dazu werden ausgehend vom Mittelpunkt des unteren Flansches Belastungen in allen Richtungen untersucht. Die Symmetrieeigenschaften des Systems erlauben die Eingrenzung auf sechs unterschiedliche Lastfälle (siehe Abbildung 5-3 rechts) mit jeweils der Referenzkraft von 8106 N.

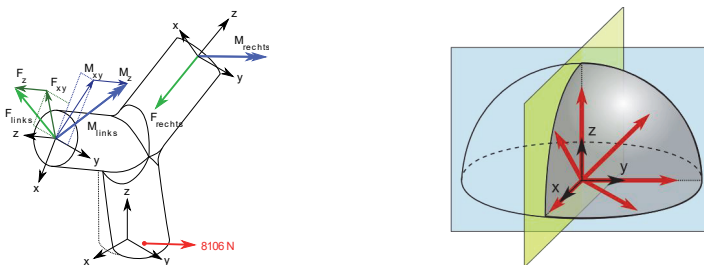


Abbildung 5-3: Reaktionskräfte und -momente für den Belastungsfall in xy-Richtung (links) und Darstellung aller sechs untersuchten Belastungsfälle (rechts) (A_Bauer 2021)

Die FEM-Simulation wird in ANSYS Mechanical 2020 durchgeführt. Die vollständigen Ergebnisse der Simulation sind in (A_Bauer 2021) zu finden. Eine Zusammenfassung, die die über alle Lastfälle hinweg maximal ermittelten Kräfte bzw. Momente darstellt, ist in Tabelle 5-2 zu finden. Aus den Daten wird ersichtlich, dass sich Form B und C für spezielle Lastfälle am besten eignen, bei anderen Lastfällen aber aufgrund besonders hoher Reaktionskräfte/-momente ungeeignet sind. Form A1 und A2 sind in ihrer Gestaltung als Kompromisslösung entworfen. Die entstehenden Reaktionskräfte sind lastübergreifend im mittleren Bereich, die Momentenbelastung fällt aber deutlich geringer aus als in Form B und C. Dies ist insbesondere relevant, da bei hoher Last zu erwarten ist, dass die maximal zulässigen Momente von handelsüblichen Kraftsensormodulen deutlich früher überschritten werden als die maximal erlaubten Kräfte. Aufgrund der im Allgemeinen etwas kleineren Reaktionskräfte und -momente des Formkonzepts A1 gegenüber A2 wird dieses weiterverwendet.

Tabelle 5-2: Maximale Reaktionskräfte/-momente an den roboterseitigen Koppelmodulflanschen (A_Bauer 2021)

Konzept	F_{xy}	$F_{z,Zug}$	$F_{z,Druck}$	M_{xy}	M_z
A1	4279,60 N	7155,00 N	-9287,60 N	1683,30 Nm	1381,60 Nm
A2	4267,50 N	8975,20 N	-10171,00 N	2333,60 Nm	1214,60 Nm
B	4054,80 N	16182,00 N	-16182,00 N	2672,60 Nm	189,36 Nm
C	5889,60 N	4050,70 N	-5990,50 N	4052,90 Nm	1245,10 Nm

5.2 Teilsysteme des Koppelmoduls

Basierend auf der grundlegenden Formgestaltung des Koppelmoduls und den abgeleiteten Anforderungen wird nachfolgend die Entwicklung der einzelnen Teilsysteme des Koppelmoduls vorgestellt. Abbildung 5-4 zeigt eine Übersicht der Teilsysteme.

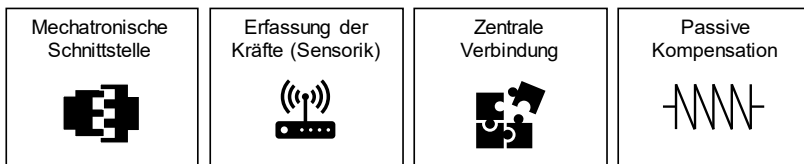


Abbildung 5-4: Teilsysteme des Koppelmoduls

5.2.1 Mechatronische Schnittstelle zum Roboter

Nachdem die grundlegende Form des Koppelmoduls festgelegt wurde und dessen Dimensionierung erfolgt ist, sollen im Folgenden die einzelnen Teilsysteme zur Erfüllung der in Kapitel 5.1.1 genannten Anforderungen vorgestellt werden.

Für das häufige und schnelle Koppeln und Entkoppeln der Roboter mit dem Koppelmodul ist eine trennbare mechatronische Schnittstelle notwendig. Diese muss neben der mechanischen Kraftübertragung auch eine Informationsweitergabe und Energieübertragung ermöglichen. Um dies zu gewährleisten, wird das Schnellwechselsystem SWS-160 von Schunk eingesetzt (siehe Abbildung 5-5 links). Über dieses Schnellwechselsystem lassen sich mittels sogenannter Durchführmodule Betriebsstoffe, Energie und Informationen weiterleiten. Um den Anspruch der generellen Einsetzbarkeit zu erfüllen, werden Durchführmodule für eine Auswahl an grundlegenden relevanten Medien und elektrischen Leitungen über beide oberen Kopplungsarme verteilt. Die Module umfassen die Durchführung von Druckluft, Kühlmittel, Ethernet, Starkstrom, Steuerströmen und Datenströmen. Ein Teil der Betriebsmittel wird direkt an den unteren Kopplungsarm angebunden, um eine generelle Verfügbarkeit von Informationen, Betriebsstoffen und Energie am Endeffektor sicherzustellen, während ein anderer Teil der Leitungen für die im Koppelmodul integrierte Sensorik verwendet wird (siehe Abbildung 5-5 rechts). Die Schnittstelle zum Endeffektor ist analog aufgebaut und erlaubt den Einsatz der Endeffektoren sowohl am gekoppelten System als auch am einzelnen Roboter (A_Bauer 2021).

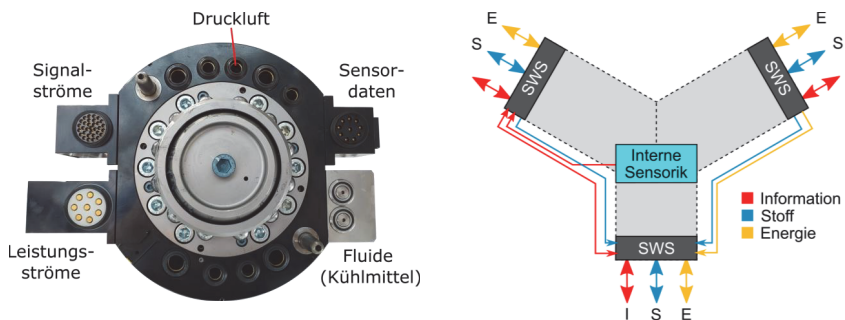


Abbildung 5-5: Schnellwechselsystem mit Durchführmodulen (links) und schematische Darstellung der Betriebsmittelweitergabe (rechts)

5.2.2 Erfassung der Kräfte und Momente

Um die Beweglichkeit des gekoppelten Robotersystems sicherzustellen, ist eine Erfassung und Regelung der inneren Kräfte und Momente notwendig. Die Messung der inneren Kräfte muss in allen sechs Freiheitsgraden eines Körpers im dreidimensionalen Raum erfolgen. Der räumliche Zustand des Körpers wird durch seine drei translatorischen Positionen und drei rotatorischen Orientierungen vollständig beschrieben. Entlang der translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade können Kräfte beziehungsweise Momente aufgrund der inneren Verspannung auftreten. Hierfür können sogenannte 6-DOF-Kraft-Momenten-Sensoren (engl. Force-Torque-Sensor, FTS) eingesetzt werden. Wird ein FTS in der kinematischen Kette zwischen beiden Robotern integriert, misst er neben den inneren Kräften unter anderem auch die Gewichtskraft und Trägheitskräfte des Koppelmoduls. Diese Einflussfaktoren lassen sich durch Messung von weiteren dynamischen und statischen Größen berechnen und können in den Kraftmessdaten kompensiert werden. Alternativ kann ein zweiter FTS eingesetzt werden. Die redundante Messung der Kräfte mit dem zweiten Sensor ermöglicht die Eliminierung störender Einflussfaktoren, ohne sie bestimmen zu müssen, und erlaubt die Prüfung der ermittelten Verspannung auf Plausibilität. Ein zweiter Sensor bietet außerdem konstruktives Verbesserungspotential, da die Verbindung zwischen beiden Roboterflanschen mit dem zweiten Sensor symmetrisch aufgebaut werden kann. Damit befindet sich der Schwerpunkt mittig im Koppelmodul und die Gesamtmasse des Koppelmoduls wird äquivalent auf beide Roboter verteilt.

Um die Prozesskräfte im Fall eines Prozesseingriffs präzise messen zu können, ist außerdem ein dritter Kraftsensor möglichst nah am Krafteinleitungspunkt sinnvoll. Abbildung 5-6 zeigt den Kraftfluss (in Rot) der inneren Kräfte sowie der Prozesskräfte nach dem C&C²-Ansatz (Matthiesen 2002). Die Roboterflansche und Werkzeugvorrichtung sind als Konnektoren (C) und die Sensoren als Wirkflächenpaare (WFP) modelliert. Die drei Kraftsensoren werden als FT1, FT2 und FT3 bezeichnet.

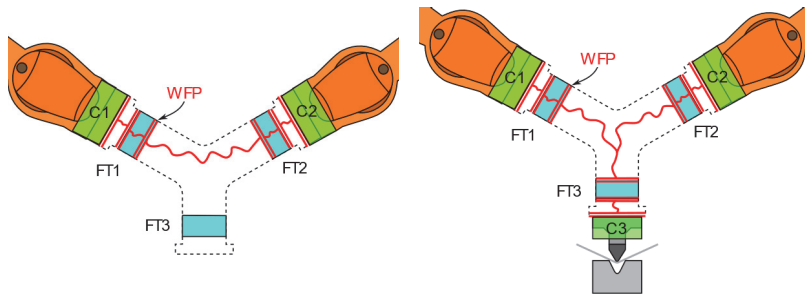


Abbildung 5-6: Kraftfluss (in Rot) der inneren Kräfte (links) und Prozesskräfte (rechts) im gekoppelten System (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2023)

Für den Einsatz im Koppelmodul wird der Kraft-Momenten-Sensor MCS-10 von HBK verwendet (A_Bauer 2021). Bei der Platzierung des Messaufnehmers stehen die beiden in Abbildung 5-7 dargestellten Möglichkeiten zur Auswahl. Die Messaufnehmer können zum einen in der kinematischen Kette koppelmoduleseitig, also nach dem Schnellwechselsystem, platziert werden (siehe Abbildung 5-7 links). Aufgrund des geringeren Hebelarms zwischen Prozessangriffspunkt im Koppelmodul und Position des Messaufnehmers am Flansch entstehen bei dieser Anordnung vergleichsweise geringere Biegemomente, auf die die Messaufnehmer besonders empfindlich reagieren. Allerdings müssen die Sensorleitungen in diesem Fall über die Durchführmodule angeschlossen werden. Da drei Messaufnehmer insgesamt 108 einzelne Signalleitungen zur Informationsübertragung benötigen und damit ein großer Teil der Durchführmodule bereits vorbelegt wäre, lässt sich dieser Fall nicht realisieren. Die andere Option ist die roboterseitige Platzierung der Messaufnehmer vor dem Schnellwechselsystem (siehe Abbildung 5-7 rechts). In diesem Fall können die Sensorleitungen fest verdrahtet werden. Aufgrund des größeren Hebelarms zwischen Prozessangriffspunkt im Koppelmodul und Position des Messaufnehmers am Flansch entstehen bei dieser Anordnung allerdings auch höhere Biegemomente. (A_Bauer 2021)

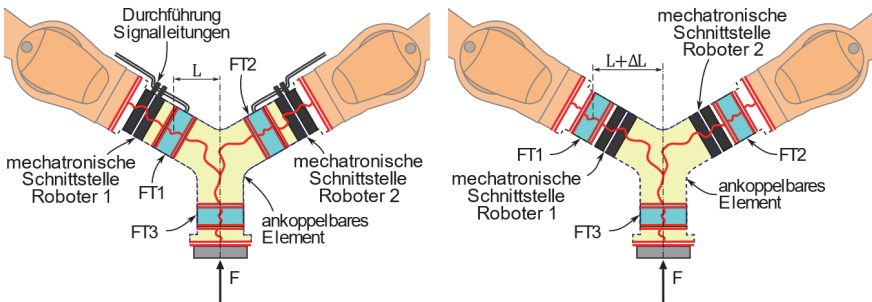


Abbildung 5-7: Platzierungsmöglichkeiten der Kraftsensoren im Koppelmodul

Um die zulässigen Maximalwerte der Messaufnehmer nicht zu überschreiten, werden die zulässigen Prozesskräfte von 8106 N auf 5000 N reduziert. Die Einhaltung der zulässigen Belastungen an den Messaufnehmern unter der neu definierten reduzierten Prozesskraft wird mittels einer FEM-Simulation überprüft. Die Ergebnisse in Tabelle 5-3 zeigen, dass die Einhaltung des zulässigen Biegemoments an den Messaufnehmern mit einem Sicherheitsfaktor von ungefähr 2 gegeben ist. Damit gilt als nachgewiesen, dass das Koppelmodul und die eingesetzten Kraftsensoren für Belastungen bis 5000 N sicher ausgelegt sind.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der FEM-Simulation und berechnete Sicherheitsfaktoren

	F_{z+}	F_{z-}	F_{xy}	M_{z+}	M_{z-}	M_{xy}
MCS10 Maximalwerte	100000 N	100000 N	20000 N	1500 Nm	1500 Nm	2000 Nm
Rechter Arm FTS	5615 N	-5615 N	2791 N	722 Nm	-722 Nm	1033 Nm
Sicherheitsfaktor FTS	17,81	17,81	7,17	2,08	2,08	1,94
MCS10 Maximalwerte	100000 N	100000 N	20000 N	1500 Nm	1500 Nm	2000 Nm
Linker Arm FTS	5617 N	-5617 N	2792 N	722 Nm	-722 Nm	1033 Nm
Sicherheitsfaktor FTS	17,80	17,80	7,16	2,08	2,08	1,94

5.2.3 Zentrale Verbindung der Kopplungsarme

Die beiden oberen Kopplungsarme und der untere Kopplungsarm müssen über ein zentrales Element zur Kraftübertragung verbunden werden. Da das Verbindungsglied die Kopplungsarme in einem Winkel von 120° fixiert, wird das zentrale Verbindungselement in Anlehnung an die Sternschaltung in der Elektrotechnik als Stern bezeichnet. Das Konzept des Sterns sieht vor, das Bauteil als massive Schweißbaugruppe zu gestalten (siehe Abbildung 5-8 links) (A_Bauer 2021). Die beiden Befestigungsflansche

der oberen Arme werden an den massiven Körper geschweißt, der untere Arm wird angeschraubt. Über Zentrierstifte ist die Positionierung und Orientierung der Befestigungsflansche sichergestellt. Die getrennte Fertigung von Massivkörper und Befestigungsflanschen ermöglicht es, unterschiedliche Winkel zwischen den Kopplungsarmen zu realisieren. Dazu werden Massivkörper mit variierenden Anstellungswinkeln bei gleichbleibenden Befestigungsflanschen als mechanische Schnittstelle zu den Roboterarmen verwendet. Die Massivbauweise geht allerdings mit einem hohen Gewicht einher. Da das Sternelement in seiner gegenwärtigen Form 80 kg wiegt und damit zu einem nicht irrelevanten Anteil die verfügbare Nutzlast der Industrieroboter reduziert, ist eine Topologieoptimierung sinnvoll. Mit einem geringeren Gesamtgewicht des Koppelmoduls verbleibt eine größere verfügbare Nutzlast für den Einsatz in Handhabungs- und Fertigungsprozessen. Ziel der Topologieoptimierung ist es daher, durch die Gewichtsoptimierung eine knochenartige Struktur zu erreichen, in der der Kraftfluss zwischen den Befestigungsflanschen über Streben sichergestellt wird (siehe Abbildung 5-8 rechts) (Mühlbeier et al. 2023).

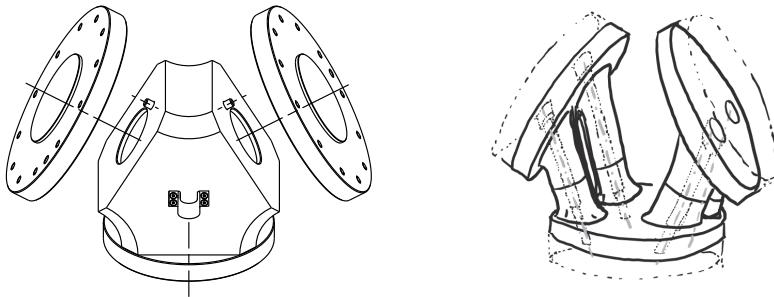


Abbildung 5-8: Konzept des Sternelements als Schweißkonstruktion (links) und als Knochenstruktur (rechts) (A_Bauer 2021)

Hierfür wird ein neues, minimalisiertes FEM-Modell des Sterns erzeugt. Die Flanschbereiche und die Streben werden von der Optimierung explizit ausgeschlossen. Als Optimierungsziel wird die Minimierung der Gestaltänderungsenergie über alle Belastungsfälle gewählt. Die Belastungsfälle beinhalten jeweils die Belastungen in die einzelnen positiven und negativen x-, y- und z-Richtungen sowie die Mischformen in positiver und negativer xy-, xz- und yz-Richtung. Somit ergeben sich insgesamt 18 Lastfälle. Die maximale Von-Mises-Spannung darf die Streckgrenze des Werkstoffs mit einem Sicherheitsfaktor von $S = 1,5$ nicht überschreiten. Das Ergebnis der Optimierung zeigt eine

sukzessive Reduzierung des ursprünglichen Volumens auf 37 % über mehrere Iterationen (siehe Abbildung 5-9). Der Knochendurchmesser wurde auf 20 mm gesetzt. Die maximalen Vergleichsspannungen aller Lastfälle des finalen Modells sind in Tabelle 5-4 dargestellt.

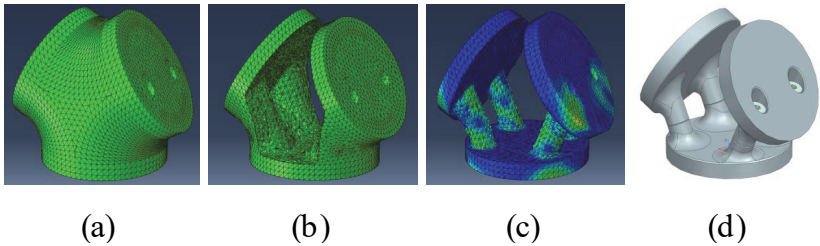


Abbildung 5-9: Topologieoptimierung; Ausgangsmodell (a), Zielvolumen = 50 % (b), Zielvolumen = 37 % (c), finales CAD-Modell (d) (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2023)

Tabelle 5-4: Maximale Von-Mises-Spannungen für alle Lastfälle bei Optimierung auf Zielvolumen von 37 %, maximaler Wert = 40,09 MPa

Belastungsfall	Maximale Spannung (MPa)	Belastungsfall	Maximale Spannung (MPa)
Lastfall 1	29,72	Lastfall 10	38,03
Lastfall 2	11,45	Lastfall 11	38,03
Lastfall 3	40,09	Lastfall 12	11,45
Lastfall 4	37,73	Lastfall 13	32,20
Lastfall 5	31,99	Lastfall 14	32,20
Lastfall 6	26,01	Lastfall 15	40,09
Lastfall 7	29,72	Lastfall 16	26,01
Lastfall 8	25,89	Lastfall 17	31,99
Lastfall 9	25,89	Lastfall 18	37,73

Das Sternelement als zentrale Schnittstelle der Kopplungsarme definiert die Anordnung und damit Lastübertragung der Kopplung. Um eine möglichst breite Palette an Lastfällen und Fertigungsprozessen abdecken zu können, wird mit der 120° Anordnung eine Kompromisslösung weiterverfolgt. Für zukünftige Anwendungen sind allerdings auch prozessspezifische Anordnungen durch Verwendung von anderen Sternen denkbar.

Um sowohl das Koppelmodul als auch die Roboter bei zu hohen inneren Kräften zu schützen, ist eine passive Sicherheit in Form einer Sollbruchstelle sinnvoll. Insbesondere bei hohen Federsystemsteifigkeiten können schnell hohe innere Kräfte auftreten. Da die Teilsysteme des Koppelmoduls teure Einzelanfertigungen sind, ist eine

Umsetzung der Sollbruchstelle als separates, einfach austauschbares Bauteil sinnvoll. Damit können Schäden an den Teilsystemen und daraus resultierende lange Wartungszeiten im Fall eines Schadens vermieden werden.

Aus fertigungstechnischen Gründen ist für die Herstellung des Sterns eine Fertigung in drei einzelnen Komponenten notwendig. Es bietet sich daher an, das Verbindungsglied der Sternkomponenten als Sollbruchkomponente zu realisieren. Die Knochenstreben werden mittig getrennt und als Hohlstruktur realisiert. Dadurch können Verbindungsschrauben als Sollbruchstelle dienen und gleichzeitig die Verbindung zwischen den drei Sterneinzelteilen herstellen (siehe Abbildung 5-10).



Abbildung 5-10: Einzelkomponenten des Sternteilsystems

Die Verbindungsschraube wird als Passschraube ausgeführt, um die korrekte Positionierung der Sterneinzelteile sicherzustellen. Eine Kerbe in der Passschraube dient als Sollbruchstelle (siehe Abbildung 5-11). Die gewünschte zulässige Spannung kann durch die Tiefe der Kerbe definiert werden. Die Passschrauben sind als Normteile (ISO 7379) standardisiert und günstig erhältlich. Die Kerbe wird in einer Nachbearbeitung hinzugefügt.

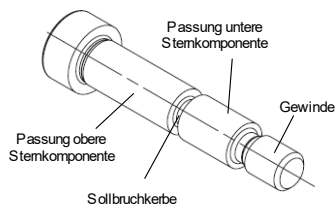


Abbildung 5-11: Passschraube nach ISO 7379 mit zusätzlicher Kerbe als Sollbruchstelle

5.2.4 Passive Kompensation der inneren Kräfte und Momente

Um die sichere Entwicklung und Erprobung der Kraftregelung zu ermöglichen, wird eine zusätzliche passive Kompensation in das Koppelmodul integriert. Diese zusätzliche Nachgiebigkeit ist in der Entwicklungsphase notwendig, um auftretende innere Kräfte zu limitieren, kann bei einem sicher funktionierenden Regler zukünftig aber entfernt werden. Die passive Kompensation muss eine Nachgiebigkeit in allen drei Bewegungsrichtungen sowie eine Verdrehung um alle drei Bewegungsachsen erlauben. Da die Nachgiebigkeit den eigentlich erwünschten Effekt der Steifigkeitssteigerung durch die Kopplung negativ beeinflusst, soll sie bereits während der Entwicklungsphase mit steigender Effektivität des Kraftreglers sukzessiv reduziert werden. Die Steifigkeit der sechsdimensionalen Nachgiebigkeit muss daher anpassbar sein. Dies soll durch den Austausch der Nachgiebigkeit durch geometrisch gleiche Alternativen mit höherer Steifigkeit erreicht werden.

Um die gewünschte Steifigkeit einzustellen, soll die passive Kompensation als modulares System realisiert werden. Als grundlegendes Element dieses modularen Federsystems eignen sich genormte Elastomer-Federelemente (DIN 95363; DIN 95360). In Abbildung 5-12 sind diese Elemente der Bauform C (beidseitige Gewinde) dargestellt. Die Federelemente sind in verschiedenen Größen, Shorehärten und Steifigkeiten verfügbar. Aufgrund der Vielzahl an verfügbaren Varianten lassen sich durch die Kombination und Zusammenschaltung mehrerer dieser Elemente beliebige Gesamtsteifigkeiten im Federsystem realisieren.

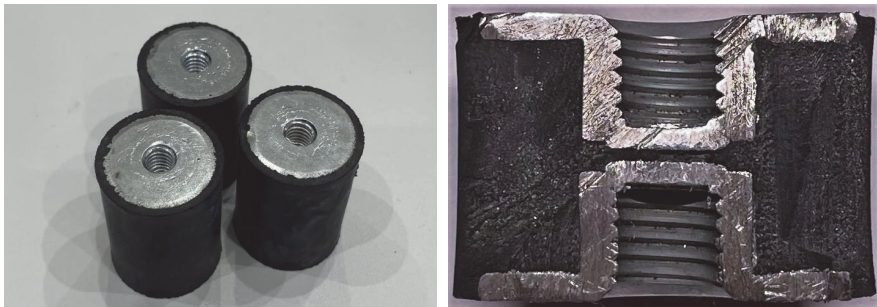


Abbildung 5-12: Genormte Elastomerelemente mit beidseitigem Gewinde (links) und Schnittansicht (rechts) (A_Arzberger 2022)

Abbildung 5-13 zeigt das Konzept des zylindrischen Federsystems in unterschiedlichen Ansichten. Es wurde im Rahmen der Arbeit (A_Arzberger 2022) entwickelt. Über die Federelemente werden Außen- und Innenring miteinander verbunden und so die Kraftübertragung zwischen roboterseitigem SWS-Flansch und Sternflansch hergestellt. Damit handelt es sich bei dem Federsystem um eine nachgiebige, nicht-schaltbare Elastomerkupplung (Haberhauer & Kaczmarek 2014, S. 119–120).

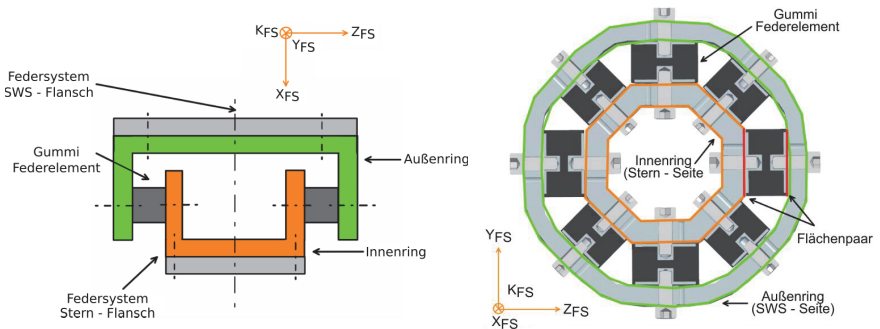


Abbildung 5-13: Darstellung der Anordnung der Federelemente im xz-Schnitt (links) und yz-Schnitt (rechts) (in Anlehnung an A_Arzberger 2022)

Die genormten Federelemente weisen eine unterschiedliche Zug- und Drucksteifigkeit auf. Um das Steifigkeitsverhalten des Federsystems richtungsunabhängig zu gestalten, werden die Elemente quer zwischen Innen- und Außenring angeordnet. Bei einer axialen Belastung (x-Richtung) werden die Federelemente unabhängig von der Belastungsrichtung immer auf Scherung beansprucht und zeigen daher ein gleichbleibendes Verhalten. Bei einer radialen Belastung (yz-Ebene) wird zu jedem auf Zug beanspruchten Federelement das gegenüberliegende Element auf Druck beansprucht. Die als Parallelschaltung wirkenden Zug-/Druck-Federelementpaare weisen damit ebenfalls ein richtungsunabhängiges Steifigkeitsverhalten auf. (A_Arzberger 2022)

Das Federsystem verfügt über acht Flächen zur Platzierung von Federelementen. Auf jeder dieser Flächen können entweder ein größeres Federelement oder bis zu drei kleinere Federelemente oder Kombinationen von mehreren Typen platziert werden (siehe Abbildung 5-14). Sind alle acht Plätze mit jeweils einem Federelement bzw. mit drei Federelementen besetzt, wird dies als 8x1-Konfiguration bzw. 8x3-Konfiguration bezeichnet. Um die kleinstmögliche Steifigkeitskonfiguration zu erreichen, kann ebenfalls

bis zu jede zweite Platzierungsfläche nicht besetzt werden. Dies entspricht dann einer 4x1- bzw. 4x3-Konfiguration.



Abbildung 5-14: Konfigurationsmöglichkeiten zur Einstellung der Federsystemsteifigkeit (in Anlehnung an A_Arzberger 2022)

5.3 Finales Gesamtsystem des Koppelmoduls

Das Gesamtsystem des Koppelmoduls ist in Abbildung 5-15 dargestellt. Die beiden oberen Arme dienen zur Verbindung der Roboter und bestehen jeweils aus einem Sensorsystem, einem Schnellwechselsystem und einem Federsystem. Am Schnellwechselsystem findet die Trennung zwischen Roboter und Koppelmodul statt. Das Sensorsystem wird zur Bestimmung der inneren Kräfte verwendet und verbleibt dauerhaft am jeweiligen Roboter. Über das Sternelement werden die oberen Arme mit dem unteren Arm verbunden. Im unteren Arm sind ebenfalls ein Sensorsystem und ein Schnellwech-

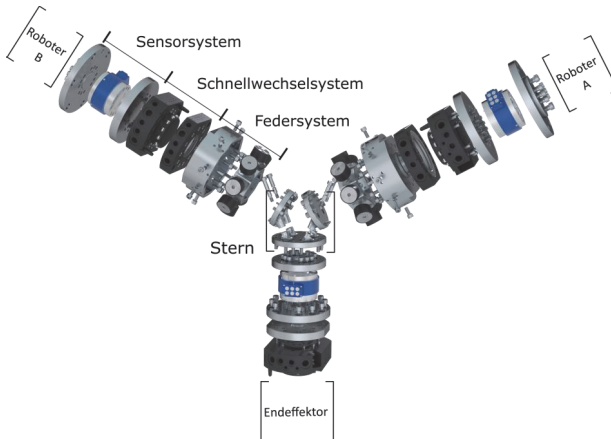


Abbildung 5-15: Gesamtsystem Koppelmodul

selsystem platziert. Über das Schnellwechselsystem können beliebige Endeffektoren angeschlossen werden. In Abbildung 5-16 ist das integrierte Koppelmodul mit beiden Roboterflanschen zu sehen. Abbildung 5-17 zeigt den Koppelvorgang in der Roboterzelle im Anfangs- und Endzustand.

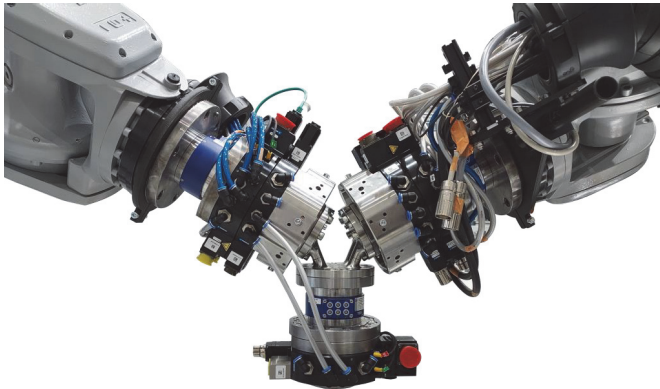


Abbildung 5-16: Integration des Koppelmoduls mit den Roboterflanschen (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2023)

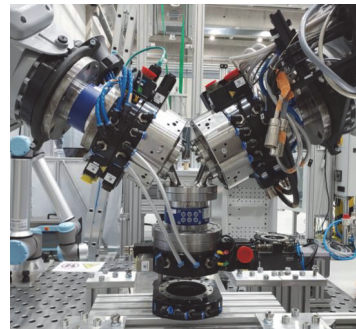
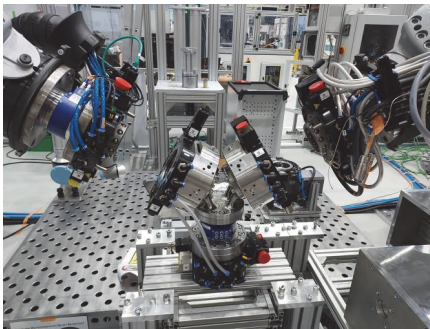


Abbildung 5-17: Koppelmodul im getrennten (links) und gekoppelten Zustand (rechts)

5.4 Zusammenfassung zur Entwicklung des Koppelmoduls

Zur Erfüllung des ersten Teilziels wurde ein Koppelmodul entwickelt, das im einstelligen Kilonewtonbereich eingesetzt werden kann. Zunächst wurden die Anforderungen an das Koppelmodul identifiziert. Das Modul soll automatisiert ankoppelbar sowie prozessunabhängig sein, eine einstellbare passive Kompensation der Verspannung erlauben und die Durchleitung von Medien an einen Endeffektor ermöglichen.

Für das Koppelmodul wurde eine Dimensionierung und Gestaltung der grundlegenden Form durchgeführt. Dazu wurden unterschiedliche Anordnungen der Kopplungsarme in einer FEM-Simulation analysiert. Es wurde eine mechatronische Schnittstelle zur Kopplung sowie zur Übertragung und Weitergabe von Energie, Betriebsstoffen und Informationen integriert. Über die Schnittstelle am unteren Arm können die Betriebsmittel einem Endeffektor bereitgestellt werden. Weiterhin wurde eine Sensorik zur Erfassung der inneren Kräfte und Momente ausgewählt und integriert. Verschiedene Anordnungen der Sensoren wurden hierfür diskutiert. Ein passives Federsystem mit einstellbarer Nachgiebigkeit zur Reduzierung von Verspannungen wurde ebenfalls entwickelt und integriert.

Abschließend wurde eine Optimierung durchgeführt. Dabei wurden die oberen Arme des Koppelmoduls konstruktiv sowie das zentrale verbindende Sternelement simulativ optimiert und das Gesamtgewicht reduziert. Das Federsystem wurde hinsichtlich Fertigbarkeit und Modularität der Steifigkeiten optimiert. Zusätzliche Sollbruchstellen wurden integriert. Ein Prototyp des Koppelmoduls wurde hergestellt und mechanisch und steuerungstechnisch in die Roboterzelle integriert. Erfolgreiche Inbetriebnahmetests wurden durchgeführt.

6 Modellbasierte Regelung der inneren Kräfte

In Kapitel 6 werden die Inhalte zur Erreichung des zweiten Teilziels aus Kapitel 3.1 erläutert:

Entwicklung und Implementierung eines prozessunabhängigen Algorithmus zur Bestimmung der inneren Kräfte/Momente und einer darauf aufbauenden kraftgeregelten Synchronisierung der gekoppelten Roboter.

Um die Regelung der inneren Kräfte zu ermöglichen, werden zuerst die grundlegenden Anforderungen an das Regelungssystem bestimmt. Daraus wird abgeleitet, welche zusätzlichen Kommunikationskanäle in die Steuerungsarchitektur der Roboterzelle für die echtzeitfähige Regelung integriert werden müssen. Auf Basis der Anforderungen an den Regler und der technischen Restriktionen der Steuerungsarchitektur wird die Regelungsstrategie erarbeitet. Auf dieser aufbauend werden Modelle für die Bestimmung der inneren Kräfte und der Nachgiebigkeit des gekoppelten Systems entwickelt. Mit dem Nachgiebigkeitsmodell kann der Transfer von Kraftwerten in Lagewerte erfolgen. Dies ist erforderlich, da der Kraftregler aufgrund von technischen Restriktionen letztlich nur auf den Lageregelkreis der Roboter zugreifen kann. Das Kapitel schließt mit der finalen Umsetzung des Reglers und der Validierung der Stabilitätseigenschaften.

6.1 Anforderungen an das Regelungssystem

Um das vorliegende Teilziel zu erreichen, müssen zunächst die Anforderungen an das Regelungssystem definiert werden. Folgende Anforderungen werden an das Regelungssystem gestellt:

- Eine gleichmäßige Aufteilung der inneren Kräfte auf beide Roboter ist erforderlich.
- Die Regelung muss sowohl bei Stillstand als auch bei Bewegung des gekoppelten Systems stabil sein.
- Der Regler muss jederzeit aktivierbar und deaktivierbar sein.
- Aufgrund der eingeschränkten Schnittstellen der Roboter soll die Regelung als indirekter Kraftregler mit Nachgiebigkeitsmodellierung der Roboter und des Koppelmoduls realisiert werden.
- Das Nachgiebigkeitsmodell muss parametrierbar sein, um Veränderungen der Steifigkeit von Roboter und/oder Koppelmodul berücksichtigen zu können.

- Der Regler und einstellbare Reglerparameter sollen über die Robotersteuerung bedient werden können.
- Es soll sowohl eine Ausregelung der inneren Kräfte als auch eine Sollvorgabe der inneren Kraft zur gezielten Einstellung einer Verspannung möglich sein.

Aus den Anforderungen an das Regelungssystem lassen sich die Anforderungen der zugrunde liegenden Steuerungsarchitektur hinsichtlich des Datenmanagements, also der Datenerfassung, -verarbeitung und -kommunikation, ableiten. Für die Bestimmung der inneren Kräfte sind die gemessenen Kräfte und Momente aus mindestens zwei Kraftsensoren im Koppelmodul erforderlich. Außerdem werden die TCP-Positionen bei der Roboter benötigt. Aus der Roboterpose lassen sich Steifigkeiten des Roboters am TCP ableiten. Diese werden zur Modellierung der Nachgiebigkeit verwendet, die aus Kraftdaten Positionskorrekturwerte berechnet. Anhand der Orientierung der Roboter-TCPs kann auch die Orientierung des Koppelmoduls und damit die Richtung der Gewichtskraft des Koppelmoduls relativ zu den Koordinatensystemen der Kraftsensoren ermittelt werden.

Die Steuerungsarchitektur, in die das Regelungssystem eingebunden wird, muss hohen Anforderungen genügen. Die genannten Sensor- und Steuerungsdaten ergeben in Summe eine große Datenmenge, die mit hoher Geschwindigkeit übertragen und verarbeitet werden muss. Dabei ist nicht nur die übertragbare Datenrate entscheidend, sondern auch ein echtzeitfähiges Verhalten.

Das Regelungssystem muss alle notwendigen Daten über einen Kommunikationsbus erhalten, Korrekturwerte für die Roboter berechnen und diese rechtzeitig an die Robotersteuerungen zurückgeben. Anschließend müssen die Robotersteuerungen die Korrekturwerte auslesen und in ihre jeweiligen Achsregler einfließen lassen. Der beschriebene Übertragungsweg ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Der Zugriff des Reglers auf die Robotersteuerung ist mit Strich-Punkt-Linien hervorgehoben.

Aus der Abbildung ist ebenfalls der Unterschied bezüglich der Datenübertragung zwischen einem gleichberechtigten Koordinationsansatz und dem Master-Slave-Ansatz ersichtlich. Im gleichberechtigten Ansatz verfahren beide Roboter sowohl positions- als auch kraftgesteuert. Beim Master-Slave Ansatz verfährt der Master-Roboter nur positionsgesteuert, während der Slave-Roboter zusätzlich auch kraftgeregelt verfährt. Die gestrichelt dargestellte Datenübertragung fällt bei einem Master-Slave-Ansatz weg.

Dadurch reduziert sich Anzahl der Regelungsparameter der Kraftregelung gegenüber des gleichberechtigten Ansatzes von zwölf auf sechs Größen.

Die dargestellte Kommunikationskette muss möglichst zuverlässig in jedem Interpolationstakt (IPO-Takt) ausgeführt werden, um die internen Lageregler der Roboter mit den Korrekturwerten zu versorgen. Dennoch handelt es sich hier um weiche Echtzeitanforderungen, da eine Überschreitung der zulässigen Zykluszeit keinen Systemausfall verursacht, sondern lediglich die Kompensation der inneren Kräfte verzögert und damit die gekoppelte Bewegung hinsichtlich Bahntreue und Genauigkeit qualitativ verschlechtert.

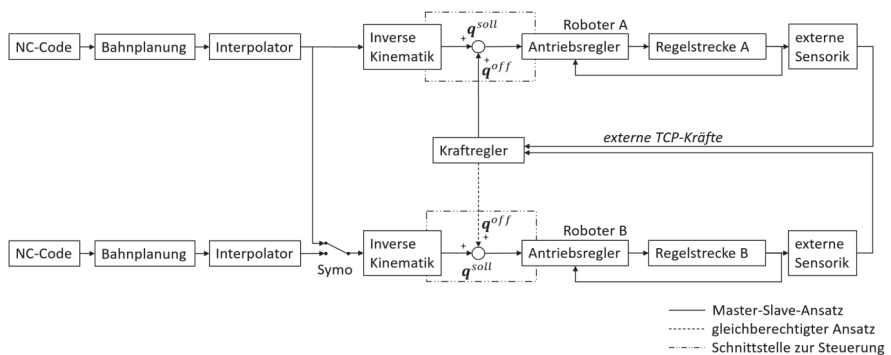


Abbildung 6-1: Grundlegender Übertragungsweg des Regelungssystems

Neben schnellen Kommunikationswegen ist zur Einhaltung der Zykluszeit auch eine hohe Rechenleistung der Steuerungshardware zur Verarbeitung des Reglers notwendig. Die Schnittstellen der Steuerungshardware zu den Robotersteuerungen müssen die Anforderungen an Echtzeitfähigkeit und Datenübertragungsrate ebenfalls erfüllen. Zur Validierung des Regelungssystems sind außerdem ein Datenlogging und entsprechender Speicherplatz zur längeren Messaufzeichnung erforderlich. Die genannten Punkte werden im folgenden Kapitel näher untersucht.

6.2 Steuerungsarchitektur und Datenverarbeitung

In diesem Kapitel wird vorgestellt, welche Kommunikationskanäle erforderlich sind, um den Anforderungen an den echtzeitfähigen Kraftregler gerecht zu werden. Dazu werden zuerst die Steuerungsarchitektur und die an der Reglerkommunikation beteiligten Geräte erläutert. Anschließend wird dargestellt, wie die Kommunikation und der echtzeitfähige Datenaustausch zwischen den Geräten implementiert wurden.

6.2.1 Steuerungsarchitektur und teilnehmende Geräte

Die Roboterzelle ist auf Basis einer dezentralisierten Steuerungsarchitektur aufgebaut. Kommunikationsteilnehmer der Architektur sind neben den Robotern und ihrer Steuerung unter anderem dezentrale I/O-Baugruppen, Ventilinseln und Kraftsensoren (siehe Abbildung 6-2). Die Geräte kommunizieren über einen gemeinsamen PROFINET-Feldbus. Aufgrund der hohen Anforderungen des Regelungssystems hinsichtlich Rechenleistung und Speicher wird dieses auf einem separaten Rechner realisiert. Der Rechner kommuniziert über eine integrierte PROFINET-Netzwerkkarte mit den anderen Teilnehmern des Netzwerks.

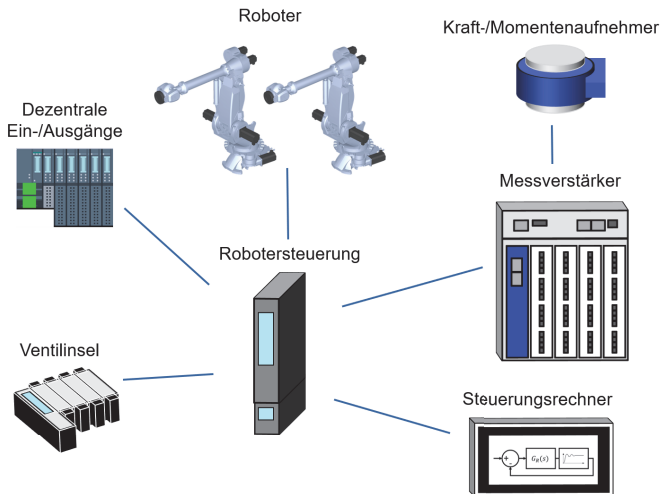


Abbildung 6-2: Kommunikationsteilnehmer in der Roboterzelle

Innerhalb der Kommunikation über PROFINET wird unter anderem zwischen RT- (Real-Time) und IRT- (Isochronous-Real-Time) Kommunikation unterschieden (siehe Anhang A). Beide Kommunikationsarten dienen dem zyklischen Datenaustausch. Bei Verwendung der IRT-Kommunikation wird darüberhinaus ein Teil der Bandbreite für die echtzeitkritische Kommunikation reserviert. Dies wird erreicht, indem vom Mastergerät (auch Controller genannt) ein IRT-Zeitplan erstellt wird, in dem die genaue Abfolge des Versands der Datenpakete aller Teilnehmer definiert ist (PI North America 2024; Siemens AG 2022, S. 190–191). Damit ist sichergestellt, dass auch bei hoher Netzauslastung Determinismus und die Einhaltung von Zykluszeiten gegeben sind.

Obwohl eine RT-Kommunikation hinsichtlich der Übertragungsgeschwindigkeit für die Regelung ausreichend wäre, wird die Kommunikation des Regelungssystems über PROFINET-IRT realisiert. Dies garantiert neben dem schnellen Datenaustausch zwischen Roboter und Regler auch die Echtzeitfähigkeit. Da nicht jedes Gerät in der Architektur IRT-fähig ist, wird innerhalb des PROFINET-Netzwerks zwischen dem IRT-Bereich und dem RT-Bereich unterschieden. Dem IRT-Bereich zugehörig sind alle Geräte, die zum Regelungssystem beitragen. Dazu gehören die Robotersteuerungen, die Kraftsensoren, ein IRT-Netzwerkswitch und der Regelungssystemrechner. Die IRT-Geräte sind über den IRT-Switch als Sterntopologie verbunden. An einzelnen IRT-Geräten sind weitere RT-Geräte in einer Linientopologie integriert. Die gesamte Topologie und die Aufteilung zwischen IRT- und RT-Bereich sind in Abbildung 6-3 dargestellt.

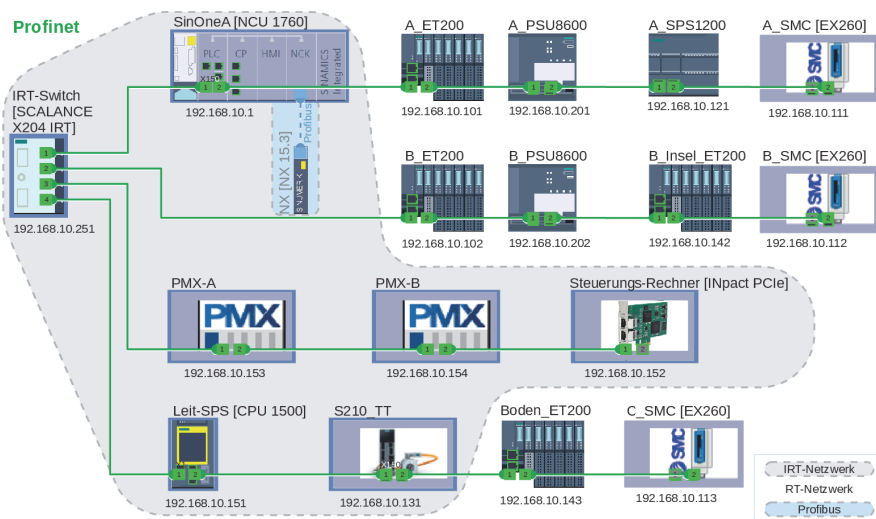


Abbildung 6-3: PROFINET-Topologie der Roboterzelle (in Anlehnung an A_Binder 2023)

Die gesamte Kommunikation des Regelungssystems läuft über das IRT-Protokoll. Die Robotersteuerung ist als IRT-Controller (Master) definiert. Das Kraftmesssystem und der externe Regelungsrechner sind als Devices (Slaves) definiert. Für den vollständigen Ablauf des Regelungssystems sind folgende Kommunikationspfade erforderlich:

1. Senden von Kraft-/Momentendaten von Messsystem an externen Rechner
2. Senden von Steuerdaten (z.B. Messung starten/stoppen, Nullsetzen der Sensoren) von Robotersteuerung an Messsystem
3. Senden von Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten von der Robotersteuerung an den externen Rechner
4. Senden von Reglerkorrekturwerten vom externen Rechner an die Robotersteuerung

Die Teilnehmer (Messsystem, Robotersteuerung und externer Rechner) der genannten Kommunikationspfade werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Funktionen beim Datenaustausch und der Datenverarbeitung kurz vorgestellt.

