

Schriftenreihe Flugzeug-Produktionstechnik

Technische Universität Hamburg

Institut für Flugzeug-Produktionstechnik

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl

Denickestr. 17

21073 Hamburg

Christian Schlosser

**Modellierung einer mobilen Hybridkinematik und
Umsetzung am Beispiel der Flugzeuginspektion**

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

© 2016 Christian Schlosser

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl

Herstellung und Verlag: BoD – Books on Demand, Norderstedt

URN: urn:nbn:de:gbv:830-88213601

ISBN: 978-3-7392-3246-1

Modellierung einer mobilen Hybridkinematik und Umsetzung am Beispiel
der Flugzeuginspektion

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Christian Schlosser

aus
Hildesheim

2015

1. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl
Institut für Flugzeug-Produktionstechnik
Technische Universität Hamburg-Harburg

2. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter
Lehrstuhl für Produktionssysteme
Ruhr-Universität Bochum

Tag der mündlichen Prüfung:

18. Dezember 2015

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Produktionstechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg entstanden.

Meinen besonderen Dank möchte ich meinem Doktorvater Professor Thorsten Schüppstuhl für die hervorragende Betreuung meiner Promotion aussprechen. Vor allem danke ich ihm für den persönlichen und fachlichen Rat während meiner Zeit am Institut und die konstruktiven und kritischen Hinweise sowie die sehr guten wissenschaftlichen Arbeitsbedingungen und Freiheiten, die zum erfolgreichen Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ebenfalls möchte ich Professor Bernd Kuhlenkötter für die Betreuung meiner Arbeit als Zweitgutachter und Professor Dieter Krause für die Übernahme des Vorsitzes meiner Prüfungskommission danken.

Ein großer Dank geht an meine Kollegen vom Institut für Flugzeug-Produktionstechnik für die kreative Unterstützung, die Zusammenarbeit und die schöne gemeinsame Zeit. Matthias Höfener gilt dabei ein besonderer Dank für die konstruktiven Diskussionen und Anregungen bei der Konzeptentwicklung. Außerdem möchte ich mich ganz besonders bei Felix Jahn für die tatkräftige Unterstützung bei der Entwicklung und der praktischen Realisierung des Roboters bedanken.

Darüber hinaus möchte ich mich auch bei Stefan Mehler und Klaus Bräutigam von der Lufthansa Technik für die sehr gute Zusammenarbeit im Forschungsprojekt „Thermas“ bedanken, die durch ihre Ideen und ihren Einsatz die praktische Umsetzung des Roboters möglich gemacht haben.

Für das ausgiebige Korrekturlesen der Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bei Ilona Rumpf, Nina Schlosser, Anna-Lena Scherger und Denise Klose bedanken.

Ein besonderer Dank geht an meine Familie für die Unterstützung auf meinem bisherigen Lebensweg und besonders herzlich möchte ich mich bei meiner Frau Nina und meinen beiden Kindern Nele und Emil für den Rückhalt und das Verständnis bedanken, die das Anfertigen dieser Arbeit erst ermöglicht haben.

Hamburg, im Dezember 2015

Christian Schlosser

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivator: Produktivitätssteigerung	1
1.2	Motivator: Ergonomiegewinn.....	5
1.3	Hemmnisse der Automatisierung	6
1.4	Erarbeitung von Lösungsansätzen	10
2	Stand der Forschung und Wissenschaft	17
2.1	Ortsflexible Roboter in der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen.....	17
2.1.1	Abgrenzung zu Servicerobotern.....	19
2.1.2	Kategorie 1: Ortsflexibel – mobil – sich auf dem Werkstück bewegend	19
2.1.3	Kategorie 2: Ortsflexibel – mobil – sich auf dem Boden bewegend	25
2.1.4	Kategorie 3: Ortsflexibel – transportabel –auf dem Werkstück fixiert...	26
2.1.5	Kategorie 4: Ortsflexibel – transportabel – auf dem Boden fixiert.....	28
2.2	Kinematische Strukturen und Transformationen	30
2.2.1	Nomenklatur und Arten von Roboterstrukturen.....	30
2.2.2	Kinematische Transformationen (Vorwärts- und Rücktransformation) .	32
2.3	Singularitäten: Bestimmung und Vermeidung.....	37
2.3.1	Verfahren zur Annäherung an Singularitäten	39
2.4	Hybridkinematiken	40
2.5	Mechanische Auslegung von Robotern	42
2.6	Zielsetzung und Vorgehensweise	42
2.6.1	Abgrenzung zum Stand der Technik und Ableitung der Aufgabenstellung	42
2.6.2	Struktur der Arbeit	45
3	Kinematische Modellierung von mobilen Hybridkinematiken	47
3.1	Methodik zur Auswahl von Hybridmechanismen	47
3.1.1	Kopplungsmöglichkeiten der Teilmechanismen	47
3.1.2	Arbeitsraummodellierung.....	48
3.1.3	Entwicklung der kinematische Struktur einer mobilen Hybridkinematik	49
3.2	Kinematische Transformation von hybriden Strukturen.....	52
3.2.1	Modellbeschreibung.....	53
3.2.2	Lösung des direkten kinematischen Problems.....	54
3.2.3	Lösung des inversen kinematischen Problems	55
3.3	Onlineüberwachung singularitätsfreier Roboterbewegung.....	57
3.3.1	Verfahren zur Detektion einer Annäherung an singuläre Bereiche	57

3.3.2	Singularitätsfreier Arbeitsraum.....	61
3.3.3	Berechnung der Distanz einer Roboterpose zu singulären Bereichen.....	63
3.4	Geometrische Modellierung der mechanischen Struktur.....	66
3.4.1	Modellbeschreibung.....	66
3.4.2	Identifikation von relevanten räumlichen Orientierungen des Roboters.....	69
3.4.3	Definition und Beschreibung der verschiedenen Betriebszustände.....	70
3.4.4	Werkzeug zur Simulation der Antriebslasten für die Auslegung.....	73
3.4.5	Optimierung der Geometriegrößen zur Maximierung des Arbeitsraums.....	76
4	Praktische Validierung am Beispiel der Flugzeuginspektion.....	81
4.1	Hintergrund und Aufgabenstellung.....	81
4.2	Konstruktion des Demonstrators.....	85
4.3	Umsetzung der Robotersteuerung.....	89
4.3.1	Aufbau und Struktur der Werkzeugmaschinensteuerung.....	89
4.3.2	Implementierung der entwickelten Verfahren.....	91
4.3.3	Automatische Programmerstellung.....	92
4.3.4	Universelle Werkzeugschnittstelle.....	93
4.4	Praktische Erprobung und Validierung.....	94
4.4.1	Validierung der Kollisions- und Singularitätsvermeidung.....	95
4.4.2	Bestimmung und Optimierung der Positioniergenauigkeit.....	97
4.4.3	Funktionstests am Flugzeug.....	101
4.5	Reflektion der Ergebnisse.....	107
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	109
5.1	Zusammenfassung.....	109
5.2	Ausblick.....	110
6	Literaturverzeichnis.....	113
7	Abkürzungsverzeichnis.....	121
8	Formelzeichen.....	122
9	Abbildungsverzeichnis.....	124
10	Diagrammverzeichnis.....	127
11	Lebenslauf.....	128

1 Einleitung

Die Welt der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen wie beispielsweise Schiffen, Windkraftanlagen oder Flugzeugen ist im Umbruch. Bedingt durch die wachsende Nachfrage nach Produkten und Dienstleistungen in diesen Branchen, ist eine Steigerung der Produktivität notwendig. Während heutige Prozesse überwiegend durch manuelle Tätigkeiten geprägt sind, die sich nicht beliebig skalieren lassen, entsteht so ein zunehmender Bedarf an Prozessautomatisierung. Neben der Produktivitätssteigerung motiviert auch der demographische Wandel und damit die Forderung nach ergonomischen Arbeitsbedingungen die Automatisierung von nicht-ergonomischen Prozessen. Damit wird die Prozessautomatisierung ein wichtiger Faktor zur langfristigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit am globalen Markt.



Abbildung 1: Schiffbau [com15], Windkraftanlagenbau [dpa13], Flugzeugbau [Aer11]

1.1 Motivator: Produktivitätssteigerung

Der Bedarf nach Prozessautomatisierung zur Steigerung der Produktivität wird im Folgenden für drei Kernbranchen der Großstrukturproduktion und –instandhaltung untersucht. Diese sind die Luftfahrt, sowie der Windenergieanlagen- und Schiffbau.

Luftfahrt:

Nach einer Prognose des Airbus Konzerns wird die Zahl der Fluggäste von 2012 bis 2031 jährlich um 4,7% steigen. Das entspricht einer Verdoppelung des Luftverkehrs innerhalb von 20 Jahren [Bun14b]. In einer Marktstudie von Bombardier wird davon ausgegangen, dass vor allem der Markt für Mittelstreckenjets mit bis zu 150 Sitzplätzen stark wachsen wird. Bis 2034 sollen demnach 12700 solcher Maschinen mit einem Wert von knapp 50 Milliarden verkauft werden [dpRe15].

Auf Basis der heutigen Auftragslage ist die Produktion des europäischen Flugzeugbauers Airbus rechnerisch für die nächsten neun Jahr voll ausgelastet [dAa14]. Aufgrund der hohen Zahl an Bestellungen wurde beispielsweise die Produktionsrate für Flugzeuge vom Typ A320 in den letzten Jahren kontinuierlich gesteigert. Lag die Produktionsrate Ende 2010

noch bei 36 Flugzeugen pro Monat, sind 2014 bereits 42 Flugzeuge pro Monat ausgeliefert worden. Bis 2017 soll die Produktionsrate auf 50 Flugzeuge pro Monat erhöht werden. Die Nachfrage am Markt würde aber aktuell eine Rate von 60 Flugzeugen pro Monat rechtfertigen [Reu15a]. Allerdings stoßen die heutigen überwiegend manuellen Prozesse in der Fertigung von Flugzeugen zunehmend an ihre Grenzen [Reu15b]. In diesem Zusammenhang sagte Günther Butschek, damaliger Chief Operating Officer (COO) von Airbus, im Rahmen der Messe ILA 2014: “Zur Erreichung unserer künftigen Produktionsraten, aber auch zur Absicherung unserer Produktivitätsziele und zur Verbesserung der Ergonomie diskutieren wir intensiv weitere Möglichkeiten zur Automatisierung“ [Har14].

Auch der amerikanische Flugzeugbauer Boeing hat im Geschäftsjahr 2014 neue Rekorde hinsichtlich Auslieferungen und Gewinn erreicht. So lag der Gewinn 2014 mit 5.5 Milliarden US Dollar 19% über dem Wert von 2013. Die Auslieferungen sind im Jahr 2014 auf 723 Flugzeuge gestiegen und sollen 2015 auf 750 bis 755 Maschinen erhöht werden [dpa15a].

Betrachtet man den Umsatz der gesamten europäischen Luft- der Raumfahrtindustrie der letzten Jahre, so zeichnet sich auch hier ein kontinuierliches Wachstum ab (siehe Diagramm 1).

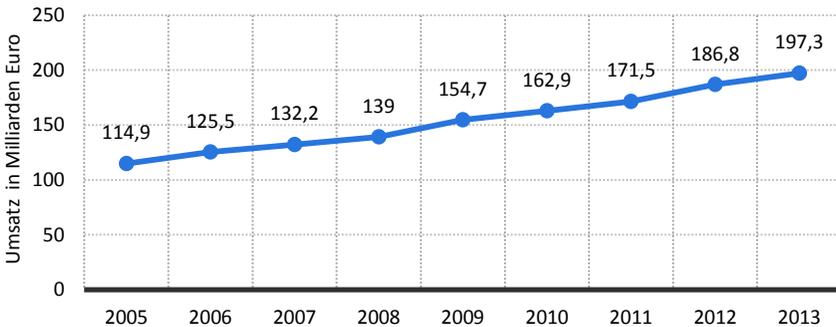


Diagramm 1: Umsatz der europäischen Luft- und Raumfahrtindustrie in den Jahren 2005 bis 2013 [ASD14]

Im Bereich der Flugzeugwartung (Maintenance, Repair and Overhaul - MRO) ist durch den Anstieg des Luftverkehrs auch eine deutliche Steigerung der Nachfrage zu verzeichnen. So stieg beispielsweise das operative Ergebnis der Lufthansa Technik AG in 2013 um 23% im Vergleich zum Vorjahr [Hen13]. Allerdings wird in dieser Branche durch das weltweit steigende MRO-Angebot auch der Preisdruck auf die Unternehmen verstärkt, und die Airlines fordern niedrigere Wartungskosten sowie kürzere Durchlaufzeiten, bei

gleichzeitiger Steigerung der Qualität. Diese Forderungen stellen Unternehmen der MRO-Branche vor die Herausforderung, effizientere und flexiblere Prozesse zu entwickeln und in die bestehende Betriebsstruktur zu integrieren [Kir13].

Schiffbau:

Die wirtschaftliche Lage deutscher Werften ist seit Jahren angespannt. Seit der Schifffahrtskrise 2009 sind die Aufträge weltweit erheblich gesunken. Der Weltmarkt hat sich zwar wieder leicht erholt, aber die deutsche Schiffsproduktion entwickelt sich, gemessen in CGT (Compensated Gross Ton), dazu allerdings nur schlecht. CGT ist das allgemein verbreitete Maß zum weltweiten Vergleich der Schiffsproduktion [Sco07]. Gemessen am Zuwachs des Auftragsvolumens ist die Entwicklung im Vergleich zum Weltmarkt aber sehr positiv zu beurteilen. Ausschlaggebend dafür ist die Verschiebung des Produktmix deutscher Werften, hin zu Spezialschiffen, Yachten und Marineschiffen, die bei der Bewertung in CGT ungenügend berücksichtigt werden (vgl. Diagramm 2) [JNM13].

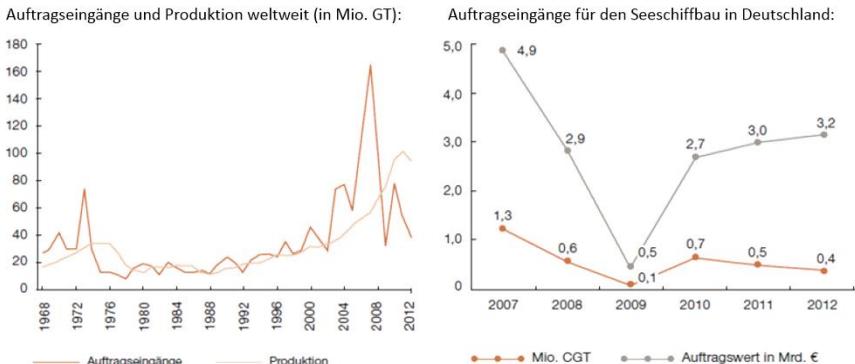


Diagramm 2: Auftragseingänge und Produktion weltweit und im Seeschiffbau in Deutschland [JNM13]

Durch diese strukturelle Anpassung haben sich viele Unternehmen an das schwierige Marktumfeld mit veränderten Marktverhältnissen angepasst. So können deutsche Werften in den oben genannten Segmenten durch ihre Technologieführung und Systemkompetenz ihre gute Marktposition ausbauen [Bun14c]. So ist beispielsweise die Produktion des deutschen Yachtbauers Lürssen auch trotz einer Erhöhung der Produktionskapazität bis 2017 ausgelastet [Sch15].

Gemessen an den Übernachtungsplätzen im Bereich der Kreuzfahrtschiffe führte 2013 die Meyer Werft den weltweiten Auftragsstand mit 43% an. Die italienische Staatswerft Fincantieri folgte mit 31%. Auch in dieser Branche zeigt sich ein deutliches Wachstum, besonders im europäischen und asiatischen Raum. Jedoch wird der Konkurrenzdruck durch

den stetigen Ausbau der Präsenz von asiatischen Unternehmen wie Mitsubishi Heavy oder STX verstärkt [Ola13].

Windenergieanlagenbau:

Der Windenergiesektor stellt im Vergleich zum Schiffs- und Flugzeugbau eine verhältnismäßig junge Branche mit großen Strukturen dar. Allerdings weist der Markt der Windenergieanlagen in den letzten 20 Jahren eine enorme Steigerung auf.

In Diagramm 3 ist die kumulierte Nennleistung der Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland seit 1995 darstellt. Aus diesem Diagramm geht eine kontinuierliche Steigerung der Nennleistung von über 3300% hervor.

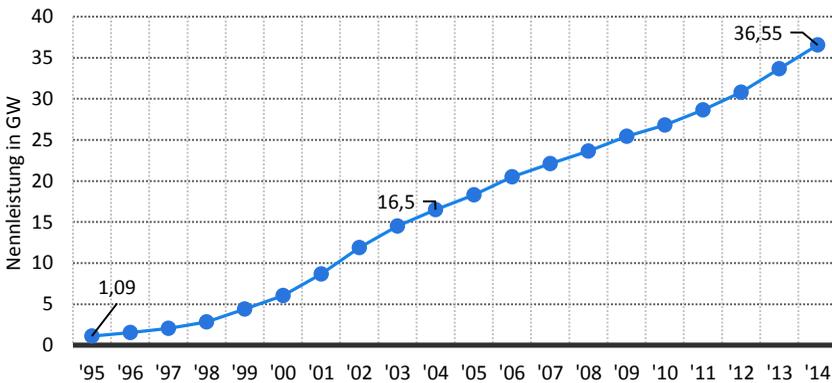


Diagramm 3: Kumulierte Nennleistung aller Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2014 [Win14]

Vergleicht man die Mitarbeiterzahlen, der Windenergiebranche in Deutschland, so stieg die Zahl der Beschäftigten von 25000 im Jahr 2000 auf 117900 im Jahr 2012 [Bun12]. Weltweit betrachtet zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei die Zuwachsraten lokal stark variieren. Die Zuwachsrate der gesamten installierten Windenergieleistung im Jahr 2014 liegt im weltweiten Mittel bei 16.2% [Wor15].

Land	Brasilien	Canada	China	Deutschland	USA	Italien
Zuwachs der Windenergieleistung	81.9 %	25.9%	25.7%	16.8%	7.8%	1.3%

Durch die steigende Anzahl an Windenergieanlagen steigt auch die Nachfrage nach Dienstleistungen der Wartung und Instandhaltung der Anlagen. So hat der Wartungsspezialist für Windenergieanlagen Deutsche Windtechnik AG seinen Jahresumsatz in 2014 um 38% gesteigert [IWR15].

Zusammenfassend ist in allen der exemplarisch vorgestellten Branchen sehr viel Potenzial und akuter Bedarf vorhanden, die Leistungsfähigkeit bestehender Prozesse zu verbessern. Durch bereits heute sehr ausgefeilte manuelle Prozesse und Abläufe bietet eine selektive Automatisierung die Chance einen deutlichen Produktivitätssprung zu realisieren.

1.2 Motivator: Ergonomiegewinn

Der zweite Motivator für eine Erhöhung des Automatisierungsgrads in der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen ist die Verbesserung der Arbeitsbedingungen durch eine ergonomische Arbeitsplatzgestaltung. Diese Forderung wird durch den demographischen Wandel und das steigende Alter der Arbeitnehmer (vgl. Diagramm 4) noch verstärkt. Dabei sind die grundlegenden Ziele der Ergonomie nicht nur humanitärer, sondern auch wirtschaftlicher Natur und begünstigen auf indirektem Wege auch die Produktivität. Aus wirtschaftlicher Sicht führen ergonomische Arbeitsbedingungen zu einer Verbesserung der Arbeitsergebnisse. Zum anderen bieten sie eine langfristige Sicherung der Arbeitskräfte und damit den Erhalt von Erfahrung im Unternehmen. Aus Sicht menschengerechter Arbeitsplatzgestaltung sollen Beschäftigte zu keiner Zeit einer Über- bzw. Unterforderung ausgesetzt werden. Das bedeutet, dass Arbeitsabläufe und Prozesse an den Menschen angepasst werden müssen und dabei eine gewisse Flexibilität hinsichtlich der individuellen Leistungsfähigkeit der Beschäftigten aufweisen müssen [Ber15].

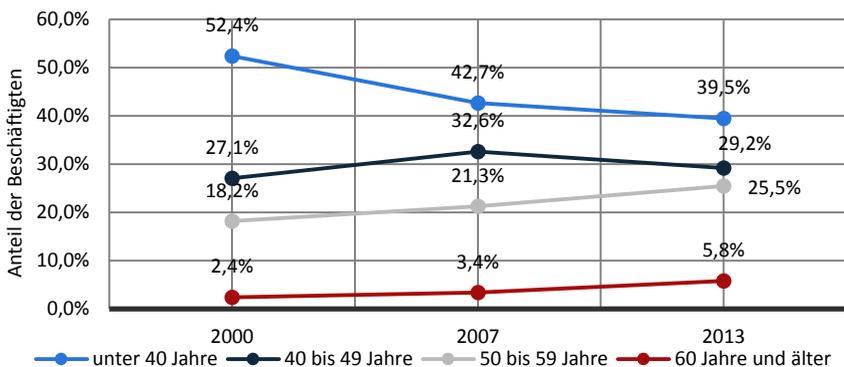


Diagramm 4: Altersstruktur der Beschäftigten in der Metall- und Elektroindustrie in Deutschland in den Jahren 2000, 2007 und 2013 [Bun14a]

Dabei umfasst die Ergonomie weit mehr als nur das Vermeiden von schweren, körperlichen Tätigkeiten. Aus arbeitswissenschaftlicher Sicht ist die Vermeidung von psychischer Beanspruchung ebenfalls ein wichtiger Aspekt eines ergonomischen Arbeitsumfeldes. In diesem Zusammenhang werden besonders die Faktoren des geringen Handlungsspielraums

in der Ausübung der Tätigkeit in Kombination mit einer geistigen Über- oder Unterforderung hervorgehoben. Eine Unterforderung entsteht häufig durch Monotonie, also Reizmangel, geringe intellektuelle Anforderungen, wenige Möglichkeiten der Kommunikation oder Bewegungsmangel [Ric00].

Im Kontext der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen bieten besonders Faktoren wie die Vermeidung von intellektueller Unterforderung durch monotone Tätigkeiten und das Arbeiten in ungünstiger Körperhaltung, wie beispielsweise die Arbeit über Kopf oder kniend, Ansatzpunkte für eine Automatisierung. Eine weitere Herausforderung wird in Zukunft auch das Finden von qualifizierten Mitarbeitern für die Produktion und Instandhaltung sein [Sho06]. Umso wichtiger ist es daher zielgerichtet, nicht-ergonomische Prozesse zu substituieren und die manuellen Tätigkeiten auf anspruchsvolle Aufgaben zu konzentrieren. So lässt sich darüber hinaus auch die Attraktivität der Unternehmen verbessern.

1.3 Hemmnisse der Automatisierung

Im Vergleich zu Branchen mit einem hohen Grad an Automation, wie zum Beispiel die Automotive- oder Elektronikindustrie, kommen in der Großstrukturproduktion und -instandhaltung viele Faktoren zusammen, die eine Automatisierung mit konventionellen Mitteln erschweren. Aus den typischen Produkteigenschaften dieser Branche lassen sich vier Faktoren ableiten, die den Kern der Herausforderung der Automatisierung bilden. Diese sind:

- große Bauteile
- kleine Losgrößen bei großer Variantenvielfalt
- große geometrische Toleranzen
- lange Produktlebenszyklen

Große Bauteile

Einer der größten Herausforderungen liegt in den Abmessungen der Bauteile selbst. Durch ihre Größe sind für Prozesse auch enorme Arbeitsräume notwendig. Diese überschreiten die Möglichkeiten von klassischen Komponenten der Prozessautomatisierung wie beispielsweise Industrierobotern oder Bearbeitungszentren um ein vielfaches. So müssen sowohl in der Produktion als auch in der Instandhaltung viele Meter in beliebige Raumrichtungen überbrückt werden. Durch die Form der Bauteile und begrenzte Zugänglichkeit der Zielpositionen ist es darüber hinaus vielfach nicht möglich, eine Automatisierung durch großskalierte Portalsysteme zu realisieren. Trotzdem bildet diese

Lösung den häufigsten Ansatz heutiger Systeme in dieser Branche und führt zu großen Sondermaschinen, die wenig flexibel und vor allem sehr kostenintensiv sind.

Neben der Größe der notwendigen Arbeitsräume kommt erschwerend hinzu, dass an den Bauteilen sowohl in der Produktion als auch in der Wartung und Instandhaltung gleichzeitig verschiedene Prozesse durchgeführt werden. Da bei einer Automatisierung auch manuelle Tätigkeiten parallel zu automatischen Prozessen ausgeführt werden, muss eine zuverlässige Absicherung der Menschen gewährleistet werden. Dabei besteht in der Regel keine Notwendigkeit einer direkten Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Aus Sicht der Maschinensicherheit führt aber die Anwesenheit von Menschen innerhalb des theoretisch erreichbaren Arbeitsraums einer Maschine zu Problemen, auch wenn diese aktuell nicht im Aufenthaltsbereich des Menschen arbeitet. Darüber hinaus werden für manuelle Prozesse vielfach Gerüste, Leitern oder Docks (siehe Abbildung 2) verwendet die den erreichbaren Arbeitsraum der Maschine weiter einschränken.



Abbildung 2: Typisches Arbeitsszenario in der Instandhaltung von Großstrukturen (links: Flugzeugwartung (Quelle: LHT), rechts: Reparatur eines Schiffs [See02])

Kleine Losgrößen bei großer Variantenvielfalt

Kleine Losgrößen und große Variantenvielfalt, welche in der Produktion und Instandhaltung von großen Strukturen üblich sind, stellen für klassische Automatisierungstechnik eine wirtschaftliche Herausforderung dar. Aufgrund der, im Vergleich zu anderen Branchen, geringen Produktionsraten muss sich ein Automatisierungssystem über viel weniger Produkte amortisieren. Aufgrund der hohen Kosten der Sondermaschinen lässt sich diese gegenüber der Handarbeit kurzfristig nicht wirtschaftlich darstellen [Fel11]. Hinsichtlich der typischen Randbedingungen der Produktion variieren allerdings sowohl die Produktionsraten, als auch die Variantenvielfalt um Größenordnungen. Im Schiffsbau sind beispielsweise die Produktionsraten mit wenigen Produkten pro Jahr am geringsten, bei gleichzeitig größter Variantenvielfalt, da nahezu jedes Schiff ein Unikat darstellt. Die Windkraftbranche hat mittlere Produktionsraten und die geringste Variantenvielfalt. Hier kann innerhalb einer Produktreihe von Serienfertigung gesprochen werden. Der Flugzeugbau hat verhältnismäßig kurze Produktionsraten von etwa

einem Flugzeug pro Tag bei Kurzstreckenflugzeugen und eine mittlere Variantenvielfalt in der grundlegenden Flugzeugstruktur. Bezieht man in die Betrachtung allerdings die Kabinausstattung mit ein, potenzieren sich die Varianten.

Große geometrische Toleranzen

Die Produkte sind aufgrund ihrer Größe und der geringen Reproduzierbarkeit von manuellen Prozessen geometrisch mit hohen Toleranzen behaftet. Dabei müssen hier nicht nur Toleranzen betrachtet werden, die aufgrund von Prozessungenauigkeiten entstehen, sondern auch solche die durch äußere Umgebungsbedingungen bedingt sind. Diese sind besonders problematisch, da sie zeitlich wechselnd und nur schwer vorhersagbar sind. Mögliche Einflussgrößen sind beispielsweise wechselnde Temperaturen oder verschiedene Beladungs- oder Betriebszustände der Produkte. So ändert sich beispielsweise bei einem Flugzeug vor und nach dem Betanken die Form und absolute Position von Rumpf und Flügeln um mehrere Zentimeter. Im Windkraftanlagenbau führen bis zu 75m lange Rotorblätter zu einer Längenänderung von etwa 7.5mm bei einer Temperaturänderung von 10K [Swi15].

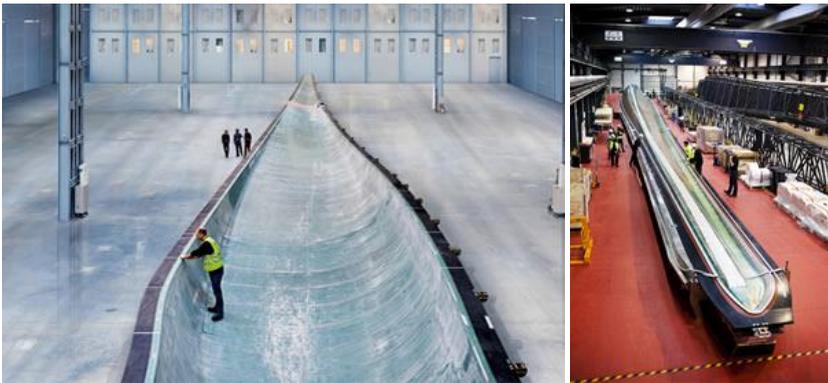


Abbildung 3: Flügel moderner Offshore Windkraftanlagen mit einer Länge von 75m [Sie12]

Diese Größenordnungen machen den Einsatz eines Automatisierungssystems mit festen Programmen nahezu unmöglich. Ein Automatisierungssystem muss daher in der Lage sein, diese Toleranzen dynamisch kompensieren zu können.

Lange Produktlebenszyklen

Ein weiterer Faktor als Hemmnis der Automatisierung ist der verhältnismäßig lange Lebenszyklus der Produkte, also die Zeit die zwischen dem Beginn der Entwicklung bis zu der Außerdienststellung der letzten Produkte vergeht. Verdeutlicht werden soll dies am Beispiel der Flugzeugproduktion (siehe Abbildung 4). Der Kern des Problems kann aber

auch auf die anderen Branchen übertragen werden.

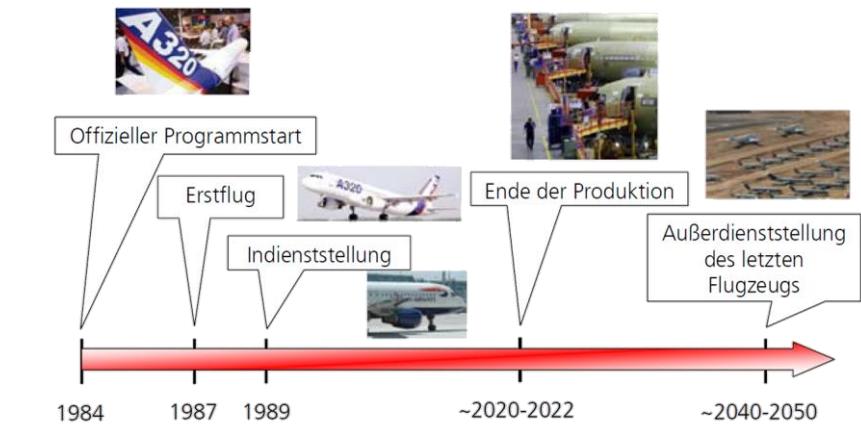


Abbildung 4: Produktlebenszyklus in der Luftfahrt am Beispiel des A320 [Deu09b]

Betrachtet man den Beginn der Entwicklung von einigen noch heute produzierten Passagierflugzeugen, so wird deutlich, dass die Planungsphasen in der Zeit der Einführung erster elektrischer Komponenten der Automatisierungstechnik stattgefunden haben.

Der Start des Boeing 737-Programms war im Jahre 1965, das Boeing 747-Programm begann im Jahr 1963 [Flu13]. Auch die Entwicklung des noch heute gebauten Airbus A320 wurde bereits im Jahr 1984 gestartet [Deu09b]. Diese langen Produktlebenszyklen stehen im Kontrast zu der schnellen Steigerung der Leistungsfähigkeit von Automatisierungssystemen. So mussten Prozesse über die langen Produktionszeiten immer wieder an den aktuellen Stand der Technik angepasst werden, um eine zeitgemäße Produktion zu gewährleisten. Bedingt durch die hohe Komplexität der Produkte und die gegenseitigen Abhängigkeiten der parallel laufenden Prozessketten, haben die Änderungen auch einen Einfluss auf die Produktionsorganisation der Verkettung und gestalten sich daher als aufwendig. Darüber hinaus liegen von den Produkten nur wenige bis keine digitalen Daten, wie beispielsweise CAD-Daten oder digitale Strukturpläne vor. Diese Informationen sind aber für eine Automatisierung notwendig. Die konservative Ausprägung des Flugzeugbaus und die gesetzlichen Vorgaben und Regularien in der Zulassung von Prozessen, führen dazu, dass auch Produktionsabläufe und -strukturen bei neuen Flugzeugen meist nur modifizierte Varianten bestehender Lösungen sind [Fel11].

1.4 Erarbeitung von Lösungsansätzen

Die im vorangehenden Kapitel beschriebene Notwendigkeit einer Produktivitätssteigerung durch Automatisierung von Prozessen und Verbesserung der Ergonomie in der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen wirft die Frage auf, mit welchen konkreten Mitteln dieses Ziel erreicht werden kann. Im Rahmen dieses Kapitels werden aus den identifizierten Hemmnissen konkrete Lösungsansätze abgeleitet und damit auch Anforderungen, die ein System erfüllen muss, um eine wirtschaftliche Automatisierung zu realisieren.

Große Produkte

Eine essentielle Anforderung an ein Automatisierungssystem für die Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen lässt sich aus der Größe der Produkte ableiten. Durch die enormen Abmessungen wird, im Vergleich zu klassischen Automatisierungsaufgaben, ein deutlich größerer Arbeitsbereich benötigt. Dies lässt sich entweder mit sehr großen stationären Maschinen oder ortsflexiblen Lösungen realisieren. In Abbildung 5 ist eine mögliche Lösungsstruktur für dieses Hemmnis dargestellt.

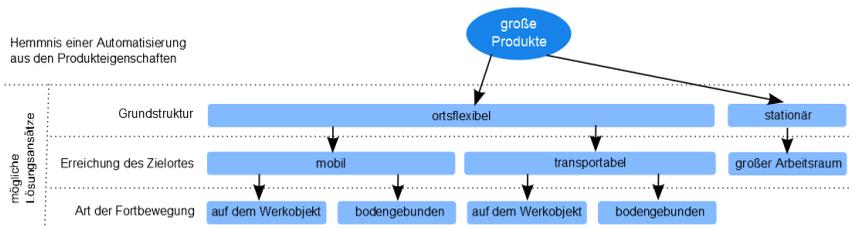


Abbildung 5: Lösungsstruktur zur Beherrschung des Automatisierungshemmnisses "große Produkte"

Bei den stationären Lösungen handelt es sich typischerweise um große Portalmaschinen. Diese sind so dimensioniert, dass die Bauteile oder zumindest die, für die Aufgabe relevanten Bereiche vollständig in den Arbeitsraum passen. So entstehen sehr große und damit auch sehr kostenintensive Maschinen. Besonders teuer werden diese Maschinen, wenn eine hohe Genauigkeit gefordert ist.

Alternativ kann eine Automatisierung auch mit ortsflexiblen Maschinen realisiert werden. Diese lassen sich dabei, je nachdem wie sie den Zielort erreichen, in mobile oder transportable Systeme unterteilen. Mobil bedeutet in diesem Kontext, dass eine selbstständige Fortbewegung der Maschine an eine Zielposition möglich ist. Transportabel bedeutet hingegen, dass ein System durch eine externe Einrichtung an eine Zielposition bewegt werden kann. Im Unterschied zu einer stationären Maschine kann ein transportables System, nach dem Erreichen der Zielposition, ohne aufwändige Inbetriebnahme Aufgaben ausführen. Dabei verfügt es über die entsprechenden Einrichtungen zur Referenzierung am

Bauteil bzw. der Umgebung. Der lokale Arbeitsraum eines transportablen Systems muss so groß bemessen sein, dass die vorgesehene Aufgabe ohne ein erneutes Positionieren ausgeführt werden kann.

Weiterhin lassen sich beide Arten von ortsflexiblen Systemen noch dahingehend differenzieren, ob sie sich auf dem Bauteil oder bodengebunden, um das Bauteil herum, bewegen. Aus diesen möglichen Lösungsansätzen ergeben sich daher vier Klassen von ortsflexiblen Maschinen, die im Rahmen der Aufarbeitung des Standes der Wissenschaft und Technik in Kapitel 3 vorgestellt werden. Stationäre Maschinen werden im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter betrachtet.

Kleine Losgröße

Hinsichtlich kleiner Losgrößen ist für einen wirtschaftlichen Einsatz ein hohes Maß an Flexibilität möglicher Aufgaben notwendig. Dies beinhaltet, wie nachfolgend dargestellt, sowohl eine Werkzeugflexibilität, als auch eine Flexibilität der möglichen Einsatzorte und der auszuführenden Programme.

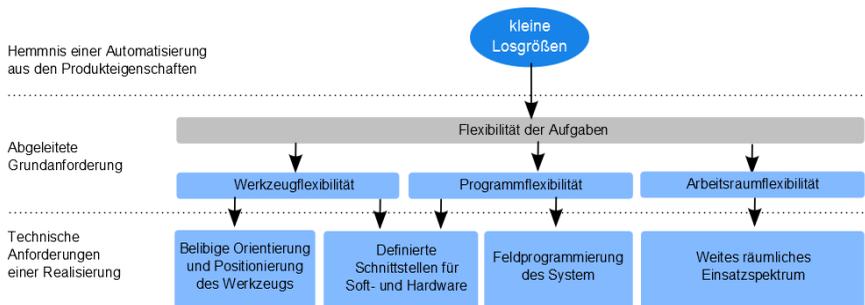


Abbildung 6: Lösungsstruktur zur Beherrschung des Automatisierungshemmnisses "kleine Losgrößen"

Die Anforderung an die Flexibilität stellt eine große Herausforderung dar, da sie sowohl die Hardware und Struktur der Maschine als auch die Softwarearchitektur beeinflusst. Eine der Kernanforderungen an eine flexible und damit universell einsetzbare Maschine ist die Definition von einheitlichen Schnittstellen der Soft- und Hardware. Durch die Softwareschnittstellen und eine einheitliche Programmierung werden die Erweiterung und kontinuierliche Optimierung der Software und die schnelle Programmgenerierung ermöglicht. Auch ist dies eine Grundvoraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz einer Software für die Offlineprogrammierung. Die definierten Hardwareschnittstellen bilden die Grundlage für den Einsatz von verschiedenen Werkzeugen. So müssen die mechanischen Anschlüsse und auch die Schnittstellen für die Energieversorgung und den Informationsaustausch vorhanden sein.

Hinsichtlich der Werkzeugflexibilität wird auch eine Anforderung an die möglichen Bewegungen der Maschine gestellt. Damit ein beliebiges Werkzeug gehandhabt werden kann, ist eine Positionierung und Orientierung des Werkzeugs in allen sechs Freiheitsgraden notwendig. Die Erhöhung der Freiheitsgrade einer Maschine steigert aber deutlich die Komplexität des Systems. In Bezug auf den Arbeitsraum der Maschine ergeben sich bei der Aufgabenflexibilität ähnliche Anforderungen wie bei den großen Strukturen. So führt die Arbeitsraumflexibilität auch zu der Forderung nach einem großen Arbeitsraum bzw. zu einem mobilen System, um mit der Maschine Aufgaben an verschiedenen Orten durchführen zu können.

Große geometrische Toleranzen

Die Inhärenz der geometrischen Toleranzen von Großstrukturbauteilen führt zur Notwendigkeit, dass ein Automatisierungssystem effizient auf geometrische Abweichungen reagieren kann. Dabei beziehen sich die Toleranzen nicht nur auf Gestaltsabweichungen die infolge von ungenauen Produktionsprozessen auftreten, sondern auch auf geometrische Veränderung der Gestalt, die im Laufe der Zeit durch unterschiedliche Betriebsbedingungen entstehen. Dazu muss ein Automatisierungssystem in der Lage sein, wie in Abbildung 7 dargestellt, sowohl Abweichungen zu erkennen und zu quantifizieren als auch eine Möglichkeit zu deren Kompensation besitzen.

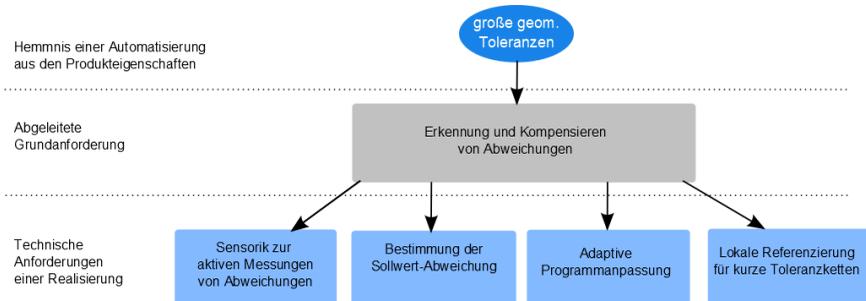


Abbildung 7: Lösungsstruktur zur Beherrschung des Automatisierungshemmnisses "große geometrische Toleranzen"

So ist für die Erkennung zum einen eine Sensorik für die Messung des Ist-Zustands zum anderen auch ein Verfahren für die effiziente Bestimmung der Abweichungen vom Soll-Zustand notwendig. Für die Kompensation der ermittelten Abweichungen müssen die Programme adaptiv angepasst werden können. Dazu müssen die Programme so erstellt sein, dass eine automatische Anpassung möglich ist. Dies ist durch entsprechende variable Parameter oder auch durch eine spezielle modulare Struktur, die je nach Ist-Zustand den Ablauf verändern kann, zu erreichen.

Darüber hinaus müssen Toleranzketten durch eine lokale Referenzierung an den Bauteilen minimiert werden. Das bedeutet, dass sich eine Maschine nicht an einem globalen Koordinatensystem referenziert, sondern immer möglichst nah an den entsprechenden Zielposen direkt am Bauteil. Dafür ist allerdings sowohl das Wissen über die Lage und Art von lokalen Merkmalen als auch ein Sensorsystem für die Detektion und Auswertung der Merkmalspositionen von Nöten.

