Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Angewandte Mechanik

Entwicklung eines modularen Manipulators für den Garten- und Weinbau

Dipl.-Ing. Julian M. Pfaff

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. dr. ir. Daniel J. Rixen

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Ulbrich
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Baier

Die Dissertation wurde am 23. März 2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13. Oktober 2015 angenommen.

Für Nikolas und das Möffchen

Danksagung

Die Dissertation ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik entstanden. Für die Unterstützung, die ich während der mehr als vier Jahre von den Lehrstuhlinhabern Prof. Ulbrich und Prof. Rixen erhalten habe, möchte ich mich sehr herzlich bedanken. Insbesondere bei der Arbeit am Projekt, dessen Leitung Prof. Ulbrich innehatte, war es mir immer möglich meine eigenen Vorstellungen und Ideen umzusetzen. Es ist eine außergewöhnliche Situation, die Ressourcen des Lehrstuhls nutzen zu dürfen, dabei jedoch die Freiheit zu haben, das Projekt nach eigenem Ermessen zu gestalten und trotzdem immer zu wissen, dass man sich auf die Rückendeckung von Prof. Ulbrich verlassen kann.

Für das administrative und inhaltliche Engagement im Projekt und am Lehrstuhl danke ich vielmals dem akademischen Direktor Dr. Thomas Thümmel. Darüber hinaus möchte ich mich bei Dir für die immerwährende Hilfe bei jeglicher Art von Schwierigkeiten bedanken, egal ob es das Projekt, meine Dissertation oder den Lehrstuhl betroffen hat.

Von allen Kollegen, die ich während meiner Zeit am Lehrstuhl kennenlernen durfte, möchte ich mich besonders bei Jörg Baur und Christoph Schütz für die tolle Zusammenarbeit an dem Projekt, die Überarbeitung meiner Dissertation sowie für die unvergessliche Zeit als Zimmernachbarn bedanken. Trotz der vielen Arbeit und der Wochenenden, die wir mit der Fertigstellung der Manipulatoren verbracht haben, hat mir die Arbeit mit Euch immer Spaß gemacht und ich würde jederzeit wieder ein Projekt mit Euch beiden zusammen angehen. Darüber hinaus danke ich den Kollegen/Freunden, mit denen zusammen ich auch neben der Arbeit viel Spaß und Freude hatte, sei es beim Rad bauen/fahren, aktiven oder passiven Fußball Genuss, beim Grillen oder vielen anderen Gelegenheiten.

Für sehr viele nette und unterhaltsame Mittagspausen möchte ich mich bei Rita Schneider bedanken. Natürlich auch für die administrative Unterstützung, die sie und Frau Müller-Philipp während der Zeit für mich und/oder das Projekt geleistet haben.

Bei der Entwicklung, Fertigung und vor allem der Montage der Manipulatoren konnte ich mich immer auf die Hilfe der beiden Werkstattmitarbeiter Simon Gerer und Georg König verlassen. Hierfür und besonders auch für den tatkräftigen Beistand und die Zusammenarbeit außerhalb des Projekts möchte ich mich bei Euch bedanken. Für die großartige Unterstützung bei der Entwicklung der Elektronik und dem allgemeinen Beistand bei der Arbeit möchte ich Georg Mayr danken. Auch neben der eigentlichen Projektarbeit konnte ich mich immer auf ein offenes Ohr und Deine fachliche Kompetenz verlassen.

Nicht nur für die Zeit meiner Dissertation, sondern auch für die vielen Jahre zuvor will ich mich gerne bei meiner Familie bedanken. Gerade in Phasen, in denen ich den richtigen Weg gesucht habe, konnte ich mich immer auf Ihre Unterstützung und Geduld verlassen. Für die finale Ausarbeitung meiner Dissertation möchte ich mich besonders bei meiner Mutter bedanken, die mir beim Redigieren der Arbeit eine sehr große Hilfe war und mich bis zur letzten Minute unterstützt hat.

Zum Schluss will ich mich noch bei meiner Freundin Sabrina Schmitt für die tollen letzten Jahre bedanken. Durch Deine kritische Betrachtung und die offenen Gespräche über mich und meine Arbeit, hast Du mir geholfen eine bessere und differenziertere Sichtweise auf viele Dinge zu erlangen. Darüber hinaus konntest Du mich auch in schwierigen Phasen immer wieder dazu motivieren – sei es durch die notwendige Ablenkung oder durch Zureden – meine Dissertation erfolgreich abzuschließen. Daher möchte ich Dir für diese schöne Zeit und die Arbeit, die Du Dir mit mir gemacht hast, danken und hoffe, dass ich Dich genauso sehr unterstützen konnte und kann, wie Du es für mich getan hast.

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung von modularen Manipulatoren für den Einsatz als Teil eines Robotersystems, der für die Ernte von Paprika, Äpfeln und Trauben sowie das präzise Aufbringen von Pflanzenschutzmitteln auf Weinreben, im Rahmen des EU-Projekts CROPS entworfen wurde. Die Aufgabe des hier beschriebenen Armes besteht in dem Transport von End-Effektoren in die erforderlichen Positionen, um Früchte zu ernten oder Pflanzen zu pflegen.

Während der Projektzeit wurden zwei Evolutionsstufen des Manipulators entwickelt und gefertigt. Das Aussehen sowie die maximal neun Freiheitsgrade des Roboterarms wurden auf der Basis der Anforderungen der zu bewältigenden Aufgaben bestimmt. Um den unterschiedlichen Einsatzgebieten gleichermaßen gerecht zu werden, wurde ein modulares Konzept verfolgt. Dies ermöglicht verschiedene Konfigurationen der Manipulatoren, die an die jeweiligen Aufgaben angepasst werden können. Zur Verifikation des Konzepts und der gefertigten Prototypen wurden Versuche sowohl im Labor als auch in den realen Anbauszenarien durchgeführt.

Zusätzlich zu den Manipulatoren wurde eine Hülle entworfen, die den Manipulator um einen taktilen Sinn erweitern kann. Mit diesem zusätzlichen Sinn können Bewegungen in einem unbekanntem Gelände durchgeführt werden, ohne den Manipulator oder die Umwelt zu beschädigen. Um dies zu testen wurde ein Element des Manipulators mit einem Prototypen der Hülle ausgestattet.