6.2.2 Kommunikation mit dem Messsystem

Das Messsystem zur Aufnahme der Kraftdaten beinhaltet drei 6-DOF-Messaufnehmer (FTS) und zwei Messverstärker (PMX). Da ein Messverstärker maximal 16 Kanäle aufzeichnen kann und die Messaufnehmer in Summe 18 Kanäle liefern, werden die Leitungen auf beide Messverstärker verteilt (siehe Abbildung 6-4). Die Messverstärker werden über eine separate Direktverbindung miteinander synchronisiert, sodass die Messdaten aller drei Messaufnehmer zeitlich synchronisiert an den externen Rechner übertragen werden können. Da sowohl Messverstärker als auch externer Rechner als PROFINET-Devices definiert sind, findet die Kommunikation über die Robotersteuerung als PROFINET-Controller statt. Um Rauschen und Störeinflüsse in den Sensordaten zu reduzieren, wird ein Besselfilter mit 50 Hz als Tiefpassfilter in den PMX eingestellt.

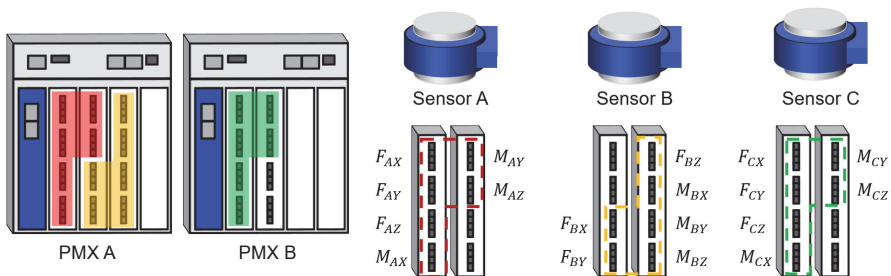


Abbildung 6-4: Zuordnung der Messaufnehmer-Kanäle zu Messverstärkern

Neben dem reinen Messdatenaustausch zwischen Messsystem und externem Rechner werden noch diverse Status- und Steuerungsdaten zwischen Messsystem,

Robotersteuerung und externem Rechner kommuniziert. Unter anderem werden der Verbindungsstatus und das Überschreiten von definierbaren Grenzwerten aller Kanäle als Statusbits an den externen Rechner gesendet. Über Steuersignale kann die Robotersteuerung das Nullsetzen der Sensordaten auf dem Messsystem auslösen. Die zulässigen kanalspezifischen Grenzwerte und Filtereinstellungen der Sensordaten können über die Weboberflächen der Messverstärker konfiguriert werden.

6.2.3 Kommunikation mit dem externen Rechner

Der externe Rechner muss zwei wesentliche Aufgaben erfüllen. Er dient zum einen als Hardwaresystem für die Ausführung des Reglers. Hierfür muss der Rechner als Datenaggregationspunkt agieren und eine schnelle Datenverarbeitung sowie Kommunikation gewährleisten. Dies wird ermöglicht, indem der Rechner durch eine zusätzliche PROFINET-IRT-Netzwerkkarte des Modells „Ixxat INpact PIR Slave PCIe“ von HMS als IRT-Device in die Architektur eingebunden wird. Zum anderen dient der Rechner als Datenlogger, um Mess- und Steuerdaten während experimenteller Versuchsreihen aufzuzeichnen. Auf dem externen Rechner wird daher ein Programm ausgeführt, das sowohl das Datenlogging als auch die Ausführung des Reglers übernimmt und in Echtzeit mit den anderen IRT-Teilnehmern kommuniziert. Aufgrund der Umsetzung auf einem leistungsfähigen separaten Rechner sind die Berechnungszeiten unkritisch und beeinflussen die Echtzeitfähigkeit des Systems nicht.

Das Programm auf dem Rechner wird über ein sogenanntes Steuerwort und Statuswort gesteuert. Dabei handelt es sich jeweils um ein Byte (8 Bit) lange Variablen, deren Bits unterschiedlichen Funktionen zugeordnet sind. Mit dem Steuerwort lassen sich über Bit 1–5 die Kraftsensoren nullen, das Datenlogging starten, eine Sensorinitialisierung durchführen und der Kraftregler aktivieren. Die restlichen Bits sind als Platzhalter für zukünftige Funktionen reserviert und werden aktuell nicht verwendet (A_Binder 2023).

Das Statuswort ermöglicht es der Robotersteuerung, den Programmstatus auf dem externen Rechner abzufragen. Bit 0 des Statusworts beschreibt, ob das Programm generell aktiv ist. Bit 1 und 5 quittieren, dass die Kraftsensoren genullt sind. Bit 4 bestätigt die Initialisierung von Kraftsensor C. Diese muss nach der Kopplung durchgeführt werden, damit der Messverstärker den durch die Kopplung neu verbundenen Sensor erkennt. Bit 2 und 3 bestätigen, dass das Datenlogging bzw. der Kraftregler aktiv ist. Weitere Bits dienen analog zum Steuerwort als Platzhalter und werden aktuell nicht verwendet. Über die Robotersteuerung kann das Steuerwort gesetzt und das Statuswort

abgefragt werden (A_Binder 2023). Tabelle 6-1 zeigt die Übersicht zur Bedeutung der einzelnen Bits des Status- und Steuerworts.

Tabelle 6-1: Steuerung und Zustandsabfrage des externen Rechnerprogramms

Bit	Steuerwort	Statuswort
0	-	Programm aktiv
1	Kraftsensoren A/B nullen	Kraftsensoren A/B sind genullt
2	Datenlogging starten	Datenlogging aktiv
3	Regler starten	Regler aktiv
4	Sensor C initialisieren	Sensor C initialisiert
5	Kraftsensor C nullen	Kraftsensor C genullt
6	-	-
7	-	-

Der Programmablauf beginnt mit dem Verbindungsaufbau mit dem PROFINET-Controller. Anschließend erfolgt das Nullsetzen der Kraftsensoren. Dies ist notwendig, da die Sensorwerte, bedingt durch Temperatur- und weitere Einflüsse, bei längerer Nichtbenutzung einen Drift zeigen. Nach dem Nullsetzen erfolgt die Regleraktivierung. Der Regler wird einmal pro IPO-Takt ausgeführt. Im nächsten Schritt wird das Datenlogging gestartet und mit der Messaufzeichnung begonnen. Die Daten werden in einer CSV-Datei abgelegt. Der detaillierte Programmablauf ist in Anhang B zu finden. (A_Binder 2023)

Das Nullsetzen der Sensoren, das Aktivieren und Deaktivieren des Reglers und das Starten und Stoppen der Messaufzeichnung kann jederzeit auch manuell ausgelöst werden. Das Rechnerprogramm läuft zu diesem Zweck in einer Dauerschleife und prüft regelmäßig das Steuerwort bzw. Statuswort, um so eine geforderte Aktion erkennen zu können und die jeweilige Aktion auszuführen. (A_Binder 2023)

6.2.4 Kommunikation mit der Robotersteuerung

Die Robotersteuerung (NC) stellt dem Regelungssystem Daten zur TCP-Position und zur Gelenkwinkelstellung des Roboters bereit. Sie erhält vom externen Rechner die Lagekorrekturwerte des Reglers und gibt diese an die Antriebsregelung weiter. Außerdem wird über die NC mithilfe des Steuer- und Statusworts der Programmablauf des externen Rechners gesteuert. Normalerweise findet die Kommunikation der NC mit weiteren Geräten über die in der Robotersteuerung integrierte SPS statt. Um eine bessere Zykluszeit des Reglers zu erreichen, wird die SPS bei der Kommunikation zwischen NC

und externem Rechner übersprungen. Dies kann mithilfe der sogenannten NC-Peripherie umgesetzt werden. Dabei werden die PROFINET-Eingangs- und -Ausgangsadressen des externen Rechners in der NC hinterlegt. Die NC kann für diese definierten Adressbereiche Daten direkt aus dem PROFINET-Bus auslesen oder in den PROFINET-Bus schreiben und somit eine besonders schnelle Kommunikation mit dem Regelungssystem sicherstellen (siehe Abbildung 6-5). (A_Binder 2023)

Die Kommunikation mit dem Regelungssystem erfordert einen zum normalen Programmablauf parallel stattfindenden kontinuierlichen Datenaustausch. Hierfür werden sogenannte Synchronaktionen eingesetzt. Dies sind NC-Befehle, die nach erstmaliger Ausführung in der NC zyklisch im IPO-Takt im Hintergrund wiederholt werden (Siemens AG 2024). Mithilfe dieser Funktion werden die notwendigen TCP-Daten kontinuierlich an den externen Rechner übermittelt sowie Lagekorrekturwerte vom externen Rechner empfangen und an die Antriebsregler weitergegeben.

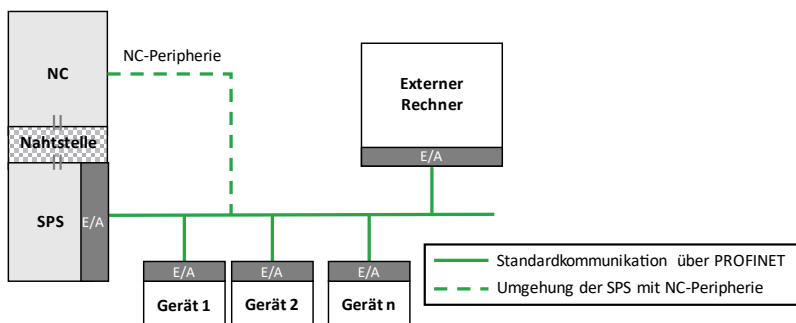


Abbildung 6-5: Kommunikation zwischen NC und externem Rechner über NC-Peripherie

6.3 Entwicklung des Regelungssystems

Auf Basis der Anforderungen an den Regler und der technischen Restriktionen der Steuerungsarchitektur wird im Folgenden die Entwicklung des Reglers beschrieben. Zunächst wird die grundlegende Regelungsstrategie erarbeitet. Anschließend folgt die Entwicklung eines Modells zur Bestimmung der inneren Kräfte. Da aufgrund von technischen Restriktionen nur auf den Lageregelkreis der Roboter zugegriffen werden kann, ist außerdem ein Nachgiebigkeitsmodell erforderlich, das den Transfer der inneren Kräfte in Lagekorrekturwerte ermöglicht. Das Nachgiebigkeitsmodell setzt sich aus den

posenabhängigen Nachgiebigkeiten der einzelnen Roboter und der Nachgiebigkeit des Koppelmoduls zusammen.

6.3.1 Regelungsstrategie des gekoppelten Robotersystems

Vor der Entwicklung des Regelungssystems muss zunächst die grundlegende Regelungsstrategie bestimmt werden. Diese beinhaltet die Auswahl eines Koordinationsansatzes (Master-Slave oder gleichberechtigt), die Berechnungsmethodik der inneren Kraft und den Reglertyp.

Aufgrund der von der Robotersteuerung gegebenen Einschränkungen kann eine Kraftregelung in der Regelungskaskade ausschließlich vor der Positionsregelung platziert werden. Daraus resultiert die sogenannte Kraftdominanz. Dies bedeutet, dass zur Einstellung der gewünschten Kraft ein Positionsfehler des TCP in Kauf genommen wird. In einem gleichberechtigten Koordinationsansatz bewegen sich beide Roboter zur Einstellung der gewünschten Kraft in gegenläufiger Richtung. Die von beiden Roboter verursachten Positionsfehler kompensieren sich gegenseitig, sodass der gesamte Positionsfehler des TCP minimal wird. Im Master-Slave-Ansatz führt hingegen nur der Slave-Roboter eine kraftbasierte Positionskorrektur durch, wodurch der TCP stärker von seiner Soll-Pose abweicht. Es entsteht ein größerer Positionsfehler.

Obwohl der gleichberechtigte Koordinationsansatz mit einem geringeren Positionsfehler des Koppelmodul-TCPs einhergeht, wird die Master-Slave-Struktur aufgrund ihrer einfacheren Umsetzbarkeit realisiert. Dadurch müssen nur noch sechs statt zwölf Reglerparameter berechnet werden, Reglerinstabilitäten betreffen nur einen Roboter direkt und eine ungewollte Wechselwirkung zwischen zwei kraftgeregelten Robotern kann ebenfalls vermieden werden. Da der in Kauf genommene größere Positionsfehler systematischer Natur ist, kann er zukünftig leicht vorhergesagt und kompensiert werden. (A_Kappus 2023)

Wie bereits in den Anforderungen in Kapitel 6.1 beschrieben, kann eine Kraftregelung aufgrund der eingeschränkten Schnittstellen der Robotersteuerung nur indirekt über die Lageregelung erfolgen. Daher verbleiben als Reglertypen noch die Admittanzregelung oder Ansätze zur parallelen Regelung. Die Admittanzregelung erfordert unter anderem eine Modellierung der Umgebungssteifigkeit. Da diese im gekoppelten Fall wesentlich von der Steifigkeit der beiden Roboter abhängt, ist sie nicht konstant und muss kontinuierlich in Abhängigkeit der Pose der Roboter neu berechnet werden. Die Umgebungssteifigkeit kann auch direkt als Inverse im Reglergesetz berücksichtigt werden.

Die daraus resultierende Nachgiebigkeitsmatrix erlaubt die Abbildung von Kräften auf Positionen und ermöglicht damit die Integration der Kraftregelschleife in die roboterseitigen Regler. Da sich die aus der Nachgiebigkeit berechneten Positionskorrekturwerte mit der eigentlichen Lage-Regelabweichung überlagern, handelt es sich letztendlich um eine indirekte parallele Kraftregelung. Sowohl die Sollwertvorgabe der Roboterlageregelung als auch die Positionskorrekturwerte der Kraftregelung beeinflussen die Roboterregelung gleichzeitig. Aufgrund der geringeren Komplexität des parallelen Ansatzes gegenüber einer vollwertigen Admittanzregelung wird dieser weiterverfolgt.

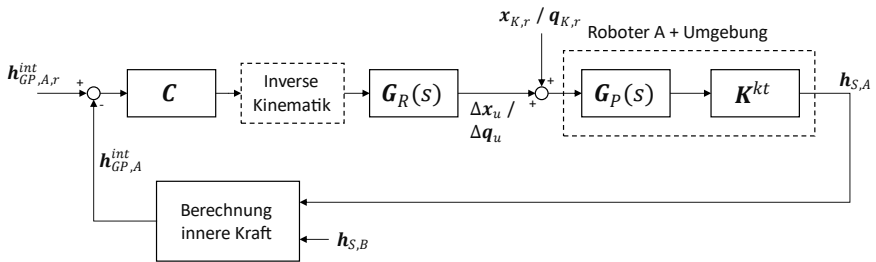


Abbildung 6-6: Konzept des in der Arbeit eingesetzten parallelen Kraftreglers (A_Kap-pus 2023)

Abbildung 6-6 zeigt das Konzept der Kraftregelschleife des parallelen Reglers. Aus den Kraftsensordaten $\mathbf{h}_{S,A}$ und $\mathbf{h}_{S,B}$ des Koppelmoduls wird zunächst die innere Kraft $\mathbf{h}_{GP,A}^{int}$ berechnet. Anschließend wird innerhalb der Kraftregelschleife die Regelabweichung aus der Führungsgröße $\mathbf{h}_{GP,A,r}^{int}$ und der inneren Kraft $\mathbf{h}_{GP,A}^{int}$ bestimmt. Sofern ein reines Ausregeln der Kopplungskräfte gewünscht ist, ist $\mathbf{h}_{GP,A,r}^{int} = 0$ und die innere Kraft $\mathbf{h}_{GP,A}^{int}$ entspricht der Regelabweichung. Die Regelabweichung wird über die Nachgiebigkeitsmatrix \mathbf{C} in Positionswerte umgerechnet, die optional in den Gelenkwinkelraum transformiert werden können. Über das Reglergesetz $G_R(s)$ wird nun die Stellgröße $\Delta \mathbf{x}_u$ bzw. $\Delta \mathbf{q}_u$ bestimmt, je nachdem, ob die Kraftregelung in Gelenkwinkelraum oder im kartesischen Raum ausgeführt werden soll. Die Werte werden mit der Sollwertvorgabe $\mathbf{q}_{K,r}$ bzw. $\mathbf{x}_{K,r}$, die als Führungsgröße der Lageregelung des Slave-Roboters dient und vom Master-Roboter kommt, verrechnet und an die interne Lageregelschleife des Roboters übergeben. $G_P(s)$ ist die Übertragungsfunktion des Lagereglers und \mathbf{K}^{kt} die Kontaktsteifigkeit des Systems. Da die gewünschte innere Kraft letztendlich über eine

Positionskorrektur eingestellt wird, entsteht ein Positionsfehler. Dieses als Kraftdominanz bezeichnete Verhalten muss bei der Charakterisierung des gekoppelten Systems in Kapitel 7 berücksichtigt werden.

Das Verhalten des vorgestellten Reglers hängt im Wesentlichen von der Methodik zur Berechnung der inneren Kraft, von der Modellierung der Nachgiebigkeit und von dem gewählten Reglergesetz ab. In den folgenden Kapiteln werden diese Aspekte erläutert.

6.3.2 Berechnung der inneren Kraft

Zur Bestimmung der inneren Kraft sind zwei vorangehende Schritte erforderlich. Zunächst muss im Koppelmodul für jeden Roboter ein Greifpunkt-Koordinatensystem definiert werden (siehe Abbildung 6-7). Diese Koordinatensysteme werden als $\Sigma_{GP,A}$ und $\Sigma_{GP,B}$ bezeichnet. Die gemessenen Kräfte aus den Sensoren werden von ihren eigenen Koordinatensystemen $\Sigma_{S,A}$ und $\Sigma_{S,B}$ in die Greifpunkt-Koordinatensysteme transferiert. Da die Sensoren die Kräfte auf die Roboter beschreiben, eigentlich aber die Kräfte, die die Roboter auf das Koppelmodul ausüben, benötigt werden, werden die Sensorwerte zusätzlich noch negiert.

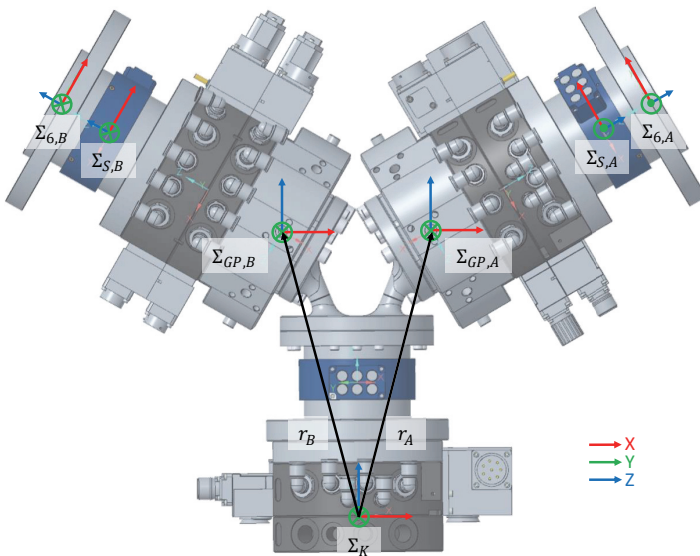


Abbildung 6-7: Bezugssysteme im Koppelmodul (in Anlehnung an A_Kappus 2023)

Als zweiter vorangehender Schritt werden die Sensorsignale außerdem noch um die Gewichtskraft der fest am Sensor montierten Komponenten bereinigt. Zu diesen Komponenten gehören die Adapterplatte und der Schnellwechselkopf (siehe Abbildung 6-8). Die Kompensation berücksichtigt ebenfalls die sich verändernde Wirkungsrichtung der Gewichtskraft gegenüber den Sensorkoordinatensystemen bei einer Orientierungsänderung des Koppelmoduls. Der ankoppelbare Teil des Koppelmoduls findet in der Gewichtskraftkompensation hingegen keine Berücksichtigung, da sein Gewichtseinfluss bereits bei der Berechnung der inneren Kräfte adressiert wird. (A_Kappus 2023)



Abbildung 6-8: Bei der Gewichtskraftkompensation berücksichtigte Komponenten

Ausgehend von den bereinigten Sensordaten wird im Folgenden die Berechnung der inneren Kraft hergeleitet und erläutert. Die Gesamtkraft \mathbf{h}_K im Koppelmodulkoordinatensystem Σ_K setzt sich aus

$$\mathbf{h}_K = \mathbf{G}_A \mathbf{h}_A + \mathbf{G}_B \mathbf{h}_B \quad 6-1$$

zusammen. \mathbf{h}_a und \mathbf{h}_b beschreiben die Kräfte der Roboterendeffektoren auf das Koppelmodul in den Greifpunktsystemen $\Sigma_{GP,A}$ und $\Sigma_{GP,B}$. \mathbf{G}_A und \mathbf{G}_B sind Krafttransformationsmatrizen nach Formel 2-15, die die Kräfte in das Koppelmodulsystem transformieren. Da die Orientierung der betrachteten Koordinatensysteme gleich ist und daher lediglich eine Translation erforderlich ist, vereinfachen sich die Transformationsmatrizen \mathbf{G}_A und \mathbf{G}_B zu

$$\mathbf{G}_A = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{S}(\mathbf{r}_A) & \mathbf{I}_3 \end{pmatrix} \quad \mathbf{G}_B = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{S}(\mathbf{r}_B) & \mathbf{I}_3 \end{pmatrix}, \quad 6-2$$

mit \mathbf{r}_A und \mathbf{r}_B , die die Translation zwischen den Greifpunktsystemen und Σ_K beschreiben.

Zur vereinfachten Berechnung werden die Endeffektorkräfte \mathbf{h}_A und \mathbf{h}_B in einem gemeinsamen (12×1) Spaltenvektor $\mathbf{h}_{AB} = (\mathbf{h}_A^T \mathbf{h}_B^T)^T$ zusammengefasst. Analog dazu werden auch die Matrizen \mathbf{G}_A und \mathbf{G}_B in der sogenannten Grasp-Matrix

$$\mathbf{G} = (\mathbf{G}_A \mathbf{G}_B) \quad 6-3$$

mit der Dimension (6×12) zusammengefasst (Uchiyama & Dauchez 1988). Formel 6-1 vereinfacht sich dann zu

$$\mathbf{h}_K = \mathbf{G} \mathbf{h}_{AB}. \quad 6-4$$

Da \mathbf{r}_A und \mathbf{r}_B geometrisch bedingt konstante Vektoren sind, ist auch die Grasp-Matrix \mathbf{G} konstant.

Nach (Bonitz & Hsia 1996; Erhart & Hirche 2015; Heck et al. 2013; Walker et al. 1991) setzt sich die Endeffektorkraft \mathbf{h}_{AB} aus einem inneren Anteil \mathbf{h}^{int} und einem externen Anteil \mathbf{h}^{ext} , der die Bewegung des Objekts bzw. des Koppelmoduls bewirkt, gemäß

$$\mathbf{h}_{AB} = \mathbf{h}^{\text{int}} + \mathbf{h}^{\text{ext}} \quad 6-5$$

zusammen. Der externe Anteil der Kräfte kann mithilfe einer sogenannten Pseudoinverse bestimmt werden. Bei einer Pseudoinverse handelt es sich um eine verallgemeinerte Inverse einer nicht quadratischen Matrix, wie beispielsweise der Grasp-Matrix. Die externe Kraft kann mithilfe der Pseudoinverse \mathbf{G}^+ der Grasp-Matrix \mathbf{G} nach

$$\mathbf{h}^{\text{ext}} = \mathbf{G}^+ \mathbf{G} \mathbf{h}_{AB} \quad 6-6$$

berechnet werden (Verginis & Dimarogonas 2020).

Durch Einsetzen von Formel 6-6 in Formel 6-5 und Umformen nach \mathbf{h}^{int} ergibt sich die zentrale Gleichung zur Bestimmung der inneren Kräfte gemäß

$$\mathbf{h}^{\text{int}} = (\mathbf{I}_{12} - \mathbf{G}^+ \mathbf{G}) \mathbf{h}_{AB}. \quad 6-7$$

Da \mathbf{G} und \mathbf{h} bekannt sind, lässt sich die innere Kraft berechnen, sofern eine Pseudoinverse \mathbf{G}^+ ausgewählt wird.

Weil die Grasp-Matrix nicht quadratisch ist, gibt es unendlich viele Lösungen die Kräfte im Koppelmodul auf die Endeffektorkräfte aufzuteilen. Die Kraftaufteilung wird über die Wahl der Pseudoinversen gesteuert (Walker et al. 1991). Es sollen zwei mögliche Pseudoinversen näher betrachtet werden. Die sogenannte gewichtete Pseudoinverse

$$\mathbf{G}_w^+ = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{G} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G}^T)^{-1} \quad 6-8$$

erlaubt die Einstellung der Kraftverteilung durch die Wahl der Gewichtungsmatrix \mathbf{W} , die sich im Fall von zwei Robotern als Blockdiagonalmatrix aus den Größen \mathbf{W}_A und \mathbf{W}_B ergibt (Chung et al. 2005):

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_A & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{W}_B \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \mathbf{W}_A = \mathbf{W}_B = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{O}_3 & w_G \cdot \mathbf{I}_3 \end{pmatrix} \quad 6-9$$

Die tatsächliche Gewichtung lässt sich dann über w_G einstellen. Bei der Wahl von $w_G = 1$ bzw. $\mathbf{W} = \mathbf{I}$ vereinfacht sich die gewichtete Pseudoinverse zur sogenannten Moore-Penrose-Inverse (Moore 1920; Penrose 1955):

$$\mathbf{G}^+ = \mathbf{G}^T (\mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1}. \quad 6-10$$

Die Moore-Penrose-Inverse minimiert die Endeffektorkräfte und sorgt daher für eine gleichmäßige Aufteilung der Kraft \mathbf{h}_K auf die Endeffektoren. Es sind allerdings auch ungleichmäßige Gewichtungen denkbar. Diese erlauben eine bessere Nutzung des Potentials, äußere Momente am Koppelmodul durch Kräfte der Endeffektoren und zugehörige Hebelarme statt entsprechender Momente zu kompensieren. (Alberts & Soloway 1988; Schneider & Cannon 1992; Walker et al. 1991)

Eine Alternative zur gewichteten Pseudoinverse stellt die Pseudoinverse \mathbf{G}_A^+ nach (Walker et al. 1991) dar. Ihr Ansatz verfolgt das Ziel, innere Kräfte bzw. Spannungen in einem Objekt zu kompensieren. Für vorliegenden Fall mit zwei Robotern berechnet sie sich wie folgt:

$$\mathbf{G}_A^+ = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{O}_3 \\ -\mathbf{S}(\mathbf{r}_A) & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_3 & \mathbf{O}_3 \\ -\mathbf{S}(\mathbf{r}_B) & \mathbf{I}_3 \end{pmatrix} \quad 6-11$$

Ein einfacher Lastfall als Beispiel zeigt den Unterschied beider Pseudoinversen. Die Roboter sollen die Gewichtskraft des Koppelmoduls aufnehmen. Dafür muss im Koppelmodulkoordinatensystem Σ_K die Kraft ${}^K \mathbf{h}_K$ mit

$${}^K \mathbf{h}_K = (0 \ 0 \ F_G \ 0 \ 0 \ 0)^T \quad 6-12$$

entgegen der Gewichtskraft wirken. Die Aufteilung von ${}^K \mathbf{h}_K$ auf die beiden Greifpunktssysteme $\Sigma_{GP,A}$ und $\Sigma_{GP,B}$ erfolgt nun mithilfe einer Pseudoinverse. Da ${}^K \mathbf{h}_K$ bereits im Koppelmodulsystem beschrieben ist (d. h. ${}^K \mathbf{h}_K = \mathbf{G} \mathbf{h}_{AB}$), vereinfacht sich Gleichung 6-6 zur Berechnung der externen Kraft zu

$${}^{GP} \mathbf{h}_{GP}^{ext} = \mathbf{G}^+ {}^K \mathbf{h}_K. \quad 6-13$$

Aus Abbildung 6-7 lässt sich entnehmen, dass aufgrund des symmetrischen Aufbaus des Koppelmoduls für die x- und z-Komponenten von \mathbf{r}_A und \mathbf{r}_B gilt:

$$r_{A,x} = -r_{B,x} = l \quad 6-14$$

$$r_{A,z} = r_{B,z} \quad 6-15$$

Mithilfe der Vereinfachungen aus Gleichung 6-14 und 6-15 und unter Verwendung der Moore-Penrose-Inverse stellt sich die externe Kraft ${}^{GP} \mathbf{h}_{GP}^{ext}$

$${}^{GP} \mathbf{h}_{GP}^{ext} = \left(0 \ 0 \ \frac{F_G}{2} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{F_G}{2} \ 0 \ 0 \ 0 \right)^T \quad 6-16$$

ein. Wie bei einer gleichmäßigen Aufteilung der Kräfte zu erwarten, wirkt jeweils die halbe Gewichtskraft an den Endeffektoren der Roboter in z-Richtung. Bei Verwendung der Pseudoinversen nach (Walker et al. 1991) ergibt sich die externe Kraft hingegen zu:

$${}^{GP} \mathbf{h}_{GP}^{ext} = \left(0 \ 0 \ \frac{F_G}{2} \ 0 \ -l \frac{F_G}{2} \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{F_G}{2} \ 0 \ -l \frac{F_G}{2} \ 0 \right)^T. \quad 6-17$$

Im Vergleich zur Moore-Penrose-Inverse ergeben sich ebenfalls Momente um die y-Achse. Diese entsprechen den Schnittmomenten, die sich aufgrund der Gewichtskraft in einem links und rechts gelagerten Balken in der Mitte des Balkens ergeben. Die Berücksichtigung dieses Schnittmoments führt zu einem spannungsfreien Zustand im Inneren des Koppelmoduls.

Die Kräfte im Inneren des Koppelmoduls stellen allerdings kein Problem dar, da das Koppelmodul auf wesentlich höhere Prozesskräfte ausgelegt wurde. Die Herstellung eines vollkommen spannungsfreien Zustands ist daher weniger relevant als die Minimierung der Endeffektorkräfte. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Arbeit die gewichtete Pseudoinverse verwendet.

Für die Wahl der Gewichtung soll nun ein weiterer Lastfall betrachtet werden. Im Koppelmodulbezugssystem Σ_K soll nun ein Moment M_y in y-Richtung aufgebracht werden:

$${}^K\mathbf{h}_K = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ M_y \ 0)^T. \quad 6-18$$

Mit der gewichteten Matrix nach Gleichung 6-8 und 6-9 ergibt sich die externe Kraft:

$${}^{GP}\mathbf{h}_{GP}^{ext} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{l}{2l^2 + \frac{2}{w_G}}M_y & 0 & \frac{1}{2w_GL^2 + 2}M_y & 0 & 0 & 0 & \frac{l}{2l^2 + \frac{2}{w_G}}M_y & 0 & \frac{1}{2w_GL^2 + 2}M_y & 0 \end{pmatrix}^T. \quad 6-19$$

Mithilfe des Gewichtungsfaktors $w_G \in (0, \infty)$ lässt sich, wie bereits erläutert, einstellen, ob angreifende Momente stärker durch Kräfte oder Momente in den Greifpunkten aufgenommen werden sollen. Im Fall von $w_G = 1$ erfolgt die Aufteilung gleichmäßig (siehe Abbildung 6-9). Ist $w_G > 1$, werden angreifende Momente stärker durch Kräfte an den Endeffektoren aufgenommen. Bei $w_G < 1$ werden angreifende Momente stärker durch Momente an den Endeffektoren aufgenommen. Für die erste Version der Kraftregelung wird eine gleichmäßige Aufnahme angestrebt und $w_G = 1$ gewählt. Da w_G als Variable im Reglercode implementiert ist, kann die Gewichtung zukünftig leicht angepasst werden.

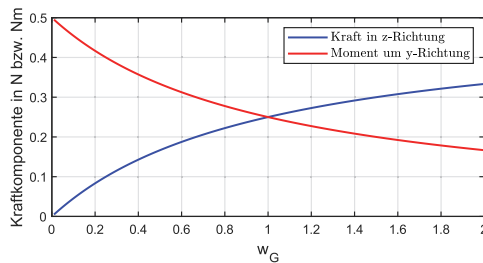


Abbildung 6-9: Aufteilung der Last auf Kraftkomponenten in Abhängigkeit der Gewichtung w_G , mit Beispielwerten $l=1$ und $M_y=1$.

Durch die Festlegung einer geeigneten Pseudoinverse kann nun die innere Kraft nach Gleichung 6-7 bestimmt werden. Mithilfe des Nachgiebigkeitsmodells werden aus dieser inneren Kraft Stellgrößen für die einzelnen Roboterachsen bestimmt. Im folgenden Kapitel wird die Modellierung der Nachgiebigkeit erläutert.

6.3.3 Nachgiebigkeitsmodell des gekoppelten Systems

Das Nachgiebigkeitsmodell dient zur Abbildung der inneren Kräfte auf Lage-Stellwerte. Es beinhaltet die Nachgiebigkeit der beiden Roboter und die Nachgiebigkeit des Koppelmoduls und wurde im Rahmen der Arbeit von (A_Kappus 2023) entwickelt. Da die drei Teilsysteme in Reihe geschaltet sind, berechnet sich die Gesamtnachgiebigkeit \mathbf{C}^{ges} mit

$$\mathbf{C}^{\text{ges}}(\mathbf{q}) = \mathbf{C}^{R,A}(\mathbf{q}) + \mathbf{C}^K + \mathbf{C}^{R,B}(\mathbf{q}). \quad 6-20$$

Der Index oben rechts einer Nachgiebigkeit bzw. Steifigkeit benennt das jeweils zugeordnete Teilsystem. Die Koppelmodulnachgiebigkeit \mathbf{C}^K wird im Wesentlichen durch die integrierten Federsysteme bestimmt. Alle anderen Komponenten des Koppelmoduls sind Stahlbauteile und daher für die Modellierung als Starrkörper anzunehmen. Die Roboternachgiebigkeiten $\mathbf{C}^{R,A}(\mathbf{q})$ und $\mathbf{C}^{R,B}(\mathbf{q})$ sind hingegen poseabhängig. Die Nachgiebigkeit kann im Arbeitsraum je nach Pose um mehrere Größenordnungen schwanken. Daher ist es nicht zielführend, einen konstanten Durchschnittswert anzunehmen. Stattdessen wird ein Modell zur Online-Berechnung der Roboternachgiebigkeit in Abhängigkeit von der aktuellen Pose entwickelt, das nachfolgend erläutert wird.

Roboternachgiebigkeit

Der Robotersteuerungsanbieter stellt zwar Informationen zur Nachgiebigkeit der eingesetzten Roboter zur Verfügung, allerdings sind diese Werte nur für einen Teilbereich des Konfigurationsraums gültig. Daher wird ein eigenes Modell benötigt, das für beliebige Konfigurationen Nachgiebigkeitswerte bereitstellen kann.

Die Bestimmung der Roboternachgiebigkeiten soll im Roboter-TCP $\Sigma_{6,i}$ bezüglich des kartesischen Basiskoordinatensystems $\Sigma_{B,i}$ erfolgen. Die Transformation der Gelenknachgiebigkeiten der Roboter erfolgt nach Gleichung 2-24 mit:

$${}^{B,i}\mathbf{C}_{6,i}^{R,i}(\mathbf{q}_i) = \mathbf{J}(\mathbf{q}_i)\mathbf{C}_J\mathbf{J}^T(\mathbf{q}_i). \quad 6-21$$

Der Index i bezeichnet den jeweiligen Roboter. Für die Bestimmung der Nachgiebigkeit nach Gleichung 6-21 wird die Nachgiebigkeitsmatrix im Gelenkwinkelraum für beliebige

Konfigurationen benötigt. Zur Bestimmung dieser Matrix können die Herstellerdaten des Robotersteuerungsanbieters genutzt werden. Der Anbieter stellt für eine Handachsenkonfiguration der Roboter von $A_4 = A_5 = A_6 = 0^\circ$ Steifigkeitswerte im Arbeitsraum zur Verfügung, die sich über den Kehrwert in Nachgiebigkeiten umrechnen lassen (siehe Anhang C). Mithilfe eines Fittings lassen sich so die optimalen Werte der Nachgiebigkeitsmatrix C_j bestimmen, für die die berechneten TCP-Nachgiebigkeiten mit den gegebenen TCP-Nachgiebigkeiten des Steuerungsherstellers möglichst gut übereinstimmen.

Für das Fitting werden nur Punkte des Arbeitsraums betrachtet, die auch vom gekoppelten System erreicht werden können. Da die Torsionssteifigkeiten der Gelenke der Haupteinflussfaktor für die Gesamtnachgiebigkeit der Roboter sind (Uhlmann et al. 2018), werden außerdem die Kippnachgiebigkeiten der Gelenke und die Nachgiebigkeit der Armglieder vernachlässigt. Weiterhin wird die Nachgiebigkeitsmatrix C_j vereinfacht als Diagonalmatrix angenommen. Damit sind die zu optimierenden Parameter auf insgesamt sechs Diagonalelemente beschränkt. Die ermittelten Gelenknachgiebigkeiten sind in Tabelle 6-2 dargestellt.

Tabelle 6-2: Modellierte Gelenknachgiebigkeiten (A_Kappus 2023)

Gelenk	Gelenknachgiebigkeit in $10^{-9} \frac{\text{rad}}{\text{Nm}}$
1	371,9
2	210,9
3	430,1
4	1845
5	959,1
6	69,76

Zur Validierung der Modellierung der Roboternachgiebigkeit wird mithilfe der ermittelten Gelenknachgiebigkeiten für mehrere Posen die TCP-Nachgiebigkeit im Basiskoordinatensystem bestimmt und mit den Werten des Steuerungsanbieters verglichen. Die prozentuale Abweichung über den relevanten Arbeitsraum wird in Abbildung 6-10 dargestellt. Die x- und z-Achse der Schaubilder beschreiben die TCP-Pose. Über die Farbskala ist die prozentuale Abweichung ersichtlich, wobei eine negative Abweichung einer zu klein geschätzten Nachgiebigkeit entspricht. Die rot gestrichelte Linie markiert die Mittelebene zwischen beiden Robotern und steht damit repräsentativ für den

relevantesten Bereich des Arbeitsraums. Der gestrichelte Kasten markiert den untersuchten Abschnitt des Arbeitsraums.

Es zeigt sich, dass die simulierten Nachgiebigkeiten um bis zu $\pm 50\%$ von den Werten des Steuerungsherstellers abweichen. Die maximalen, minimalen und mittleren prozentualen Abweichungen sind in Tabelle 6-3 dargestellt.

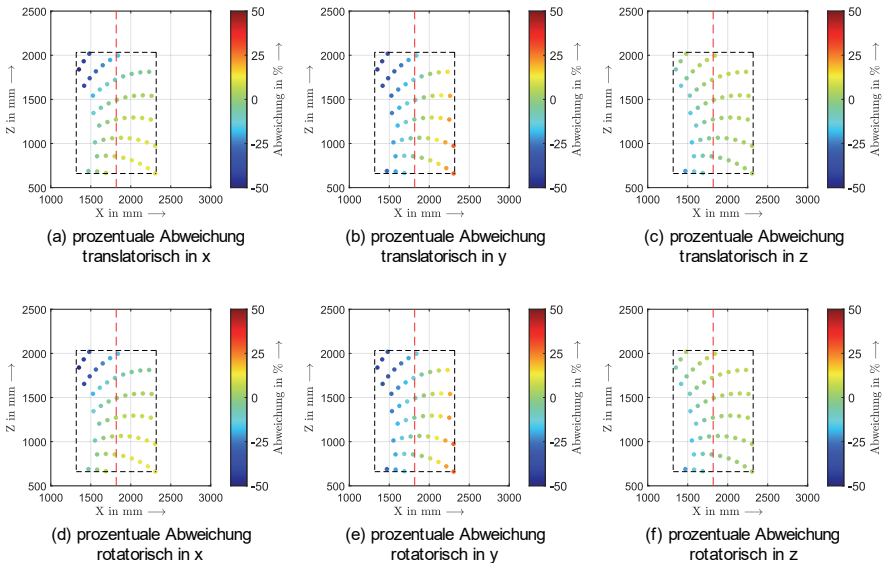


Abbildung 6-10: Prozentuale Abweichung zwischen dem Roboter-Nachgiebigkeitsmodell und den vom Hersteller angegebenen Nachgiebigkeiten (A_Kappus 2023)

Tabelle 6-3: Minimale, maximale und mittlere prozentuale Abweichung der modellierten TCP-Nachgiebigkeiten (A_Kappus 2023)

Kartesische Richtung im Basis-KOS	x	y	z	Rot (x)	Rot (y)	Rot (z)
Minimale Abweichung in %	-51,3	-43,2	-20,9	-55,9	-6,64	-38,9
Maximale Abweichung in %	11,8	27,9	6,56	5,56	3,26	20,5
Mittlere Abweichung in %	-4,8	-7,0	-1,5	-13,9	0,1	-4,5

Eine zu klein geschätzte Nachgiebigkeit bietet den Vorteil einer größeren Stabilitätsreserve des Reglers und ist daher nicht problematisch. Eine zu groß geschätzte Nachgiebigkeit kann hingegen Stabilitätsprobleme verursachen. Da die simulierten TCP-Nachgiebigkeiten im Allgemeinen jedoch zu gering oder größtenteils passend geschätzt werden und nur vereinzelt wenig relevante Posen auftreten, in denen die

Nachgiebigkeit deutlich zu hoch geschätzt wird, wird die Güte des Modells als ausreichend eingestuft.

Damit die Roboternachgiebigkeiten mit der Koppelmodulnachgiebigkeit verrechnet werden können, müssen sie im selben Bezugssystem $\Sigma_{FS,A}$ dargestellt werden (siehe Abbildung 6-11). Um die hierfür notwendigen Transformationsschritte zu vereinfachen, werden bei der Berechnung der TCP-Steifigkeiten angepasste Jacobi-Matrizen verwendet, die die translatorische Verschiebung zwischen den Roboter-TCPs $\Sigma_{6,A}$ bzw. $\Sigma_{6,B}$ und den Federsystembezugssystemen $\Sigma_{FS,A}$ bzw. $\Sigma_{FS,B}$ bereits berücksichtigen. Alle weiteren Transformationsschritte zur Berechnung der Gesamtnachgiebigkeit werden am Ende des Kapitels erläutert (siehe Gleichung 6-27, 6-28, 6-29).

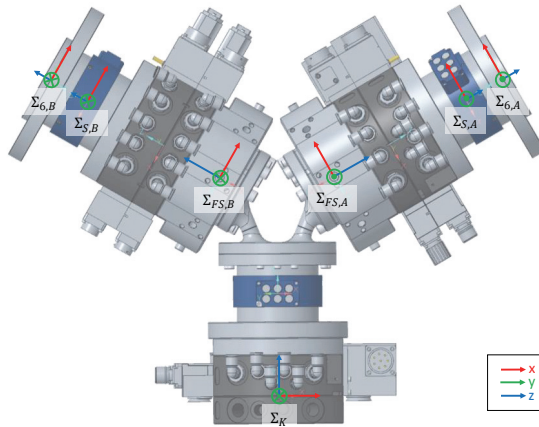


Abbildung 6-11: Translatorische Verschiebung zwischen den Flanschkoordinatensystemen und den Federkoordinatensystemen

Koppelmodulnachgiebigkeit

Die Koppelmodulnachgiebigkeit setzt sich aus den Federsystemnachgiebigkeiten zusammen, die sich wiederum aus den Nachgiebigkeiten der einzelnen Federelemente ergeben. Im Folgenden wird daher zunächst die Berechnung der Steifigkeit der einzelnen Federelemente erläutert. Anschließend werden diese miteinander verrechnet und in die Federsystemnachgiebigkeiten umgerechnet.

Abbildung 6-12 zeigt ein exemplarisches Federelement und die Platzierung des Koordinatensystems Σ_E im Element. Die Steifigkeitsmatrix des Elements soll simulativ in

einer FEM-Simulation bestimmt werden. Dazu werden anhand von bekannten Zug-, Druck- und Torsionssteifigkeiten der Federelemente ein passendes Materialmodell ausgewählt und anschließend unterschiedliche Belastungsfälle in der Simulation betrachtet. Die Belastungsfälle simulieren schrittweise eine translatorische Verschiebung von bis zu 2 mm und eine rotatorische Verdrehung um bis zu 5° im Bezugssystem Σ_E . Anhand der aus der Simulation resultierenden Kräfte und der vorgegebenen Verschiebung bzw. Verdrehung werden die richtungsabhängigen Steifigkeiten bestimmt.

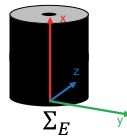


Abbildung 6-12: Koordinatensystem eines Federelements (A_Kappus 2023)

Abbildung 6-13 zeigt exemplarisch die ermittelten Kennlinien für eine Verschiebung in x- und y-Richtung. Bei der Verschiebung in x-Richtung zeigt sich ein stark unterschiedliches Verhalten zwischen einer positiven (Zug) und einer negativen (Druck) Verschiebung. Aufgrund der in Kapitel 5.2.3 beschriebenen Parallelschaltung von Federelementen, die bei einer radialen Belastung des Federsystems dazu führt, dass immer Zug-/Druck-Federelementpaare gemeinsam belastet werden und sich das Federsystem damit in positiver und negativer radialer Richtung gleich verhält, werden die in der Simulation ermittelten Zug- und Druckverläufe gemittelt. Anschließend werden die Verläufe für jeden translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrad des Bezugssystems Σ_E zu je einem Wert gemittelt.