Lange Produktlebenszyklen

Hinsichtlich der langen Produktlebenszyklen von Großstrukturprodukten muss ein Automatisierungssystem wandlungsfähig sein. Das bedeutet, dass das System auf Veränderungen hinsichtlich der Aufgaben und Einsatzorte reagieren kann, die zum Zeitpunkt der Entwicklung noch nicht absehbar sind. Dazu ist es notwendig, auch für Änderungen in der Arbeitsorganisation und Prozesstechnologie offen zu sein und weitere Funktionen und Fähigkeiten in das bestehende System integrieren zu können [NRA08]. Konkret sind also eine leichte Integration in bestehende Prozessketten und ein einfacher Austausch einer Maschine zu realisieren.

Für die einfache Integration in bestehende vorwiegend manuelle Prozessketten ist es wichtig, den Aufbau des Systems modular zu gestalten, um an die vorlaufenden und nachfolgenden Prozesse angepasste effiziente Automatisierung realisieren zu können. Dafür lassen sich idealerweise mit einem Automatisierungssystem granulare Aufgaben wirtschaftlich abbilden, um durch deren Kombination ein möglichst breites Anwendungsfeld abzudecken. Durch den modularen Aufbau lassen sich auch, entsprechend der Grundanforderung an ein wandlungsfähiges System, neue Funktionen und Fähigkeiten entwickeln und integrieren. Neben den internen Schnittstellen, sind für die Wandlungsfähigkeit definierte Prozessschnittstellen notwendig. Diese ermöglichen auch den Austausch des Systems, wenn die Grenzen der Wandlungsfähigkeit durch Änderungen überschritten werden.

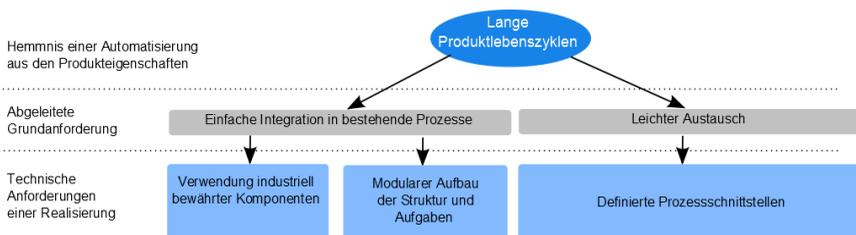


Abbildung 8: Lösungsstruktur zur Beherrschung des Automatisierungshemmnisses "Lange Produktlebenszyklen":

Für die einfache Integration in bestehende industrielle Arbeitsprozesse ist es außerdem vorteilhaft wenn die verwendeten Komponenten industriell verbreitet und bewährt sind. So lässt sich die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Systeme erhöhen und zum anderen die Ersatzteilbeschaffung vereinfachen.

Zusammenfassung

Fast man die erarbeiteten Lösungsansätze für die vorgestellten Hemmnisse einer Automation im Bereich der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen zusammen, so ergeben sich, wie in Abbildung 9 dargestellt, eine Vielzahl von technischen Anforderungen, die ein Automatisierungssystem erfüllen muss.

In DIN EN ISO 8373 [DIN14], dem Wörterbuch der Roboter und Robotikgeräte, werden die Eigenschaften der Begriffe aus dem Bereich der Robotik definiert. Nach diesen Definitionen wäre für die Erfüllung der erarbeiteten Anforderungen eine Kombination der Definitionen von „intelligent“, „mobiler Roboter“ und „Industrieroboter“ notwendig.

Ein „intelligenter mobiler Industrieroboter“ ist also ein automatisch gesteuerter, frei programmierbarer Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und in der Lage ist,

- Aufgaben durch Wahrnehmung seiner Umgebung und Anpassung seines Verhaltens auszuführen.
- sich unter eigener Kontrolle zu bewegen.

Der Faktor „intelligent“ basiert größtenteils auf Sensorik und Software und kann auch in bestehende Systeme integriert werden. Die Faktoren „mobil“ und „Industrieroboter“ hingegen ergeben sich aus der Struktur und dem mechanischen Aufbau der Maschinen und sind charakteristische Eigenschaften für die Erfüllung der Anforderungen der Produktion und Instandhaltung von großen Strukturen. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher der Fokus auf den kinematischen Aufbau und die mechanischen Strukturen von dieser Art von Maschinen gelegt.

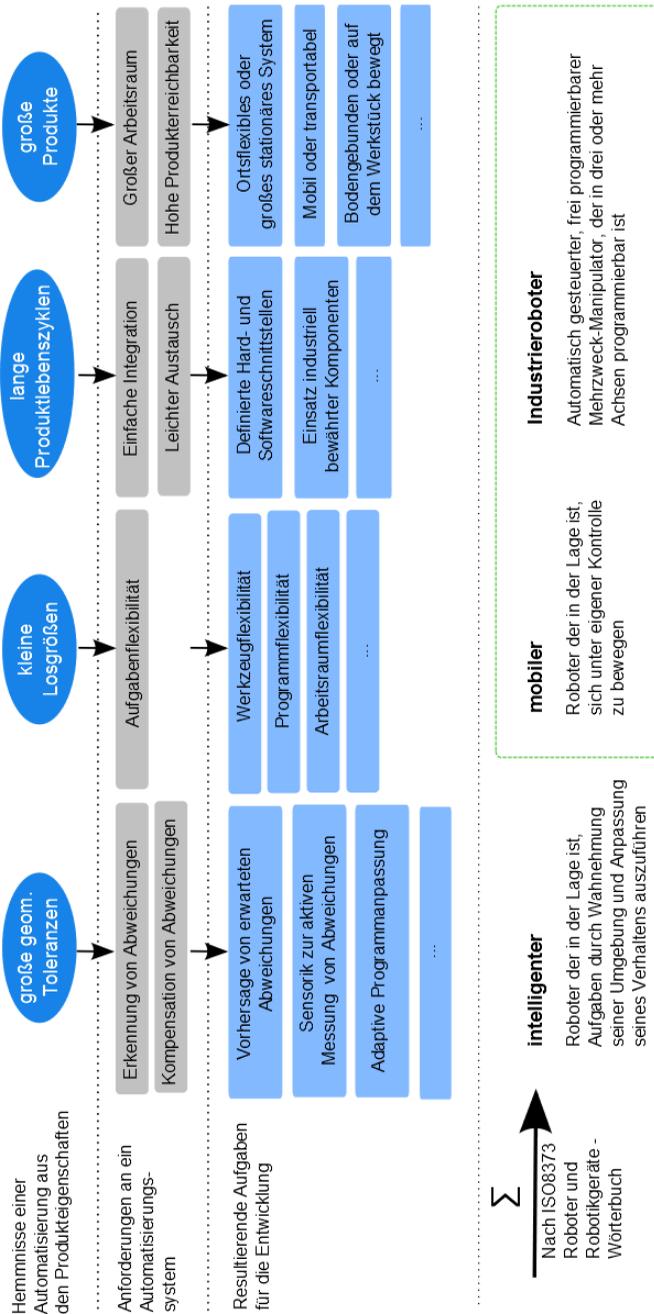


Abbildung 9: Zusammenfassende Anforderungsanalyse

2 Stand der Forschung und Wissenschaft

Im folgenden Kapitel werden der Stand der Wissenschaft und Technik von mobilen Robotern in der industriellen Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen erarbeitet und die theoretischen Grundlagen zur Beschreibung und Berechnung von kinematischen Strukturen vorgestellt. So wird der theoretische und praktische Wissensstand für die Ableitung der Aufgabenstellung dieser Dissertation geschaffen.

2.1 Ortsflexible Roboter in der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen

In diesem Unterkapitel werden mobile Roboterlösungen aus dem industriellen Umfeld für die Instandhaltung und Produktion von Großstrukturen vorgestellt und analysiert. Da es für die Strukturierung von mobilen Robotern keine allgemein gültige Systematik gibt, wird diese zunächst entwickelt. Es werden die Systeme entsprechend der Art der Fortbewegung in die, bei der Erarbeitung von Lösungsansätzen definierten vier Kategorien für ortsflexible Maschinen eingeteilt (siehe Abbildung 10). Stationäre Maschinen mit großen Arbeitsräumen werden in dieser Arbeit aufgrund des Fokus auf mobilen Systemen nicht weiter betrachtet. Aus kinematischer Sicht fallen auch schienenengebundene Maschinen mit transportablen Teilsystemen, wie das Projekt „GroFi“ des DLR [RöKr13], zu den stationären Lösungen.

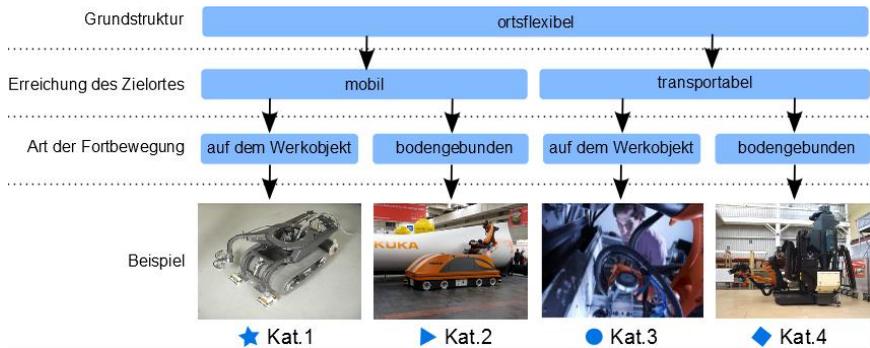


Abbildung 10: Gliederung von mobilen Robotern nach der Art der Fortbewegung

Es werden verfügbaren Systeme vorgestellt, die für den Kontext der Automatisierung im Bereich der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen relevant sind. Der Fokus liegt neben aktuellen Forschungsvorhaben auch auf einer Vorstellung von Industrielösungen, die den Stand der Technik repräsentieren. Im Rahmen der Betrachtung wird auch eine klare Abgrenzung zu reinen Servicerobotern erarbeitet.

Zur zeitlichen Einordnung der vorgestellten Systeme sind diese in Abbildung 11 chronologisch dargestellt. Betrachtet man die zeitliche Verteilung der entwickelten Systeme, so stellt man einen starken Anstieg in den letzten 10 Jahren fest. Dies ist zum einen auf die, in der Einleitung beschriebene Steigerung des Bedarfs nach Automatisierung zurückzuführen. Zum anderen werden solche komplexen Systeme erst durch die exponentiell steigende Leistungsfähigkeit von Rechenleistung wirtschaftlich realisierbar.

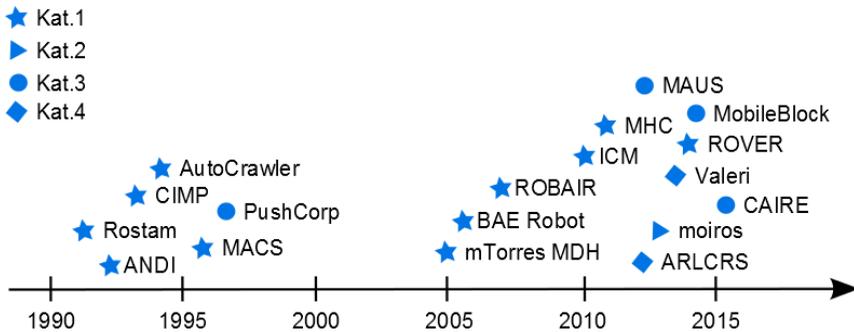


Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung von mobilen Systemen

Eine Ausnahme bilden hier allerdings eine Reihe von Robotern der Kategorie 1 die zwischen 1990 und 1997 für die Inspektion von Flugzeugen entwickelt worden sind. Diese Maschinen wurden im Rahmen des „National Aging Aircraft Research Program“ (NAARP) aus dem Jahre 1988 entwickelt [Fed91]. Dieses Forschungsprogramm der Flugsicherheitsbehörde der USA war die Reaktion auf eine Reihe von Flugzeugunfällen in den 1980er aufgrund von Materialermüdung bei Kurzstreckenflugzeugen. Der ausschlaggebende Zwischenfall ereignete sich 1988 bei Aloah Flug 243. Durch einen über 6 Meter langen Ermüdungsriß in der Außenhaut einer Boeing 737-200, in einer Flughöhe von 24000 Fuß, kam es zu einer Dekompression der Kabine, bei der ein Flugbegleiter ums Leben kam [Nat88]. Nach diesem Vorfall wurden durch den US-Kongress die Anforderungen an die Inspektion von Verkehrsflugzeugen stark erhöht. So wurden im Rahmen des NAARP erstmals automatische Inspektionsroboter und automatisierungsgerechte Sensoren entwickelt.

2.1.1 Abgrenzung zu Servicerobotern

Bei der Vorstellung des Stands der Wissenschaft und Technik von mobilen Robotern wird der große Bereich der Servicerobotik nicht betrachtet, da diese von der Konzeption einen grundlegend anderen Fokus haben und den Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration adressieren. Zur klaren Abgrenzung wird hier wie in Abschnitt 1.3 die DIN EN ISO 8373 zur Definition der Serviceroboter verwendet. Darunter fallen demnach alle Roboter, die nützliche Aufgaben für Menschen, die Gesellschaft oder Einrichtungen verrichten, mit Ausnahme von Anwendungen in der industriellen Automatisierung [DIN14].



Abbildung 12: DESIRE (Deutsche Servicerobotik Initiative), Car-O-Bot 4 Fraunhofer IPA

2.1.2 Kategorie 1: Ortsflexibel – mobil – sich auf dem Werkstück bewegend

Mobile Roboter, die sich auf einem Bauteil fortbewegen und sich aus eigener Kraft daran festhalten können, werden auch als Kletterroboter bezeichnet. Diese Gruppe von Maschinen bildet die größte Zahl an relevanten Systemen in der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen. Je nach Art der Fortbewegung lassen sich die Roboter noch in kontinuierlich oder schrittweise bewegte Maschinen unterscheiden. Dabei ergibt sich die Art der Fortbewegung aus den Anforderungen an Geschwindigkeit, Genauigkeit und der relativen Traglast. So ermöglichen kontinuierlich bewegte Roboter deutlich höhere Bewegungsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig geringerer Traglast und Bewegungsgenauigkeit. Der gewählte oder notwendige Haftmechanismus spielt bei der Bewegungsart nur eine untergeordnete Rolle, da sich prinzipiell alle praktisch relevanten Haftmechanismen als kontinuierliche und schrittweise wirksame Befestigungen realisieren lassen. Bei den möglichen Einsatzszenarien dagegen hat der Haftmechanismus einen sehr großen Einfluss. So legt die Oberfläche bzw. das Material des zu begehenden Bauteils typischerweise den Haftmechanismus bereits fest.

„Automated NonDestructive Inspektor“ (ANDI)

Der Roboter ANDI ist der älteste Inspektionsroboter für Flugzeuge und ist im Rahmen des „National Aging Aircraft Research Program“ entwickelt worden [ACK98]. Der Roboter ist dafür konzipiert, Rissinspektionen mittels Wirbelstromsonden auf dem Flugzeugrumpf durchzuführen. Die mechanische Struktur dieses Roboters besteht aus einem T-förmigen Grundgestell, auf das zwei bewegliche Brücken aufgesetzt sind. Jede dieser Brücken hat drei Freiheitsgrade und ermöglicht eine ebene Translation auf Basis von zwei Linearantrieben und eine senkrecht auf dieser Ebene stehende Drehung. So ist diese Maschine in der Lage sich schrittweise auf der Flugzeugoberfläche fortzubewegen. Als Haftmechanismus werden hier Vakuumsaugfüße verwendet, die an den beweglichen Brücken über Pneumatikzylinder angehoben werden können. So kann zwischen der Fortbewegung und einer Sensorpositionierung umgeschaltet werden.

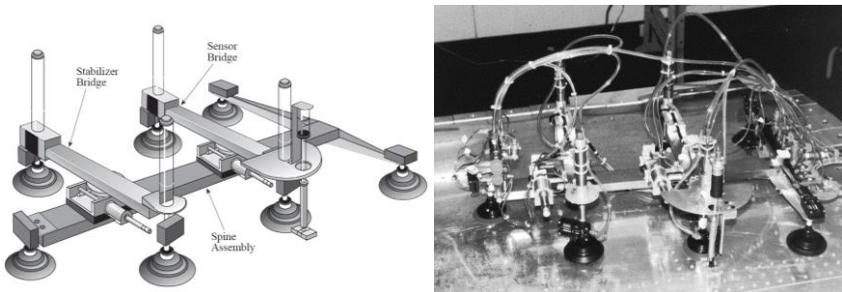


Abbildung 13: „Automated NonDestructive Inspektor“ ANDI [ACK98, SKA93]

Der Wirbelstromsensor für die Inspektion ist bei diesem Roboter an der mittleren Brücke befestigt und wird ebenfalls über einen pneumatisch angetriebenen Aktuator auf die Oberfläche gedrückt und kann durch das Verschieben der Brücke bewegt werden.

„Crown Inspection Mobile Plattform“ (CIMP)

Der zweite Roboter, der im Rahmen des „National Aging Aircraft Research Program“ entwickelt worden ist, heißt CIMP und ist speziell für die visuelle Inspektion des oberen Bereichs des Flugzeugrumpfs, der sogenannten Crown Area, entwickelt worden [SGP98]. Diese Maschine bewegt sich zwar auf dem Bauteil, wird aber nur durch die Schwerkraft auf diesem gehalten. Somit ist CIMP formal kein Kletterroboter.

Der strukturelle Aufbau des Roboters besteht aus einem angetriebenen, rollbaren Bügel für die Fortbewegung entlang der Rumpfachse sowie eine Linearführung mit gebogenen Führungen, an der die Inspektionseinheit befestigt ist. Diese Inspektionseinheit liegt auf Rollen auf der Oberfläche auf und beinhaltet eine stereoskopische Kamera, die über den Rumpf geführt wird. Durch den einfachen Aufbau ist der Energieverbrauch des Roboters

signifikant kleiner als bei kletternden Robotern, sodass ein mehrstündiger Betrieb mit integrierten Akkus möglich ist.



Abbildung 14: „Crown Inspection Mobile Platform“ CIMP [SGP98]

„AutoCrawler“

Der Roboter AutoCrawler ist ein kontinuierlich bewegter Kletterroboter, der in Zusammenarbeit von AutoCrawler LLC und Boeing entwickelt worden ist [SGP98]. Die Maschine besitzt für die Fortbewegung zwei mit Vakuumsaugfüßen bestückte Ketten. Dieser Aufbau ermöglicht dem Roboter durch unterschiedlich schnelle Kettenbewegung eine beliebige ebene Bewegung mit zwei translatorischen und einem rotatorische Freiheitsgrad. Für die Umorientierung mit zwei Ketten ist allerdings Schlupf zwischen den Ketten und der Oberfläche notwendig, was sich negativ auf die Genauigkeit der Bewegung auswirkt.



Abbildung 15: „AutoCrawler“ [SGP98]

Durch eine spezielle Anordnung von passiv gesteuerten Ventilen, werden nur die Saugfüße mit Unterdruck versorgt, die Kontakt zur Oberfläche haben. Der AutoCrawler ist durch das Bewegungsprinzip in der Lage sich sehr schnell fortzubewegen und kann hohe Lasten tragen. Beide Angaben sind aber nicht näher spezifiziert.

„BAE Robot“

Der von BAE-Systems entwickelte Roboter ist in der Lage, sich kontinuierlich auf Flugzeugstrukturen fortzubewegen. Dazu nutzt die Maschine große flächige Vakuumsaugfüße, die aufgrund der teildurchlässigen Dichtung und einem definierten Spalt prinzipbedingt nur einen geringen Unterdruck für die Haftung zur Verfügung haben. Dafür wird aber eine Bewegung in angesaugtem Zustand ermöglicht. Diese Art des Haftmechanismus wird auch als „inverted hovercraft“ bezeichnet [Whi05]. Der notwendige Volumenstrom für die Vakuumerzeugung wird durch eine bodengebundene mehrstufige Flügelzellenpumpe erreicht.

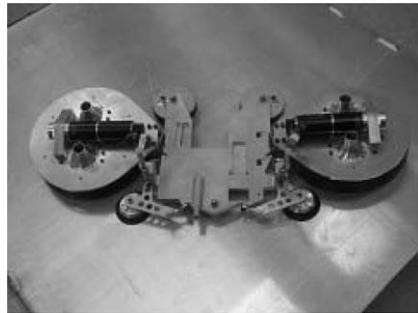


Abbildung 16: BAE-Systems Roboter [Whi05]

Die eigentliche Bewegung des Roboters wird durch zwei Rollen realisiert, die jeweils in den beiden Hauptkammern angebracht sind. Dieser Aufbau ermöglicht es dem Roboter, sich in beliebiger Richtung auf der Oberfläche zu bewegen und zu orientieren.

„RobAir“

Das Projekt „RobAir“ ist ein EU-Förderprojekt, das im Rahmen des fünften Rahmenprogramms gefördert worden ist [Buc10]. Der Roboter wurde in diesem Projekt durch die London South Bank University entwickelt. Das Besondere an dieser Maschine ist der kinematische Aufbau. So verfügt sie über zwei senkrecht zueinander angeordnete pneumatische Zylinderpaare. Durch diese lassen sich zwei Rahmen in festen Schritten in beliebige Richtungen in der Ebene bewegen. Eine zusätzliche elektrische Rotationsachse ermöglicht eine geringe Winkelkorrektur der Bewegung [SSC07].

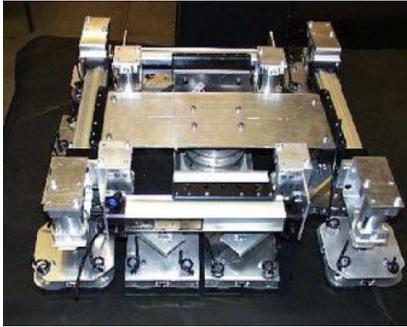


Abbildung 17: RobAir Robot [SSC07]

Als Haftmechanismus kommen Vakuumsaugfüße zum Einsatz. Diese sind zur besseren Formanpassung sehr klein dimensioniert und in mechanisch stabilen Vierergruppen, als Erweiterung der klassischen Dreipunktauflage, angeordnet [SSC07].

mTorres „Flexible Drilling Head“ (FDH)

Der von mTorres entwickelte Roboter “Flexible Drilling Head” ist für das Bohren von Nietlöchern konzipiert worden [MCF10]. Der Roboter wird im Airbuswerk in Finkenwerder aktuell dazu eingesetzt, um bei Flugzeugen vom Typ A380 Nietlöcher des Quernahtstoßes am Rumpf zu bohren. Als Haftmechanismus kommen bei diesem Roboter Vakuumsaugfüße zum Einsatz. Das Vakuum wird durch Ejektoren an jedem Saugfuß aus zentral zugeführter Druckluft realisiert.

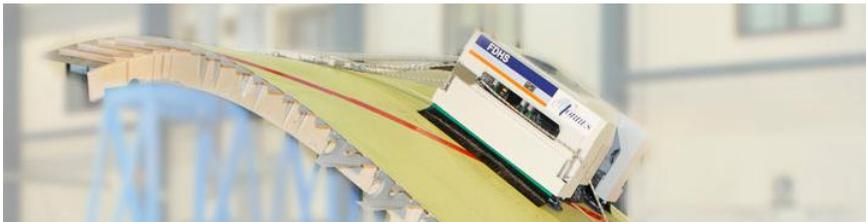


Abbildung 18: mTorres – „Flexible Drilling Head“ [mTo15]

Von der kinematischen Struktur her ist diese Maschine ein Rahmenroboter mit zwei relativ zueinander verschiebbaren Rahmen. Die daraus resultierende schrittweise Bewegung ist in einer linearen Hauptachse möglich. Der Krümmungsausgleich in radialer Richtung sowie der Wechsel zwischen den Rahmen werden durch eine lineare Verschiebung der Vakuumsaugfüße erreicht. Die Maschine ist auch in der Lage, geringe Winkelkorrekturen im Bereich von wenigen Grad auszuführen. So lässt sich beispielsweise die nicht ideal zylindrische Form des Rumpfes bei der Fortbewegung kompensieren.

Für die Bearbeitung ist am inneren Rahmen auf dem Roboter eine zusätzliche hochgenaue Bewegungseinrichtung mit drei translatorischen Freiheitsgraden für die Werkzeugpositionierung integriert. Strukturell entspricht der Aufbau einer klassischen Werkzeugmaschine. Die beiden notwendigen Rotationsachsen für die 5-Achsbearbeitung werden über ein Ankippen der gesamten Maschine realisiert.

„Remotely Operated Vacuum Enabled Robot“ (ROVER)

Der mobile Roboter ROVER der Firma Boeing ist für die Inspektion des Flugzeugumpfes und der Flügeloberseite entwickelt worden. Die Maschine kann sich dabei ähnlich des BAE-Roboters durch dynamisches Vakuum an der Oberfläche halten. Darüber hinaus besitzt sie vier Mecanum-Räder, die eine omnidirektionale Fortbewegung ermöglichen. Als Antriebe kommen Schrittmotoren zum Einsatz, die über eine kombinierte Sicherheitsleine und Kabelführung mit Energie versorgt werden [Geo13].

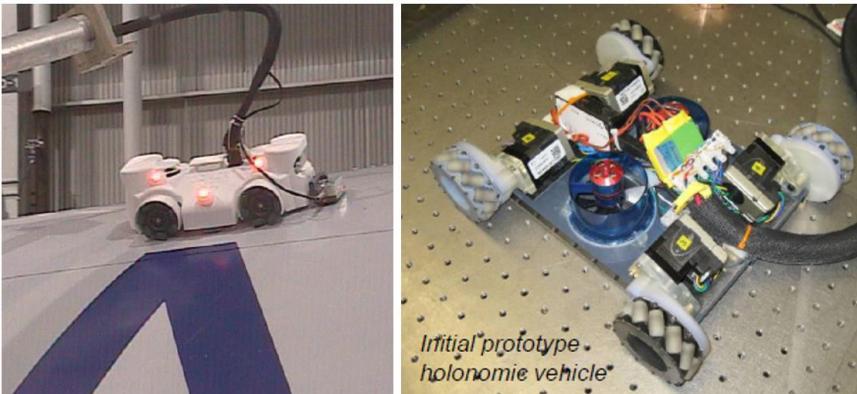


Abbildung 19: Boeing "Remotely Operated Vacuum Enabled Robot" ROVER [Geo13]

Weitere Robotersysteme

Darüber hinaus existieren noch weitere relevante Robotersysteme, die aber nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden. Hier sind die Inspektionsplattform „Multifunction Automated Crawling System“ MACS des California Institute of Technology [BaBa00], der Schweißroboter REST des Spanish National Research Council [Gon13] und der Inspektionsroboter „Mobile Robotic Scanner“ MRS der Firma Alstom Inspection Robotics aus der Schweiz [Als15] zu nennen.



Abbildung 20: links: „Multifunction Automated Crawling System“ - MACS [BaBa00], mitte: REST [Gon13], rechts: „Mobile Robotic Scanner“ - MRS [Bog10]

Dazu kommen noch zwei relevante Maschinen, die aktuell in der Inspektion von Großstrukturen zum Einsatz kommen, formal aber nicht zu den Robotern zählen, da sie sich nicht programmgesteuert sondern ferngesteuert bewegen. Dies sind der „Magnetic Hull Crawler“ MHC der Firma Cybernetix aus Frankreich für die Inspektion von ferromagnetischen Schiffsrümpfen [Cyb11] sowie die kontinuierlich bewegte Inspektionsplattform „The Climber“ der Firma International Climbing Machines aus den USA [Gil10].



Abbildung 21: links: Magnetic Hull Crawler (MHC) [Cyb11], rechts: The Climber [Gil10]

2.1.3 Kategorie 2: Ortsflexibel – mobil – sich auf dem Boden bewegend

Die zweite Kategorie umfasst Roboter, die sich selbstständig auf dem Boden um das Bauteil herum bewegen können. Für den industriellen Einsatz sind in diesem Zusammenhang zwei Systeme aktuell relevant. Zum einen ist es das „moiros“-Projekt der Firma Kuka [Kuk13], zum anderen der Roboter OmniRob aus dem durch die europäische Union geförderten Projekt „Valeri“ [Fra12]. Beide Maschinen basieren auf einer mobilen Plattform mit Mecanum-Rädern für die omnidirektionale ebene Bewegung mit einem aufgesetzten Vertikal-Knickarm-Roboter an dem das Werkzeug befestigt ist. Die beiden Projekte

verfolgen allerdings grundsätzlich unterschiedliche Ansätze hinsichtlich des Aufgabenspektrums. Während der Roboter des Moiros-Projekts als Bearbeitungsmaschine für das Schleifen von Rotorblättern entwickelt wurde, ist die Roboterplattform aus dem Projekt „Valeri“ für die Mensch-Roboter-Kooperation in der Großstrukturproduktion konzipiert.

Das Einmessen der Roboterplattformen erfolgt bei beiden Systemen über Lasersensoren an der Umgebung. Im Projekt „moiros“ wird so eine Positioniergenauigkeit der Plattform in der Ebene von bis zu $\pm 5\text{mm}$ erreicht [Kuk13]. Diese Genauigkeit ist für anschließende Prozesse nicht ausreichend, sodass sich das Werkzeug am Bauteil referenzieren muss.



Abbildung 22: links: Kuka „moiros“ [Kuk13], rechts: OmniRob [Sae15]

Ein wesentlicher Vorteil dieser Art von Maschinen ist, dass sie aus Standardkomponenten zusammengesetzt werden können und in der Lage sind, auch sehr große und schwere Werkzeuge zu tragen. Der mögliche Arbeitsraum ist allerdings durch die Reichweite des Roboterarms und durch die Zugänglichkeit für die Plattform beschränkt.

2.1.4 Kategorie 3: Ortsflexibel – transportabel – auf dem Werkstück fixiert

Die dritte Kategorie umfasst Maschinen, die transportabel sind und direkt auf dem Bauteil befestigt werden. In dieser Kategorie sind vornehmlich Systeme für die Bearbeitung von Oberflächen zu finden. Diese Prozesse erfordern eine sehr hohe Genauigkeit bei gleichzeitig lokal eingeschränktem Arbeitsraum.

Aktuell gibt es drei relevante Systeme für die mechanische Oberflächenbearbeitung. Die älteste Maschine dieser Kategorie ist das kommerzielle "Scarfig Tool for Automated Repair" STARC der Firma PushCorp [ErGo95]. Dieses System ist von der kinematischen Struktur eine Steward-Gough-Plattform, die mittels Vakuum an der Oberfläche befestigt

werden kann. Diese Kinematik besitzt 6 Freiheitsgrade und ist mit einer Frässpindel für die Bearbeitung ausgestattet.

Das zweite System ist ebenfalls ein kommerzielles Produkt. Es ist von der Firma DMG-Mori und heißt „MobileBlock“ [Feu15]. Vom Aufbau her entspricht diese Maschine einer klassischen 5-Achs-Fräsmaschine mit integrierter Ultraschallspindel. Zur Befestigung auf dem Bauteil werden in diesem Fall 12 bzw. 16 Vakuumsaugfüße verwendet. Diese sind für die Anpassung an gekrümmte Oberflächen einzeln verstellbar.



Abbildung 23: links: PushCorp "Scarfing Tool for Automated Repair" STARC [ErGo95], rechts: DMG Mori „MobileBlock“ [Feu15]

Die dritte relevante Maschine dieser Kategorie ist im Forschungsprojekt „Caire“ am Institut für Flugzeug-Produktionstechnik in Zusammenarbeit mit der Lufthansa Technik AG entwickelt worden [HöSc14b]. Dieses System basiert auf einem Industrieroboter, der sich mittels Vakuumsaugfüßen auf dem Bauteil befestigen lässt und mit einer Frässpindel ausgestattet ist. Durch den seriellen Aufbau des Roboters erreicht diese Maschine einen sehr großen Arbeitsraum in Bezug auf die Maschinengröße. Die geringere Steifigkeit im Vergleich zu kartesischen Maschinen wird durch eine Onlinekompensation auf Basis der Prozesskräfte minimiert [HöSc14a].

Darüber hinaus existiert auch eine Maschine für die Oberflächeninspektion, welche dieser Kategorie angehört. Das von Boeing entwickelte Gerät heißt „Mobile Automated Scanner“ MAUS und ist ein mit Vakuumsaugfüßen auf dem Flugzeugrumpf befestigtes System. Der Sensor zur Inspektion der Rumpfoberfläche wird über Linearachsen in drei Raumrichtungen realisiert [Geo13]

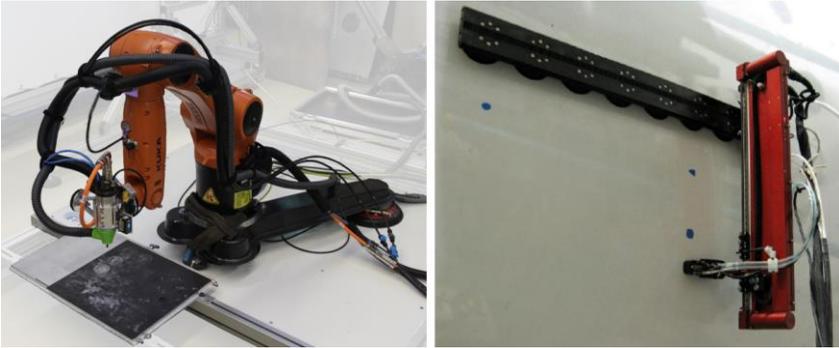


Abbildung 24: links: Industrieroboterbasiertes CFK-Bearbeitungssystem "CAIRE" [HöSc14b], rechts: Boeing „Mobile Automated Scanner“ "MAUS" [Geo13]

2.1.5 Kategorie 4: Ortsflexibel – transportabel – auf dem Boden fixiert

In die vierte Kategorie fallen Maschinen die transportabel sind, aber neben dem Bauteil auf dem Boden fixiert werden. In dieser Kategorie gibt es aktuell nur zwei für die Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen relevante Systeme.

Im Rahmen des am National Robotic Engineering Center der Carnegie Mellon University durchgeführten Projekt mit dem Namen „Laser Coating Removal for Aircraft“ wurde eine Maschine für das automatisierte Entschichten von Flugzeugen entwickelt [Nat13]. Vom kinematischen Aufbau her ist das System eine manuell verschiebbare Plattform mit einer vertikalen Linearachse auf die ein Industrieroboter gesetzt wurde. Durch diesen Aufbau kann die Reichweite des Roboters deutlich erhöht werden und bietet durch die entstehende kinematische Redundanz einen größeren Arbeitsraum in nicht direkt zugängliche Bereiche des Flugzeugs.



Abbildung 25: LCR-Systems "Laser Coating Removal for Aircraft" [LCRI4]

Das zweite System ist das ehemalige Produkt Skywash der Firma Putzmeister. Diese Maschine wurde konzipiert, um Passagierflugzeuge zu reinigen. Es besteht aus einer transportablen Plattform auf der eine serielle Kinematik mit insgesamt zehn Achsen für die Handhabung der Waschbürste montiert ist. Insgesamt verfügt das System über eine Reichweite von 30 m und ist so auch in der Lage, große Flugzeuge vom Typ B-747 zu reinigen [Put88].



Abbildung 26: Putzmeister SkyWash [Put88]

Die Programmierung der Maschine erfolgt Offline für jeden Flugzeugtypen. Für die Anpassung der Roboterbahn an die tatsächliche Flugzeugkontur sind an der Waschbürste Abstandssensoren vorhanden.

2.2 Kinematische Strukturen und Transformationen

Die kinematische Struktur charakterisiert maßgeblich die Eigenschaften eines bewegten Systems und bildet die Grundlage für die mathematische Beschreibung der Bewegung. In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst die Nomenklatur zur einheitlichen Bezeichnung von Roboterstrukturen und die verschiedenen grundsätzlichen Arten und Aufbauten vorgestellt. Darauf aufbauend werden Verfahren zur Berechnung der kinematischen Transformationen, als Grundlage der mathematischen Beschreibung der Bewegung eines Mechanismus, ausgeführt. Abschließend werden aktuelle Methoden und Ansätze zur Erkennung und Vermeidung von Singularitäten vorgestellt.

2.2.1 Nomenklatur und Arten von Roboterstrukturen

Die Grundlage zur Modellierung und Beschreibung des kinematischen Verhaltens von Roboterstrukturen bildet die sogenannte kinematische Kette des Mechanismus. Eine kinematische Kette ist eine Abfolge von Gelenken und starren Verbindungselementen (Gliedern). Ein Mechanismus besteht aus einer kinematischen Kette, die eine definierte feste Basis hat. Aus der Art der kinematischen Kette lassen sich die beiden elementaren Strukturen von Mechanismen ableiten. Diese sind in Abbildung 27 (links und Mitte) dargestellt. Ein Mechanismus mit einer offenen kinematischen Kette besitzt eine serielle Struktur. Verfügt ein Mechanismus über eine oder mehrere geschlossene kinematische Ketten, so hat dieser eine parallele Struktur [KePi98]. Hybride Strukturen (Abbildung 27, rechts) sind eine Kombination aus den elementaren Strukturen und bestehen aus einer seriellen Kopplung von mehreren parallelen Mechanismen.

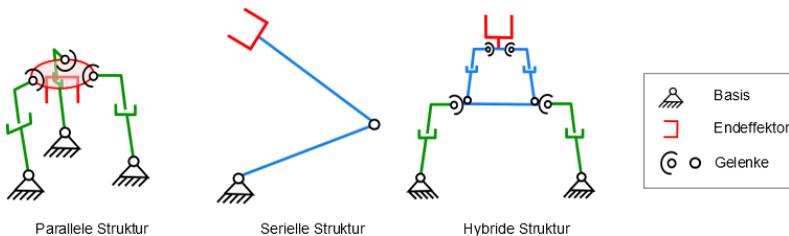


Abbildung 27: Elementare Roboterstrukturen

Aus der Art der Gelenke und deren Anordnung in der kinematischen Kette entstehen für den jeweiligen Mechanismus charakteristische Freiheitsgrade der Bewegung. Als Freiheitsgrad wird nach DIN EN ISO 8373 eine unabhängige Bewegung gegenüber einem Koordinatensystem bezeichnet [DIN14]. Diese Freiheitsgrade lassen sich im kartesischen Raum in translatorische, entlang der Koordinatenachsen, und in rotatorische, um die Koordinatenachsen drehende, Freiheitsgrade unterteilen. Ein Körper kann also maximal drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade besitzen.

Die Gelenke eines Mechanismus, die eine Rotation zulassen, werden je nach Anzahl der möglichen Freiheitsgrade als Dreh- (ein Freiheitsgrad), Kardan- (zwei Freiheitsgrade) oder Kugelgelenk (drei Freiheitsgrade) bezeichnet. Bei den Gelenken für translatorische Bewegung werden typischerweise Schubgelenke mit einem Freiheitsgrad verwendet. In der nachfolgenden Tabelle sind die Gelenkarten mit den jeweiligen Abkürzungen zusammengefasst [Mer06].

Abk.	Engl. Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung	Anzahl der Freiheitsgrade
R	Rotational Joint	Drehgelenk	1 rotatorischer Freiheitsgrad
P	Prismatic Joint	Schubgelenk	1 translatorischer Freiheitsgrad
U	Universal Joint	Kardangeln	2 rotatorische Freiheitsgrade
S	Spherical Joint	Kugelgelenk	3 rotatorische Freiheitsgrade

Tabelle 1: Gelenkarten von kinematischen Strukturen

Zur Beschreibung von Mechanismen wird häufig die Struktur der kinematischen Kette verwendet. Dies vereinfacht die Beschreibung besonders bei parallelkinematischen Maschinen und lässt sich auch auf seriell kinematische Maschinen übertragen. So lässt sich die Struktur durch die englischen Abkürzungen der Gelenkfolge von der Basis zum Endeffektor beschreiben. Angetriebene Gelenke werden dabei unterstrichen. Die Anzahl der parallelen kinematischen Ketten wird als Präfix mit einem Bindestrich vorangestellt. So beschreibt ein Mechanismus vom Typ 1-RRRRRR einen typischen Vertikal-Knickarm-Roboter mit sechs seriell angeordneten, angetriebenen Drehgelenken. Ein Mechanismus vom Typ 3-UPU besteht aus drei parallelen Ketten, die jeweils aus einem Kardan-, einem angetriebenen Schub- und einem weiteren Kardangeln bestehen (siehe Abbildung 28).

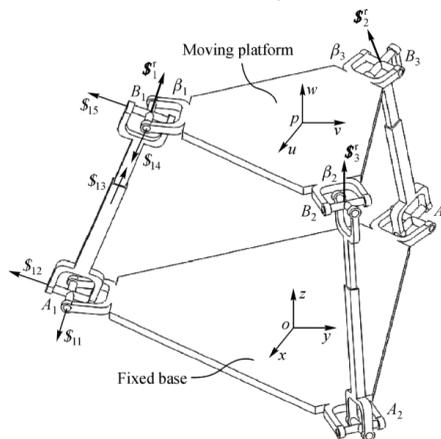


Abbildung 28: Exemplarische Darstellung einer 3-UPU Kinematik [QFG12]

Die Anzahl der resultierenden Freiheitsgrade eines Mechanismus lässt sich nur bei einfachen seriellen Mechanismen durch einfache Addition der Gelenkfreiheitsgrade bestimmen. Dies ist dadurch bedingt, dass bei parallelen Mechanismen in diese Betrachtung auch mechanische Zwangsbedingungen einbezogen werden müssen. Aus mathematischer Sicht stellt eine Roboterkinematik ein mechanisches Getriebe dar. So lassen sich die Freiheitsgrade auf Basis der Grübler-Formel berechnen [CoKe14].

$$F = b(n - 1) - \sum_{i=1}^g (b - f_i) \quad (\text{Formel 2-1})$$

Dabei bezeichnet F den Freiheitsgrad des Mechanismus, b den Bewegungsgrad mit $b=6$ für den allgemein räumlichen Fall und $b=3$ für den ebenen Fall, n bezeichnet die Anzahl der Glieder inklusive Gestell und f_i den Gelenkfreiheitsgrad von Gelenk i . Ob die Freiheitsgrade translatorischer oder rotatorischer Art sind, lässt sich allerdings so nicht bestimmen. Damit ein Mechanismus statisch stabil ist, muss die Anzahl der resultierenden Freiheitsgrade mit der Anzahl von unabhängigen angetriebenen Achsen übereinstimmen.