Abstract

This thesis covers the development of a modular manipulator that has been designed as a part of a robot within the European project CROPS. The robot has been developed for harvesting sweet peppers, apples and grapes and the precise application of pesticides. The main purposes of the described manipulator is to move the end-effectors in the required position to harvest and cultivate the targeted fruits.

During the course of the project the manipulator underwent two different stages of development in which two prototypes were developed and produced. The kinematic design with nine degrees of freedom were chosen on the basis of multiple requirements. In order to fullfill these very heterogeneous requirements a modular concept was implemented. This concept allowes different configurations of manipulators that were able to be adapted to the different harvesting environments. Field and laboratory experiments were carried out to confirm and verify the suitability of the chosen concept and developed prototypes.

In order to further the abilities of the manipulators a tactile cover was developed, applied to one of the prototypes and tested. This additional tactile feature enables the manipulator to carry out movements without damaging its components or its environment.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Einführung . . . 1
1.2 Das EU-Projekt CROPS . . . 2
1.3 Aufbau der Arbeit . . . 4

2 Automatisierung und Robotik in der Landwirtschaft 7

3 Manipulator der ersten Generation 11
3.1 Anforderungen . . . 12
3.1.1 Anbau der Pflanzen . . . 12
3.1.2 Arbeitsraum . . . 15
3.1.3 Leistung . . . 15
3.1.4 Modularität . . . 16
3.1.5 Weitere Anforderungen . . . 17
3.2 Mechatronisches Konzept . . . 18
3.2.1 Kinematisches Design . . . 19
3.2.2 Struktur . . . 24
3.2.3 Aktorik . . . 25
3.2.4 Sicherheit/Bremsen . . . 29
3.2.5 Sensorik . . . 30
3.2.6 Elektronik . . . 31
3.3 Konstruktive Umsetzung . . . 32
3.3.1 Auswahl und Auslegung der Getriebe . . . 33
3.3.2 Auswahl und Auslegung der Motoren . . . 34
3.3.3 Gelenk 1 (Linearachse) . . . 36
3.3.4 Gelenk 2-4 . . . 40
3.3.5 Gelenk 5-6 . . . 42
3.3.6 Gelenk 7-9 (Handgelenk) . . . 43
3.3.7 Schutz gegenüber Umwelteinflüssen . . . 49
3.3.8 Modularität . . . 50
3.4 Sensorik . . . 50
3.4.1 Encoder . . . 51
3.4.2 Endschalter . . . 52
3.5 Elektronik . . . 52
3.5.1 Motor Controller . . . 53
3.5.2 Bussystem . . . 54
3.6 Ergebnisse . . . 55
3.6.1 Eigenschaften des Manipulators . . . 55
3.6.2 Versuche in einer realen Umgebung . . . 60
3.7 Zusammenfassung . . . 65

4 Manipulator der zweiten Generation 67
4.1 Erweiterte Anforderungen . . . 68
4.2 Mechatronisches Konzept . . . 69
4.2.1 Kinematisches Design . . . 69
4.2.2 Struktur und Aktorik . . . 70
4.2.3 Sensorik . . . 72
4.2.4 Elektronik . . . 73
4.3 Modulare Robotik . . . 73
4.4 Konstruktive Umsetzung . . . 74
4.4.1 Auswahl und Auslegung der Getriebe und Motoren . . . 74
4.4.2 Linearachse . . . 77
4.4.3 Antriebsmodule . . . 79
4.4.4 Zwischenstücke . . . 84
4.5 Sensorik . . . 88
4.5.1 Inkrementelle Encoder . . . 89
4.5.2 Absolutencoder . . . 90
4.6 Elektronik . . . 91
4.6.1 Motorsteuerung . . . 91
4.6.2 Bussystem . . . 92
4.7 Ergebnisse . . . 93
4.7.1 Messungen der Module . . . 93
4.7.2 Eigenschaften des Manipulators . . . 95
4.7.3 Versuche in einer realen Umgebung . . . 98
4.8 Zusammenfassung . . . 98

5 Taktile Hülle 101
5.1 Stand der Technik . . . 101
5.1.1 Intrinsische Sensoren . . . 102
5.1.2 Extrinsische Sensoren . . . 103
5.2 Anforderungen . . . 104
5.3 Konzept . . . 105
5.4 Mechatronische Umsetzung . . . 106
5.4.1 Sensorik . . . 106
5.4.2 Mechanik . . . 108
5.4.3 Algorithmus . . . 109
5.4.4 Elektronik . . . 111
5.5 Ergebnisse . . . 113
5.6 Zusammenfassung . . . 118

6 Zusammenfassung und Ausblick 121
6.1 Zusammenfassung . . . 121
6.2 Ausblick . . . 123

A Übersicht 127

B System Beschreibung 129

C Auslegung 131

1 Einleitung

Zur Erläuterung der Grundlage dieser Arbeit wird ein kurzer Überblick über die Agrarpolitik der EU sowie der Bevölkerungsentwicklung und der daraus resultierenden Notwendigkeit der Automatisierung der Landwirtschaft gegeben. Darüber hinaus wird das Projekt CROPS, in dessen Rahmen die Entwicklung der Manipulatoren stattfand, vorgestellt und ein kurzer Überblick über die Kapitel der Arbeit gegeben.

1.1 Einführung

Im Jahre 1957 wurde die Europäische Wirtschaftsgemeinschaft gegründet. Diese ging am 1. Dezember 2009 über in die Europäische Union. In dem „Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union“sind die Ziele für die Entwicklung der europäischen Landwirtschaft definiert. So steht in Artikel 39[1] unter anderem:
„Ziel der gemeinsamen Agrarpolitik ist es,

- die Produktivität der Landwirtschaft durch die Förderung des technischen Fortschritts, Rationalisierung der landwirtschaftlichen Erzeugungen und den bestmöglichen Einsatz der Produktionsfaktoren, insbesondere der Arbeitskräfte, zu steigern;
- auf diese Weise der landwirtschaftlichen Bevölkerung, insbesondere durch Erhöhung des Pro-Kopf-Einkommens der in der Landwirtschaft tätigen Personen, eine angemessene Lebenserhaltung zu gewährleisten;
- die Versorgung sicherzustellen;
- für die Belieferung der Verbraucher zu angemessenen Preisen Sorge zu tragen“

Dies ist besonders wichtig, da laut einer Studie der Vereinten Nationen (United Nations, 2013) die Bevölkerung der Erde voraussichtlich bis zum Jahre 2050 von zur Zeit 7,2 Mrd. auf 9,6 Mrd. ansteigen wird. Der stärkste Bevölkerungszuwachs wird in Afrika und Asien stattfinden, wohingegen in Europa die Einwohnerzahl stagnieren, oder sogar schrumpfen wird. Dennoch betrifft das Weltbevölkerungswachstum, auf Grund des globalen Marktes und des Im- und Exports von Lebensmitteln über die Grenzen der EU hinaus, auch die europäischen Landwirte.