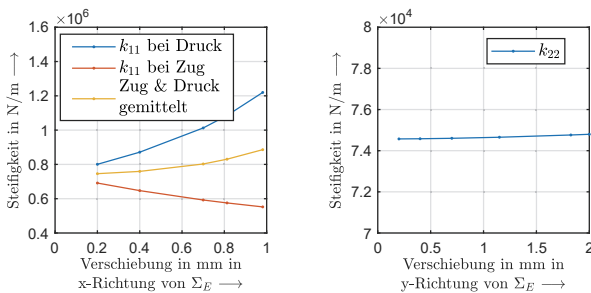


Abbildung 6-13: Simulativ (FEM) ermittelte Steifigkeitsverläufe eines Federelements der Form C nach DIN 95363 mit 40 mm Durchmesser, 30 mm Höhe und Shorehärte 70 (A_Kappus 2023)

Die ermittelten Steifigkeitswerte werden in Tabelle 6-4 exemplarisch für ein Federelement der Form C nach DIN 95363 mit 40 mm Durchmesser, 30 mm Höhe und einer Shorehärte von 70 dargestellt. Die Steifigkeitsmatrix für ein einzelnes Federelement ergibt sich damit gemäß

$${}^E \mathbf{K}_E^E = \begin{pmatrix} \bar{k}_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{k}_{22} & 0 & 0 & 0 & \bar{k}_c \\ 0 & 0 & \bar{k}_{33} & 0 & -\bar{k}_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{k}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\bar{k}_c & 0 & \bar{k}_{55} & 0 \\ 0 & \bar{k}_c & 0 & 0 & 0 & \bar{k}_{66} \end{pmatrix}. \quad 6-22$$

Laut der in Kapitel 5.2.4 in Abbildung 5-14 dargestellten Konfigurationsmöglichkeiten des Federsystems besitzt ein solches acht Platzierungsflächen für die Federelemente. Jede Platzierungsfläche kann mit einem einzelnen oder drei schlankeren Federelementen bestückt werden. Falls eine Dreierkonfiguration vorliegt, müssen zunächst die Steifigkeiten der drei Federelemente einer Platzierungsfläche in ein gemeinsames Bezugssystem transformiert werden. Abbildung 6-14 zeigt die Zuordnung der Koordinatensysteme zu den Platzierungsflächen des Federsystems. Die Platzierungs-

Tabelle 6-4: Gemittelte simulative Steifigkeitskomponenten eines Federelements der Form C nach DIN 95363 mit 40 mm Durchmesser, 30 mm Höhe und Shorehärte 70 (A_Kappus 2023)

Komponenten der Steifigkeitsmatrix	Werte
\bar{k}_{11}	$8,048 \times 10^5 \text{ N/m}$
\bar{k}_{22}	$7,466 \times 10^4 \text{ N/m}$
\bar{k}_{33}	$7,466 \times 10^4 \text{ N/m}$
\bar{k}_{44}	$8,398 \times 10^0 \text{ Nm/rad}$
\bar{k}_{55}	$3,107 \times 10^1 \text{ Nm/rad}$
\bar{k}_{66}	$3,107 \times 10^1 \text{ Nm/rad}$
\bar{k}_c	$1,061 \times 10^3 \text{ N}$

flächen werden mit $j = 1 \dots 8$ indiziert. Die Bezugssysteme innerhalb einer Platzierungsfläche werden mit $i = 0 \dots 3$ indiziert, wobei der Index 0 die mittlere Position der Platzierungsfläche bezeichnet.

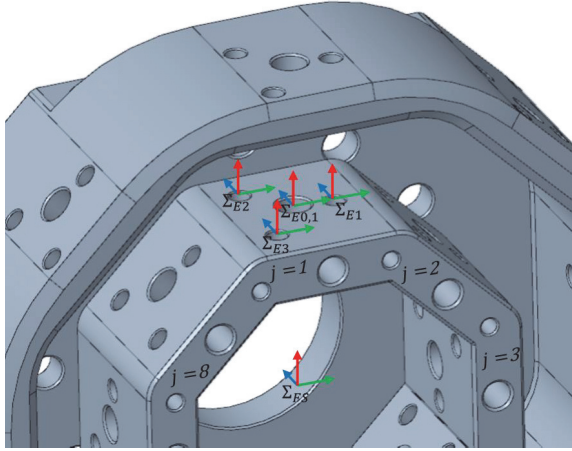


Abbildung 6-14: Koordinatensysteme der Platzierungsflächen für Federelemente im Federsystem (A_Kappus 2023)

Nach Gleichung 2-21 zur Transformation von Steifigkeiten können mit

$${}^{E0,j}\mathbf{K}_{E0,j}^{Ei} = ({}^{Ei}_{E0,j}\mathbf{J})^T ({}^{Ei}\mathbf{K}_{Ei}^{Ei}) ({}^{Ei}_{E0,j}\mathbf{J}) \quad 6-23$$

die Steifigkeiten der drei Federelemente in das Koordinatensystem $\Sigma_{E0,j}$ transformiert und mit

$${}^{E0,j}\mathbf{K}_{E0,j} = \sum_{i=1}^3 {}^{E0,j}\mathbf{K}_{E0,j}^{Ei} \quad 6-24$$

aufsummiert werden. Wird pro Platzierungsfläche nur ein Federelement statt drei verwendet, entfallen die bisherigen Schritte und die Steifigkeitsmatrix des Federelements kann direkt für den nachfolgenden Transformationsschritt verwendet werden. Die summierten Steifigkeiten ${}^{E0,j}\mathbf{K}_{E0,j}$ je Platzierungsfläche j werden mit

$${}^{FS}\mathbf{K}_{FS}^{FS} = \sum_{j=1}^8 (({}^{E0,j}_{FS}\mathbf{J})^T ({}^{E0,j}\mathbf{K}_{E0,j}) ({}^{E0,j}_{FS}\mathbf{J})) \quad 6-25$$

in das gemeinsame Federsystem-Bezugssystem transformiert und aufsummiert. Durch Invertierung erfolgt schließlich die Ermittlung der Nachgiebigkeit des Federsystems:

$${}^{FS}\mathbf{C}_{FS}^{FS} = ({}^{FS}\mathbf{K}_{FS}^{FS})^{-1} \quad 6-26$$

Gesamtnachgiebigkeit

Nach der Ermittlung der Roboter- und Federsystemnachgiebigkeiten erfolgt die Berechnung der Gesamtnachgiebigkeit. Hierfür werden alle Nachgiebigkeiten zunächst gemäß Formel 2-22 in das Bezugssystem $\Sigma_{FS,A}$ transformiert.

Die Nachgiebigkeit von Roboter A ${}^{B,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{R,A}$ hat bereits den korrekten Bezugspunkt. Es muss lediglich das Bezugssystem angepasst werden. Daher fällt der schiefsymmetrische Anteil der Transformationsmatrix weg und die Transformation vereinfacht sich zu

$${}^{FS,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{R,A} = \begin{pmatrix} ({}^{FS,A}\mathbf{R}_{B,A}) & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & ({}^{FS,A}\mathbf{R}_{B,A}) \end{pmatrix} ({}^{B,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{R,A}) \begin{pmatrix} ({}^{FS,A}\mathbf{R}_{B,A})^T & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & ({}^{FS,A}\mathbf{R}_{B,A})^T \end{pmatrix}. \quad 6-27$$

Bei der Nachgiebigkeit von Roboter B wird im ersten Schritt das Bezugssystem nach $\Sigma_{FS,B}$ angepasst. Auch hier vereinfacht sich die Transformationsmatrix aufgrund des Wegfallens des schiefsymmetrischen Anteils. Im zweiten Schritt erfolgt die Transformation von $\Sigma_{FS,B}$ nach $\Sigma_{FS,A}$ mithilfe der Transformationsmatrix ${}^{FS,A}\mathbf{J}_{FS,B}$. Die gesamte Transformation für Roboter B berechnet sich nach

$${}^{FS,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{R,B} = ({}^{FS,A}\mathbf{J}_{FS,B}) \begin{pmatrix} ({}^{FS,B}\mathbf{R}_{B,B}) & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & ({}^{FS,B}\mathbf{R}_{B,B}) \end{pmatrix} ({}^{B,B}\mathbf{C}_{FS,B}^{R,B}) \begin{pmatrix} ({}^{FS,B}\mathbf{R}_{B,B})^T & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & ({}^{FS,B}\mathbf{R}_{B,B})^T \end{pmatrix} ({}^{FS,A}\mathbf{J}_{FS,B})^T. \quad 6-28$$

Auch die Nachgiebigkeit von Federsystem B wird mit ${}^{FS,A}\mathbf{J}_{FS,B}$ in das Zielbezugssystem transformiert:

$${}^{FS,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{FS,B} = ({}^{FS,A}\mathbf{J}_{FS,B}) ({}^{FS,B}\mathbf{C}_{FS,B}^{FS,B}) ({}^{FS,A}\mathbf{J}_{FS,B})^T \quad 6-29$$

Die gewünschte Gesamtnachgiebigkeit des Nachgiebigkeitsmodells ergibt sich durch Summation der Ergebnisse aus Gleichung 6-27, 6-28, 6-29 und der Nachgiebigkeit des Federsystems ${}^{FS,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{FS,A}$ zu:

$${}^{FS,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{\text{ges}}(\mathbf{q}_A, \mathbf{q}_B) = {}^{FS,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{R,A}(\mathbf{q}_A) + {}^{FS,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{FS,A} + {}^{FS,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{FS,B} + {}^{FS,A}\mathbf{C}_{FS,A}^{R,B}(\mathbf{q}_B) \quad 6-30$$

Zur Validierung des Nachgiebigkeitsmodells wird an vier Messpunkten im Arbeitsraum des Koppelmoduls die Nachgiebigkeit experimentell ermittelt und verglichen (siehe Tabelle 6-5).

Tabelle 6-5: Messpunkte zur Validierung des Nachgiebigkeitsmodells im Welt-KOS (A_Kappus 2023)

	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	Messpunkt 4
x	1000	1000	1180	1000
y	750	750	750	50
z	1603	303	953	953

Dazu fährt das gekoppelte System zunächst einen Messpunkt an. Anschließend verfährt Roboter A in jedem kartesischen Freiheitsgrad $i \in \{1, \dots, 6\}$ von seinem eigenen TCP ausgehend je Messung 2 mm in translatorischen bzw. 2° in rotatorischen Freiheitsgraden. Bei jeder Messung wird die Veränderung der Kraft $\Delta \mathbf{h}$ erfasst. Anhand der einzelnen Kraftkomponenten Δh_j mit $j \in \{1, \dots, 6\}$ und der vorgegebenen translatorischen bzw. rotatorischen Verschiebungen Δx_i bzw. $\Delta \varphi_i$ können die einzelnen Elemente der Gesamtsteifigkeitsmatrix gemäß

$$k_{ij} = \frac{\Delta h_j}{\Delta x_i} \text{ bzw. } k_{ij} = \frac{\Delta h_j}{\Delta \varphi_i} \quad 6-31$$

berechnet werden. Durch Invertierung der Matrix ergibt sich die experimentell ermittelte Nachgiebigkeitsmatrix $\mathbf{C}^{\text{Messung}}$. Dieses Vorgehen wird für alle Messpunkte wiederholt. Die Werte der experimentellen Nachgiebigkeit für den ersten Messpunkt sind in Tabelle 6-6 dargestellt. Die Ergebnisse der weiteren Messpunkte sind bei (A_Kappus 2023) zu finden.

Tabelle 6-6: Experimentell ermittelte Nachgiebigkeitsmatrix im ersten Messpunkt. Die Einheit des translatorischen Teils ist m/N, für den rotatorischen Teil rad/Nm, Kopplungsteil 1/N bzw. rad/N (A_Kappus 2023)

	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6
j = 1	3,49×10 ⁻⁵	-4,52×10 ⁻⁷	1,45×10 ⁻⁵	4,87×10 ⁻⁶	1,98×10 ⁻⁴	-9,04×10 ⁻⁶
j = 2	-1,53×10 ⁻⁶	3,49×10 ⁻⁵	-1,25×10 ⁻⁷	-1,33×10 ⁻⁴	-2,47×10 ⁻⁶	-9,24×10 ⁻⁵
j = 3	1,36×10 ⁻⁵	1,27×10 ⁻⁶	1,51×10 ⁻⁵	2,06×10 ⁻⁷	8,28×10 ⁻⁵	-8,16×10 ⁻⁶
j = 4	1,95×10 ⁻⁵	-1,38×10 ⁻⁴	1,06×10 ⁻⁵	2,09×10 ⁻³	1,81×10 ⁻⁴	2,63×10 ⁻⁴
j = 5	2,12×10 ⁻⁴	1,48×10 ⁻⁵	1,05×10 ⁻⁴	5,04×10 ⁻⁵	2,85×10 ⁻³	-2,01×10 ⁻⁴
j = 6	8,11×10 ⁻⁶	-1,17×10 ⁻⁴	8,95×10 ⁻⁷	3,80×10 ⁻⁴	-8,49×10 ⁻⁶	1,66×10 ⁻³

Tabelle 6-7 zeigt die modellierten Nachgiebigkeiten im gleichen Messpunkt. Ein komponentenweiser Vergleich der prozentualen Abweichungen mit $(c_{ij, \text{Modell}} - c_{ij, \text{Messung}}) / c_{ij, \text{Messung}} \cdot 100\%$ ist in Tabelle 6-8 dargestellt.

Tabelle 6-7: Modellerte Nachgiebigkeitsmatrix im ersten Messpunkt. Die Einheit des translatorischen Teils ist m/N, für den rotatorischen Teil rad/Nm, Kopplungsteil 1/N bzw. rad/N

	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6
j = 1	2,95x10 ⁻⁵	-9,79x10 ⁻¹⁰	1,34x10 ⁻⁵	-3,06x10 ⁻⁹	1,63x10 ⁻⁴	1,60x10 ⁻⁹
j = 2	-9,79x10 ⁻¹⁰	3,20x10 ⁻⁵	-5,29x10 ⁻⁹	-1,23x10 ⁻⁴	1,55x10 ⁻⁹	-1,18x10 ⁻⁴
j = 3	1,34x10 ⁻⁵	-5,29x10 ⁻⁹	1,42x10 ⁻⁵	-3,51x10 ⁻⁹	9,47x10 ⁻⁵	1,50x10 ⁻⁹
j = 4	-3,06x10 ⁻⁹	-1,23x10 ⁻⁴	-3,51x10 ⁻⁹	1,98x10 ⁻³	1,25x10 ⁻⁸	2,56x10 ⁻⁴
j = 5	1,63x10 ⁻⁴	1,55x10 ⁻⁹	9,47x10 ⁻⁵	1,25x10 ⁻⁸	2,43x10 ⁻³	9,85x10 ⁻⁹
j = 6	1,60x10 ⁻⁹	-1,18x10 ⁻⁴	1,50x10 ⁻⁹	2,56x10 ⁻⁴	9,85x10 ⁻⁹	1,68x10 ⁻³

Tabelle 6-8: Prozentuale Abweichung der Nachgiebigkeitskomponenten zwischen Messung und Modellierung

	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6
j = 1	-15 %	-100 %	-7 %	-100 %	-18 %	-100 %
j = 2	-100 %	-8 %	-96 %	-8 %	-100 %	28 %
j = 3	-2 %	-100 %	-6 %	-100 %	14 %	-100 %
j = 4	-100 %	-11 %	-100 %	-5 %	-100 %	-3 %
j = 5	-23 %	-100 %	-10 %	-100 %	-15 %	-100 %
j = 6	-100 %	1 %	-100 %	-33 %	-100 %	1 %

Entlang der Hauptdiagonalen sind geringe Abweichungen zwischen 1 % und 15 % vorhanden. Die Größenordnung zwischen Modell und Messung stimmt überein. Allgemein werden die Nachgiebigkeiten durch das Modell eher unterschätzt. Dies bedeutet, dass das Modell eine geringere Nachgiebigkeit annimmt, als das physische System tatsächlich hat. Die Unterschätzung geht einher mit einer geringeren Kreisverstärkung des Reglers und einer höheren Stabilitätsreserve und ist daher wünschenswert.

Außerhalb der Hauptdiagonalen sind teilweise größere prozentuale Abweichungen vorhanden. Ein erneuter Blick auf Tabelle 6-7 zeigt, dass die größeren prozentualen Abweichungen für Matrixelemente gelten, deren Absolutwerte um mehrere Größenordnungen kleiner als die Werte der Hauptdiagonalen sind. Sie beeinflussen das Reglerverhalten nicht. Um eine vollständige Entkopplung der Nachgiebigkeit zu erreichen, werden die vernachlässigbaren Nebendiagonalwerte für das Nachgiebigkeitsmodell gleich Null gesetzt. Die Entkopplung stellt sicher, dass eine innere Kraft in einer bestimmten Bewegungsrichtung ausschließlich eine Reglerkorrektur in derselben Richtung bewirkt.

Gründe für Abweichungen des Modells von der realen Nachgiebigkeit können unter anderem ein nichtlineares Verhalten der Nachgiebigkeiten des Federsystems und der Roboter bei größeren Auslenkungen sein. Weiterhin werden das zeitabhängige viskoelastische Verhalten der Federelemente sowie Alterungseffekte in der Modellierung nicht berücksichtigt. Für eine bessere Montagefreundlichkeit werden die

Federelemente außerdem beim Einbau in den inneren und äußeren Ring um eine Verschiebung von 2 mm auf Zug belastet. Diese Vorspannung und die damit einhergehenden veränderten Steifigkeitseigenschaften werden ebenfalls vernachlässigt. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Vernachlässigung der Parallelogrammstruktur zwischen Achse 2 und 3 der Roboter.

Aufgrund der geringen Abweichungen entlang der Hauptdiagonalen kann mit dem Nachgiebigkeitsmodell das Verhalten des gekoppelten Systems sehr gut abgebildet werden. Die exakte Übereinstimmung der Absolutwerte ist hierfür nur zweitrangig, da kleinere Abweichungen über die Kreisverstärkung des Reglers kompensiert werden können. Wichtiger ist hingegen eine gut angenäherte Abbildung der Verhältnisse der Nachgiebigkeitskomponenten zueinander sowie die Entkopplung voneinander. Die Analyse der weiteren drei Messpunkte in (A_Kappus 2023) bestätigt diesen Sachverhalt. Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte wird die Güte des Nachgiebigkeitsmodells für den Zweck der Regelung als hoch genug eingeschätzt.

6.4 Umsetzung des Regelkreises

Die im vorangegangenen Kapitel entwickelte grundlegende Reglerarchitektur sowie die Modelle zur Berechnung der inneren Kraft und der Nachgiebigkeit werden in diesem Kapitel zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt. Die detaillierte Funktionsweise des finalen Kraftreglers sowie des Reglergesetzes wird erläutert. Anschließend wird die Implementierung des Kraftreglers vorgestellt.

6.4.1 Funktionsweise des Kraftreglers

Die Aufgabe des im Rahmen der Arbeit von (A_Kappus 2023) entwickelten Kraftreglers ist es, die inneren Kräfte im gekoppelten Robotersystem durch Positionskorrekturen des Slave-Roboters zu regeln. Hierfür berechnet der Regler, ausgehend von den Sensorkräften, die inneren Kräfte und bestimmt über das Nachgiebigkeitsmodell letztendlich Positionskorrekturwerte. Die detaillierten Prozessschritte sind im finalen Blockschaltbild in Abbildung 6-15 dargestellt.

Zunächst werden die von den Kraftsensoren bereitgestellten Kraftwerte ${}^{S,A}\mathbf{h}_{S,A}$ und ${}^{S,B}\mathbf{h}_{S,B}$ um die Gewichtskraft der Schnellwechselköpfe $\mathbf{h}^{komp,A}$ bzw. $\mathbf{h}^{komp,B}$ bereinigt und negiert (siehe Kapitel 6.3.2). Als Nächstes erfolgt die Transformation der Kräfte von den Sensorbezugssystemen in die jeweiligen Greifpunktbezugssysteme $\Sigma_{GP,A}$ bzw. $\Sigma_{GP,B}$.

Nach der Transformation wird der zusammengesetzte (12×1) Spaltenvektor ${}^{GP}\mathbf{h}_{GP}$ gebildet. Nach Gleichung 6-6 und 6-7 zur Zerlegung der Kräfte in innere und externe Anteile wird die innere Kraft bestimmt. Hierfür wird die in Kapitel 6.3.2 vorgestellte gewichtete Pseudoinverse \mathbf{G}^+ mit $w=1$ verwendet. Die innere Kraft ${}^{GP,B}\mathbf{h}_{GP,B}^{int}$ wird nicht weiterverwendet. ${}^{GP,A}\mathbf{h}_{GP,A}^{int}$ wird dem Regelkreis zurückgeführt und mit der Führungsgröße

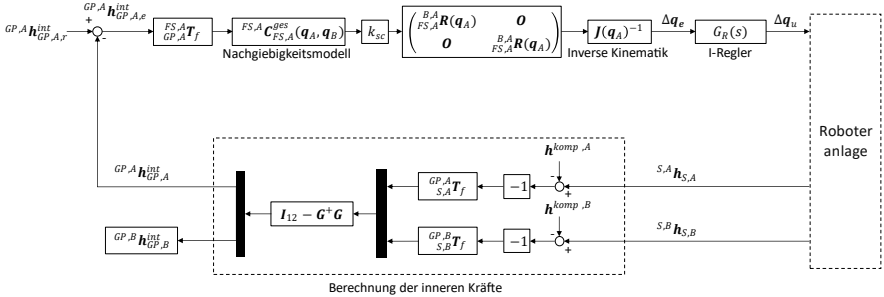


Abbildung 6-15: Blockschaltbild des entwickelten Kraftreglers (A_Kappus 2023)

${}^{GP,A}\mathbf{h}_{GP,A,r}^{int}$ verrechnet. Soll die innere Kraft minimiert werden, wird als Führungsgröße ein Wert von 0 vorgegeben. Dann entspricht die innere Kraft ${}^{GP,A}\mathbf{h}_{GP,A}^{int}$ direkt der Regelabweichung ${}^{GP,A}\mathbf{h}_{GP,A,e}^{int}$. Alternativ kann über die Führungsgröße auch eine gezielte Verspannung des gekoppelten Systems zur Beeinflussung des Systemverhaltens erreicht werden. Erste eigene Untersuchungen hierzu sind in (Goebels et al. 2024) zu finden. Die Forschungsarbeit zeigt, dass das dynamische Verhalten der gekoppelten Roboter durch eine gezielte Verspannung beeinflusst werden kann. Die Verspannung kann genutzt werden, um Eigenfrequenzen des Systems zu verschieben. Damit kann beispielsweise Rattern im Fräsprozess reduziert werden.

Die Regelabweichung ${}^{GP,A}\mathbf{h}_{GP,A,e}^{int}$ wird als Nächstes vom Greifpunktsystem in das Bezugssystem von Federsystem A transformiert. Die beiden Bezugssysteme unterscheiden sich lediglich in der Orientierung (vgl. dazu Abbildung 6-7 und Abbildung 6-11). Im Bezugssystem von Federsystem A findet die Verrechnung der transformierten Regelabweichung mit dem Nachgiebigkeitsmodell ${}^{FS,A}C_{FS,A}^{ges}(q_A, q_B)$ statt. Um die veränderten Eigenschaften des Federsystems bei Erneuerung der Federelemente berücksichtigen zu können, wird ein Skalierungsfaktor k_{sc} multipliziert. Die Bestimmung des Faktors

wird in (A_Kappus 2023) näher erläutert. Die aus der Verrechnung mit dem Nachgiebigkeitsmodell und dem Skalierungsfaktor resultierenden kartesischen Lagekorrekturwerte werden im nächsten Schritt zurück in das Basiskoordinatensystem von Roboter A transformiert. Anschließend erfolgt die Transformation in den Gelenkwinkelraum über die inverse Jacobi-Matrix $\mathbf{J}(\mathbf{q}_A)^{-1}$. Anhand des Reglergesetzes $G_R(s)$ des I-Reglers (erläutert im Folgekapitel 6.4.2) werden die resultierenden Gelenkwinkelabweichungen $\Delta \mathbf{q}_e$ in die finalen Stellwerte $\Delta \mathbf{q}_u$ umgerechnet und über die Schnittstelle zur Temperaturkompensation an Roboter A weitergegeben, wo sie mit der Lageregelabweichung der Robotersteuerung überlagert werden.

6.4.2 Reglergesetz und Limitierungen

Für die Kraftregelung wird ein I-Regler verwendet, da dieser bei steigender Umgebungssteifigkeit ein stabileres Verhalten aufweist (Rocco et al. 1997). Somit kann bei zukünftiger Erhöhung der Koppelmodulsteifigkeit eine Verschlechterung des Stabilitätsverhaltens vermieden werden. Die Implementierung des I-Reglers erfolgt als diskreter Integrator nach dem Euler-Vorwärts-Verfahren. Für jede Achse des Roboters wird ein eigener Integrator verwendet. Der Verstärkungsfaktor k_I ist für alle Achsen gleich. Der Stellwert $\Delta q_{i,u}(n)$ einer Achse $i \in \{1, \dots, 6\}$ berechnet sich mit dem Zeitschritt n und der Positionsabweichung $\Delta q_{i,e}(n-1)$ zu

$$\Delta q_{i,u}(n) = \Delta q_{i,u}(n-1) + k_I \cdot T_{\text{Sampling}} \cdot \Delta q_{i,e}(n-1) \quad 6-32$$

mit T_{Sampling} als Taktzeit des Reglers, die 4,6 ms beträgt.

Die für die Regelung des Roboters verwendete Temperaturkompensationsschnittstelle begrenzt die zulässigen Achsgeschwindigkeiten. Fordert der Regler innerhalb eines Berechnungsschrittes eine größere Winkeländerung, als mit der maximalen Achsgeschwindigkeit zulässig ist, kann dies zu Instabilitäten führen, da die Synchronisierung der einzelnen Achsen verloren geht. Um dies zu verhindern, wird im Reglergesetz ein limitierender Faktor k_{lim} eingeführt. Dieser Skalierungsfaktor reduziert die Stellgrößen aller Achsen proportional, um die maximal zulässige Achsgeschwindigkeit aller Achsen einzuhalten. Zur Berechnung von k_{lim} wird zunächst für jede Achse i das Verhältnis V_i zwischen der maximal zulässigen Geschwindigkeit $\Delta q_{i,u,\text{max}}$ und der Winkeländerung im aktuellen Reglerdurchlauf bestimmt:

$$V_i(n-1) = \frac{\Delta q_{i,u,\max} \cdot S}{|k_i \cdot T_{\text{Sampling}} \cdot \Delta q_{i,e}(n-1)|} \quad 6-33$$

Mit dem Sicherheitsfaktor $S = 0,85$ wird eine zusätzliche Sicherheit gegenüber dem Überschreiten der maximalen Geschwindigkeit implementiert. Die maximal zulässige Geschwindigkeit einer Achse $\Delta q_{i,u,\max}$ berechnet sich aus einem von der Robotersteuerung vorgegebenen Geschwindigkeitsfaktor $v_{i,\max}$ und der Taktzeit des Reglers T_{Sampling} zu:

$$\Delta q_{i,u,\max} = v_{i,\max} \cdot T_{\text{Sampling}} \cdot \frac{360^\circ}{60s / \text{min}} \quad 6-34$$

Mit $\Delta q_{i,u,\max}$ kann nun V_i für alle Achsen berechnet werden. Gilt für eine oder mehrere Achsen $V_i < 1$, dann würde ohne Limitierung eine Überschreitung der zulässigen Achsgeschwindigkeit der jeweiligen Achse auftreten. In diesem Fall nimmt k_{lim} das Minimum aller V_i an. Sind alle $V_i \geq 1$, wird $k_{\text{lim}} = 1$. Die Bestimmung von k_{lim} verläuft damit nach folgender Berechnungsvorschrift:

$$k_{\text{lim}}(n-1) = \begin{cases} 1 & , \min(V_1(n-1), \dots, V_6(n-1)) \geq 1 \\ \min(V_1(n-1), \dots, V_6(n-1)) & , \min(V_1(n-1), \dots, V_6(n-1)) < 1 \end{cases} \quad 6-35$$

Das finale Reglergesetz lautet dann:

$$\Delta q_{i,u}(n) = \Delta q_{i,u}(n-1) + k_{\text{lim}}(n-1) \cdot k_i \cdot T_{\text{Sampling}} \cdot \Delta q_{i,e}(n-1) \quad 6-36$$

Neben der Geschwindigkeitslimitierung werden auch die Stellwerte $\Delta q_{i,u}$ aus Sicherheitsgründen limitiert. Für die Achsen 1–3 beträgt der Maximalwert $\pm 6^\circ$, da diese Achsen aufgrund ihrer langen Armglieder bereits bei wenigen Grad Kompensation große Positionsänderungen am Roboter-TCP verursachen. Dies ist bei den Handachsen nicht der Fall. Daher sind hier größere Wertebereiche zulässig. Der Grenzwert bei den Achsen 4 und 6 wird auf $\pm 30^\circ$ gesetzt. Die Begrenzung für Achse 5 wird auf $\pm 20^\circ$ gesetzt. (A_Kappus 2023)

6.4.3 Implementierung des Kraftreglers

Die Entwicklung des Reglers erfolgt mit der Software Simulink in MATLAB. Mithilfe des MATLAB-Add-ons „Embedded Coder“ wird das Simulink-Modell in C-Code konvertiert. Der C-Code wird in das in Kapitel 6.2.3 vorgestellte Rechnerprogramm integriert und parallel mit der Messdatenaufzeichnung ausgeführt. Die Kraftsensordaten als Input des

Reglers sowie die Stellwerte als Output des Reglers werden über die im Rechnerprogramm implementierte PROFINET-Schnittstelle übertragen. Der Zugriff auf die Lageregelung der Roboter erfolgt über die vom Steuerungshersteller bereitgestellte Temperaturkompensationsschnittstelle, bei der die übertragenen Kompensationswerte auf die Lageregelabweichung aufsummiert werden.

Der Regler kann die drei Zustände Reglerstart, Standby und Reglerstopp annehmen. Der Start des Reglers erfolgt bei Stillstand der Roboter. Beim Starten wird initial eine Positionskorrektur von Roboter A vorgenommen, um die vorliegenden inneren Kräfte der Führungsgröße anzunähern. Anschließend ist der Regler betriebsbereit.

Der Zustand Standby dient als Anti-Windup-Methode. Da im Regelungssystem ein I-Anteil enthalten ist, besteht das Risiko, dass der sogenannte Windup-Effekt auftritt (Hippe 2006). Wenn im laufenden Betrieb mit aktivem Regler die Bewegungsfreigabe der Roboter wegfällt, beispielsweise durch Loslassen des Totmannschalters oder Auslösen einer Safety-Funktion, steigt der Integratorwert kontinuierlich an, ohne dass der Roboter dem daraus resultierenden Stellwert folgen kann. Wenn die Bewegungsfreigabe wieder gegeben ist, versucht der Roboter aufgrund des angewachsenen Stellwerts schlagartig, diesen auszufahren. Dabei können mechanische Schäden am Koppelmodul oder auch an den Robotern auftreten (siehe Abbildung 6-16). Um dies zu verhindern, ist der Regler an die Bewegungsfreigabe der Roboter gekoppelt. Sobald diese wegfällt, wird die ermittelte Positionsabweichung im Regler mit 0 multipliziert, um den Wert des I-Reglers konstant zu halten und ein Aufsummieren zu verhindern.

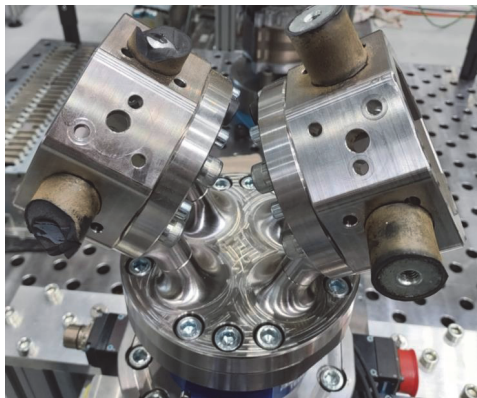


Abbildung 6-16: Zerstörte Federelemente im Koppelmodul aufgrund des Windup-Effekts während einer Testfahrt

Der Windup-Effekt kann in umgekehrter Weise auch beim Abschalten des Reglers auftreten. Wurden vor dem Abschalten größere Korrekturwerte ausgefahren und wird der Regler anschließend abgeschaltet, werden die Korrekturwerte schlagartig auf 0 gesetzt, was zu einer ruckartigen Korrektur des geregelten Roboters führt. Um dies zu verhindern, wird bei Abschaltung des Reglers der Wert des I-Anteils kontinuierlich reduziert, bevor die vollständige Abschaltung des Reglers erfolgt. Die Reduzierung wird durch negative Rückkopplung der eigenen Stellwerte erreicht ($\Delta q_{i,e}(n) = -\Delta q_{i,u}(n)$). Die Stellgrößen des Reglers aus Gleichung 6-36 werden damit nach

$$\Delta q_{i,u}(n) = (1 - k_{\text{lim}}(n-1) \cdot k_I \cdot T_{\text{Sampling}}) \cdot \Delta q_{i,e}(n-1) \quad 6-37$$

berechnet und konvergieren gegen 0. Bei Abschaltung des Reglers erfolgt nach einer Rückkopplungszeit von fünf Sekunden die tatsächliche Abschaltung, wodurch die Kompensationswerte auf exakt 0 gesetzt werden (A_Kappus 2023).

6.5 Charakterisierung und Validierung des Reglers

Das im vorangegangenen Kapitel vorgestellte finale Regelungssystem soll nun abschließend auf seine Stabilität untersucht werden. Dafür werden nachfolgend Stabilitätsuntersuchungen am offenen und im geschlossenen Regelkreis betrachtet. Die Stabilitätsuntersuchungen dienen ebenfalls der Parametrierung des noch nicht festgelegten Verstärkungsfaktors k_I .

6.5.1 Stabilitätsuntersuchung am offenen Regelkreis

In diesem Kapitel wird zunächst der Frequenzgang des offenen Regelkreises experimentell bestimmt und mithilfe des vereinfachten Nyquist-Kriteriums die Stabilität validiert. Für die Untersuchung werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Das betrachtete System ist ein LTI-System (engl. Linear Time-Invariant).
- Die Regelungsstrecke ist entkoppelt. Eine Anregung in eine Richtung führt nur zu einer Auslenkung in dieselbe Richtung.
- Der Frequenzgang ist unabhängig von der Gelenkwinkelkonfiguration.

Bezüglich der ersten Annahme ist zu beachten, dass das Gesamtsystem der Roboter eigentlich kein lineares System ist, im jeweiligen Arbeitspunkt aber aufgrund von kleinen Winkeländerungen des Kraftreglers linearisiert werden kann.

Für die Messung wird das gekoppelte System auf einen zentralen Punkt des Arbeitsraums mit der Position

$${}^w \mathbf{p}_K = \begin{pmatrix} 1180 \\ 750 \\ 953,038 \end{pmatrix} \quad 6-38$$

im Welt-KOS gefahren. Anschließend erfolgt eine Anregung in Form eines sinusförmiges Kraftsignals in x-Richtung über die Führungsgröße des Reglers mit:

$${}^{GP,A} \mathbf{h}_{GP,A,r}^{int} = \begin{pmatrix} A \sin(\omega_f t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad 6-39$$

Für die Amplitude A wird ein Wert von 50 N und für die Kreisfrequenz ω_f ein Bereich von 0,5–50 Hz festgelegt. Die Frequenz steigt innerhalb dieses Bereichs exponentiell an und wird bei jeder Stufe fünf Sekunden gehalten. Die gesamte Messdauer beträgt 100 Sekunden.

Die innere Kraft wird als Antwort des Versuchs aufgezeichnet und ist in Abbildung 6-17 dargestellt. Anhand der Amplituden in den anderen Richtungen lässt sich erkennen, dass zwar keine vollständige Entkopplung des Systems herrscht, ungewollte zusätzliche Anregungen jedoch aufgrund der geringen Amplituden für die Stabilitätsuntersuchung vernachlässigt werden können.

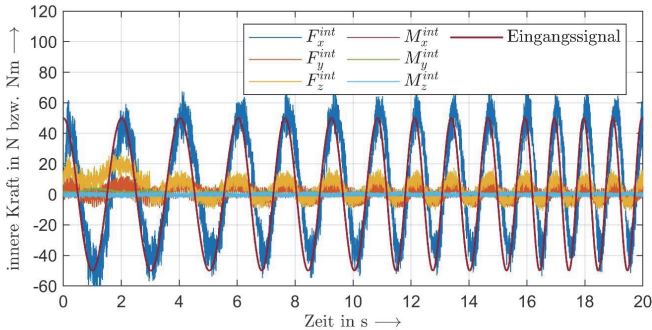


Abbildung 6-17: Gemessene innere Kräfte bei einem sinusförmigen Eingangssignal mit steigender Frequenz von 0,5–50 Hz und einer Amplitude von 50 N als Anregung (A_Klein 2024)

Aus dem Frequenzgang soll nun die Amplitude und Phasenverschiebung für alle Frequenzen mithilfe der Correlation-Approach-Methode nach (Naumovic et al. 2011) ermittelt werden. Dazu wird das Ausgangssignal, also die innere Kraft in x-Richtung, jeweils mit einem Sinus- und einem Cosinus-Signal mit gleicher Frequenz multipliziert und über ein Vielfaches der Periodendauer T_m integriert. Mit der Integration wird das Messrauschen gefiltert. Es resultieren die beiden Größen y_s und y_c .

Mit

$$|G_0(j\omega_f)| = \frac{2}{A \cdot T_m} \sqrt{y_s^2(T_m) + y_c^2(T_m)} \quad 6-40$$

$$\varphi_0(\omega_f) = \arctan \frac{y_c(T_m)}{y_s(T_m)} \quad 6-41$$

werden anschließend die Amplitude $|G_0(j\omega_f)|$ und die Phase $\varphi_0(\omega_f)$ des offenen Regelkreises für jede Frequenz bzw. Periodendauer berechnet. Diese werden mit der frequenzabhängigen Amplitude $|G_I(j\omega_f)|_{dB}$ und Phase $\varphi_I(\omega_f)$ des I-Reglers addiert. Bei der Amplitude ist zu beachten, dass diese für die Addition in Dezibel umgerechnet werden muss. Die Berechnung der resultierenden Amplitude $|G_{0,I}(j\omega_f)|_{dB}$ und Phase $\varphi_{0,I}(\omega_f)$ ergibt sich dann nach:

$$|G_{0,I}(j\omega_f)|_{dB} = |G_0(j\omega_f)|_{dB} + |G_I(j\omega_f)|_{dB} \quad 6-42$$

$$\varphi_{0,I}(\omega_f) = \varphi_0(\omega_f) + \varphi_I(\omega_f) \quad 6-43$$

Abbildung 6-18 zeigt die resultierenden Nyquist-Diagramme für eine Reglerverstärkung von $k_I = 4,5$ und $k_I = 8,5$. Die Diagramme veranschaulichen die Ergebnisse für jeweils zwei verschiedene Federkonfigurationen im Koppelmodul. Die 4x1-Konfiguration¹ mit Federelementen mit einem Durchmesser von 40 mm, einer Höhe von 30 mm und einer Shorehärte von 40 wird im Folgenden als sogenannte Testkonfiguration bezeichnet. Diese hat eine sehr hohe Nachgiebigkeit und erlaubt damit das sichere Testen von neuen Funktionen des gekoppelten Systems. Die 8x1-Konfiguration² mit Federelementen mit einem Durchmesser von 50 mm, einer Höhe von 30 mm und einer Shorehärte von 70 wird als Messkonfiguration bezeichnet. Diese besitzt eine deutlich höhere

¹ Vier von acht Plätzen des Federsystems sind mit jeweils einem Federelement besetzt.

² Alle acht Plätze des Federsystems sind mit jeweils einem Federelementtyp besetzt.

Steifigkeit und wird bei der Charakterisierung des gekoppelten Systems in Kapitel 7 eingesetzt, um die zum gegebenen Zeitpunkt maximal mögliche Steifigkeit und Genauigkeit des gekoppelten Systems zu erreichen.

Aus den Nyquist-Diagrammen lassen sich Aussagen zur Stabilität anhand der verfügbaren Amplituden- und Phasenreserve ermitteln. Im rechten Nyquist-Diagramm ist dargestellt, wie die Amplituden- und Phasenreserven ermittelt werden können. Die Amplitudenreserve A_R ergibt sich aus dem Kehrwert der Amplitude bei der Durchtrittsfrequenz. Die Durchtrittsfrequenz beschreibt die Stelle einer Kurve, an der die x-Achse ($\text{Im} = 0$) geschnitten wird. An dieser Stelle gilt $|G_0(j\omega_f)| = 1$.

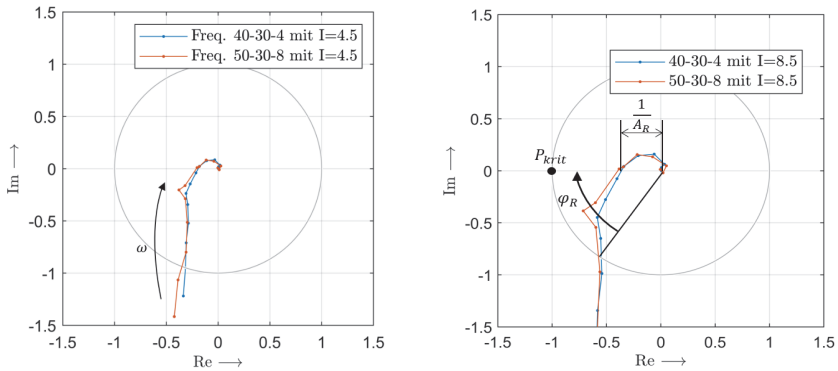


Abbildung 6-18: Nyquist-Diagramme für Reglerverstärkung $k_I = 4,5$ (links) und $k_I = 8,5$ (rechts) mit Ortskurven des Systems für beide Federkonfigurationen (A_Klein 2024)

Die Phasenreserve φ_R entspricht dem Winkel, um den die jeweilige Ortskurve gedreht werden muss, damit der kritische Punkt durchlaufen wird. Nach (Tröster 2015, S. 301) entsprechen Werte von $A_R = 2 \dots 3$ und $\varphi_R > 50^\circ$ einem guten Führungs- und Störverhalten des Systems. Beide Ortskurven weisen sowohl bei der niedrigsten Reglerverstärkung $k_I = 4,5$ als auch bei der höchsten untersuchten Reglerverstärkung $k_I = 8,5$ ausreichende Reserven auf (A_Klein 2024). Daher kann zunächst ein Verstärkungsfaktor von $k_I = 8,5$ angenommen werden.

6.5.2 Stabilitätsuntersuchung im geschlossenen Regelkreis

Im Folgenden soll die Reglerverstärkung auch im geschlossenen Regelkreis untersucht werden. Dazu werden sogenannte Soll- und Störsprünge mit verschiedenen Reglerverstärkungen für die Messkonfiguration des Koppelmoduls durchgeführt. Anhand der dabei aufgezeichneten Kraftspitzenwerte und Ausregelzeiten lassen sich Rückschlüsse auf die Dynamik und Stabilität des Reglers ziehen. Die Untersuchungen werden, beginnend mit einer Reglerverstärkung von $k_f = 4,5$, mit Steigerungen von jeweils 0,5 bis $k_f = 8,5$ oder bis zum Auftreten von Stabilitätsproblemen durchgeführt. Als Ausregelzeit wird die Zeitspanne ab Auftreten des Sprungs bis zum Eintreten in einen Toleranzbereich definiert. Der Toleranzbereich liegt für Kräfte im Bereich von -5 N bis 5 N und für Momente im Bereich von -0,5 Nm bis 0,5 Nm. Als Eintritt gilt der erste Eintritt, bei dem der Messwert den Toleranzbereich nicht um mehr als ± 1 N bzw. $\pm 0,1$ Nm wieder verlässt.

Zunächst sollen die Sollsprünge betrachtet werden. Bei der Versuchsdurchführung wird das Koppelmodul von beiden Robotern aufgenommen, auf den Messpunkt gefahren und anschließend der Regler eingeschaltet. Die bei Regleraktivierung schlagartig auftretende initiale Verspannung entspricht dem Sollsprung. Abbildung 6-19 zeigt den Verlauf der inneren Kraft beispielhaft für $k_f = 5,5$. Die maximale Kraft beträgt 347 N in x-Richtung und das maximale Moment 48 Nm um die y-Richtung. Die Ausregelzeit ist in x-Richtung am größten und beträgt 1,08 Sekunden.

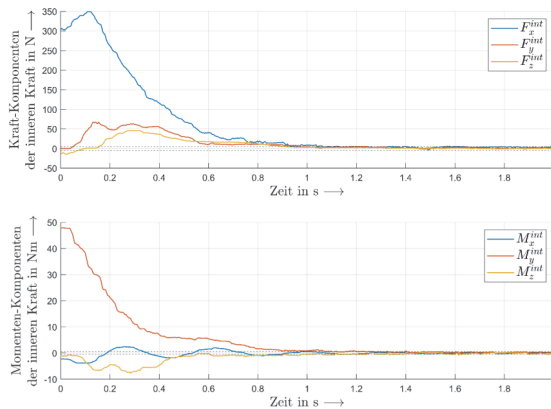


Abbildung 6-19: Verlauf der inneren Kräfte bei Sollsprung mit $k_f = 5,5$ (A_Klein 2024)

Ein Vergleich der Ausregelzeiten und maximalen Kräfte für alle Reglerverstärkungen ist in Tabelle 6-9 dargestellt.

Tabelle 6-9: Ausregelzeiten und maximale Kräfte/Momente beim Sollsprung für verschiedene Reglerverstärkungen (A_Klein 2024)

	Sollsprung Ausregelzeit [s]			Sollsprung max. innere Kräfte [N] bzw. [Nm]		
	$k_I = 4,5$	$k_I = 5,0$	$k_I = 5,5$	$k_I = 4,5$	$k_I = 5,0$	$k_I = 5,5$
F_x^{int}	1,40	1,20	1,08	355	347	348
F_y^{int}	1,12	1,01	0,97	69	70	67
F_z^{int}	1,15	1,10	0,95	40	41	45
M_x^{int}	0,50	0,75	0,89	4	5	4
M_y^{int}	1,57	1,29	1,10	49	48	48
M_z^{int}	1,12	1,01	0,98	7	8	8

Mit zunehmender Reglerverstärkung sinkt wie erwartet die Ausregelzeit für alle kartesischen Freiheitsgrade. Eine Ausnahme bildet hierbei das Moment um die x-Richtung. Hier steigt die Ausregelzeit. Bei genauerer Betrachtung des Verlaufs in Abbildung 6-19 wird ersichtlich, dass das Moment M_x^{int} eine langsam abklingende Schwingung mit einer Amplitude von ca. 3,5 Nm aufweist. Mit steigender Reglerverstärkung vollzieht sich das Abklingen langsamer, wodurch die Ausregelzeit ansteigt. Da die Ausregelzeit von M_x^{int} auch bei hoher Reglerverstärkung immer noch geringer als in den anderen Freiheitsgraden und somit nicht ausschlaggebend für die gesamte Ausregelzeit ist, trägt eine höhere Reglerverstärkung dennoch zur verbesserten Dynamik des Reglers bei. Die maximalen Kraft- und Momentenwerte, die je Reglerverstärkung auftreten, bleiben bei Erhöhung der Dynamik annähernd konstant. Der Regler kann den Sollsprung auch bei $k_I = 5,5$ problemlos ausregeln. Allerdings sind bei der Versuchsdurchführung erste Instabilitäten sichtbar geworden. Diese machen sich im Wesentlichen dadurch bemerkbar, dass das gekoppelte System bei Stillstand mit aktiviertem Regler anfängt zu schwingen und die Schwingung kontinuierlich ansteigt.