Zur Verdeutlichung wird der oben dargestellte räumliche Mechanismus vom Typ 3-U \underline{P} U näher untersucht. Dieser Mechanismus verfügt über acht Glieder (jeweils zwei in den drei parallelen Ketten, der Basis sowie der Endeffektor-Plattform) und hat neun Gelenke, davon sechs mit zwei Freiheitsgraden (Kardangelenke) und 3 mit einem Freiheitsgrad (Schubgelenke).

$$F = 6(8 - 1) - \sum_{i=1}^6 (6 - 2) - \sum_{i=1}^3 (6 - 1) = 3 \quad (\text{Formel 2-2})$$

Der Mechanismus verfügt also über drei Freiheitsgrade und ist durch die drei unabhängig angetriebenen Schubgelenke statisch stabil.

2.2.2 *Kinematische Transformationen (Vorwärts- und Rücktransformation)*

Zur Beschreibung der Bewegung eines Mechanismus werden kinematische Transformationen verwendet. Diese beschreiben den Zusammenhang zwischen Gelenkkoordinaten und der Pose des Endeffektors (Tool Center Point - TCP) in einem Bezugssystem (K_0) und können auch als Übertragungsfunktionen bezeichnet werden [CoKe14].

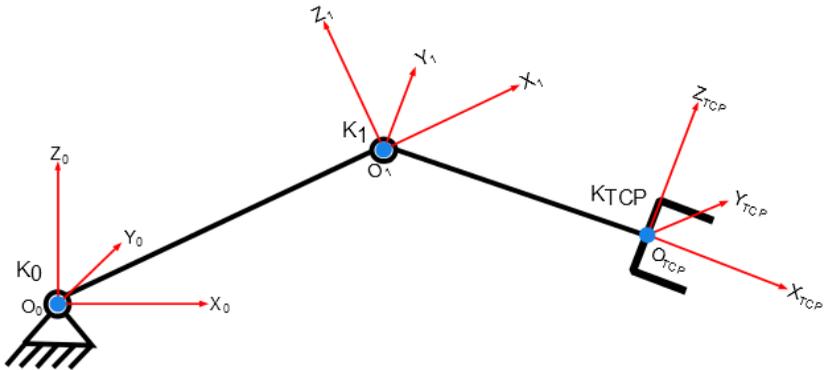


Abbildung 29: Offene kinematische Kette

Die Berechnung der Gelenkkoordinaten aus den kartesischen Koordinaten des Endeffektors wird als Rücktransformation oder auch inverses kinematisches Problem (IKP) bezeichnet. Für die Steuerung von Robotern ist diese Transformation besonders wichtig, da hier die Sollwertvorgaben für die Lageregelung berechnet werden. Daher ist eine laufzeiteffiziente Berechnung des IKP von essentieller Bedeutung.

Die Abbildung der kartesischen Endeffektor-Pose in Gelenkkoordinaten wird als Vorwärtstransformation oder direktes kinematisches Problem (DKP) bezeichnet. Diese Transformation wird aus steuerungstechnischer Sicht für die Arbeitsraumüberwachung und für die Bestimmung der Initialposition der Interpolation verwendet.

Die Methoden zu Berechnung der kinematischen Transformationen sind von der kinematischen Struktur abhängig. So existiert bei seriellen Mechanismen für das DKP eine eindeutige analytische Lösung und für das IKP eine mehrdeutige numerische Lösung. Bei parallelen Mechanismen existieren für das DKP in der Regel nur numerische Näherungslösungen und für das IKP ein oder mehrdeutige analytische Lösungen.

Für die kinematische Transformation wird in der Regel nach jedem Gelenk ein Koordinatensystem definiert. Die Koordinatensysteme werden für eine einfache Rechnung als homogene Transformationsmatrizen behandelt. Dabei handelt es sich um 4x4 Matrizen, in denen sowohl die Rotationen als auch die Translationen zum vorhergehenden Bezugssystem abgebildet sind. [Web09].

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xy} & R_{xz} & T_x \\ R_{yx} & R_{yy} & R_{yz} & T_y \\ R_{zx} & R_{zy} & R_{zz} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Formel 2-3})$$

Bei seriellen Mechanismen erhält man die Vorwärtstransformation durch sequenzielles Multiplizieren der Koordinatensysteme.

$$T_1^n = T_1^2 * T_2^3 \dots * T_{n-1}^n \quad (\text{Formel 2-4})$$

Bei der allgemeinen Koordinatentransformation im kartesischen R^3 gibt es sechs mögliche Operationen (drei Rotationen und drei Translationen), um ein Koordinatensystem in ein anderes zu überführen. Jede mögliche Operation lässt sich ebenfalls als homogene Transformation darstellen, wobei sich die Translationen immer gleich ausdrücken lassen:

$$Rot_x(a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & -\sin a & 0 \\ 0 & \sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Formel 2-5})$$

$$Rot_y(b) = \begin{bmatrix} \cos b & 0 & \sin b & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin b & 0 & \cos b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Formel 2-6})$$

$$Rot_z(c) = \begin{bmatrix} \cos c & -\sin c & 0 & 0 \\ \sin c & \cos c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Formel 2-7})$$

$$Trans(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Formel 2-8})$$

Mithilfe dieser vier Matrizen lassen sich durch entsprechende Wahl der Reihenfolge der Operationen beliebige Konventionen wie die verschiedenen Eulerwinkel [GPS06] oder Denavit-Hartenberg-Transformation [DeHa55] abbilden.

Bei seriellen Mechanismen wird für die Berechnung in der Regel das rekursive Verfahren von Denavit-Hardenberg (DH) verwendet. Dazu wird in jedes Gelenk der kinematischen Führungskette ein Koordinatensystem nach der DH-Konvention gelegt. Durch diese geschickte Wahl der Koordinatensysteme ist es möglich, eine Transformation von einem Koordinatensystem zum nächsten auf maximal vier Operationen (zwei Rotationen und zwei

Translationen) zu reduzieren. So lässt sich auf analytischem Wege die Vorwärtstransformation bestimmen.

Die Lösung der Rücktransformation eines seriellen Mechanismus ist dagegen nur bei rein kartesischem Aufbau aus Linearachsen eindeutig möglich. Bei der Verwendung von Rotationsachsen entstehen mehrere mögliche Lösungen des IKP, wie in Abbildung 30 verdeutlicht wird.

Diese Mehrdeutigkeiten des IKP werden in der Robotik als Konfigurationen bezeichnet. Die Pose des TCP kann in diesem Beispiel durch die Konfiguration $[\varphi_1, \varphi_2]$ oder $[\varphi_1', \varphi_2']$ erreicht werden. Bei einer Umsetzung in einer Robotersteuerung muss daher verhindert werden, dass bei mehrfacher Berechnung des IKP unbemerkt die Konfiguration gewechselt wird. Eine Besonderheit der Mehrdeutigkeit stellt die Singularität dar, bei der unendlich viele Lösungen vorhanden sein können. Dieses Thema wird im nachfolgenden Abschnitt näher betrachtet.

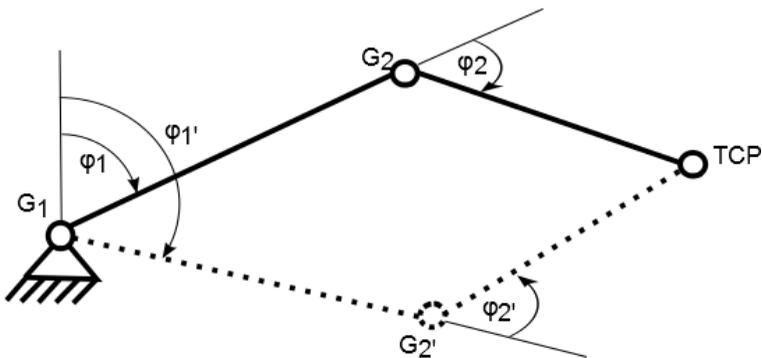


Abbildung 30: Mehrdeutigkeit bei der Lösung der Rücktransformation bei offenen kinematischen Ketten

Für die Berechnung von parallelen Mechanismen lässt sich auf diesem Wege keine Lösung finden, da immer mindestens zwei kinematische Ketten von der Basis zum TCP führen und sich gegenseitig bedingen. Die Berechnung der Transformationen sind aber für alle Arten von parallelen Mechanismen, also planare, sphärische oder räumliche Mechanismen, in den letzten 30 Jahren intensiv mathematisch untersucht worden. In [Mer06] sind die mathematischen Verfahren und Lösungsansätze zur Berechnung von Transformationen, Arbeitsräumen, Singularitäten und Roboterdynamik bei parallelen Mechanismen zusammengefasst.

Die Lösung der Vorwärtstransformation von parallelen Mechanismen ist nicht direkt wie bei seriellen Mechanismen möglich. So wird für die Berechnung des DKP ein geometrischer Ansatz gewählt. Hier wird auf Basis einer Schließbedingung das Gleichungssystem gelöst, dass aus den Lösungen der parallelen kinematischen Ketten besteht. Die Schließbedingung ist geometrisch betrachtet ein Punkt am Endeffektor, der über alle kinematischen Ketten von der Basis aus als Vektorkette erreicht werden kann [Mer06]. Die Lösung des resultierenden, meist nicht linearen Gleichungssystems, kann mithilfe des Newton-Raphson-Verfahrens effizient numerisch gelöst werden.

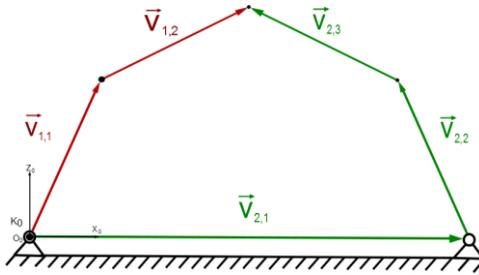


Abbildung 31: Geometrische Schließbedingung für die Berechnung des DKP

Bei dieser Berechnung ist zu beachten, dass stets mehrere Lösungen des DKP existieren, die alle die Schließbedingung erfüllen. Bedingt ist dies durch die passiven Gelenke der kinematischen Ketten und den daraus resultierenden unbekannteren Gelenkwinkeln.

Die Berechnung der Rücktransformation bei parallelen Mechanismen ist im Vergleich zu seriellen Mechanismen im Allgemeinen leichter zu berechnen. Das IKP lässt sich geometrisch durch die Berechnung der Schnittpunkte der Ortskurven bestimmen, die durch die Enden der Glieder der Gelenke an der Basis und am Endeffektor beschrieben sind. So entstehen, je nach Art der Gelenke, Schnitte zwischen Geraden (prismatisches Gelenk), Kreisen (Drehgelenk) oder Kugelflächen (Kugelgelenk).

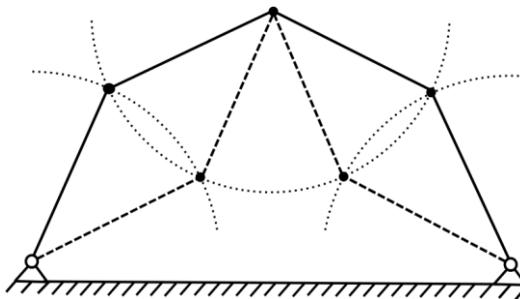


Abbildung 32: Berechnung des IKP

Wie in der nachfolgenden Abbildung zu sehen ist, existieren auch für das IKP mehrere mögliche Lösungen. Die Zahl der möglichen Lösungen ist abhängig von der Zahl der parallelen Glieder. Bei dem einfachen ebenen Fünfgelenk sind vier Lösungen möglich.

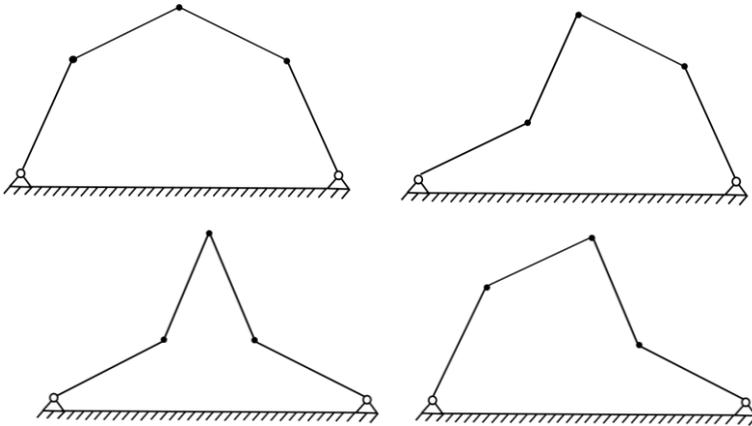


Abbildung 33: Mögliche Lösungen des IKP

2.3 Singularitäten: Bestimmung und Vermeidung

Der Begriff singular ist vom lateinischen Wort *singularis* abgeleitet und bedeutet „einzigartig“ oder „vereinzelt auftretend“ [Dud15]. Im systemtheoretischen Kontext wird der Begriff der Singularität erstmals durch James Clerk Maxwell erwähnt, er beschreibt sie als eine kleine Ursache die eine große Wirkung hervorruft [Max73]. Diese Beschreibung trifft exakt den Charakter einer Singularität im Sinne der Berechnung von Mechanismen. So kann eine infinitesimal kleine Änderung der Roboterpose in einer singularären Konfiguration zu einer unendlich großen Änderung der Antriebe führen. Auf das Verhalten von Mechanismen in der Nähe von und in singularären Bereichen wird aber noch später eingegangen.

Mathematisch sind Singularitäten Sonderfälle, die bei der Berechnung der Vorwärts- bzw. Rücktransformation auftreten können. Im Kontext der kinematischen Berechnung von mechanischen Strukturen sind sie über den Rang der Jacobi-Matrix eines Mechanismus definiert [GoAn90]. Die Jacobi-Matrix J ist als Matrix mit den partiellen Ableitungen ersten Grades einer Reihe von n Funktionen mit m Variablen definiert [Kap91].

$$\begin{cases} y_1 = f_1(x_1, \dots, x_m) \\ \dots \\ y_n = f_n(x_1, \dots, x_m) \end{cases} \quad (\text{Formel 2-9})$$

$$J(x_1, \dots, x_m) = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial y_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial y_n}{\partial x_m} \end{pmatrix} \quad (\text{Formel 2-10})$$

Bei der Berechnung von kinematischen Mechanismen beschreibt die Jacobi-Matrix J die Abbildung der Gelenkvariablen \dot{q} auf die Geschwindigkeiten des Endeffektors \dot{x} und lässt sich als partielle Übertragungsfunktion erster Ordnung beschreiben. Die Jacobi-Matrix enthält also alle notwendigen Informationen, um einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Gelenkkoordinaten und den Koordinaten des Endeffektors herzustellen [CoKe14] :

$$\dot{x} = J * \dot{q} \quad (\text{Formel 2-11})$$

$$\dot{q} = J^{-1} * \dot{x} \quad (\text{Formel 2-12})$$

Immer wenn dieser eindeutige Zusammenhang verloren geht, befindet sich der Mechanismus in einer singulären Stellung. Mathematisch lässt sich dieser Fall so definieren, dass in einer singulären Stellung die Determinante der Jacobi-Matrix null ist. Bei der Berechnung von Mechanismen treten drei verschiedene Arten von Singularitäten auf. Inverse (Typ-1), Vorwärts (Typ-2) und kombinierte (Typ-3) Singularitäten [YCC02].

Eine Typ-1 Singularität liegt vor, wenn der Endeffektor des Mechanismus mindestens einen Freiheitsgrad verliert und ist durch eine unendliche Zahl von Lösungen des IKP gekennzeichnet. Dies ist der Fall, wenn mindestens eine kinematische Kette völlig ausgestreckt ist (Siehe Abbildung 34, links) oder wenn bei mindestens zwei Achsen kollinear sind (Siehe Abbildung 34, rechts). Eine Besonderheit dieser Art von Singularität ist, dass ein Mechanismus durch achsweises Verfahren der Antriebe sich selbstständig aus der singulären Pose bewegen kann.

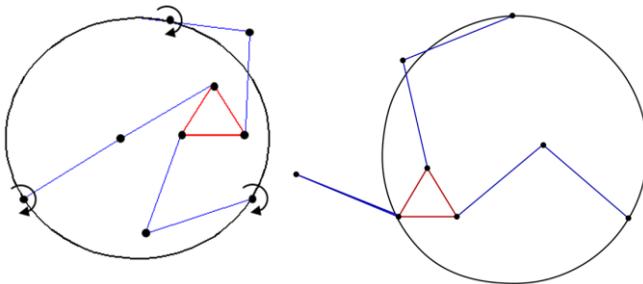


Abbildung 34: Typ-1 Singularität

Singularitäten vom Typ-2 liegen immer dann vor, wenn sich die Freiheitsgrade des Endeffektors um einen oder mehrere Freiheitsgrade erhöhen. Bedingt dadurch, dass das DKP von seriellkinematischen Mechanismen analytisch geschlossen lösbar und dadurch die Vorwärtstransformation immer eindeutig ist, können Typ-2 Singularitäten nur bei parallelkinematischen Mechanismen auftreten. In einer singulären Pose vom Typ-2 kann sich der Endeffektor ohne eine Bewegung des Antriebs infinitesimal bewegen. Charakteristisch für diese Art von Singularitäten ist, dass sich der Mechanismus in einer singulären Pose selbst sperrt. In Abbildung 35 ist ein planarer parallelkinematischer Mechanismus, mit zwei möglichen Arten der Typ-2 Singularitäten, dargestellt.

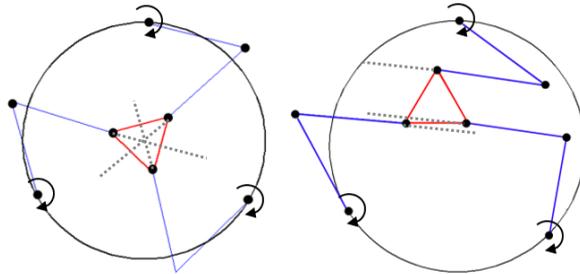


Abbildung 35: Typ-2 Singularitäten mit zusätzlichem Freiheitsgrad der Rotation (links) bzw. Translation (rechts)

Die linke Abbildung zeigt eine singuläre Pose, in der eine Rotation ohne Bewegung der Antriebe möglich ist. Die Rotationsachse entspricht dem Schnittpunkt der passiven Armglieder des Mechanismus. In der rechten Abbildung ist eine singuläre Pose dargestellt, in der eine zusätzliche Translation möglich ist. Hier entspricht die Bewegungsachse der Normalen der Richtung der parallel verlaufenden passiven Armglieder. Im Gegensatz zu den meisten Typ-1 Singularitäten, die den Rand des Arbeitsraums bilden, liegen diese vom Typ-2 stets innerhalb des Arbeitsraums.

Typ-3 Singularitäten sind eine Kombination des Typs-1 und -2 und können in Roboterposen auftreten, in denen der Endeffektor sowohl einen Freiheitsgrad gewinnt als auch einen verliert [GWIO2].

2.3.1 Verfahren zur Annäherung an Singularitäten

Für die praktische Anwendung ist nicht nur die Kenntnis über die Lage der Singularitäten wichtig, sondern auch eine Annäherung an diese. So nimmt die strukturelle Steifigkeit eines parallelen Mechanismus mit der Annäherung an eine Singularität vom Typ-2 zunehmend ab. Die Manipulierbarkeit eines parallelen Mechanismus nimmt dagegen mit der Annäherung an eine Singularität vom Typ-1 hin ab. [Hen08]

Typischerweise wird die Annäherung an Singularitäten auch durch die Auswertung der Determinanten der Jacobi-Matrix realisiert. In [Bie06] werden eine Reihe von Methoden zur Berechnung der Annäherung an eine singuläre Pose beschrieben. Ein Ansatz für die Berechnung einer Annäherung an eine Singularität wird über den Betrag der Determinanten [Yos85] der Jakobimatrix bzw. der inversen Jakobimatrix [Hen08] gemacht.

$$M_1 = \|\det J\| \text{ bzw. } M_2 = \|\det J^{-1}\| \quad (\text{Formel 2-13})$$

Da die Determinante einer Jakobimatrix nicht begrenzt ist, wurde von [Lee00] ein sogenannter Qualitätsindex λ als dimensionslose Kenngröße eingeführt. Hier wird der Betrag der Determinante auf seinen maximal möglichen Wert bezogen, der einer strukturabhängigen Konstante eines Mechanismus entspricht.

$$\lambda = \frac{\|\det J\|}{\|\det J\|_{\max}} \quad (\text{Formel 2-14})$$

So ergibt sich ein Kennwert mit $0 < \lambda < 1$ als vom Mechanismus unabhängige Maßzahl für den Abstand zu einer singulären Pose. Ein weiterer Ansatz zur Beurteilung der Nähe zu einer Singularität ist die in [AnLo92] eingeführte Konditionszahl $\kappa(J)$ als Frobenius-Skalarprodukt des Betrags der Jakobimatrix mit der invertierten Jakobimatrix.

$$\kappa(J) = \|J\| * \|J^{-1}\| \quad (\text{Formel 2-15})$$

Darüber hinaus existieren weitere Ansätze, die eine Abschätzung über die Eigenwerte der Jakobimatrix anstreben [Gos90]. Alle diese Verfahren haben gemein, dass weder ein geometrischer Bezug noch ein zulässiger Grenzwert für eine Annäherung definiert werden kann.

In [Bie06] werden auf Basis der Grassmann-Geometrie eine Reihe von möglichen Verfahren entwickelt, die eine physikalische Deutung der Näherung zu singulären Stellungen ermöglichen. Aufgrund des Umfangs der Einführung in die zugrundeliegende Schrauben-Vektor-Theorie und die geringe Relevanz für diese Dissertation werden diese Verfahren hier nicht im Detail weiter erläutert.

2.4 Hybridkinematiken

Im Vergleich zu rein parallelen oder seriellen Mechanismen sind Hybridkinematiken weniger weit verbreitet und finden erst in den letzten Jahren zunehmend Bedeutung in der Wissenschaft. Wie im vorangehenden Kapitel beschrieben bestehen Hybridkinematiken

aus einer zumeist seriellen Kopplung von mehreren Teilkinematiken. Diese können sowohl eine rein parallele oder auch serielle Struktur haben.

Mit der kinematischen Modellierung haben sich bisher nur Wenige auseinandergesetzt. In [Tan00] wurde ein Konzept zur Berechnung der kinematischen Transformationen einer Hybridkinematik aus der seriellen Kopplung von zwei Tripoden mittels klassischer Koordinatentransformation vorgestellt. Hier wurden die beiden Teilkinematiken zusammengefasst und eine gemeinsame Transformation berechnet. Ein ähnliches Vorgehen ist auch in [Sta15] zu finden. Im Gegensatz dazu wird in [ZBL04] ein Ansatz gewählt, bei dem die beiden Parallelstrukturen so ausgewählt sind, dass eine der beiden nur eine Translation ausführt und die darauf aufgesetzte nur rein rotatorische Freiheitsgrade besitzt. Dadurch ist es möglich, die Freiheitsgrade des Endeffektors auf die beiden Teilkinematiken zu verteilen.

Die meisten Untersuchungen zu hybriden Mechanismen werden ohne einen anwendungsorientierten Kontext angestellt. So sind nur sehr wenige Hybridkinematiken praktisch umgesetzt worden. Im Folgenden sollen ein paar aktuelle Umsetzungen vorgestellt werden.

Eine Realisierung existiert als Mikromanipulator für medizinische Eingriffe am Auge (Abbildung 36, links) [OuWi10]. Eine weitere Umsetzung ist der Bearbeitungsroboter Exechon. Dieser ist eine serielle Kopplung eines parallelen Mechanismus mit einem seriellen Roboterhandgelenk (Abbildung 36 , Mitte) [BiJi11, ZZM10]. Der von Festo entwickelte „Bionic Handling Assistant“ (Abbildung 36, rechts) ist mechanisch ebenfalls eine Hybridkinematik, bestehend aus drei seriell gekoppelten Tripoden und einem seriellen Endeffektor [HYL12]. Allerdings wird dieser Mechanismus auch aufgrund seines Erscheinungsbilds „Constand curvature continuum kinematics“ genannt [RoSt12].

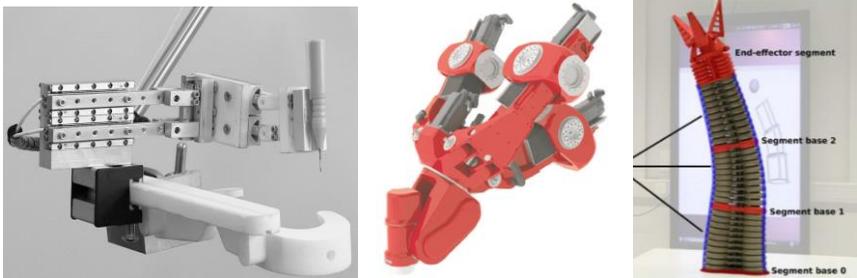


Abbildung 36: Medizinroboter [OuWi10], Exechon [ZZM10], Bionic Handling Assistant [RoSt12]

2.5 Mechanische Auslegung von Robotern

Wissenschaftliche Werke zur grundlegenden Auslegung und Berechnung von seriellen Industrierobotern sind bereits viele Jahre alt [Kre94, Wan89]. Der Fokus der Entwicklung liegt hier in der Optimierung von Zuverlässigkeit und Genauigkeit und nicht im Bereich der Leichtbauoptimierung, da diese für den klassisch stationären Fall nur eine sehr geringe Relevanz hat. Heutige wissenschaftliche Arbeiten im Bereich der seriellen Mechanismen beschäftigen sich mehr mit steuerungstechnischen Aspekten.

Die Modellierung und Optimierung von parallelkinematischen Robotern ist dagegen immer noch Gegenstand der aktuellen Forschung. In [Hen08] werden die Möglichkeiten der Optimierung von Werkzeugmaschinen mit paralleler Struktur mittels Finiter-Elemente-Berechnungen untersucht. In der Dissertation von Schenk [Sch08] werden verschiedene Maschinenkonzepte von redundanten Hybridkinematiken für die Fräsbearbeitung untersucht. In [Car15] wird ein Verfahren zur Optimierung der Geometrie von Parallelrobotern auf Basis der im vorangehenden Kapitel erläuterten Konditionszahlen vorgestellt und am Beispiel eines 3RRR-Mechanismus validiert. Mithilfe des Verfahrens werden die Größenverhältnisse für die geometrischen Verbindungselemente des Mechanismus optimiert. Die Konditionszahl dient dabei als Indikator für die Annäherung an singuläre Bereiche. Bei der optimierten Geometrie sind daher die singulären Bereiche minimal.

2.6 Zielsetzung und Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden die Defizite beim Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich universell einsetzbarer mobiler Industrieroboter aufgezeigt und es wird daraus die wissenschaftliche Aufgabenstellung dieser Dissertation abgeleitet. Darüber hinaus erfolgen auch die Vorstellung der Struktur der Arbeit sowie die Vorgehensweise zur Erfüllung der Aufgabenstellung.

2.6.1 *Abgrenzung zum Stand der Technik und Ableitung der Aufgabenstellung*

Betrachtet man den Stand der Wissenschaft und Technik bei ortsflexiblen Robotern in der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen, so ist festzustellen, dass in den vergangenen Jahren eine ganze Reihe an Systemen entwickelt worden ist.

Im Bereich der bodengebundenen, mobilen Roboter existiert mit „moiros“ eine Maschine, die universell einsetzbar ist. Auch bei den auf dem Bauteil befestigten, und transportablen Roboter ist der für die mechanische Oberflächenbearbeitung konzipierte Roboter „CAIRE“ prinzipiell in der Lage, beliebige Aufgaben auszuführen. Das LCR-System, welches für das Entschichten von lackierten Oberflächen mittels Lasertechnik entwickelt wurde, erfüllt die

universelle Einsetzbarkeit in der Kategorie der Roboter, die bodengebunden und transportabel sind. Alle diese Robotersysteme haben gemeinsam, dass sie für die Werkzeugführung einen klassischen Industrieroboter mit sechs Achsen verwenden, der den universellen Einsatz gewährleistet.

Im Bereich der mobilen und bauteilgebundenen Roboter existieren dagegen aktuell nur Sondermaschinen, die ausschließlich für den entwickelten Einsatzzweck verwendet werden können. Es fehlt eine universell einsetzbare Maschine, die in der Lage ist, ein beliebiges Werkzeug in gewissen Grenzen hinsichtlich von Abmessungen und Gewicht, in allen sechs Freiheitsgraden handhaben zu können. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass mit einer rein seriellen Struktur, wie sie beispielsweise bei Industrierobotern vorhanden ist, eine Fortbewegung mit sechs Freiheitsgraden aus eigener Kraft aufgrund der begrenzten Leistungsdichte der Antriebe heute nur schwer realisiert werden kann. Bei den rein parallelen Mechanismen ist die Klasse der Hexapoden die einzige mit allen sechs Freiheitsgraden, und diese ist aber aufgrund seiner eingeschränkten Arbeitsräume nur bedingt für eine selbstständige Fortbewegung geeignet. In Abbildung 37 ist die Ableitung der Aufgabenstellung aus den Defiziten des Stands der Technik graphisch dargestellt.

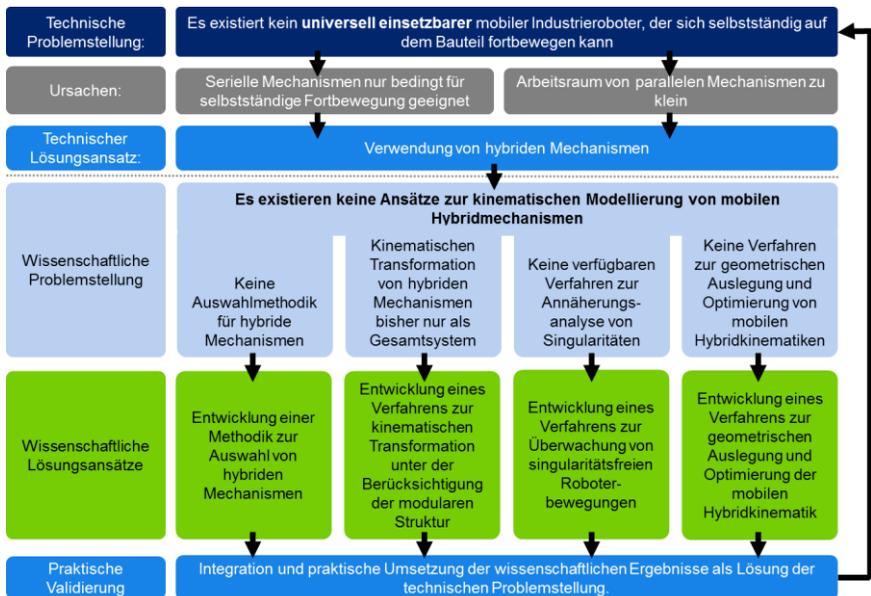


Abbildung 37: Ableitung der Aufgabenstellung

Eine Möglichkeit zur Lösung dieser Problematik bildet dabei die Klasse der hybriden Mechanismen. Allerdings existieren bisher keine Ansätze zur kinematischen Modellierung

von mobilen Hybridmechanismen. Diese sollen daher im Rahmen dieser Dissertation erarbeitet werden.

Im Detail bedeutet dies, dass zunächst eine Methode entwickelt wird, die sich mit der anforderungsspezifischen Auswahl von geeigneten Teilmechanismen auseinandersetzt. Die zielgerichtete Kombination von Teilmechanismen zu einer hybriden Struktur ist ein essentieller Vorteil dieser Klasse von Kinematiken. Diese Thematik wurde bisher in der Wissenschaft noch nicht behandelt und bildet die Grundlage der kinematischen Modellierung der Arbeit.

Der zweite Schwerpunkt der Modellierung mobiler Hybridmechanismen ist die Berechnung der kinematischen Transformation. In den Verfahren und Ansätzen im Stand der Wissenschaft und Technik wird diese Klasse von Mechanismen wie rein serielle bzw. parallele Mechanismen berechnet. Das bedeutet, dass der gesamte Mechanismus mit einer Transformation vollständig beschrieben wird. Bei diesem Vorgehen werden aber die Vorteile der unabhängigen Teilmechanismen nicht genutzt und so Möglichkeiten der Modularität verschenkt. Im Rahmen der Arbeit ist es daher das Ziel, ein modulares Verfahren für die Transformation zu entwickeln, welches sowohl die unabhängigen Teilmechanismen als auch deren geometrische Kopplung berücksichtigt.

Mit der Gewährleistung einer singularitätsfreien Roboterbewegung beschäftigt sich der dritte Schwerpunkt der vorliegenden Dissertation. Die Berechnung von Singularitäten und der Annäherung an singuläre Posen wird bei allen bekannten Verfahren über die Auswertung der Jacobi-Matrix eines Mechanismus erreicht. Dies erfordert in der Robotersteuerung einen erheblichen rechnerischen Mehraufwand für eine fortlaufende Überwachung der Programmlaufzeit. Darüber hinaus bieten die verfügbaren Verfahren keine Möglichkeit, eine Annäherung an singuläre Posen zu erkennen und dabei eine geometrische Information zum Abstand der Singularität zu berechnen. Daher wird hier ein Verfahren entwickelt, das eine rechenzeiteffiziente Onlineüberwachung einer Annäherung an Singularitäten mit geometrischem Bezug ermöglicht.

Den Abschluss der Modellierung von mobilen Hybridkinematiken bildet die Entwicklung eines Simulationswerkzeugs, mit dessen Hilfe sich die mechanische Auslegung und Optimierung der geometrischen Struktur eines mobilen Hybridmechanismus durchführen lässt. Im Stand der Wissenschaft und Technik existieren keine Ansätze oder Arbeiten, die für ein mobiles System genutzt werden können. Das Verfahren zur Optimierung der Geometrie eines parallelen Mechanismus auf Basis der Konditionszahl berücksichtigt die

tatsächliche Lastverteilung am Mechanismus nicht und ist daher ebenfalls nicht verwendbar.

Im Gegensatz zu stationären Maschinen liegen bei mobilen Systemen sowohl grundsätzlich unterschiedliche Lastfälle bei Fortbewegung und Werkzeugpositionierung als auch verschiedene Lastrichtungen durch eine beliebige Orientierung auf der Oberfläche vor. In der vorliegenden Dissertation werden aus der Vielzahl von möglichen Lastsituationen markante Varianten identifiziert und eine mechanische Simulation des Mechanismus durchgeführt werden. Dadurch soll ein Auslegungswerkzeug für die Antriebe entwickelt werden und außerdem durch eine iterative Minimierung der Strukturbelastung eine Optimierung der Geometrieparameter des Mechanismus ermöglicht werden.

2.6.2 Struktur der Arbeit

Der Hauptteil dieser Arbeit gliedert sich, wie in Abbildung 38 dargestellt, in zwei Bereiche. Im ersten Bereich werden zunächst die Methoden und Verfahren für die Modellierung einer mobilen Hybridkinematik erarbeitet. Diese werden dann am Beispiel eines mobilen Roboters für die Flugzeuginspektion praktisch umgesetzt und in Versuchen validiert.

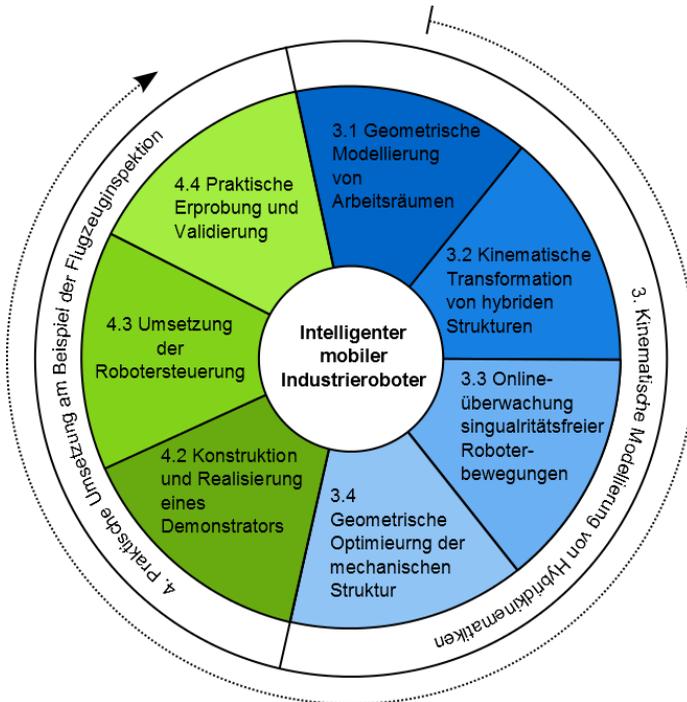


Abbildung 38: Struktur der Arbeit

Kapitel 3 bildet den wissenschaftlichen Kern der Arbeit und ist damit vom Umfang her der größte Teil der Dissertation. Das Kapitel beschäftigt sich mit der kinematischen Modellierung von mobilen Hybridkinematiken. In 3.1 werden zunächst die Möglichkeiten untersucht, die durch die Kombination von verschiedenen Teilkinematiken entstehen, den Arbeitsraum einer Hybridkinematik zu modellieren. Hier wird auch die kinematische Struktur für das mobile System erarbeitet. Unterkapitel 3.2 beschäftigt sich mit der kinematischen Transformation und stellt das Konzept der Koppeltransformation für eine effiziente Berechnung vor. In 3.3 wird ein Verfahren zur Onlineüberwachung von Roboterbewegungen hinsichtlich Singularitäten und der Annäherung an singuläre Bereiche für einen planaren, parallelen Mechanismus entwickelt. In Unterkapitel 3.4 wird ein Ansatz zur geometrischen Optimierung der mechanischen Struktur eines mobilen Systems in Bezug auf die Minimierung der Antriebsleistung bzw. Maximierung des Arbeitsraums erarbeitet.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der praktischen Umsetzung und technischen Realisierung eines mobilen Roboters am Beispiel der Flugzeuginspektion. Anhand dieses Demonstrators wird die praktische Validierung der theoretischen Ergebnisse des dritten Kapitels durchgeführt. In Unterkapitel 4.1 wird die Konstruktion und Realisierung eines hinsichtlich Leichtbau optimierten Demonstrators kurz vorgestellt. 4.2 beschreibt die Implementierung der in Kapitel 3 erarbeiteten Methoden und Verfahren in einer Werkzeugmaschinensteuerung. Unterkapitel 4.3 und 4.4 bilden den Abschluss der Entwicklung und beschäftigen sich mit der praktischen Erprobung und der Validierung. In 4.5 werden die Ergebnisse der Validierung kritisch bewertet.

Kapitel 5 bildet den Abschluss der Arbeit. Hier werden die Ergebnisse zusammengefasst. Das Kapitel beinhaltet auch den Ausblick, in dem mögliches Optimierungspotenzial und Ansatzpunkte für weiterführende Forschungsarbeiten aufgezeigt werden.

3 Kinematische Modellierung von mobilen Hybridkinematiken

Das folgende Kapitel bildet den wissenschaftlichen Kern dieser Dissertation und beschäftigt sich mit der Entwicklung von Methoden und Verfahren für die kinematische Modellierung von mobilen Hybridkinematiken.

3.1 Methodik zur Auswahl von Hybridmechanismen

Ein wesentlicher Vorteil von hybriden Mechanismen gegenüber rein seriellen bzw. parallelen Formen ist, dass durch eine Kombination der Teilmechanismen eine geometrische Modellierung des Arbeitsraums möglich wird. Diese Kopplung wird im Folgenden näher untersucht.

3.1.1 Kopplungsmöglichkeiten der Teilmechanismen

So gibt es systematisch die Möglichkeit, serielle und parallele Mechanismen jeweils entweder parallel oder seriell zu koppeln. Theoretisch entsteht durch die beliebigen Kombinationsmöglichkeiten von Teilmechanismen eine nahezu unendliche Vielzahl von möglichen Hybridkinematiken. Allerdings lässt sich diese Zahl durch eine kritische Betrachtung der Sinnhaftigkeit der Kombinationen deutlich reduzieren.

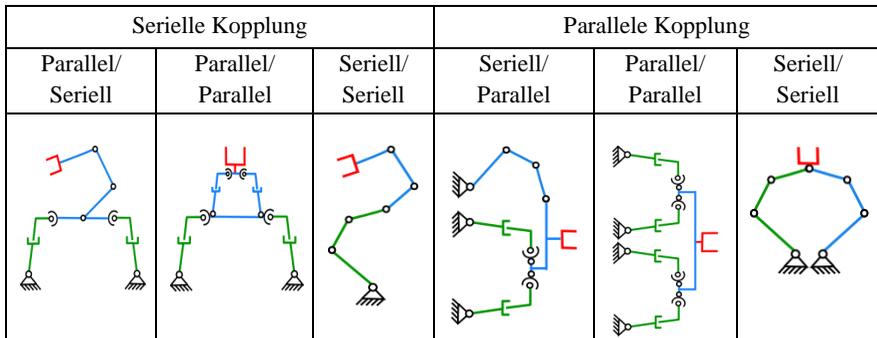


Abbildung 39: Mögliche Grundstrukturen von Hybridkinematiken

Das Ergebnis einer parallelen Kopplung von zwei seriellen Teilmechanismen ist ein rein paralleler Mechanismus. Die parallele Kombination eines seriellen und eines parallelen Mechanismus führt zu keinen sinnvollen Ergebnissen. Die parallele Kopplung von zwei Parallelkinematiken ist für hochpräzise Anwendungen interessant. Hinsichtlich der Arbeitsraumgröße und Bewegungsspielraum des Gesamtsystems führt die parallele Kopplung von zwei Mechanismen zu ähnlichen Ergebnissen wie rein parallele Mechanismen und ist daher für den mobilen Einsatz nicht relevant.