Seit 1950 ist in Deutschland die Anzahl an Erwerbstätigen in dem landwirtschaftlichen Bereich von 24 % auf heute unter 2 % gesunken (Bundeszentrale für politische Bildung et al., 2013). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ein Landwirt 1949 für die Ernährung von zehn Menschen sorgte, während er heute

1 Der Vertrag ist unter http://www.aeuv.de/ verfügbar.

für die Nahrung von 144 Menschen verantwortlich ist (Deutscher Bauernverband, 2014). Diese enorme Steigerung der Produktivität pro Person konnte nur durch eine erhebliche Verbesserung der Anbaumethoden und durch den technischen Fortschritt des Anbaus erreicht werden. Daher ist die Steigerung der Produktivität eines Landes auch stark an dessen Industrialisierung gekoppelt.

Ein Großteil der Automatisierung fand beim Ackerbau (Mais, Kartoffeln, etc.), oder bei massentauglichen Erzeugnissen, wie Obst für Säfte, statt. Diese können in großem Maßstab mit entsprechend großen Maschinen bearbeitet werden. Doch auch bei der Produktion von hochwertigen Früchten, die für den Einzelhandel bestimmt sind, gibt es seit den 60er Jahren Bestrebungen, den Anbau und die Ernte ganz oder zumindest teilweise zu automatisieren (vgl. Kapitel 2). Trotz der umfangreichen Forschung in diesem Bereich, sind allerdings kaum entsprechende Systeme auf dem Markt.

Die Nutzung von Robotersystemen böte zudem die Möglichkeit, die Anbaubedingungen zu optimieren. Für Menschen ist das Arbeitsklima in den Gewächshäusern auf Grund der hohen Temperatur und der großen Luftfeuchtigkeit sehr belastend. Würden Maschinen den Großteil der Pflege und Ernte der Pflanzen übernehmen, wäre es möglich, die Randbedingungen weiter an die Bedürfnisse der Pflanzen anzupassen. Zum Beispiel ließen sich durch eine Erhöhung des Kohlendioxidanteils der Luft die Erträge steigern.

Durch Robotersysteme könnten aber nicht nur in ökonomischer, sondern auch in ökologischer Hinsicht Verbesserungen erzielt werden. Insbesondere in Zeiten in denen der nachhaltige und ökologische Anbau zunehmend an Bedeutung gewinnt, sind Systeme von Interesse, die eine selektive Pflege der Pflanzen ermöglichen. Durch sie könnten Pflanzen, die Nährstoffe benötigen oder von Krankheiten oder Schädlingen befallen sind, erkannt und gezielt behandelt werden, wodurch sich die Belastung durch Düngemittel und Pestizide verringern ließe.

Das EU-Projekt CROPS, das im Folgenden näher beschrieben wird, befasst sich mit diesem Thema, indem es die Entwicklung eines Roboters zum Einsatz im Garten- und Weinbau fördert.

1.2 Das EU-Projekt CROPS

Das EU-Projekt CROPS[2] (intelligent sensing and manipulation for sustainable production and harvesting of high value crops - Clever Robots for Crops) wurde am 01. Oktober 2010 gestartet. In den vier Jahren, auf die das Projekt angesetzt war, wurden unter der Zusammenarbeit von dreizehn Partnern (siehe Tabelle 1.1) unter anderem Prototypen autonomer Roboter für den Einsatz in der Landwirtschaft entwickelt. Ein Hauptziel dabei war die Ernte von Paprika, Äpfeln und Trauben sowie das selektive Sprühen von Pestiziden auf von Krankheiten befallenem Wein. Für diesen Einsatzbereich sollte ein autonomes Robotersystem entwickelt werden, das aus einer Plattform für die Bewegung im Gewächshaus, oder Feld, einem Manipulator mitsamt Greif- und Schneidwerkzeug und einer Sensorik zur Erkennung

2 Gefördert im Rahmen des Seventh Framework Programme, Grant Agreement No. 246252, http://www.crops-robots.eu.

Tabelle 1.1: Partner des EU-Projekts Crops

Projektpartner		Arbeitspakete[1]	Herkunftsland
BGU	-	Ben-Gurion University of the Negev WP4, WP9	Israel
CSIC	-	Consejo Superior de Investigaciones Científicas WP2	Spanien
INIA	-	Intituto de Investigaciones Agropecuarias WP6	Chile
KULeuven	-	Katholieke Universiteit Leuven WP1, WP6	Belgien
TUM	-	Technische Universität München WP1, WP3	Deutschland
UL	-	Univerza v Ljubljani WP1, WP7	Slowenien
UMU	-	Umeå Universitet WP1, WP8	Schweden
UniMI	-	Universita′ degli Studi di Milano WP7	Italien
WUR	-	Wageningen UR Greenhouse Horticulture WP1, WP5, WP12, WP13	Niederlande
CNH	-	CNH Belgium NV WP1, WP6	Belgien
Festo	-	Festo AG & Co. KG WP3	Deutschland
Force-A	-	Force-A SA WP2	Frankreich
Jentjens	-	Jentjens Machinetechniek B.V.[2] WP1, WP5	Niederlande

[1] Arbeitspakete an denen der Partner hauptsächlich beteiligt war; Beteiligung an anderen WPs nicht ausgeschlossen.
[2] Jentjens hat das Konsortium Mitte 2013 verlassen.

von Früchten und Hindernissen besteht. Daneben sollten Untersuchungen zur Detektierung von Bäumen und Felsen sowie zur Ermittlung der Tragfähigkeit des Bodens in forstwirtschaftlichem Gelände durchgeführt werden.