Als Nächstes wird der Störsprung betrachtet. Das gekoppelte System wird zunächst auf den Messpunkt gefahren und initial ausgeregelt. Dann wird bei aktiviertem Regler der nicht geregelte Roboter 3 mm in x-Richtung bewegt. Sobald die Bewegung beginnt, steigen die inneren Kräfte und Momente an und der kraftgeregelte Roboter versucht diese auszuregulieren. Abbildung 6-20 zeigt exemplarisch den Kraft- und Momentenverlauf

beim Störsprung für $k_I = 5,5$. Es treten Kräfte bis zu 644 N und Momente bis zu 16 Nm auf. Die maximale Ausregelzeit liegt bei 0,97 Sekunden.

Der Vergleich der Ausregelzeiten und maximalen Kräfte für alle Reglerverstärkungen ist in Tabelle 6-10 dargestellt. Analog zu den Sollsprüngen wird die Ausregelzeit bei steigender Reglerverstärkung reduziert. Eine Ausnahme bildet M_z^{int} durch sein gegensätzliches Verhalten. Allerdings gilt auch hier, dass die Ausregelzeit von M_z^{int} für die gesamte Ausregelzeit nicht ausschlaggebend ist und vernachlässigt werden kann. Die maximalen Kräfte und Momente verändern sich bei steigender Reglerverstärkung ebenfalls nicht wesentlich.

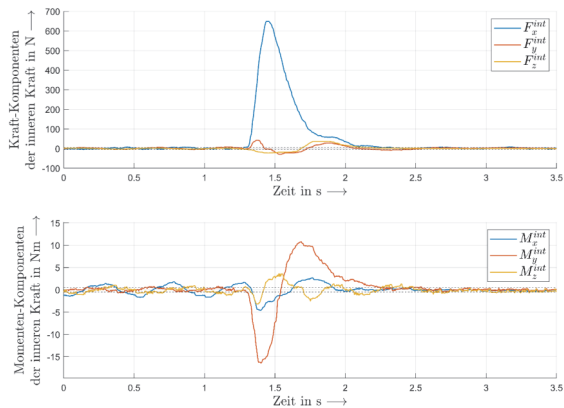


Abbildung 6-20: Verlauf der inneren Kräfte bei Störsprung mit $k_I = 5,5$ (A_Klein 2024)

Tabelle 6-10: Ausregelzeiten und maximale Kräfte/Momente beim Störsprung für verschiedene Reglerverstärkungen (A_Klein 2024)

	Störsprung Ausregelzeit (in Sekunden)			Störsprung max. innere Kräfte (in N bzw. Nm)		
	$k_I = 4,5$	$k_I = 5,0$	$k_I = 5,5$	$k_I = 4,5$	$k_I = 5,0$	$k_I = 5,5$
F_x^{int}	1,41	1,14	0,97	662	647	644
F_y^{int}	1,13	0,70	0,81	71	46	42
F_z^{int}	1,32	1,00	0,92	29	30	35
M_x^{int}	1,05	0,98	0,61	5	4	5
M_y^{int}	1,25	1,18	0,93	16	16	16
M_z^{int}	0,70	0,60	0,85	5	4	4

Aus den beiden vorgestellten Untersuchungen ist ersichtlich, dass der Regler grundsätzlich in der Lage ist, sowohl die Soll- als auch die Störsprünge bis $k_f = 5,5$ problemlos auszuregeln. Da allerdings sich selbst verstärkende Schwingungen im Stillstand ab einer Verstärkung von $k_f = 5,5$ auftreten, wird nach Abschluss der Untersuchung des geschlossenen Regelkreises die finale Reglerverstärkung auf $k_f = 5,0$ festgelegt. Die detaillierte Stabilitätsuntersuchung und weitere Ergebnisse sind in (A_Klein 2024) zu finden.

6.6 Zusammenfassung zur Modellierung und Regelung

Zur Erfüllung des zweiten Teilziels wurde die Modellierung und Kraftregelung des gekoppelten Systems umgesetzt. Zunächst wurden die Anforderungen an das Regelungssystem identifiziert und daraus die notwendigen Anpassungen der Steuerungsarchitektur abgeleitet und umgesetzt. Die neu implementierten Datenmanagementfunktionen erlauben den echtzeitfähigen Datenaustausch über das PROFINET-IRT-Protokoll. Das Datenmanagement umfasst die Datenerfassung und -verarbeitung sowie die Kommunikation zwischen den teilnehmenden Systemen. Die Kraftsensorik, der externe Rechner zur Regelung und die Robotersteuerung wurden in den echtzeitfähigen Datenaustausch eingebunden.

Anschließend wurde die Regelung als Master-Slave-Ansatz umgesetzt. Der erste Roboter verfährt bewegungsgesteuert. Der zweite Roboter verfährt gleichzeitig sowohl bewegungs- als auch kraftgesteuert. Die innere Kraft dient als Regelgröße des Reglers. Sie wird durch eine redundante Messung der herrschenden Kräfte und durch die anschließende Zerlegung in innere und äußere Anteile bestimmt. Die Zerlegung erfolgt mathematisch durch Aufstellung der sogenannten Grasp-Matrix und Ableitung ihrer Pseudoinversen. Die Ansteuerung des kraftgeregelten Roboters wird über eine Lagekompensationsschnittstelle der Robotergelenke ermöglicht. Der Zusammenhang zwischen der inneren Kraft und der Lage wird über ein Nachgiebigkeitsmodell hergestellt. Das Modell beinhaltet die posenabhängige Steifigkeit der einzelnen Roboter sowie die simulativ bestimmte Steifigkeit des Koppelmoduls. Ein Prototyp des Kraftreglers wurde entwickelt. Dazu wurden der Aufbau des Reglers, das Reglergesetz sowie die Begrenzungen des Reglers betrachtet. Der Regler wurde als modellbasierter I-Regler mit einem Nachgiebigkeitsmodell in Simulink entwickelt und als C-Code in der Steuerungsarchitektur implementiert. Da das Nachgiebigkeitsmodell des Reglers in jeder Pose

funktioniert und unabhängig vom konkreten Fertigungsprozess oder zu handhabenden Werkstück ist, ist der Regler grundsätzlich prozessunabhängig einsetzbar.

Eine umfassende Charakterisierung und Validierung des Reglers wurden durchgeführt. Mithilfe des Nyquist-Kriteriums wurde der offene Regelkreis hinsichtlich seiner Stabilität untersucht. Anschließend wurde der geschlossene Regelkreis mit Soll- und Störsprüngen charakterisiert und der finale Verstärkungsfaktor des I-Reglers festgelegt.

7 Charakterisierung des gekoppelten Systems

In Kapitel 7 werden die Inhalte zur Erreichung des dritten Teilziels aus Kapitel 3.1 erläutert:

Charakterisierung der statischen Steifigkeit und Genauigkeit des gekoppelten Systems und Bewertung der Ergebnisse im Vergleich mit einzelnen Robotern.

Hierfür werden in Kapitel 7.1 und 7.2 separate Untersuchungen zur statischen Steifigkeit und Genauigkeit des gekoppelten Systems vorgestellt. Die Steifigkeitsuntersuchung beginnt mit einer systematischen Herleitung des Versuchsplans. Mithilfe von Methoden der statistischen Versuchsplanung werden der zu untersuchende Raum, die Messmethodik und die Einflussgrößen definiert, um darauf aufbauend einen Versuchsplan für die gekoppelten und den einzelnen Roboter zu entwerfen. Anschließend erfolgt die Auswertung der Versuchsergebnisse. Aus den Ergebnissen werden 3D-Steifigkeitskarten zur Beschreibung der Steifigkeit im Raum abgeleitet. Auf Basis der Steifigkeitskarten finden eine qualitative sowie quantitative Analyse und eine Bewertung der Steifigkeit des gekoppelten Systems im Vergleich zum einzelnen Roboter statt.

Analog zur Steifigkeitsuntersuchung wird auch für die Genauigkeitsuntersuchung ein Versuchsplan systematisch hergeleitet. Dieser orientiert sich an den Vorgaben der DIN EN ISO 9283 zur Ermittlung von Genauigkeitskenngrößen von Robotern. Es werden die Positionsgenauigkeit, Positionswiederholgenauigkeit, Positions-Bahngenauigkeit und Bahnwiederholgenauigkeit betrachtet. Die Ergebnisse werden analysiert, um Optimierungspotentiale für das gekoppelte System zu identifizieren und gemeinsam mit den Erkenntnissen aus der Steifigkeitsuntersuchung einen Entwicklungsplan für die Weiterentwicklung der Kopplung abzuleiten.

7.1 Steifigkeitsuntersuchung

Zur Erfüllung von Teilziel 3 aus Kapitel 3.1 wird eine Charakterisierung der statischen Steifigkeit des gekoppelten Systems vorgenommen und die Ergebnisse der Charakterisierung dem einzelnen Roboter gegenübergestellt. Die Steifigkeitsuntersuchung soll eine Beschreibung der Steifigkeit des gekoppelten Systems im Arbeitsraum und einen quantitativen Vergleich mit einem einzelnen Roboter ermöglichen. Aus dieser Zielsetzung leiten sich folgende zu beantwortende Fragen ab:

- In welchem Ausmaß kann die Systemsteifigkeit durch die Kopplung im Vergleich zum Einzelroboter gesteigert werden?

- Ist die Steifigkeit an jedem Punkt im Arbeitsraum höher oder gibt es Teilbereiche, in denen das gekoppelte System schlechtere Eigenschaften als ein Einzelroboter aufweist?
- Inwiefern führt die Kopplung zu einer homogeneren Steifigkeitsverteilung im Arbeitsraum, die weniger von der spezifischen Pose der Roboter abhängig ist?

Die Beantwortung der Fragen erfolgt durch die experimentelle Bestimmung der Steifigkeit des gekoppelten Systems in unterschiedlichen Posen. Dazu wird im Folgenden zunächst die Versuchsplanung erläutert. Anschließend wird die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse vorgestellt und abschließend eine Bewertung der Steifigkeitsuntersuchung durchgeführt.

7.1.1 Versuchsplanung

Im ersten Schritt der Versuchsplanung muss die Komplexität der Untersuchung auf ein handhabbares Maß reduziert werden. Dazu müssen einige Einschränkungen vorgenommen werden. Es werden ausschließlich die translatorischen Steifigkeiten des TCP in x-, y- und z-Richtung betrachtet, da Fertigungsprozesse in der Regel hohe Kräfte und vernachlässigbare Momente auf den TCP übertragen. Die Orientierung des Koppelmoduls wird während der gesamten Untersuchung in allen drei Orientierungsfreiheitsgraden konstant auf 0° gehalten. Zur weiteren Komplexitätsreduzierung wird innerhalb des Arbeitsraums des gekoppelten Systems ein Teilbereich als Versuchsraum definiert. Dieser Versuchsraum ist Gegenstand der Untersuchung. Abbildung 7-1 zeigt die Platzierung des Untersuchungsraums in der Roboterzelle bezüglich des Welt-KOS. Alle Koordinatenangaben in Kapitel 7 beziehen sich auf das Welt-KOS.

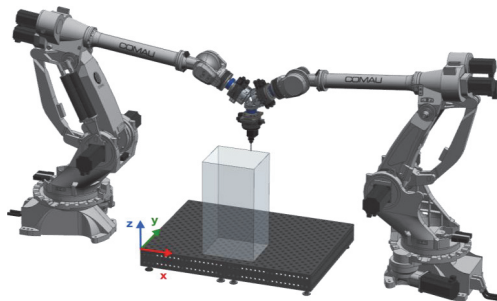


Abbildung 7-1: Platzierung des Versuchsraums in der Roboterzelle bezüglich des Welt-KOS

Da sich aus dem zu untersuchenden Versuchsraum ein empirisch bestimmtes Steifigkeitsmodell ergibt, ist eine generelle Extrapolation des charakterisierten Versuchsraums auf andere Teilbereiche des Arbeitsraums nicht zulässig (Kleppmann 2020, S. 6). Allerdings besteht die Möglichkeit, die ermittelten Steifigkeitswerte aufgrund von Symmetrieeigenschaften der Roboter auch auf andere Teilbereiche des gekoppelten Arbeitsraums übertragen zu können. Hierfür müssen die theoretisch geltenden Symmetrieeigenschaften der Roboter in zukünftigen Experimenten auch praktisch nachgewiesen werden.

Die Bestimmung der Steifigkeit soll durch Aufzeichnung des Kraft-Verschiebungs-Verlaufs bei Aufbringen einer langsam steigenden Kraft auf den Koppelmodul-TCP erfolgen. Als Messverfahren wird eine an (Jubien et al. 2014) angelehnte Vorgehensweise gewählt. Statt die Kraft durch ein bewegtes Objekt auf den stillstehenden TCP des Koppelmoduls auszuüben und die resultierende Verschiebung zu messen, wird das starre Objekt festsitzend im Raum platziert und das gekoppelte System gegen das Objekt bewegt. Die Roboter erzeugen die aufzubringende Kraft selbst, indem sie das Koppelmodul gegen das starre Objekt bewegen. Die Verschiebung des TCP entspricht dann dem laut Robotermesssystem gefahrenen Weg. Das Messprinzip ist in Abbildung 7-2 dargestellt. Mit dieser Messmethode kann sowohl auf ein externes Wegmesssystem als auch auf eine komplexe Aktorik zum Aufbringen von Kräften auf den TCP verzichtet werden. Die zu messenden Kräfte werden mithilfe von Kraftsensor C im Koppelmodul aufgezeichnet. Mit dem Kraft-Verschiebungsverlauf kann die Steifigkeit nach dem Hookeschen Gesetz berechnet werden (vgl. Formel 2-1).

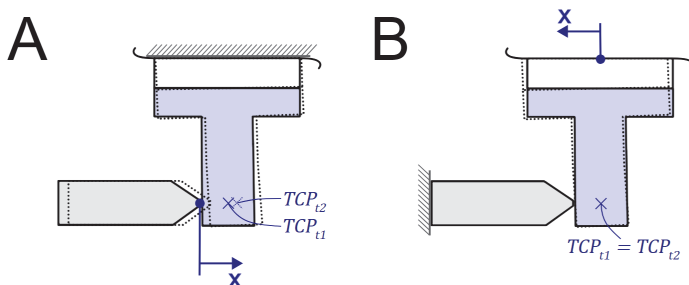


Abbildung 7-2: Messverfahren zur Ermittlung der Steifigkeit mit Kraftaufbringung durch bewegtes Objekt (links) und durch Bewegung des Roboters (rechts)

Um eine Vergleichbarkeit zwischen dem Einzelroboter und dem gekoppelten System zu gewährleisten, soll auch der Einzelroboter während der Messung mit dem Koppelmodul ausgestattet werden (siehe Abbildung 7-3). Dies erlaubt es, bei gleicher TCP-Messpose der beiden Systeme auch die jeweils gleiche Gelenkwinkelkonfiguration von Roboter A einzunehmen. Somit kann eine Verfälschung der Messergebnisse aufgrund unterschiedlicher Posen von Roboter A zum Erreichen eines gewünschten TCPs vermieden werden. Weiterhin ermöglicht die Anbringung des Koppelmoduls auch eine bessere Vergleichbarkeit, da die Steifigkeit beider Systeme hierdurch von dem im Koppelmodul integrierten Federsystem gleichermaßen beeinflusst wird.

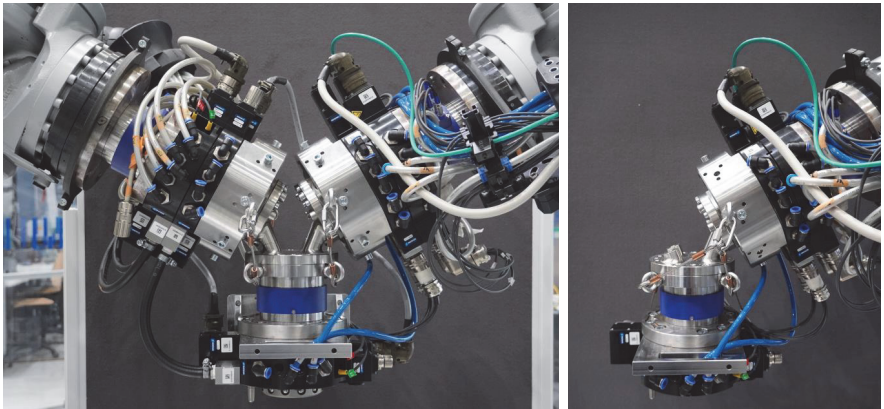


Abbildung 7-3: Gekoppeltes System (links) und Einzelroboter (rechts) mit Koppelmodul im Vergleich

Als starres Objekt zur Kraftaufbringung im Versuch dienen Doppel-T-Stahlträger. Die Stahlträger sind auf einer Befestigungsplatte aufgeschweißt, die die flexible Positionierung und Befestigung auf der Matrixplatte ermöglicht (siehe Abbildung 7-4 links). Um Messungen mit verschiedenen z-Werten durchführen zu können, werden mehrere Stahlträger mit unterschiedlichen Höhen eingesetzt (siehe Abbildung 7-4 mittig).

Die Bestimmung der Verschiebung des TCPs aus dem Wegmesssystem des Roboters beinhaltet die Annahme, dass die Stahlträger als starres, unnachgiebiges Objekt agieren. Die Stahlträger werden daher so ausgelegt, dass ihre Verformung aufgrund der vom gekoppelten System aufgebrachten Kräfte vernachlässigbar klein ist und die Stahlträger damit als starre Objekte angenommen werden können. Mithilfe der FEM-Simulation des höchsten Stahlträgers (siehe Abbildung 7-4 rechts) wird diese Auslegung

validiert. Am Krafteinleitungspunkt entsteht bei einer Last von 1000 N eine maximale Verformung von 0,03 mm. Vom gekoppelten System werden bei gleicher Last Verformungen von mindestens 2 mm erwartet. Daraus resultiert eine prozentuale Verfälschung der Messergebnisse um 1,5 %. Die Durchbiegung der Stahlträger kann also vernachlässigt werden.

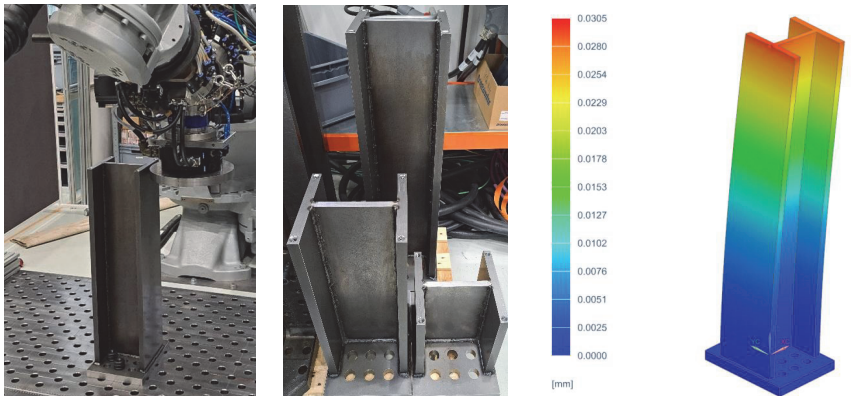


Abbildung 7-4: Befestigter Stahlträger während der Steifigkeitsmessung (links), verschiedene Höhen der Stahlträger (mittig) (A_Caixeta 2024) und FEM-Simulation der Durchbiegung des Stahlträgers bei einer Last von 1000 N (rechts)

Als Nächstes sollen die Einflussgrößen der Steifigkeitsuntersuchung betrachtet werden. Die Einflussgrößen können in Randbedingungen und Faktoren unterteilt werden. Randbedingungen beschreiben unveränderliche Größen, die vor der Versuchsdurchführung einmalig festgelegt werden und sich dann nicht mehr ändern. Als Faktoren werden, orientiert an der statistischen Versuchsplanung, veränderliche Größen bezeichnet, die während der Versuchsreihe ständig variiert werden.

An dieser Stelle sei erneut hervorgehoben, dass das Ziel der Steifigkeitsuntersuchung allerdings nicht – wie in der statistischen Versuchsplanung oft üblich – darin besteht, die Wechselwirkung der Faktoren untereinander und mit der Steifigkeit als Zielgröße zu untersuchen und zu modellieren, sondern zu prüfen, welche Größenordnung von Steifigkeitswerten grundsätzlich mit der Kopplung erreichbar ist und wie die Ergebnisse in Relation zum einzelnen Roboter abschneiden. Die Untersuchung setzt daher den Fokus auf die Kartografierung des Versuchsraums hinsichtlich der Steifigkeit.

Die betrachteten Einflussgrößen sind in Abbildung 7-5 dargestellt. Da die Steifigkeiten des gekoppelten Systems wesentlich von der Roboterpose abhängen, wird diese als Faktor in der Versuchsreihe betrachtet. Die Belastungsrichtung wird ebenfalls als Faktor betrachtet, da sich die Steifigkeitseigenschaften der Roboter bedingt durch ihren kinematischen Aufbau deutlich in den kartesischen Freiheitsgraden unterscheiden. Aus den zu erwartenden Ergebnissen der Versuchsreihe kann für jede Belastungsrichtung eine eigene richtungsspezifische 3D-Steifigkeitskarte erstellt werden.

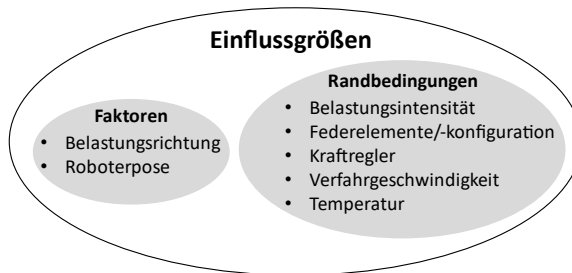


Abbildung 7-5: Einflussgrößen bei der Steifigkeitsuntersuchung

Für die Belastungsrichtung und Roboterpose müssen die Faktorstufen bestimmt werden. Bei der Belastungsrichtung ergeben sich die Faktorstufen aus den kartesischen Raumrichtungen. Es wird erwartet, dass bei einer Belastungsrichtung kein Unterschied zwischen einer Belastung in positiver und negativer Richtung hinsichtlich der Steifigkeit auftritt. Vorversuche haben allerdings gezeigt, dass teils erhebliche Abweichungen der Steifigkeit auftreten (A_Caixeta 2024). Eine mögliche Ursache für diese Abweichungen kann Umkehrspiel sein. Eine detaillierte Ursachenanalyse findet im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht statt.

Tabelle 7-1 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der Vorversuche zur Belastungsrichtung. Es sind die ermittelten Abweichungen zwischen positiver und negativer Belastung für drei unterschiedliche Posen dargestellt. Für jede Pose ist eine Steifigkeitsmessung in positiver und negativer Richtung jeweils für die x- und y-Achse dargestellt. Die z-Richtung wird nicht betrachtet, da das Messverfahren hier technisch bedingt nur eine Messung in positiver Richtung erlaubt. Die Messungen in y-Richtung zeigen für die Messpunkte eine Differenz zwischen positiver und negativer Belastung von 2–3,7 % gegenüber dem Mittelwert beider Belastungsrichtungen der jeweiligen Messpunkte. Die mittlere prozentuale Differenz für die y-Richtung beträgt 2,84 %. In x-Richtung beträgt die mittlere Differenz hingegen 21,63 %. Die Unterschiede in den Steifigkeitswerten bei

positiver und negativer Belastung lassen sich demnach in y-Richtung vernachlässigen, in x-Richtung aufgrund der großen Unterschiede jedoch nicht. Es ergeben sich somit vier zu betrachtende unterschiedliche Belastungsrichtungen. Diese sind die positive und negative x-Richtung sowie die positive y- und z-Richtung.

Tabelle 7-1: Ergebnisse der Vorversuche zur Belastungsrichtung (A_Caixeta 2024)

TCP-Position [mm]			Kartesische Achse	Steifigkeit in [N] bei		Differenz	
x	y	z		positiver Belastung	negativer Belastung	in [mm]	in [%]
1600	400	310	y	540,50	527,26	13,24	2,48
			x	393,51	315,66	77,84	21,95
400	400	310	y	297,74	308,97	11,23	3,70
			x	814,74	657,01	157,74	21,44
1600	1100	310	y	494,54	506,28	11,74	2,35
			x	415,07	334,50	80,57	21,50

Als Nächstes wird der Faktor Roboterpose betrachtet. Innerhalb des definierten Versuchsraums soll eine präzise Aussage über das Steifigkeitsverhalten des gekoppelten Systems möglich sein. Der Versuchsraum wird dazu analog zu den vier Stahlträgern in vier xy-Ebenen mit unterschiedlichen z-Werten unterteilt (siehe Abbildung 7-6) (A_Caixeta 2024).

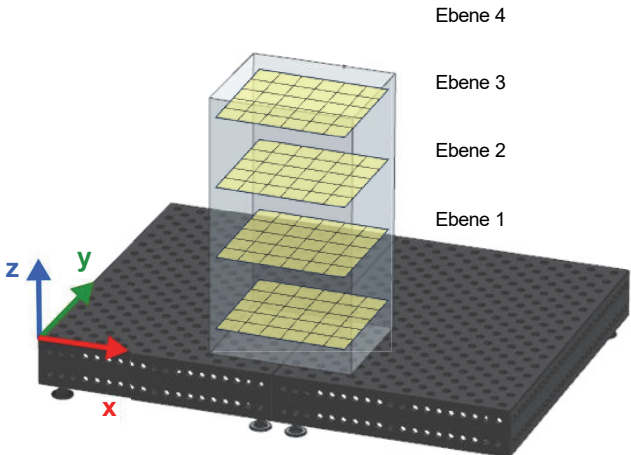


Abbildung 7-6: Räumliche Darstellung der Messebenen

Auf jeder Ebene werden neun Messpunkte definiert (siehe Abbildung 7-7) (A_Caixeta 2024). Die Messpunkte sind nicht immer äquidistant platziert, da technische Einschränkungen eine Steifigkeitsmessung in einem fixen Abstand nur teilweise erlauben (A_Caixeta 2024). In einzelnen Ebenen wird der messbare Bereich durch die Achse-5-Singularität sowie durch Achswinkelbegrenzungen der Roboter eingeschränkt. Je nach Belastungsrichtung lassen sich Messungen daher nicht immer exakt, sondern stattdessen nur angenähert an den gewünschten Punkten realisieren.

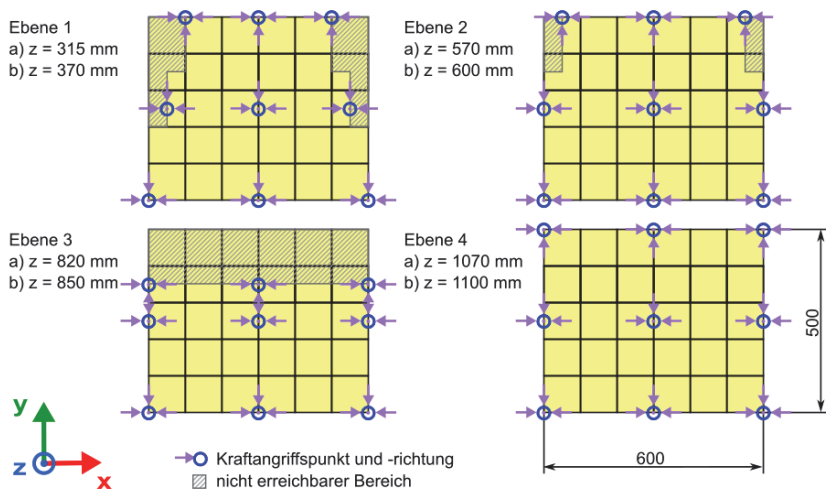


Abbildung 7-7: Einzelne Messebenen und Messpunkte des Versuchsraums

Die Steifigkeitsmessungen weichen technisch bedingt auch in z-Richtung hinsichtlich der z-Koordinate ab. Die Messungen in z-Richtung erfolgen durch den Kontakt des Koppelmoduls mit der Stirnseite der Stahlträger, während Messungen in x- und y-Richtung durch Kontakt mit den Seitenflächen des Stahlträgers durchgeführt werden (siehe Abbildung 7-8). Daraus ergeben sich bei Messungen in z-Richtung hinsichtlich der z-Koordinate nach oben versetzte Messpunkte. Dieser Versatz in z-Richtung wird in Abbildung 7-7 durch die Indizierung einer Ebene mit den Indizes a und b beschrieben, wobei Ersterer Messungen in x- und y-Richtung beschreibt und Letzterer sich auf Messungen in z-Richtung bezieht.

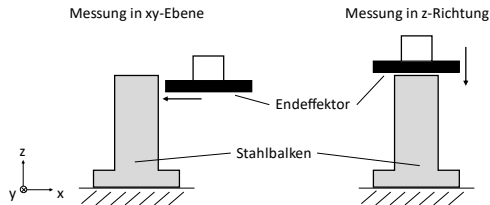


Abbildung 7-8: Unterschiede in der Messdurchführung nach Belastungsrichtung

Mit neun Messpunkten pro Ebene und vier Ebenen pro Belastungsrichtung ergeben sich 36 Faktorstufen für die Roboterpose. Gemeinsam mit den vier Belastungsrichtungen ergeben sich damit insgesamt 144 Kombinationen im Versuchsplan. Da Voruntersuchungen gezeigt haben, dass sich die Kraft-Weg-Verläufe nur in den ersten beiden Durchläufen einer Kombination verändern und ab dem dritten Durchlauf gleichbleiben, wird jede Kombination mit drei Wiederholungen ausgeführt. Der finale Versuchsplan mit den exakten Messpunkten ist in Anhang D zu finden. Analog dazu wird der gleiche Versuchsplan auch für den Einzelroboter aufgestellt und ausgeführt, um Referenzwerte zu bestimmen.

Als Nächstes werden die Randbedingungen betrachtet. Zu den relevanten Randbedingungen zählen unter anderem die Belastungsintensität und der Angriffspunkt der Last bei einer Messung. Die Belastungsintensität muss groß genug gewählt werden, sodass in den Roboter Gelenken kein Spiel mehr vorhanden ist und die mechanischen Kontaktflächen geschlossen sind. Aufgrund des Einflusses der Kontaktflächen wird erwartet, dass die Federkennlinie zunächst einen nichtlinearen Verlauf aufweist und sich anschließend einem linearen Verlauf annähert. Für den industriellen Einsatz ist das Steifigkeitsverhalten im linearen Bereich ausschlaggebend, da von einem Betrieb der Roboter unter Prozesslast ausgegangen wird.

Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass keine mechanischen Beschädigungen des gekoppelten Systems auftreten. Voruntersuchungen zur Bestimmung der geeigneten Prozesskraft haben gezeigt, dass lokale plastische Verformungen als Erstes in den Kontaktflächen der Knochenstreben des Sternelements aufgrund von hoher Flächenpressung auftreten. Dieser Schadensfall wurde in der simulativen Absicherung der Dimensionierung des Koppelmoduls nicht berücksichtigt. Um die Intaktheit des Koppelmoduls zu gewährleisten, wird für die Steifigkeitsuntersuchung ein Sternelement mit verstärkten Knochenstreben eingesetzt. Dazu werden die Knochenstreben im

Durchmesser von ursprünglich 22 mm auf 28 mm vergrößert. Außerdem wird der Kraftbetrag auf ein Maximum von 1000 N für das gekoppelte System und 600 N für einen Einzelroboter begrenzt. Der Krafteinleitungspunkt während einer Messung ist durch eine Stahlscheibe, die als eigener Endeffektor am Koppelmodul angebracht ist, gegeben (siehe Abbildung 7-9 rechts).



Abbildung 7-9: Krafteinleitungsendeffektor

Die eingesetzten Federelemente beeinflussen die statische Steifigkeit ebenfalls wesentlich. Die Härte der Federelemente, die mit der Steifigkeit korreliert, Materialermüdung und die Konfiguration des Federsystems spielen hierbei eine Rolle. Da eine möglichst steife Konfiguration gewünscht ist, werden die härtesten bzw. steifsten vom Regler gegenwärtig handhabbaren Federelemente in einer 8x1-Konfiguration eingesetzt.

Auch der entwickelte Kraftregler für die inneren Kräfte beeinflusst die Steifigkeit. Die genaue Wechselwirkung ist allerdings unbekannt und soll im Rahmen der Steifigkeitsuntersuchung nicht betrachtet werden. Während der einzelnen Messaufzeichnungen wird der Regler deaktiviert. Die vom Regler vorab ausgeführte Korrektur der Gelenkwinkel zur Einstellung der gewünschten inneren Kraft bleibt während der Messungen erhalten. Die eingestellte Vorspannung beträgt 0 N.

Weitere potentielle Einflussgrößen sind die Verfahrgeschwindigkeit und die Temperatur. Eine hohe Verfahrgeschwindigkeit verringert die Messlaufzeiten erheblich. Allerdings soll ein impulsartiger Kontakt des Koppelmoduls mit dem Stahlträger vermieden werden. Dieser kann zu Schwingungen führen und den aufgezeichneten Kraft-Weg-Verlauf verfälschen. Als Kompromisswert wird daher die Verfahrgeschwindigkeit auf 50 mm/min gesetzt (A_Caixeta 2024). Die Umgebungstemperatur liegt bei ca. 23 °C und wird als konstant angenommen, da sich die Roboterzelle in einer klimatisierten Halle befindet. Der Einfluss der Betriebstemperatur der Roboter wird vernachlässigt. Eine Übersicht der gewählten Werte der Randbedingungen für die Versuchsdurchführung ist in Tabelle 7-2 dargestellt.

Tabelle 7-2: Randbedingungen bei der Steifigkeitsuntersuchung

Randbedingung	Wert/Typ
Belastungsintensität	1000 N/600 N
Federelemente	GN 351-50-30-M10-EE-70 ³
Federkonfiguration	8x1-Konfiguration
Kraftregler	Deaktiviert und auf 0 N eingestellt
Verfahrgeschwindigkeit	50 mm/min
Umgebungstemperatur	23 °C

7.1.2 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Mit dem definierten Versuchsplan und den gegebenen Randbedingungen können die Versuche durchgeführt werden. Die Versuchsdurchführung und Datenaufzeichnung finden im Rahmen der Arbeit von (A_Caixeta 2024) statt. Mit den erfassten Daten werden Kraft-Weg-Verlaufs-Diagramme erstellt, aus denen letztendlich Steifigkeitswerte abgeleitet werden können. Nachfolgend wird die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse beschrieben. Diese umfassen die Verarbeitung und Auswertung der Daten, die qualitative Analyse des gekoppelten Systems und den Vergleich mit dem einzelnen Roboter. Außerdem werden Erkenntnisse zur Verbesserung der Homogenität der Steifigkeit im Arbeitsraum vorgestellt.

7.1.2.1 Verarbeitung und Auswertung der Messdaten

Abbildung 7-10 zeigt einen typischen Verlauf einer Messung. Jede Faktorstufenkombination wird mit drei Wiederholungen durchgeführt und als Durchlauf 1–3 im Graphen dargestellt. Der erste Durchlauf verläuft mit einem geringeren Anstieg als die folgenden Durchläufe. Die aus dem Kraft-Weg-Verlauf ermittelte Steifigkeit ist demnach bei der ersten Wiederholung einer Kombination immer geringfügig niedriger. Dies ist vermutlich auf das werkstoffspezifische Verhalten der Federelemente aus Naturkautschuk zurückzuführen (Gent 1962; Pintado et al. 2018). Nach dem Aufbringen der Messkraft und dem anschließenden Entlasten verbleibt eine gewisse mechanische Restspannung in den Federelementen, die sich über die Zeit abbauen kann. Da die folgenden Wiederholungen allerdings direkt ohne Zeitverzögerung durchgeführt werden, ist die Restspannung in den Federelementen noch vorhanden und führt zu einem steileren Anstieg des Kraft-Weg-Verlaufs der zweiten und dritten Wiederholung. Die Messung der nachfolgenden Kombination hingegen erfordert technisch bedingt eine gewisse Umrüstzeit.

³ Federelemente des Unternehmens Ganter Norm nach DIN 95363 mit einer Shorehärte von 70, Durchmesser 50 mm, Höhe 30 mm.

Daher können sich die Federelemente nun wieder entspannen und weisen beim ersten Durchlauf der neuen Kombination erneut einen schwächeren Anstieg auf als in den nachfolgenden Wiederholungen.

Zur Ermittlung der Steifigkeit wird jeder Durchlauf eines Kraft-Weg-Verlaufs in einzelne Segmente zerlegt, beginnend ab dem Kontaktpunkt, an dem Kräfte auftreten. Für jedes Segment wird die Steifigkeit aus der Kraft- und Wegdifferenz des Segments ermittelt. Diese Vorgehensweise stellt eine Annäherung an die Bestimmung der Steifigkeit über die Ableitung des Kraft-Weg-Verlaufs dar. Eine direkte Bestimmung über die Ableitung ist nicht möglich, da die Kraft-Weg-Verläufe nicht immer stetig differenzierbar sind.

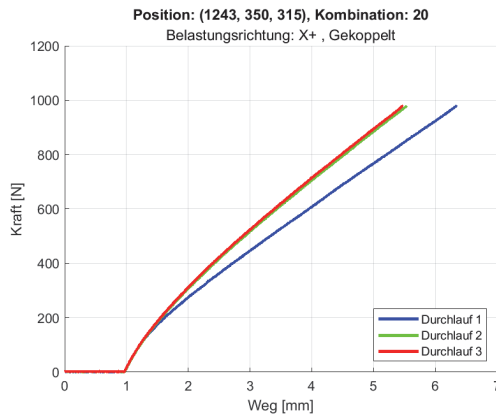


Abbildung 7-10: Kraft-Weg-Verlauf einer Steifigkeitsmessung mit TCP-Pose $x = 1243$, $y = 350$, $z = 315$, bezogen auf das Welt-KOS der Roboterzelle

Aus den Segmentsteifigkeiten wird die mittlere Steifigkeit eines Durchlaufs bestimmt. Anschließend werden die Steifigkeiten aller Durchläufe gemittelt, um die finale Steifigkeit des gekoppelten Systems der jeweiligen Faktorstufenkombination zu bestimmen. Die segmentweise Bestimmung der Steifigkeit liefert auch bei progressiven oder degressiven Kurvenverläufen präzise Ergebnisse.

Obwohl der verspannte Zustand eher den industriellen Einsatzbedingungen entspricht und damit die Steifigkeiten des zweiten und dritten Durchlaufs aussagekräftiger sind, wird der Ausreißer des ersten Durchlaufs bei der Berechnung der finalen Steifigkeit trotzdem mitberücksichtigt. Damit wird sichergestellt, dass die berechneten Steifigkeitswerte auch im Laborumfeld, in dem der nicht verspannte Zustand häufiger auftritt, valide sind.

7.1.2.2 Qualitative Analyse des gekoppelten Systems

Es wird erwartet, dass sich das posenabhängige Verhalten des gekoppelten Systems aus der Summe des Verhaltens der Einzelroboter ergibt. Das Steifigkeitsverhalten des Koppelmoduls selbst wird als konstant sowie posenunabhängig angenommen und beeinflusst die Steifigkeit des Gesamtsystems lediglich in Form eines konstanten Offsets. Daraus folgt, dass Trends im posenabhängigen Verlauf der Steifigkeiten des gekoppelten Systems ausschließlich auf das Verhalten der beiden Einzelroboter sowie deren Zusammenschaltung zurückzuführen sind. Daher ist es sinnvoll, sich vor der Betrachtung der Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchung des gekoppelten Systems nochmals den grundsätzlichen Steifigkeitsverlauf bei einzelnen Robotern anzuschauen.

Dazu wird das in Kapitel 6.3.3 entwickelte Steifigkeitsmodell betrachtet. Abbildung 7-11 zeigt eine Visualisierung des Steifigkeitsmodells für die Steifigkeit in x-, y- und z-Richtung bei einer Handachsenstellung von 0° . Die Darstellung ergibt sich durch einen Schnitt in der xz-Ebene eines zylindrischen Koordinatensystems. Die x-Achse entspricht damit der radialen Komponente, während die z-Achse die Höhe darstellt. Für die Kopplung ist vor allem der mittlere Teil des sichelförmigen Arbeitsraums relevant, da sich hier die Arbeitsbereiche beider Roboter der Roboterzelle überschneiden. An den oberen und unteren Enden des sichelförmigen Arbeitsraums ist eine Kopplung nicht möglich. In dem überschneidenden Arbeitsbereich variiert die Steifigkeit in x-Richtung insbesondere bei einer Auslenkung in z-Richtung, während sich die Steifigkeit in z-Richtung vor allem bei einer Auslenkung in radialer Richtung (x- oder y-Richtung) ändert. Dies ist auf die Veränderung der Hebelarme zwischen dem TCP und den Roboterachsen zurückzuführen.

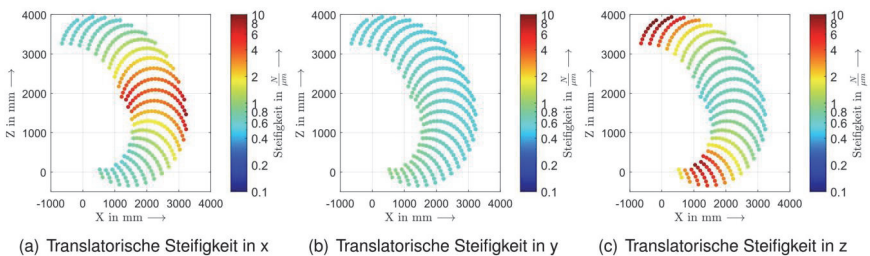


Abbildung 7-11: Kinematisches Steifigkeitsmodell des Comau-Roboters NJ290-3.0
(A_Kappus 2023)

Auf Grundlage des Vorwissens zum grundsätzlichen Steifigkeitsverhalten eines einzelnen Roboters sollen nun die experimentell ermittelten Steifigkeiten des gekoppelten Systems betrachtet werden. Die Steifigkeiten werden je Belastungsrichtung in einer 3D-Steifigkeitskarte dargestellt. Abbildung 7-12 zeigt die 3D-Plots der Steifigkeiten des gekoppelten Robotersystems für die vier untersuchten Belastungsrichtungen. Die x-, y- und z-Achsen beschreiben die jeweilige Position im Raum in Millimetern bezogen auf das Welt-KOS der Roboterzelle. Über eine Farbskala wird der Wert der Steifigkeiten in N/mm visualisiert. Die Farbskalierung ist für jeden Plot eigens definiert. Dies muss bei Vergleichen von mehreren Plots miteinander berücksichtigt werden.

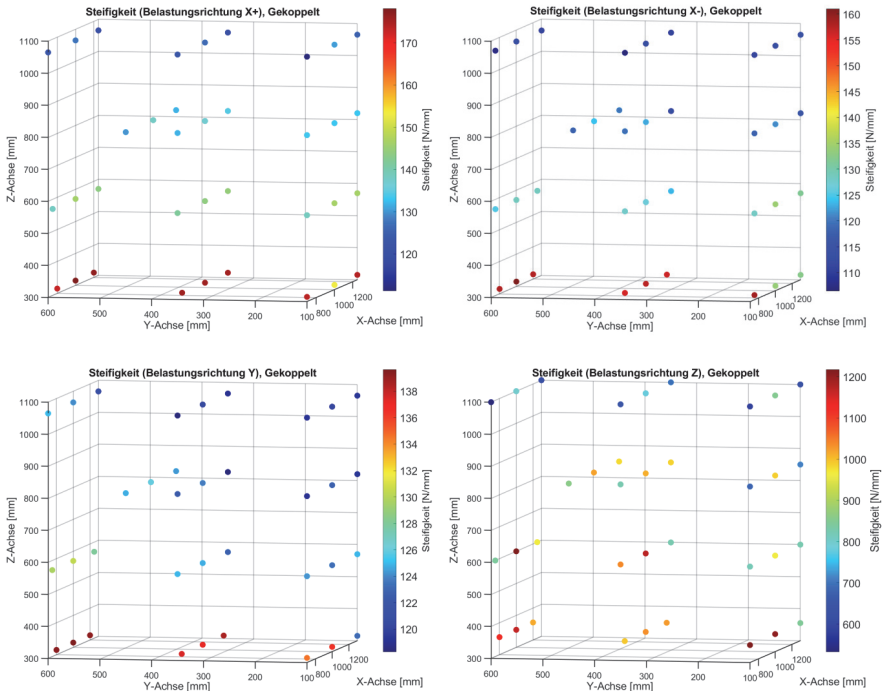


Abbildung 7-12: 3D-Steifigkeitskarten des gekoppelten Robotersystems für unterschiedliche Belastungsrichtungen

Bei Betrachtung der ersten beiden Plots zur positiven und negativen Belastung in x-Richtung fällt zunächst auf, dass die Verläufe der Steifigkeit miteinander vergleichbar sind. Die mittlere Abweichung zwischen der positiven und negativen Belastungs-

richtung über alle Posen hinweg beträgt 15,52 N/mm bzw. 11,75 %. Obwohl die Voruntersuchungen zur Belastungsrichtung eine zu signifikante Streuung der Steifigkeiten bei Vergleich der Belastungen in positiver und negativer x-Richtung gezeigt haben, um ein annähernd symmetrisches Verhalten anzunehmen (siehe Kapitel 7.1.1), lassen die Ergebnisse der 3D-Plots vermuten, dass das symmetrische Verhalten grundsätzlich vorhanden ist, jedoch bisher unbekannte Einflüsse eine nicht vernachlässigbare Streuung verursachen und die Steifigkeitswerte verfälschen.

Weiterhin fällt bei Betrachtung der beiden Plots auf, dass die Steifigkeit ansteigt, je tiefer sich der Messpunkt befindet. Die gleiche Verhaltensweise ist auch bei Belastung in y-Richtung erkennbar. In y-Richtung wird außerdem ein klarer Trend von einer niedrigeren Steifigkeit zu einer höheren Steifigkeit bei Verschiebung des Messpunkts in positiver y-Richtung ersichtlich. Dieses Verhalten ist zu erwarten, da auch die Steifigkeit des Einzelroboters in y-Richtung bei Reduzierung der Armauslenkung steigt. Zu beachten ist hier allerdings, dass sich die Steifigkeit von Einzelrobotern in y-Richtung generell deutlich konstanter verhält und weniger von der Pose beeinflusst wird als in anderen Richtungen. Dies spiegelt sich auch im 3D-Plot des gekoppelten Systems wider. Die Spannweite der Steifigkeiten verläuft lediglich von ca. 120 N/mm bis 138 N/mm und ist damit deutlich konstanter als in x- und z-Richtung.