Somit werden im Weiteren nur Hybridkinematiken mit einer seriellen Kopplung der Teilmechanismen betrachtet. Die serielle Kopplung von parallelen und seriellen Mechanismen wie bei dem Roboter Exechon, bietet die Möglichkeit die hohe Beweglichkeit des seriellen Handgelenks für die Werkzeugorientierung mit der hohen Steifigkeit des Tripoden für translatorische Bewegungen zu kombinieren [ZZM10].

Bei einer seriellen Kopplung von zwei seriellen Teilmechanismen entsteht zwar immer noch ein rein serieller Mechanismus, allerdings bringt die differenzierte Betrachtung als hybrider Mechanismus bei überbestimmten Systemen, mit mehr als sechs Freiheitsgraden, mathematisch einige Vorteile hinsichtlich der Berechnung.

Für die Entwicklung eines Mechanismus mit der Anforderung an eine selbstständige Fortbewegung sind besonders serielle Kopplungen aus mehreren parallelen Mechanismen interessant. Durch diese Kombination lassen sich die Vorteile der hohen Steifigkeit und Dynamik der parallelen Maschinen mit den verhältnismäßig großen Arbeitsräumen von seriellen Mechanismen kombinieren. Allerdings werden auch die negativen Eigenschaften der Teilkinematiken kombiniert. So ist die Beherrschung von sich überlagernden Singularitäten bei parallelen Teilmechanismen eine besondere Herausforderung.

3.1.2 Arbeitsraummodellierung

Im Folgenden soll nun die Möglichkeiten der Arbeitsraummodellierung, die sich bei hybriden Mechanismen ergeben, aufgezeigt werden. Zunächst sind die notwendigen Freiheitsgrade zu definieren. Prinzipiell ist es zwar auch möglich einen hybriden Mechanismus mit drei Freiheitsgraden zu entwerfen, das eigentliche Potenzial dieser Klasse von Mechanismen wird aber erst mit zunehmenden Freiheitsgraden deutlich.

Die definierten Freiheitsgrade sind dabei auf die Teilmechanismen des Gesamtsystems zu verteilen. Ein Ansatz bei der Verteilung ist, einen Mechanismus für die Rotation und einen für die Translation zu definieren. Auf diese Weise sind die Freiheitsgrade der im Stand der Technik beschriebenen Exechon-Kinematik verteilt. Mit diesem Vorgehen wird aber die Zahl der infrage kommenden Teilmechanismen stark eingeschränkt.

Daher wird hier der Ansatz vorgeschlagen, die notwendigen Freiheitsgrade so zu verteilen, dass geometrischen Besonderheiten der Teilmechanismen ausgenutzt werden und sich die Mechanismen entsprechend in den Freiheitsgraden ergänzen.

Aufgrund der Vielzahl der möglichen kinematischen Ausprägungen bei der Auswahl der Teilmechanismen, ist auf die Sammlungen von möglichen Topologien der Struktursynthese von parallelen Mechanismen zurückzugreifen [Gog09, Gog10]. In der nachfolgenden

Darstellung sind exemplarisch vier mögliche Parallelkinematiken dargestellt, die eine Translation in der Ebene und eine Rotation um die Achse orthogonal zur Bewegungsebene ausführen können.

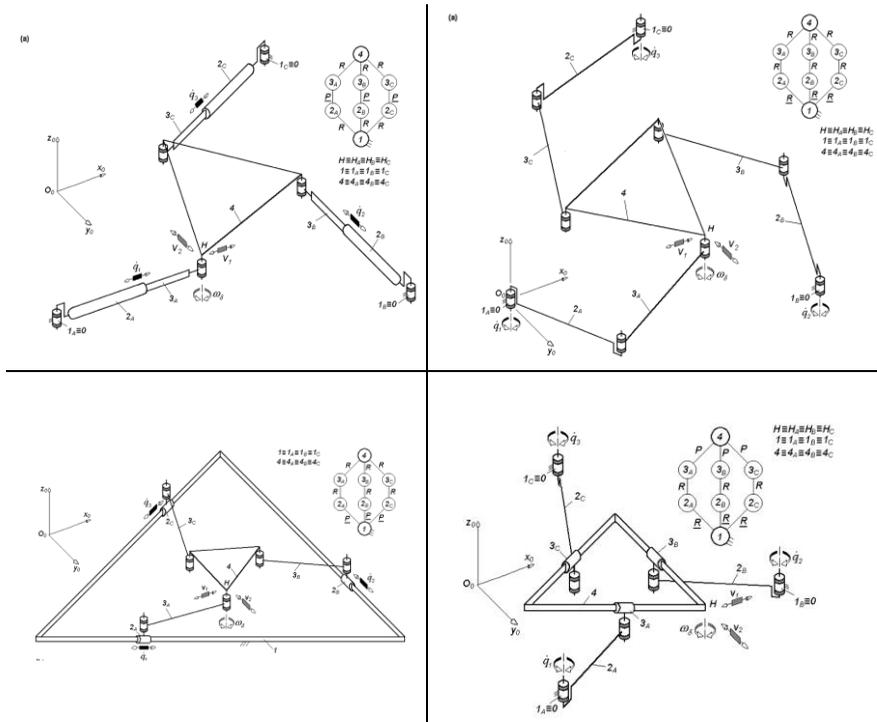


Abbildung 40: Mögliche kinematische Ausprägungen einer Parallelkinematik mit drei identischen Freiheitsgraden[Gog10].

Zur Veranschaulichung des Verfahrens wird dieses im Folgenden exemplarisch anhand der Randbedingungen der praktischen Aufgabenstellung durchgeführt und ein hybrider Mechanismus mit allen sechs Freiheitsgraden entwickelt.

3.1.3 Entwicklung der kinematische Struktur einer mobilen Hybridkinematik

In diesem Abschnitt soll eine konkrete Hybridkinematik entwickelt werden. Bei dem Mechanismus handelt es sich um denjenigen, der später in der praktischen Validierung umgesetzt wird. Als Eingangsgrößen für die Entwicklung sind im Folgenden die relevanten Randbedingungen für die Entwicklung aus der praktischen Aufgabe aufgeführt. Dies sind im Speziellen:

- 6 Freiheitsgrade
- großer translatorischer Arbeitsraum in der XY-Ebene
- niedriger Schwerpunkt
- geringe Orientierungen notwendig
- gleichmäßige Lastverteilung

Die mechanische Struktur der entwickelten Hybridkinematik ist in Abbildung 41 dargestellt. Die kinematische Ausprägung der Teilmechanismen wurde unter Aspekten der späteren praktischen Umsetzbarkeit ausgewählt.

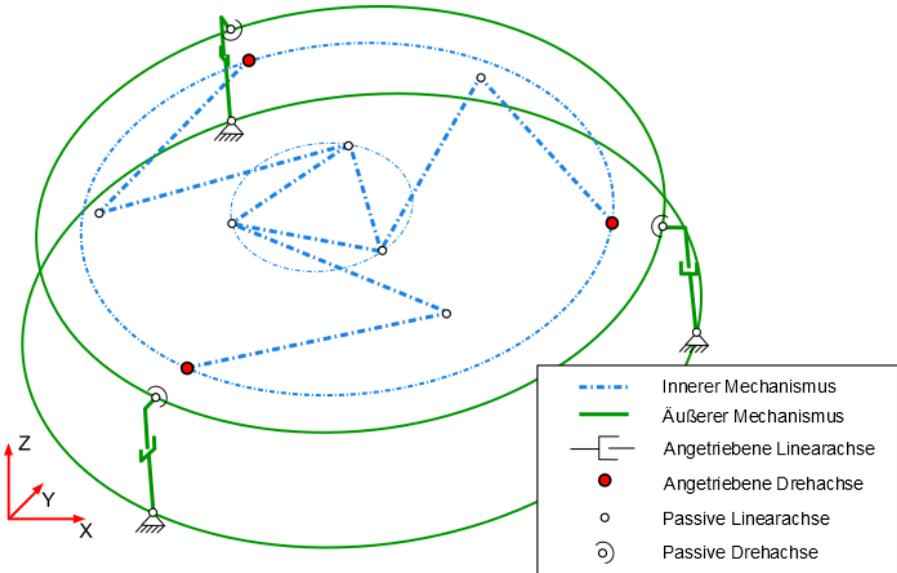


Abbildung 41: Mechanische Struktur der Hybridkinematik für den mobilen Einsatz

Der entwickelte Gesamtmechanismus besteht aus zwei parallelen Mechanismen mit jeweils drei Freiheitsgraden. Der äußere Mechanismus ist vom Typ 3-RPS und verfügt über zwei rotatorische Freiheitsgrade um die X- und Y- Achse sowie einen translatorischen Freiheitsgrad in Richtung der Z-Achse. Der innere Mechanismus ist vom Typ 3-RRR und ist in der Lage eine Rotation um die Z-Achse und eine Translation in der XY-Ebene auszuführen. Die Basis des 3-RRR Mechanismus ist mit der Endeffektorplattform des äußeren Mechanismus verbunden. Diese Verbindung bildet damit die serielle Kopplung der beiden Teilmechanismen.

Die Basis des Gesamtmechanismus wechselt je nach Betriebszustand des Roboters. Im Falle einer Werkzeugpositionierung ist die Basis des Gesamtmechanismus identisch mit der Basis des äußeren Mechanismus. Im Falle der Fortbewegung wird die Endeffektorplattform

des inneren Mechanismus fixiert und die Basis des äußeren in die gewünschte Bewegungsrichtung verschoben. Danach wird wieder die Basis des äußeren Mechanismus fixiert und die Endeffektorplattform des inneren Mechanismus in die Bewegungsrichtung verschoben. Dieser Vorgang muss solange wiederholt werden bis die gewünschte Roboterposition erreicht ist. Die Orientierung kann während der Bewegung in den Grenzen des Arbeitsraums frei geändert werden.

Typische Bauteile in der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen auf denen sich der Roboter bewegen und Aufgaben durchführen soll, haben eine leicht gekrümmte und überwiegend flächige Gestalt. Der notwendige große translatorische Arbeitsraum in der Ebene erfolgt durch den inneren planaren Mechanismus vom Typ 3-RRR. Aufgrund der Forderung, dass die notwendigen Orientierungen nur gering sind, wird der Arbeitsbereich der linearen Antriebe des äußeren Mechanismus vom Typ 3-RPS ebenfalls klein. So lässt sich insgesamt eine kompakte Bauform des Gesamtmechanismus mit einem niedrigen Schwerpunkt realisieren. Die gleichmäßige Lastverteilung wird durch einen vollsymmetrischen geometrischen Aufbau des Gesamtmechanismus erreicht.

3.2 Kinematische Transformation von hybriden Strukturen

Hybridkinematiken bieten nicht nur bei der Modellierung von Arbeitsräumen viel Potenzial, sondern sie ermöglichen auch einen neuen Ansatz für die effiziente Berechnung der kinematischen Transformation. Dieser wird im Folgenden hier vorgestellt.

Der Kerngedanke des hier entwickelten Verfahrens ist eine Aufspaltung der gesamten kinematischen Transformation, wie in Abbildung 42 dargestellt, in drei unabhängige Teiltransformationen. So entsteht für jeden der Teilmechanismen der Hybridkinematik eine unabhängige Transformation und zusätzlich eine für die geometrische Verknüpfung der beiden Mechanismen. Aufgrund der verbindenden Eigenschaft der Transformation wird diese als Koppeltransformation bezeichnet.

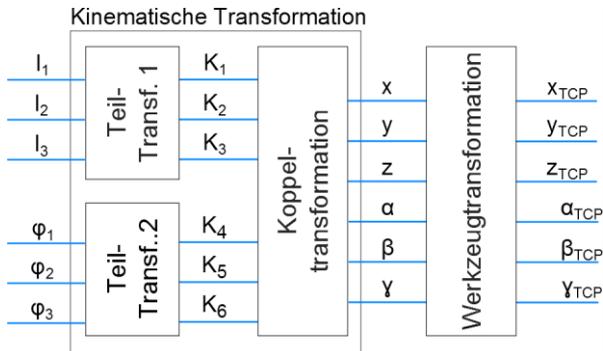


Abbildung 42: Struktur der modularen Transformation von Hybridkinematiken

Durch die Aufteilung der kinematischen Transformation in Teiltransformationen mit weniger Freiheitsgraden sind diese aus mathematischer Sicht verhältnismäßig einfach zu berechnen. Es entsteht eine modulare Struktur, die eine einfache Modifikation des kinematischen Aufbaus ermöglicht. So könnte beispielsweise ein Teilmechanismus geändert werden, ohne dass es einen Einfluss auf den anderen Teilmechanismus hat.

Darüber hinaus vereinfacht sich auch die Berechnung der Gesamttransformation mit diesem Verfahren. Soll eine Berechnung von den Achskoordinaten $\{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3\}$ und $\{l_1, l_2, l_3\}$ der Teilmechanismen zu den kartesischen Werkzeugkoordinaten $\{x_{TCP}, y_{TCP}, z_{TCP}, \alpha, \beta, \gamma\}$, also von links nach rechts im Diagramm durchgeführt werden, so müssen jeweils die partiellen Vorwärtstransformationen verwendet werden. Bei einer Berechnung von der kartesischen Werkzeugposition zu den Achswinkeln der Teilmechanismen, also von rechts nach links, werden die partiellen Rückwärtstransformationen verwendet. Die Struktur und

Verknüpfungspunkte bleiben bestehen. Beide Aspekte vereinfachen besonders die praktische Umsetzung, wie in Kapitel 4 gezeigt wird.

Aufgrund der intensiven wissenschaftlichen Untersuchung von parallelen Mechanismen in den vergangenen Jahren sind für nahezu jede kinematische Grundstruktur ausgereifte Berechnungsverfahren verfügbar. So kann bei der Entwicklung von Hybridkinematiken auf dieses Wissen zurückgegriffen werden, was den gesamten Prozess deutlich vereinfacht. Die jeweils individuell zu erarbeitende Koppeltransformation ist eine kartesische Koordinatentransformation und lässt sich sowohl für die Vorwärts- als auch die Rückwärtstransformation geometrisch bestimmen. Auch die Werkzeugtransformation ist eine rein kartesische Koordinatentransformation und kann optional als weitere unabhängige Transformationen durchgeführt werden.

3.2.1 Modellbeschreibung

Das Konzept wird nun anhand der Struktur der im vorangehenden Kapitel entwickelten Hybridkinematik erläutert. In Abbildung 43 ist die Struktur der Transformation für diesen Mechanismus zu sehen. Es sind hier auch die jeweiligen Ein- und Ausgangsgrößen der Teilmechanismen als Schnittstelle zwischen den Transformationen bzw. des Gesamtsystems dargestellt

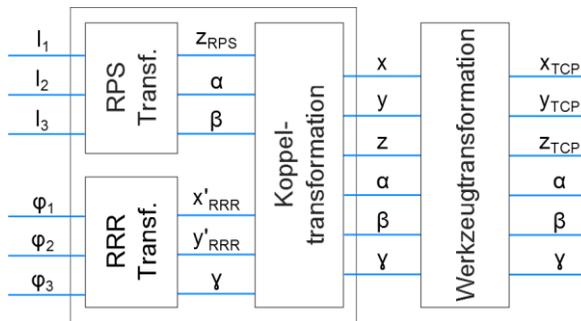


Abbildung 43: Struktur der Transformation einer Hybridkinematik bestehend aus einem 3-RPS und einem 3-RRR Mechanismus mit serieller Kopplung

Für die gewählten Teilmechanismen sind, wie oben beschrieben, die kinematischen Transformationen bereits hinreichend mathematisch erarbeitet und können aus der Literatur abgeleitet werden. Für den äußeren Mechanismus wird die Vorwärtstransformation aus [OHA06] und die Rückwärtstransformation aus [WiSh97] entnommen. Bei dem inneren Mechanismus erfolgt die Berechnung der Lösung des direkten kinematischen Problems auf Basis von [Bon08] und des inversen kinematischen Problems auf Basis von [ZW10].

In Abbildung 44 sind die Koordinatensysteme des Gesamtmechanismus dargestellt. Für die nachfolgende Berechnung wird angenommen, dass sich der Mechanismus in dem Betriebszustand zum Positionieren des Werkzeugs befindet. Demnach beschreibt das Koordinatensystem O_{Base} $\{X, Y, Z\}$ die Basis des 3-RPS Mechanismus und des gesamten Systems. Das Koordinatensystem O' $\{X', Y', Z'\}$ repräsentiert die Endeffektor-plattform des äußeren 3-RPS Mechanismus und gleichzeitig die Basis des inneren 3-RRR Mechanismus. Die Endeffektorplattform des inneren und damit des gesamten Mechanismus wird durch das Koordinatensystem O'' $\{X'', Y'', Z''\}$ ausgedrückt. Das Koordinatensystem O_{TCP} $\{X_{TCP}, Y_{TCP}, Z_{TCP}\}$ beschreibt letztendlich das des Werkzeugs. Mithilfe der Koppeltransformation lässt sich nun eine Endeffektorpose des Gesamtmechanismus O'' im Basiskoordinatensystem O ausdrücken.

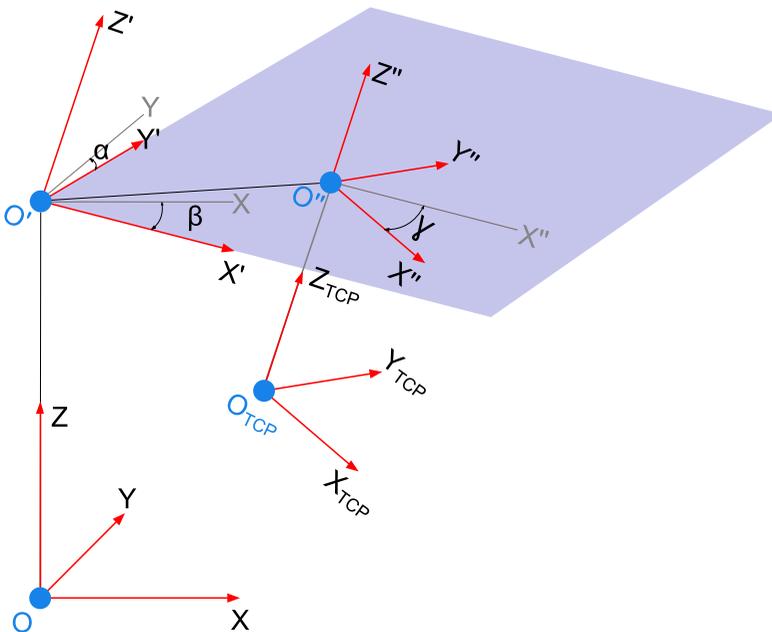


Abbildung 44: Koordinatensysteme des Gesamtmechanismus

3.2.2 Lösung des direkten kinematischen Problems

Das direkte kinematische Problem der Koppeltransformation, mit der eine Pose des Endeffektors auf Basis der beiden Posen der Teilmechanismen bestimmt werden kann, ist einfach zu berechnen. Die gesuchte Endeffektorpose des Gesamtmechanismus $\overline{p_{ges}} = \{x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\}$ entspricht dabei der Endeffektorpose des inneren Mechanismus $\overline{p_{RRR}} = \{x', y', \gamma\}$, die aus dem Koordinatensystem O' in O transformiert ist.

Die Transformation von $O' \rightarrow O$ entspricht dabei genau der Endeffektorpose des äußeren Mechanismus $\overline{p}_{RPS} = \{z, \alpha, \beta\}$ und ist entsprechend, relativ zu O , um X und Y gedreht und in Z verschoben. Aufgrund der Annahme, dass zunächst um X und dann um Y gedreht wird, lässt sich die gesamte Drehung wie folgt als Rotationsmatrix darstellen:

$$\mathbf{R}_{xy} = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \sin(\beta) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \cos(\beta) \\ -\cos(\alpha) \sin(\beta) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (\text{Formel 3-1})$$

Die Lösung des direkten kinematischen Problems der Koppeltransformation \vec{t}_{fwd} hat dann folgende Form:

$$\vec{t}_{fwd} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{RPS} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x'_{RRR} \\ y'_{RRR} \\ 0 \end{pmatrix} * \mathbf{R}_{xy} \quad (\text{Formel 3-2})$$

3.2.3 Lösung des inversen kinematischen Problems

Die Berechnung des inversen kinematischen Problems der Koppeltransformation, also der Bestimmung der Endeffektorposen der Teilmechanismen \overline{p}_{RRR} und \overline{p}_{RPS} auf Basis einer Endeffektorpose des Gesamtmechanismus \overline{p}_{ges} , lässt sich ebenfalls geometrisch lösen.

Durch die serielle Verknüpfung der beiden Teilmechanismen muss für die Lösung des inversen kinematischen Problems eine geometrische Schließbedingung gefunden werden, damit der Ursprung des Koordinatensystems O' bestimmt werden kann. Diese lässt sich aus den kinematischen Zwangsbedingungen der Teilmechanismen ableiten. Der 3-RPS-Mechanismus kann ausschließlich eine Translation entlang der Z -Achse, der 3-RRR-Mechanismus in der Ebene der Achsen X' und Y' ausführen.

Bei der Rückwärtstransformation sind x , y sowie z konstante Vorgaben. Daher muss der Ursprung von O' am Schnittpunkt eines Vektors \vec{g} entlang der Z -Achse mit der Ebene P , die durch die Achsen X' und Y' aufgespannt wird, liegen. Die für die Schnittberechnung notwendige Flächennormale \vec{n}_p der Ebene wird durch das Kreuzprodukt von zwei senkrechten Vektoren im Koordinatensystem O' berechnet:

$$\vec{n}_p = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \left[\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} * \mathbf{R}_{xy} \right] \times \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} * \mathbf{R}_{xy} \right] \quad (\text{Formel 3-3})$$

Damit lautet die Ebenengleichung von P :

$$P = \{\vec{x} \in \mathbb{R}^3 | (\vec{x} - \vec{p}) * \vec{n}_p = 0\} \quad (\text{Formel 3-4})$$

Da der Vektor \vec{g} genau entlang der Z-Achse des Zielkoordinatensystems O ausgerichtet ist, kann dieser wie folgt vereinfacht werden:

$$\vec{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Formel 3-5})$$

Der Schnittpunkt von P und \vec{g} wird durch Einsetzen von \vec{g} in P und anschließendem Auflösen nach λ ermittelt:

$$\lambda = \frac{x*n_x + y*n_y + z*n_z}{n_z} \quad (\text{Formel 3-6})$$

Die Lösung des inversen kinematischen Problems \vec{t}_{inv} erhält man durch Rückeinsetzen von λ in \vec{g} :

$$\vec{t}_{inv} = \begin{pmatrix} x'_{RRR} \\ y'_{RRR} \\ z_{RPS} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{xy}^{-1} * \left[\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda \end{pmatrix} \right] \quad (\text{Formel 3-7})$$

3.3 Onlineüberwachung singularitätsfreier Roboterbewegung

Für einen sicheren und zuverlässigen Einsatz eines Roboters ist es notwendig, dass sich die Maschine nur innerhalb des zulässigen Arbeitsraums bewegt. So muss die kinematische Struktur zum einen verlässlich vor möglichen Kollisionen von Teilen der Maschine geschützt werden und zum anderen muss sichergestellt sein, dass sich die kinematische Struktur nicht in eine singuläre Pose bewegt. Dieser Punkt ist besonders wichtig, da bei parallelen Mechanismen Typ-2 Singularitäten innerhalb des Arbeitsraums vorhanden sein können (siehe Abschnitt 0). Aus diesen kann die Maschine nicht mehr selbstständig herausfahren und es führt zu einem Verklemmen, welches die Zerstörung der Mechanik zur Folge haben kann. Daher ist es umso wichtiger, nicht nur Singularitäten selbst zu erkennen, sondern auch eine Annäherung an singuläre Posen.

Beim Einsatz von Hybridkinematiken ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass es keinen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des anderen Mechanismus hat, wenn sich ein Teilmechanismus in einer singulären Stellung befindet. Dies ist zwar vorteilhaft, da beide Mechanismen unabhängig voneinander betrachtet und überwacht werden können. Allerdings entsteht durch die Koppeltransformation aus einem einzelnen singulären Punkt im Arbeitsraum des Teilmechanismus, ein räumlich ausgedehnter singulärer Bereich des Gesamtmechanismus.

Der innere Teilmechanismus der Hybridkinematik (3-RRR) ist besonders kritisch hinsichtlich Singularitäten vom Typ 2 [Mer06]. Der äußere Teilmechanismus (3-RPS) besitzt im Gegensatz dazu keine Singularitäten innerhalb des technisch nutzbaren Arbeitsraums. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein Verfahren für die Erkennung einer Annäherung an singuläre Bereiche anhand des Mechanismus vom Typ 3-RRR beschrieben.

3.3.1 Verfahren zur Detektion einer Annäherung an singuläre Bereiche

Das in diesem Abschnitt beschriebene Verfahren zur Detektion der Annäherung an Singularitäten unterscheidet sich grundsätzlich zum typischen Vorgehen im Stand der Wissenschaft. Bei diesem Ansatz ist es nicht wie üblich notwendig, die Jacobimatrizen des Mechanismus zu bestimmen und auszuwerten. Die Detektion erfolgt durch eine Modifikation der Berechnung des direkten kinematischen Problems. Die Information über die Annäherung an eine singuläre Pose wird auf Basis der Lösung der geometrischen Schließbedingung gewonnen. Das Verfahren eignet sich aufgrund der Einfachheit insbesondere für den praktischen Einsatz in Robotersteuerungen mit begrenzter Rechenkapazität und zur Onlineüberwachung.

Im Folgenden wird das entwickelte Verfahren durch die Erweiterung der Vorwärtstransformation vorgestellt. In der nachfolgenden Abbildung ist zur Übersicht die kinematische Struktur des planaren 3-RRR-Mechanismus dargestellt.

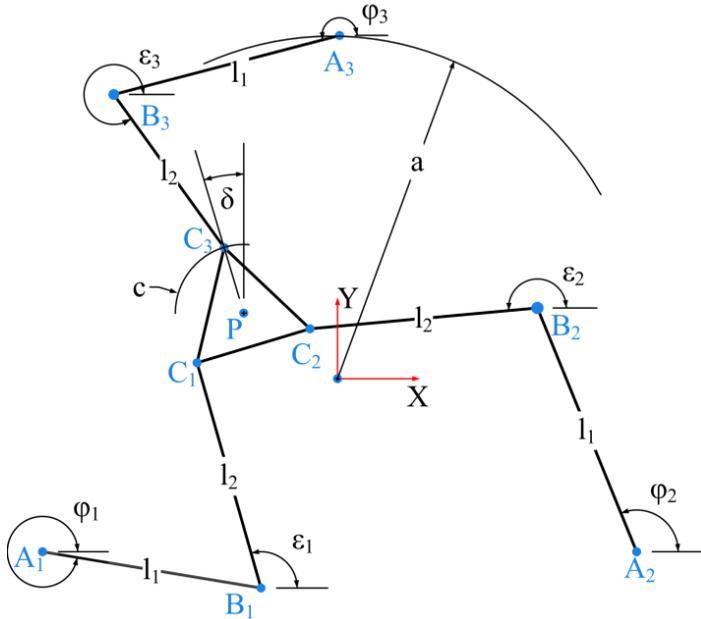


Abbildung 45: Kinematische Struktur des planaren 3-RRR Mechanismus

Die Punkte A_i liegen auf einem Kreis mit dem Radius a und beschreiben die Lage der angetriebenen Drehgelenke an der Basis des Mechanismus. Die Endeffektorplattform, die durch die Punkte C_i beschrieben wird, ist über drei identische kinematische Ketten mit der Basis verbunden. Diese Ketten bestehen jeweils aus zwei, mit einem Rotationsgelenk verbundenen Stäben der Länge l_1 bzw. l_2 . Sie werden über ein weiteres Drehgelenk B_i mit der Endeffektorplattform (in C_i) und auf der anderen Seite mit den angetriebenen Gelenken (in A_i) der Basis verbunden.

Die mathematische Beschreibung der Vorwärtstransformation dieses Mechanismus, als Grundlage für die Detektion von singulären Bereichen, basiert auf der Arbeit von [OHA06] und [NaBa11]. Die Positionen der angetriebenen Gelenke A_i der Basis des Mechanismus in Bezug auf das feste Koordinatensystem $K_0(X, Y)$ kann wie folgt dargestellt werden:

$$A_1 = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}a, -\frac{1}{2}a\right)^T \quad (\text{Formel 3-8})$$

$$A_2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}a, -\frac{1}{2}a\right)^T \quad (\text{Formel 3-9})$$

$$A_3 = (0, a)^T \quad (\text{Formel 3-10})$$

Die Lage der passiven Gelenke B_i und C_i in Bezug auf K_0 kann bestimmt werden als:

$$B_i = A_i + (l_1 \cos(\varphi_i), l_1 \sin(\varphi_i))^T \quad (\text{Formel 3-11})$$

$$C_i = B_i + (l_2 \cos(\varepsilon_i), l_2 \sin(\varepsilon_i))^T \quad (\text{Formel 3-12})$$

Darüber hinaus können die passiven Gelenke C_2 and C_3 auch über die Vektorkette $A_1B_1C_1C_2$ und $A_2B_2C_2C_3$ bestimmt werden. Diese Berechnung wird als C'_2 und C'_3 bezeichnet:

$$C'_2 = C_1 + (\sqrt{3}c \cos(\delta), \sqrt{3}c \sin(\delta))^T \quad (\text{Formel 3-13})$$

$$C'_3 = C_2 + \left(\sqrt{3}c \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \delta\right), \sqrt{3}c \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \delta\right)\right)^T \quad (\text{Formel 3-14})$$

Aus (Formel 3-11) bis (Formel 3-14) wird nun die Schließbedingung des Mechanismus aufgestellt werden:

$$0 = C'_2 - C_2 \quad (\text{Formel 3-15})$$

$$0 = C'_3 - C_3 \quad (\text{Formel 3-16})$$

Zur Lösung der Schließbedingung wird die trigonometrische Funktion mithilfe der Tangens-Halbwinkel-Substitution in eine Polynomfunktion umgewandelt:

$$t = \tan\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (\text{Formel 3-17})$$

Durch Einsetzen der geometrischen Größen, wie der Armlänge l_1 oder l_2 , des Durchmessers der Endeffektorplattform c und der Basis a erhält man für einen Satz gegebener Achswinkel $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)^T$ ein univariantes Polynom. Die Nullstellen $r_{i,j}$ dieses Polynoms entsprechen den Lösungen der Schließbedingung. Die Bestimmung der Nullstellen wird numerisch über

das Newton-Raphson-Verfahren gelöst. Aus den berechneten Nullstellen des Polynoms kann durch Resubstitution die Orientierungen $\delta_{i,j}$ der Endeffektorplattform bei einer gegebenen Position (X_i, Y_i) berechnet werden:

$$\delta_{i,j} = 2 * atan(r_{i,j}) \tag{Formel 3-18}$$

Die möglichen Konfigurationen des Mechanismus lassen sich nun aus den Lösungen ableiten. In Diagramm 5 ist zur Verdeutlichung exemplarisch das Polynom der Schließbedingung an der Stelle $X=0$ und $Y=0$ und die aus den Nullstellen resultierenden Konfigurationen des Mechanismus dargestellt.

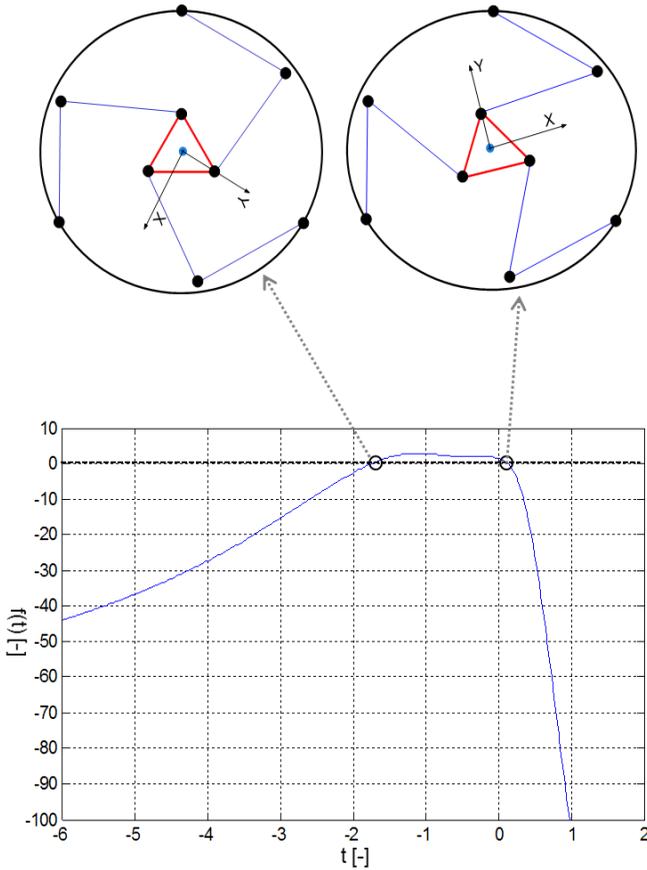


Diagramm 5: Polynom der Schließbedingung und resultierende Konfigurationen aus den Nullstellen bei $(X=0, Y=0)$

An dieser Stelle setzt das Verfahren zur Detektion der Annäherung an eine singuläre Pose an, indem es den Abstand der Nullstellen auswertet. Befindet sich der Mechanismus in einer Singularität vom Typ-2, so konvergieren die Nullstellen des Polynoms der Schließbedingung zu einer mehrfachen Nullstelle. Zur Verdeutlichung ist in Diagramm 6 das Polynom der Schließbedingung des Mechanismus in einer singulären Pose dargestellt.

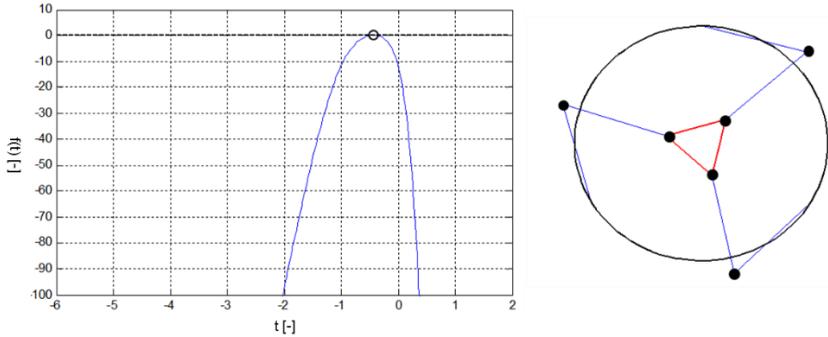


Diagramm 6: Polynom der Schließbedingung in singulärer Pose bei $(X=0, Y=0)$

Mit dem hier vorgestellten Verfahren lässt sich eine Annäherung an eine Singularität durch die zunehmende Konvergenz der Nullstellen des Polynoms der Schließbedingung identifizieren. Das bedeutet, dass der Abstand der Nullstellen einen direkten Zusammenhang zu der Nähe einer singulären Pose hat. Auf Basis dieser Analyse des Polynoms der Schließbedingung lassen sich nun verschiedene Methoden zur Arbeitsraumüberwachung realisieren. Diese werden im Folgenden näher erläutert und numerisch validiert.

3.3.2 Singularitätsfreier Arbeitsraum

Für den praktischen Einsatz und die sichere Bewegung eines Roboters ist es, aufgrund von geometrischen Toleranzen darüber hinaus notwendig, nicht nur eine theoretisch infinitesimal beschränkte singuläre Posen zu erkennen, sondern auch die Nähe zu einer Singularität. Diese Anforderung bedarf bei den klassischen Verfahren, wie im Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben, einer zusätzlichen Analyse und Auswertung der Jacobimatrizen eines Mechanismus. Der hier vorgestellte Ansatz zur vereinfachten Arbeitsraumüberwachung und Gewährleistung einer singularitätsfreien Bewegung basiert daher lediglich auf dem Verfahren der modifizierten Berechnung der Vorwärtstransformation.

Trägt man exemplarisch den Abstand d der Nullstellen $r_{i,1}$ und $r_{i,2}$ als Funktion der Position (X_i, Y_i) des Mechanismus mit konstanter Orientierung (hier $\delta = -80^\circ$) auf, so erhält man eine in Diagramm 7 dargestellte Verteilung.

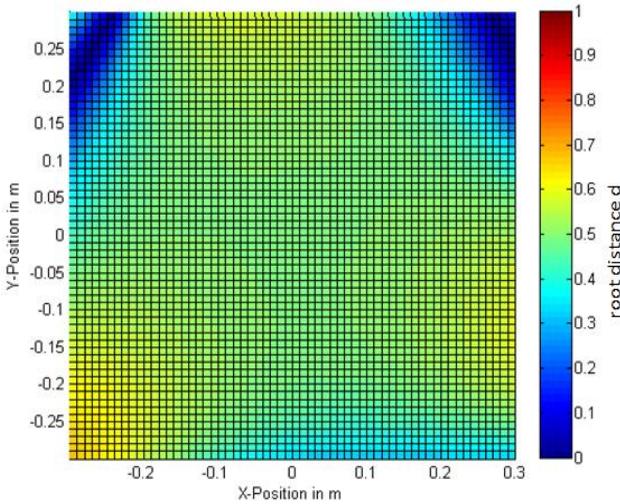


Diagramm 7: Abstand der Nullstellen des Polynoms der Schließbedingung als Funktion der Position des Mechanismus und konstanter Orientierung

In dieser Verteilung lassen sich deutlich die kritischen Bereiche innerhalb des Arbeitsraums erkennen. So konvergieren in der Umgebung von $(X=-0.28, Y=0.25)$ und $(X=0.25, Y=0.25)$ die Abstände zwischen den Nullstellen des Polynoms der Schließbedingung gegen Null. Das weist, entsprechend der aufgestellten These, auf eine Annäherung an eine Singularität hin. Analysiert man die zugehörigen Konfigurationen des Mechanismus (siehe Abbildung 46) in diesen beiden Bereichen, so lässt sich die Annäherung an eine singuläre Pose nachweisen.

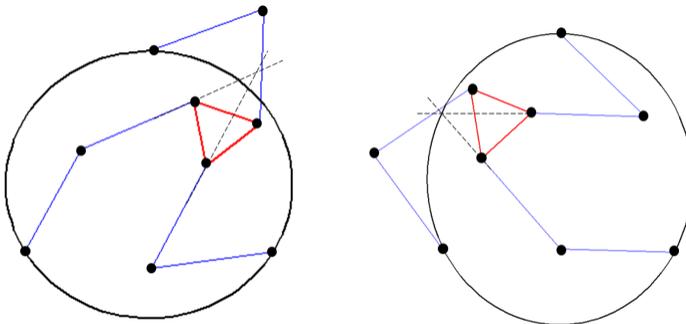


Abbildung 46: Konfigurationen des Mechanismus in der Nähe einer Typ-2 Singularität – links $(X=0.30, Y=0.25)$, rechts $(X=-0.30, Y=0.25)$

Geht man nun von einem realen Mechanismus aus, so sind sowohl die Längen der Arme als auch die Abstände zwischen den Gelenken toleranzbehaftet. Darüber hinaus sind auch

die Gelenke und Antriebe nicht spielfrei und ideal ausgerichtet. Durch eine ungünstige Verkettung der Toleranzen ist es daher möglich, dass der reale Mechanismus bereits in einer Singularität ist, obwohl er sich rechnerisch erst kurz davor befindet.

Definiert man daher einen Grenzwert d_{\min} als minimal zulässiger Abstand der Nullstellen, so lässt sich eine sehr effiziente binäre Überwachung des Arbeitsraums realisieren. Mithilfe dieses Grenzwerts lassen sich sowohl die geometrischen Toleranzen des realen Mechanismus als auch eine unzulässige Annäherung an die Singularität berücksichtigen. In Diagramm 8 ist der resultierende Arbeitsraum für zwei verschiedene Grenzwerte dargestellt.

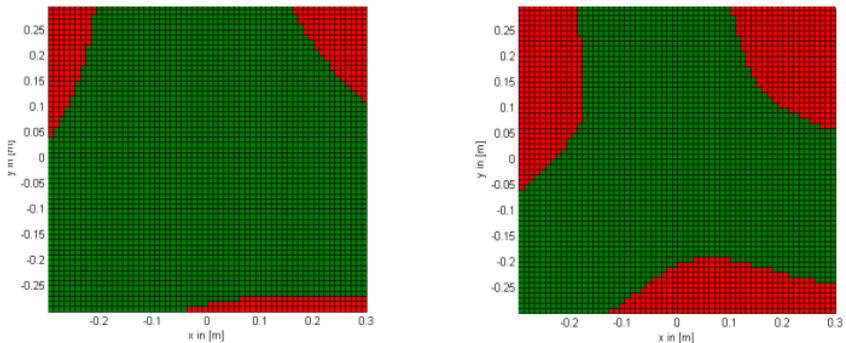


Diagramm 8: Zulässiger Arbeitsraum für $d_{\min} > 0,6$ (links) und $d_{\min} > 0,7$ (rechts)

Je nach Güte des realen Mechanismus kann so durch geschickte Wahl des Grenzwerts der zulässige Arbeitsraum maximiert werden. Für den praktischen Einsatz ist es möglich, den optimalen Grenzwert experimentell zu bestimmen.