Tabelle 1.2 zeigt eine Übersicht über die dreizehn Arbeitspakete (WPs), die während des Projekts bearbeitet wurden. Die Aufgabe von WP1 war die Leitung der Integration der einzelnen Teilsysteme zu einem autonomen Robotersystem, sowie die Entwicklung eines Zustandsautomaten zur Steuerung des Systems. Die Sensorik zur Erfassung von Früchten, Pflanzen und von mit Krankheiten oder Schädlingen befallenen Blättern wurde im Rahmen von WP2 entwickelt. Die Konzipierung und Herstellung der Manipulatoren und End-Effektoren zum Greifen und Abtrennen der Früchte war Aufgabe von WP3. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die Manipulatoren entwickelt, die Gegenstand dieser Arbeit sind. Die Durchführung des Arbeitspakets fand unter der Leitung des Lehrstuhls für Angewandte Mechanik der TU München statt.

Tabelle 1.2: Übersicht über die Arbeitspakete die während des Projekts bearbeitet wurden

	Beschreibung	Leitung
WP1	System Engineering and Architecture	TUM
WP2	Sensing	CSIC
WP3	Manipulators and End-Effectors	TUM
WP4	Intelligent Sensor Fusion and Learning Algorithms	BGU
WP5	Sweet pepper - prtotected cultivation	WUR
WP6	Harvesting systems in orchards: grapes and apples	KULeuven
WP7	Precision Spraying	UL
WP8	Forestry	UMU
WP9	Training	BGU
WP10	Dissemination	UniMI
WP11	Final demonstration	UniMI
WP12	Economics, Social Aspects, Sustainability and Exploitation	WUR
WP13	Coordination	WUR

Die Algorithmen zur Auswertung der Sensorinformationen wurden innerhalb des vierten Arbeitspakets erforscht. Die Integration der Systeme aus den Teilgebieten der Paprika- (WP5), Apfel- und Traubenernte (WP6) sowie des Präzisionssprühens (WP7) wurden von den Verantwortlichen der jeweiligen WPs übernommen. Darüber hinaus wurden im Rahmen dieser Arbeitspakete die notwendigen Versuche und Messungen zur Evaluierung der einzelnen Systeme unter realen Bedingungen durchgeführt. Die Bearbeiter von WP8 widmeten sich der visuellen Erfassung von Gegenständen in der Umgebung sowie der Detektierung der Bodenbelastbarkeit im forstwirtschaftlichen Umfeld.

Zur Fortbildung der beteiligten Personen, zur Publizierung und Verbreitung der generierten Ergebnisse sowie zur Erforschung der Möglichkeiten der Vermarktung eines solchen Systems dienten die Arbeitspakete 9–12. Das WP13 war für die übergeordnete Koordination des Projekts verantwortlich.

Nach seinem offiziellen Ende am 30. September 2014 wurde das Projekt am 27. Oktober 2014 erfolgreich von der Europäischen Union evaluiert.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die hier dargestellte Arbeit beschreibt die Entwicklung und Konstruktion von Manipulatoren für spezielle landwirtschaftliche Tätigkeiten, wie z.B. das selektive Ernten von hochwertigen Früchten. Um einen allgemeinen Überblick über bisherige Entwicklungen und Forschungsergebnisse in diesem Bereich zu geben, wird in Kapitel 2 der Stand der Technik beschrieben.

Dabei wird sowohl auf Roboter in der Landwirtschaft eingegangen, als auch auf modulare Roboter, da diese die Möglichkeit bieten, sich spezialisiert an unterschiedliche Situationen und Aufgaben anzupassen. Somit sind diese für die Landwirtschaft von besonderem Interesse, da sie einen größeren Aufgabenbereich abdecken können.

Kapitel 3 stellt die Entwicklung der ersten Generation des Manipulators dar. Es wird im Detail gezeigt, welche Anforderungen – basierend auf den realen Ernteszenarien – an eine solche Maschine gestellt werden und wie diese in ein entsprechendes Konzept eingearbeitet wurden. Sowohl die konstruktive Umsetzung als auch die Sensorik und Elektronik, die für den Betrieb des Manipulators notwendig sind, werden vorgestellt und erläutert. Um die Eignung des Roboters für die gestellte Aufgebe zu überprüfen sowie Schwächen und Stärken des Arms zu identifizieren, wurden umfangreiche Tests im Labor sowie in realer Umgebung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche werden zusammengefasst und im Hinblick auf die zweite Generation des Manipulators ausgewertet.

Eine weiterentwickelte zweite Generation des Manipulators wird in Abschnitt 4 vorgestellt. Die Versuche mit den ersten Prototypen zeigten, dass die Anforderungen leicht erweitert und modifiziert werden mussten. Aus diesen neu gewonnen Einsichten wurde ein überarbeitetes Konzept abgeleitet, welches detailliert dargestellt wird. Aufbauend auf diesem Konzept wurde eine neue Generation des Ernteroboters konstruiert und gefertigt. Die Änderungen und Neuerungen in den Bereichen Konstruktion, Elektronik und Sensorik werden ebenso beschrieben, wie die Ergebnisse von Versuchen mit der zweiten Manipulator-Generation.

Das Sichtsystem und die dazugehörigen Algorithmen des Ernteroboters wurden, wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, von den Projektpartnern des WP2 und WP4 entwickelt. Um die Orientierung und die Navigation in unbekanntem Gelände weiter zu verbessern, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine taktile Hülle entworfen, deren Konzept und Umsetzung in Kapitel 5 erläutert wird. Darüber hinaus werden erste Versuche mit der Hülle auf einem Element des Manipulator beschrieben und bewertet.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine Zusammenfassung der vorgestellten Themen (Kapitel 6). Neben einem allgemeinen Überblick über die erarbeiteten Ergebnisse wird besonders auf die Neuerungen bei den Prototypen als auch bei der taktilen Hülle eingegangen. Basierend auf diesen Ergebnissen und der Arbeit im Allgemeinen wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen gegeben.