Im Vergleich zur x- und y-Richtung ist die Steifigkeit in z-Richtung wie erwartet wesentlich größer, da der Untersuchungsbereich auch beim Einzelroboter höhere Steifigkeiten aufweist. Ein klarer Trend zur Erhöhung der Steifigkeit bei absinkendem Messpunkt ist erkennbar. Dies lässt sich ebenfalls mit dem gleichen Verhalten des Einzelroboters erklären.

7.1.2.3 Vergleich des gekoppelten Systems mit dem Einzelroboter

Die simulative Steifigkeitsmodellierung der Einzelroboter aus Abbildung 7-11 ist als Orientierung gegenüber dem gekoppelten System zur qualitativen Analyse und Betrachtung der Steifigkeitsverläufe im Raum hilfreich. Die konkreten Steifigkeitswerte eines solchen Modells weichen aber nach eigener Erfahrung deutlich von den realen Werten des Roboters ab. Sie sind daher nicht geeignet für einen quantitativen Vergleich mit dem gekoppelten System. Gründe für die Abweichungen des Modells von den realen Steifigkeiten eines Einzelroboters sind unter anderem vom Datenblatt abweichende reale Getriebesteifigkeiten, vom Modell abweichende Handgelenksstellungen im Betrieb und zusätzliche Massen sowie veränderte Hebelarme durch Endeffektoren.

Daher wird für den quantitativen Vergleich zwischen Einzelroboter und gekoppeltem System die Versuchsreihe zur Steifigkeitsmessung noch einmal analog für den Einzelroboter durchgeführt, um empirische Vergleichswerte zu ermitteln. Wie in Kapitel 7.1.1 beschrieben, wird eine Hälfte des Koppelmoduls an dem Einzelroboter angebracht. Dies ermöglicht es, sowohl die gleiche TCP-Pose als auch Gelenkwinkelkonfiguration des gekoppelten Systems anzunehmen. Zur Vergleichbarkeit werden im halben Koppelmodul ebenfalls Federelemente eingesetzt. Die Messungen werden mit einer reduzierten maximalen Kraft von 600 N durchgeführt, um das Koppelmodul nicht zu beschädigen. Abbildung 7-13 zeigt die Steifigkeitsplots des Einzelroboters.

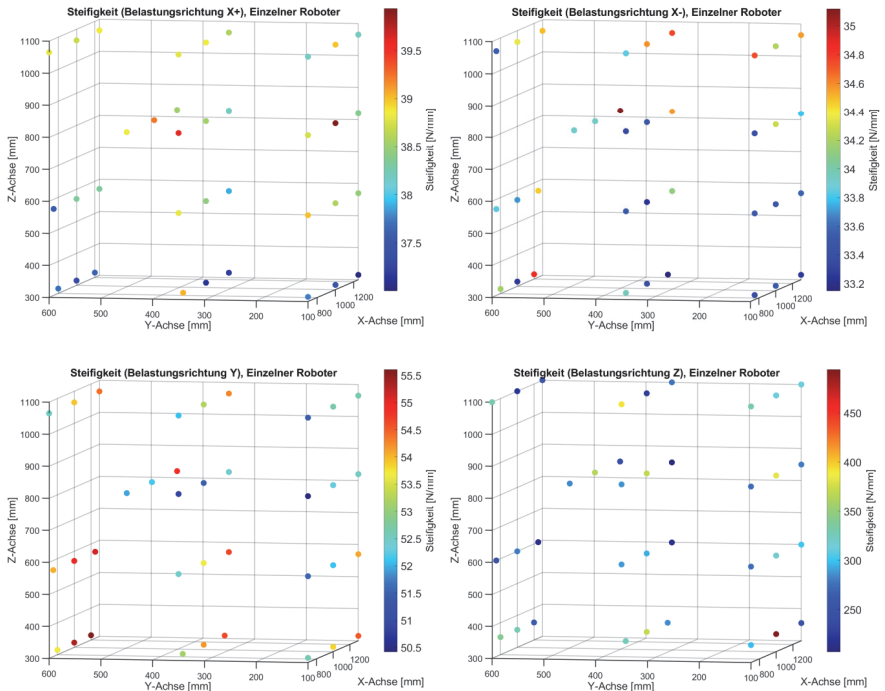


Abbildung 7-13: 3D-Steifigkeitskarten des Einzelroboters

Bei Betrachtung der Spannweite der Steifigkeiten der Einzelroboter fällt auf, dass diese für die Belastung in x- und y-Richtung extrem gering ist. Aufgrund der Posenabhängigkeit wird eine wesentlich größere Streuung erwartet. Um dies genauer zu prüfen, wird je Steifigkeitsplot die Standardabweichung der Messpunkte über alle Posen bestimmt.

Zusätzlich kann für jeden Messpunkt die Standardabweichung über die drei Messwiederholungen einer Messung ermittelt und daraus eine gemittelte Standardabweichung gebildet werden. Tabelle 7-3 zeigt den direkten Vergleich beider Größen für alle Belastungsrichtungen und beide Robotersysteme. Zum Vergleich sind die Kennwerte auch für das gekoppelte System dargestellt.

Tabelle 7-3: Vergleich der mittleren Standardabweichungen und Standardabweichungen über alle Posen

	Belastungsrichtung			
	x-	x+	y	z
Einzelroboter				
Standardabweichung über Posen	1,02	0,96	1,61	58,38
Mittlere Standardabweichung	2,75	2,06	2,92	10,16
Gekoppeltes System				
Standardabweichung über Posen	15,93	18,76	7,35	193,53
Mittlere Standardabweichung	5,60	5,16	5,56	19,98

Beim gekoppelten System ist wie erwartet die Streuung aufgrund der Pose deutlich größer als die mittlere Standardabweichung. Daraus lässt sich für den Einzelroboter schließen, dass die Posenabhängigkeit für Belastungen in x- und y-Richtung in den Messdaten nicht sichtbar ist. Dies ist vermutlich auf eine zu geringe maximale Belastung bei der Steifigkeitsmessung des Einzelroboters zurückzuführen, die zum Schutz des Koppelmoduls insbesondere beim Einzelroboter stark begrenzt werden musste. Die Belastung ist nicht hoch genug, um die Robotergelenke ausreichend zu verformen und den Einfluss der Gelenksteifigkeiten sichtbar zu machen. Die Messdaten spiegeln somit im Wesentlichen die Steifigkeit des halben Koppelmoduls wider und weisen daher auch keine posenabhängige Varianz auf. Die Messdaten des Einzelroboters für x und y sind für den Steifigkeitsvergleich relevant, erlauben aber keine direkten Rückschlüsse auf die Steifigkeitsverläufe über die Posen hinweg. Anhand der Daten in z-Richtung kann allerdings eine generelle qualitative Aussage zur Homogenität abgeleitet werden. Die Daten sind daher für die Validierung der simulativen Vorergebnisse zur reduzierten Posenabhängigkeit aus (Mühlbeier et al. 2021) geeignet. Für eine exakte quantitative Bewertung sind perspektivisch weiterführende Untersuchungen der Homogenität mit angepassten Koppelmodulen denkbar.

Hinsichtlich der Steifigkeitswerte ist eine direkte Vergleichbarkeit der beiden Robotersysteme in allen Richtungen gegeben. Zur Bewertung der beiden Systeme kann

Abbildung 7-14 herangezogen werden. Die Abbildung zeigt die mittlere Steifigkeit aller Messpunkte je Belastungsrichtung für beide Systeme. Für das gekoppelte System ergeben sich mittlere Steifigkeiten von 120–140 N/mm für die x- und y-Richtung sowie von 896 N für die z-Richtung. Die Steifigkeiten des gekoppelten Systems sind durchschnittlich um den Faktor 3,13 größer.

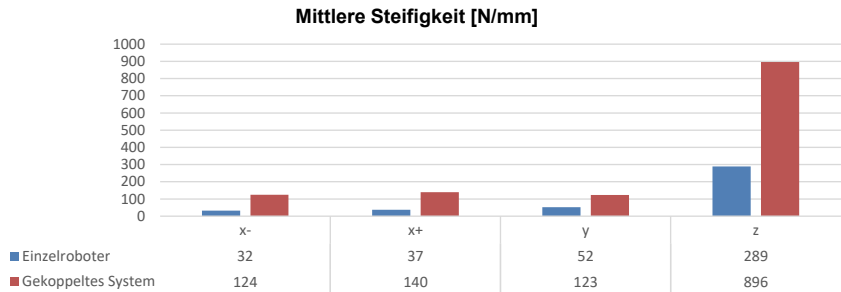


Abbildung 7-14: Mittlere Steifigkeiten nach Belastungsrichtung

Wie bereits erwähnt ist beim Einzelroboter zur besseren Vergleichbarkeit ebenfalls das nachgiebige Federsystem eingebaut, obwohl es technisch nicht notwendig ist, da der Einzelroboter keine geschlossene kinematische Kette aufweist. Es wird daher eine zusätzliche Versuchsreihe mit reduziertem Umfang durchgeführt, bei der die Federelemente durch Stahlblöcke mit gleicher Geometrie ersetzt werden. Dieses System stellt einen wesentlich realistischeren Vergleich bezüglich des industriellen Einsatzes von Robotern dar. Damit soll geprüft werden, wie das gekoppelte System zum jetzigen Entwicklungsstand gegenüber Robotern im industriellen Einsatz abschneidet. Für die Versuchsreihe werden exemplarisch zwölf Punkte ausgewählt und die Steifigkeit mit Stahlblöcken in unterschiedlichen Belastungsrichtungen erneut gemessen. Die Koordinaten der ausgewählten Messpunkte sind in Tabelle 7-4 dargestellt.

Tabelle 7-4: Messpunkte der Steifigkeitsmessung mit Stahlblöcken

Position	(1) x-	(2) x-	(3) x+	(4) x+	(5) y	(6) y	(7) y	(8) y	(9) z	(10) z	(11) z	(12) z
x	750	1000	1250	1000	1000	1000	750	100	1250	1000	1000	1000
y	100	100	100	600	350	100	600	600	600	600	350	100
z	315	350	315	315	350	315	570	600	570	570	600	570

Abbildung 7-15 zeigt für jeden Messpunkt die Steifigkeiten der drei Systeme: Einzelroboter mit Federelementen, Einzelroboter mit Stahlelementen und gekoppeltes System.

Abgesehen von Messpunkt 5 und 6 wird sichtbar, dass das gekoppelte System auch deutlich höhere Steifigkeiten erreichen kann als der Einzelroboter mit Stahlblöcken. Das gekoppelte System liefert damit trotz gegenwärtig noch erforderlicher Federelemente bereits bessere Steifigkeitseigenschaften als ein Einzelroboter und besitzt Potential für noch weitaus größere Steifigkeitssteigerungen.

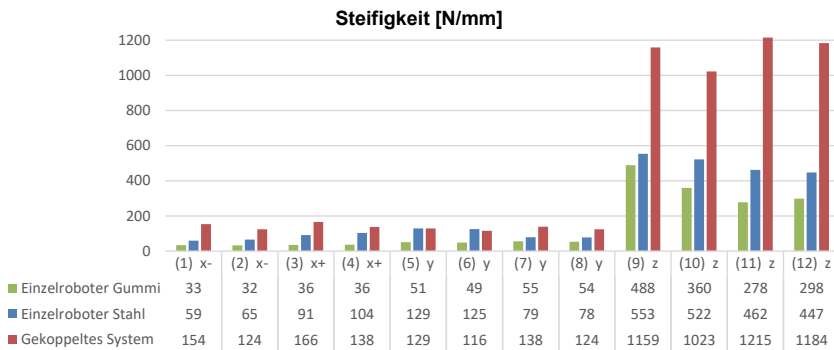


Abbildung 7-15: Vergleich der Steifigkeiten für die Systeme Einzelroboter, Einzelroboter mit Stahlfedern und gekoppeltes System in unterschiedlichen Posen

7.1.2.4 Homogenität der Steifigkeit des gekoppelten Systems

Da sich das Steifigkeitsverhalten des gekoppelten Systems im Wesentlichen aus dem Verhalten der einzelnen Roboter ergibt, lassen sich auch für die Homogenität im Arbeitsraum Rückschlüsse bezüglich der zu erwartenden Ergebnisse aus dem Verhalten der Einzelroboter ziehen.

Hierfür soll erneut die in Kapitel 7.1.2.2 in Abbildung 7-11 vorgestellte Simulation der Einzelrobotersteifigkeit betrachtet werden. Im gekoppelten Zustand kompensieren sich die radialen Auslenkungen bezüglich der Steifigkeit in z-Richtung üblicherweise. Wenn ein Roboter stärker radial ausgelenkt ist, nimmt der andere Roboter eine Haltung mit geringerer Auslenkung ein. Daraus lässt sich ableiten, dass die Steifigkeit des gekoppelten Systems in z-Richtung eine größere Homogenität gegenüber dem Einzelroboter aufweisen kann, wenn Bewegungen in radialer Richtung ausgeführt werden. Gleiches Verhalten weist auch die Steifigkeit in y-Richtung auf. Allerdings ist der Einfluss der Pose hier generell sehr gering und der zu erwartende Kompensationseffekt durch die Kopplung vernachlässigbar. Die Steifigkeit in x-Richtung hingegen kann nicht von dem

Kompensationsverhalten profitieren. Im koppelbaren Bereich hängt sie, wie bereits erwähnt, im Wesentlichen von der z-Koordinate ab. Bei einer Bewegung in z-Richtung verhalten sich beide Einzelroboter hinsichtlich ihrer Auslenkung allerdings gleich. Die Auslenkung nimmt bei beiden entweder gleichzeitig zu oder ab.

Da also eine reduzierte Posenabhängigkeit und damit eine größere Homogenität der Steifigkeit vor allem in z-Richtung bei einer Bewegung in der xy-Ebene zu erwarten ist, wird in Abbildung 7-16 erneut die 3D-Steifigkeitskarte des gekoppelten Systems in z-Richtung betrachtet.

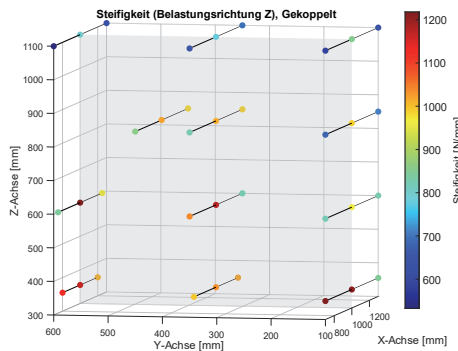


Abbildung 7-16: 3D-Steifigkeitskarte des gekoppelten Robotersystems in z-Richtung mit Symmetrieebene

In dieser Steifigkeitskarte stellt die yz-Ebene bei $x = 1000$ mm eine Symmetrieebene zwischen beiden Robotern dar. Sie befindet sich genau mittig mit gleichem Abstand zu beiden Robotern. Von der Symmetrieebene ausgehend wird aufgrund der Kompensation der Auslenkungen erwartet, dass die Steifigkeit links und rechts von der Symmetrieebene (entspricht einer Bewegung in der xy-Ebene bei konstantem z-Wert) ähnlich verläuft. Dieser Effekt ist vor allem bei den Messpunkten der vierten Ebene ($z = 1100$ mm) erkennbar.

Zur genaueren Analyse der vierten Ebene werden in Abbildung 7-17 3D-Wirkungsflächendiagramme der Ebene und zugehörige Konturdiagramme der Steifigkeit dargestellt. Auf der linken Seite sind die Diagramme des gekoppelten Systems zu sehen. Die rechte Seite zeigt die Messwerte des Einzelroboters. Die Steifigkeiten sind zur besseren Vergleichbarkeit jeweils über ihren Mittelwert normiert. Zur Erzeugung der Diagramme wird die Thin-Plate-Spline-Interpolationsmethode verwendet.

Von der Symmetrieebene bei $x = 1000$ mm ausgehend lässt sich beim gekoppelten System ein deutlich symmetrischer Verlauf der Wirkungsfläche erkennen. Das Konturdiagramm bestätigt den symmetrischen Verlauf. Der Verlauf beim Einzelroboter zeigt hingegen kein symmetrisches Verhalten um die Symmetrieebene. Die Ergebnisse bestätigen daher die Hypothese der gegenseitigen Kompensation der Roboter über ihre Auslenkungen.

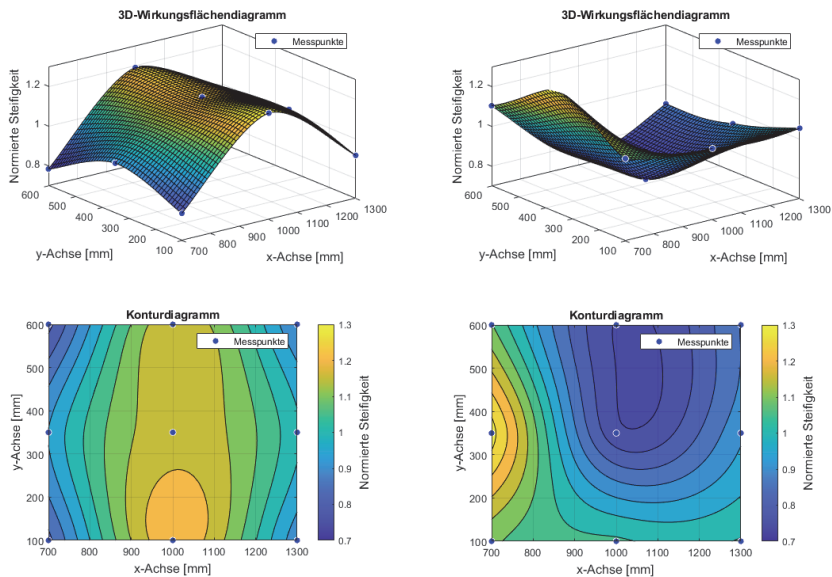


Abbildung 7-17: 3D-Wirkungsflächendiagramm und Konturplot für die Steifigkeit in z-Richtung der Messpunkte der vierten Ebene für das gekoppelte System (links) und den Einzelroboter (rechts)

Wird hingegen der gesamte Versuchsraum statt nur der vierten Ebene betrachtet, ist der Unterschied im symmetrischen Verlauf zwischen Einzelroboter und gekoppeltem System weniger ausgeprägt. Mit der Betrachtung des gesamten Versuchsraums wird eine weitere Dimension (z-Richtung) berücksichtigt und eine Dimensionsreduktion zur Erzeugung der Diagramme erforderlich. Da eine stärkere Homogenität im Wesentlichen hinsichtlich einer Bewegung in der xy-Ebene (also bei konstantem z-Wert) erwartet wird, erfolgt die Dimensionsreduktion um die z-Achse. Dazu werden Messpunkte, die die gleichen x- und y-Koordinaten haben, zusammengefasst und gemittelt.

Anschließend werden analog zum oben bereits beschriebenen Vorgehen die Wirkungsflächendiagramme und Konturplots erzeugt.

Abbildung 7-18 zeigt die Ergebnisse. Das Wirkungsflächendiagramm des gekoppelten Systems zeigt eine wesentlich komplexere Verteilung im Vergleich zur alleinigen Betrachtung von Ebene 4. Dennoch lassen sich Symmetrieeigenschaften um die Symmetrieebene erahnen, insbesondere im Vergleich zur Wirkungsfläche des Einzelroboters. Deutlicher wird dies bei Betrachtung der Konturdiagramme. Hier wird ersichtlich, dass die Farbverläufe und Konturlinien des gekoppelten Systems annähernd symmetrisch zur Symmetrieebene sind und eine wesentlich bessere Symmetrie als der Einzelroboter aufweisen. Insgesamt sind die Symmetrieeigenschaften weniger stark ausgeprägt als bei der separaten Betrachtung der vierten Ebene. Dennoch lässt sich im Vergleich zum Einzelroboter definitiv eine reduzierte Posenabhängigkeit und damit stärker ausgeprägte Homogenität der Steifigkeit in z-Richtung feststellen.

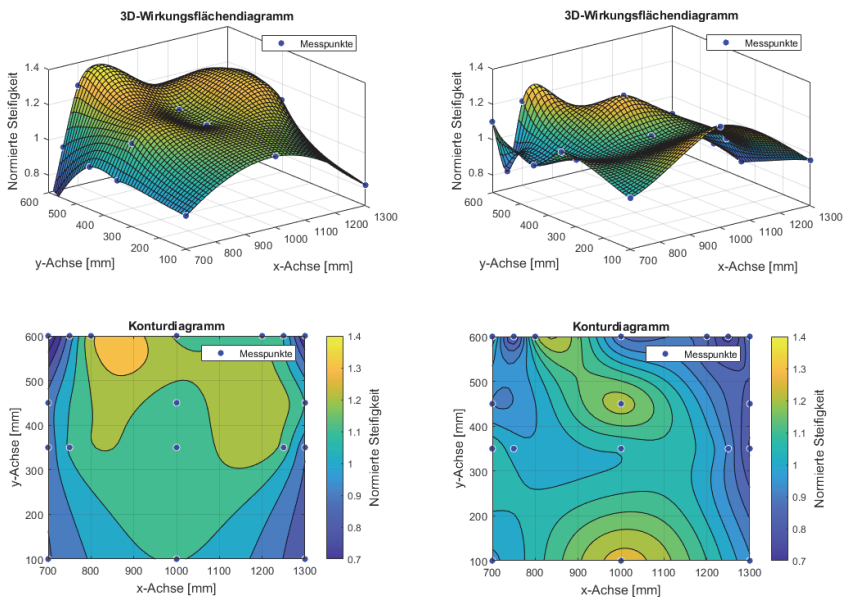


Abbildung 7-18: 3D-Wirkungsflächendiagramm und Konturplot für die Steifigkeit in z-Richtung der Messpunkte der aggregierten Ebenen für das gekoppelte System (links) und den Einzelroboter (rechts)

7.1.3 Bewertung der Ergebnisse

Mit der Steifigkeitsuntersuchung sollen die in Kapitel 7.1 genannten Forschungsfragen zur Erfüllung von Teilziel 3 beantwortet werden. Daher soll im Folgenden auf das Ausmaß der Steifigkeitssteigerung, die Konsistenz der Steigerung im Arbeitsraum und die Homogenität der Steifigkeitsverteilung eingegangen werden.

Die Messergebnisse zeigen eine durchschnittliche Steigerung der Steifigkeit durch die Kopplung um den Faktor 3,13. Dieser Faktor gilt auch bei Betrachtung der einzelnen Belastungsrichtungen. Die Steifigkeiten des gekoppelten Systems sind ausnahmslos bei jedem Messpunkt höher. Auch im Vergleich zum Einzelroboter mit eingesetzten Stahlelementen weist das gekoppelte System bessere Steifigkeitseigenschaften auf. Damit erweist sich das Potential zur Steifigkeitssteigerung durch die Kopplung als vielversprechend. Insbesondere der zukünftige Verzicht auf die Federelemente im Koppelmodul kann zu einer weiteren enormen Steifigkeitssteigerung beitragen.

Die Analyse der Ergebnisse der Einzelroboter zeigt, dass höhere Lasten bei der Versuchsdurchführung notwendig sind, um eine ausführliche Untersuchung der Homogenität vornehmen zu können. In den gegebenen Versuchsdaten ist der posenabhängige Einfluss der Steifigkeit in den Daten des Einzelroboters nicht sichtbar, weshalb kein Vergleich mit dem gekoppelten System möglich ist. Ein Vergleich der Streuung zwischen einzelnen Messwiederholungen eines Messpunkts mit der Streuung über mehrere Messpunkte hinweg bestätigt diese Annahme. Eine Ausnahme bildet die Steifigkeit in z-Richtung. Hier ist die Posenabhängigkeit sichtbar und kann analysiert werden. Die Ergebnisse machen deutlich, dass grundsätzlich eine größere Homogenität und eine Reduzierung der Posenabhängigkeit besteht. Dies ist auf die gegenseitige Kompensation der Auslenkungen der Roboterarme bei einer Bewegung in der xy-Ebene zurückzuführen. Weitere spezifische Untersuchungen zur Posenabhängigkeit sind jedoch sinnvoll, um mit größerer Sicherheit Aussagen über die Homogenität treffen zu können.

Die experimentell ermittelten Steifigkeitswerte basieren auf der Messung der Kraft mit an den Robotern angebrachten Kraftsensoren. Die Sensoren haben einen mehrere Meter langen Übertragungsweg der Kraftsignale in Form von analogen Daten und unterliegen daher entlang des Leitungswegs Störeinflüssen (elektromagnetische Felder, mehrfache Steckverbindungen und Steckerwackelkontakte). Die gemessenen Daten weisen somit immer eine gewisse Unsicherheit auf. Die Resultate der Steifigkeitsuntersuchung sind daher als erste Einschätzung der Steifigkeiten des gekoppelten Systems

zu interpretieren. Sie zeigen das grundsätzliche Potential von gekoppelten Systemen auf und sind vor allem in Relation zum Einzelroboter statt als absolute Werte zu betrachten.

7.2 Genauigkeitsuntersuchung

Neben der Untersuchung der Steifigkeit ist eine weitere Hauptaufgabe zur Erfüllung von Teilziel 3 die Charakterisierung der Genauigkeit des gekoppelten Systems. Es sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Ist das gekoppelte Robotersystem genauer als ein Einzelroboter?
- Ist die Absolutgenauigkeit des gekoppelten Systems weniger von der spezifischen Pose abhängig und damit homogener im Raum?

Zur Beantwortung der Fragen wird eine Genauigkeitsuntersuchung im Rahmen der Arbeit von (A_Klein 2024) durchgeführt. Die Untersuchung wird im Folgenden, beginnend mit der Versuchsplanung, vorgestellt. Anschließend erfolgt die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse und schließlich die Bewertung der Genauigkeitsuntersuchung.

Die Vorgehensweise bei der Genauigkeitsuntersuchung ist an die DIN EN ISO 9283 angelehnt. Die Norm beschreibt die Vorgehensweise zur Ermittlung verschiedener Genauigkeitsgrößen für einzelne Roboter. Von den in der Norm genannten Genauigkeitsgrößen werden folgende Größen zur Beschreibung der Pose- und Bahngenauigkeit im Rahmen dieser Untersuchung betrachtet:

- Positionsgenauigkeit (AP_p)
- Positions-Wiederholgenauigkeit (RP_i)
- Positions-Bahn-Genauigkeit (AT_p)
- Positions-Bahn-Wiederholgenauigkeit (RT_p)

Die genannten Größen werden oft auch als Absolut- und Wiederholgenauigkeit bezeichnet. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden zur besseren Lesbarkeit ebenfalls diese Bezeichnungen verwendet. Tabelle 7-5 zeigt die exakte Zuordnung der gängigen Bezeichnungen zu den normierten Begriffen. Dabei ist zu beachten, dass unter den Begriffen der Absolut- und Wiederholgenauigkeit im Rahmen der Arbeit immer Genauigkeitskenngrößen der Position zu verstehen sind. Orientierungsgenauigkeiten werden in der Arbeit nicht betrachtet.

Tabelle 7-5: Einordnung der Genauigkeitskenngrößen

Bezeichnung nach Norm (DIN EN ISO 9283)	Gängige Bezeichnung	Formelzeichen nach Norm
Positionsgenauigkeit	Absolutgenauigkeit	AP_p
Positions-Wiederholgenauigkeit	Wiederholgenauigkeit	RP_l
Positions-Bahn-Genauigkeit	Bahn-Absolutgenauigkeit	AT_p
Positions-Bahn-Wiederholgenauigkeit	Bahn-Wiederholgenauigkeit	RT_p

7.2.1 Versuchsplanung

Analog zur Steifigkeitsuntersuchung erfolgt auch für die Genauigkeitsuntersuchung zunächst die Bestimmung des Versuchsraums. Laut DIN EN ISO 9283 soll eine schiefe Ebene, in einem Würfel liegend, der den größtmöglichen Teil des Arbeitsraums abdeckt, als Messebene verwendet werden. Angepasst an die Arbeitsraumrestriktionen des gekoppelten Systems wird eine schiefe Ebene in einem möglichst großen Quader des Arbeitsraums definiert. Abbildung 7-19 zeigt die Versuchsebene im Welt-KOS. In Blau dargestellt sind die für das gekoppelte System erreichbaren Bereiche auf verschiedenen Höhen. In diese wird die schiefe Ebene mit maximal möglicher Neigung gelegt. Da das gekoppelte System mittig im Arbeitsraum die Achse-5-Singularität der beiden Roboter erreicht, wird die schiefe Ebene in negativer y-Richtung außermittig verschoben. Die aus diesen Restriktionen resultierende schiefe Versuchsebene mit den geplanten Versuchsfahrten ist in Gelb dargestellt. Die Norm empfiehlt als Versuchsfahrten Punktfolgen für die Bestimmung der Positionsgenauigkeiten sowie Kreis- und Linearfahrten zur Bestimmung der Bahngenauigkeiten.

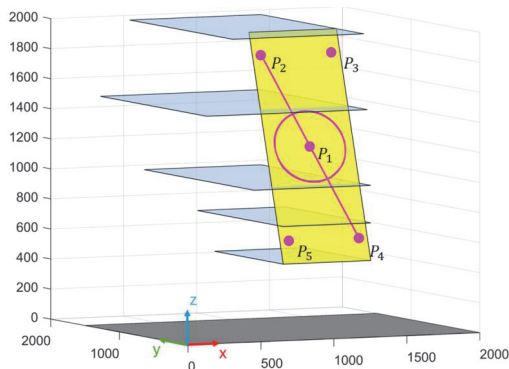


Abbildung 7-19: Schiefe Versuchsebene im Welt-KOS (A_Klein 2024)

Zur Aufstellung des Versuchsplans sind zunächst die relevanten Einflussgrößen zu bestimmen. Eine Übersicht über die Einflussgrößen ist in Abbildung 7-20 dargestellt. Für die Verfahrensgeschwindigkeit sind Werte und Abstufungen aus der Norm vorgegeben. Als Federsystem wird die 8x1-Messkonfiguration verwendet (siehe Kapitel 6.5.1). Die Temperatur liegt bei konstanten 23 °C. Die Messungen sollen laut Norm unter Last durchgeführt werden. Das Koppelmodul dient hierbei als Grundlast für die Roboter. Zusätzliche Lasten werden nicht angebracht. Eine Variation der Last wird zur Reduzierung der Komplexität nicht durchgeführt.

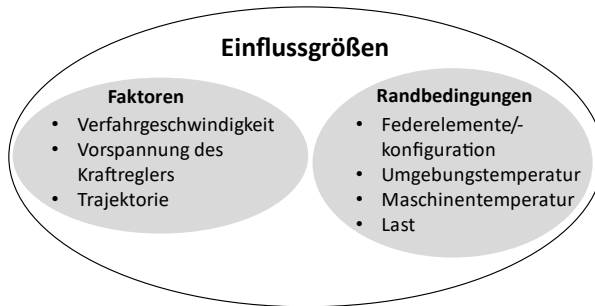


Abbildung 7-20: Einflussgrößen bei der Genauigkeitsuntersuchung

Als Faktoren werden die Geschwindigkeit, die Vorspannung des Kraftreglers und die Trajektorie festgelegt (A_Klein 2024). Für die Geschwindigkeit werden laut Norm Fahrten mit 10 % und mit 100 % einer selbst definierten Referenzgeschwindigkeit empfohlen. Als Referenzgeschwindigkeit werden 6000 mm/min festgelegt. Die niedrigere Geschwindigkeitsstufe beträgt damit 600 mm/min. Die Vorspannung wird ebenfalls in zwei Faktorstufen betrachtet. Die niedrigere Stufe entspricht einem spannungsfreien Zustand. Die hohe Stufe wird mit einer Vorspannungskraft von 1000 N in x-Richtung festgelegt.

Die Trajektorie hingegen ist kein Faktor im eigentlichen Sinne, da ihre Wechselwirkung mit den anderen Faktoren und den Zielgrößen nicht untersucht wird. Stattdessen werden entsprechend der Norm für jede Trajektorie eigene Genauigkeiten berechnet. Die Trajektorie wird im Versuchsplan dennoch wie ein Faktor behandelt, da sie während der Versuchsdurchführung genauso wie die eigentlichen Faktoren bei jeder Kombination variiert. Eine alternative Trennung in drei separate Versuchspläne würde den Randomisierungsgrad dagegen deutlich verschlechtern. Als Trajektorien werden wie bereits erwähnt eine Punktfolge, eine Kreisbahn und eine Gerade definiert.

Damit ergeben sich insgesamt zwölf Faktorstufenkombinationen. Tabelle 7-6 zeigt die Faktoren und Faktorstufen als Übersicht. Jede Faktorstufenkombination wird entsprechend der Norm zehn Mal wiederholt. Um dem verfälschenden Einfluss einer potentiellen Materialermüdung der Federelemente vorzubeugen, findet eine Blockbildung und Randomisierung des Versuchsplans statt (A_Klein 2024).

Tabelle 7-6: Faktoren und Faktorstufen der Genauigkeitsuntersuchung

	Geschwindigkeit [mm/min]	Kraftregler [N]	Trajektorie
Stufe 1	600	0	Punktfolge
Stufe 2	6000	1000	Kreisbahn
Stufe 3	-	-	Gerade

Analog zur Steifigkeitsuntersuchung wird der Versuchsplan auch für den Einzelroboter zur Bestimmung von Referenzwerten durchgeführt. Da beim Einzelroboter keine Vorspannung möglich ist, reduziert sich der Versuchsplan auf sechs Faktorstufenkombinationen.

Die Messaufzeichnung erfolgt mit dem Lasertracker Leica AT960. Abbildung 7-21 links zeigt die Integration des Reflektorsystems T-Mac im Koppelmodul. Das System besteht aus einem klassischen Reflektor (gelb) zur Bestimmung der Position und zusätzlichen LED-Elementen (rot) zur Bestimmung der Orientierung. Die LED-Signale werden von einer Kamera im Lasertracker erfasst und können zur Orientierungsberechnung genutzt werden. Somit können zukünftig auch Orientierungen gemessen werden. Analog zur Steifigkeitsuntersuchung wird die Einzelrobotermessung mit dem halben Koppelmodul und befestigtem T-Mac durchgeführt. Für die Einzelrobotermessungen werden die Federelemente durch Stahlblöcke ersetzt.

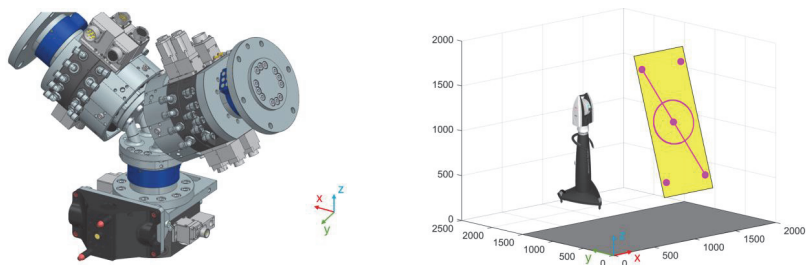


Abbildung 7-21: Integration des T-Mac im Koppelmodul (links) und Platzierung des Lasertrackers im Versuchsraum (rechts) (A_Klein 2024)

Abbildung 7-21 rechts zeigt die Positionierung des Lasertrackers im Versuchsraum bezogen auf das Welt-KOS. Die Oberfläche der Matrixplatte ist in Grau dargestellt. Der Koordinatenursprung des Welt-KOS liegt in einem Eckpunkt der Matrixplatte. Vor Beginn der Messungen wird der Lasertracker bezüglich des Welt-KOS referenziert. Außerdem finden dreistündige Aufwärmfahrten der einzelnen Roboter mit einer angebrachten Last von jeweils 15 kg statt. Abbildung 7-22 zeigt den Versuchsaufbau während einer Messung. Farblich hervorgehoben sind der Lasertracker (rot), das Koppelmodul (grün) und der T-Mac-Reflektor (orange). Die Versuchsdurchführung und die Datenaufzeichnung finden im Rahmen der Arbeit von (A_Klein 2024) statt.

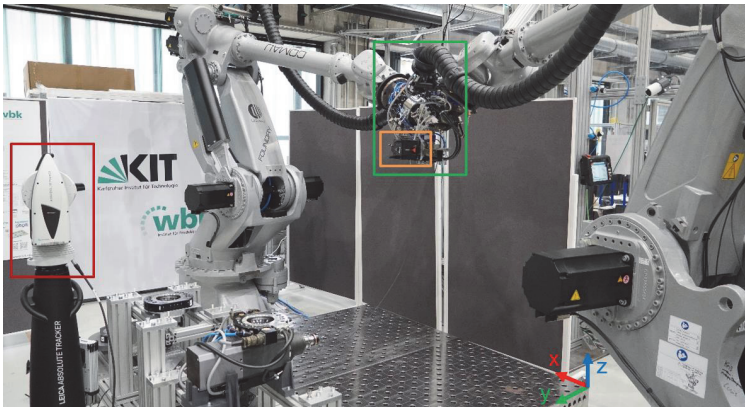


Abbildung 7-22: Genauigkeitsmessung in der Roboterzelle mit Lasertracker und 6-DOF-Reflektor

7.2.2 Auswertung und Interpretation

In diesem Kapitel werden ausgehend von dem entworfenen Versuchsplan die Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung vorgestellt. Im ersten Schritt werden die Positionsgenauigkeitskenngrößen anhand des Versuchs zur Punktfolge dargelegt. Anschließend folgt die Analyse der Bahngenauigkeitskenngrößen anhand der Versuche zur Kreis- und Geradenbahn. Die Ermittlung aller betrachteten Genauigkeitskenngrößen erfolgt nach DIN EN ISO 9283 (siehe Anhang E und Anhang F).

7.2.2.1 Absolutgenauigkeit

Aus den Ergebnissen der Versuchsreihe der Punktfolge werden die Positionsgenauigkeitskenngrößen bestimmt. Abbildung 7-23 zeigt die Reihenfolge, in der die Punkte laut Norm abgefahren werden. Zunächst soll die Absolutgenauigkeit betrachtet werden.

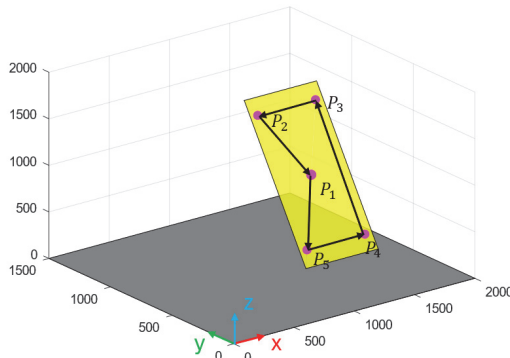


Abbildung 7-23: Reihenfolge und Bewegungsrichtungen der Messung der Punktfolge (A_Klein 2024)

Tabelle 7-7 zeigt die berechnete Absolutgenauigkeit für unterschiedliche Faktorstufenkombinationen für die Punkte P₁ bis P₅ für das gekoppelte System. Es zeigt sich zunächst, dass der Einfluss der Faktorstufen vernachlässigbar ist. Die Standardabweichung über alle in der Tabelle dargestellten Werte beträgt 0,6 mm und ist deutlich geringer als die mittlere Wiederholgenauigkeit von 1,8 mm (siehe Tabelle 7-9). Der Einfluss der Faktoren ist daher nicht signifikant.

Tabelle 7-7: Absolutgenauigkeit (AP_p) des gekoppelten Robotersystems (A_Klein 2024)

Geschwindigkeit		-	-	+	+
Vorspannung		-	+	-	+
Absolut- genauigkeit AP_p [mm]	P ₁	24,48	24,22	24,44	24,26
	P ₂	24,76	24,98	24,81	25,09
	P ₃	24,99	26,20	25,91	26,14
	P ₄	25,07	24,28	25,25	24,66
	P ₅	25,32	24,39	25,26	24,40
MW [mm]		24,95			
SD [mm]		0,6			

Die Visualisierung der Absolutgenauigkeit in Abhängigkeit der Faktoren aus Abbildung 7-24 bestätigt diese Annahme. In den Diagrammen wird anhand der sehr guten Parallelität der Geraden sichtbar, dass keine nennenswerte Wechselwirkung zwischen den Faktoren besteht. Außerdem wird anhand der fehlenden Steigung und des geringen Abstands zwischen den Geraden deutlich, dass die Effektstärke auf die Absolutgenauigkeit sehr gering bzw. vernachlässigbar ist. Der leicht sichtbare Effekt bei P_3 wird als Ausreißer interpretiert, der aufgrund der geringen Effektstärke vernachlässigt werden kann. Auch im Vergleich der Punkte P_1 bis P_5 untereinander bestehen keine signifikanten Unterschiede. Der Einfluss der Pose auf die Absolutgenauigkeit ist in den Ergebnissen nur geringfügig sichtbar und vernachlässigbar. Die mittlere Absolutgenauigkeit beträgt 24,95 mm.

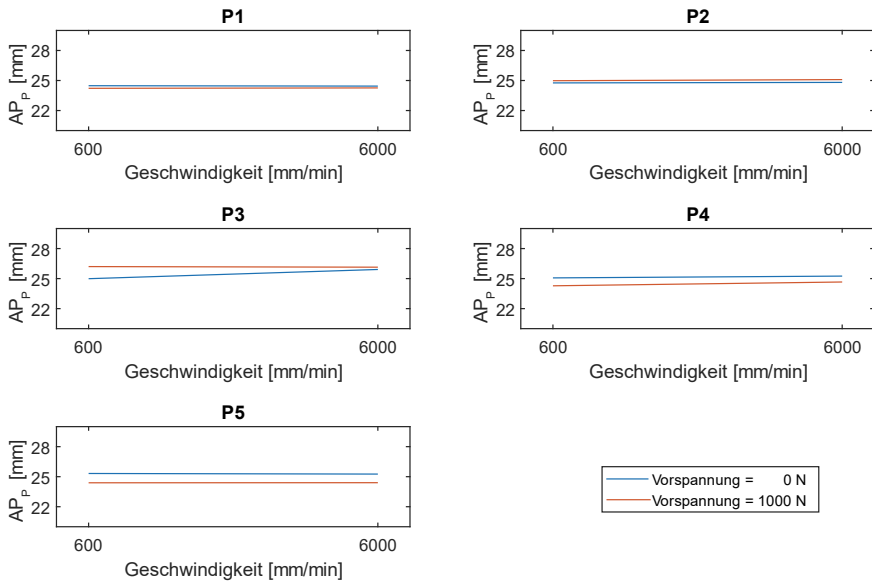


Abbildung 7-24: Absolutgenauigkeit (AP_P) in Abhängigkeit der Faktoren für das gekoppelte Robotersystem

Tabelle 7-8 zeigt die Absolutgenauigkeit für den Einzelroboter. Auch hier bestätigt sich, dass die Geschwindigkeit als Faktor vernachlässigbar ist. Allerdings zeigen sich größere Abweichungen im Vergleich der Punkte untereinander. Im Vergleich mit dem gekoppelten System kann dies als Indiz für eine reduzierte Posenabhängigkeit des

gekoppelten Systems interpretiert werden, da die Standardabweichung des gekoppelten Systems mit 0,6 mm trotz eines größeren Absolutfehlers nur ungefähr der Hälfte der Standardabweichung des Einzelroboters entspricht (1,21 mm). Generell ist die Absolutgenauigkeit des gekoppelten Systems gegenüber dem Einzelroboter als deutlich schlechter zu bewerten. Der Absolutfehler ist durchschnittlich um den Faktor 2,15 größer.

Tabelle 7-8: Absolutgenauigkeit (AP) des Einzelroboters (A_Klein 2024)

Geschwindigkeit		-	+
Absolutgenauigkeit AP_p [mm]	P ₁	11,71	11,85
	P ₂	11,18	11,36
	P ₃	11,90	12,00
	P ₄	13,03	13,30
	P ₅	9,66	9,63
MW [mm]		11,56	
SD [mm]		1,21	

Die Betrachtung der Absolutgenauigkeit, zerlegt in die einzelnen Komponentenrichtungen, bringt weitere Erkenntnisse. Hierfür soll allerdings zunächst noch einmal auf die räumliche Anordnung der Messpunkte in der schiefen Messebene aus Abbildung 7-23 verwiesen werden. Die Punkte P₂ und P₃ liegen bezüglich ihrer z-Koordinate im Raum am weitesten oben. P₁ liegt auf mittlerer Höhe und P₄ sowie P₅ befinden sich im unteren Bereich des Versuchsraums. In der nachfolgenden Abbildung 7-25 sind diese Höhenunterschiede hinsichtlich der z-Koordinate farblich hervorgehoben.

Abbildung 7-25 links oben zeigt für die Messpunkte P₁–P₅ den Absolutfehler der Absolutgenauigkeit in x- und y-Richtung für das gekoppelte System. Da für jede Faktorstufenkombination fünf Messpunkte untersucht werden, enthält die Darstellung insgesamt 20 Punkte (bzw. zehn Punkte für den Einzelroboter), von denen aufgrund von Überlappungen allerdings nicht alle sichtbar sind. Im Diagramm wird deutlich, dass eine systematische Abweichung vorliegt. Je höher der untersuchte Punkt hinsichtlich der z-Koordinate in der Versuchsebene liegt, desto größer ist der Absolutfehler in x- und y-Richtung. Der Fehler lässt sich vermutlich auf eine Verdrehung bzw. Verkipfung des gekoppelten Roboterkoordinatensystems gegenüber dem Welt-KOS zurückführen. Insgesamt treten Absolutfehler in x-Richtung zwischen 3 mm und 12 mm sowie in y-Richtung zwischen 0 mm und 10 mm auf.

Abbildung 7-25 links unten zeigt ebenfalls für das gekoppelte System den Absolutfehler der Absolutgenauigkeit in x- und z-Richtung. Auch hier ist ein Trend bei Betrachtung der Punkte hinsichtlich ihrer Position in der Versuchsebene sichtbar. Je höher ein Messpunkt hinsichtlich der z-Koordinate im Raum liegt, desto geringer ist der Absolutfehler in z-Richtung. Es treten Absolutfehler in z-Richtung zwischen 19 mm und 25 mm auf. Außerdem wird deutlich, dass der Absolutfehler in z-Richtung wesentlich größer ausgeprägt ist als in den beiden anderen Koordinatenrichtungen. Als Ursache hierfür wird der Einfluss der Schwerkraft vermutet.

Die Betrachtung der Absolutfehlerplots für den Einzelroboter (Abbildung 7-25 rechts oben/unten) bestätigt diese Annahme. Auch hier liegt in z-Richtung ein deutlich größerer Absolutfehler, von 9 mm bis 12 mm, als in x- und y-Richtung vor.