Der besondere Vorteil dieses Verfahrens liegt in der hohen Effizienz hinsichtlich der notwendigen Rechenzeit. Die Informationen für die Überwachung lassen sich mit einem sehr geringen zusätzlichen Aufwand der Berechnung in der Steuerung gewinnen. So sind über die Ermittlung der Lösung der Vorwärtstransformation hinaus lediglich die Bestimmung der zweiten Nullstelle des Polynoms der Schließbedingung und eine zusätzliche bedingte Anweisung notwendig.

3.3.3 Berechnung der Distanz einer Roboterpose zu singulären Bereichen

Für die hier verwendete planare Parallelkinematik lässt sich auch ein geometrischer Zusammenhang zu dem Abstand der Nullstellen abschätzen. Dieser Zusammenhang basiert auf der bereits nachgewiesenen Annahme, dass zwischen den Nullstellen $\delta_{i,1}$ und $\delta_{i,2}$ immer eine Singularität liegen muss. Da jeder Lösung des Polynoms, entsprechend (Formel

3-18), einer Plattformorientierung zugeordnet werden kann, lässt sich auch der Abstand der Lösungen in eine winkelige Distanz umrechnen. Das heißt, für jede Position (X_i, Y_i) des Mechanismus existiert theoretisch eine singuläre Plattformorientierung $\delta_{i,S}$.

Damit abgeschätzt werden kann wie weit eine Singularität entfernt ist, muss aber bestimmt werden, wo $\delta_{i,S}$ in Bezug zu den Nullstellen liegt. Geht man nun vereinfachend davon aus, dass eine Singularität immer genau äquidistant zwischen den Nullstellen $\delta_{i,1}$ und $\delta_{i,2}$ des Polynoms der Schließbedingung liegt, so kann für eine beliebige Position des Mechanismus eine zulässige Orientierung $\Delta\delta_{S,calc}$ abgeschätzt werden (siehe Diagramm 9).

$$\Delta\delta_{S,calc} \cong \frac{\delta_{i,2} - \delta_{i,1}}{2} \quad (\text{Formel 3-19})$$

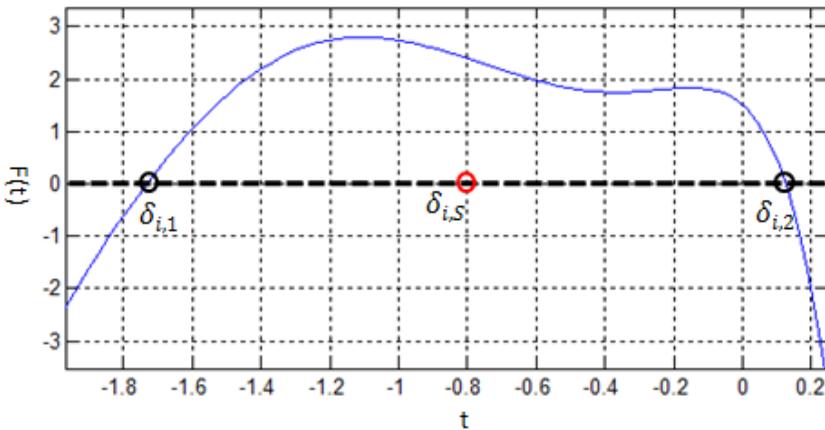


Diagramm 9: Abschätzung der winkligen Distanz zu einer Singularität.

Diese Vereinfachung setzt allerdings voraus, dass die Annäherung von beiden Seiten linear erfolgt. Im Folgenden soll daher untersucht werden, in wie weit diese Annahmen zulässig sind. Dazu wird für verschiedene Orientierungen des Mechanismus, bei konstanter Position, die singuläre Orientierung $\delta_{S,calc}$ nach (Formel 3-19) bestimmt. Damit der mögliche Bereich für diese Untersuchung möglichst groß ist, wird eine Position in der Mitte des Arbeitsraums gewählt. Zur Bewertung der Ergebnisse wird die Abweichung $\Delta\delta_{S,dev}$ zwischen dem errechneten Winkel $\Delta\delta_{S,calc}$ von dem tatsächlichen singulären Winkel $\delta_{S,real}$ zu der Singularität ermittelt:

$$\Delta\delta_{S,dev} = \delta_{S,real} - \delta_{S,calc} \quad (\text{Formel 3-20})$$

Der reale Winkel der Singularität für die Position ($X=0$, $Y=0$) wurde experimentell ermittelt und beträgt $\delta_{S,\text{real}} = 47^\circ$. In Diagramm 10 ist die absolute Abweichung $\Delta\delta_{S,\text{dev}}$ für verschiedene Ausgangswinkel dargestellt.

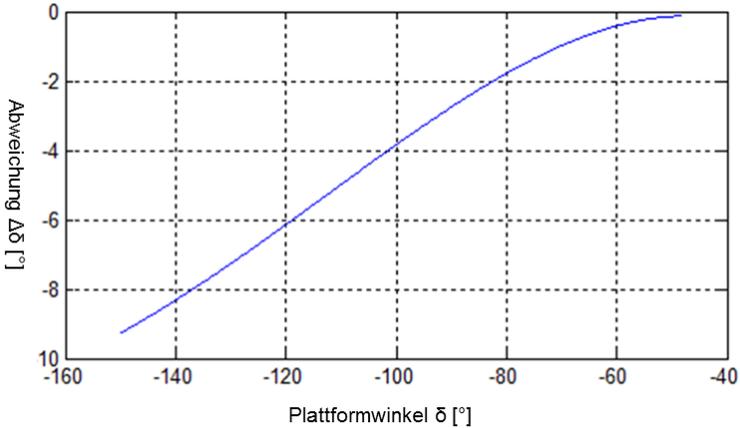


Diagramm 10: Absolute Abweichung der berechneten singulären Winkeln $\delta_{S,\text{calc}}$ für die Plattformposition ($X=0$, $Y=0$)

Es wird deutlich, dass mit zunehmendem Abstand zu der Singularität auch die Abweichung zunimmt. Dies ist auf die Linearisierung der Lage der Singularität zurückzuführen. Allerdings ist die Abweichung in allen Fällen negativ. Das hat zur Folge, dass der errechnete, zulässige Drehwinkel stets kleiner ist, als der reale. Dabei handelt es sich also um eine konservative Abschätzung zur sicheren Seite hin und kann toleriert werden. Darüber hinaus konvergiert $\delta_{S,\text{calc}}$ in der Nähe der Singularität gegen $\delta_{S,\text{real}}$, sodass die Abweichung mit realer Annäherung an eine Singularität gegen Null konvergiert. Damit ist durch die vereinfachte Abschätzung keine Verkleinerung des zulässigen Bewegungsbereichs zu erwarten.

3.4 Geometrische Modellierung der mechanischen Struktur

Eine Modellierung der geometrischen Struktur ist für eine praktische Umsetzung der Hybridkinematik in der Form eines mobilen Roboters notwendig. Dazu wird ein mechanisches Modell des Mechanismus benötigt, mithilfe dessen sich sowohl die orts- und lageabhängigen Belastungen als auch die verschiedenen Betriebszustände abbilden lassen.

Die Betriebszustände sind in diesem Fall das schrittweise Fortbewegen und das Positionieren des Werkzeugs. Für eine Abschätzung der Abhängigkeiten und die grundsätzliche geometrische Optimierung ist ein statisches Modell mit einer einfachen dynamischen Erweiterung ausreichend. Hinsichtlich der Antriebslasten ist, wie auch bei der Betrachtung der Annäherung an Singularitäten, die planare Parallelkinematik besonders kritisch. Durch den Einsatz der hybriden Gesamtstruktur des Roboters ist es daher möglich, beide Mechanismen getrennt voneinander zu betrachten. So wird für die Modellierung an dieser Stelle nur der innere Mechanismus untersucht. Insgesamt sollen dabei folgende Ziele erreicht werden:

- Optimierung von geometrischen Größen des Mechanismus hinsichtlich eines maximalen Arbeitsraums
- Abschätzung der notwendigen Momente und –Kräfte für die Antriebsauslegung
- Berechnung der Reaktionskräfte an den Teilkomponenten für die mechanische Konstruktion

In diesem Kapitel wird daher zunächst das mechanische Modell beschrieben, das als Grundlage für die weiteren Untersuchungen dient. Darauf aufbauend werden die Einflüsse der verschiedenen Betriebs- und Bewegungszustände auf die Lastverteilung analysiert und der Einfluss der räumlichen Lage des Roboters untersucht. Daraus werden für die Auslegung Fälle mit maximaler Antriebs- und Bauteillast identifiziert. Den Abschluss des Kapitels bildet die Vorstellung der entwickelten Simulationsumgebung für die Auslegung und Optimierung der Geometrie und Antriebe. Mithilfe der Simulation werden die Geometriegrößen des Mechanismus, wie beispielsweise die Länge der Arme, die Abstände der Antriebe oder die Dimensionen der Werkzeugplattform, hinsichtlich eines maximal möglichen Arbeitsraums bei konstanter Antriebsleistung optimiert.

3.4.1 Modellbeschreibung

Das entwickelte mechanische Modell basiert grundsätzlich auf den Newton'schen Gleichgewichtsbedingungen. Die mögliche Dynamik des Systems wird dadurch berücksichtigt, dass eine vorgegebene Masse des Roboters bzw. des Werkzeugs mit einer festen Beschleunigung bewegt werden kann. Die so aus der Dynamik entstehende Kraft

wird als zusätzliche Komponente in das statische Modell als konstante Belastung integriert. In Abbildung 47 ist die Skizze für die Modellbeschreibung dargestellt.

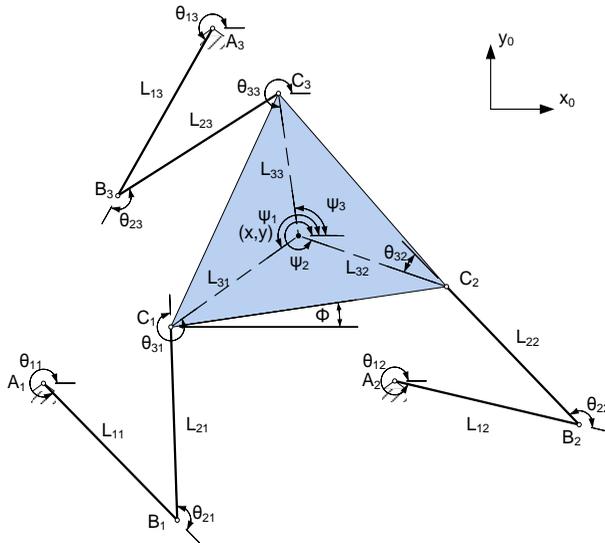


Abbildung 47: Skizze zur Modellbeschreibung des inneren 3-RRR Mechanismus

Das Modell des Mechanismus lässt sich wie folgt beschreiben (mit $i = 1 \dots 3$):

- Der Mechanismus kann eine Relativbewegung zwischen den Mittelpunkten der Kreise ausführen, die durch A_i und C_i beschrieben werden. Dies ist eine Translation in Richtung x_0 und y_0 und eine Rotation um ϕ .
- An den Drehpunkten A_i befinden sich die Antriebe des Mechanismus. Diese erzeugen ein Moment M_{Ti} .
- Die Drehgelenke B_i und C_i sind passive Drehgelenke mit einem Freiheitsgrad.
- Durch die Punkte A_1, A_2, A_3 ist die Basis des Mechanismus definiert.
- Die Punkte C_1, C_2, C_3 beschreiben die Werkzeugplattform.
- Die Basis A_i und die Werkzeugplattform C_i entsprechen der Form eines gleichseitigen Dreiecks.
- Die Armlängen L_{1i} bzw. L_{2i} sind jeweils gleich.
- Der Mechanismus besitzt einen symmetrischen Aufbau.
- Die Winkel θ_{2i} und θ_{3i} ergeben sich aus den kinematischen Transformationen.

Zunächst wird der theoretische Arbeitsraum des Mechanismus näher untersucht. In der Literatur unterscheidet man zwischen verschiedenen Arten des Arbeitsraums [Mer06].

Diese unterscheiden sich durch die Randbedingungen und sind entsprechend unterschiedlich groß. Hier sind vor allem folgende Arbeitsräume relevant: der „Constant Orientation Workspace“, der mit einer fixen Orientierung erreicht werden kann, der „Minimal Orientation Workspace“, der mit mindestens einer Orientierung erreicht werden kann sowie der „Dextrous Workspace“, der mit beliebigen Orientierungen erreicht werden kann. Typischerweise wird der „Dextrous Workspace“ verwendet (siehe Abbildung 48), da dieser die Anforderungen an eine reale Anwendung am besten widerspiegelt.

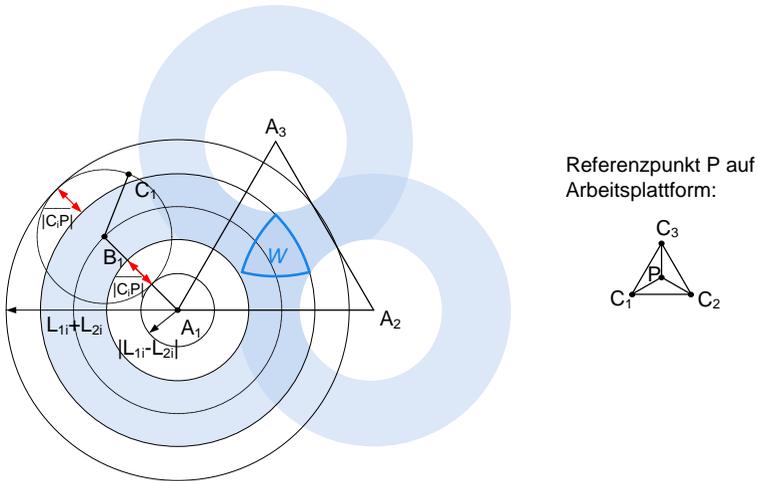


Abbildung 48: "Dextrous Workspace" des 3-RRR Mechanismus [Ram13]

Dieser Arbeitsraum lässt sich für den verwendeten 3-RRR Mechanismus wie folgt herleiten. Durch die Forderung nach einer beliebigen Orientierung muss für jeden Punkt P' im Arbeitsraum ein Kreisbogen mit dem Radius $|C_i P|$ um den Endpunkt C_i des Arms existieren. Das führt für jeden Arm des Roboters zu einem ringförmigen Bereich der zwischen den Grenzen $L_{1i} - L_{2i} - |C_i P|$ und $L_{1i} - L_{2i} + |C_i P|$ liegt. Damit nun ein Punkt P' im Arbeitsraum liegen kann, muss er von allen drei Armgliedern erreicht werden können. Der resultierende Arbeitsraum W entspricht daher der gemeinsamen Schnittmenge der drei Ringe.

Besonders bei parallelkinematischen Maschinen müssen zusätzliche Randbedingungen definiert werden, die den Arbeitsraum weiter einschränken. So muss beispielsweise eine mögliche Kollision der Armglieder, das Vorhandensein von Singularitäten oder auch Bewegungs- und Leistungsgrenzen der Antriebe berücksichtigt werden. Diese Faktoren lassen sich nicht so einfach abschätzen wie die geometrischen Arbeitsräume und erfordern

eine individuelle Betrachtung des jeweiligen Mechanismus und der entsprechenden Einflussgrößen wie Lasten oder geometrische Randbedingungen.

Diese Betrachtungen werden in das Modell integriert. So werden Posen aus dem Arbeitsraum entfernt, bei denen das notwendige Antriebsmoment M_{Ti} aus der Berechnung des statischen Modells größer ist als der vorgegebene Maximalwert, der durch den ausgewählten Antrieb erreicht werden kann. Genauso wird auch bei Überschneidungen von Armteilen untereinander oder mit der Arbeitsplattform verfahren. Es wird allerdings bei dieser Betrachtung vereinfachend von räumlich nicht ausgedehnten Armen ausgegangen. Eine Überschneidung tritt daher immer dann auf wenn sich die Verbindungslinien zwischen den Gelenken der Arme und der Arbeitsplattform schneiden.

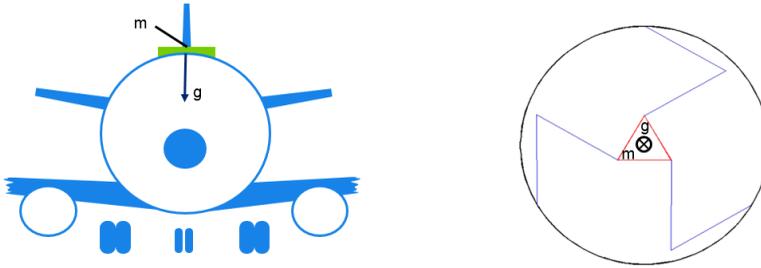
3.4.2 Identifikation von relevanten räumlichen Orientierungen des Roboters

Durch die Forderung nach einer Fortbewegung der mobilen Maschine in beliebige Richtungen und auch in allen Lagen, führt dazu, dass auch der Vektor der Schwerkraft beliebig orientiert sein kann. Um die Auslegung zu vereinfachen und den Berechnungsaufwand beherrschbar zu machen, werden im Folgenden markante Orientierungen des Roboters identifiziert. Dadurch ist es möglich, bei minimalem Rechenaufwand, eine hinreichende Dimensionierung der Antriebe und der Struktur zu gewährleisten. In Abbildung 49 sind zwei mögliche Ausrichtungen der mobilen Maschine dargestellt, aus der sich alle anderen räumlichen Orientierungen als Mischform ableiten lassen.

Im ersten Fall wirkt die Schwerkraft senkrecht zur Ebene der Hauptbewegungsrichtung des Roboters. So werden durch die Gewichtskraft die linearen Stellantriebe des äußeren Mechanismus und die Gelenke des inneren Mechanismus belastet. Durch die geringen Massen, die sich nur innerhalb des Roboters bewegen, kann in diesem Fall von einer positionsinvarianten Lastverteilung ausgegangen werden. So lassen sich die linearen Antriebe des äußeren Mechanismus auf Basis einer statischen Gewichtsabschätzung vordimensionieren.

Der zweite Fall beschreibt eine Orientierung des Roboters, sodass die Schwerkraft parallel zur Ebene der Hauptbewegungsrichtung der Maschine wirkt. In diesem Fall werden die Lasten der Gewichtskraft durch die Antriebe des inneren Mechanismus aufgenommen. Die Lastverteilung ist somit stark von der Pose des Werkzeugs abhängig. Darüber hinaus spielen auftretende Singularitäten ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Abschätzung des Arbeitsraums und in der Auslegung der Antriebe des inneren Mechanismus.

1. Fall: Gravitation wirkt senkrecht zur Kinematik-Ebene



2. Fall: Gravitation wirkt genau in Kinematik-Ebene – dimensionierend für Antriebe

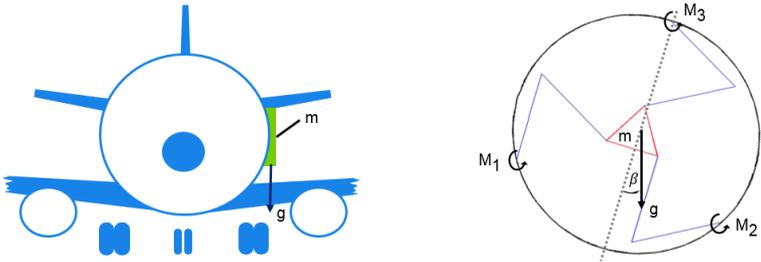


Abbildung 49: Räumliche Orientierungen der mobilen Maschine

3.4.3 Definition und Beschreibung der verschiedenen Betriebszustände

Im Gegensatz zu stationären Maschinen verfügen sich selbst fortbewegende Roboter über mehrere verschiedene kinematische Betriebszustände. Wenn das mobile System sowohl das Werkzeug als auch die Fortbewegung mit denselben Antrieben durchführt, so haben diese beiden Betriebszustände unterschiedliche Antriebs- und Strukturbelastungen zur Folge. Im Folgenden werden die beiden möglichen Betriebszustände näher analysiert und die grundlegenden mechanischen Beziehungen aufgestellt. Für beide Betriebszustände wird angenommen, dass die Schwerkraft in der Ebene der Hauptbewegungsrichtung des Mechanismus wirkt.

Positionieren des Werkzeugs

Das Positionieren des Werkzeugs ist der typische Arbeitszustand des Roboters. In diesem Fall sind die Antriebe des Mechanismus fixiert und es werden die Masse der Werkzeugaufnahme und die des Werkzeugs bewegt. Die beiden Massen werden vereinfachend als Punktmasse m im Mittelpunkt der Werkzeugplattform zusammengefasst. In Abbildung 50 ist das mechanische Ersatzmodell des Mechanismus für diesen Betriebszustand dargestellt.

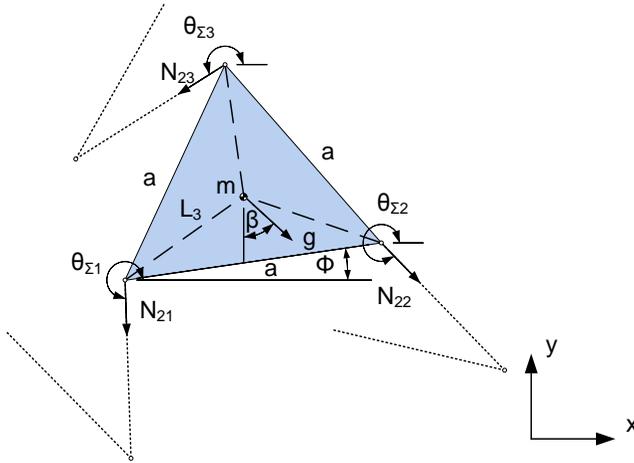


Abbildung 50: Mechanisches Ersatzmodell für das Positionieren des Werkzeugs

Hier ist die Werkzeugplattform mit den, für das mechanische Gleichgewicht notwendigen, Stabkräften N_{2i} in den passiven Armteilen des Mechanismus zu erkennen. Durch die beidseitige Lagerung der passiven Armteile mit Rotationsgelenken können nur Kräfte in Normalrichtung der Arme übertragen werden. Ebenso können keine Momente an den Anschlusspunkten der Werkzeugplattform wirken. Dies vereinfacht das mechanische Modell deutlich. So lässt sich die Wirkrichtung der Stabkräfte $\theta_{\Sigma i}$ aus der Lösung des inversen kinematischen Problems als Funktion der Pose $P(x, y, \phi)$ berechnen. Diese ergeben sich zu:

$$N_{21} = \frac{\sin \beta \cdot m \cdot g - \cos \theta_{\Sigma 2} \cdot N_{22} - \cos \theta_{\Sigma 3} \cdot N_{23}}{\cos \theta_{\Sigma 1}} \quad (\text{Formel 3-21})$$

$$N_{22} = \frac{-m \cdot g \cdot (\cos \beta + \tan \theta_{\Sigma 1} \sin \beta) - N_{23} \cdot (\sin \theta_{\Sigma 3} - \tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 3})}{(\sin \theta_{\Sigma 2} - \tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 2})} \quad (\text{Formel 3-22})$$

$$N_{23} = m \cdot g \frac{L_3 \cdot \cos(\beta - \Phi - \pi/6) + a \cdot (\cos \beta + \tan \theta_{\Sigma 1} \sin \beta) \frac{\sin(\Phi - \theta_{\Sigma 2})}{\sin \theta_{\Sigma 2} - \tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 2}}}{a \cdot \sin(\Phi + \pi/3 - \theta_{\Sigma 3}) - (\sin \theta_{\Sigma 3} - \tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 3}) \frac{\sin(\Phi - \theta_{\Sigma 2})}{\sin \theta_{\Sigma 2} - \tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 2}}} \quad (\text{Formel 3-23})$$

Wie später gezeigt wird, lassen sich aus diesen Stabkräften direkt die notwendigen Antriebsmomente ableiten.

Fortbewegen

Im Betriebszustand des Fortbewegens wird die Werkzeugplattform an den Punkten C_i fixiert und der äußere Rahmen des Mechanismus wird bewegt. Hier wirken als Last sowohl die Antriebe und der Rahmen des inneren Mechanismus als auch der gesamte äußere Mechanismus. Im Vergleich zum Betriebszustand der Werkzeugpositionierung sind diese Belastungen höher, sodass dieser Betriebszustand besonders für die Antriebsauslegung relevant ist.

Aufgrund der Symmetrien des inneren und äußeren Mechanismus wird die wirkende Gewichtskraft wieder als Punktmasse m in der Mitte der äußeren Plattform angenommen. Ein zusätzliches Moment an der Werkzeugplattform entsteht, außerhalb der Fixpunkte C_i , durch die Verschiebung des Lastangriffspunkts bei der Bewegung. Dies führt zu einer Verstärkung der resultierenden Stabkräfte N_{2i} . Das mechanische Ersatzmodell für den Betriebszustand der Fortbewegung ist in Abbildung 51 dargestellt.

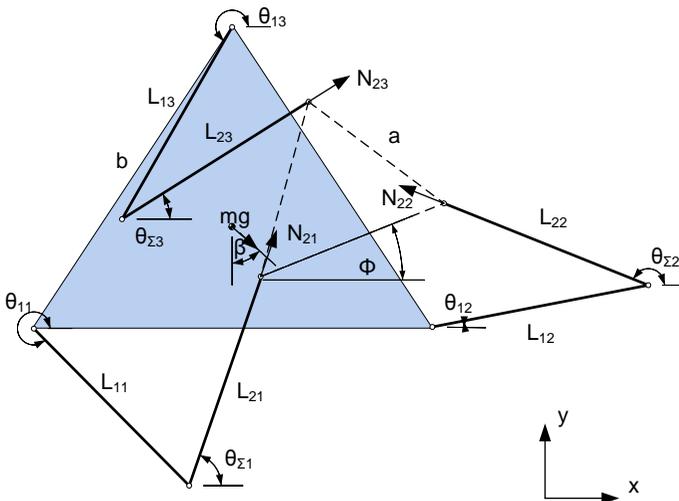


Abbildung 51: Mechanisches Ersatzmodell für die Fortbewegung

Nachfolgend sind die resultierenden Stabkräfte für diesen Betriebszustand aus den Gleichgewichtsbedingungen aufgeführt.

$$N_{21} = -\frac{\sin \beta \cdot m \cdot g - \cos \theta_{\Sigma 2} \cdot N_{22} - \cos \theta_{\Sigma 3} \cdot N_{23}}{\cos \theta_{\Sigma 1}} \quad (\text{Formel 3-24})$$

$$N_{22} = \frac{mg \cdot (\cos \beta + \tan \theta_{\Sigma 1} \sin \beta) - N_{23} \cdot (\sin \theta_{\Sigma 3} - \tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 3})}{(\sin \theta_{\Sigma 2} - \tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 2})} \quad (\text{Formel 3-25})$$

$$N_{23} \quad (\text{Formel 3-26})$$

$$\begin{aligned} & mg \left(\cos \beta \left(\frac{b}{2} - L_1 \cdot \cos \theta_{11} - L_2 \cos \theta_{21} \right) - \sin \beta \left(\frac{\sqrt{3}}{6} b - L_1 \sin \theta_{11} - L_2 \sin \theta_{21} \right) \right) \\ = & \frac{a \left(\sin \left(\theta_{\Sigma 3} - \phi - \frac{\pi}{3} \right) + (\tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 3} - \sin \theta_{\Sigma 3}) / (\sin \theta_{\Sigma 2} - \tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 2}) \sin \left(\theta_{\Sigma 2} - \phi \right) \right)}{mg (\cos \beta + \tan \theta_{\Sigma 1} \sin \beta) a \sin \left(\theta_{\Sigma 2} - \phi \right)} \\ - & \frac{a \cdot \left(\sin \left(\theta_{\Sigma 3} - \phi - \frac{\pi}{3} \right) (\sin \theta_{\Sigma 2} - \tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 2}) + \sin \left(\theta_{\Sigma 2} - \phi \right) (\tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 3} - \sin \theta_{\Sigma 3}) \right)}{a \cdot \left(\sin \left(\theta_{\Sigma 3} - \phi - \frac{\pi}{3} \right) (\sin \theta_{\Sigma 2} - \tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 2}) + \sin \left(\theta_{\Sigma 2} - \phi \right) (\tan \theta_{\Sigma 1} \cos \theta_{\Sigma 3} - \sin \theta_{\Sigma 3}) \right)} \end{aligned}$$

3.4.4 Werkzeug zur Simulation der Antriebslasten für die Auslegung

Auf Basis des mechanischen Ersatzmodells wird nun ein Auslegungswerkzeug für die Dimensionierung der Antriebe und der Maximierung des tatsächlich nutzbaren Arbeitsraums entwickelt. Für die weitere Betrachtung werden daher die Belastungen immer in Bezug auf die Antriebe in den Punkten A_i definiert. Mit den Stab- bzw. Normalkräften N_{2i} lassen sich, aus der Länge der angetriebenen Arme L_{1i} und dem Winkel zwischen den beiden Armteilen θ_{2i} die notwendigen Antriebsmomente M_{1i} bestimmen.

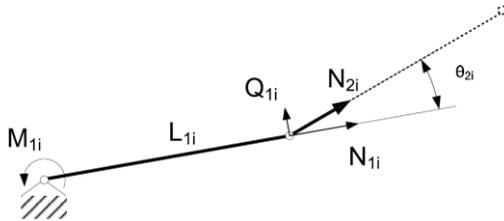


Abbildung 52: Bestimmung der Antriebsmomente aus den Stabkräften

Diese können aus dem mechanischen Ersatzmodell wie folgt abgeleitet werden:

$$M_{1i} = L_{1i} \sin \theta_{2i} \cdot N_{2i} \quad (\text{Formel 3-27})$$

Neben der, im vorangehenden Abschnitt bestimmten Stabkraft N_{2i} lassen sich die notwendigen Größen aus der bereits bekannten Berechnung der Rückwärtstransformation bestimmen. Aus dieser Rechnung wird deutlich, dass sowohl die Normalkräfte N_{2i} als auch die Winkel θ_{2i} nichtlineare Funktionen der Pose $P(x,y,\phi)$ bzw. der Achswinkel der Antriebe $(\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13})$ sind. Dadurch ist eine analytische Ermittlung der Extremwerte der Antriebsmomente nicht möglich. Auch die Optimierung der geometrischen Größen (a, b, L_{1j}, L_{2j}) ist daher auf analytischem Weg nicht möglich. Aus diesem Grund wird für

das Auslegungswerkzeug eine numerische Berechnung gewählt. Die Simulation der erreichbaren Arbeitsräume und der resultierenden Antriebsmomente wird auf Basis eines iterativen Vorgehens realisiert. So können Parameterstudien durchgeführt werden, bei denen jeweils ein geometrischer Designparameter des Mechanismus ($a, b, L_{1j}, L_{2j}, \beta, \dots$) variiert wird.

In der Simulation werden nun jeweils die Antriebsmomente $M_{1,i}$ für eine finite Anzahl an Positionen einer definierten Orientierung der Werkzeugplattform bestimmt. Liegt das Moment von allen Antrieben für eine Pose unterhalb eines vorher definierten Grenzwerts $M_{1,max}$, dann gehört die Pose zum Arbeitsraum. In Diagramm 11 ist exemplarisch das Ergebnis der Simulation, für einen definierten Satz Designparameter und bei konstanter Orientierung der Werkzeugplattform, dargestellt.

Das Ergebnis ist eine ebene Verteilung der Antriebsmomente der drei Motoren des Mechanismus. Die Zuordnung der Antriebe erfolgt über die Darstellung des idealisierten kinematischen Modells. Das maximal zulässige Moment der Antriebe liegt in diesem Beispiel bei 150Nm. Damit nun die Größe des resultierenden Arbeitsraums abgeschätzt werden kann, müssen die zulässigen Bereiche der Einzelantriebe überlagert werden. Dies ist durch eine einfache logische UND-Verknüpfung der Teilbereiche möglich.

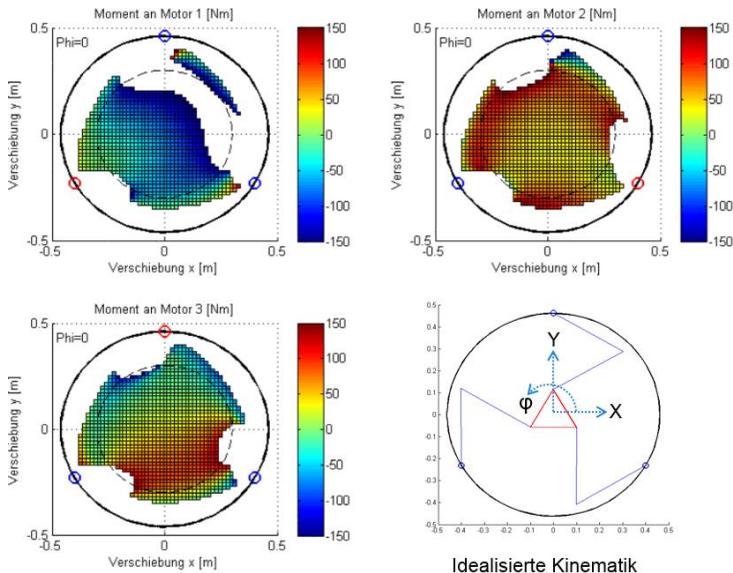


Diagramm 11: Momentenverteilung der Einzelantriebe für einen exemplarischen Satz an Designparametern und definierter Orientierung der Werkzeugplattform

Um die Ergebnisse von verschiedenen Parameterstudien besser zu vergleichen, wird der Arbeitsraum durch einen Kreis mit maximalem Durchmesser definiert, der innerhalb des resultierenden Arbeitsraums liegt. Der Mittelpunkt des Kreises ist dabei immer in der Mitte des Mechanismus. Das Ergebnis dieser Erweiterung ist im nachfolgenden Diagramm zu sehen.

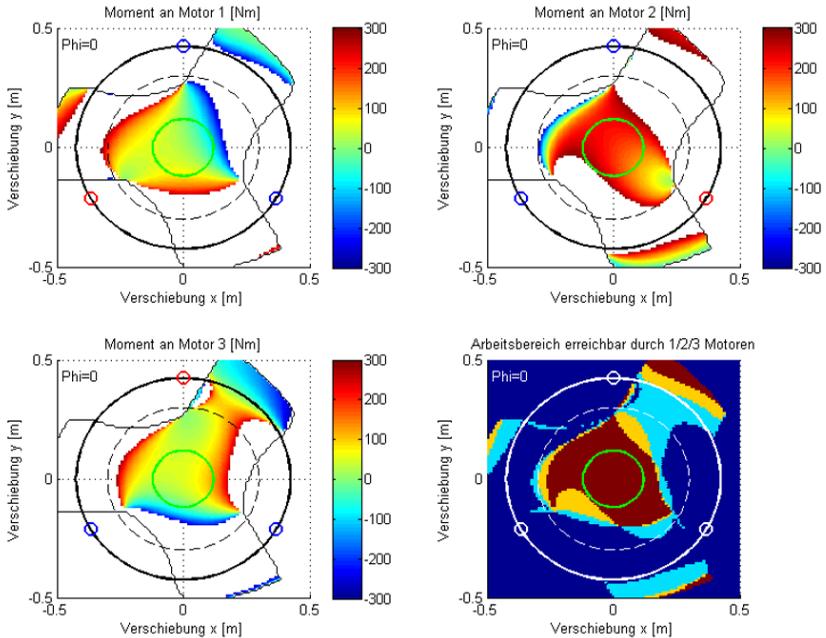


Diagramm 12: Überlagerung des resultierenden und maximal möglichen Arbeitsraum

Hier wird darüber hinaus auch der maximal mögliche Arbeitsraum als Kontur dargestellt, der mit beliebig hohen Antriebsmomenten erreichbar wäre. In der überlagerten Darstellung unten rechts ist durch die Farbskala kein Moment dargestellt, sondern die Erreichbarkeit eines Bereichs in Abhängigkeit der Anzahl der Antriebe.

Der resultierende kreisförmige Arbeitsraum kann nun dazu genutzt werden, die Datenmenge für die automatisierte Optimierung der Designparameter gering zu halten. Für jeden Berechnungsschritt lässt sich so das große Datenvolumen der Momentenverteilungen der Einzelantriebe auf eine eindimensionale Größe, den Arbeitsraumdurchmesser, reduzieren. Als Ergebnis werden für einen Satz Designparameter die kreisförmigen Arbeitsräume über eine vollständige Umdrehung der Werkzeugplattform berechnet (siehe Diagramm 13).

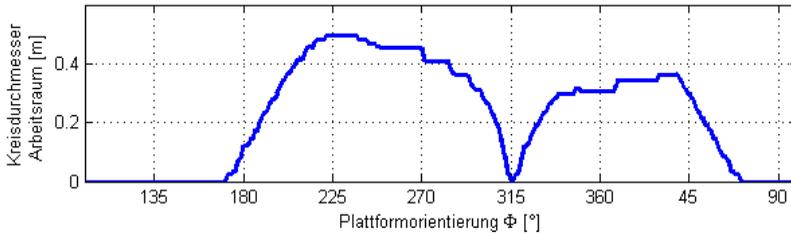


Diagramm 13: Kreisförmiger Arbeitsraum für beliebige Werkzeugorientierungen

Anhand dieser Diagramme lassen sich nun sowohl der maximal mögliche Arbeitsraum als auch der zulässige Orientierungsbereich erkennen. In Abschnitten, in denen über weite Teile kein Arbeitsraum vorhanden ist, liegt in der Regel eine Kollision zwischen den Armen untereinander oder mit der Arbeitsplattform vor. In einem Bereich der nur eine scharf abgegrenzte Nullstelle besitzt, befindet sich der Mechanismus in einer singulären Pose. Dies resultiert aus einem lokal begrenzten, theoretisch unendlich steilen, Anstieg der notwendigen Antriebskraft. Der zulässige Orientierungsbereich kann, neben dem absolut größten Arbeitsraum, als zweites Qualitätskriterium für die vorgegebene Konfiguration verwendet werden. So ist prinzipiell ein möglichst breiter Orientierungsbereich mit gleichzeitig großem Arbeitsräumen ideal.

Diese beiden Strategien für die Bewertung der Designparameter werden im folgenden Abschnitt näher untersucht und für die Auswahl einer optimalen Konfiguration quantifiziert.

3.4.5 Optimierung der Geometrie Größen zur Maximierung des Arbeitsraums

Mithilfe des Simulationswerkzeugs ist es nun möglich die Durchmesser des Arbeitsraums $D_{A,real}$ hinsichtlich der möglichen Translation bzw. Rotation zu maximieren. Dazu werden für die Designparameter jeweils sinnvolle Iterationsbereiche und -intervalle festgelegt. Das zulässige Moment der Antriebe wird ebenfalls definiert. Für jede mögliche Konfiguration K_i des Mechanismus werden nun die Arbeitsraumverteilungen in Abhängigkeit der Plattformorientierung $D_{A,real}(\phi)$ berechnet. Die Ergebnisse der Iterationen lassen sich, wie nachfolgend dargestellt, als Reihe visualisieren. Hier sind deutlich die Iterationsgruppen der einzelnen Parameter als stetige Sequenzen zu erkennen.

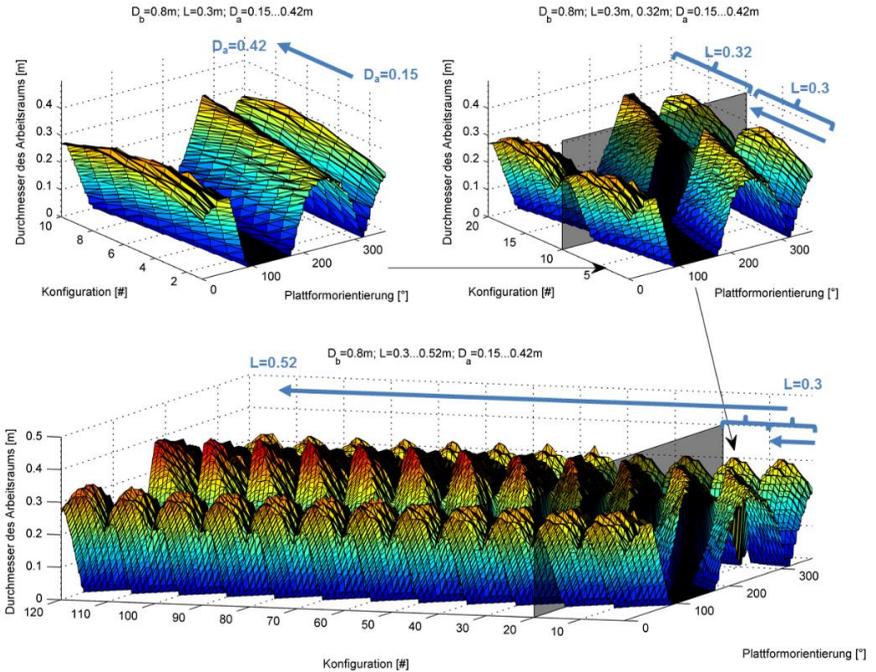


Abbildung 53: Iterative Berechnung einer großen Anzahl an möglichen Konfigurationen – Hier exemplarisch: Variation der Armlängen L und Durchmesser D_a der Werkzeugplattform

Zur Auswahl der optimalen Konfiguration K_{opt} lassen sich, wie bereits angesprochen, zwei verschiedene Strategien anwenden. Es können die Designparameter verwendet werden, bei denen der größte Arbeitsraum für eine Orientierung verfügbar ist:

$$K_{opt,1} = \max \left[\max \left(D_{A,real}(\phi) \right) \right] \quad (\text{Formel 3-28})$$

Alternativ kann die Konfiguration verwendet werden, bei der die meiste Bewegung möglich ist, also ein großer Orientierungsbereich bei gleichzeitig großen Arbeitsräumen. Diese Strategie lässt sich mathematisch als Konfiguration beschreiben, bei der der Flächeninhalt von $D_{A,real}(\phi)$ maximal ist.

$$K_{opt,2} = \max \left[\int_0^{360} D_{A,real}(\phi) d\phi \right] \quad (\text{Formel 3-29})$$

In den beiden nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Gütebewertung mit den beiden Strategien für alle untersuchten Konfigurationen dargestellt. Dabei ist jeweils die Konfiguration markiert, die bei der Optimierungsstrategie die höchste Güte erreicht hat.