2 Automatisierung und Robotik in der Landwirtschaft

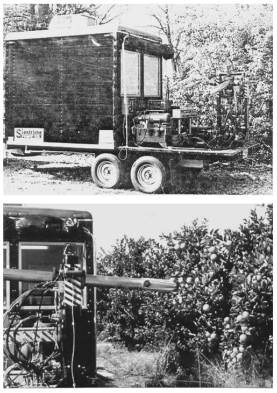
In prähistorischer Zeit wurden bereits vom Menschen oder Tieren gezogene Pflüge eingesetzt, um den Boden für den Anbau von Feldfrüchten aufzulockern. Ab 1850 kamen in Europa die ersten mit Dampf betriebenen Pflüge zum Einsatz, später folgte der Traktor, um das Pflügen und andere Aufgaben im Ackerbau zu übernehmen und zu vereinfachen. Heutzutage werden die ersten vollautonomen Systeme getestet, die auf der Basis von GPS-Daten die Felder bestellen und die Ernte einbringen (Pilarski et al., 2002; Pedersen et al., 2006).

Die Automatisierung beschränkt sich nicht nur auf herkömmliche Feldfrüchte, wie Weizen, Mais oder Kartoffeln, sondern betrifft auch den Gartenbau. So können z.B. Trauben (z.B. CNH[1] oder Oxbo[2]), Zitrusfrüchte, verschiedene Beerensorten (Oxbo) oder Kirschen, Äpfel oder Birnen (Munckhof[3]) teil- oder vollautomatisch geerntet werden. Hierfür werden Systeme eingesetzt, die das Obst durch Rütteln und Schütteln von einzelnen Ästen oder der gesamten Pflanzen, von der Pflanze lösen. Da hierbei eine Unterscheidung zwischen reifen und unreifen Früchten nur schwer oder überhaupt nicht möglich ist, wird das Erntegut meist nur für Säfte oder minderwertige Weine verwendet. Früchte, die zum direkten Verzehr in den Handel gelangen, oder für hochwertige Weine bestimmt sind, werden nach wie vor von Hand geerntet. Es kann also grundsätzlich unterschieden werden zwischen der stark automatisierten Massenernte und der selektiven Ernte, die bislang noch wenig bis gar nicht automatisiert ist.

Um auch die selektive Ernte von Früchten zu automatisieren, werden in diesem Bereich große Anstrengungen unternommen. Die diesbezügliche Forschung ist eng mit der Entwicklung von Robotern im Allgemeinen verbunden. Der erste industrielle Roboter Unimate geht auf ein Patent von Georg Charles Devol (Devol Jr., 1961) zurück. Seitdem werden immer mehr Felder für den Einsatz von Robotern erschlossen. Ein Großteil (mindestens 36 %) der industriellen Roboter wird in der Autoindustrie eingesetzt, ein geringerer Anteil in der Elektronikindustrie (16 %) und chemische Industrie (10 %) (The International Federation of Robotics (IFR), 2012). Nur 0,1 % der Roboter wurden im Jahre 2011 in der Landwirtschaft, Fischerei, Jagd und Forstwirtschaft genutzt.

Die Ausweitung der Automatisierung auf den Garten- und Weinbau wurde zuerst von Schertz und Brown (1968) beschrieben. Die ersten realen Robotersysteme wurden von D'Esnon et al. (1987) für Zitrusfrüchte bzw. Harrell et al. (1990) für Orangen entwickelt (Abb. 2.1*a*). Die meisten Systeme bestehen aus einer Plattform auf der ein Manipulator mit Greifer bzw. Trennwerkzeug und Sensorik angebracht

1 http://agriculture.newholland.com/
2 http://www.oxbocorp.com/
3 http://www.munckhof.org/



(a) Erster Roboter für die Ernte von Orangen Harrell et al. (1990)

(b) Weiterentwicklung des Orangenerntero-boters Muscato et al. (2005)

(c) Automatische Erntemaschine für Wasser-melonen Sakai et al. (2002)

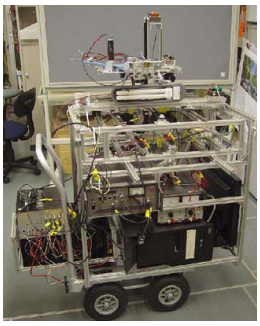
Bild 2.1: Beispiele für Entwicklungen basierend auf Industrierobotern

sind. Einen Überblick über die Entwicklung in den 1980ern geben Sarig (1993); Tillett (1993); Edan (1995). Intensive Forschung zu diesem Thema wurde in Japan betrieben. Dort wurden Systeme für Gurken, Tomaten und Trauben von Kondo et al. (1996a,b); Kondo und Ting (1998b,a), oder für Tomaten, Auberginen und Erdbeeren von Hayashi et al. (2002); Hayashi, S. ; Ota, T. ; Kubota, K. ; Ganno, K. ; Kondo (2005); Hayashi et al. (2010) entwickelt.

Eine Weiterentwicklung des 1990 vorgestellten Roboters für Orangen ist in Abbildung 2.1*b* dargestellt. Das System, welches in Muscato et al. (2005) beschrieben wird, besteht aus zwei Greifarmen, die jeweils aus einer Teleskopachse bestehen, mit der die Distanz zu den Früchten überbrückt werden kann. Die Arme selbst sind auf einer Linearachse vertikal verfahrbar. Daneben (Abb. 2.1*c*) ist ein autonomer Roboter für die Ernte von Wassermelonen abgebildet (Sakai et al., 2002, 2008). Er besitzt drei angetriebene Freiheitsgraden (DOFs) sowie einem vierten passiven DOF, der eine Auslenkung des Greifers erlaubt.

Der Aufbau in Darstellung 2.2*a* zeigt einen Roboter für die Ernte von Paprika (Kitamura und Oka, 2005, 2006). Er besteht aus einer Stereo-Kamera und einem dreiachsigen Manipulator zur Positionierung des Schneidwerkzeugs. Der Roboter in Bild 2.2*c* ist für die Ernte von Spargel in einem Gewächshaus konzipiert. Er besteht aus einem Arm mit vier DOFs und einem 3D Sichtsystem zur Positionsbestimmung der Spargel (Irie et al., 2009; Irie und Taguchi, 2014). In Bild 2.2*b* ist der Prototyp eines Roboters für die Ernte von Erdbeeren dargestellt (Han et al., 2012). Zu einem Kartesischen Roboter mit drei Achsen wurde eine zusätzliche rotatorische Achse hinzugefügt, die die Ernte auf zwei gegenüberliegenden Gangseiten ermöglichen soll.