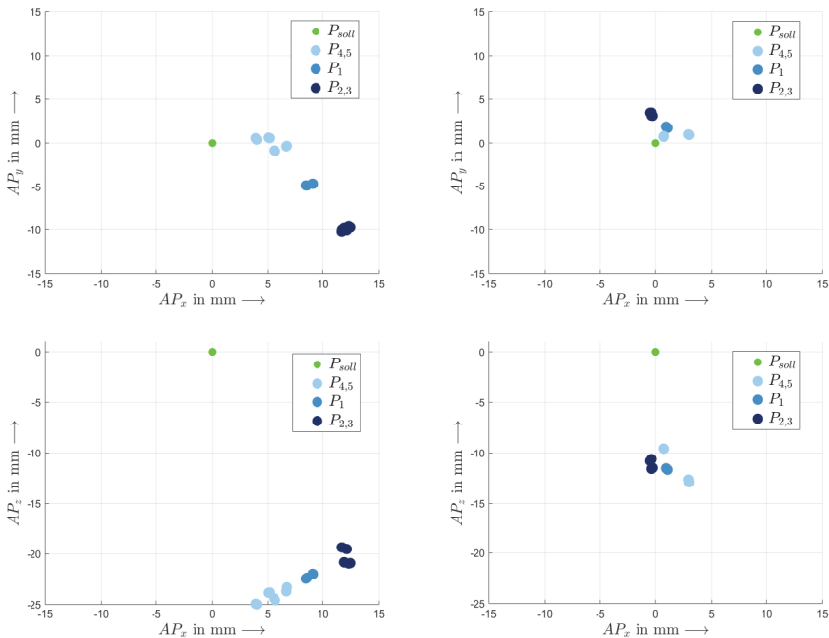


Abbildung 7-25: Absolutfehler der Absolutgenauigkeit in den einzelnen Koordinatenrichtungen für das gekoppelte System (links oben/unten) und den Einzelroboter (rechts oben/unten) (A_Klein 2024)

Der generell deutlich größere Absolutfehler des gekoppelten Systems gegenüber dem Einzelroboter lässt sich außerdem auch auf den Regler zurückführen. Der exakte Einfluss des Reglers wurde nicht untersucht. Da es sich aber um eine kraftdominante Regelung handelt, die zur Einhaltung der gewünschten Last gezielt eine Positionsabweichung einstellt, ist davon auszugehen, dass der Regler einen Absolutfehler im mittleren einstelligen Millimeterbereich verursacht.

Der gesamte Absolutfehler des gekoppelten Systems setzt sich daher anteilig aus dem Fehler aufgrund der Schwerkraft, aufgrund des Reglers und aufgrund einer Verdrehung bzw. Verkipfung des gekoppelten Roboterkoordinatensystems gegenüber dem Welt-KOS zusammen. Die Verdrehung bzw. Verkipfung kann sich wiederum aus mehreren möglichen Transformationsfehlern zusammensetzen. Zunächst besteht eine mögliche Fehlerquelle in der Kalibrierung der Einzelroboter zum absoluten Welt-KOS. Da die Position und die Orientierung der Roboterbasen mit dem Lasertracker gemessen und Kompensationen hinterlegt wurden, wird der Einfluss dieses Transformationsfehlers allerdings als gering eingeschätzt. Einen größeren Einfluss dürfte die Transformation der Roboter-TCPs in einen gemeinsamen Koppelmodul-TCP haben. Für die Transformation wurden die geometrischen CAD-Daten des Koppelmoduls verwendet. Fertigungstoleranzen und insbesondere die nachgiebigen Federelemente führen allerdings zu geometrischen Abweichungen und damit zu Transformationsfehlern.

7.2.2.2 Wiederholgenauigkeit

Als Nächstes wird die Wiederholgenauigkeit (RP_i) betrachtet. Tabelle 7-9 zeigt die Ergebnisse. Im direkten Vergleich ist die Wiederholgenauigkeit des gekoppelten Systems um Größenordnungen schlechter als die Wiederholgenauigkeit des Einzelroboters. Im Mittel ist die Wiederholgenauigkeit des Einzelroboters um Faktor 28 besser. Die schlechteren Ergebnisse des gekoppelten Systems können unter anderem auf den Kraftregler, das Sensorrauschen der Kraftsensoren und die Federelemente zurückgeführt werden. Für eine genauere Analyse der einzelnen Störquellen sind zukünftig weitere Untersuchungen notwendig.

Tabelle 7-9: Wiederholgenauigkeit (RP_i) des gekoppelten Systems und Einzelroboters mit Mittelwert und Standardabweichung (A_Klein 2024)

Geschwindigkeit Vorspannung		Gekoppeltes System				Einzelroboter	
		-	-	+	+	-	+
		-	+	-	+		
	P ₁	1,56	2,00	1,73	1,95	0,11	0,10
Wiederhol- genauigkeit RP_i [mm]	P ₂	1,62	2,05	1,84	1,97	0,06	0,05
	P ₃	1,61	2,02	1,90	2,03	0,05	0,06
	P ₄	1,89	1,67	1,74	1,78	0,05	0,04
	P ₅	1,48	1,75	1,68	1,68	0,09	0,03
	MW [mm]			1,80		0,06	
	SD [mm]			0,17		0,03	

Im Gegensatz zur Absolutgenauigkeit ist bei der Wiederholgenauigkeit ein Einfluss der Faktoren sichtbar. Die Visualisierung der Wiederholgenauigkeiten in Abhängigkeit der Faktoren in Abbildung 7-26 zeigt, dass bei steigender Vorspannung, mit Ausnahme von P₄, die Wiederholgenauigkeit schlechter wird. Bei einer Vorspannung von 0 N wird die Wiederholgenauigkeit mit zunehmender Geschwindigkeit ebenfalls schlechter (mit Ausnahme von P₄), wohingegen sie bei einer Vorspannung von 1000 N annähernd konstant bleibt.

Eine mögliche Erklärung für die schlechtere Wiederholgenauigkeit bei höherer Vorspannung liefern die als Federelemente eingesetzten Gummipuffer. Das Relaxationsverhalten sowie die nichtlinearen Steifigkeitseigenschaften beeinflussen die Übertragungssteifigkeit zwischen den Robotern und bringen zufällige, nicht vorhersagbare Störungen mit ein. Sowohl mit einer höheren Vorspannung als auch mit einer höheren Geschwindigkeit nimmt die Beeinflussung der Roboterbewegung durch diese Effekte zu.

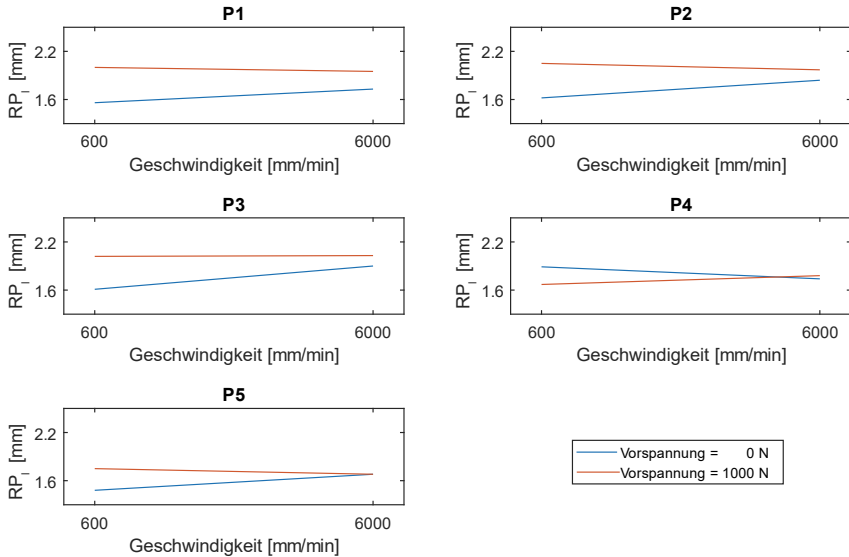


Abbildung 7-26: Wiederholgenauigkeit (RP_i) in Abhängigkeit der Faktoren für das gekoppelte Robotersystem

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 7-27 die Wiederholgenauigkeit des Einzelroboters in Abhängigkeit der Faktoren. Zur besseren Vergleichbarkeit zeigt die y-Achse einen gleichgroßen Bereich von 1,2 mm wie die Diagramme des gekoppelten Roboters in Abbildung 7-26. Es ist kein Einfluss der Geschwindigkeit sichtbar. Die Parallelität und die fehlende Steigung der Geraden weisen auf vernachlässigbare Effekte hin. Daraus lässt sich schließen, dass die Verschlechterung der Wiederholgenauigkeit des gekoppelten Systems bei höherer Geschwindigkeit nicht mit den Robotereigenschaften selbst, sondern mit dem stochastischen Verhalten des Koppelmoduls und der Regelung zusammenhängt.

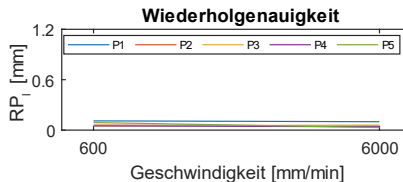


Abbildung 7-27: Wechselwirkungsdiagramm für die Wiederholgenauigkeit (RP_i) des Einzelroboters für die Punkte P1–P5

Im Folgenden werden die Bahngenaigkeitskenngößen betrachtet. Diese sind die Bahn-Absolutgenauigkeit (AT_p) und die Bahn-Wiederholgenauigkeit (RT_p).

Zunächst soll die Bahn-Absolutgenauigkeit betrachtet werden. Diese wird aus den Ergebnissen der Geraden- und Kreisfahrt bestimmt. Dazu werden jeweils die Sollbahn und die gefahrenen Ist-Bahnen diskretisiert und für jeden Diskretisierungspunkt entlang der Trajektorie die Absolutgenauigkeit berechnet. Die Berechnung der Absolutgenauigkeit an einem Diskretisierungspunkt erfolgt wie üblich über den zugehörigen Sollpunkt und den Mittelwert der Ist-Punkte. Der Maximalwert aller Absolutgenauigkeiten einer Trajektorie entspricht dann der Bahn-Absolutgenauigkeit. Abbildung 7-28 zeigt die Trajektorie und Verfahrerrichtung für die Geraden- und Kreisfahrt.

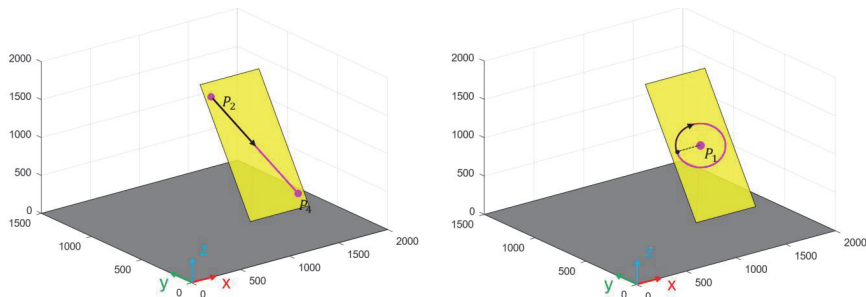


Abbildung 7-28: Trajektorien und Bewegungsrichtungen der Geradenfahrt (links) und Kreisfahrt (rechts) (A_Klein 2024)

In Tabelle 7-10 sind die Ergebnisse zur Bahn-Absolutgenauigkeit des gekoppelten Systems für verschiedene Faktorstufen und Trajektorien dargestellt.

Tabelle 7-10: Bahn-Absolutgenauigkeiten (AT_p) des gekoppelten Systems (A_Klein 2024)

Geschwindigkeit		-	-	+	+
Vorspannung		-	+	-	+
AT_p [mm]	Kreis	25,12	24,96	28,68	28,28
	Gerade	25,15	25,1	25,34	25,55

Die Werte sind vergleichbar mit den Ergebnissen zur Absolutgenauigkeit der Punktfolgen. Ebenfalls analog zur Absolutgenauigkeit haben die Faktoren keinen wesentlichen Einfluss. Einzige Ausnahme bildet die Geschwindigkeit bei der Kreisfahrt. Bei hoher Geschwindigkeitsstufe ergeben sich um ca. 3 mm schlechtere Bahn-Absolutgenauigkeiten verglichen mit den üblichen Ergebnissen. Dies lässt sich mit dem Verhalten der

Roboter erklären. Bei einer Kreisfahrt kommt es für einzelne Roboterachsen zwangsläufig zu einer Richtungsumkehr, bei der, um eine konstante Bahngeschwindigkeit aufrechtzuerhalten, hohe Achsbeschleunigungen notwendig sind. Bei höheren Bahngeschwindigkeiten können aufgrund der notwendigen Achsbeschleunigungen schnell Dynamikbegrenzungen des Roboters zum Tragen kommen und daher größere Abweichungen von der Sollbahn auftreten.

Da die Vorspannung keinen Einfluss auf die Bahn-Absolutgenauigkeit hat, werden im Folgenden die Ergebnisse nur hinsichtlich der Bahngeschwindigkeiten betrachtet. Abbildung 7-29 oben zeigt den Verlauf der Absolutgenauigkeit entlang der Geradentrajektorie für beide Geschwindigkeitsstufen des gekoppelten Systems.

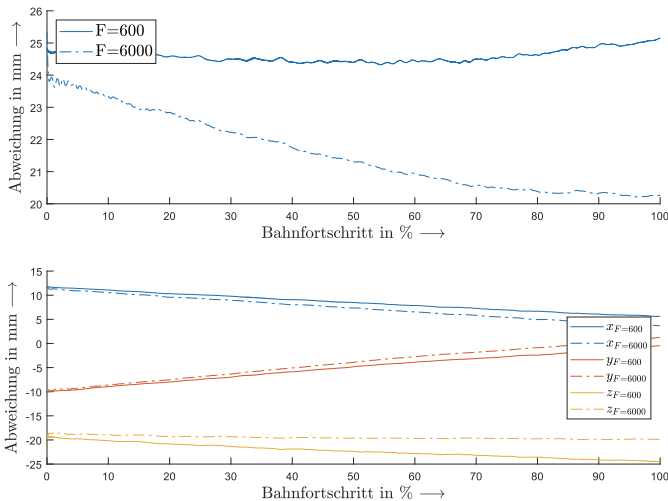


Abbildung 7-29: Verlauf der Absolutgenauigkeit (AP_p) entlang der Geradentrajektorie für beide Geschwindigkeitsstufen des gekoppelten Systems (A_Klein 2024)

An jedem einzelnen Messpunkt der Kurven kann eine Absolutgenauigkeit ermittelt werden. Diese entspricht der Positionsabweichung an dem jeweiligen Punkt im Schaubild. Die größte Abweichung bzw. schlechteste Absolutgenauigkeit entlang einer Kurve entspricht der Bahn-Absolutgenauigkeit der jeweiligen Geschwindigkeitsstufe. Für die niedrige Geschwindigkeitsstufe verläuft die Bahn annähernd konstant, während bei hoher Geschwindigkeit eine Verbesserung der Absolutgenauigkeit um ca. 4 mm zu erkennen ist. Anhand der Verläufe in den einzelnen Koordinatenrichtungen in Abbildung 7-29

unten lässt sich dieses Verhalten erklären. Mit steigendem Bahnfortschritt und damit einhergehend sinkender z-Koordinate sinkt der Absolutfehler in x- und y-Richtung genau wie bei der Punktfolge. Bei niedriger Geschwindigkeit verhält sich der Absolutfehler in z-Richtung allerdings gegenläufig, sodass in Summe ein annähernd konstanter Gesamtverlauf der Absolutgenauigkeit entsteht. Bei hoher Geschwindigkeit ist der Verlauf des Absolutfehlers in z-Richtung hingegen annähernd konstant, sodass der Gesamtfehler aufgrund der sinkenden Absolutfehler in x- und y-Richtung abnimmt.

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 7-30 oben den Verlauf der Absolutgenauigkeit entlang der Kreisbahn für das gekoppelte System. Der Verlauf der höheren Geschwindigkeitsstufe ähnelt einem Kosinus. Die daraus resultierende starke Schwankung spiegelt sich in der bereits in Tabelle 7-10 dargestellten schlechteren Bahn-Absolutgenauigkeit wider. Wie bereits erläutert, sind die starken Schwankungen bei hoher Geschwindigkeitsstufe gegenüber der niedrigeren Geschwindigkeitsstufe auf die hohen Gelenkwinkelbeschleunigungen bei Richtungswechsel der Roboterachsen zurückzuführen.

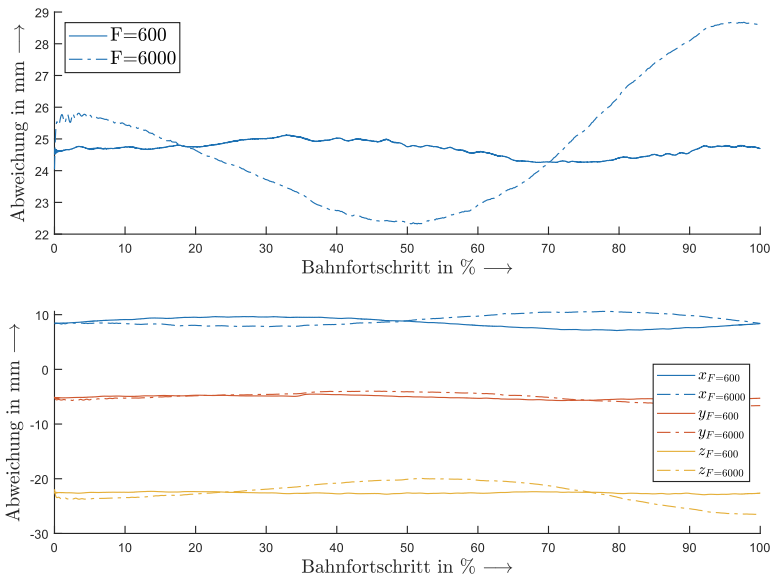


Abbildung 7-30: Verlauf der Absolutgenauigkeit (AP_p) entlang der Kreisbahn für beide Geschwindigkeitsstufen des gekoppelten Systems (A_Klein 2024)

Die Betrachtung der einzelnen Komponenten des Verlaufs in Abbildung 7-30 unten bestätigt den schwingungsartigen Verlauf auch für die einzelnen Koordinatenrichtungen. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die untere Abbildung einen deutlich größeren Wertebereich auf der y-Achse als die obere Abbildung umfasst, wird deutlich, dass auch die Verläufe der einzelnen Koordinatenrichtungen, insbesondere bei hoher Geschwindigkeit, große Amplituden aufweisen.

Zum Abschluss der Auswertung der Bahn-Absolutgenauigkeit werden in Tabelle 7-11 erneut die Bahn-Absolutgenauigkeiten des gekoppelten Systems aus Tabelle 7-10 herangezogen und mit den ermittelten Bahn-Absolutgenauigkeiten des Einzelroboters verglichen. Wie erwartet weist der Einzelroboter bei der Kreisbahn mit hoher Geschwindigkeit ebenfalls eine schlechtere Bahn-Absolutgenauigkeit gegenüber der niedrigen Geschwindigkeitsstufe auf. Außerdem gilt generell, dass die Werte des gekoppelten Systems im Mittel doppelt so groß wie die Werte der Einzelroboter sind und daher eine deutlich schlechtere Bahn-Absolutgenauigkeit aufweisen. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen der Absolutgenauigkeit (vgl. Tabelle 7-7 und Tabelle 7-8) und ist daher zu erwarten (A_Klein 2024).

Tabelle 7-11: Vergleich der Bahn-Absolutgenauigkeiten (AT_p) des gekoppelten Systems und des Einzelroboters (A_Klein 2024)

		Gekoppeltes System				Einzelroboter	
Geschwindigkeit		-	-	+	+	-	+
Vorspannung		-	+	-	+		
AT_p	Kreis	25,12	24,96	28,68	28,28	13,44	15,45
[mm]	Gerade	25,15	25,1	25,34	25,55	12,98	11,15

7.2.2.3 Bahn-Wiederholgenauigkeit

Als Nächstes wird die Bahn-Wiederholgenauigkeit (RT_p) betrachtet. Im Gegensatz zur Bahn-Absolutgenauigkeit wird hier für jeden Diskretisierungspunkt nicht die Absolutgenauigkeit, sondern die Wiederholgenauigkeit berechnet. Der maximale Wert aller Wiederholgenauigkeiten entlang der Trajektorie entspricht der Bahn-Wiederholgenauigkeit.

Tabelle 7-12 zeigt die Ergebnisse zur Bahn-Wiederholgenauigkeit. Im Mittel ist die Bahn-Wiederholgenauigkeit des Einzelroboters um Faktor 7 besser (A_Klein 2024). Die schlechteren Bahn-Ergebnisse des gekoppelten Systems sind wie bei der normalen

Wiederholgenauigkeit auch auf den Kraftregler, die Kraftsensoren und die Federelemente im Koppelmodul zurückzuführen. Ebenfalls analog zur Wiederholgenauigkeit bei der Punktfolge ist auch bei den Bahn-Wiederholgenauigkeiten der Einfluss der Geschwindigkeit und der Vorspannung sichtbar. Im Allgemeinen wird die Bahn-Wiederholgenauigkeit sowohl bei höherer Geschwindigkeit als auch bei höherer Vorspannung aufgrund der Eigenschaften der Federelemente schlechter.

Tabelle 7-12: Bahn-Wiederholgenauigkeiten (RT_p) des gekoppelten Systems und des Einzelroboters (A_Klein 2024)

		Gekoppeltes System				Einzelroboter	
Geschwindigkeit		-	-	+	+	-	+
Vorspannung		-	+	-	+		
RT_p	Kreis	1,65	2,29	2,03	2,89	0,09	0,49
[mm]	Gerade	1,84	1,85	1,65	2,12	0,09	0,35
MW [mm]		2,04				0,26	

Konträr zur Punktfolge ist der Einfluss der Geschwindigkeit allerdings auch beim Einzelroboter erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass die Bahn-Wiederholgenauigkeit des gekoppelten Systems im Gegensatz zur Wiederholgenauigkeit nicht nur durch das Koppelmodul und die Kraftregelung, also ausschließlich durch für die Kopplung benötigte Teilsysteme, sondern auch durch die Robotersteuerung und -mechanik beeinflusst wird. Auch dass die Bahn-Wiederholgenauigkeit des Einzelroboters nur um den Faktor 7 besser ist, während seine Wiederholgenauigkeit um den Faktor 28 besser ist, zeigt, dass bei der Bahn-Wiederholgenauigkeit vor allem auch roboter- und steuerungsspezifische Einflüsse vorhanden sind, die insbesondere beim gekoppelten System zum Tragen kommen.

7.2.3 Bewertung der Ergebnisse

Mit der Genauigkeitsuntersuchung sollen die in Kapitel 7.2 genannten Forschungsfragen zur Erfüllung von Teilziel 3 beantwortet werden. Die Ergebnisse sind dabei als erste Einordnung der Genauigkeiten des gekoppelten Systems zu verstehen.

Die Daten zeigen, dass die Absolut- und die Bahn-Absolutgenauigkeit des gekoppelten Systems miteinander vergleichbar sind. Werte zwischen 24 mm und 26 mm sind üblich. Das gekoppelte System weist damit entlang einer Bahn genauso gute Genauigkeitseigenschaften wie beim Anfahren einzelner Zielpunkte auf. Im Vergleich zum

Einzelroboter mit Werten von ca. 11 mm bis 13 mm sind die Absolut- und die Bahn-Absolutgenauigkeit des gekoppelten Systems zunächst deutlich schlechter. Allerdings lassen sich aus den Ergebnissen einige systematische Fehler identifizieren, deren Behebung die Genauigkeit des gekoppelten Systems enorm verbessern kann.

Die Ergebnisse zeigen eine Verkipfung bzw. Verdrehung des Koordinatensystems des gekoppelten Systems gegenüber dem Welt-KOS. Diese kann durch eine präzisere Vermessung der Roboter und des Koppelmoduls beseitigt werden. Ein weiterer systematischer Einfluss ist der kraftdominante Regler. Da die aus der Reglerstruktur zwangsläufig hervorgehenden Positionsfehler allerdings systematischer Natur sind, können sie berechnet und ebenfalls kompensiert werden. Als weiterer großer Einflussfaktor wurde die Gewichtskraft identifiziert. Hierfür existieren bereits verfügbare industrielle Kompensationslösungen, die zukünftig implementiert werden können.

Die Faktoren Geschwindigkeit und Vorspannung haben im Allgemeinen keinen signifikanten Einfluss auf die Absolut-Genauigkeitsgrößen gezeigt. Eine Ausnahme bildet hierbei die Kreisfahrt aufgrund der erforderlichen Richtungsumkehr einzelner Roboter-gelenke. Für Roboterkinematiken mit rotierenden Achsen ist es grundsätzlich schwierig, eine Bahnbewegung mit konstanter Geschwindigkeit aufrechtzuerhalten, wenn die Drehrichtung einzelner Gelenke geändert werden muss. Da eine höhere Bahngeschwindigkeit grundsätzlich eine höhere Dynamik des Antriebssystems verlangt, spiegeln sich daraus resultierende Positions- bzw. Bahnfehler entsprechend stärker in den Messdaten wider.

Die Wiederholgenauigkeit und die Bahn-Wiederholgenauigkeit weisen ebenfalls ähnliche Werte auf. Allerdings ist hier der Einfluss der Faktoren sichtbar. Eine höhere Vorspannung und höhere Bewegungsgeschwindigkeiten führen zu schlechteren Wiederholgenauigkeiten. Die Wiederholgenauigkeiten des gekoppelten Systems sind unabhängig von den Faktoren deutlich schlechter als beim Einzelroboter. Dies lässt sich auf zusätzliche Störgrößen aufgrund der Regelung und des Koppelmoduls, insbesondere der Federelemente, zurückführen. Insgesamt zeigt sich, dass die aufgrund der Überbestimmtheit des gekoppelten Systems notwendige Kraftregelung die Genauigkeiten der Roboter negativ beeinflusst. Um die verbesserten Steifigkeitseigenschaften des gekoppelten Systems ohne Genauigkeitsverluste nutzen zu können, sind zukünftig weitere Verbesserungen in der Regelungsstruktur sowie im mechanischen Aufbau des Koppelmoduls notwendig. Insbesondere der Verzicht auf die Federelemente mindert den

Genauigkeitsverlust erheblich. Auf konkrete Verbesserungspotentiale und Maßnahmen zur Genauigkeitssteigerung wird in Kapitel 7.4 näher eingegangen.

Bezüglich der Homogenität des gekoppelten Systems lässt sich nur eine Erkenntnis aus den Daten ableiten. Der Vergleich der Absolutgenauigkeiten der einzelnen Messpunkte der Punktfolge miteinander zeigt für das gekoppelte System deutlich geringe Schwankungen als beim Einzelroboter. Dies kann als weiteres Indiz für eine reduzierte Posenabhängigkeit gewertet werden. Eine vollumfängliche Einschätzung der Homogenität lässt sich aus den bestehenden Daten allerdings nicht ableiten. Hierfür sind weitere Untersuchungen notwendig.

7.3 Zusammenfassung zur Charakterisierung des gekoppelten Systems

Zur Erfüllung des dritten Teilziels wurden systematische Untersuchungen zur statischen Steifigkeit und Genauigkeit des gekoppelten Systems vorgenommen. Im ersten Schritt wurde die Steifigkeitsuntersuchung durchgeführt. Hierfür wurde zunächst der Untersuchungsraum für die Versuchsdurchführungen festgelegt, bevor Einflussgrößen, Randbedingungen, Faktoren und Faktorstufen bestimmt, ein Messprinzip ausgewählt und der zugehörige Versuchsaufbau realisiert wurden. Die Kraftaufbringung zur Ermittlung der Kraft-Weg-Verläufe erfolgt durch die Bewegung des Roboters gegen einen starren, unbeweglichen Körper. Dieses Verfahren kann mit bereits in der Roboterzelle integrierten Sensoren realisiert werden.

Aus den aufgezeichneten Kraft-Weg-Verläufen wurden die Steifigkeiten in x-, y- und z-Richtung ermittelt und 3D-Steifigkeitskarten für das gekoppelte System erstellt. Um Referenzwerte zu erhalten, wurden die Versuche analog auch für einen einzelnen Roboter durchgeführt. Die Steifigkeiten des gekoppelten Systems wurden hinsichtlich der Steigerung gegenüber dem Einzelroboter und der Homogenität des Arbeitsraums untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Steifigkeit des gekoppelten Systems im Schnitt um den Faktor 3,13 höher ist, dass sie an jedem Messpunkt höher als die Referenz ist und dass eine verbesserte Homogenität in bestimmten Teilbereichen sowie Belastungsrichtungen vorliegt. Es wurde auch gezeigt, dass für aussagekräftigere Erkenntnisse zur Homogenität zukünftig konstruktive Anpassungen am Koppelmodul sowie spezifischere Untersuchungen zur Posenabhängigkeit notwendig sind.

Außerdem konnte identifiziert werden, welche Hemmnisse das Potential des gekoppelten Systems aktuell ausbremsen und wie das Potential zukünftig weiter gesteigert

werden kann. Hierfür sind robustere Signalleitungen der Kraftsensoren, eine reduzierte Nachgiebigkeit im Koppelmodul und konstruktive Optimierungen, insbesondere am Sternelement des Koppelmoduls, erforderlich.

Im zweiten Schritt der Charakterisierung wurde die Genauigkeit des gekoppelten Systems untersucht. Hierfür wurde ein Versuchsplan angenähert an die DIN EN ISO 9283 zur Ermittlung von Genauigkeitskenngößen von Robotern verwendet. Analog zur Steifigkeitsuntersuchung wurden auch hier zunächst ein geeigneter Versuchsraum definiert, die Messmethode ausgewählt und Einflussgrößen, Randbedingungen, Faktoren sowie Faktorstufen bestimmt.

Die Messung der Pose des gekoppelten Systems wurde mithilfe eines Lasertrackers und eines am Koppelmodul angebrachten Reflektors durchgeführt. Als Bewegungsbahnen wurden Punktfolgen zur Ermittlung der Absolutgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit sowie Kreis- und Geradenbahnen zur Bestimmung der Bahn-Absolutgenauigkeit und Bahn-Wiederholgenauigkeit definiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Absolutgenauigkeit und die Bahn-Absolutgenauigkeit annähernd gleich sind. Die Größen sind betragsmäßig ungefähr doppelt so groß wie beim Einzelroboter und damit deutlich schlechter. Es wurde gezeigt, dass dies auf systematische Fehler zurückzuführen ist, die die Genauigkeitswerte deutlich verschlechtern, und dass diese aufgrund ihres systematischen Auftretens zukünftig kompensiert bzw. beseitigt werden können. Zu den systematischen Fehlern gehören die Positionsverfälschung durch den Kraftregler, Transformationsfehler zwischen dem Koordinatensystem des gekoppelten Systems und dem Weltkoordinatensystem sowie die Gewichtskraft. Außerdem wurden erneut Hinweise auf eine reduzierte Posenabhängigkeit durch die Kopplung gefunden. Die Wiederholgenauigkeit und die Bahn-Wiederholgenauigkeit des gekoppelten Systems sind ebenfalls annähernd gleich und jeweils deutlich schlechter als beim Einzelroboter.

Analog zur Steifigkeitsmessung konnten Potentiale identifiziert werden, um die Genauigkeit enorm zu verbessern. Neben der Beseitigung der systematischen Fehler tragen insbesondere die Reduzierung der Koppelmodulnachgiebigkeit, eine robustere Datenübertragung der Kraftsensoren sowie die Optimierung des Kraftreglers zu einer Verbesserung der erreichbaren Genauigkeiten bei.

Sowohl für die Steifigkeits- als auch für die Genauigkeitsuntersuchung gilt, dass diese in erster Linie dem Zweck dienen, eine grundlegende Charakterisierung des

gekoppelten Systems zu erhalten, die gegenwärtigen Defizite zu identifizieren und das Potential der Kopplung nachzuweisen. Die ermittelten Werte sind daher weniger in ihrem absoluten Betrag, sondern vor allem in Relation zu den Referenzwerten des einzelnen Roboters zu bewerten. Gleiches gilt für die Faktoren in der Untersuchung. Die vorliegenden Daten erlauben eine Prüfung, ob die Faktoren einen grundsätzlichen Einfluss auf die Zielgrößen ausüben. Für eine Analyse der exakten Wechselwirkung zwischen den Einfluss- und Zielgrößen sind allerdings weitere Untersuchungen notwendig. Anhand der Erkenntnisse aus der Steifigkeits- und Genauigkeitsuntersuchung lassen sich die nächsten Entwicklungsschritte des gekoppelten Systems ableiten. Diese werden nachfolgend vorgestellt.

7.4 Entwicklungsplan für das gekoppelte System

Aus den Erkenntnissen der Charakterisierung und den identifizierten Grenzen und Schwächen des gekoppelten Systems zeigt sich einerseits, dass keine fundamentalen technischen Barrieren der Realisierung eines ausgereiften, unter realen Produktionsbedingungen einsetzbaren gekoppelten Systems im Weg stehen. Andererseits ist ersichtlich, dass das volle Potential des gekoppelten Systems gegenwärtig noch nicht genutzt werden kann. Zur Erschließung des ungenutzten Potentials der Kopplung wird daher ein Entwicklungsplan vorgestellt. Nachfolgend werden die einzelnen Maßnahmen zur Weiterentwicklung des gekoppelten Systems beschrieben, bewertet und in den Gesamtkontext des Entwicklungsplans eingeordnet.

Tabelle 7-13 zeigt den Entwicklungsplan. Die einzelnen Optimierungsmaßnahmen werden unter anderem hinsichtlich ihrer Komplexität und ihres Entwicklungs- und Implementierungsaufwands bewertet. Die Komplexität beschreibt, wie viele Interaktionen und Abhängigkeiten mit anderen Komponenten und Teilsystemen bestehen. Der Entwicklungs- und Implementierungsaufwand beinhaltet die personellen und zeitlichen Ressourcen, die für die Entwicklung und Integration in das Gesamtsystem erforderlich sind. Damit einher geht ebenfalls das notwendige fachliche Wissen, das für die Durchführung einer Maßnahme erforderlich ist.

Neben den Herausforderungen bei der Umsetzung der Maßnahmen werden diese auch hinsichtlich ihres Mehrwerts bewertet. Die Bewertung erfolgt in drei Kategorien. Robustheit und Sicherheit beschreibt den Beitrag einer Maßnahme, die Fehleranfälligkeit im gekoppelten System zu reduzieren und die Sicherheit der Teilsysteme im Fehlerfall auf-

Tabelle 7-13: Entwicklungsplan mit Maßnahmen zur Verbesserung des gekoppelten Systems und Erschließung noch ungenutzter Potentiale

	Maßnahme	Komplexität	Entwicklungs-/Implementierungsaufwand	Mehrwert			Gesamtwertung (empfohlene Priorität)
				Robustheit/ Sicherheit	Verbesserung Eigenschaften	Komplexitätsreduktion/ Bedienbarkeit	
Mechanisch	Konstruktive Strukturoptimierung des Sternelements	+	+	++	++	O	++
	Sternvarianten für die prozessspezifische Anordnung der Roboter	-	+	O	+++	O	++
Sensorsystem	Neuerkabelung der Kraftsensoren mit Reduzierung der Steckverbindungen und schneller AD-Wandlung	++	++	+++	O	+	+++
	Filterung der Kraftsignale reduzieren	++	+++	+	+	O	+
	Autonome Kraftüberwachung mit Nothalt	--	-	+++	O	+	+
Modellierung	Gewichtskraftkompensation der Roboter	++	+++	O	+++	O	++
	TCP-Kraftschätzmodell statt Kraftsensoren	+	--	++	+	++	+
Regelung	Reglererweiterung mit P- und D-Anteil	++	--	+	++	O	++
	Regleralgorithmus direkt auf der NC-Steuerung	+	--	+	++	+	++
	Direkte Regelung der Geschwindigkeit/Strom statt Position	++	-	+	+++	O	++
	Kompensation des reglerbasierten Positionsoffset	+	-	O	++	O	+
Vermessung	Kalibrierung der Roboter	+++	++	O	+++	O	+++
	Vermessung des Koppelmoduls	+	++	O	+	O	+
Legende		+++ sehr gering ++ gering + moderat	- hoch -- sehr hoch	+++ sehr hoch ++ hoch + moderat O keinen Mehrwert			+++ sehr hoch ++ hoch + moderat

rechtzuerhalten. Ein Beispiel hierfür ist der automatisierte Nothalt bei Überschreiten von inneren Kräften zum Schutz der Mechanik von Roboter und Koppelmodul. Unter der Verbesserung der Eigenschaften ist die Verbesserung der Steifigkeit, Genauigkeit, Roboter- und Reglerdynamik sowie der handhabbaren Prozesskräfte des gekoppelten Systems zu verstehen. Diese Kategorie bietet den größten Mehrwert, da sie den grundlegenden Forschungszweck der Anlage, die Verbesserung der Eigenschaften des gekoppelten Systems zur Befähigung in Fertigungsszenarien, im Fokus hat.

Komplexitätsreduktion und Bedienbarkeit beschreibt den Einfluss einer Maßnahme zur Reduktion der Gesamtkomplexität des Systems und zur Verbesserung der Bedienbarkeit der Anlage. Dies erlaubt eine einfachere Prozessüberwachung und Versuchsdurchführung sowie ein schnelleres Erlernen der Bedienung des gekoppelten Systems. Nach der initialen Entwicklung des gekoppelten Systems sind zukünftig deutlich mehr Versuchsreihen und Experimente zu erwarten. Maßnahmen dieser Kategorie tragen zur schnelleren und einfacheren Bedienung des Systems bei und ermöglichen es dadurch, mehr Zeit in die tatsächlichen Forschungstätigkeiten zu investieren.

Abschließend erfolgt eine Gesamtwertung der Maßnahmen. Diese berücksichtigt den Mehrwert der Maßnahme im Verhältnis zu Komplexität und Aufwand und kann außerdem für die weitere Entwicklung als empfohlene Priorisierung der Maßnahmen interpretiert werden.

Die Maßnahmen und ihre Bewertungen werden im Folgenden vorgestellt.

Mechanische Optimierungen

Zu den mechanischen Optimierungsmaßnahmen zählen die Strukturoptimierung des Sternelements des Koppelmoduls und die Fertigung von prozessspezifischen, individuellen Sternvarianten für bestimmte Use-Cases. Im Rahmen der Strukturoptimierung kann mit einer weiteren Vergrößerung des Durchmessers der Knochenstreben oder einer anderen Formgestaltung der Streben das System für deutlich höhere Kräfte ausgelegt werden. Außerdem ist das Koppelmodul hierdurch besser gegen Überlast und plastische Verformung geschützt. Eine Anpassung des Sterns geht mit einer moderaten Komplexität einher, da dabei nur die Kompatibilität zu den restlichen Koppelmodulteilsystemen sichergestellt werden muss und im Fall einer Veränderung der Abmessungen des Koppelmoduls die Kopplungspositionen neu programmiert werden müssen. Der Entwicklungs- und Implementierungsaufwand beschränkt sich auf das CAD-Design und den mechanischen Zusammenbau und wird daher als moderat eingestuft. Die Gesamtwertung der Strukturoptimierung wird als hoch bewertet.

Durch die Herstellung von prozessspezifischen Sternvarianten kann bei einzelnen Use-Cases eine deutlich höhere Steifigkeit infolge einer anderen Kopplungsanordnung der Roboter erreicht werden. In einem Fräsprozess kann die Kopplung beispielsweise in einem Winkel von 90° statt 180° erfolgen, um homogenere Steifigkeitseigenschaften in unterschiedlichen Belastungsrichtungen zu erreichen. Aufgrund der neuen Anordnung müssen allerdings sämtliche Verkabelungen und Schläuche am Koppelmodul, die

Platzierung der Durchführmodule sowie die Ablage des Koppelmoduls angepasst werden. Die Koppelpositionen müssen ebenfalls neu programmiert werden. Die prozessspezifische Individualisierung geht daher mit einer hohen Komplexität einher. Der Entwicklungs- und Implementierungsaufwand ist mit der Strukturoptimierung vergleichbar und wird daher als moderat bewertet. Die Gesamtwertung der Maßnahme wird ebenfalls als hoch eingestuft.

Maßnahmen zum Sensorsystem

Hinsichtlich des Sensorsystems für die Bestimmung der inneren Kraft wurden drei Optimierungsmaßnahmen identifiziert. Die Neuverkabelung der Kraftsensoren ist als einfachste Variante umzusetzen. Ziel hierbei ist es, die Schwankungen und Störspitzen in den Kraftsignalen zu reduzieren, da diese sich unmittelbar auf das Reglerverhalten auswirken. Durch eine Platzierung der Messverstärker direkt auf den Roboterschultern kann der Kabelweg vom Sensor bis zum Verstärker deutlich verkürzt und die Anzahl der Steckverbindungen entlang der Leitungen reduziert werden. Der Umbau geht mit einer geringen Komplexität und einem geringen Implementierungsaufwand einher, da lediglich eine Neugestaltung der Roboterschulterplatten und eine neue Verkabelung der Sensoren erforderlich sind. Es sind keine komplexen Anpassungen in der Steuerungsarchitektur notwendig. Da die anfällige Verkabelung neben Programmierfehlern bisher die Hauptursache für Störfälle ist und Aufwand und Komplexität der Maßnahme gering sind, wird die Neuverkabelung als eine der wichtigsten Maßnahmen erachtet und mit einer sehr hohen Gesamtwertung versehen.

Die Verbesserung der Signalqualität ermöglicht auch eine Reduzierung des Signalfilters der Kraftdaten. Die Abschwächung des Filters geht mit einer Reduzierung der Signalverzögerung beim Regler einher und kann daher sowohl zur Optimierung der Robustheit als auch zu einem besseren Führungsverhalten des Reglers beitragen. Die Umsetzung erfordert lediglich die Anpassung der Filterfrequenz im Messverstärker und Regler und ist daher mit geringer Komplexität und geringem Aufwand verbunden. Die Maßnahme ist sehr einfach umzusetzen, bringt im Vergleich zu anderen Optimierungen aber nur geringfügige Verbesserungen mit sich und erhält daher eine moderate Gesamtwertung.

Die autonome Kraftüberwachung mit Nothalt verfolgt das Ziel, bei Experimenten, insbesondere nachdem größere Veränderungen am gekoppelten System vorgenommen

wurden, die Sicherheit der Mechanik zu gewährleisten, indem bei zu hohen inneren Kräften ein automatischer Nothalt der Anlage initiiert wird. Auch für ein zukünftiges Serienprodukt ist eine autonome Kraftüberwachung essentiell, um einen robusten und sicheren Betrieb zu gewährleisten. Die Komplexität einer solchen Überwachung ist allerdings sehr hoch, da ein zusätzlicher Algorithmus erforderlich ist, der auf die Kraftsignale zu- und gleichzeitig in die Sicherheitstechnik der einzelnen Robotersteuerungen eingreifen muss. Eine weitere Herausforderung bei der Entwicklung der Kraftüberwachung ist die korrekte Erkennung einer tatsächlichen Überlast und Unterscheidung von kurzfristigen Lastspitzen bzw. Signalstörungen. Eine zu sensitiv eingestellte Kraftüberwachung würde häufige nicht notwendige Stopps und Wiederholungen von Versuchen verursachen. Die autonome Kraftüberwachung wird trotz ihres Mehrwerts aufgrund der hohen Komplexität und Aufwände mit einer Gesamtwertung von moderat gesehen.

Modellierungsmaßnahmen

Optimierungsmaßnahmen auf Basis von Modellierungen sind die Gewichtskraftkompensation und das TCP-Kraftschätzmodell. Die Gewichtskraftkompensation kann die Genauigkeit enorm steigern. Da ein industriell einsetzbares System für die Einzelroboter sowie die notwendigen Schnittstellen bereits verfügbar sind, sind die Komplexität und die Aufwände der Maßnahme als gering bis sehr gering einzuschätzen. Die Maßnahme erhält daher eine hohe Gesamtwertung.

Das TCP-Kraftschätzmodell auf Basis der Antriebsmomente kann die Kraftsensoren ersetzen. Damit einher geht eine deutliche Komplexitätsreduktion, da die Sensoren, die Verkabelung und einige Kommunikationsabläufe in der Steuerung der Roboter wegfallen. Da das fehleranfällige Sensorsystem wegfällt, würde auch die Robustheit und Sicherheit des gekoppelten Systems deutlich erhöht werden. Das Kraftschätzmodell für die Roboter existiert bereits als industrielle Testsoftware und müsste für eine Integration in die Roboterzelle noch auf das gekoppelte System angepasst werden. Allerdings ist die Qualität solcher Modelle bisher nicht gesichert und ein Nachweis über die ausreichende Modellgüte wäre erforderlich. Die Komplexitätsreduktion durch Einsatz eines Modells darf nicht auf Kosten der Qualität des Kraftreglers erfolgen. Für einen sicheren Betrieb mit dem Kraftschätzmodell wären daher zunächst umfangreiche Tests und Vergleiche mit den realen Kraftsensordaten erforderlich, was wiederum in sehr hohen Aufwänden resultiert. Aus diesem Grund wird das TCP-Kraftschätzmodell mit einer moderaten Gesamtwertung gesehen.

Regelungstechnische Maßnahmen

Das größte Optimierungspotential bietet die Regelungstechnik. Eine Erweiterung des Reglers um einen P- und D-Anteil kann die Reglerdynamik deutlich erhöhen und aufgrund der verbesserten Regelung auch die Robustheit der Anlage steigern. Die Erweiterung des Reglers vergrößert allerdings die Anzahl der einzustellenden Reglerparameter deutlich und erfordert umfangreiche Validierungsversuche. Daher ist der Entwicklungsaufwand sehr hoch. Die Komplexität wiederum ist als gering zu bewerten, da keine weiteren Teilsysteme von der Maßnahme betroffen wären. Daher erhält auch diese Maßnahme eine hohe Gesamtwertung.

Eine weitere regelungstechnische Maßnahme ist die Verlagerung des Regleralgorithmus von der externen Steuerung direkt auf die NC-Steuerung. Insbesondere in Kombination mit dem Kraftschätzmodell kann diese Maßnahme die Reglerdynamik deutlich verbessern, da damit jegliche Kommunikation mit weiteren Teilsystemen wegfällt und alle für den Regler notwendigen Eingangsdaten direkt auf der Steuerung verfügbar sind. Die Komplexität einer solchen Maßnahme ist gering, da keine weiteren Teilsysteme direkt davon abhängig sind. Allerdings stellt die Implementierung direkt auf der NC eine Herausforderung dar, da der Regler dann nicht mehr in Form eines leicht zugänglichen C-Codes programmiert werden kann. Auch das Nachgiebigkeitsmodell muss dann auf die Steuerung übertragen werden. Die Implementierung erfordert unter anderem herstellerspezifischen Support und ist insgesamt als sehr aufwendig einzuschätzen. Die Verlagerung des Regleralgorithmus wird insgesamt mit einer hohen Gesamtwertung versehen.