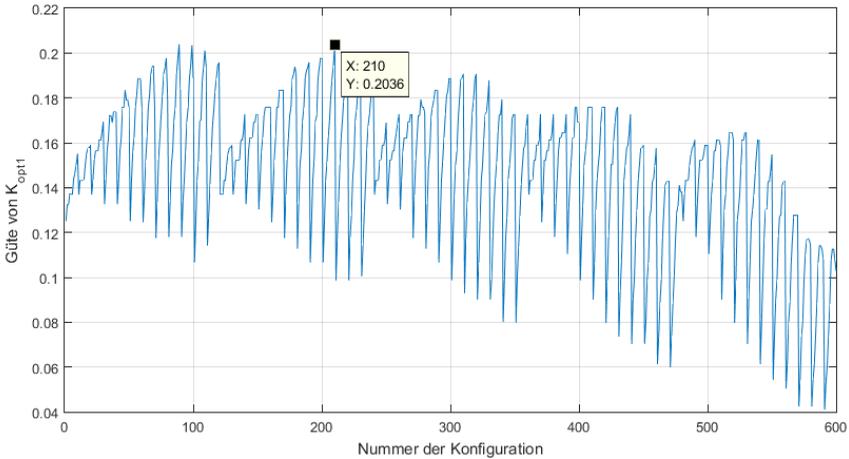


Diagramm 14: Darstellung der erreichten Güte von Optimierungsstrategie 1 für alle Konfigurationen

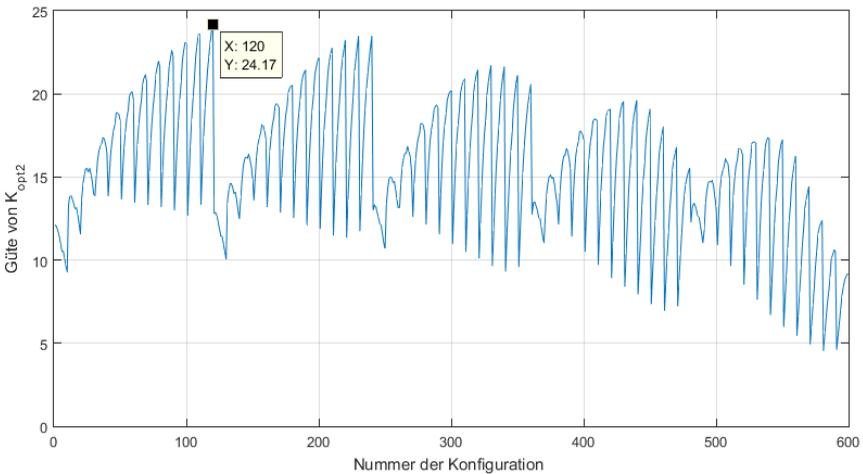


Diagramm 15: Darstellung der erreichten Güte von Optimierungsstrategie 2 für alle Konfigurationen

In der nachfolgenden Tabelle werden die resultierenden Designparameter der am besten bewerteten Konfigurationen aus der Optimierung gegenüber gestellt. Zur einfacheren Vergleichbarkeit werden die Armlängen L und der Durchmesser der Werkzeugplattform

D_{innen} auf den Durchmesser des Außenrings $D_{\text{außen}}$ normiert. Damit lassen sich die Geometrieverhältnisse als dimensionslose Kennwerte beurteilen.

	$D_{\text{außen}}$	D_{innen}	L
$K_{\text{opt},1}$	1	0,48	0,60
$K_{\text{opt},2}$	1	0,52	0,65

In dem nachfolgenden Diagramm sind die resultierenden Arbeitsräume als Funktion der Plattformorientierung für die ausgewählten Konfigurationen dargestellt.

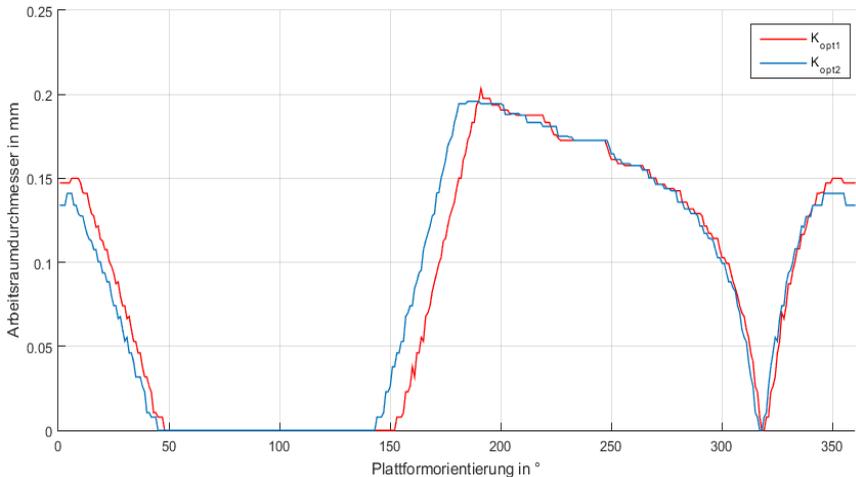


Diagramm 16: Resultierende Arbeitsraumverteilung der bei der Optimierung ermittelten Konfigurationen

Es wird deutlich, dass beide Optimierungsstrategien verwendbare Ergebnisse liefern können. Bei der Auswahl der jeweiligen Strategie ist die zu erfüllende Aufgabe des Mechanismus ausschlaggebend. Ist primär ein großer translatorischer Arbeitsraum entscheidend, so sollte $K_{\text{opt},1}$ gewählt werden. Bei einer Forderung nach einer maximalen kombinierten, also rotatorischer und translatorischer Bewegung, ist $K_{\text{opt},2}$ zu bevorzugen.

4 Praktische Validierung am Beispiel der Flugzeuginspektion

Im folgenden Kapitel werden die erarbeiteten theoretischen Ergebnisse auf ihre praktische Übertragbarkeit untersucht. Die Validierung erfolgt auf Basis der Entwicklung eines mobilen Roboters für die Inspektion von Flugzeugrümpfen aus Aluminium.

Zu Beginn des Kapitels werden die Aufgabenstellung und der Hintergrund des Forschungsprojekts erläutert, in dessen Rahmen der Roboter entwickelt wurde. Daraus werden die Anforderungen für die mechanische Konstruktion der Maschine abgeleitet. Darüber hinaus sind auch die Umsetzungen der entwickelten theoretischen Methoden in der Robotersteuerung dargestellt. Den Abschluss bildet die praktische Erprobung des Roboters, mit dem Fokus der Validierung des Gesamtsystems unter realen Bedingungen am Flugzeug.

4.1 Hintergrund und Aufgabenstellung

Eine wichtige Motivation zur Entwicklung eines mobilen Roboters für die Inspektion von Flugzeugrümpfen aus Aluminium ist die Reduktion der Taktzeit in der Flugzeugwartung. Die Inspektionen der Boeing 737 Classic sind aufgrund der Rissproblematik im Bereich von Kanten, den sogenannten „Chemical Milled Pockets“, sehr umfangreich und zeitaufwendig. Bei „Chemical Milled Pockets“ handelt es sich um einen besonderen, gewichtssparenden Aufbau der Außenhaut des Flugzeugrumpfs (siehe Abbildung 54, links).



Abbildung 54: links: Aufbau einer "Chemical Milled Pocket", rechts: Heutiger Inspektionsprozess zur Rissprüfung mittels Wirbelstromsonde

Dabei besteht die Außenhülle aus zwei verklebten Aluminiumblechen, von denen das Innere mit taschenförmigen Aussparungen (Pockets) versehen ist. Wegen der Kerbwirkung am Übergang der Bleche und durch korrosive Einflüsse sind die Kanten besonders empfindlich für Ermüdungsrisse [Has11]. Diese sind durch die wechselnden Lasten und

Umgebungsdrücke bedingt, denen der Flugzeugrumpf bei jedem Flugzyklus ausgesetzt ist. Dieser Effekt ist besonders kritisch, da die 737 als Kurzstreckenflugzeug verhältnismäßig viele Flugzyklen in Bezug auf die Flugstunden aufweist.

Aufgrund der Rissproblematik werden durch sogenannte „Service Bulletins“ bestimmte regelmäßige Inspektionen vorgeschrieben. In Abbildung 55 ist eine Inspektionsvorgabe aus einem exemplarischen „Service Bulletin“, SB 737-53A1301, dargestellt [Boe10].

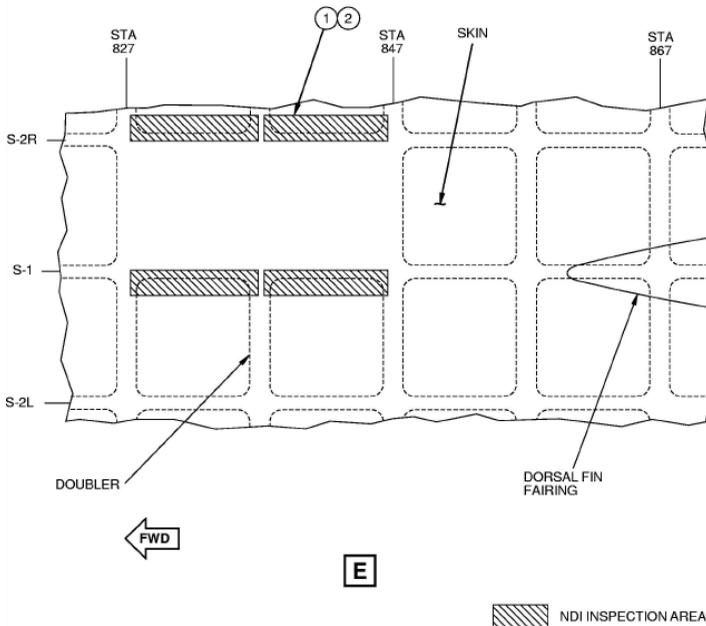


Abbildung 55: Exemplarische Inspektionsvorgabe aus SB 737-53A1301 [Boe10]

Im vorliegenden Beispiel sind vier Pocketkanten zu inspizieren. Allerdings existieren auch Service Bulletins, die eine Inspektion aller horizontalen Kanten der über 3000 Pockets vorschreiben.

Die Position der Inspektionsbereiche wird über eine Angabe von Stringern und Spanten definiert. In diesem Beispiel liegt der Inspektionsbereich zwischen Spant STA827 und STA847 und an Stringer S-2R und S-1. Die Ortsangaben können nicht in kartesische Koordinaten umgerechnet werden, sondern sind nummerierende Bezeichnungen von Flugzeugmerkmalen. Diese Art der Bezeichnung ist historisch gewachsen und zum schnellen manuellen Auffinden von Zielpositionen auf dem Flugzeugrumpf entstanden. Die zugrundeliegende Systematik wird im Folgenden kurz erläutert.

Bei den Spanten werden die sogenannten „Stations“ (STA) von vorn nach hinten in unterschiedlichen Intervallen nummeriert. Typischerweise liegt z.B. STA0 vor dem Flugzeug. Darüber hinaus gibt es auch Angaben wie STA500A, STA500B, ..., mit denen die abweichenden Bereiche von Flugzeugen unterschiedlicher Länge aus derselben Flugzeugfamilie gekennzeichnet sind. Bei den Stringern ist die Bezeichnung einfacher nachvollziehbar. Der oberste Stringer in der Mitte des Rumpfes wird mit S-1 bezeichnet. Alle anderen werden von oben nach unten durchnummeriert und mit der Angabe versehen, ob sie in Flugrichtung blickend links oder rechts der Mitte liegen.

Bei dem heutigen manuellen Inspektionsprozess werden die Pocketkanten durch eine Wirbelstromsonde inspiziert (siehe Abbildung 54, rechts). Dieser Prozess erfordert viel Erfahrung und Zeit für das Einrüsten des Flugzeugs mit Leitern und Docks, damit die Mitarbeiter die Inspektionsbereiche erreichen können. Während der Inspektion wird die Wirbelstromsonde entlang des Inspektionsbereichs bewegt und manuell im angezeigten Phasenbild nach risstypischen Signaturen gesucht.

Im Forschungsprojekt „Thermas“ wurde in Zusammenarbeit mit der Lufthansa Technik AG ein System zur Automatisierung dieser Inspektionen entwickelt. Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des zweiten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo II) und durch die Hamburger Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation unterstützt. Ziel des Forschungsvorhabens war es, einen automatisierungsgerechten Sensor und ein sich selbstständig bewegendes Handhabungsgerät zu entwickeln. Der Sensor wurde durch die Projektpartner Edevis GmbH und IFF GmbH, der Roboter durch das Institut für Flugzeug-Produktionstechnik der TUHH entwickelt.

Der Sensor für die Rissprüfung basiert physikalisch auf dem Verfahren der Puls-Phasen-Thermographie und besteht aus einer thermographischen Kamera mit einem elektromagnetischen Induktor für die Anregung der Oberfläche aus Aluminium. Der Induktor wird bei einer Messung senkrecht auf die Oberfläche aufgesetzt und diese durch kurze elektromagnetische Pulse im Bereich von Millisekunden erwärmt. Die resultierende Temperaturverteilung wird durch die hochsensible Thermokamera erfasst und in einem Steuerrechner ausgewertet.

Der am IFPT entwickelte Roboter hat die Aufgabe den Sensor an die zu inspizierenden Orte zu positionieren und senkrecht auf der Oberfläche auszurichten. Ein wichtiger Punkt des Roboterkonzeptes ist, dass im Gegensatz zu den Maschinen des Technikstands nicht eine aufgabenspezifische Sondermaschine, sondern gemäß den Forderungen aus der Einleitung,

ein „intelligenter mobiler Roboter“ entwickelt werden soll. Dazu muss dieser in der Lage sein, sich beliebig auf der Oberfläche fortzubewegen und zu orientieren. Damit eine solche Bewegung, sowie die beliebige Orientierung und Positionierung des Sensors im Arbeitsraum möglich ist, sind insgesamt sechs Freiheitsgrade notwendig.

Für eine Bewegung in vertikaler oder auch überhängender Positionen ist ein Haftsystem nötig, das auch auf nicht glatten Oberflächen wie Blechstößen, Reparaturstellen und Nietköpfen zuverlässig funktioniert. Die Fortbewegung der Maschine erfolgt durch die abwechselnde Verschiebung von zwei zueinander beweglichen Rahmen, von denen immer jeweils einer fest mit dem Untergrund verbunden ist. Aus diesem Verfahren resultiert eine schrittweise Fortbewegung des Roboters.

Auf Basis von Taktzeitanalysen zu Beginn des Projekts wurde eine Arbeitsraumgröße mit dem Durchmesser von 60cm festgelegt. In diesem Arbeitsraum können insgesamt acht Pocketkanten inspiziert werden, bevor sich der Roboter zur nächsten Messstelle bewegen muss. Aufgrund der Struktur und Anordnungen der Messstellen auf dem Flugzeug lässt sich so eine zeitoptimale Rissprüfung durchführen. Als mechanische Schnittstelle werden sowohl ein Flansch als auch ein zulässiger Bauraum und eine zulässige Gesamtmasse für das Werkzeug definiert. Darüber hinaus existieren auch Schnittstellen für die Energieversorgung und den Informationsaustausch, die ein möglichst breites Spektrum an Aufgaben bzw. Werkzeugen abdeckt. Bei einer Änderung der Aufgabe des Roboters kann innerhalb der Schnittstellenspezifikation das Werkzeug getauscht werden, ohne dass die Struktur der Maschine geändert werden muss.

Als Steuerung des Roboters wird eine Werkzeugmaschinensteuerung verwendet, die industriell bewährte Servoaktoren als Antriebe nutzt. Durch den Einsatz dieser robusten und zuverlässigen Antriebstechnik soll eine spätere Industrialisierung vereinfacht werden. So lassen sich zum einen bereits integrierte Sicherheitsfunktionen nutzen und zum anderen sind die Komponenten gut verfügbar und Ersatzteile können schnell beschafft werden. Ein weiterer Vorteil der Werkzeugmaschinensteuerung liegt in der Verwendung der bewährten Benutzerschnittstellen. So lässt sich der Roboter durch einfache NC-Programme steuern und bewegen. Dies vereinfacht die Einarbeitung in die Steuerung durch das Bedienpersonal und erhöht die Akzeptanz für den Einsatz. Allerdings bietet dieser Ansatz der Verwendung einer Werkzeugmaschinensteuerung auch eine Reihe von Herausforderungen. So ist diese Art der Steuerung nicht für bewegte Maschinen ausgelegt, was ein eigenes Konzept für die Wahl und Lage der Maschinenkoordinatensysteme notwendig macht. Auch die Echtzeitauswertung von Sensordaten für adaptive Bewegungsbahnen ist nur sehr begrenzt verfügbar und muss entsprechend erweitert werden.

4.2 Konstruktion des Demonstrators

Die kinematische Struktur des Roboters, die im Rahmen der Konstruktion als mobiles System realisiert wurde, basiert auf den theoretischen Vorarbeiten aus Kapitel 3. In der nachfolgenden Abbildung ist die mechanische Struktur der verwendeten Hybridkinematik als einfaches CAD-Modell dargestellt. Hier ist der innere Mechanismus vom Typ 3-RRR, der äußere Mechanismus vom Typ 3-RPS, sowie der definierte Bauraum für die Werkzeugaufnahme zu erkennen.

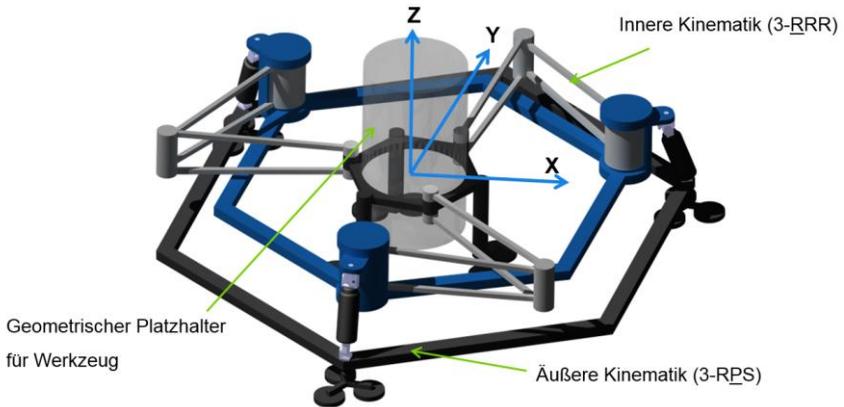


Abbildung 56: Kinematische Struktur des mobilen Roboters als Basis für die konstruktive Entwicklung

Im Rahmen der konstruktiven Entwicklung hat der Mechanismus eine Reihe von verschiedenen Stadien durchlaufen (siehe Abbildung 57). Zu Beginn wurden nach grundlegenden kinematischen Untersuchungen erste Bewegungsstudien durchgeführt. Diese dienten zur Abschätzung realer Kollisionsbereiche aufgrund der räumlich ausgedehnten Struktur und zur Untersuchung von verschiedenen Lager- und Gelenkanordnungen.

Darauf aufbauend wurde ein erster Prototyp des Mechanismus entwickelt. In diesem Modell ist bereits die Antriebstechnik, bestehend aus Servoantrieben und Getrieben, in eine Roboterstruktur aus Aluminiumprofilen integriert. Dieser Aufbau ist dazu genutzt worden erste Versuche mit der NC-Steuerung und praktische Erfahrungen mit der Umsetzung der kinematischen Transformation zu sammeln. Durch den variablen Aufbau aus Aluminiumprofilen konnten geometrische Anpassungen und Varianten leicht umgesetzt und getestet werden.

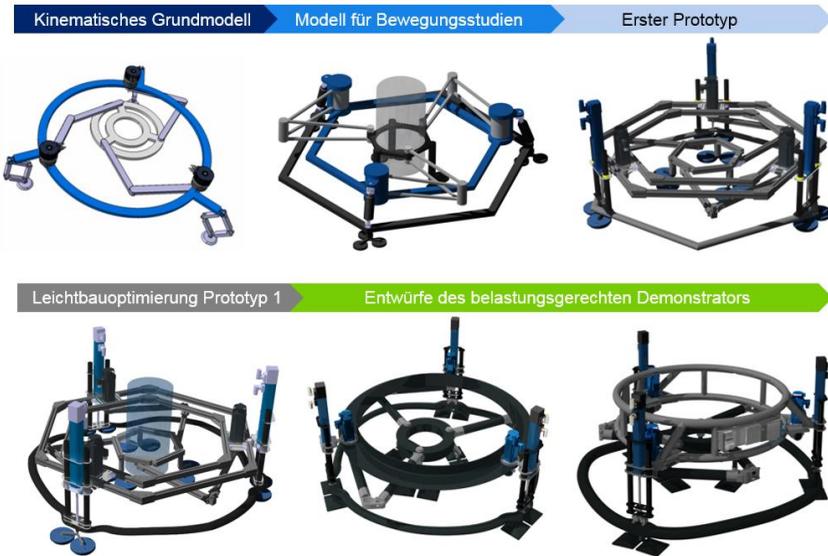


Abbildung 57: Evolution der Konstruktion der mobilen Hybridkinematik

Der nächste Schritt in der Evolution des mobilen Roboters war ein hinsichtlich Leichtbau optimierter und belastungsgerecht gestalteter Prototyp. In diesem Stadium wurden schrittweise die Teilsysteme des Roboters konstruktiv überarbeitet, um sowohl die Struktur und Form als auch die Materialauswahl an die Lastsituation anzupassen. Dabei hat sich die Gestalt des Roboters kontinuierlich fortentwickelt. Die Bauteile aus Aluminiumprofilen wurden durch Integralbauteile aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen oder Aluminiumrohrahmen ersetzt. Durch diese Maßnahmen konnte das Gewicht der Maschine reduziert und die Steifigkeit deutlich erhöht werden.

Haftmechanismus

Neben der Konstruktion und Optimierung der Primärstruktur des Roboters wurden parallel umfangreiche Entwicklungen im Bereich des Haftmechanismus vorangetrieben. Im Zuge dieser Untersuchungen erfolgte auch eine Analyse und Bewertung der verschiedenen Prinzipien für das Haften auf dem Rumpf des Flugzeugs.

Aufgrund der nichtmagnetischen Oberfläche und den wechselnden Lastfällen, bietet ein aktives Vakuumsystem das größte Potenzial für den Einsatzzweck. Dieses wird als quasistatisches System ausgeführt, bei dem die Vakuumsaugfüße an den Dichtungen aufgrund der Offenporigkeit des Materials, einen geringen Leckagestrom aufweisen. Dieser Aufbau ermöglicht eine hohe Dichtkante, die sich durch die sehr hohe Flexibilität des Dichtungsmaterials an jede vorhandene Unebenheit der Oberfläche anpasst. Versuche

haben gezeigt, dass eine ähnliche Formanpassung mit geschlossenenporigen Dichtmaterialien mit den verfügbaren Mitteln nicht zu realisieren ist. Der resultierende Leckagestrom durch das offenporige Material ist im Vergleich zur Verbesserung der Dichtwirkung, infolge der besseren Oberflächenanpassung, zu vernachlässigen.



Abbildung 58: Optimierte Vakuumsaugfüße mit Abstands- und Drucksensoren auf einem überlappenden Blechstoß.

Zur Erreichung der hohen Volumenströme im Moment des Ansaugens, zur schnellen Evakuierung der Saugfüße, wird eine leistungsstarke Ejektorpumpe verwendet. Wegen des geringen möglichen Differenzdrucks wirken sich bei Vakuumverteilungen die Reibungsverluste in den Rohrleitungen stark auf den möglichen Volumenstrom aus. Daher erfolgt die Vakuumerzeugung möglichst nah an den Verbrauchern. Aufgrund des besseren Gesamtwirkungsgrads werden für den Haftmechanismus des Roboters keine Kleinejektoren an jedem Fuß, sondern eine zentrale Vakuumpumpe in die Struktur integriert. Zur Überwachung des Drucks existiert an jedem Saugfuß ein Drucksensor. Darüber hinaus ist auch jeweils ein Ultraschallsensor vorhanden, um den Abstand zur Oberfläche zu messen. Diese Sensoren werden für das Einmessen der Oberfläche und für die Programmadaption bei der Fortbewegung verwendet.

Gesamtsystem

Im Rahmen der Konstruktion wurden auch die peripheren Systeme wie der Vakuumerzeuger, die Ventilinsel sowie Sensor- und Kommunikationsmodule in das Gesamtsystem integriert. Die damit eingehende Planung und Integration der Signal- und Energieleitungen war ein weiterer Schritt zu einem funktionsfähigen Demonstrator. Das Ergebnis der Gesamtkonstruktion ist in Abbildung 59 dargestellt.

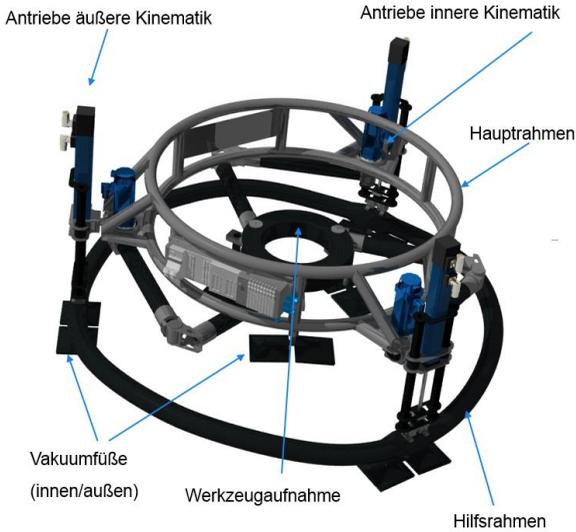


Abbildung 59: Gesamtkonstruktion des belastungsgerechten Demonstrators

Nach Abschluss der Konstruktion wurden die Komponenten und Teilsysteme gefertigt. Dabei waren viele der Teile aufgrund ihrer Komplexität manuell herzustellen. Die Bauteile die aus CFK bestehen, wurden am IFPT produziert. Dies beinhaltet neben dem Fräsen von Formen auch das Laminieren von Bauteilen. In den nachfolgenden Abbildungen sind exemplarisch Fertigungsschritte der Herstellung von Teilkomponenten des Roboters dargestellt.



Abbildung 60: Herstellung von Teilkomponenten des Roboters

Der Demonstrator des mobilen Roboters hat ein Eigengewicht von 75kg und ist in der Lage ein Werkzeug mit einer Masse von bis zu 20kg zu führen. Der Arbeitsraum hat einen Durchmesser von 600mm. Die Störkontur entspricht im normalen Betrieb der Außenkontur des Roboters und hat einen Durchmesser von 1500mm. Bei Bewegungen im Randbereich des Arbeitsraums vergrößert sich der Durchmesser der Störkontur durch das Herausragen der Arme des inneren Mechanismus um weitere 200mm.

4.3 Umsetzung der Robotersteuerung

Im folgenden Abschnitt wird die Umsetzung der Robotersteuerung näher erläutert. Nach einer Vorstellung der Struktur der Werkzeugmaschinensteuerung wird die Implementierung der in Kapitel 3 entwickelten Verfahren dargelegt. Darüber hinaus wird kurz das verwendete Verfahren zur automatischen Programmgenerierung vorgestellt.

4.3.1 Aufbau und Struktur der Werkzeugmaschinensteuerung

Die Robotersteuerung basiert auf einem etablierten NC-Kern, der für den Einsatz in einer Werkzeugmaschine konzipiert ist. In Abbildung 61 ist die Funktionsstruktur für die Umsetzung eines Fahrbefehls in eine Achsbewegung dargestellt.

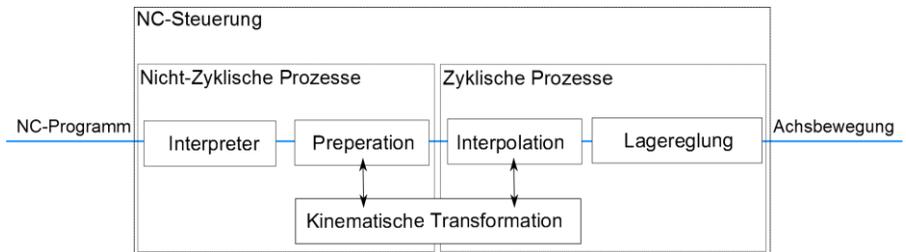


Abbildung 61: Funktionsstruktur einer NC-Steuerung

Grundsätzlich lassen sich die Funktionsbausteine der Steuerung in zyklische und nichtzyklische Prozesse aufteilen. Die nichtzyklischen Prozesse haben die Aufgabe, Befehle aus dem NC-Programm einzulesen und für die anschließenden Prozesse aufzubereiten. Diese Prozesse laufen in der Steuerung mit einer geringen Priorität ab und besitzen Puffer zu den zyklischen, echtzeitfähigen Prozessen. Durch diese wird ein konstanter Datenstrom zu den Echtzeitprozessen gewährleistet. Aufgrund der möglichen Unterbrechung der nichtzyklischen Prozesse wird eine besondere Anforderung an die ausgeführten Programme gestellt. Der enthaltene Code bzw. die verwendeten Funktionen müssen eintrittsinvariant sein. Das bedeutet, dass sich mehrere gleichzeitig ausgeführte Instanzen nicht gegenseitig beeinflussen und auch nach Fortsetzung einer Unterbrechung noch das ursprüngliche Ergebnis liefern.

Die zyklischen Prozesse werden in der Steuerung mit einem festen Systemtakt aufgerufen und werden daher auch als Echtzeit-Prozesse bezeichnet. Sie haben die Aufgabe die Bewegungsbefehle zu erzeugen und in synchronisierte Achsbewegungen umzusetzen. Die feste Zeittaktung der Programmaufrufe ist notwendig, um eine Positionsregelung trotz unterschiedlicher Programmlaufzeiten stabil zu realisieren. Andernfalls würde dies zu unerwünschten Regelabweichungen oder Schwingungen im System führen. Bei der Implementierung von zyklischen Funktionen ist es essentiell, dass sie innerhalb eines Takts vollständig abgearbeitet werden können, da sonst diese klare Zeitbeziehung verloren geht.

Im Folgenden werden kurz die Aufgaben der Teilprozesse in der NC-Steuerung vorgestellt. Ein erstelltes NC-Programm wird zunächst vom Interpreter verarbeitet. In diesem Prozess werden die einzelnen Anweisungen des Programms analysiert und auf syntaktische Fehler überprüft. Darüber hinaus werden auch Kontrollstrukturen und Schleifen innerhalb der Programme ausgewertet und verarbeitet. Das Ergebnis des Interpreters ist dann ein maschinenlesbares Ablaufprogramm mit linearer Struktur ohne Verzweigungen.

Darauf aufbauend werden vom Preperation-Prozess Maschinenfunktionen, wie die Werkzeugkorrektur oder einfache Koordinatentransformationen, durchgeführt. Ebenfalls werden in diesem Prozess die zulässigen Achswinkel, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen überwacht. Dazu ist es notwendig, dass auch in diesem nichtzyklischen Prozess, die kinematische Transformation aufgerufen wird, um die Vorgaben aus dem kartesischen Raum in die Achskoordinatensysteme umzurechnen. Durch die Überwachung wird gewährleistet, dass es beim Abfahren der programmierten Bahn zu keiner Überlastung der Antriebe und damit zu einer Bahnabweichung kommt.

Der erste Echtzeitprozess ist der sich anschließende Interpolator. Dieser führt eine zeitdiskrete Interpolation der Bewegungsbahn entsprechend der programmierten Interpolationsart von einem Zielpunkt zum nächsten durch. Für jeden interpolierten Punkt im kartesischen Raum ist ein vollständiger Satz von Achswinkeln durch die kinematische Transformation zu bestimmen. Das erfordert eine effiziente Berechnung, da diese immer innerhalb der Zykluszeit abgeschlossen sein muss.

Das Ergebnis des Interpolators ist eine Liste von zeitdiskreten Achspositionen, die dann durch die Lageregler der Antriebe als Sollwerte in eine tatsächliche Bewegung umgesetzt werden.

4.3.2 Implementierung der entwickelten Verfahren

Die entwickelten Verfahren werden vollständig in den Prozess der kinematischen Transformation in einem sogenannten Compile-Cycle (CC) innerhalb des NC-Kerns integriert. Dadurch können sowohl die Funktionen von dem nichtzyklischen Prozess der Preparation als auch vom Echtzeitprozess der Interpolation genutzt werden. Außerdem ist gewährleistet, dass die Berechnungsergebnisse in der Bahnvorausplanung und auch in der Erzeugung der Bewegung identisch sind. Dafür muss nicht nur die eigentliche kinematische Transformation der Hybridkinematik innerhalb der Zykluszeit des Interpolators abgearbeitet werden, sondern es erfordert auch die Überwachung der Annäherung an singuläre Bereiche und weitere Sicherheitsfunktionen wie der Kollisionsüberwachung zwischen den bewegten Elementen der Teilmechanismen. In Abbildung 62 sind die Struktur sowie die Anknüpfungspunkte der implementierten Funktionen zum Basissystem der NC-Steuerung dargestellt.

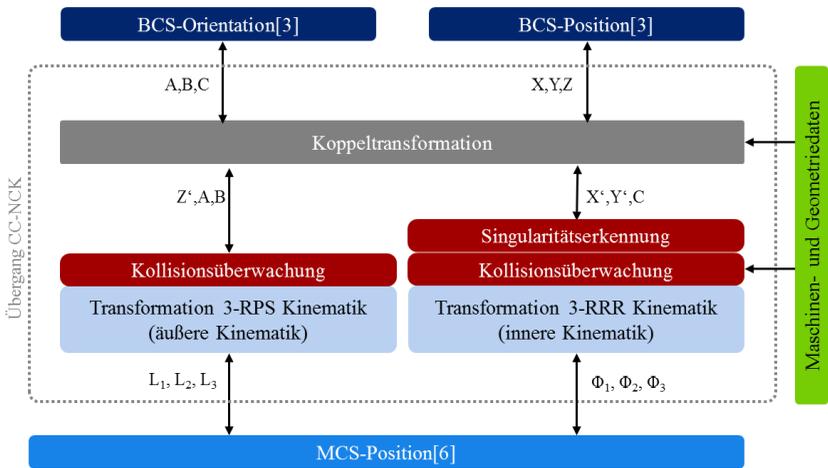


Abbildung 62: Struktur und Schnittstellen des entwickelten Compile-Cycles im NC-Kern

Das Register für die Achspositionen ist ein Vektor und wird als MCS (Machine-Coordinate-System)-Position bezeichnet. Analog dazu wird eine Pose im kartesischen Raum durch die beiden Vektoren BCS (Base-Coordinate-System)-Position und BCS-Orientierung abgebildet. Die Maschinen- und Geometriedaten werden vom Compile-Cycle ebenfalls aus dem Basissystem bezogen. Damit lässt sich eine geometrische Anpassung des Roboters ohne eine Änderung des Programms realisieren.

Innerhalb des Compile-Cycles sind die beiden Teiltransformationen und die Koppeltransformation zu erkennen. Bei den Sicherheitsfunktionen lassen sich sowohl die

Singularitätserkennung als auch die Kollisionsüberwachung auf der Ebene der Teiltransformationen durchführen. Um Rechenzeit zu sparen, ist es für den 3-RPS Mechanismus, mangels Singularitäten im Arbeitsraum, ausreichend, eine Kollisionsüberwachung durchzuführen.

Bei der Kollisionsüberwachung wird neben den zulässigen Achswinkeln bzw. -längen der Antriebe eine Kollision zwischen der Werkzeugaufnahme des Roboters und den Armen des inneren Mechanismus betrachtet. Eine Kollision zwischen anderen Elementen des Roboters ist innerhalb des nutzbaren Arbeitsraums nicht möglich und muss daher auch nicht überwacht werden.

In der Steuerung entsteht so eine modulare Struktur der Teilfunktionen, die eine ressourceneffiziente Berechnung und eine Integration von weiteren Funktionen ermöglicht. Die Auslastung des NC-Kerns mit aktivierter Transformation und Sicherheitsüberwachung liegt bei etwa 33%. Damit ergibt sich eine minimal mögliche Zykluszeit des Interpolators von 1.1ms bei der verwendeten Steuerung. Der typische Interpolationstakt liegt bei 2 bis 4ms, sodass die Berechnung ausreichend schnell erfolgt. Zur Kostenreduktion besteht auch die Möglichkeit auf eine etwas weniger leistungsfähige Steuerung zurückzugreifen.

4.3.3 Automatische Programmerstellung

Die automatisierte Programmerstellung ist ein essentieller Bestandteil des Roboterdemonstrators und hat die Erstellung von Bewegungsbahnen auf der Rumpfoberfläche zum Ziel. Nur so kann sich der Demonstrator automatisiert zu definierten Zielposen bewegen und Messungen durchführen. Die Zielposen für die zu untersuchenden Pocketkanten werden aus den entsprechenden Service-Bulletins entnommen. Für die Programmerstellung sind immer die Kreuzungspunkte zwischen diesen Strukturelementen als mögliche Referenzpunkte relevant. Die relativen Positionen der Referenzpunkte müssen für die Programmierung in kartesische Koordinaten umgerechnet werden. Neben der Position ist darüber hinaus die Orientierung am Zielpunkt notwendig. Diese wird aus der Oberflächennormalen gebildet und repräsentiert eine senkrechte Ausrichtung des Werkzeugs am Zielpunkt.

Da die senkrechte Orientierung zur Oberfläche nicht einfach durch die integrierten Abstandssensoren berechnet werden kann, wurde für die Programmgenerierung der nachfolgend beschriebene Ansatz entwickelt. Der für die Inspektionen relevante Bereich auf dem Flugzeug ist nahezu zylindrisch. Daher wird die Rumpfoberfläche lokal als Zylinder angenähert und diese zu Beginn der Inspektion eingemessen.

Das Einmessen der Oberfläche wird über die an den Vakuumfüßen des Innenrings vorhandenen Abstandssensoren durchgeführt und erfolgt in einem eigenen Programmmodul. Für die Bestimmung eines Zylinders sind mathematisch mindestens 5 Punkte notwendig. Zur Minimierung der Fehlerrate werden für das Einmessen allerdings 21 Messpunkte verwendet. In der nachfolgenden Abbildung sind die abstrahierte Roboterplattform und der als Zylinder angenäherte Flugzeugrumpf zu sehen.

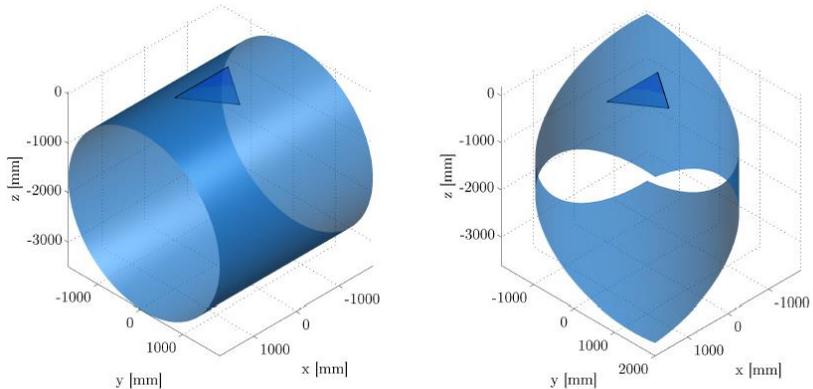


Abbildung 63: *Approximierter Zylinder mit abstrahierter Roboterplattform [Jah14]*

Aus diesen Messpunkten werden zu Beginn der Inspektion automatisch NC-Programme erstellt, die eine gezielte Bewegung in radialer und axialer Richtung auf dem Flugzeug ermöglichen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, dass die initiale Ausrichtung des Roboters auf dem Rumpf stark vereinfacht wird. Dadurch wird die Fehlorientierung rechnerisch über die Zylinderachse kompensiert. Darüber hinaus können die eigentlichen Bewegungsprogramme auf der Steuerung sehr einfach programmiert und erweitert werden, da aufgrund der radialen und axialen Bewegungsbausteine direkt Bewegungen im Stringer und Spant-Koordinatensystem programmiert werden können. Eine tiefer gehende Beschreibung des Verfahrens ist in [Jah14] zu finden.

4.3.4 *Universelle Werkzeugschnittstelle*

Für die Aufnahme von Werkzeugen ist an der Maschine eine universelle Werkzeugschnittstelle geschaffen worden. In Abbildung 64 sind die einzelnen Schnittstellen dargestellt.

Diese werden nach ihrer Art in Energie, Information und mechanische Schnittstellen unterteilt. An elektrischer Energie stehen Spannungen von 24V DC als auch 240V AC zur Verfügung. Darüber hinaus kann auch über die Steuerung geschaltete Druckluft mit 600kPa und Vakuum mit -80kPa bereitgestellt werden.