Auch für etliche andere Früchte wie Trauben (Monta et al., 1995), Gurken (Arima und Kondo, 1999), Äpfel (Peterson et al., 1999; Guo et al., 2010), Melonen (Edan et al., 2000), Pilze (Reed et al., 2001), Radicchio (Foglia und Reina, 2006), Zitronen (Sivaraman, 2006; Babu Sivaraman und Thomas F Burks, 2007), Kirschen (Tanigaki et al., 2008) und Kiwi (Scarfe et al., 2009) wurden spezielle Ernteroboter



(a) Roboter zur Ernte von Paprika Kitamura und Oka (2005)

(b) Ernteroboter für Spargel Irie et al. (2009)

(c) Erdbeererteroboter Han et al. (2012)

Bild 2.2: Beispiele für Entwicklungen basierend auf Industrierobotern

entwickelt.

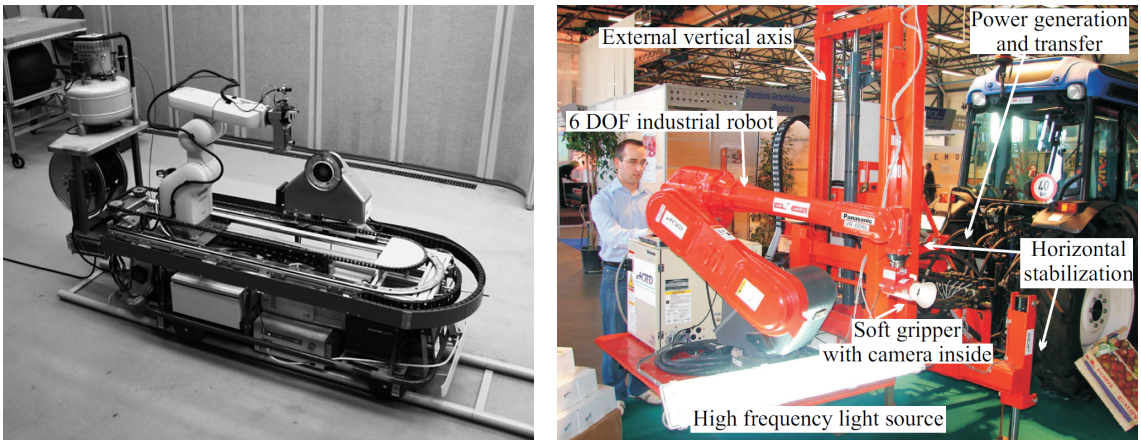
Auf Grund der komplexen und sehr speziellen Anforderung an die Roboter sind die meisten Manipulatoren Eigenentwicklungen. Nur wenige Systeme nutzen einen kommerziellen Manipulator als Basis für einen Ernteroboter (Abb. 2.3). In Abbildung 2.3*a* ist ein Roboter zur Ernte von Gurken von Van Henten et al. (2002) zu sehen. Das System besteht aus einer Plattform auf der der 7DOF-Roboter mit dem Schneidwerkzeug und die Sensorik montiert sind. Der Roboter selbst besteht aus einer horizontalen Linearführung, auf der ein Mitsubishi RV-E2 mit 6DOF montiert ist. Der Ernteroboter von Baeten et al. (2008) nutzt einen Panasonic VR006L mit 6DOF, der auf einer vertikalen Linearachse befestigt ist (Abb. 2.3*b*). Das gesamte System, das zur Ernte von Äpfeln eingesetzt wird, wird von einem Traktor getragen. Ein weiterer Manipulator zur Ernte von Datteln mit dem Roboter Katana450 von Neuronics, der auf einem zusätzlichen Teleskoparm montiert ist, wird in Aljanobi et al. (2010) vorgestellt.

Ein allgemeiner Überblick über die aktuelle Forschung und abgeschlossene Projekte bei Ernterobotern wird in Bac et al. (2014) gegeben.

Für einen kommerziellen Einsatz sind bisher nur wenige Systeme entwickelt worden. Laut Tillett (1993) wurde schon Ende der 1980er versucht, die beiden Roboter MAGALI (D'Esnon et al., 1987) und CITRUS von JASA für einen kommerziellen Einsatz weiterzuentwickeln. Aktuell wird von Shibuya Seiki Co.LTD ein Erntesystem für Erdbeeren für den kommerziellen Markt entwickelt, das schon Ende 2014 auf den Markt kommen sollte, jedoch bisher nicht verfügbar ist. Ein System von AGROBOT[4] für diesen Bereich ist bereits erhältlich. Voraussetzung für dessen Nutzung ist allerdings eine Änderung des Anbausystems der Erdbeeren. Ein System für das Pflücken von Rosen von der Firma Jentjens (mittlerweile Teil von Irmato) konnte ebenfalls erst eingesetzt werden, nachdem der Rosenanbau passend zum System verändert wurde.

Im Bereich der Pflanzenpflege, insbesondere für die Behandelung mit Pestiziden, wurden verschiedene Systeme entwickelt. Für den Einsatz in Gewächshäusern wurde das autonome System Aurora von Mandow et al. (1996) vorgestellt. Es

4 http://www.agrobot.com/



(a) Gurkenernteroboter von Van Henten et al. (2002)

(b) Roboter zur Ernte von Äpfeln von Baeten et al. (2008)

Bild 2.3: Beispiele für Ernteroboter basierend auf Industrierobotern

besteht aus einer Plattform, die an die engen Gänge in Gewächshäusern angepasst ist, sowie Sensoren und Aktoren für die Detektierung und Behandelung befallener Pflanzenteile. Ein weiteres System für den Einsatz in Gewächshäusern, welches autonom durch die Gänge navigiert und dabei gleichmäßig die Pflanzen besprüht, wurde von Sammons et al. (2005) beschrieben. Weitere Arbeiten in diesem Bereich beschäftigen sich mit einem Sensorsystem und mehreren Sprühköpfen (Gillis et al., 2001), mit der Pflege von Datteln (Shapiro et al., 2009) oder mit Sensorik für die dreidimensionale Positionsbestimmung der betroffenen Pflanzenstellen (Li et al., 2009).