Die Reglerdynamik kann ebenfalls deutlich gesteigert werden, wenn statt der Position direkt auf die Geschwindigkeits- oder den Stromregler in den Antrieben der Roboter zugegriffen werden kann. Da die notwendigen Daten bereits verfügbar sind und keine weiteren steuerungstechnischen Abhängigkeiten bestehen, wird die Komplexität als sehr gering eingeschätzt. Vom Steuerungsanbieter ist allerdings gegenwärtig kein tieferer Zugriff in die Antriebsregelung freigegeben. Die Maßnahme erhält insgesamt eine hohe Gesamtwertung, allerdings ist ihre Machbarkeit zum jetzigen Zeitpunkt fraglich.

Zur Erhöhung der Genauigkeit kann als letzte regelungstechnische Optimierungsmaßnahme der Positionsoffset aufgrund des kraftdominanten Reglers kompensiert werden. Aus der Genauigkeitsuntersuchung geht hervor, dass dieser einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss hat und die Genauigkeit verschlechtert. Da der Offset sich aus den

beiden bekannten Größen der Positionskorrektur und der Steifigkeit des Systems berechnen lässt, ist der Entwicklungsaufwand als gering einzuschätzen. Allerdings erfordert die Kompensation neben dem Slave-Roboter auch einen Zugriff und eine Positionskorrektur des Master-Roboters und ist damit mit einem sehr hohen Implementierungsaufwand verbunden, wodurch der Gesamtaufwand als hoch einzuschätzen ist. Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit bereits implementierten Schnittstelle für eine Regelung des Master-Roboters wird die Komplexität trotz der zusätzlichen Abhängigkeit als moderat bewertet. Die Maßnahme erhält somit eine moderate Gesamtwertung.

Vermessungsmaßnahmen

Eine weitere wichtige Optimierungsmaßnahme ist die erneute Kalibrierung der Roboter. Die Genauigkeitsuntersuchung hat gezeigt, dass gegenwärtig weiterhin systematische Fehler in den Genauigkeitskenngrößen erkennbar sind, die auf Kalibrierungsfehler zurückzuführen sind. Eine erneute Vermessung der Systeme mit qualitativ hochwertigerem Lasertrackerequipment kann diese Fehler reduzieren. Die Kalibrierung umfasst die Ermittlung der exakten Positionierung und Orientierung der Roboter zueinander und zum Welt-KOS auf der Matrixplatte. Da keine Abhängigkeiten mit weiteren Teilsystemen bestehen und sich der Implementierungsaufwand einer Kalibrierung auf eine einmalige umfangreiche Messreihe beschränkt, ist die Komplexität als sehr gering und die Aufwände als gering einzuschätzen. Da der Mehrwert hinsichtlich der Genauigkeit sehr groß ist und gleichzeitig nur eine sehr geringe Komplexität bzw. geringe Aufwände vorliegen, wird die Kalibrierung als wichtigste Maßnahme bewertet. Die Gesamtwertung fällt demnach sehr hoch aus.

Weiterhin kann das Koppelmodul vermessen werden, um die Transformation der Roboter-TCP-Koordinatensysteme in den Koppelmodul-TCP exakt zu berechnen. Bisher basiert die Transformation auf den geometrischen CAD-Daten des Koppelmoduls. Aufgrund von Fertigungstoleranzen und der nachgiebigen Federelemente im Koppelmodul können die realen Maße allerdings geringfügig abweichen. Die Neuvermessung erfordert lediglich eine Anpassung der geometrischen Transformationen in der Steuerung der Roboter und in der Regelung. Daher ist die Komplexität als moderat zu bewerten. Der Aufwand der Neuvermessung beschränkt sich ebenfalls auf eine einmalige Vermessung in einer Koordinatenmessmaschine und ist daher als gering einzuschätzen. Die Maßnahme wird aufgrund der leichten Umsetzbarkeit, gleichzeitig aber auch wegen ihres nur geringfügigen Mehrwerts insgesamt als moderat bewertet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel erfolgt die Zusammenfassung dieser Forschungsarbeit. Außerdem werden im Ausblick Verbesserungsmaßnahmen zur Potentialsteigerung der Kopplung vorgestellt, um einen vielversprechenden Einsatz des Systems in zukünftigen Anwendungen zu ermöglichen.

8.1 Zusammenfassung

Um Industrieroboter zukünftig stärker in wertschöpfenden Fertigungstätigkeiten einsetzen zu können, müssen diese höhere Steifigkeiten aufweisen, höhere Prozesskräfte aufbringen und höhere Genauigkeiten erreichen. Die Kopplung von seriellen Roboterkinematiken, also die mechanische Zusammenschaltung zu einer temporären Parallelkinematik, bietet großes Potential, Industrieroboter hierfür zu befähigen und gleichzeitig die Flexibilität von seriellen Roboterkinematiken beizubehalten. Bisherige Lösungsansätze zur Kopplung weisen allerdings einige Defizite auf. Die Lösungen sind einerseits nicht prozess- sowie werkstückunabhängig und können daher nicht flexibel für unterschiedlichste Produktionsprozesse eingesetzt werden. Andererseits können die verwendeten Regelungsstrategien zur Regelung der durch die Kopplung geschaffenen Überbestimmtheit nicht gleichzeitig mit externen Lasten aufgrund von Fertigungsprozessen umgehen. Weiterhin gibt es zum gegenwärtigen Zeitpunkt auch keine tiefergehende Charakterisierung von gekoppelten Systemen, um das tatsächliche Potential der Technologie zu bewerten.

Die vorliegende Arbeit hat sich daher zum Ziel gesetzt, eine Kopplungslösung zu entwickeln, die über Handhabungsaufgaben hinaus auch in Fertigungsprozessen eingesetzt werden kann. Wesentliche Alleinstellungsmerkmale hierfür sind der adapterbasierte und damit prozessunabhängige Lösungsansatz des mechanischen Koppelmoduls sowie die prozesskraftunabhängige Regelungsstrategie. Zur Erreichung dieser Lösung wurden drei Teilziele definiert. Das erste Teilziel lautet:

Entwicklung eines prozessunabhängigen, generell einsetzbaren Koppelmoduls, das eine starre Kopplung erlaubt und die gekoppelte Ausführung von Fertigungsprozessen ermöglicht.

Um dieses Ziel zu erreichen, erfolgte die systematische Entwicklung eines adapterbasierten mechatronischen Koppelmoduls für einen Lastbereich im einstelligen Kilonewtonbereich. Auf Basis der aus dem Stand der Technik abgeleiteten Defizite wurden

zunächst die Anforderungen an das Koppelmodul spezifiziert. Anhand dieser Anforderungen wurden eine erste grundlegende Formgestaltung und Dimensionierung sowie eine Identifikation der Teilfunktionen des Koppelmoduls vorgenommen. Anschließend wurden für die identifizierten Funktionen die Teilsysteme des Koppelmoduls ausgearbeitet. Diese sind die mechatronische Schnittstelle zum Roboter, ein Sensorsystem zur Erfassung der Verspannung, eine passive Teilkompensation der Verspannung und das zentrale Verbindungsglied zwischen den Teilsystemen. Über die mechatronische Schnittstelle können Strom, Betriebsstoffe sowie Informationen übertragen und bereitgestellt werden. Das Sensorsystem basiert auf 6-DOF-Kraftmomentensensoren und dient gemeinsam mit der passiven Kompensation als Grundlage für die Regelung des überbestimmten Systems. Mit dem zentralen Verbindungsglied können unterschiedliche Formgestaltungen des Koppelmoduls realisiert werden. Das Koppelmodul wurde als Prototyp hergestellt, in eine parallel aufgebaute Roboterzelle integriert und während des Voranschreitens der Arbeit stetig iterativ optimiert.

Ausgehend von dem integrierten mechanischen Koppelmodul erfolgte zur Erfüllung des zweiten Teilziels die Entwicklung eines Modells der inneren Kräfte und des Regelungssystems. Das zweite Teilziel lautet:

Entwicklung und Implementierung eines prozessunabhängigen Algorithmus zur Bestimmung der inneren Kräfte/Momente und einer darauf aufbauenden kraftgeregelten Synchronisierung der gekoppelten Roboter.

Zunächst wurden die Anforderungen an die externe Regelung aus den Defiziten im Stand der Technik abgeleitet. Darauf aufbauend wurden die notwendigen Schnittstellen für einen schnellen Datenaustausch und eine echtzeitfähige Regelung entwickelt und in die Steuerungsarchitektur der Roboterzelle integriert. Für die Regelung wurde ein echtzeitfähiger externer Rechner in das PROFINET-Bussystem der Roboterzelle integriert. Anschließend erfolgte die Entwicklung des Regelungssystems. Hierfür wurde zunächst die grundlegende Reglerarchitektur als modellbasierte, parallele Kraft-Lageregelung festgelegt. Die Regelung wurde als Master-Slave-Ansatz konzipiert. Der Master-Roboter übergibt die Soll-Positionen an den Slave-Roboter. Dieser folgt parallel sowohl der Lagevorgabe des Master-Roboters als auch der Kraftvorgabe des externen Reglers. Als Führungsgröße des externen Reglers dient die innere sechsdimensionale Kraft. Zur Bestimmung der Kraft wurde ein Algorithmus entwickelt, der die von den Kraftsensoren aufgezeichneten Lasten in Echtzeit in externe und interne Kräfte zerlegt und die inneren Kräfte an den Regler weitergibt. Zur Verarbeitung der inneren Kräfte

wurde ein Nachgiebigkeitsmodell entworfen, das basierend auf den aktuellen Roboter-gelenkwinkelstellungen die Gesamtnachgiebigkeit des gekoppelten Systems in Echtzeit berechnet. Das Nachgiebigkeitsmodell wurde mit Realversuchen an den gekoppelten Robotern validiert. Mit dem Modell wird aus der kraftbasierten Regelabweichung eine lagebasierte Regelabweichung bestimmt, die mit einem I-Regler letztendlich in eine Stellgröße umgerechnet wird und gemeinsam mit der Lagevorgabe des Master-Roboters an den Slave-Roboter übergeben wird. Das Regelungssystem wurde implementiert und mithilfe von Stabilitätsuntersuchungen am gekoppelten Robotersystem systematisch parametrisiert und validiert.

Das aus Teilziel 1 und 2 resultierende Kopplungssystem, bestehend aus Koppelmodul und Regelungssystem, wurde zur Erfüllung des dritten Teilziels abschließend in der Roboterzelle charakterisiert und bewertet. Das dritte Teilziel der Arbeit lautet:

Charakterisierung der statischen Steifigkeit und Genauigkeit des gekoppelten Systems und Bewertung der Ergebnisse im Vergleich mit einzelnen Robotern.

Zunächst wurde die statische Steifigkeit des Systems systematisch untersucht. Der aus Fertigungsprozesssicht relevanteste Teil des gekoppelten Arbeitsraums wurde als Untersuchungsraum definiert. Der Fokus innerhalb dieses Untersuchungsraums wurde auf die Bestimmung der Steifigkeit entlang der translatorischen Freiheitsgrade gelegt. Für die Untersuchung wurde ein Messverfahren definiert und ein Versuchsplan entworfen. Nach Vorgabe des Versuchsplans wurden Kraft-Weg-Verläufe für unterschiedliche Posen und Belastungsrichtungen im Raum gemessen und daraus statische Steifigkeiten berechnet. Aus den Steifigkeiten wurden 3D-Steifigkeitskarten des Untersuchungsraums für jede Belastungsrichtung erstellt. Die Steifigkeiten des gekoppelten Systems wurden anschließend qualitativ und quantitativ bewertet. Als Referenz für die Bewertung dienen Steifigkeitsdaten, die unter gleichen Versuchsbedingungen für einen einzelnen Roboter gewonnen wurden. Für das gekoppelte System konnte eine durchschnittliche Steifigkeitserhöhung um den Faktor 3,13 gegenüber dem einzelnen Roboter erreicht werden. Bei Belastung in z-Richtung konnte außerdem eine klar reduzierte Posenabhängigkeit des gekoppelten Systems nachgewiesen werden.

In der zweiten Untersuchung wurde die Genauigkeit des gekoppelten Systems geprüft. Die Untersuchung wurde angelehnt an die Norm DIN EN ISO 9283 zur Ermittlung von Genauigkeitsgrößen von einzelnen Robotern geplant. Entsprechend der Norm wurden Punktfolgen, Kreisbahnen und Geradenbahnen als Versuchstrajektorien definiert. Zur

sensorischen Erfassung der Positionen wurde ein Lasertracker verwendet. Anhand der Daten wurden Absolut- und Bahn-Absolutgenauigkeiten sowie Wiederhol- und Bahn-Wiederholgenauigkeiten berechnet und bewertet. Als Referenz wurden die Versuche ebenfalls erneut mit einem einzelnen Roboter durchgeführt. Im Gegensatz zur Steifigkeitsuntersuchung hat sich gezeigt, dass die Genauigkeitskenngrößen des gekoppelten Systems deutlich schlechter ausfallen als beim einzelnen Roboter. Dies konnte unter anderem auf systematische Fehler wie die Gewichtskraft, Transformationsfehler, Nachgiebigkeiten im Koppelmodul und den externen Regler zurückgeführt werden. Diese Fehler müssen zukünftig beseitigt bzw. kompensiert werden, um gegenüber dem Referenzsystem bessere Ergebnisse zu erzielen. Allerdings konnte analog zur Steifigkeitsuntersuchung trotz schlechterer Genauigkeitswerte eine reduzierte Posenabhängigkeit festgestellt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte ein vollumfänglicher Prototyp eines gekoppelten Systems entwickelt und getestet werden. Die adapterbasierte Lösung erlaubt eine prozess- und werkstückunabhängige Kopplung von Robotern und ist grundsätzlich auch auf andere Robotermodelle übertragbar. Es wurde gezeigt, dass gekoppelte Systeme deutlich höhere Steifigkeiten erreichen und damit auch höhere Prozesskräfte ausüben können. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass eine reduzierte Posenabhängigkeit und damit eine höhere Homogenität der Robotereigenschaften im Arbeitsraum durch die Kopplung erreicht werden kann. Das System wurde mit Industrierobotern umgesetzt und ähnelt daher sowohl hinsichtlich der verfügbaren Schnittstellen als auch bezüglich der in der industriellen Fertigung geforderten Lastbereiche einem realen industriellen Umfeld. Die Lösung kann demnach in vergleichbarer Form im industriellen Umfeld zum Tragen kommen. Die Arbeit leistet damit einen wichtigen Beitrag, die Grenzen der bisherigen Einsatzmöglichkeiten von Industrierobotern in der industriellen Fertigung zu erweitern und sich der angestrebten Vision einer vollumfänglichen roboterbasierten Produktion anzunähern.

Gleichwohl kann mit dem Prototyp das volle Potential der Kopplung noch nicht ausgeschöpft werden. Im Rahmen der Arbeit konnten einige Optimierungspotentiale identifiziert werden, die in einem Entwicklungsplan zusammengefasst wurden. Mithilfe der Maßnahmen des Entwicklungsplans kann neben der höheren Systemsteifigkeit letztendlich auch das Erreichen einer gegenüber dem einzelnen Roboter höheren Genauigkeit erzielt werden. Systemsteifigkeiten von bis zu $10 \text{ N}/\mu\text{m}$ sowie Genauigkeiten von bis zu $50 \mu\text{m}$ sind denkbar. Damit bietet die Kopplungstechnologie das Potential, für

Roboter im Umfeld der Werkzeugmaschinen Fuß zu fassen und in bestimmten Anwendungsbereichen konventionelle Maschinen zu ersetzen. Denkbar ist beispielsweise der Einsatz in der zerspanenden Bearbeitung von großflächigen Aluminium- und CFK-Bauteilen in der Luftfahrt, die flexible Umformung von Blech- und Kleinteilen und die automatisierte Zerspanung variantenreicher metallischer Bauteile in kleinen Losgrößen. Erste industrielle Umsetzungen sind daher vor allem im Sondermaschinenbau, wo häufig geringe Stückzahlen, eine hohe Variantenvielfalt und besonders große oder auch kleine Bauteile anzutreffen sind, denkbar.

8.2 Ausblick

Die in der Arbeit entwickelte Kopplungslösung zeigt vielversprechende Ergebnisse, schöpft aber gegenwärtig nur einen kleinen Teil des eigentlichen Potentials der Roboterkopplung aus. Nachfolgend werden daher die wichtigsten nächsten Schritte zur Erschließung des Potentials der Kopplung erläutert. Der ausführliche, im Detail diskutierte Entwicklungsplan hierzu wurde bereits in Kapitel 7.4 vorgestellt.

Die mechanische Optimierung des Koppelmoduls kann deutliche Verbesserungen hinsichtlich Dynamik, Robustheit und Steifigkeit bringen. Mit einer robusteren Neugestaltung des Sterns als zentrales Verbindungsglied kann das System für deutlich höhere Prozesskräfte angepasst werden. Auch die Anordnung der Arme kann durch den Einsatz verschiedener Sternelemente verändert werden, wodurch es möglich wird, Steifigkeitseigenschaften auf individuelle Anwendungsfälle anzupassen.

Gegenwärtig sind die Kommunikationsleitungen der Kraftsensoren aufgrund von langen analogen Leitungswegen, elektromagnetischen Störungen und einer Vielzahl von Steckverbindungen überempfindlich und können zu ruckartigen Ausgleichsbewegungen des Kraftreglers führen. Eine vereinfachte Übertragungsleitung mit kürzeren Kabellängen, weniger Steckverbindungen und frühzeitiger digitaler Wandlung kann das Rauschen der Kraftsignale deutlich reduzieren und Störspitzen in der Regelung vermeiden. Bei reduzierter Störempfindlichkeit kann entsprechend auch die Filterung und damit die Verzögerung der Kraftsignale reduziert werden. Die Anpassungen würden somit in Summe zu einem robusteren und gleichzeitig dynamischeren Regler beitragen.

Alternativ kann untersucht werden, inwieweit die Kraftsensoren durch eine Schätzung der TCP-Kräfte auf Basis der Antriebsmomente der Roboter ersetzt werden können. Diese Funktion existiert inzwischen auch als industrielle Lösung (CC-ROCO) für die verwendeten Robotersteuerungen, konnte aber aufgrund der erst kürzlich erfolgten

Markteinführung nicht im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden. Sollte eine solche Lösung mit ausreichender Genauigkeit funktionieren, kann durch den Verzicht auf die Kraftsensoren eine enorme Verschlankung und Kostenreduktion des Koppelmoduls erreicht werden.

Auch auf regelungstechnischer Seite besteht großes Optimierungspotential. Zur Erhöhung der Reglerdynamik kann der I-Regler um P- und D-Anteile erweitert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, den Regler von der externen Steuerung auf die NC-Steuerung zu übertragen. Dies würde die Kommunikationszeiten zwischen dem Roboter und der Regelung deutlich verringern und darüber hinaus zu einer beträchtlichen Verbesserung der Reglerdynamik führen. Die Integration der Regelung in die NC-Steuerung birgt insbesondere in Kombination mit der antriebsbasierten Schätzung der Kraftdaten Potential zur Steigerung der Reglerdynamik, da in diesem Fall die Kraftdaten bereits auf der Steuerung vorliegen würden und nicht von einem externen System übertragen werden müssten. Somit wäre für die Regelung der inneren Kräfte keine Kommunikation mit weiteren externen Geräten erforderlich. Außerdem kann die Dynamik weiter gesteigert werden, wenn der Reglerzugriff direkt auf die Geschwindigkeits- oder Stromregelung der Roboter statt auf die Lageregelung stattfinden kann. Dies erweist sich aufgrund der eingeschränkten Zugriffsmöglichkeiten bei industriellen Steuerungen gegenwärtig allerdings als schwierig.

Mit einer verbesserten Reglerdynamik kann auch eine stärkere Reduzierung oder potentiell auch das vollständige Entfernen der Nachgiebigkeiten im Koppelmodul in Betracht gezogen werden. Dies würde erheblich zur Verschlankung des Koppelmoduls sowie zur Verbesserung der Robotersteifigkeit, -dynamik und -genauigkeit beitragen.

Weiterhin kann die Genauigkeit durch Beseitigung der als systematisch identifizierten Fehlerquellen deutlich verbessert werden. Möglichkeiten zur Beseitigung der Fehler sind die Kompensation der Gewichtskraft und Nachgiebigkeiten der einzelnen Roboter, eine präzisere Vermessung der Roboterbasen sowie des Koppelmoduls und die Kompensation des reglerbasierten Lageoffsets aufgrund der kraftdominanten Architektur des externen Reglers.

Es stehen somit eine Vielzahl an Optionen zur Verbesserung der Roboterkopplung und zur vollen Ausschöpfung des Potentials zur Verfügung. Außerdem sind zukünftig auch Kopplungen von drei oder vier Robotern denkbar, da die in dieser Arbeit verwendete Roboterzelle bereits um zwei weitere Roboter ergänzt wurde.

Die in dieser Forschungsarbeit entwickelte Kopplungslösung sowie die identifizierten Weiterentwicklungsmaßnahmen zeigen, dass keine grundlegenden technischen oder physikalischen Hürden bestehen, die dem Erreichen der für den industriellen Einsatz erforderlichen Genauigkeiten und Steifigkeiten entgegenstehen. Daher sind produktive Prototypeneinsätze des gekoppelten Systems in der bearbeitenden Industrie bereits kurzfristig denkbar.

Mit dem Trend zur kognitiven Robotik, in der Roboter ihre Umgebung selbstständig wahrnehmen und mit ihr interagieren können, werden außerdem sensorisch leistungsfähige Roboter mit höherer Rechenkapazität zunehmend zur Standardware. Die verbesserte Grundausstattung zukünftiger Roboter schafft damit bereits die technischen Grundvoraussetzungen für eine Kopplung und reduziert die Aufwände zur Befähigung erheblich. Die Roboterkopplung wird somit auch wirtschaftlich deutlich attraktiver. Mittelfristig sind daher auch Potentiale für den großflächigen Einsatz von gekoppelten Robotersystemen in der Luftfahrt, im Sondermaschinenbau und auch in der Automobilindustrie erschließbar.

Publikationsliste des Autors

Die nachfolgenden aufgeführten Publikationen sind während der Tätigkeit des Verfassers der vorliegenden Arbeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik entstanden.

(Fleischer et al. 2021)

Fleischer, J.; Albers, A.; Anderl, R.; Aurich, J.; Gönzheimer, P.; **Mühlbeier, E.**; Schlagenhauf, T.; Wäschle, M.; Giese, T.; Wang, Y.; Glatt, M.; Litsche, S. & Steglich, S. (2021), *5G in der Industrie - Wege in die Technologieführerschaft in Produktentwicklung und Produktion (acatech Impuls)*, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, Deutschland, DOI: 10.48669/aca_2021-2.

(Goebels et al. 2024)

Goebels, M.; Baumgärtner, J.; Fuchs, T.; **Mühlbeier, E.**; Puchta, A. & Fleischer, J. (2024), „Milling using two mechatronically coupled robots“, *Procedia CIRP*, 130 , S. 867–872, DOI: 10.1016/j.procir.2024.10.177.

(Kimmig et al. 2021)

Kimmig, A.; Schöck, M.; **Mühlbeier, E.**; Oexle, F. & Fleischer, J. (2021), „Wertstromkinematik – Produktionssysteme neu gedacht“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116 (12), S. 935–939, DOI: 10.1515/zwf-2021-0207.

(Mayer et al. 2024)

Mayer, A.; Kastner, K.; **Mühlbeier, E.**; Chardonnet, J.-R.; Reichwald, J.; Puchta, A.; Fleischer, J. & Ovtcharova, J. (2024), „Towards Reconfigurable Cyber-Physical-Human Systems: Leveraging Mixed Reality and Digital Twins to integrate Human Operations“, *Procedia CIRP*, 130 , S. 524–531, DOI: 10.1016/j.procir.2024.10.124.

(Mehner et al. 2023)

Mehner, M.; Matkovic, N.; **Mühlbeier, E.**; Mayer, D.; Fleischer, J. & Verl, A. (2023), „Evaluation of external control of KUKA Industrial Robots for laboratory and prototype environments“, *ISR Europe 2023: 56th International Symposium on Robotics*, Stuttgart, Deutschland, 26.-27. September, Hrsg. A. Verl & W. Kraus, VDE Verlag, Berlin, Deutschland, S. 278–284. ISBN: 978-3-8007-6140-1, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10363083>, [Zuletzt geprüft 15.05.2025].

(Mühlbeier et al. 2023)

Mühlbeier, E.; Bauer, V.; Schade, F.; Gönnheimer, P.; Becker, J. & Fleischer, J. (2023), „Mechatronic Coupling System for Cooperative Manufacturing with Industrial Robots“, *Procedia CIRP*, 120 , S. 744–749, DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.069.

(Mühlbeier et al. 2021)

Mühlbeier, E.; Gönnheimer, P.; Hausmann, L. & Fleischer, J. (2021), „Value Stream Kinematics“, *Production at the leading edge of technology: Proceedings of the 10th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGPP), Dresden, Deutschland, 23-24 September 2020*, Hrsg. B.-A. Behrens, A. Brosius, W. Hintze, S. Ihlenfeldt & J. P. Wulfsberg, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 409–418. ISBN: 978-3-662-62137-0, DOI: 10.1007/978-3-662-62137-7_41.

(Mühlbeier et al. 2021)

Mühlbeier, E.; Oexle, F.; Gönnheimer, P. & Fleischer, J. (2021), „Wertstromkinematik – Produktionssysteme neu gedacht“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116 (11), S. 847–851, DOI: 10.1515/zwf-2021-0179.

(Mühlbeier et al. 2022)

Mühlbeier, E.; Oexle, F.; Gerlitz, E.; Matkovic, N.; Gönnheimer, P. & Fleischer, J. (2022), „Conceptual control architecture for future highly flexible production systems“, *Procedia CIRP*, 106 , S. 39–44, DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.152.

(Schade et al. 2022)

Schade, F.; Karle, C.; **Mühlbeier, E.;** Gönnheimer, P.; Fleischer, J. & Becker, J. (2022), „Dynamic Partial Reconfiguration for Adaptive Sensor Integration in Highly Flexible Manufacturing Systems“, *Procedia CIRP*, 107 , S. 1311–1316, DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.150.

(Schade et al. 2023)

Schade, F.; Kreutzer, M.; **Mühlbeier, E.;** Gerlitz, E.; Gönnheimer, P.; Fleischer, J. & Becker, J. (2023), „Modular Hardware/Software Architecture for Edge Units in Highly Flexible Manufacturing Systems“, *Procedia CIRP*, 120 , S. 601–606, DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.045.

Literaturverzeichnis

Literaturangaben nach dem Schema (A_<Nachname> <Jahr>) beziehen sich auf studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser dieser Arbeit inhaltlich und organisatorisch angeleitet wurden.

(A_Arzberger 2022)

Arzberger, P. (2022), *Entwicklung eines Federsystems zum Ausgleich von Positionsabweichungen gekoppelter Roboterkinematiken*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Bauer 2021)

Bauer, V. (2021), *Entwicklung eines intelligenten Koppelmoduls zur Kollaboration von Roboterkinematiken mit einstellbarem Nachgiebigkeitselement*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Binder 2023)

Binder, S. (2023), *Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zur Identifikation von Verspannungskräften gekoppelter Roboter*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Caixeta 2024)

Caixeta, P. (2024), *Versuchsplanung (DoE), Durchführung und Datenanalyse zur Bestimmung der Steifigkeitseigenschaften von gekoppelten Robotern*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Kappus 2023)

Kappus, J. (2023), *Entwicklung einer Regelung für die Kompensation von Verspannungskräften eines gekoppelten, sechsfach überbestimmten Robotersystems*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Klein 2024)

Klein, T. (2024), *Optimierung eines kraftgeregelten Robotersystems und DOE-Genauigkeitsanalyse für gekoppelte Robotersysteme*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(ABB 2024)

ABB (2024), *Anwendungshandbuch MultiMove: RobotWare 6.15*, <https://se-arch.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC050961-003&LanguageCode=de&DocumentPartId=&Action=Launch>, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Alberts & Soloway 1988)

Alberts, T. E. & Soloway, D. I. (1988), „Force control of a multi-arm robot system“, *Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, USA, 24.-29. April 1988, IEEE Comput. Soc. Press, S. 1490–1496. ISBN: 0-8186-0852-8, DOI: 10.1109/ROBOT.1988.12278.

(Albrichsfeld 1998)

Albrichsfeld, C. A. von (1998), *Ein Beitrag zur selbsteinstellenden Nachgiebigkeitsregelung für kraftschlüssig kooperierende Roboter*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, VDI-Verl., Düsseldorf, Deutschland, ISBN: 3-18-369108-6.

(Basile et al. 2013)

Basile, F.; Caccavale, F.; Chiacchio, P.; Coppola, J. & Marino, A. (2013), „A decentralized kinematic control architecture for collaborative and cooperative multi-arm systems“, *Mechatronics*, 23 (8), S. 1100–1112, DOI: 10.1016/j.mechatronics.2013.08.008.

(Baumgärtner et al. 2023)

Baumgärtner, J.; Gönzheimer, P. & Fleischer, J. (2023), „Optimal Robot Work-piece Placement for Maximized Repeatability“, *Advances in System-Integrated Intelligence: Proceedings of the 6th International Conference on System-Integrated Intelligence*. Genova, Italien, Hrsg. M. Valle, D. Lehmhus, C. Gianoglio, E. Ragusa, L. Seminara, S. Bosse, A. Ibrahim & K.-D. Thoben, Springer International Publishing, Cham, S. 252–261. ISBN: 978-3-031-16280-0, DOI: 10.1007/978-3-031-16281-7_25.

(Bazzi et al. 2020)

Bazzi, D.; Lapertosa, M.; Zanchettin, A. M. & Rocco, P. (2020), „Goal-driven variable admittance control for robot manual guidance“, *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, NV., USA, 25.-29. Oktober 2020, IEEE, DOI: 10.1109/iro545743.2020.9341722.

(Berx et al. 2022)

Berx, N.; Decré, W. & Pintelon, L. (2022), „Examining the Role of Safety in the Low

Adoption Rate of Collaborative Robots“, *Procedia CIRP*, 106, S. 51–57, DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.154.

(Bongardt 2004)

Bongardt, T. (2004), *Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern*, Dissertation, Technische Universität München, Utz Verlag, München, Deutschland, ISBN: 3831603324.

(Bonitz & Hsia 1996)

Bonitz, R. C. & Hsia, T. C. (1996), „Internal force-based impedance control for cooperating manipulators“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12 (1), S. 78–89, DOI: 10.1109/70.481752.

(Braun et al. 2004)

Braun, B. M.; Starr, G. P.; Wood, J. E. & Lumia, R. (2004), „A Framework for Implementing Cooperative Motion on Industrial Controllers“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20 (3), S. 583–589, DOI: 10.1109/TRA.2004.824941.

(Brecher & Weck 2017)

Brecher, C. & Weck, M. (2017), *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2: Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung*, 9. Aufl., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1559429>, ISBN: 9783662465677.

(Caccavale et al. 1998)

Caccavale, F.; Chiacchio, P. & Chiaverini, S. (1998), „A quaternion-based regulator for cooperative manipulators“, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications (Cat. No.98CH36104)*, Triest, Italien, 01.-04. September 1998, IEEE, S. 557–561. ISBN: 0-7803-4104-X, DOI: 10.1109/CCA.1998.728530.

(Caccavale & Villani 2000)

Caccavale, F. & Villani, L. (2000), „Impedance Control of Cooperative Manipulators“, *Machine Intelligence & Robotic Control*, 2 (2), S. 51–57, <http://wpage.unina.it/villani/ftp/pubblicazioni/miroc00.pdf>, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Caccavale et al. 2000)

Caccavale, F.; Chiacchio, P. & Chiaverini, S. (2000), „Task-space regulation of

cooperative manipulators“, *Automatica*, 36 (6), S. 879–887, DOI: 10.1016/S0005-1098(99)00215-0.

(Caccavale et al. 2008)

Caccavale, F.; Chiacchio, P.; Marino, A. & Villani, L. (2008), „Six-DOF Impedance Control of Dual-Arm Cooperative Manipulators“, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13 (5), S. 576–586, DOI: 10.1109/TMECH.2008.2002816.

(Calanca et al. 2016)

Calanca, A.; Muradore, R. & Fiorini, P. (2016), „A Review of Algorithms for Compliant Control of Stiff and Fixed-Compliance Robots“, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21 (2), S. 613–624, DOI: 10.1109/TMECH.2015.2465849.

(Celikag et al. 2018)

Celikag, H.; Sims, N. D. & Ozturk, E. (2018), „Cartesian Stiffness Optimization for Serial Arm Robots“, *Procedia CIRP*, 77, S. 566–569, DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.222.

(Chung et al. 2005)

Chung, J. H.; Yi, B.-J. & Kim, W. K. (2005), „Analysis of internal loading at multiple robotic systems“, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19 (8), S. 1554–1567, DOI: 10.1007/BF03023933.

(Craig 2005)

Craig, J. J. (2005), *Introduction to robotics: Mechanics and control*, 3. Aufl., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, ISBN: 9780131236295.

(Denavit & Hartenberg 1955)

Denavit, J. & Hartenberg, R. S. (1955), „A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices“, *Journal of Applied Mechanics*, 22 (2), S. 215–221, DOI: 10.1115/1.4011045.

(DIN 95360), DIN 95360:2009-06 (2009): *Elastomer-Federelemente - Technische Spezifikation*, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland, DOI: 10.31030/1508064.

(DIN 95363), DIN 95363:1994-07 (1994): *Elastomer-Federelemente, zylindrisch; Formen A bis F*, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland, DOI: 10.31030/2662553.

(DIN EN ISO 9283), DIN EN ISO 9283:1998-04 (1998): *Industrieroboter - Leistungs-kenngrößen und zugehörige Prüfmethode*, <https://www.dinmedia.de/de/norm/iso-9283/7658056>, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

- (DIN ISO/TS 15066), DIN ISO/TS 15066:2017-04 (2016): *Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter*, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland, DOI: 10.31030/2584636.
- (Eckardt et al. 2016)
Eckardt, M.; Buchheim, A. & Gerngross, T. (2016), „Investigation of an automated dry fiber preforming process for an aircraft fuselage demonstrator using collaborating robots“, *CEAS Aeronautical Journal*, 7 (3), S. 429–440, DOI: 10.1007/s13272-016-0199-y.
- (Erhart & Hirche 2015)
Erhart, S. & Hirche, S. (2015), „Internal Force Analysis and Load Distribution for Cooperative Multi-Robot Manipulation“, *IEEE Transactions on Robotics*, 31 (5), S. 1238–1243, DOI: 10.1109/TRO.2015.2459412.
- (Erhart & Hirche 2016)
Erhart, S. & Hirche, S. (2016), „Model and Analysis of the Interaction Dynamics in Cooperative Manipulation Tasks“, *IEEE Transactions on Robotics*, 32 (3), S. 672–683, DOI: 10.1109/TRO.2016.2559500.
- (Fanuc Robotics America 2012)
Fanuc Robotics America (2012), *Fanuc Robotics R-30iB Controller MULTI ARM: Controller Option Manual*.
- (Fasse & Breedveld 1998)
Fasse, E. D. & Breedveld, P. C. (1998), „Modeling of Elastically Coupled Bodies: Part I—General Theory and Geometric Potential Function Method“, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 120 (4), S. 496–500, DOI: 10.1115/1.2801491.
- (Garcia et al. 2005)
Garcia, J. G.; Robertsson, A.; Ortega, J. G. & Johansson, R. (2005), „Force and Acceleration Sensor Fusion for Compliant Robot Motion Control“, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spanien, 18.-22. April 2005, IEEE, S. 2709–2714. ISBN: 0-7803-8914-X, DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570523.
- (Gent 1962)
Gent, A. N. (1962), „Relaxation processes in vulcanized rubber. I. Relation among

stress relaxation, creep, recovery, and hysteresis“, *Journal of Applied Polymer Science*, 6 (22), S. 433–441, DOI: 10.1002/app.1962.070062207.

(Goebels et al. 2024)

Goebels, M.; Baumgärtner, J.; Fuchs, T.; Mühlbeier, E.; Puchta, A. & Fleischer, J. (2024), „Milling using two mechatronically coupled robots“, *Procedia CIRP*, 130 , S. 867–872, DOI: 10.1016/j.procir.2024.10.177.

(Haberhauer & Kaczmarek 2014)

Haberhauer, H. & Kaczmarek, M. (2014), *Taschenbuch der Antriebstechnik*, 1. Aufl., Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag; Ciando, München, Deutschland, ISBN: 978-3-446-43426-4, DOI: 10.3139/9783446434264.fm.

(Haninger et al. 2022)

Haninger, K.; Radke, M.; Vick, A. & Kruger, J. (2022), „Towards High-Payload Admittance Control for Manual Guidance With Environmental Contact“, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7 (2), S. 4275–4282, DOI: 10.1109/lra.2022.3150051.

(Heck et al. 2013)

Heck, D.; Kostic, D.; Denasi, A. & Nijmeijer, H. (2013), „Internal and external force-based impedance control for cooperative manipulation“, *2013 European Control Conference (ECC)*, Zürich, Schweiz, 17.-19. Juli 2013, IEEE, Piscataway, N.J., USA, S. 2299–2304. ISBN: 978-3-033-03962-9, DOI: 10.23919/ECC.2013.6669163.

(Hippe 2006)

Hippe, P. (2006), *Windup in control: Its effects and their prevention*, 1. Aufl., Springer, London, ISBN: 9781846283239, DOI: 10.1007/1-84628-323-X.

(Hsu 1993)

Hsu, P. (1993), „Coordinated control of multiple manipulator systems“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9 (4), S. 400–410, DOI: 10.1109/70.246051.

(Iglesias et al. 2015)

Iglesias, I.; Sebastián, M. A. & Ares, J. E. (2015), „Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential“, *Procedia Engineering*, 132 , S. 911–917, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.577.

(International Federation of Robotics 2020)

International Federation of Robotics (2020), *IFR Press Conference 2020*, Frankfurt, https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation_WR_2020.pdf, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(ISO 7379), ISO 7379:1983-10 (1983): *Hexagon socket head shoulder screws*, <https://www.iso.org/standard/14078.html>, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Jubien et al. 2014)

Jubien, A.; Abba, G. & Gautier, M. (2014), „Joint Stiffness Identification of a Heavy Kuka Robot with a Low-cost Clamped End-effector Procedure“, *Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Wien, Österreich, 01.-03. September 2014, Hrsg. J. Filipe, SCITEPRESS, S.l., S. 585–591. ISBN: 978-989-758-039-0, DOI: 10.5220/0005115805850591.

(Kleppmann 2020)

Kleppmann, W. (2020), *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*, 10. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, Deutschland, <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446463974>, ISBN: 9783446463974, DOI: 10.3139/9783446463974, [Zuletzt geprüft: 12.08.2024].

(KUKA Deutschland GmbH 2021)

KUKA Deutschland GmbH (2021), *KUKA.RoboTeam 3.1: Für KUKA System Software 8.6 und 8.7*, Augsburg.

(Kurfess 2005)

Kurfess, T. R. (2005), *Robotics and Automation Handbook*, CRC Press, Boca Raton, ISBN: 9781315220352.

(MABI Robotic 2024)

MABI Robotic (2024), *MAX-100 Precision*, https://cdn.prod.website-files.com/678e3edfed8efc26069c9085/678e4c62d1da9dc333ba1ab9_MAX-100-225-P_Datenblatt_de_V2.pdf, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Makris 2021)

Makris, S. (2021), *Cooperating Robots for Flexible Manufacturing*, Springer International Publishing, Cham, Schweiz, ISBN: 978-3-030-51590-4, DOI: 10.1007/978-3-030-51591-1.

(Massa et al. 2015)

Massa, D.; Callegari, M. & Cristalli, C. (2015), „Manual guidance for industrial robot programming“, *Industrial Robot: An International Journal*, 42 (5), S. 457–465, <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ir-11-2014-0413/full/pdf>, DOI: 10.1108/IR-11-2014-0413, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Matthiesen 2002)

Matthiesen, S. (2002), *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Deutschland, DOI: 10.5445/IR/12092002, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Meskouris & Hake 2009)

Meskouris, K. & Hake, E. (2009), *Statik der Stabtragwerke: Einführung in die Tragwerkslehre*, 2. Aufl., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN: 9783540889939, DOI: 10.1007/978-3-540-88993-9.

(Möller 2019)

Möller, C. (2019), *Entwicklung eines hochgenauen Bearbeitungsroboters durch den Einsatz zusätzlicher Messtechnik*, Dissertation, Technische Universität Hamburg, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Deutschland, ISBN: 9783839616000, DOI: 10.15480/882.2741.

(Moore 1920)

Moore, E. H. (1920), „On the Reciprocal of the General Algebraic Matrix“, *Bulletin of the American Mathematical Society*, 26 , S. 394–395.

(Mühlbeier et al. 2021)

Mühlbeier, E.; Gönnheimer, P.; Hausmann, L. & Fleischer, J. (2021), „Value Stream Kinematics“, *Production at the leading edge of technology: Proceedings of the 10th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Dresden, Deutschland, 23-24 September 2020*, Hrsg. B.-A. Behrens, A. Brosius, W. Hintze, S. Ihlenfeldt & J. P. Wulfsberg, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 409–418. ISBN: 978-3-662-62137-0, DOI: 10.1007/978-3-662-62137-7_41.

(Mühlbeier et al. 2023)

Mühlbeier, E.; Bauer, V.; Schade, F.; Gönnheimer, P.; Becker, J. & Fleischer, J.

(2023), „Mechatronic Coupling System for Cooperative Manufacturing with Industrial Robots“, *Procedia CIRP*, 120, S. 744–749, DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.069.

(Naumovic et al. 2011)

Naumovic, M. B.; Keyser, R. de & Ionescu, C.-M. (2011), „Testing the MATLAB®Simulink-based frequency response analyzer“, *10th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TELSIKS)*, Nis, Serbien, 05.-08. Oktober 2011, IEEE, S. 589–592. ISBN: 978-1-4577-2019-2, DOI: 10.1109/TELSIKS.2011.6143183.

(Pascali et al. 2022)

Pascali, L. de; Erhart, S.; Zaccarian, L.; Francesco, B. & Hirche, S. (2022), „A Decoupling Scheme for Force Control in Cooperative Multi-Robot Manipulation Tasks“, *2022 IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (AMC)*, Padua, Italien, 18.-20. Februar 2022, IEEE, S. 243–249. ISBN: 978-1-7281-7711-3, DOI: 10.1109/AMC51637.2022.9729263.

(Penrose 1955)

Penrose, R. (1955), „A generalized inverse for matrices“, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 51 (3), S. 406–413, DOI: 10.1017/S0305004100030401.

(Perez-Ubeda et al. 2021)

Perez-Ubeda, R.; Zotovic-Stanisic, R.; Gutierrez Rubert, S. C. & Lluch-Cerezo, J. (2021), „Adjusting the active joint stiffness of a collaborative robot arm for force control“, *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (I-CIT)*, Valencia, Spanien, 10.-12. März 2021, IEEE, Piscataway, NJ, USA. ISBN: 978-1-7281-5730-6, DOI: 10.1109/icit46573.2021.9453698.

(Pfeiffer et al. 2008)

Pfeiffer, F.; Wriggers, P. & Pfeiffer, F. (2008), *Mechanical System Dynamics*, 1. Aufl., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-540-79435-6, DOI: 10.1007/978-3-540-79436-3.

(PI North America 2024)

PI North America (2024), *Profinet IRT: The Solution for Synchronous Real-time Applications*, <https://us.profinet.com/wp-content/uploads/2020/10/PROFINET-IRT-final.pdf>, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Pintado et al. 2018)

Pintado, P.; Ramiro, C.; Berg, M.; Morales, A. L.; Nieto, A. J.; Chicharro, J. M.; Miguel de Priego, J. C. & García, E. (2018), „On the mechanical behavior of rubber springs for high speed rail vehicles“, *Journal of Vibration and Control*, 24 (20), S. 4676–4688, DOI: 10.1177/1077546317732206.

(Pott & Dietz 2019)

Pott, A. & Dietz, T. (2019), *Industrielle Robotersysteme*, 1. Aufl., Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-25344-8, DOI: 10.1007/978-3-658-25345-5.

(Raibert & Craig 1981)

Raibert, M. H. & Craig, J. J. (1981), „Hybrid Position/Force Control of Manipulators“, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 103 (2), S. 126–133, DOI: 10.1115/1.3139652.

(Reinhart & Zaidan 2009)

Reinhart, G. & Zaidan, S. (2009), „A generic framework for workpiece-based programming of cooperating industrial robots“, *2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Changchun, China, 9.-12. August 2009, IEEE, Piscataway, N.J., USA, S. 37–42. ISBN: 978-1-4244-2692-8, DOI: 10.1109/ICMA.2009.5245122.

(Reinhart et al. 2010)

Reinhart, G.; Zaidan, S. & Hubele, J. (2010), „Is Force Monitoring in Cooperating Industrial Robots Necessary?“, *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, München, Deutschland, 7.-9. Juni 2010, VDE Verlag, Berlin, Deutschland. ISBN: 978-3-8007-3273-9, <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5756731>.

(Reyes-Uquillas & Hsiao 2021)

Reyes-Uquillas, D. & Hsiao, T. (2021), „Compliant Human–Robot Collaboration with Accurate Path-Tracking Ability for a Robot Manipulator“, *Applied Sciences*, 11 (13), <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/13/5914>, DOI: 10.3390/app11135914.

(Riedel 2015)

Riedel, M. (2015), *Method for handling objects using at least two industrial robots*, Europäisches Patent EP2862677,

<https://www.mysciencework.com/patent/download/verfahren-zum-handhaben-von-objekten-mittels-wenigstens-zweier-industrieroboter-EP2862677B1/EP2862677B1>, [Zuletzt geprüft: 12.08.2024].

(Rocco et al. 1997)

Rocco, P.; Ferretti, G. & Magnani, G. (1997), „Implicit force control for industrial robots in contact with stiff surfaces“, *Automatica*, 33 (11), S. 2041–2047, DOI: 10.1016/S0005-1098(97)00113-1.

(Rodamilans et al. 2016)

Rodamilans, G. B.; Villani, E.; Trabasso, L. G.; Oliveira, W. R. de & Suterio, R. (2016), „A comparison of industrial robots interface: force guidance system and teach pendant operation“, *Industrial Robot: An International Journal*, 43 (5), S. 552–562, <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ir-02-2016-0074/full/pdf>, DOI: 10.1108/IR-02-2016-0074, [Zuletzt geprüft: 12.08.2024].

(Roth 2016)

Roth, A. (2016), *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*, 1. Aufl., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-662-48504-0, DOI: 10.1007/978-3-662-48505-7.