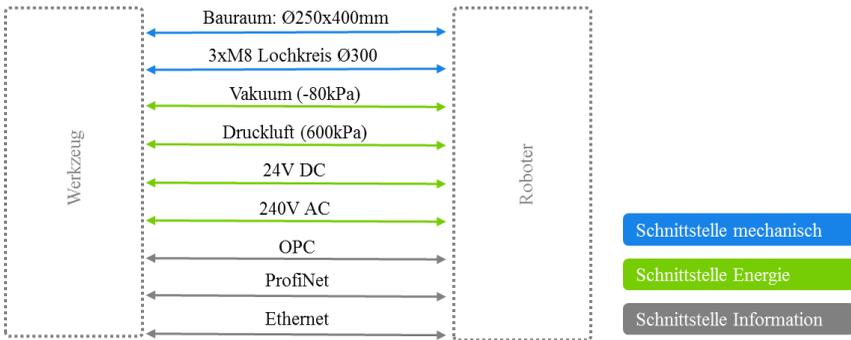


Abbildung 64: Schnittstellen zwischen Roboter und Werkzeug

Zur Übertragung von Informationen ist eine Ethernetleitung vorhanden, über die neben einfacher TCP/IP- und UDP-Kommunikation auch industriell eingesetzte Protokolle wie OPC und ProfiNet verwendet werden können. Für beide Schnittstellen stehen in der Steuerung entsprechende Mastermodule zur Verfügung.

Die mechanische Anbindung des Werkzeugs erfolgt über einen Flansch mit einem Lochkreisdurchmesser von 300mm. Die zulässigen Werkzeugabmessungen liegen bei einem Durchmesser von 250mm und einer Länge von 400mm bei einer maximalen Gesamtmasse von 20kg.

4.4 Praktische Erprobung und Validierung

Die praktische Erprobung des mobilen Roboters wurde in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Phase wurden jeweils Teilsysteme wie Pneumatik, Antriebe und Sensoren oder die Steuerung unter Laborbedingungen getestet. Die zweite Phase diente zur Erprobung der Teilsysteme unter realen Bedingungen am Flugzeug und der Erarbeitung von weiterem Optimierungspotenzials. In der dritten Phase fand die Validierung des Gesamtsystems am Flugzeug statt.

Bei den Laborversuchen wurden Versuche durchgeführt, um festzustellen, ob die sichere Roboterbewegung in Bezug auf die Kollisions- und Singularitätsvermeidung zuverlässig funktioniert. Darüber hinaus sind Messungen durchgeführt worden, um die Positioniergenauigkeit der Maschine zu bestimmen. Dies diente zum einen zur Überprüfung der Transformation und zum anderen der Validierung der eigentlichen mechanischen Konstruktion.

Im Rahmen der praktischen Erprobung am Flugzeug erfolgte eine Validierung der Antriebs- und Strukturauslegung durch Bewegungstest in verschiedenen Lagen am Rumpf. Darüber

hinaus werden das Vakuumsystem, das Einmessen der Oberfläche sowie die automatische Programmerzeugung untersucht. Den Abschluss bildet die automatisierte Abarbeitung einer realen Inspektionsaufgabe, bei der das Inspektionswerkzeug integriert ist.

4.4.1 *Validierung der Kollisions- und Singularitätsvermeidung*

Die Validierung der Sicherheitsfunktionen, die sicherstellen, dass es bei der Bewegung des Roboters zu keinen Kollisionen innerhalb der Struktur oder einer unbeabsichtigten Bewegung in singuläre Bereiche kommen kann, erfolgte im Rahmen von Laborversuchen. Dazu wurden Tests durchgeführt, bei denen die Maschine in nichtzulässige Bereiche bewegt worden ist. Um die verschiedenen Prozesse der NC-Steuerung und deren Zugriffe auf die Sicherheitsfunktionen überprüfen zu können, wurden die Bewegung zum einen über manuelles Verfahren der Achsen und zum anderen durch eine programmierte Bahn ausgeführt. Bei einer Bewegung von Hand erfolgt die Überprüfung im Interpolator-Prozess der Steuerung. Bei programmierten Bewegungen muss die Erkennung der unzulässigen Bewegung bereits im Preperator-Prozess erfolgen. Beide Systeme greifen über den Aufruf des entwickelten Transformationsmoduls auf die Sicherheitsfunktionen zu und müssen zu dem gleichen Ergebnis kommen.

Bei allen Versuchen wurde gezeigt, dass es keinen Unterschied macht, ob eine unzulässige Pose manuell oder durch ein Programm angefahren wird. Bei einer manuellen Fahrt stoppte die Maschine bei Erreichen des unzulässigen Bereichs, bei einer programmierten Bewegung wurde diese erst gar nicht ausgeführt. Das lässt auf die korrekte Überwachung aus dem Preperation-Prozess schließen, da dieser die Überwachung während der Bewegungsplanung ausführt. Für die weiteren Untersuchungen wurde daher nicht mehr zwischen einer programmierten und manuellen Bewegung unterschieden.

Der folgende Test diente der Validierung der Funktion zur Kollisionserkennung. Dazu wurde die Werkzeugplattform in der Nulllage ($X=0$, $Y=0$) soweit um die Z-Achse rotiert, bis die Kollisionserkennung die Bewegung stoppte. In Abbildung 65 ist das Ergebnis für einen zulässigen Winkel zwischen der Werkzeugplattform und dem inneren Arm von 45° dargestellt. Dieser zulässige Wert wurde experimentell ermittelt und berücksichtigt neben der Kollision der Strukturelemente auch zulässige Biegeradien von Kabeln und Leitungen, die an den Gelenken herausgeführt sind.

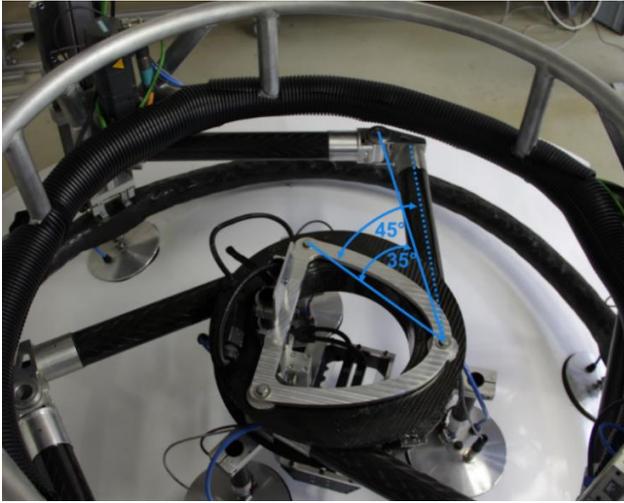


Abbildung 65: Validierung der Kollisionserkennung für einen zulässigen Plattformwinkel von 35°

Durch die konstruktive Gestaltung des inneren Arms liegt zwischen der Verbindungslinie der Gelenke im Modell und der Struktur des inneren Arms ein konstanter Versatz von 10°. Dieser wurde bei der Überwachung berücksichtigt und ließ sich ebenfalls in dieser Messung bestimmen. Die vorgegebenen Winkel stimmten mit einer Genauigkeit von $<1^\circ$ mit den Daten im Modell überein.

In zweiten Test wurde die Funktion der Singularitätsvermeidung validiert. Für diesen Test ist die Werkzeugplattform in Nulllage solange gedreht worden, bis die Singularitätserkennung die Bewegung gestoppt hat. In Abbildung 66 ist links die Pose des Roboters bei Erreichen der Abschaltschwelle und rechts zum einen die zugehörige Konfiguration im Modell und zum anderen die singuläre Orientierung an dieser Position (gestrichelt) dargestellt.

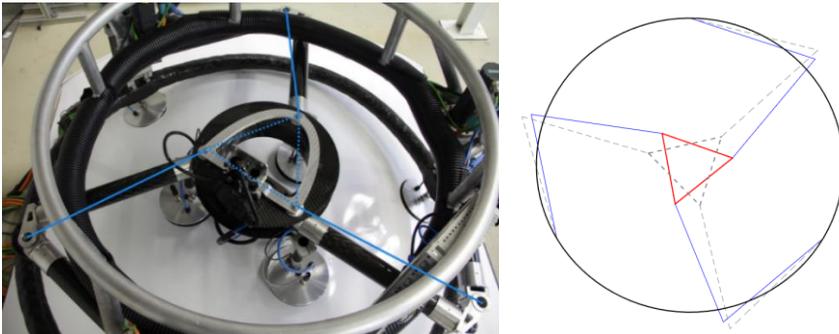


Abbildung 66: Validierung Singularitätsvermeidung mit $D=0.7$

Für eine zulässige Distanz der Nullstellen (vgl. Kapitel 3.3.2) von $D=0.7$ stoppte die Steuerung an dieser Position bei einem Winkel von -80.2° . Berechnet man entsprechend (Formel 3-19) und (Formel 3-18) aus der Distanz D der Nullstellen die theoretische Restdrehung bis zu einer Singularität so erhält man 30.3° . Vergleicht man die so errechnete singuläre Orientierung von 49.9° mit der experimentell ermittelten 47° , so liegt die Abweichung etwas über den theoretisch ermittelten 1.8° . Zur groben Abschätzung ist dieser Unterschied nicht problematisch, da die Maschine immer mit einem deutlich größeren Abstand zu Singularitäten eingesetzt wird. Insgesamt lassen sich aber mit diesen Versuchen zum einen die Funktion der Kollisions- und Singularitätsvermeidung validieren, aber auch die in Kapitel 3.3 entwickelten Ansätze zur Abschätzung der Winkeldistanz zu einer singulären Orientierung.

4.4.2 *Bestimmung und Optimierung der Positioniergenauigkeit*

Bei den Laborversuchen wurde darüber hinaus auch die Berechnung der kinematischen Transformation geprüft und optimiert. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der Positioniergenauigkeit des Roboters. Nach der Fertigstellung des Demonstrators erfolgten verschiedene Messungen, um die Präzision der Bewegung zu beurteilen. Dazu wurde die Position der Werkzeugplattform bei verschiedenen Fahrmanövern, wie Kreis und Kreuzmustern, kontinuierlich aufgezeichnet.

In den ersten Versuchen wurden als Geometrieparameter die idealen Werte aus der Konstruktion verwendet. Diese weichen aber aufgrund von Fertigungs- und Montagetoleranzen von der tatsächlichen Geometrie des Roboters ab. Im nachfolgenden Diagramm sind die Messergebnisse für einen Kreis mit Radius 100mm sowie einer kreuzförmigen Bewegung entlang der X und Y Achse im Bereich von jeweils ± 100 mm dargestellt.

In der Vergrößerung sind die Abweichungen von den Sollpositionen deutlich zu erkennen. Im oberen Bereich sollte die Position (0,100) angefahren werden. Erreicht wird aber die Position (-3.1, 101.7). Daraus ergibt sich eine absolute Abweichung vom 3.5mm als Abstand zur Sollposition. Im rechten Bereich liegt die Sollposition bei (100,0), die tatsächlich erreichte Position liegt bei (98.95, 0.14). Daraus resultiert eine absolute Abweichung von 1.1mm. Durch die Geometrieabweichung der Roboterstruktur entsteht darüber hinaus ein Fehler der Orthogonalität zwischen der X- und Y-Achse von 1.77° .

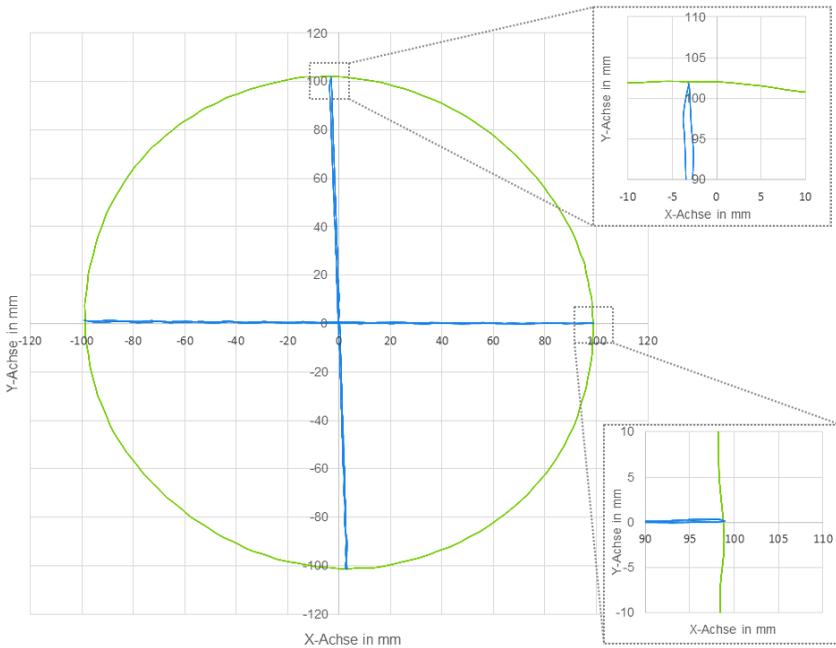


Diagramm 17: Messergebnisse einer kreuz- und kreisförmigen Bewegung mit idealen Geometrieparametern

Die großen Unterschiede in der Absolutabweichung zwischen einer Bewegung in X- und Y-Richtung liegen an der Ermittlung des für den Test verwendeten Koordinatensystems. Dieses wurde mit dem Roboter eingemessen und über die drei angefahrenen Punkte (0,0), (0,100) und (100,0) definiert. Der Ursprung liegt im Punkt (0,0). Die X-Achse liegt genau in Richtung des Punkts (0,100). Die Y-Achse liegt orthogonal zur X-Achse und zeigt in Richtung des Punkts (100,0). Das Koordinatensystem wird so in diese Punkte gelegt, dass ein orthogonales System entsteht. Liegen die Punkte nicht in einem exakten Winkel von 90° zueinander, so befindet sich der Ursprung und die X-Achse auf zwei der drei Punkte, die Y-Achse wird mit minimalem Fehler in Richtung des dritten Punktes interpoliert.

Betrachtet man die Wiederholgenauigkeit des Roboters, so stellt man fest, dass diese sehr gut ist. Dies ist besonders daran zu erkennen, dass sowohl bei der Kreisbahn als auch bei der Kreuzbewegung die relative Abweichung bei den Nulldurchgängen zwischen den Bewegungen im Mittel bei 0.15mm liegt.

Ausgehend von dieser Basis wurde der Roboter vermessen, um so die realen Geometriedaten zu erfassen. Dazu sind die geometrischen Elemente wie die Längen der Arme, die Durchmesser der Werkzeugplattform und der Basis des Roboters genau ermittelt

worden. Zur Kompensation von Fehlern in der Koordinatensystemdefinition wurden alle Größen relativ aufgenommen. Die Position der Rotationsachsen ließ sich mangels einer geeigneten konzentrischen Bohrung in den Achsen nicht direkt bestimmen. Daher sind die Targets für das Messsystem auf den Armen bzw. den Lineareinheiten befestigt worden und die ausgeführten Bewegungen waren kreisförmig. Die Lage der Rotationsachse liegt dann in dem interpolierten Kreismittelpunkt. Aus diesen Kreismittelpunkten lassen sich die Abstände der Achsen berechnen.

In Abbildung 67 ist der Messaufbau für die Vermessung der Robotergeometrie zu sehen. Wegen der besseren Sichtbarkeit der Geometrieelemente wurde der Roboter mit den Saugfüßen an der Wand befestigt.

Die ermittelten Abweichungen liegen im Bereich von 0.5-0.9% des Sollmaßes. Allerdings fällt auf, dass die Streuung innerhalb der, durch die Symmetrie bedingten, theoretisch gleichgroßen Bauteile bzw. Abstände im Bereich von 0.1 bis 0.5% liegt. Da im Modell für die Transformation von einer Symmetrie ausgegangen wird, werden jeweils die Mittelwerte der gemessenen Größen verwendet.



Abbildung 67: Messung der realen Geometrie des Roboters

Im Anschluss an die Vermessung erfolgte eine erneute Messung der absoluten und relativen Positionsgenauigkeit des Roboters. Dazu wurden wie bei der ersten Messung kreis- und kreuzförmige Bewegungsbahnen abgefahren und die Position der Maschine aufgezeichnet. Im Vergleich zur ersten Messung ist hier aber ein größerer Bereich des Arbeitsraums genutzt worden. Bei dem ersten Versuch wurde ein Kreuz mit X und $Y \pm 200\text{mm}$

abgefahren. Die Messergebnisse dieses Versuchs sind im nachfolgenden Diagramm zusammengefasst dargestellt.

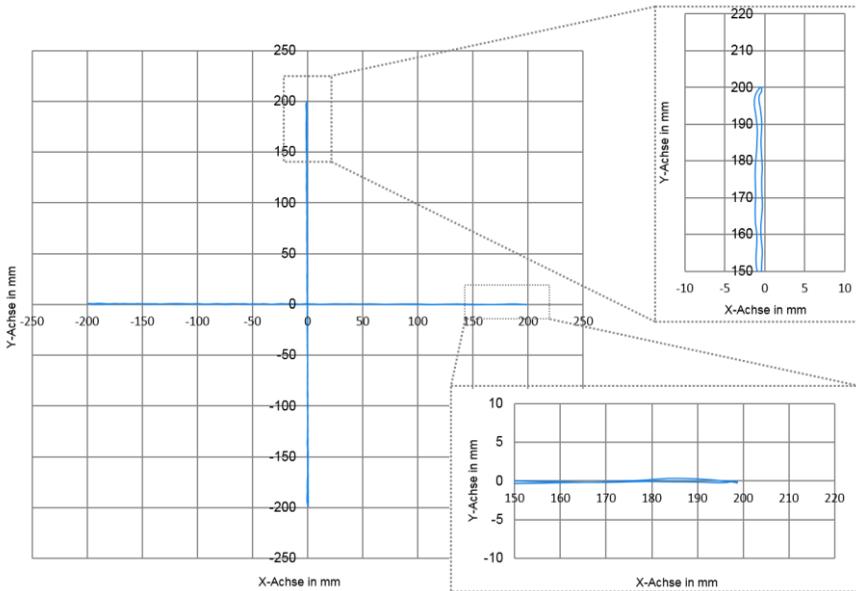


Diagramm 18: Messergebnisse einer kreuzförmigen Bewegung mit eingemessenen Roboterparametern

Insgesamt ist eine signifikante Verbesserung der absoluten Genauigkeit zu erkennen. So liegt die Abweichung im oberen Bereich für die Sollposition (0,200) bei 0.4mm und im rechten Bereich mit der Sollposition (200,0) bei 1.3mm. Darüber hinaus ist der Fehler in der Orthogonalität der Achsen nicht mehr messbar. Weiterhin besteht aber ein Hystereseeffekt bei Bewegungen in Y-Richtung, der aber auf mechanische Einflüsse, wie beispielsweise Spiel in den Lagerstellen, zurückzuführen ist.

Die Bewertung der Genauigkeit von sich wiederholenden Bahnen erfolgt über das mehrfache Abfahren einer Kreisbahn, die in diesem Versuch einen Radius von 220mm hat. Die Messergebnisse sind in Diagramm 19 dargestellt.

In den vergrößerten Ansichten ist zu erkennen, dass die wiederholbare Bahngenauigkeit bei 0.07mm liegt. Die absolute Abweichung der Bahn bewegt sich bei dieser Messung im Bereich von 0.5 bis 0.7mm.

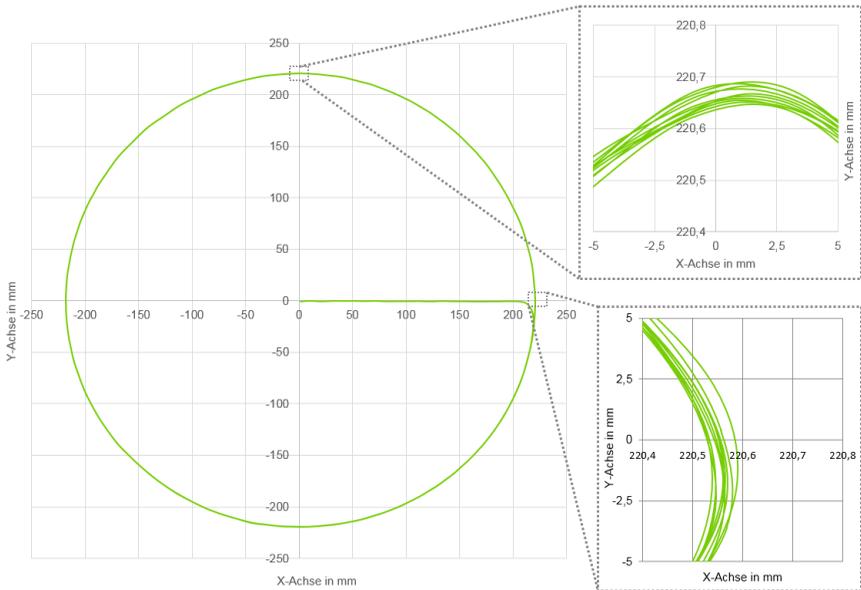


Diagramm 19: Messergebnisse einer Kreisbahn mit eingemessenen Parametern und mehreren Wiederholungen

4.4.3 Funktionstests am Flugzeug

Bei den Versuchen am Flugzeug wurden die Teilsysteme und das Gesamtsystem erprobt und hinsichtlich ihrer Funktionalität überprüft. Im Rahmen dieser Versuche ist die Leistungsfähigkeit des Roboters untersucht und hinsichtlich der Anforderungen an einen intelligenten mobilen Industrieroboter aus Kapitel 1 bewertet worden.

Als erstes wurde das Teilsystem des Haftmechanismus praktisch validiert. Dazu fand eine Reihe von Saugversuchen an unebenen Bereichen des Flugzeugs statt. In den nachfolgenden Abbildungen sind Beispiele der untersuchten Szenarien aus diesen Tests zusammengestellt.

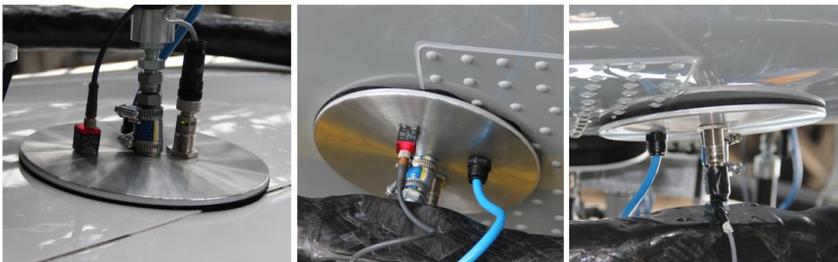


Abbildung 68: Praktische Validierung des Haftmechanismus

Links ist das Ansaugen im Bereich von überlappenden Blechen der Außenhaut des Rumpfes zu sehen. In der Mitte und rechts ist eine Befestigung auf verschiedenen Reparaturblechen mit aufgesetzten Universalkopfnieten dargestellt. Als Kriterium, ob sich der Roboter erfolgreich ansaugen kann, wird das Erreichen eines Mindestvakuums von 50kPa definiert. Dieses Druckniveau wird durch Drucksensoren, die in jeden Saugfuß integriert sind, gemessen und angezeigt. Es konnte nachgewiesen werden, dass ein zuverlässiges Ansaugen in allen relevanten Bereichen des Flugzeugrumpfes möglich ist. Relevante Bereiche sind in diesem Zusammenhang der zylindrische Teil des Rumpfes. An Übergängen zu Elementen wie Passagiertüren, Lade- und Landeklappen oder der Verkleidung der Flügelanbindung kann aufgrund der vorhandenen Spalte kein Vakuum aufgebaut werden. Das Auftreten eines ungenügenden Vakuums in einem der Saugfüße wird aber durch die Drucksensoren detektiert und es wird eine neue Positionierung des Roboters vorgenommen. Zusammenfassend kann daher der Haftmechanismus für den Einsatz am Flugzeugrumpf als erfolgreich validiert bezeichnet werden.

Das zweite Teilsystem, dass bei den Flugzeugtests validiert worden ist, ist das Einmessen auf dem Flugzeugrumpf und daraus abgeleitet die automatische Programmerstellung für Bewegungsbahnen sowie die definierte Ausrichtung des Werkzeugs relativ zur Flugzeugoberfläche. Dafür wurde das in Abschnitt 4.3.3 vorgestellte Verfahren verwendet.

In einem ersten Schritt ist überprüft worden, ob das Referenzieren auf dem Rumpf zuverlässig und hinreichend genau ist. Dazu erfolgte eine Referenzierung an verschiedenen Positionen auf dem Flugzeug und mit unterschiedlichen Orientierungen des Roboters. Alle Versuche wurden im zylindrischen Bereich des Rumpfes durchgeführt, bei dem der theoretische Radius der Boeing 737-500 bei $R_{\text{Flugzeug}} = 1780\text{mm}$ liegen soll. Im nachfolgenden Diagramm sind die Ergebnisse von fünf Messungen dargestellt.

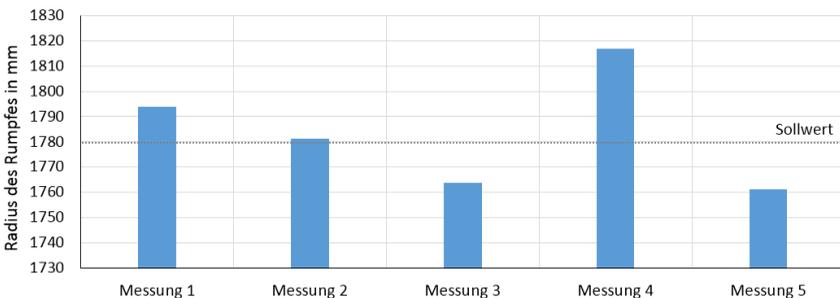


Diagramm 20: Eingemessene Radien des zylindrischen Bereichs einer B737-500

Die mittlere Abweichung des berechneten Radius des Rumpfes vom theoretischen Wert liegt bei diesen Messungen bei 0.2%. Die maximale Abweichung liegt bei 2.0%. Diese

Abweichungen sind für die Berechnung der Krümmung der Oberfläche ausreichend, da auch der reale Durchmesser aufgrund der geometrischen Toleranzen vom theoretischen Wert abweicht.

Im zweiten Schritt wurde überprüft, ob die automatisch in der Steuerung erstellten Programmmodule für eine radiale und axiale Bewegung auf dem Flugzeugrumpf korrekt funktionieren. Diese sind auf Basis des eingemessenen Zylinders berechnet worden. In diesem Versuch wurde eine Roboterbewegung mit sechs Schritten entlang der Flugzeugachse programmiert und die Abweichung der tatsächlichen Bewegung ermittelt. Als Referenz der axialen Bewegung diente der Blechstoß einer Sektion des Rumpfes. In der nachfolgenden Abbildung ist dieser Test zu sehen.

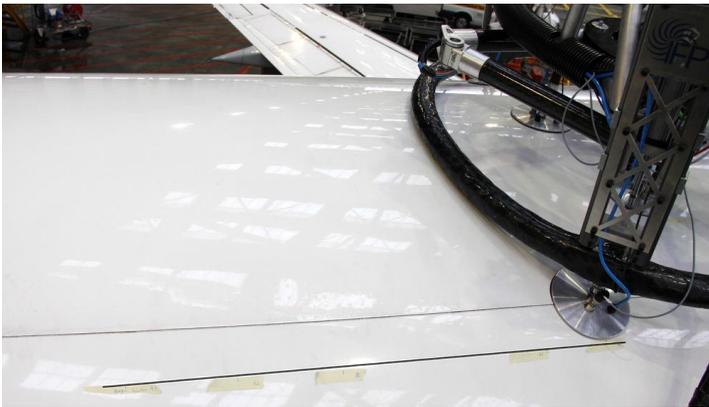


Abbildung 69: Ermittlung der Abweichung bei axialer Fortbewegung auf Basis automatisch berechneter Programmmodule

Nach jedem Schritt wurde die Position eines definierten Saugfußes auf dem Rumpf markiert. Nach insgesamt sechs Schritten wurde die Verschiebung parallel zum axial verlaufenden Blechstoß ermittelt. Die ermittelte Abweichungen lagen im Bereich $< 1\text{cm}$ vom Idealwert. Insgesamt waren die Positionsfehler um die axiale Referenz herum verteilt und es war kein Drift zu beobachten. Somit ist davon auszugehen, dass die Berechnung der Programme selbst, auf Basis des interpolierten Zylinders, sehr genau funktioniert. Bei den gemessenen Fehlern kommen Einflüsse der Elastizitäten der Flugzeugoberfläche und der Roboterstruktur, einschließlich der Vakuumsaugfüße zusammen. Das Teilsystem der Referenzierung und die automatische Programmerstellung lassen sich mit diesem Versuch daher grundsätzlich positiv validieren.

Die für das Einmessen der Flugzeugoberfläche verwendeten Abstandssensoren werden darüber hinaus auch für die Programmadaption verwendet. Dazu wird bei jedem

Absetzvorgang der Vakuumsaugfüße der tatsächliche Abstand zur Oberfläche ermittelt und bei einer Abweichung zu den Sollwerten eine Korrektur durchgeführt. So ist gewährleistet, dass es zu keiner Beschädigung der Oberfläche kommen kann. Im Falle einer Anpassung der Bewegungsbahn wird die neue Position als Ausgangspunkt für die weiterführende Bewegung verwendet, sodass die Adaption zu keiner Verschiebung des Programms führt.

Das dritte Teilsystem, das im Rahmen der Flugzeugtests untersucht wurde, ist die Werkzeugschnittstelle. Hier ist geprüft worden, ob über die implementierten Schnittstellen eine Energieversorgung des Sensors und der Datenaustausch möglich sind. Hinsichtlich der Energieversorgung wurden Druckluft für die Verstellung des Induktors sowie eine Spannungsversorgung für die Kamera verwendet. Der Datenaustausch fand über OPC statt. Hier wurden sowohl Daten vom Sensor an die Steuerung übermittelt, als auch Steuerbefehle an den Sensor. Bei den Tests hatten alle Schnittstellen einwandfrei funktioniert, sodass auch die Werkzeugschnittstelle erfolgreich getestet werden konnte.

Im ersten Test des Gesamtsystems wurde die selbstständige Bewegung des Roboters in eine beliebige Richtung und in beliebiger Lage validiert. Dazu sind Bewegungsprogramme erstellt worden, die sich im oberen Bereich des Flugzeugrumpfs befinden. Bei dieser Lage im Raum hat der Haftmechanismus nur einen geringen Einfluss auf die Funktion der Bewegung und es konnte die grundsätzliche Beweglichkeit untersucht werden. Diese Versuche beinhalteten neben rein translativen Bewegungen in verschiedene Richtungen auch Wechsel der Orientierung des Roboters. Im zweiten Schritt wurden Bewegungen in der Vertikalen und auch über Kopf ausgeführt. Damit konnte das Zusammenspiel der Antriebstechnik, der mechanischen Struktur und des Haftmechanismus untersucht werden. In den nachfolgenden Abbildungen ist der Roboter in fast vertikaler und überhängender Lage am Flugzeugrumpf dargestellt.



Abbildung 70: Bewegung des Roboters in vertikaler und überhängender Lage am Flugzeugrumpf

Die Bewegungsversuche sind insgesamt positiv abgeschlossen worden. Sowohl die Bewegung in beliebiger Richtung, als auch in beliebiger Lage konnten ohne Einschränkungen ausgeführt werden.

Bei einer Fortbewegung in vertikaler Lage war allerdings durch die Verformungen des Roboters und des Flugzeugs ein Drift in Schwerkraftrichtung von wenigen Zentimetern pro Schritt zu erkennen. Bei der Untersuchung der Ursachen wurde das Aufsummieren des Spiels in den Führungen und den Lagern der Linearachsen sowie in den Gelenken der Vakuumsaugfüße als größte Einflussfaktoren des Roboters identifiziert. Durch geringe Wandstärke des Blechs der Flugzeugaußenhaut von 0.8 – 1.2 mm erfolgte aber auch eine elastische Verformung des Flugzeugs. Diese Problematik erfordert u.a. eine konstruktive Überarbeitung von Teilen der Roboterstruktur, um das Spiel zu minimieren. Auf die grundlegende Funktionsweise des Roboters hat dieser Positionsfehler in vertikaler Lage aber keinen Einfluss.

Bei einem abschließenden Versuch des Gesamtsystems am Flugzeug war es das Ziel die Machbarkeit einer automatisierten Inspektion nachzuweisen. Im Rahmen dieses Tests wurde eine Flugzeugprüfung durchgeführt, die auf einer realen Inspektionsvorschrift für den Flugzeugtyp Boeing 737-500 basiert. Da die Zielpunkte der Messungen von außen nicht sichtbar sind, wurden diese vor dem Versuch auf dem Rumpf markiert. So ließ sich, wie in Abbildung 71 dargestellt, die exakte Positionierung überprüfen.

Der Demonstrator musste sich ausgehend von einer Startposition auf dem Rumpf zu verschiedenen Zielpositionen programmgesteuert fortbewegen und Messungen mit dem Thermographiesensor durchführen. Der gesamte Inspektionsprozess lief dabei automatisch ab und hatte folgenden Ablauf:

1. Einmessen des Roboters an der Startposition.
2. Automatische Programmerstellung für die Fortbewegung und Sensorpositionierung auf Basis der Zielposen der Inspektionsvorschrift.
3. Bewegung des Roboters zu der ersten Zielposition.
4. Durchführung aller möglichen Messungen innerhalb des Arbeitsraums.
5. Wiederholung von Schritt 3 und 4 bis zum Abschluss der Inspektion

Bei den Versuchen zeigte sich eine korrekte Funktion des Roboters. Der Sensor wurde im Rahmen der zulässigen Toleranzen auf der Oberfläche positioniert und orientiert, sodass valide Messungen durchgeführt werden konnten. Die Kommunikation und der Datenaustausch zwischen Sensor und Roboter funktionierte einwandfrei, ebenso wie das Einmessen und die automatische Programmerstellung.



Abbildung 71: Validierung des Gesamtsystems anhand einer automatisiert ausgeführten Flugzeuginspektion

Der entwickelte Demonstrator wurde nach der Validierung auf mehreren Fachmessen für Flugzeugwartung und -instandhaltung in Europa und den USA vorgestellt. Dabei hat sowohl das entwickelte Konzept des intelligenten mobilen Industrieroboters als auch die Umsetzung des Demonstrators bei Branchenexperten durchgehend eine positive Einschätzung erhalten. Die gewonnene Aufmerksamkeit zeigt sich auch durch zahlreiche internationale Berichterstattungen [Aer14, Fit15, Hor14, Luf14, Don15].

4.5 Reflektion der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Ergebnisse der praktischen Validierung kritisch reflektiert und hinsichtlich der wissenschaftlichen Aufgabenstellung und den Anforderungen der Flugzeuginspektion bewertet.

In der praktischen Validierung des entwickelten modularen Ansatzes der kinematischen Transformation konnte nachgewiesen werden, dass die Positioniergenauigkeit im Bereich von 0.5 – 0.7mm und die Wiederholgenauigkeit bei 0.07mm liegt. Damit ist die erreichte Genauigkeit in der Größenordnung von stationären Industrierobotern und für die angestrebten Handhabungsvorgänge hinreichend genau.

Zudem wurde gezeigt, dass die Teilfunktionen des Verfahrens zur Überwachung von singularitätsfreien Roboterbewegungen auch im praktischen Betrieb zuverlässig funktionieren. Dies lässt sich dabei sowohl für programmierte als auch manuelle Bewegungen nachweisen. Im Zusammenspiel mit der ebenfalls implementierten Kollisionserkennung wurde so ein umfassendes Sicherheitssystem entwickelt.

Für die geometrische Modellierung von mobilen Hybridkinematiken konnte die Funktion des entwickelten Werkzeugs zur grundlegenden Auslegung der Antriebstechnik und zur Optimierung der mechanischen Struktur nachgewiesen werden. So können neben Belastungsuntersuchungen auch geometrische Parameterstudien und deren Einfluss auf den resultierenden Arbeitsraum des Mechanismus durchgeführt werden. Die Ergebnisse lassen sich auch auf die Praxis übertragen und als Grundlage für die konstruktive Auslegung eines mobilen Hybridmechanismus verwenden.

In den praktischen Versuchen ließ sich zeigen, dass die Dimensionierung der Antriebe für die Fortbewegung in beliebiger Richtung und Lage ausreichend sind. Allerdings wurde festgestellt, dass es bei Fortbewegungen in vertikaler Richtung zu einer Verschiebung des Roboters in Schwerkraftrichtung kommt. Diese tritt immer dann auf, wenn es zu einem Lastwechsel zwischen den Saugfüßen des äußeren Rahmens und denen des inneren Rahmens kommt. Als Ursache für die Abweichung sind überwiegend Verformungen der Flugzeugaußenhaut und Elastizitäten der Lager, Gelenke und Saugfüße des Roboters identifiziert worden. Die aus Leichtbauaspekten verwendeten Kunststoffgleitlager haben hier einen großen Einfluss. Bei der vertikalen Lage summieren sich dann die für sich genommen kleinen elastischen Verformungen zu einer Abweichung von Zentimetern. Dies ist in einer zukünftig konstruktiven Überarbeitung zu optimieren. Dabei müssen zum einen die Lagerstellen steifer ausgelegt werden, zum anderen muss der Roboterschwerpunkt weiter gesenkt werden, um die resultierenden Lagerbelastungen zu verringern.

Das entwickelte Verfahren zum Einmessen des Flugzeugrumpfes und die darauf aufbauende automatische Programmerstellung sind mit einer mittleren Abweichung des ermittelten Radius des Flugzeugrumpfes von 0.2% und einem maximalen Fehler von 2% gegenüber dem theoretischen Wert hinreichend. Daraus resultiert bei einer Bewegung von 600mm auf der Oberfläche ein Fehler der Flächennormalen von 0.37°. Dieser Wert ist für die angestrebte Handhabungsaufgabe ausreichend und unter Berücksichtigung der toleranzbehaftenden Form des Flugzeugrumpfs zu vernachlässigen. Bei der Messung der berechneten Zylinderachse ließ sich keine messbare Abweichung zu der Flugzeugachse ermitteln. In der praktischen Validierung konnte die automatische Programmgenerierung ebenfalls erfolgreich getestet werden. Die erstellten Programmmodule arbeiten zuverlässig und präzise.

Außerdem kann die Maschine sich selbstständig in beliebiger Lage auf großen Strukturen fortzubewegen und kann über Sensoren die Oberfläche wahrnehmen und ihre Bewegungsbahn entsprechend adaptieren. Auch hinsichtlich der notwendigen Aufgabenflexibilität kann der Roboter sowohl verschiedene Werkzeuge aufnehmen und handhaben als auch beliebige Programme abarbeiten. In Bezug auf die Wandlungsfähigkeit besitzt die Maschine Schnittstellen für die einfache Integration in bestehende Systeme zur Planung und Steuerung der Produktion und es sind industriell etablierte Protokolle für den Datenaustausch vorhanden. Durch den konsequenten Einsatz von Hardwarekomponenten aus dem Werkzeugmaschinenbau ist ein geringer Aufwand für Wartung und Instandhaltung der Maschine durch zuverlässige und schnell verfügbare Komponenten gegeben. Damit erfüllt der entwickelte Roboter die in Kapitel 1 erarbeiteten Anforderungen an einen intelligenten mobilen Industrieroboter.

Als Ergebnis der praktischen Erprobung des Gesamtsystems kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Anforderungen der Aufgabenstellung für die automatisierte Rissprüfung von Flugzeugrümpfen aus Aluminium erfüllt worden sind. Es konnte die Machbarkeit einer automatischen Inspektion auf Basis einer realen Inspektionsvorgabe nachgewiesen und das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden.

Die im Rahmen der praktischen Validierung gewonnen Erkenntnisse erlauben auch den Rückschluss, dass der entwickelte Roboter in der Lage ist, sich auch auf anderen großen Bauteilen fortzubewegen und ein Werkzeug innerhalb der festgelegten Spezifikationen positionieren zu können. Eine wichtige Voraussetzung für diese Übertragbarkeit ist aber ein Bauteil mit geschlossener Oberfläche, deren Oberflächenstörungen wie Reparaturbleche oder Nietköpfe, die nicht größer sind als bei Flugzeugenrümpfen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im letzten Kapitel dieser Arbeit werden die Ergebnisse zusammengefasst und mögliches Optimierungspotenzial für weiterführende Untersuchungen im Rahmen eines Ausblicks herausgearbeitet.

5.1 Zusammenfassung

Aufgrund der hohen Nachfrage nach einer Produktivitätssteigerung im Bereich der Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen, steigt auch der Bedarf an Automatisierungslösungen für diese Branchen. Durch die zu Beginn der Arbeit beschriebenen Hemmnisse hinsichtlich notwendiger Arbeitsraumgröße, Losgrößen, geometrischen Toleranzen und langen Produktlebenszyklen, ist eine Automatisierung mit herkömmlichen Mitteln nur schwer wirtschaftlich realisierbar.

Der daraus abgeleitete Bedarf nach intelligenten, mobilen Industrierobotern stellt neue Anforderungen an die kinematische Struktur solcher Maschinen. Besonders mobile Systeme, die sich auf dem Bauteil fortbewegen, lassen sich mit rein seriellen bzw. rein parallelen Mechanismen nicht optimal realisieren. Für die gut geeigneten hybriden Mechanismen existieren aber keine verfügbaren Arbeiten zur kinematischen Modellierung mit dem Fokus auf mobilen Systemen. Daher bildet die Entwicklung von Methoden für diese Modellierung den wissenschaftlichen Kern der Arbeit.

Das erarbeitete Vorgehen zur anforderungsspezifischen Auswahl der Teilmechanismen bietet eine Grundlage für neue Gestaltungsmöglichkeiten bei der Kinematikentwicklung. Es wurde aufgezeigt, welche Kombinationsmöglichkeiten für die gezielte Modellierung der kinematischen Eigenschaften von hybridkinematischen Strukturen bestehen. Die entwickelte Herangehensweise für die modulare Berechnung der Transformation von Hybridmechanismen ist ein effizienter Berechnungsansatz. Mithilfe der Methode lassen sich die Lösungen des kinematischen Problems bei dieser Art von Mechanismen einfacher berechnen und die spezifischen Eigenschaften der Modularität des kinematischen Aufbaus besser nutzen.