3 Manipulator der ersten Generation

Im Verlaufe der vier Jahre, über die sich das CROPS-Projekt erstreckte, wurden zwei Generation und insgesamt drei Manipulatoren entwickelt und gebaut. Die zwei Prototypen der ersten Generation, die einen nahezu gleichen Aufbau besitzen, werden in diesem Kapitel beschrieben.

Um die Aufteilung in zwei Generationen sinnvoll nutzen zu können, war es notwendig, innerhalb eines Jahres einen funktionstüchtigen Prototypen fertigzustellen, um ihn in Feldversuchen testen zu können. Gleichzeitig war es wichtig, einen identischen zweiten Arm zu bauen, der für Tests im Labor und für die Weiterentwicklung der Software genutzt werden konnte.

In diesem Kapitel wird der gesamte Entwicklungsprozess der Manipulatoren der ersten Generation dargestellt - von der Zusammenstellung der Anforderungen bis hin zu den ersten Ernte-Versuchen im Feld. Abbildung 3.1 zeigt die fertiggestellte Laborversion der beiden Prototypen.

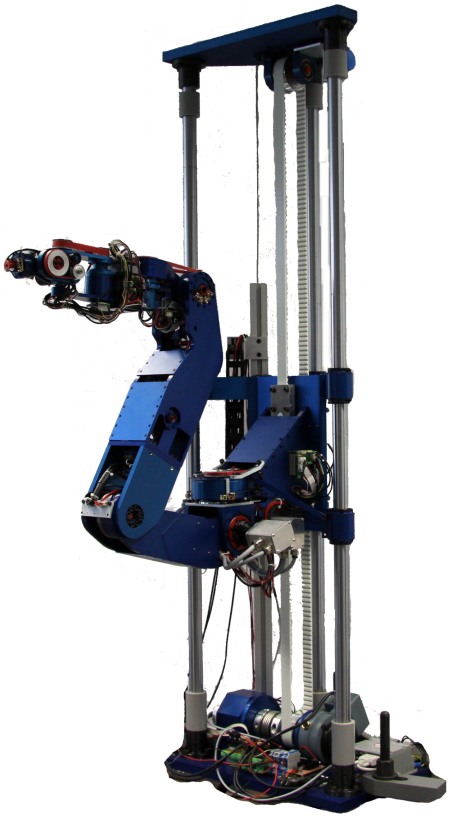


Bild 3.1: Zweiter Prototyp der ersten Generation, der für Versuche im Labor eingesetzt wird

3.1 Anforderungen

Auf der Grundlage von Messungen und Erfahrungen der Projektpartner, welche die Anwenderarbeitspakete WP5–7 bearbeitet haben (vgl. Kapitel 1.2), wurde eine Liste mit Anforderungen[1] an den Ernteroboter zusammengetragen. Diese Liste wurde verwendet, um die Rahmenbedingungen für die Entwicklung des Manipulators abzustecken. Im Folgenden werden die Anforderungen für die unterschiedlichen Anwendungen zusammengefasst und dargestellt.

3.1.1 Anbau der Pflanzen

Der folgende Abschnitt soll einen kurzen Überblick über den Anbau der Früchte geben, um eine Vorstellung von den benötigten Fähigkeiten des Manipulators zu erlangen.

Paprika

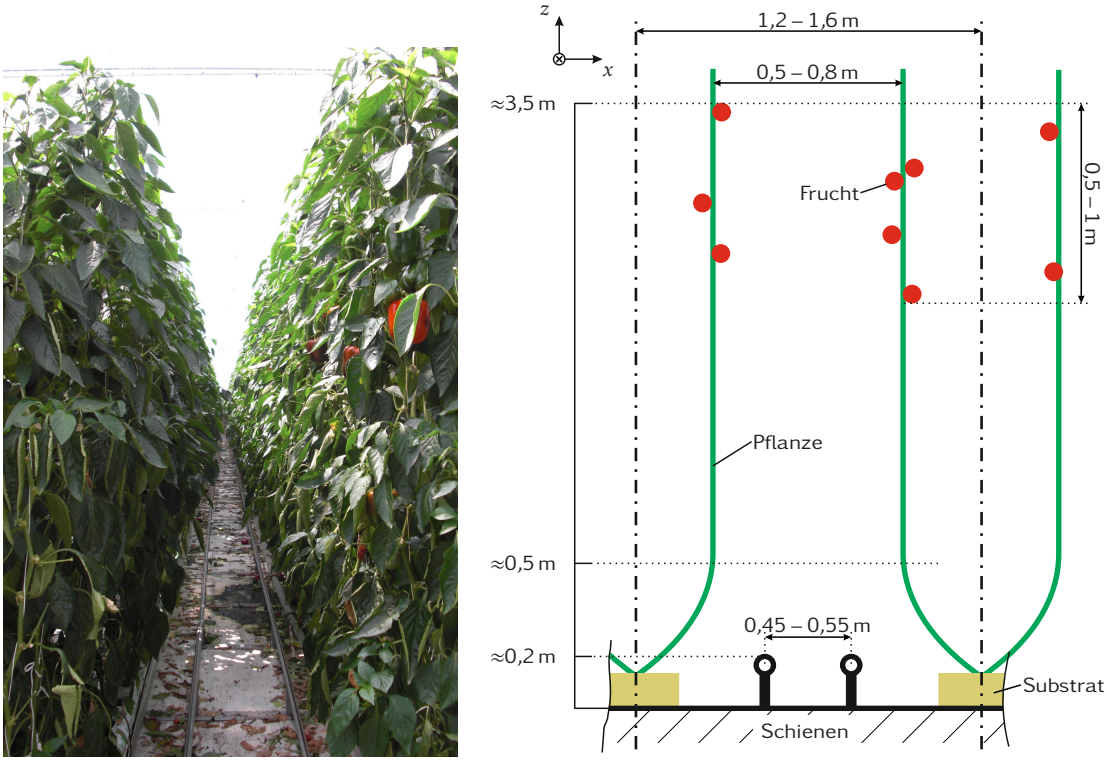
Paprikapflanzen werden üblicherweise in Gewächshäusern angebaut. Für einen hohen Ertrag werden sie dicht an dicht in langen parallel verlaufenden Reihen angebaut (siehe Abb. 3.2*a*). Die Abstände zwischen den Reihen sind dabei ausschlaggebend für die maximale Anzahl von Pflanzen in einem Gewächshaus. Bild 3.2*b* zeigt die schematische Darstellung eines Gangs.