(Schäfer 2024)

Schäfer, M. (2024), *Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem Li-DAR-System in der Mensch-Roboter-Kollaboration - Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration*, Shaker Verlag, DOI: 10.5445/IR/1000171717.

(Schneider & Cannon 1992)

Schneider, S. A. & Cannon, R. H. (1992), „Object impedance control for cooperative manipulation: theory and experimental results“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8 (3), S. 383–394, DOI: 10.1109/70.143355.

(Schumacher et al. 2019)

Schumacher, M.; Wojtusich, J.; Beckerle, P. & Stryk, O. von (2019), „An introductory review of active compliant control“, *Robotics and Autonomous Systems*, 119, S. 185–200, DOI: 10.1016/j.robot.2019.06.009.

(Siciliano & Villani 1999)

Siciliano, B. & Villani, L. (1999), *Robot Force Control*, 1. Aufl., Springer, Boston, MA, USA, ISBN: 9781461544319, DOI: 10.1007/978-1-4615-4431-9.

(Siciliano et al. 2009)

Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L. & Oriolo, G. (2009), *Robotics: Modelling, planning and control*, 1. Aufl., Springer, London, ISBN: 978-1-84628-641-4, DOI: 10.1007/978-1-84628-642-1.

(Siciliano & Khatib 2016)

Siciliano, B. & Khatib, O. (2016), *Springer Handbook of Robotics*, 2. Aufl., Springer International Publishing, Cham, Schweiz, ISBN: 978-3-319-32550-7, DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1.

(Siemens AG & Comau 2019)

Siemens AG & Comau (2019), *NJ290-3.0: Wiederholgenauigkeit, Absolutgenauigkeit, Steifigkeit*, Datenblatt, https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109757564/Robot_Datasheets_V2.1.zip, [Zuletzt geprüft: 03.09.2024].

(Siemens AG 2021)

Siemens AG (2021), *Sinumerik 840D sl: Funktionsbeschreibung Synchronized Motion (SYMO)*.

(Siemens AG 2022)

Siemens AG (2022), *SIMATIC PROFINET mit STEP 7: PROFINET mit STEP 7*.

(Siemens AG 2024)

Siemens AG (01/2024), *SINUMERIK ONE Synchronaktion: Funktionshandbuch*, Nürnberg, https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109973967/ONE_synchronized_actions_fct_man_0724_de-DE.pdf?download=true, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Smith et al. 2012)

Smith, C.; Karayiannidis, Y.; Nalpantidis, L.; Gratal, X.; Qi, P.; Dimarogonas, D. V. & Kragic, D. (2012), „Dual arm manipulation—A survey“, *Robotics and Autonomous Systems*, 60 (10), S. 1340–1353, DOI: 10.1016/j.robot.2012.07.005.

(Song et al. 2020)

Song, S.; Dai, X.; Huang, Z. & Gong, D. (2020), „Load Parameter Identification for Parallel Robot Manipulator Based on Extended Kalman Filter“, *Complexity*, 2020 (4), S. 1–12, DOI: 10.1155/2020/8816374.

(Spiller & Verl 2012)

Spiller, A. & Verl, A. (2012), „Force controlled handling with cooperating industrial

robots“, *ROBOTIK 2012: 7th German Conference on Robotics*, München, Deutschland, 21.-22. Mai 2012, VDE Verlag, Berlin, Deutschland, S. 496–501, <https://ieeexplore.ieee.org/document/6309558>, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Spiller 2014)

Spiller, A. (2014), *Unterstützung der Werkstückhandhabung kooperierender Industrieroboter durch Kraftregelung*, Dissertation, Universität Stuttgart, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Deutschland, ISBN: 978-3-8396-0711-4, DOI: 10.18419/OPUS-4579.

(Steegmüller & Zürn 2017)

Steegmüller, D. & Zürn, M. (2017), „Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft“, *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1: Produktion*, Hrsg. B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl & M. T. Hompel, SPRINGER VIEWEG, Berlin, Heidelberg, S. 27–44. ISBN: 978-3-662-45279-0, DOI: 10.1007/978-3-662-45279-0_23.

(Sun & Mills 2002)

Sun, D. & Mills, J. K. (2002), „Manipulating rigid payloads with multiple robots using compliant grippers“, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 7 (1), S. 23–34, DOI: 10.1109/3516.990884.

(Surdilovic et al. 2010)

Surdilovic, D.; Yakut, Y.; Nguyen, T.-M.; Pham, X. B.; Vick, A. & Martin-Martin, R. (2010), „Compliance control with dual-arm humanoid robots: Design, planning and programming“, *10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Nashville, TN, USA, 6.-8. Dezember 2010, IEEE, Piscataway, N.J., USA, S. 275–281. ISBN: 978-1-4244-8688-5, DOI: 10.1109/ICHR.2010.5686273.

(Tonietti et al. 2005)

Tonietti, G.; Schiavi, R. & Bicchi, A. (2005), „Design and Control of a Variable Stiffness Actuator for Safe and Fast Physical Human/Robot Interaction“, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spanien, 18.-22. April 2005, IEEE, S. 526–531. ISBN: 0-7803-8914-X, DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570172.

(Tröster 2015)

Tröster, F. (2015), *Regelungs- und Steuerungstechnik für Ingenieure*, 4. Aufl., De Gruyter Oldenbourg, Berlin, Deutschland, ISBN: 978-3-11-041114-0, DOI: 10.1515/9783110411157.

(Tsarouchi et al. 2014)

Tsarouchi, P.; Makris, S.; Michalos, G.; Stefos, M.; Fourtakas, K.; Kaltsoukalas, K.; Kontrovakis, D. & Chryssolouris, G. (2014), „Robotized Assembly Process Using Dual Arm Robot“, *Procedia CIRP*, 23, S. 47–52, DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.078.

(Tsarouchi et al. 2016)

Tsarouchi, P.; Makris, S. & Chryssolouris, G. (2016), „On a Human and Dual-arm Robot Task Planning Method“, *Procedia CIRP*, 57, S. 551–555, DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.095.

(Tzafestas et al. 1998)

Tzafestas, C. S.; Prokopiou, P. A. & Tzafestas, S. G. (1998), „Path Planning and Control of a Cooperative Three-Robot System Manipulating Large Objects“, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 22 (2), S. 99–116, DOI: 10.1023/A:1007943632269.

(Uchiyama & Dauchez 1988)

Uchiyama, M. & Dauchez, P. (1988), „A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots“, *Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, USA, 24.-29. April 1988, IEEE Comput. Soc. Press, S. 350–356. ISBN: 0-8186-0852-8, DOI: 10.1109/ROBOT.1988.12073.

(Uhlmann et al. 2018)

Uhlmann, E.; Reinkober, S. & Hollerbach, T. (2018), „Erhöhung der Genauigkeit beim Fräsen mit Industrierobotern“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113 (9), S. 576–579, DOI: 10.3139/104.111957.

(VDI 2803), VDI 2803: 2019-01 (2019): *Funktionenanalyse - Grundlagen und Methode*, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland, <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/vdi-2803-blatt-1/296563038>, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Verginis & Dimarogonas 2020)

Verginis, C. K. & Dimarogonas, D. V. (2020), „Energy-Optimal Cooperative Manipulation via Provable Internal-Force Regulation“, *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Paris, Frankreich, 31. Mai - 31. August 2020, IEEE, Piscataway, N.J., USA, S. 9859–9865. ISBN: 978-1-7281-7395-5, DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9196696.

(Walker et al. 1991)

Walker, I. D.; Freeman, R. A. & Marcus, S. I. (1991), „Analysis of Motion and Internal Loading of Objects Grasped by Multiple Cooperating Manipulators“, *The International Journal of Robotics Research*, 10 (4), S. 396–409, DOI: 10.1177/027836499101000408.

(Wang et al. 2020)

Wang, L.; Liu, S.; Liu, H. & Wang, X. V. (2020), „Overview of Human-Robot Collaboration in Manufacturing“, *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing (AMP 2020)*, Hrsg. L. Wang, Springer International Publishing AG, Cham, Schweiz, S. 15–58. ISBN: 978-3-030-46211-6, DOI: 10.1007/978-3-030-46212-3_2.

(Weber 2019)

Weber, W. (2019), *Industrieroboter: Methoden und Steuerung und Regelung*, 4. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, Deutschland, ISBN: 9783446460607, DOI: 10.3139/9783446460607.

(Wen & Kreutz-Delgado 1992)

Wen, J. T. & Kreutz-Delgado, K. (1992), „Motion and force control of multiple robotic manipulators“, *Automatica*, 28 (4), S. 729–743, DOI: 10.1016/0005-1098(92)90033-C.

(White et al. 2011)

White, P. J.; Revzen, S.; Thorne, C. E. & Yim, M. (2011), „A general stiffness model for programmable matter and modular robotic structures“, *Robotica*, 29 (1), S. 103–121, DOI: 10.1017/S0263574710000743.

(Winkler 2008)

Winkler, A. (2008), „Lastidentifikation und Messung dynamischer Kräfte und Momente mit einem 12D-Kraft-/ Momentsensor“, *VDI Berichte 2012 (Tagungsband zur Robotik 2008)*, VDI-Verl., Düsseldorf, Deutschland, S. 33–36. ISBN: 978-3-18-092012-2.

(Wolf & Hirzinger 2008)

Wolf, S. & Hirzinger, G. (2008), „A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation“, *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 19.-23. Mai 2008, IEEE, Piscataway,

N.J., USA, S. 1741–1746. ISBN: 1050-4729, DOI: 10.1109/RO-BOT.2008.4543452.

(Ye et al. 2022)

Ye, X.; Shen, W.; Mamaev, I.; Bertram, T.; Bryg, M.; Schwartz, M.; Asfour, T.; Hein, B.; Kipfmüller, M. & Kotschenreuther, J. (2022), „Multi-level optimization approach for multi-robot manufacturing systems“, *ISR Europe 2022, 54th International Symposium on Robotics*, München, Deutschland, 20.-21. Juni 2022, VDE Verlag, Berlin, Deutschland. ISBN: 978-3-8007-5891-3, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9861791>, [Zuletzt geprüft: 07.05.2025].

(Ye et al. 2023)

Ye, X.; Schwartz, M. & Hohmann, S. (2023), „Enhancement of Path Tracking Accuracy for Physically Coupled Industrial Robots by Hybrid Position-Torque Compensation“, *2023 European Control Conference (ECC)*, Bukarest, Rumänien, 13.-16. Juni 2023, IEEE, S. 1–8. ISBN: 978-3-907144-08-4, DOI: 10.23919/ECC57647.2023.10178292.

(Zaidan 2013)

Zaidan, S. (2013), *A work-piece based approach for programming cooperating industrial robots*, Dissertation, Technische Universität München, Utz Verlag, München, Deutschland, ISBN: 978-3-8316-4175-8.

(Zeng & Hemami 1997)

Zeng, G. & Hemami, A. (1997), „An overview of robot force control“, *Robotica*, 15 (5), S. 473–482, DOI: 10.1017/S026357479700057X.

(Zhang et al. 2005)

Zhang, H.; Wang, J.; Zhang, G.; Gan, Z.; Pan, Z.; Cui, H. & Zhu, Z. (2005), „Machining with Flexible Manipulator: Toward Improving Robotic Machining Performance“, *Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey, CA, USA, 24.-28. Juli 2005, IEEE, S. 1127–1132. ISBN: 0-7803-9047-4, DOI: 10.1109/AIM.2005.1511161.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Produktionskonzept Wertstromkinematik (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2021)	13
Abbildung 1-2: Durchgängige digitale Prozesskette in der Wertstromkinematik (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2021)	14
Abbildung 1-3: Vergleich der simulierten Tool-Center-Point-Nachgiebigkeit für (a) einen und (b) drei gekoppelte Roboter, visualisiert in MATLAB (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2021)	15
Abbildung 1-4: Aufbau der Dissertation	16
Abbildung 2-1: Inhalte von Kapitel 2	18
Abbildung 2-2: Bestimmung der Steifigkeit eines Systems im Betriebspunkt (in Anlehnung an Brecher & Weck 2017, S. 21)	19
Abbildung 2-3: Zusammenhang zwischen Absolut- und Wiederholgenauigkeit (in Anlehnung an Möller 2019, S. 14)	20
Abbildung 2-4: Einflussgrößen auf die Bearbeitungsgenauigkeit eines Industrieroboters (in Anlehnung an Möller 2019)	21
Abbildung 2-5: Überführung von Koordinatensystemen nach DH-Konvention (in Anlehnung an Siciliano et al. 2009, S. 62)	25
Abbildung 2-6: Linear- und Winkelgeschwindigkeiten in verschiedenen Koordinatensystemen desselben Körpers (in Anlehnung an Siciliano & Khatib 2016, S. 150)	26
Abbildung 2-7: Beispiel eines überbestimmt gelagerten Balkens im 2D-Raum (in Anlehnung an Meskouris & Hake 2009, S. 44)	30
Abbildung 2-8: Konzept der impliziten Impedanzregelung und expliziten Impedanzregelung (gestrichelt) (in Anlehnung an Schumacher et al. 2019)	32
Abbildung 2-9: Konzept der Admittanzregelung (in Anlehnung an Schumacher et al. 2019)	33
Abbildung 2-10: Konzept der hybriden Kraft-Positions-Regelung (in Anlehnung an Schumacher et al. 2019)	34

Abbildung 2-11: Konzept der parallelen Kraft-/Positionsregelung (in Anlehnung an Schumacher et al. 2019)	35
Abbildung 2-12: Übersicht zu Kooperationspartnern von Robotern	35
Abbildung 2-13: Aufbau und Komponenten einer dynamischen Kopplung	44
Abbildung 3-1: Vorgehensweise bei der Arbeit	51
Abbildung 4-1: FAST-Diagramm zur Herleitung der Anforderungen an das Kopplungssystem	53
Abbildung 4-2: Teilsysteme des Kopplungssystems	54
Abbildung 4-3: Teilsysteme des Koppelmoduls	54
Abbildung 4-4: Schematischer Prozessablauf zur Spannungskompensation der Roboter	55
Abbildung 4-5: Roboterzelle und Teilsysteme	56
Abbildung 4-6: Roboterschulterplatte (links) und Roboterflansch (rechts)	57
Abbildung 4-7: Matrixplatte mit Schnellspannbolzen (links) und Endeffektormagazin (rechts)	58
Abbildung 5-1: Stempelkraft in N für verschiedene Blechbreiten l_s , Blechdicken s_0 und Gesenkenweiten w beim Freibiegen von C45-Stahl mit $R_m = 650 \text{ N/mm}^2$, Referenzkraft von 8106 N in Schwarz dargestellt (links), Parameter im Freibiegeprozess (rechts) (A_Bauer 2021)	61
Abbildung 5-2: Formgestaltungskonzepte des Koppelmoduls (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2023)	62
Abbildung 5-3: Reaktionskräfte und -momente für den Belastungsfall in xy-Richtung (links) und Darstellung aller sechs untersuchten Belastungsfälle (rechts) (A_Bauer 2021)	62
Abbildung 5-4: Teilsysteme des Koppelmoduls	63
Abbildung 5-5: Schnellwechselsystem mit Durchführmodulen (links) und schematische Darstellung der Betriebsmittelweitergabe (rechts)	64
Abbildung 5-6: Kraftfluss (in Rot) der inneren Kräfte (links) und Prozesskräfte (rechts) im gekoppelten System (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2023)	66

Abbildung 5-7: Platzierungsmöglichkeiten der Kraftsensoren im Koppelmodul	67
Abbildung 5-8: Konzept des Sternelements als Schweißkonstruktion (links) und als Knochenstruktur (rechts)(A_Bauer 2021)	68
Abbildung 5-9: Topologieoptimierung; Ausgangsmodell (a), Zielvolumen = 50 % (b), Zielvolumen = 37 % (c), finales CAD-Modell (d) (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2023)	69
Abbildung 5-10: Einzelkomponenten des Sternteilsystems	70
Abbildung 5-11: Passschraube nach ISO 7379 mit zusätzlicher Kerbe als Sollbruchstelle	70
Abbildung 5-12: Genormte Elastomerelemente mit beidseitigem Gewinde (links) und Schnittansicht (rechts) (A_Arzberger 2022)	71
Abbildung 5-13: Darstellung der Anordnung der Federelemente im xz-Schnitt (links) und yz-Schnitt (rechts) (in Anlehnung an A_Arzberger 2022)	72
Abbildung 5-14: Konfigurationsmöglichkeiten zur Einstellung der Federsystemsteifigkeit (in Anlehnung an A_Arzberger 2022)	73
Abbildung 5-15: Gesamtsystem Koppelmodul	73
Abbildung 5-16: Integration des Koppelmoduls mit den Roboterflanschen (in Anlehnung an Mühlbeier et al. 2023)	74
Abbildung 5-17: Koppelmodul im getrennten (links) und gekoppelten Zustand (rechts)	74
Abbildung 6-1: Grundlegender Übertragungsweg des Regelungssystems	78
Abbildung 6-2: Kommunikationsteilnehmer in der Roboterzelle	79
Abbildung 6-3: PROFINET-Topologie der Roboterzelle (in Anlehnung an A_Binder 2023)	80
Abbildung 6-4: Zuordnung der Messaufnehmer-Kanäle zu Messverstärkern	81
Abbildung 6-5: Kommunikation zwischen NC und externem Rechner über NC-Peripherie	84
Abbildung 6-6: Konzept des in der Arbeit eingesetzten parallelen Kraftreglers (A_Kappus 2023)	86

Abbildung 6-7: Bezugssysteme im Koppelmodul (in Anlehnung an A_Kappus 2023)	87
Abbildung 6-8: Bei der Gewichtskraftkompensation berücksichtigte Komponenten	88
Abbildung 6-9: Aufteilung der Last auf Kraftkomponenten in Abhängigkeit der Gewichtung w_G , mit Beispielwerten $l=1$ und $M_y=1$.	92
Abbildung 6-10: Prozentuale Abweichung zwischen dem Roboter-Nachgiebigkeitsmodell und den vom Hersteller angegebenen Nachgiebigkeiten (A_Kappus 2023)	95
Abbildung 6-11: Translatorische Verschiebung zwischen den Flanschkoordinatensystemen und den Federkoordinatensystemen	96
Abbildung 6-12: Koordinatensystem eines Federelements (A_Kappus 2023)	97
Abbildung 6-13: Simulativ (FEM) ermittelte Steifigkeitsverläufe eines Federelements der Form C nach DIN 95363 mit 40 mm Durchmesser, 30 mm Höhe und Shorehärte 70 (A_Kappus 2023)	97
Abbildung 6-14: Koordinatensysteme der Platzierungsflächen für Federelemente im Federsystem (A_Kappus 2023)	99
Abbildung 6-15: Blockschaltbild des entwickelten Kraftreglers (A_Kappus 2023)	104
Abbildung 6-16: Zerstörte Federelemente im Koppelmodul aufgrund des Windup-Effekts während einer Testfahrt	107
Abbildung 6-17: Gemessene innere Kräfte bei einem sinusförmigen Eingangssignal mit steigender Frequenz von 0,5–50 Hz und einer Amplitude von 50 N als Anregung (A_Klein 2024)	109
Abbildung 6-18: Nyquist-Diagramme für Reglerverstärkung $k_I = 4,5$ (links) und $k_I = 8,5$ (rechts) mit Ortskurven des Systems für beide Federkonfigurationen (A_Klein 2024)	111
Abbildung 6-19: Verlauf der inneren Kräfte bei Sollsprung mit $k_I = 5,5$ (A_Klein 2024)	112
Abbildung 6-20: Verlauf der inneren Kräfte bei Störsprung mit $k_I = 5,5$ (A_Klein 2024)	114

Abbildung 7-1: Platzierung des Versuchsraums in der Roboterzelle bezüglich des Welt-KOS	118
Abbildung 7-2: Messverfahren zur Ermittlung der Steifigkeit mit Kraftaufbringung durch bewegtes Objekt (links) und durch Bewegung des Roboters (rechts)	119
Abbildung 7-3: Gekoppeltes System (links) und Einzelroboter (rechts) mit Koppelmodul im Vergleich	120
Abbildung 7-4: Befestigter Stahlträger während der Steifigkeitsmessung (links), verschiedene Höhen der Stahlträger (mittig) (A_Caixeta 2024) und FEM-Simulation der Durchbiegung des Stahlträgers bei einer Last von 1000 N (rechts)	121
Abbildung 7-5: Einflussgrößen bei der Steifigkeitsuntersuchung	122
Abbildung 7-6: Räumliche Darstellung der Messebenen	123
Abbildung 7-7: Einzelne Messebenen und Messpunkte des Versuchsraums	124
Abbildung 7-8: Unterschiede in der Messdurchführung nach Belastungsrichtung	125
Abbildung 7-9: Krafteinleitungsendeffektor	126
Abbildung 7-10: Kraft-Weg-Verlauf einer Steifigkeitsmessung mit TCP-Pose $x = 1243$, $y = 350$, $z = 315$, bezogen auf das Welt-KOS der Roboterzelle	128
Abbildung 7-11: Kinematisches Steifigkeitsmodell des Comau-Roboters NJ290-3.0 (A_Kappus 2023)	129
Abbildung 7-12: 3D-Steifigkeitskarten des gekoppelten Robotersystems für unterschiedliche Belastungsrichtungen	130
Abbildung 7-13: 3D-Steifigkeitskarten des Einzelroboters	132
Abbildung 7-14: Mittlere Steifigkeiten nach Belastungsrichtung	134
Abbildung 7-15: Vergleich der Steifigkeiten für die Systeme Einzelroboter, Einzelroboter mit Stahlfedern und gekoppeltes System in unterschiedlichen Posen	135
Abbildung 7-16: 3D-Steifigkeitskarte des gekoppelten Robotersystems in z-Richtung mit Symmetrieebene	136
Abbildung 7-17: 3D-Wirkungsflächendiagramm und Konturplot für die Steifigkeit in z-Richtung der Messpunkte der vierten Ebene für das gekoppelte System (links) und den Einzelroboter (rechts)	137

Abbildung 7-18: 3D-Wirkungsflächendiagramm und Konturplot für die Steifigkeit in z-Richtung der Messpunkte der aggregierten Ebenen für das gekoppelte System (links) und den Einzelroboter (rechts)	138
Abbildung 7-19: Schiefe Versuchsebene im Welt-KOS (A_Klein 2024)	141
Abbildung 7-20: Einflussgrößen bei der Genauigkeitsuntersuchung	142
Abbildung 7-21: Integration des T-Mac im Koppelmodul (links) und Platzierung des Lasertrackers im Versuchsraum (rechts) (A_Klein 2024)	143
Abbildung 7-22: Genauigkeitsmessung in der Roboterzelle mit Lasertracker und 6-DOF-Reflektor	144
Abbildung 7-23: Reihenfolge und Bewegungsrichtungen der Messung der Punktfolge (A_Klein 2024)	145
Abbildung 7-24: Absolutgenauigkeit (AP_p) in Abhängigkeit der Faktoren für das gekoppelte Robotersystem	146
Abbildung 7-25: Absolutfehler der Absolutgenauigkeit in den einzelnen Koordinatenrichtungen für das gekoppelte System (links oben/unten) und den Einzelroboter (rechts oben/unten) (A_Klein 2024)	148
Abbildung 7-26: Wiederholgenauigkeit (RP_l) in Abhängigkeit der Faktoren für das gekoppelte Robotersystem	151
Abbildung 7-27: Wechselwirkungsdiagramm für die Wiederholgenauigkeit (RP_l) des Einzelroboters für die Punkte P_1 – P_5	151
Abbildung 7-28: Trajektorien und Bewegungsrichtungen der Geradenfahrt (links) und Kreisfahrt (rechts) (A_Klein 2024)	152
Abbildung 7-29: Verlauf der Absolutgenauigkeit (AP_p) entlang der Geradentrajektorie für beide Geschwindigkeitsstufen des gekoppelten Systems (A_Klein 2024)	153
Abbildung 7-30: Verlauf der Absolutgenauigkeit (AP_p) entlang der Kreisbahn für beide Geschwindigkeitsstufen des gekoppelten Systems (A_Klein 2024)	154

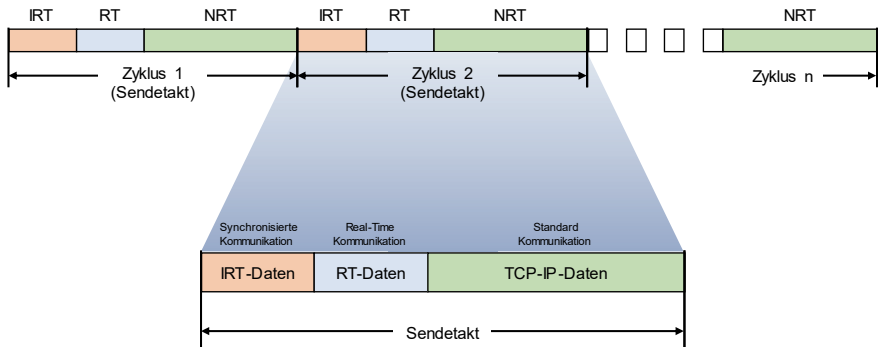
Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Kraftwechselwirkung und Kopplungsformen von gekoppelten Robotern	41
Tabelle 5-1: Übersicht der Anforderungen an das Koppelmodul	59
Tabelle 5-2: Maximale Reaktionskräfte/-momente an den roboterseitigen Koppelmodulflanschen (A_Bauer 2021)	63
Tabelle 5-3: Ergebnisse der FEM-Simulation und berechnete Sicherheitsfaktoren	67
Tabelle 5-4: Maximale Von-Mises-Spannungen für alle Lastfälle bei Optimierung auf Zielvolumen von 37 %, maximaler Wert = 40,09 MPa	69
Tabelle 6-1: Steuerung und Zustandsabfrage des externen Rechnerprogramms	83
Tabelle 6-2: Modellierte Gelenknachgiebigkeiten (A_Kappus 2023)	94
Tabelle 6-3: Minimale, maximale und mittlere prozentuale Abweichung der modellierten TCP-Nachgiebigkeiten (A_Kappus 2023)	95
Tabelle 6-4: Gemittelte simulative Steifigkeitskomponenten eines Federelements der Form C nach DIN 95363 mit 40 mm Durchmesser, 30 mm Höhe und Shorehärte 70 (A_Kappus 2023)	98
Tabelle 6-5: Messpunkte zur Validierung des Nachgiebigkeitsmodells im Welt-KOS (A_Kappus 2023)	101
Tabelle 6-6: Experimentell ermittelte Nachgiebigkeitsmatrix im ersten Messpunkt. Die Einheit des translatorischen Teils ist m/N, für den rotatorischen Teil rad/Nm, Kopplungsteil 1/N bzw. rad/N (A_Kappus 2023)	101
Tabelle 6-7: Modellierte Nachgiebigkeitsmatrix im ersten Messpunkt. Die Einheit des translatorischen Teils ist m/N, für den rotatorischen Teil rad/Nm, Kopplungsteil 1/N bzw. rad/N	102
Tabelle 6-8: Prozentuale Abweichung der Nachgiebigkeitskomponenten zwischen Messung und Modellierung	102
Tabelle 6-9: Ausregelzeiten und maximale Kräfte/Momente beim Sollsprung für verschiedene Reglerverstärkungen (A_Klein 2024)	113
Tabelle 6-10: Ausregelzeiten und maximale Kräfte/Momente beim Störsprung für verschiedene Reglerverstärkungen (A_Klein 2024)	114

Tabelle 7-1: Ergebnisse der Vorversuche zur Belastungsrichtung (A_Caixeta 2024)	123
Tabelle 7-2: Randbedingungen bei der Steifigkeitsuntersuchung	127
Tabelle 7-3: Vergleich der mittleren Standardabweichungen und Standardabweichungen über alle Posen	133
Tabelle 7-4: Messpunkte der Steifigkeitsmessung mit Stahlblöcken	134
Tabelle 7-5: Einordnung der Genauigkeitskenngrößen	141
Tabelle 7-6: Faktoren und Faktorstufen der Genauigkeitsuntersuchung	143
Tabelle 7-7: Absolutgenauigkeit (AP_p) des gekoppelten Robotersystems (A_Klein 2024)	145
Tabelle 7-8: Absolutgenauigkeit (AP) des Einzelroboters (A_Klein 2024)	147
Tabelle 7-9: Wiederholgenauigkeit (RP_l) des gekoppelten Systems und Einzelroboters mit Mittelwert und Standardabweichung (A_Klein 2024)	150
Tabelle 7-10: Bahn-Absolutgenauigkeiten (AT_p) des gekoppelten Systems (A_Klein 2024)	152
Tabelle 7-11: Vergleich der Bahn-Absolutgenauigkeiten (AT_p) des gekoppelten Systems und des Einzelroboters (A_Klein 2024)	155
Tabelle 7-12: Bahn-Wiederholgenauigkeiten (RT_p) des gekoppelten Systems und des Einzelroboters (A_Klein 2024)	156
Tabelle 7-13: Entwicklungsplan mit Maßnahmen zur Verbesserung des gekoppelten Systems und Erschließung noch ungenutzter Potentiale	161

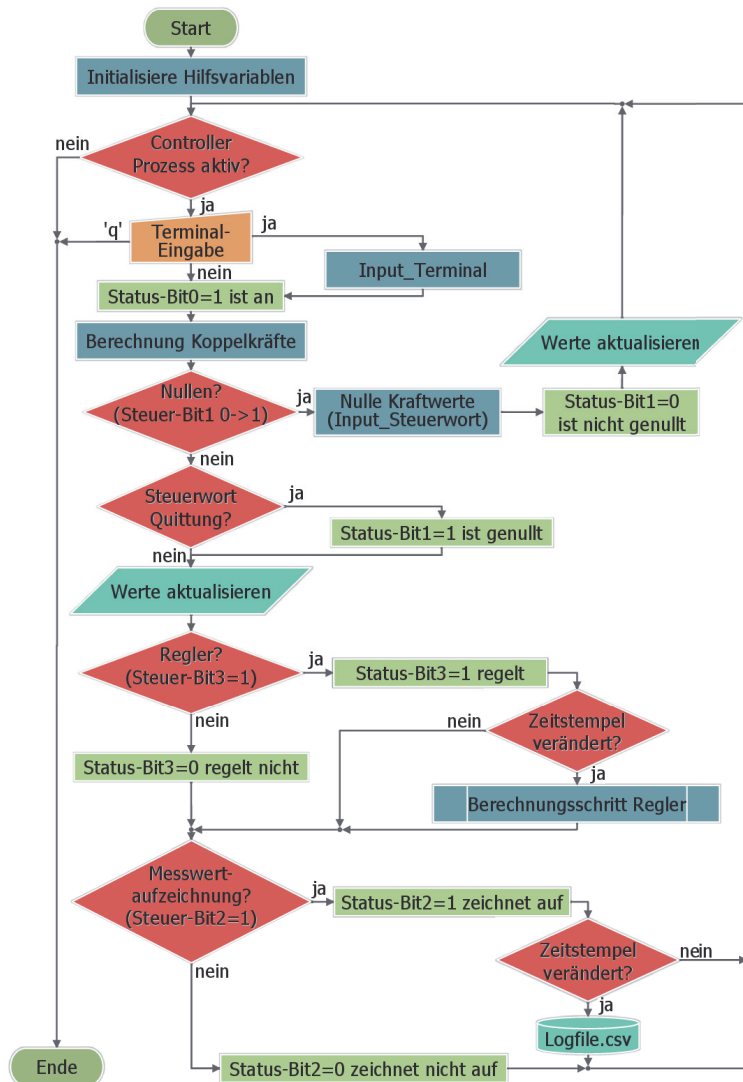
Anhang

Anhang A: Aufbau des PROFINET-Kommunikationszyklus (Eigene Darstellung eines Auszugs aus Siemens AG 2022, S. 191)



- **IRT-Daten (synchronisierte Kommunikation)**
Dieser Zeitbereich kann abhängig vom Sendetakt in bestimmten Schritten reserviert werden. Innerhalb dieses Zeitbereichs werden ausschließlich IRT-Daten übertragen.
- **RT-Daten (Real-Time Kommunikation)**
In diesem Zeitbereich werden die zyklischen RT-Daten übertragen. RT-Daten werden gegenüber "normalen" TCP/IP-Daten priorisiert. TCP/IP-Daten bzw. Ethernet-Telegramme können eine Priorität zwischen 1 und 7 haben. RT-Daten haben die Priorität 6.
- **TCP/IP-Daten (Standard Kommunikation)**
Die Standard-Kommunikation (z. B. TCP/IP) wird schließlich in dem verbleibenden Intervall des Kommunikationszyklus übertragen.

Anhang B: Programmablaufplan für Datenlogging und Echtzeitregelung (A_Binder 2023)



Anhang C: Steifigkeiten des Roboters Comau-NJ290-3.0 (Siemens AG & Comau 2019)



SIEMENS
Ingenuity for life

NJ290 3.0

Wiederholgenauigkeit

Wiederholgenauigkeit: 0,15 mm

Randbedingungen: Gemessen nach ISO9283 (monodirektional)




Absolutgenauigkeit (nach ISIOS Kalibration)

	Fehler absolut im gesamten Arbeitsraum	Fehler absolut innerhalb 1m ³ um Arbeitsfokus	Fehler relativ für eine Roboterbewegung innerhalb 1m ³ um Arbeitsfokus (best fit)
Mittelwert [mm]	tbd	tbd	tbd
Standardabweichung [mm]	tbd	tbd	tbd
Maximal Fehler [mm]	tbd	tbd	tbd

Messung gemäß ISO 9283 mit zusätzlichen praxisrelevanten Randbedingungen:

- Anfahren aus verschiedenen Richtungen und mit verschiedenen Orientierungen (multidirektional)
- Messung am TCP (300mm vom Flansch entfernt)
- gemessen mit ca. 50% der max. Nutzlast
- Ergebnisse gelten für Boden-, Wand- oder Deckenmontage des Roboters

Steifigkeit

Steifigkeit X-Richtung (N/μm)	Steifigkeit Y-Richtung (N/μm)	Steifigkeit Z-Richtung (N/μm)	
			
	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
Min.wert [N/μm]	0.232	0.896	0.190
Max.wert [N/μm]	7.669	2.045	11.890
Mittelwert [N/μm]	1.638	1.257	1.543

Randbedingungen:

- Die Steifigkeitswerte in einem farbigen Punkt werden in der Flansch-Mitte angegeben, mit allen Handachsen auf 0°.
- Die Steifigkeitskennwerte wurden simulativ auf Basis der Mechanikennwerte ermittelt.
- Die Skala für die Steifigkeit in X/Y/Z-Richtung ist gleich.

Anhang D: Versuchsplan der Steifigkeitsuntersuchung (A_Caixeta 2024)

Kombi- nation	Ebene	Faktoren				
		TCP Position [mm]			Belastungs- richtung	
		Y	X	Z		
0	Ebene 1	600	800	315	X+	
1					X-	
2					Y+	
3				355	Z+	
4					X+	
5					X-	
6			1000	315	Y+	
7					Z+	
8					X+	
9			1200	315	X-	
10					Y+	
11					Z+	
12				355	X+	
13					X-	
14					Y-	
15			750	315	Z+	
16					X+	
17					X-	
18		350	1000	315	Y-	
19					Z+	
20					355	X+
21			X-			
22			Y-			
23			1250	315	Z+	
24					X+	
25					700	315
26			750	Y-		
27			700	Z+		
28		100	1000	315	X+	
29					X-	
30					Y-	
31				355	Z+	
32				1250	X+	
33				315	X-	
34			Y-			
35			355		Z+	
36			600	750	570	X+
37						X-
38					Y+	
39					600	Z+
40				1000	570	X+
41						X-
42	Y+					

Kombi- nation	Ebene	Faktoren				
		TCP Position [mm]			Belastungs- richtung	
		Y	X	Z		
43	Ebene 2	600	1250	600	Z+	
44					X+	
45					X-	
46				570	Y+	
47					Z+	
48					X+	
49			700	570	X-	
50					Y-	
51				700	600	Z+
52				350	1000	570
53		X-				
54		Y-				
55		Z+				
56		1250	570		X+	
57					X-	
58		1300	600		Y-	
59					Z+	
60		100	700		570	X+
61						X-
62				Y-		
63			700	600	Z+	
64					X+	
65			1000	570	X-	
66					Y-	
67				600	Z+	
68				1250	570	X+
69			X-			
70			Y-			
71			450	1000	820	X+
72						X-
73		Y+				
74		850			Z+	
75					X+	
76					X-	
77		1300		820	Y+	
78					Z+	
79				850	X+	
80					X-	
81		350		700	820	X+
82						X-
83						Z+
84				750	X+	
85			X-			

Kombi- nation	Ebene	Faktoren			
		TCP Position [mm]			Belastungs- richtung
		Y	X	Z	
86	Ebene 3	350	700	820	Y-
87				850	Z+
88			1000		X+
89				820	X-
90					Y-
91			850		Z+
92					X+
93			1250		X-
94				820	Y-
95			1300		Z+
96		100	700		X+
97			750	820	X-
98			700		Y-
99				850	Z+
100			1000		X+
101				820	X-
102					Y-
103			850		Z+
104					X+
105			1250		X-
106				820	Y-
107			1300		Z+
108	Ebene 4	600	700		X+
109			750	1065	X-
110			700		Y+
111				1100	Z+
112			1000		X+
113				1065	X-
114					Y+
115			1100		Z+
116					X+
117			1250		X-
118				1065	Y+
119			1300		Z+
120		350	700		X+
121			750	1065	X-
122			700		Y-
123				1100	Z+
124			1000		X+
125				1065	X-
126					Y-
127			1100		Z+
128				1250	X+

Kombi- nation	Ebene	Faktoren			
		TCP Position [mm]			Belastungs- richtung
		Y	X	Z	
129	Ebene 4	350	1300	1065	X-
130					Y-
131				1100	Z+
132		700	1065		X+
133					X-
134					Y-
135		700	1100		Z+
136					X+
137				1065	X-
138		1000	1065		Y-
139				1100	Z+
140					X+
141		1250	1065		X-
142					Y-
143				1100	Z+

Anhang E: Berechnung der Positions- und Positionswiederholgenauigkeit. Auszug aus (DIN EN ISO 9283)

Positionsgenauigkeit

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

$$AP_x = (\bar{x} - x_c)$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c)$$

$$AP_z = (\bar{z} - z_c)$$

Dabei ist:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$$

\bar{x} , \bar{y} und \bar{z} sind die Koordinaten des Schwerpunktes der Gruppe von Punkten, die nach n -facher Wiederholung derselben Pose erreicht werden.

x_c , y_c und z_c sind die Koordinaten der Sollpose;

x_j , y_j und z_j sind die Koordinaten der j -ten Istpose.

Positions-Wiederholgenauigkeit

$$RP_1 = \bar{l} + 3S_1$$

Dabei ist:

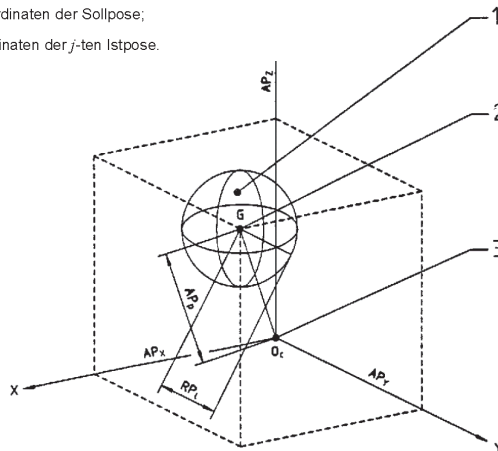
$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j$$

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

Dabei ist:

\bar{x} , \bar{y} , \bar{z} und x_j , y_j , z_j wie in 7.2.1 festgelegt.

$$S_1 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}}$$



- 1 Beispiel für eine Istposition
- 2 Position von G: \bar{x} , \bar{y} , \bar{z}
- 3 O_c gegeben durch die Sollpose P_c

Bild 8: Positionsgenauigkeit und -Wiederholgenauigkeit

Anhang F: Berechnung der Positions-Bahn-Genauigkeit und Positions-Bahn-Wiederholgenauigkeit. Auszug aus (DIN EN ISO 9283)

8.2 Bahn-Genauigkeit (AT)

Die Bahn-Genauigkeit gibt an, wie exakt ein Roboter in der Lage ist, seine mechanische Schnittstelle entlang einer Sollbahn n -mal in derselben Richtung zu bewegen.

Die Bahn-Genauigkeit wird durch zwei Faktoren bestimmt:

- die Differenz zwischen den Positionen einer Sollbahn und der Schwerlinie der Gruppe der Positionen von Istbahnen (d. h. Positions-Bahn-Genauigkeit, AT_p , in Bild 20),
- die Differenz zwischen Sollorientierungen und dem Mittelwert der Istorientierungen (d. h. Orientierungs-Bahn-Genauigkeit).

Die Bahn-Genauigkeit ist die größte Bahnabweichung in Position und Orientierung entlang der erreichten Bahn.

Die Positions-Bahn-Genauigkeit, AT_p , wird festgelegt als das Maximum der Abstände zwischen den Positionen der Sollbahn und den Schwerpunkten \bar{G}_i von n Meßzyklen für jeweils eine Anzahl von berechneten Punkten (m) entlang der Bahn.

Die Positions-Bahn-Genauigkeit wird wie folgt berechnet:

$$AT_p = \max_{i=1 \dots m} \sqrt{(\bar{x}_i - x_{ci})^2 + (\bar{y}_i - y_{ci})^2 + (\bar{z}_i - z_{ci})^2}$$

Dabei sind:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad \bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \bar{z}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij}$$

Bei der Berechnung von AT_p sollte folgendes beachtet werden:

- Die Anzahl der auszuwählenden Meßpunkte und der zugehörigen Normalebenen entlang der Sollbahn ist von der Form der Sollbahn und der Prüfgeschwindigkeit abhängig. Die ausgewählte Zahl der Normalebenen muß im Prüfbericht angegeben werden.
- x_{ci} , y_{ci} und z_{ci} sind die Koordinaten des i -ten Punktes auf der Sollbahn.
- x_{ij} , y_{ij} und z_{ij} sind die Schnittpunktkoordinaten der j -ten Istbahn und der i -ten Normalebene.

8.3 Bahn-Wiederholgenauigkeit (RT)

Die Bahn-Wiederholgenauigkeit gibt die Exaktheit der Übereinstimmung zwischen den Istbahnen für dieselbe n -mal wiederholte Sollbahn an.

Bei einer n -mal in derselben Richtung durchfahrenen Bahn wird die Bahn-Wiederholgenauigkeit angegeben durch

- RT_p als Maximalwert von RT_{pi} , der gleich dem Radius eines Kreises in der Normalebene ist, dessen Mittelpunkt auf der Schwerlinie liegt (siehe Bild 20),
- die größte Streuung der Winkel um den Mittelwert bei verschiedenen berechneten Punkten.

Die Bahn-Wiederholgenauigkeit wird wie folgt berechnet:

$$RT_p = \max RT_{pi} = \max \{\bar{l}_i + 3S_{li}\} \quad i = 1 \dots m$$

Dabei sind:

$$\bar{l}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij}$$

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

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

mit x_i , y_i , z_i , x_{ij} , y_{ij} und z_{ij} wie in 8.2 festgelegt.

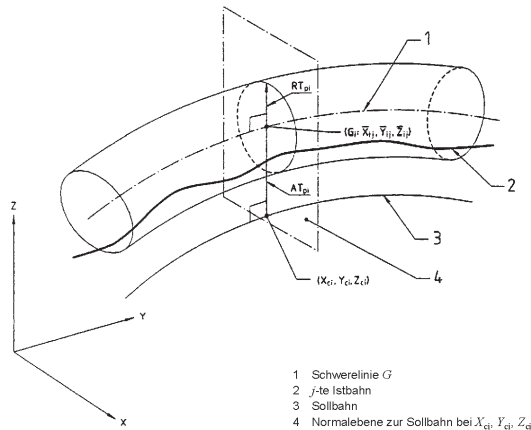


Bild 20: Bahn-Genauigkeit und Bahn-Wiederholgenauigkeit für eine Sollbahn

Forschungsberichte aus dem wbk
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten
Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozessesteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsignen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme:
Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung
im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch
Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung
in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der
Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische
Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge
zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer
Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkabbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossman

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünfsachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Managment-Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser
Abrasivstrahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönninger

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungs-
organisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

Development of a database to consider multi wear mechanisms within chip forming simulation

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

Ausfallgerechte Ersatzteilerstellung im Maschinen- und Anlagenbau mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schadigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspannbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für µMIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptronischen Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen
Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner
Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel
der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten
Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess
und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourcen-
effizienter Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der
Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight
production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning

Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation

Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotextrurierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebsspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositätserkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönzheimer

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

Menschzentriertes Implementierungsvorgehen für das Digitale Shopfloor Management - Förderung der Selbstorganisation unter Berücksichtigung der Mitarbeiterakzeptanz

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess

Maschinentechnik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 287

Dr.-Ing. Nikolas Sven Matkovic

Additive Individualization of Continuous-Discontinuous Reinforced Thermoplastics

Band 288

Dr.-Ing. Marco Wurster

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

Band 289

Dr.-Ing. Felix Johannes Wirth

Prozessgeregelter Formgebung von Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren

Band 290

Dr.-Ing. Patrizia Konstanze Gartner

Konzept eines Selbstheilungsmechanismus für Polymerelektrolytmembranen

Optimierung der Lebensdauer und der Effizienz von Brennstoffzellen

Band 291

Dr.-Ing. Jens Schäfer

Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung

Band 292

Dr.-Ing. Gwen Louis Steier

Strategischer Fit in globalen Produktionsnetzwerken

Entscheidungsunterstützung für die strategische Netzwerkkonfiguration

Band 293

Dr.-Ing. Louis Schäfer

Assistierte, modellbasierte Grobplanung von Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung:

Anwendung am Beispiel hochautomatisierter Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie

Band 294

Dr.-Ing. Jan-Philipp Kaiser

Autonomous View Planning using Reinforcement Learning

Modeling and Application for Visual Inspection in Remanufacturing

Band 295

Dr.-Ing. Wilken Wößner

Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 296

Dr.-Ing. Ann-Kathrin Wurba

Reduktion der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens von Batterieelektroden

Band 297

Dr.-Ing. Simon Mangold

Automatisierte Demontage von Schraubverbindungen für das Remanufacturing

Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Demontagezelle

Band 298

Dr.-Ing. Eduard Gerlitz

Flexibles Trennen von Zellkontaktierungen in Lithium-Ionen-Batteriemodulen

Ein Beitrag zur automatisierten und flexiblen Demontage von Traktionsbatterien

Band 299

Dr.-Ing. Edgar Mühlbeier

Mechatronisches Koppelsystem für die prozessunabhängige, kraftgeregelte Kopplung von seriellen Roboterkinematiken