Die Berechnung der Annäherung an eine Singularität bei planaren Parallelmechanismen ist ein neuartiges Verfahren. Es wurde die grundlegend neue Idee vorgestellt, Aussagen zur Annäherung an Singularitäten zu treffen, ohne die Jacobimatrix eines Mechanismus auszuwerten. Das Verfahren eignet sich dabei besonders für die Onlineberechnung. Zudem kann es auch eine geometrische Abschätzung über die Entfernung zu einer Singularität treffen.

Das entwickelte Werkzeug für die strukturelle Auslegung und Optimierung von mobilen Maschinen zeigt, dass eine grundlegende Auslegung über ein mechanisches Ersatzmodell möglich ist. Es lassen sich damit auch einfache Bewegungsanalysen bei verschiedenen Lastsituationen und Betriebszuständen durchführen. Zur Optimierung der geometrischen Designparameter des Mechanismus werden zwei Strategien vorgestellt, mit denen sich je nach Aufgabe die ideale Roboterkonfiguration identifizieren lässt.

Im Rahmen der Arbeit wurden die erarbeiteten Verfahren zur Modellierung von mobilen Hybridkinematiken mit der Entwicklung eines Demonstrators in die Praxis überführt und am Beispiel einer Aufgabe aus der Flugzeuginspektion praktisch validiert. Der entwickelte Demonstrator besitzt eine hybridkinematische Struktur und hat sechs Freiheitsgrade. Diese sind ohne redundante Antriebe sowohl für die Fortbewegung als auch für die Werkzeugpositionierung nutzbar. Der Roboter verfügt über einen leistungsfähigen, auf Vakuum basierenden Haftmechanismus, der eine Bewegung in beliebiger Lage und beliebiger Richtung auf dem Flugzeugrumpf ermöglicht. Darüber hinaus können durch Sensoren die Oberfläche erfasst und Bewegungen adaptiv angepasst werden. Aus den Sensordaten werden auch automatisch Programmmodule für die Fortbewegung und Positionierung des Werkzeugs errechnet. Durch universelle Hard- und Softwareschnittstellen lässt sich mit dem Roboter ein weites Spektrum von Werkzeugen nutzen und die damit möglichen Aufgaben erfüllen.

Bei der praktischen Validierung des Roboterdemonstrators wurde gezeigt, dass er den definierten Anforderungen an einen intelligenten mobilen Industrieroboter gerecht wird. Die Erkenntnisse dieser Arbeit bieten für die Produktion und Instandhaltung von Großstrukturen neue Lösungsansätze der Prozessautomatisierung.

5.2 Ausblick

Im Rahmen dieses Kapitels wird ein Ausblick für weiterführende Arbeiten gegeben. Es werden Ansätze aufgezeigt, um die gewonnen Erkenntnisse zu vertiefen und diese auf andere Problemstellungen zu übertragen.

Das in dieser Arbeit erarbeitete Verfahren zur Auswahl der Teilmechanismen einer Hybridkinematik ist ein erster qualitativer Ansatz der systematischen Modellierung von kinematischen Eigenschaften eines hybriden Mechanismus. Der Fokus liegt hier primär auf der Größe des Arbeitsraums bei gleichzeitig geringem Gewicht des Mechanismus, da diese Eigenschaften für die Entwicklung eines mobilen Systems hohe Priorität haben. Der Einfluss der Kopplungsart der Teilmechanismen wird untersucht und die Möglichkeiten der Arbeitsraummodellierung werden diskutiert. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass dies

für mobile Hybridmechanismen ausreichend ist. Allerdings existieren weitere Anwendungsfälle, die wiederum andere kinematische Eigenschaften, wie beispielsweise eine hohe Präzision oder hohe Steifigkeit, als Fokus haben. Die Einflüsse dieser Anforderungen müssen in weiterführenden Arbeiten untersucht werden. Auch eine Quantifizierung der Auswahl sowie die Entwicklung einer umfassenden Methodik zur anwendungsspezifischen Auswahl von Teilmechanismen ist ein interessanter Ansatzpunkt für weitere Forschung.

Sollen in der Zukunft auch Bearbeitungsaufgaben mit dem Roboter durchgeführt werden, so ist aber eine zusätzliche Steigerung der Präzision notwendig. Dies erfordert, wie in Kapitel 4.5 erläutert, eine Optimierung der mechanischen Roboterstruktur und darüber hinaus auch eine Genauigkeitssteigerung der Transformation. So müssen fertigungstechnisch die Geometrieabweichungen der Bauteile und konstruktiv das Spiel der Lager und Gelenke verringert werden. Auf der Seite der Steuerung gibt es zwei Möglichkeiten, die Genauigkeit zu verbessern. Die Positioniergenauigkeit des Roboters kann durch ein präzises Vermessen von Punkten im Arbeitsraum und anschließender Kompensation der Abweichung in die Größenordnung der Wiederholgenauigkeit gebracht werden.

Die zweite Möglichkeit ist eine Erweiterung der Optimierung, die in Kapitel 4.4.2 durchgeführt worden ist. In den Versuchen wurde die Geometrie des Roboters hochgenau vermessen. Durch die Annahme einer Symmetrie der kinematischen Ketten bei der Berechnung der Transformationen können immer nur die Mittelwerte der gemessenen Längen und Abstände in der Rechnung berücksichtigt werden. Die notwendige Auflösung der kinematischen Symmetrie einer Transformation bietet einen weiteren interessanten Ansatzpunkt für weiterführende Arbeiten. Da die Annahme einer Symmetrie das mathematische Modell der Mechanismen sehr stark vereinfacht, führt entsprechend die Auflösung zu einer enormen Vergrößerung des Berechnungsaufwands. Im Zuge der weiterführenden Forschung ist es eine Herausforderung, die nichtsymmetrische Transformation hinsichtlich der Rechenzeit zu optimieren, um weiterhin eine Echtzeitberechnung zu gewährleisten. Dieser Ansatz ist insofern interessant, da sich mit diesem Verfahren nicht nur die Positioniergenauigkeit verbessern lässt, sondern auch die Wiederholgenauigkeit.

Die vorgestellte Methode zur Überwachung von singularitätsfreien Roboterbewegungen lässt sich prinzipiell auch auf andere Mechanismen übertragen. Der grundsätzliche Ansatz, dass zwischen den Lösungen der Schließbedingung bei der Vorwärtstransformation eine singuläre Pose vorliegt, gilt für alle parallelkinematischen Mechanismen. Allerdings

müssen hinsichtlich der geometrischen Interpretation der Abstände Einschränkungen gemacht werden. So ist ein geometrischer Rückschluss nur bei Mechanismen möglich, bei denen sich die Lösung des direkten kinematischen Problems durch ein univariantes Polynom ausdrücken lässt. Bei allen anderen Mechanismen lassen sich aber relative Aussagen zur Annäherung an eine singuläre Pose treffen, die für eine einfache Sicherheitsfunktion ausreichend wären. Im Rahmen von weiterführenden Forschungsarbeiten kann eine Übertragbarkeit der Methode auf serielle Mechanismen untersucht werden. Hier müssten die Informationen aus der mehrdeutigen Lösungen der Rückwärtstransformation, und damit den möglichen Roboterkonfigurationen, gewonnen werden. Dies ist dadurch bedingt, da bei seriellen Mechanismen die Lösung des direkten kinematischen Problems in der Regel eindeutig ist und daher auch keine Singularitäten aufweist.

6 Literaturverzeichnis

- [Aer11] Aero News Network: Airbus Single Aisle Production To Increase To 42 Per Month In Q4 2012. Reflects Strong Order Backlog And Continued Stable Growth. In Aero News Network. 23.05.2011.
- [Aer14] Aerosieger: MORFI detektiert Strukturrisse im Flugzeugrumpf über Infrarot. In Aerosieger - Das Luftfahrt Magazin. 06.10.2014.
- [ACK98] Alberts, C. J. et al.: Automated Inspection of Aircraft. In Federal Aviation Administration. 1998.
- [Als15] Alstom Inspektion Robotics: BIKE Platform, 2015 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://inspection-robotics.com/products/bike-platform/>.
- [AnLo92] Angeles, J.; Lopez-Cajun, C. S.: Kinematic Isotropy and the Conditioning Index of Serial Robotic Manipulators. In The International Journal of Robotics Research, 1992, Vol. 11; S. 560–571.
- [ASD14] ASD Europe: Umsatz der europäischen Luft- und Raumfahrtindustrie in den Jahren 2005 bis 2013 (in Milliarden Euro), Statista - Das Statistik-Portal., 2014 [Zugriff am: 11.02.2015]. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/30811/umfrage/umsatz-der-europaeischen-luft--und-raumfahrtindustrie>.
- [BaBa00] Bar-Cohen, Y.; Backes, P.: Scanning large aerospace structures using open-architecture crawlers, NSMMS Symposium Vol 27, 2000
- [Ber15] Berufsgenossenschaft Holz und Metall BGHM: Ergonomie und Arbeitsplatzgestaltung, 2015 [Zugriff am: 12.02.2015]. Verfügbar unter: <http://www.bghm.de/arbeits-schuetzer/fachinformationen/ergonomie-und-arbeitsplatzgestaltung.html>.
- [BiJi11] Bi, Z. M.; Jin, Y.: Kinematic modeling of Exechon parallel kinematic machine. In Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, Vol. 27; S. 186–193.
- [Bie06] Bier, C. C.: Geometrische und physikalische Analyse von Singularitäten bei Parallelstrukturen. Vulkan-Verl., Essen, 2006.
- [Boe10] Boeing: Service Bulletin 737-53A1301 FUSELAGE - Skin - Cracks at Chem-milled Steps in Crown Skins at Specified Locations- Inspection, 2010
- [Bog10] Bogue, R.: The role of robotics in non-destructive testing. In Industrial Robot: An International Journal. 2010; S. 421–426.
- [Bon08] Bonev, I.: Direct kinematics of zero-torsion parallel mechanisms: Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, 2008; S. 3851–3856.

- [Buc10] Buckley, J.: A robot inspector of aircraft wings and fuselage, 2010 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: http://cordis.europa.eu/result/rcn/85695_de.html.
- [Bun14a] Bundesagentur für Arbeit - Gesamtmetall: Altersstruktur der Beschäftigten in der Metall- und Elektroindustrie in Deutschland in den Jahren 2000, 2007 und 2013, Statista - Das Statistik-Portal, 2014
- [Bun14b] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Die Luftfahrtstrategie der Bundesregierung, 2014 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/J-L/luftfahrtstrategie-der-bundesregierung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- [Bun14c] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Branchenfokus Maritime Wirtschaft. Werften/Schiffbau, 2014 [Zugriff am: 11.02.2015]. Verfügbar unter: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Wirtschaft/branchenfokus,did=196312.html>.
- [Bun12] Bundesverband WindEnergie: Anzahl der Beschäftigten in der Windindustrie in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2012, Statista - Das Statistik-Portal, 2012 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/162646/umfrage/anzahl-der-beschaeftigten-der-windindustrie-von-2004-bis-2009/>.
- [Car15] Cardona Gutierrez, Manuel Napoleon: Dimensional Synthesis of 3RRR Planar Parallel Robots for Well-Conditioned Workspace. In IEEE Latin America Transactions, 2015, Vol. 13; S. 409–415.
- [com15] comSpace: Meyer Werft GmbH, 2015 [Zugriff am: 12.10.2015]. Verfügbar unter: <https://www.comspace.de/de/referenzen/production-service/meyer-werft>.
- [CoKe14] Corves, B.; Kerle, H.: Getriebetechnik. In (Grote, K.-H.; Feldhusen, J. Hrsg.): Dubbel. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014; S. 603–613.
- [Cyb11] Cybernetix: MHC - Magnetic Hull Crawler, 2011 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.cybernetix.fr/en/node/1004>.
- [DeHa55] Denavit, J.; Hartenberg, R. S.: A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. In ASME Journal of Applied Mechanics, 1955, Vol. 1955; S. 215–221.
- [Deu09b] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Technologieentwicklung und CO₂-Emissionen des Luftverkehrs bis 2050, 2009 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: http://www.dlr.de/fw/Portaldata/42/Resources/dokumente/pdf_dokumente/5PR_01_LF_Technologieentwicklung.pdf.
- [DIN14] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN ISO 8373:2010 Roboter und Robotikgeräte — Wörterbuch. Beuth Verlag GmbH, 2014.

-
- [Don15] Donner, R.: How Technology Has Prompted Innovation. In AviationPros. 16.07.2015.
- [dpa13] dpa: Nordex stellt Produktion in den USA ein. In Manager Magazin. 28.06.2013.
- [dpa15a] dpa: Flugzeugbauer schwingt zu neuen Höhen auf. In Handelsblatt. 28.01.2015.
- [dAa14] dpa; AFP; airliners.de: Airbus kann für 2013 Rekordergebnisse verbuchen. In airliners. 13.01.2014.
- [dpRe15] dpa; Reuters: Bombardier - Kampfansage an Airbus und Boeing. In Handelsblatt. 14.06.2015.
- [Dud15] Duden.de: Wörterbucheintrag "singulär", 2015 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.duden.de/node/641864/revisions/1605642/view>.
- [ErGo95] Erlbacher, E. A.; Gorwin, L. E.: Automated Scarfing and Surface Finishing Apparatus for Complex Contour Composite Structures, PushCorp, Inc., 1995
- [Fed91] Federal Aviation Administration - U.S. Department of Transportation: Programm Plan - National Aging Aircraft Research Program, U.S. Department of Transportation, 1991
- [Fel11] Felder, W. N.: Barriers to Automation of Aircraft Production. Extreme Manufacturing – What are the technology needs for long-term US Manufacturing Competitiveness?, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, Maryland, 2011.
- [Feu15] Feucht, F.: Mobile und stationäre ULTRASONIC-Bearbeitung von Composites für MRO und Produktion, 2015
- [Fit15] Fitzsimons, B.: Sounds ultra advanced. In Aerospace Testing International, 2015, Vol. 2015; S. 50–56.
- [Flu13] Flug Revue: Boeing 737-100, 2013 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.flugrevue.de/zivilluftfahrt/flugzeuge/boeing-737-100/469525>.
- [Fra12] Fraunhofer IFF: Factories of the future: Mobile manipulators for aerospace production, 2012, Firmenschrift
- [Geo13] Georgeson, G.: Trends in R&D for Nondestructive Evaluation of In-Service Aircraft. 5th International Symposium on NDT in Aerospace, Singapur, 2013.
- [Gil10] Gil, C. O.: Remote-Controlled Tower Maintenance. In windssystemsmag. August 2010; S. 52–55.

- [Gog09] Gogu, G.: Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 2: Translational Topologies with Two and Three Degrees of Freedom. Springer Netherland, Berlin, 2009.
- [Gog10] Gogu, G.: Topologies with planar motion of the moving platform. Springer, New York, 2010.
- [GPS06] Goldstein, H.; Poole, C. P.; Safko, J. L.: Klassische Mechanik. Wiley-VCH, Weinheim, 2006.
- [Gon13] Gonzalez-de-santos, P.: Pablo Gonzalez-de-Santos' Home Page [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.car.upm-csic.es/fsr/gds/index.html>.
- [Gos90] Gosselin, C.: Stiffness mapping for parallel manipulators. In IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, Vol. 6; S. 377–382.
- [GoAn90] Gosselin, C.; Angeles, J.: Singularity analysis of closed-loop kinematic chains. In IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, Vol. 6; S. 281–290.
- [GWI02] Guilin, Y.; Weihai, C.; I, M. C.: A geometrical method for the singularity analysis of 3-RRR planar parallel robots with different actuation schemes: Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on, 2002; S. 2055–2060.
- [Har14] Hartbrich, I.: Airbus geht neue Wege in der Flugzeugproduktion. In VDI-Nachrichten. 23.Mai 2014; S. 1.
- [Has11] Hashmi, N.: Revisiting Aloha Airline Flight 243: Corrosion Engineer's Stand point, Islamabad, Pakistan. School of chemical and materials engineering, 2011.
- [Hen13] Henningsen, A. W.: Jahresbericht 2013, Lufthands Technik AG, 2013, Firmenschrift
- [Hen08] Hensel, S.: Modellierung und Optimierung von Werkzeugmaschinen mit parallelkinematischen Strukturen. Verl. Wiss. Scripten, Zwickau, 2008.
- [HöSc14a] Höfener, M.; Schüppstuhl, T.: A method for increasing the accuracy of "on-workpiece" machining with small industrial robots for composite repair. In Production Engineering - Research and Development - Assembly, Handling and Industrial Robotics.
- [HöSc14b] Höfener, M.; Schüppstuhl, T.: Small Industrial Robots for On-Aircraft Repair of Composite Structures. 45th International Symposium on Robotics / 8th German Conference on Robotics, München, 2014.
- [Hor14] Horwitz, D.: Robotic renaissance. In Airline Fleet Management. 18.11.2014.
- [HYL12] Hu, B. et al.: Statics and Stiffness Model of Serial-Parallel Manipulator Formed by k Parallel Manipulators Connected in Series. In Journal of Mechanisms and Robotics, 2012, Vol. 4; S. 21012.

- [IWR15] IWR Online: Deutsche Windtechnik erklimmt die Spitze, 2015 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.iwr.de/news.php?id=28185>.
- [Jah14] Jahn, F.: Entwicklung einer Simulationsumgebung zur Berechnung von frei definierbaren Trajektorien eines mobilen Roboters auf unbekanntem zylindrischen Oberflächen. Bachelorarbeit, Hamburg. Institut für Flugzeug-Produktionstechnik, 2014.
- [JNM13] Jandke, H.; Nodorp, R.; Meyer zu Bergsten, K.: Zur Lage des deutschen Schiffbaus 2013, Verbandes für Schiffbau und Meerestechnik e. V. (VSM), 2013
- [Kap91] Kaplan, W.: Advanced calculus. Addison-Wesley, Advanced Book Program, Redwood City, Calif, 1991.
- [KePi98] Kerle, H.; Pittschellis, R.: Einführung in die Getriebelehre. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1998.
- [Kir13] Kirschfink, F.-J.: New MRO – Extending Competence to New Aircraft Types. 4th International Workshop on Aircraft System Technologies, Hamburg, 2013.
- [Kre94] Kreuzer, E.: Industrieroboter. Technik, Berechnung und anwendungsorientierte Auslegung. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [Kuk13] Kuka Roboter GmbH: Kein Job zu Groß, kein Weg zu weit: Die Konzeptstudie "moiros", 2013 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: http://www.kuka-robotics.com/res/sps/a737ee03-5832-4c95-9d91-84e0de80c664_moiros_DE.pdf.
- [LCR14] LCR-Systems: Laser Coating Removal Robot, 2014 [Zugriff am: 11.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.lcrsystem.com/>.
- [Lee00] Lee, J.: Investigation of quality indices of in-parallel platform manipulators and development of web based analysis tool. Dissertation, Florida, 2000.
- [Luf14] Lufthansa Technik AG: Roboter mit Durchblick, Lufthansa Technik AG, 2014 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.lufthansa-technik.com/de/tcd>.
- [MCF10] Marguet, B. et al.: Crawler Robots for Drilling and Fastener Installation: An Innovative Breakthrough in Aerospace Automation. SAE International, 2010.
- [Max73] Maxwell, J. C.: Does the progress of Physical Science tend to give any advantage to the opinion of Necessity (or Determinism) over that of the Contingency of Events and the Freedom of the Will?, 1873 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://w3.pppl.gov/~hammett/Maxwell/freewill.html>.
- [Mer06] Merlet, J.-P.: Parallel robots. Springer, Dordrecht, 2006.

- [mTo15] mTorres: Flexible Drilling Head, 2015 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/carbon-fiber/flexible-drilling-head>.
- [NaBa11] Nasa, C.; Bandyopadhyay, S.: Trajectory-tracking control of a planar 3-RRR parallel manipulator with singularity avoidance: Thirteenth World Congress in Mechanism and Machine Science 2011.
- [Nat13] National Robotics Engineering Center: Laser Coating Removal for Aircraft, 2013 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.nrec.ri.cmu.edu/projects/ctc/description/>.
- [Nat88] National Transportation Safety Board: Aloha Airlines, Flight 243, Boeing 737-200, N73711, USA, 1988.
- [NRA08] Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. Hrsg.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. PZH Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen, 2008.
- [OHA06] Oetomo, D. et al.: Direct Kinematics and Analytical Solution to 3RRR Parallel Planar Mechanisms: Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV '06. 9th International Conference on, 2006; S. 1–6.
- [Ola13] Olaf Preuß: Die Traumschiff-Fabrik mit vollem Auftragsbuch. In Hamburger Abendblatt. 12.10.2013.
- [OuWi10] Ouarda Ibrahim; Wisama Khalil: Inverse and direct dynamic models of hybrid robots. In Mechanism and Machine Theory, 2010, Vol. 45; S. 627–640.
- [Put88] Putzmeister AG: Skywash - Großroboter von Putzmeister. 1988 - der Zukunft voraus, 1988 [Zugriff am: 02.09.2015]. Verfügbar unter: http://www.pmw.de/cps/rde/xchg/pm_online/hs.xml/3637_DEU_HTML.htm.
- [QFG12] Qu, H.; Fang, Y.; Guo, S.: Parasitic rotation evaluation and avoidance of 3-UPU parallel mechanism. In Frontiers of Mechanical Engineering, 2012, Vol. 7; S. 210–218.
- [Ram13] Ram, M.: Analyse und konstruktive Modellierung einer parallelen Leichtbaukinematik innerhalb eines mobilen Robotersystems für die Flugzeug-Produktion. Studienarbeit, Hamburg. Institut für Flugzeug-Produktionstechnik, 2013.
- [Reu15a] Reuters: Airbus muss Produktion des A320 ausweiten. In Handelsblatt. 28.05.2015.
- [Reu15b] Reuters: Order-Boom bringt Flugzeugfabriken an ihre Grenzen. Airbus vs. Boeing. In Handelsblatt. 13.06.2015.
- [Ric00] Richter, G.: Psychische Belastung und Beanspruchung. Forschungsergebnisse in der Praxis. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2000.

- [RoSt12] Rolf, M.; Steil, J. J.: Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the Bionic Handling Assistant: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012); S. 3440–3446.
- [RöKr13] Röstermundt, D.; Krombholz, C.: GroFi - Large-Scale Parts in Fiber Placement Technology, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2013
- [Sae15] Saenz, J.: Project Valeri - Validation of Advanced, Collaborative Robotics for Industrial Applications, Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF, 2015 [Zugriff am: 02.09.2015]. Verfügbar unter: <http://www.valeri-project.eu/>.
- [Sch08] Schenck, C.: Einsatz bewegungsreduzierender Hybridkinematiken für die Hochgeschwindigkeits-Fräsbearbeitung. Shaker, Aachen, 2008.
- [Sch15] Schürmeyer, J.: Lürssen Werft setzt auf Wachstum in Lemwerder. In NWZ. 20.01.2015.
- [Sco07] Scorpecci, D.: Compensated Gross Ton (CGT) System. OECD - Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2007
- [See02] Seestadt Bremerhaven: Exklusiver Hingucker „Luna“: Größte Expeditionsjacht der Welt wird in Bremerhaven umgebaut, 2002 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.bremerhaven.de/>.
- [SSC07] Shang, J. et al.: Design of a climbing robot for inspecting aircraft wings and fuselage. In *Industrial Robot: An International Journal*. 2007; S. 495–502.
- [Sho06] Sholl, P.: Automated manufacture, productivity and profitability in the global aerospace industry. In *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2006, Vol. 78.
- [SGP98] Siegel, M.; Gunatilake, P.; Podnar, G.: Robotic assistants for aircraft inspectors. In *Industrial Robot: An International Journal*, 1998, Vol. 25; S. 389–400.
- [SKA93] Siegel, M.; Kaufmann, W.; Alberts, C.: *Mobile Robots for Difficult Measurements in Difficult Environments: Application to Aging Aircraft Inspection*, Pittsburgh, Pennsylvania, 1993.
- [Sie12] Siemens: Rekord-Windturbine mit 154 Meter großen Rotoren, 2012 [Zugriff am: 19.02.2015]. Verfügbar unter: http://www.siemens.com/innovation/de/news/2012/inno_1223_2.htm.
- [Sta15] Staicu, S.: Kinematics modelling of a spatial two-module hybrid parallel robot. In *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 2015, Vol. 2015; S. 3–12.
- [Swi15] Swiss-Composite: Faserverbund-Werkstoffdaten [Zugriff am: 18.02.2015]. Verfügbar unter: <http://www.swiss-composite.ch/>.
- [Tan00] Tanio K. Tanev: Kinematics of a hybrid (parallel–serial) robot manipulator. In *Mechanism and Machine Theory*, 2000, Vol. 35; S. 1183–1196.

- [Wan89] Wanner, M.-C.: Rechnergestützte Verfahren zur Auslegung der Mechanik von Industrierobotern. Springer, Berlin, New York, 1989.
- [Web09] Weber, W.: Industrieroboter. Methoden der Steuerung und Regelung. Hanser, München, 2009.
- [Whi05] White, T. S.: A Mobile Climbing Robot for High Precision Manufacture and Inspection of Aerostructures. In The International Journal of Robotics Research, 2005, Vol. 24; S. 589–598.
- [WiSh97] Williams, R. L.; Shelley, B. H.: Inverse kinematics for planar parallel manipulators: Proceedings of ASME Design Technical Conferences, 1997; S. 14–17.
- [Win14] Windmonitor.de: Kumulierte Nennleistung aller Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2014, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, 2014
- [Wor15] World Wind Energy Association - WWEA: New Record in Worldwide Wind Installations, 2015 [Zugriff am: 08.10.2015]. Verfügbar unter: <http://www.wwindea.org/new-record-in-worldwide-wind-installations/>.
- [YCC02] Yang, G.; Chen, W.; Chen, I.: A geometrical method for the singularity analysis of 3-RRR planar parallel robots with different actuation schemes: Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems; S. 2055–2060.
- [Yos85] Yoshikawa, T.: Manipulability of Robotic Mechanisms. In The International Journal of Robotics Research, 1985, Vol. 4; S. 3–9.
- [ZWZ10] Zhao, D. et al.: Explicit solution for inverse kinematics of 3-RPS parallel link manipulator: Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010 International Conference on, 2010; S. 425–429.
- [ZBL04] Zheng, X. Z.; Bin, H. Z.; Luo, Y. G.: Kinematic analysis of a hybrid serial-parallel manipulator. In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, Vol. 23.
- [ZZM10] Zoppi, M.; Zlatanov, D.; Molfino, R.: Kinematics analysis of the Exechon tripod: Proceedings of the ASME DETC, 34th Annual Mechanisms and Robotics Conference (MR), Montreal, Canada, 2010; S. 15–18.

7 Abkürzungsverzeichnis

ANDI	Automated NonDestructive Inspector
BCS	Base Coordinate System
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CAD	Computer Aided Design
CC	Compile Cycle
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CIMP	Crown Inspection Mobile Plattform
CTG	Compensated Gross Ton
DH	Denavit-Hardenberg
DKP	direktes kinematisches Problem
FDH	Flexible Drilling Head
IFPT	Institut für Flugzeug-Produktionstechnik
ILA	Internationale Luftfahrtausstellung
IKP	inverses kinematisches Problem
LCR	Laser Coating Removal for Aircraft
LuFo	Luftfahrtforschungsprogramms
MACS	Multifunction Automated Crawling System
MAUS	Mobile Automated Scanner
MCS	Machine Coordinate System
MHC	Magnetic Hull Crawler
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul
MRS	Mobile Robotic Scanner
NAARP	National Aging Aircraft Reasearch Program
NC	Numeric Control
ROVER	Remotely Operated Vacuum Enabled Robot
SB	Service Bulletins
STA	Station (Spant)
STARC	Scarfiging Tool for Automated Repair
TCP	Tool Center Point
TUHH	Technische Universität Hamburg-Harburg

8 Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
α	Kartesische Variable für Drehung um X-Achse	°
β	Kartesische Variable für Drehung um Y-Achse	°
γ	Kartesische Variable für Drehung um Z-Achse	°
$\delta_{i,j}$	Orientierung der Werkzeugplattform	°
$\delta_{i,s}$	Singuläre Orientierung der Werkzeugplattform	°
$\delta_{s,real}$	Tatsächliche zulässige Orientierung der Werkzeugplattform	°
$\Delta\delta_{s,dev}$	Abweichung zwischen berechneter und tatsächlicher zulässigen Orientierung der Werkzeugplattform	°
$\Delta\delta_{s,calc}$	Berechnete zulässige Orientierung der Werkzeugplattform	°
λ	Dimensionsloser Qualitätsindex für die Singularitätsbeurteilung	-
$\Theta_{2,i}$	Winkel zwischen dem äußeren und inneren Arm des 3-RRR-Mechanismus	°
$\Theta_{3,i}$	Winkel zwischen dem inneren Arm und der Werkzeugplattform des 3-RRR-Mechanismus	°
φ_i	Achswinkel i	°
A_i	Positionen des angetriebenen Gelenks i	mm
B_i	Positionen des passiven Gelenks i der Verbindung der Arme	mm
b	Bewegungsgrad eines Mechanismus	-
C_i	Positionen des passiven Gelenks i an der Werkzeugplattform	mm
$D_{A,real}(\phi)$	Arbeitsraumverteilungen in Abhängigkeit der Plattforientierung	mm
F	Freiheitsgrad auf Basis der Grübler-Formel	-
f_i	Gelenkfreiheitsgrad	-
J	Jakobi-Matrix	-
K_i	Koordinatensystem i	-
K_i	Roboterkonfiguration i	-
$K_{opt,1/2}$	Optimale Roboterkonfiguration nach Kriterium 1 bzw. 2	-
L_{1i}	Länge des äußeren Arms i des 3-RRR-Mechanismus	mm
L_{2i}	Länge des inneren Arms i des 3-RRR-Mechanismus	mm
l_i	Achslänge i	mm
M_{Ti}	Antriebsmoment an Antrieb i	Nm

n	Anzahl der Glieder eines Mechanismus	-
N_{2i}	Normalkraft im inneren Arm i des 3-RRR-Mechanismus	N
n_p	Flächennormale der Ebene P	-
O	Koordinatenursprung	-
\dot{q}	Gelenkgeschwindigkeiten	rad/s
Rot_x	Rotationsmatrix für Drehung um X	-
Rot_{xy}	Rotationsmatrix: zunächst um X- und dann um Y-Achse gedreht	-
Rot_y	Rotationsmatrix für Drehung um Y	-
Rot_z	Rotationsmatrix für Drehung um Z	-
t_{fwd}	Lösung des direkten kinematischen Problems der Koppeltransformation	-
t_{inv}	Lösung des inversen kinematischen Problems der Koppeltransformation	-
T_m^n	Transformation von Koordinatensystem n in m	-
\dot{x}	Geschwindigkeit des Endeffektors in kartesischen Koordinaten	mm/s

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schiffbau [com15], Windkraftanlagenbau [dpa13], Flugzeugbau [Aer11].1	
Abbildung 2:	Typisches Arbeitsszenario in der Instandhaltung von Großstrukturen (links: Flugzeugwartung (Quelle: LHT), rechts: Reparatur eines Schiffs [See02]).....	7
Abbildung 3:	Flügel moderner Offshore Windkraftanlagen mit einer Länge von 75m [Sie12].....	8
Abbildung 4:	Produktlebenszyklus in der Luftfahrt am Beispiel des A320 [Deu09b]	9
Abbildung 5:	Lösungsstruktur zur Beherrschung des Automatisierungshemmnisses "große Produkte"	10
Abbildung 6:	Lösungsstruktur zur Beherrschung des Automatisierungshemmnisses "kleine Losgrößen"	11
Abbildung 7:	Lösungsstruktur zur Beherrschung des Automatisierungshemmnisses "große geometrische Toleranzen".....	12
Abbildung 8:	Lösungsstruktur zur Beherrschung des Automatisierungshemmnisses "Lange Produktlebenszyklen":	13
Abbildung 9:	Zusammenfassende Anforderungsanalyse.....	15
Abbildung 10:	Gliederung von mobilen Robotern nach der Art der Fortbewegung.....	17
Abbildung 11:	Zeitliche Entwicklung von mobilen Systemen	18
Abbildung 12:	DESIRE (Deutsche Servicerobotik Initiative), Car-O-Bot 4 Fraunhofer IPA	19
Abbildung 13:	“Automated NonDestructive Inspector” ANDI [ACK98, SKA93]	20
Abbildung 14:	„Crown Inspection Mobile Platform“ CIMP [SGP98]	21
Abbildung 15:	„AutoCrawler“ [SGP98].....	21
Abbildung 16:	BAE-Systems Roboter [Whi05]	22
Abbildung 17:	RobAir Robot [SSC07]	23
Abbildung 18:	mTorres – „Flexible Drilling Head“ [mTo]	23
Abbildung 19:	Boeing "Remotely Operated Vacuum Enabled Robot" ROVER [Geo13]24	
Abbildung 20:	links: „Multifunction Automated Crawling System“ - MACS [BaBa00], mitte: REST [Gon], rechts: “Mobile Robotic Scanner” - MRS [Bog10]..25	
Abbildung 21:	links: Magnetic Hull Crawler (MHC) [Cyb11], rechts: The Climber [Int] 25	
Abbildung 22:	links: Kuka „moiros“ [Kuk13], rechts: OmniRob [Sae15]	26

Abbildung 23:	links: PushCorp "Scarfig Tool for Automated Repair" STARC [ErGo95], rechts: DMG Mori „MobileBlock“ [Feu15]	27
Abbildung 24:	links: Industrieroboterbasiertes CFK-Bearbeitungssystem "CAIRE" [HöSc14b], rechts: Boeing „Mobile Automated Scanner“MAUS [Geo13].....	28
Abbildung 25:	LCR-Systems "Laser Coating Removal for Aircraft" [LCR14]	28
Abbildung 26:	Putzmeister SkyWash [Put07]	29
Abbildung 27:	Elementare Roboterstrukturen	30
Abbildung 28:	Exemplarische Darstellung einer 3-UPU Kinematik [QFG12].....	31
Abbildung 29:	Offene kinematische Kette	33
Abbildung 30:	Mehrdeutigkeit bei der Lösung der Rücktransformation bei offenen kinematischen Ketten	35
Abbildung 31:	Geometrische Schließbedingung für die Berechnung des DKP	36
Abbildung 32:	Berechnung des IKP	36
Abbildung 33:	Mögliche Lösungen des IKP	37
Abbildung 34:	Typ-1 Singularität.....	38
Abbildung 35:	Typ-2 Singularitäten mit zusätzlichem Freiheitsgrad der Rotation (links) bzw. Translation (rechts)	39
Abbildung 36:	Medizinroboter [OuWi10], Exechon [ZZM10], Bionic Handling Assistant [RoSt12].....	41
Abbildung 37:	Ableitung der Aufgabenstellung.....	43
Abbildung 38:	Struktur der Arbeit.....	45
Abbildung 39:	Mögliche Grundstrukturen von Hybridkinematiken	47
Abbildung 40:	Mögliche kinematische Ausprägungen einer Parallelkinematik mit drei identischen Freiheitsgraden[Gog10].....	49
Abbildung 41:	Mechanische Struktur der Hybridkinematik für den mobilen Einsatz ..	50
Abbildung 42:	Struktur der modularen Transformation von Hybridkinematiken	52
Abbildung 43:	Struktur der Transformation einer Hybridkinematik bestehend aus einem 3-RPS und einem 3-RRR Mechanismus mit serieller Kopplung	53
Abbildung 44:	Koordinatensysteme des Gesamtmechanismus	54
Abbildung 45:	Kinematische Struktur des planaren 3-RRR Mechanismus	58
Abbildung 46:	Konfigurationen des Mechanismus in der Nähe einer Typ-2 Singularität – links ($X=0.30, Y=0.25$), rechts ($X=-0.30, Y=0.25$)	62
Abbildung 47:	Skizze zur Modellbeschreibung des inneren 3-RRR Mechanismus.....	67

Abbildung 48:	"Dextrous Workspace" des 3-RRR Mechanismus.....	68
Abbildung 49:	Räumliche Orientierungen der mobilen Maschine	70
Abbildung 50:	Mechanisches Ersatzmodell für das Positionieren des Werkzeugs.....	71
Abbildung 51:	Mechanisches Ersatzmodell für die Fortbewegung	72
Abbildung 52:	Bestimmung der Antriebsmomente aus den Stabkräften.....	73
Abbildung 53:	Iterative Berechnung einer großen Anzahl an möglichen Konfigurationen – Hier exemplarisch: Variation der Armlängen und Durchmesser der Werkzeug-plattform	77
Abbildung 54:	links: Aufbau einer "Chemical Milled Pocket", rechts: Heutiger Inspektionsprozess zur Rissprüfung mittels Wirbelstromsonde	81
Abbildung 55:	Exemplarische Inspektionsvorgabe aus SB 737-53A1301 [Boe10]	82
Abbildung 56:	Kinematische Struktur des mobilen Roboters als Basis für die konstruktive Entwicklung	85
Abbildung 57:	Evolution der Konstruktion der mobilen Hybridkinematik	86
Abbildung 58:	Optimierte Vakuumsaugfüße mit Abstands und Drucksensoren auf einem überlappenden Blechstoß.....	87
Abbildung 59:	Gesamt konstruktion des belastungsgerechten Demonstrators	88
Abbildung 60:	Herstellung von Teilkomponenten des Roboters.....	88
Abbildung 61:	Funktionsstruktur einer NC-Steuerung.....	89
Abbildung 62:	Struktur und Schnittstellen des entwickelten Compile-Cycles im NC- Kern	91
Abbildung 63:	Approximierter Zylinder mit abstrahierter Roboterplattform [Jah14] ...	93
Abbildung 64:	Schnittstellen zwischen Roboter und Werkzeug	94
Abbildung 65:	Validierung der Kollisionserkennung für einen zulässigen Plattformwinkel von 35°	96
Abbildung 66:	Validierung Singularitätsvermeidung mit $D=0.7$	96
Abbildung 67:	Messung der realen Geometrie des Roboters	99
Abbildung 68:	Praktische Validierung des Haftmechanismus	101
Abbildung 69:	Ermittlung der Abweichung bei axialer Fortbewegung auf Basis automatisch berechneter Programmmodule	103
Abbildung 70:	Bewegung des Roboters in vertikaler und überhängender Lage am Flugzeugrumpf	104
Abbildung 71:	Validierung des Gesamtsystems anhand einer automatisiert ausgeführten Flugzeuginspektion	106

10 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1:	Umsatz der europäischen Luft- und Raumfahrtindustrie in den Jahren 2005 bis 2013 [ASD14].....	2
Diagramm 2:	Auftragseingänge und Produktion weltweit und im Seeschiffbau in Deutschland [JNM13]	3
Diagramm 3:	Kumulierte Nennleistung aller Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2014 [Win14]	4
Diagramm 4:	Altersstruktur der Beschäftigten in der Metall- und Elektroindustrie in Deutschland in den Jahren 2000, 2007 und 2013 [Bun14a]	5
Diagramm 5:	Polynom der Schließbedingung und resultierende Konfigurationen aus den Nullstellen bei $(X=0, Y=0)$	60
Diagramm 6:	Polynom der Schließbedingung in singulärer Pose bei $(X=0, Y=0)$	61
Diagramm 7:	Abstand der Nullstellen des Polynoms der Schließbedingung als Funktion der Position des Mechanismus und konstanter Orientierung .	62
Diagramm 8:	Zulässiger Arbeitsraum für $d_{\min} > 0,6$ (links) und $d_{\min} > 0,7$ (rechts)....	63
Diagramm 9:	Abschätzung der winkelligen Distanz zu einer Singularität.	64
Diagramm 10:	Absolute Abweichung der berechneten singulären Winkeln $\delta S, calc$ für die Plattformposition $(X=0, Y=0)$	65
Diagramm 11:	Momentenverteilung der Einzelantriebe für einen exemplarischen Satz an Designparametern und definierter Orientierung der Werkzeugplattform.....	74
Diagramm 12:	Überlagerung des resultierenden und maximal möglichem Arbeitsraum.....	75
Diagramm 13:	Kreisförmiger Arbeitsraum für beliebige Werkzeugorientierungen	76
Diagramm 14:	Darstellung der erreichten Güte von Optimierungsstrategie 1 für alle Konfigurationen.....	78
Diagramm 15:	Darstellung der erreichten Güte von Optimierungsstrategie 2 für alle Konfigurationen.....	78
Diagramm 16:	Resultierende Arbeitsraumverteilung der bei der Optimierung ermittelten Konfigurationen.....	79
Diagramm 17:	Messergebnisse einer kreuz- und kreisförmigen Bewegung mit idealen Geometrieparametern	98
Diagramm 18:	Messergebnisse einer kreuzförmigen Bewegung mit eingemessenen Roboterparametern	100
Diagramm 19:	Messergebnisse einer Kreisbahn mit eingemessenen Parametern und mehreren Wiederholungen	101
Diagramm 20:	Eingemessene Radien des zylindrischen Bereichs einer B737-500....	102

11 Lebenslauf

Name	Schlosser
Vorname	Christian
Geburtsdatum	22.11.1983
Geburtsort, -land	Hildesheim, Deutschland
1990 – 1994	Grundschule Barierenode
1994 – 1996	Orientierungsstufe St. Augustinus in Hildesheim
1996 – 2003	Gymnasium Himmelsthür in Hildesheim Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
2003 – 2004	Zivildienst im Salze Rehasentrum in Bad Salzdetfurth
2004 – 2010	Studium Maschinenbau/Mechatronik an der TU Clausthal Abschluss: Diplom Ingenieur
2010 – 2015	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug- Produktionstechnik der TU Hamburg-Harburg