Die Pflanzen wachsen in einem Substrat, welches eine Versorgung mit Nährstoffen gewährleistet. Die Abstände zwischen den Substratreihen, die tatsächlichen Abstände zwischen den Pflanzen und die Anzahl der Triebe, die aus einem Substrat wachsen, variieren auf Grund der unterschiedlichen Anbauweisen verschiedener Bauern. Zwischen jeweils zwei Reihen verlaufen am Boden Heizungsrohre. Zusätzlich zu ihrem eigentlichen Zweck werden die Rohre als Schienensystem für die beweglichen Plattformen der Erntehelfer genutzt.

Ein Umbau der bestehenden Gewächshäuser ohne eine garantierte Verbesserung der Ernteergebnisse durch den Einsatz eines Robotersystems ist aus Kostengründen nahezu ausgeschlossen. Zudem könnten mögliche Änderungen, wie breitere Gänge, die Erträge verkleinern, da die Anzahl an Pflanzen in einem Gewächshaus reduziert werden müsste. Daher ist eine Montage des Manipulators auf einer Plattform, die das vorhandene Schienensystem nutzt, vorgesehen. Die frei verfügbare Breite eines Gangs bei der weder Pflanzen noch Früchte zu stark touchiert werden, entspricht in etwa der Spurbreite der Schienen und gibt die maximale Breite des Ernteroboters vor.

Der Anbau der Paprika findet in einem Jahresrhythmus statt. Im Frühjahr werden die Substrate mit den Pflanzenkeimlingen in den Reihen der Gewächshäuser ausgelegt. Bis zum Winter wachsen die Pflanzen bis auf eine Höhe von etwa 3,5 m (Hemming et al., 2011). Die verbleibende Zeit des Jahresrhythmus wird zur Reinigung und Aufbereitung der Gewächshäuser und zur Zucht der nächsten Keimlinge verwendet.

1 Die gesamten Anforderungen können den Dokumenten Hemming et al. (2011); Nguyen et al. (2011) entnommen werden



(a) Blick entlang eines Korridors in einem Gewächshaus für Paprika

(b) Schematische Darstellung der entlang eines Korridors wachsenden Pflanzen

Bild 3.2: Reale und schematische Darstellung eines Ganges in einem Gewächshaus

Aus einem Substrat werden jeweils zwei oder drei Pflanzen gezogen. Ausgehend vom Substrat werden sie an Seilen, die an der Decke befestigt sind, abwechselnd zu den nebeneinander liegenden Gängen geführt. Da somit immer zwei Pflanzen zwischen zwei Reihen sind, können diese jeweils nur von einer Gangseite erreicht werden. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Pflanzen in einer Reihe beträgt etwa 30 cm. In diesem Bereich befinden sich oft mehrere Früchte neben-, hinter- und untereinander.

Ab dem Sommer können die ersten reifen Früchte geerntet werden. Die reifen Paprika wachsen am oberen Ende der Pflanze in einem Bereich von 0,5 – 1 m. Dementsprechend befinden sich die ersten Früchte die zu Beginn der Saison geerntet werden zunächst in einer Höhe von 0,5 – 1,5 m. Später, gegen Ende der Saison, müssen sie allerdings in einer Höhe von 2,5 – 3,5 m gepflückt werden.

Äpfel und Trauben

Äpfel und Trauben werden nicht in Gewächshäusern, sondern auf Feldern im Freien angebaut (Abb. 3.3). Die Art und Weise des Anbaus ähnelt zwar dem der Paprika, da auch hier lange parallel verlaufenden Reihen bepflanzt werden, davon abgesehen gibt es jedoch deutliche Unterschiede.

Die Abstände zwischen den Reihen sind deutlich größer, da zum einen beim Anbau auf die Hilfe von landwirtschaftlichen Maschinen zurückgegriffen wird und zum anderen die Kosten für die Anbaufläche im Vergleich zu einem Ge-

(a) Anbau von Äpfeln im Feld (b) Anbau von Trauben im Feld

Bild 3.3: In Reihen angepflanzte Apfelbäume bzw. Rebstöcke

wächshaus deutlich geringer sind. Zudem werden die Pflanzen nur in einfachen Reihen gepflanzt, was bedeutet, dass der Zugang zu den Früchten von beiden Seiten möglich ist. Ganz wesentlich ist der Unterschied im Wachstumszyklus der Pflanzen. Apfelbäume und Weinreben werden nicht jede Saison neu gepflanzt, sondern wachsen über etliche Jahre hinweg. Bei den Pflanzen, die alt genug sind, um Früchte zu tragen, entstehen und reifen diese zur selben Zeit an der gesamten Pflanze. Die Erntezeit umfasst daher nur wenige Wochen im Jahr.

Entgegen natürlicher Apfelbäume, die weit verästelt sind und nur schwer den Zugriff auf die Früchte erlauben, sind moderne Züchtungen durch das Anbinden an eine Art Gitter (ähnlich einem Erziehungssystem für Weinreben) sowie gezieltes Beschneiden besser an eine maschinelle Bearbeitung angepasst (Bild 3.3*a*). Das flache, planare Palmetten-System, auf das hier Bezug genommen wird, lässt die Pflanzen in einer Ebene wachsen, wodurch der Zugriff von den Seiten vereinfacht wird. Die einzelnen Bäume werden etwa 2,5 – 3 m hoch, weisen dabei jedoch nur eine Tiefe von knapp 50 cm auf. Daher können die Pflanzen leicht von beiden Seiten gepflegt und abgeerntet werden (Nguyen et al., 2011). Die Blüten, aus denen sich die Äpfel entwickeln, wachsen oft in doldigen Blütenständen. Um die spätere Ernte zu vereinfachen und die Qualität der Äpfel zu verbessern, werden die Blütenstände ausgedünnt. Damit wird sichergestellt, dass nicht zu viele Äpfel um die Nährstoffe konkurrieren.

Weintrauben werden in ähnlicher Weise angepflanzt (siehe Bild 3.3*b*). Die Abstände zwischen den Reihen können zwar variieren, sind aber, anders als beim Anbau von Paprika, sehr groß. Die Pflanzen werden etwa 2 m hoch und haben eine Breite von 0,5–0,8 m (Nguyen et al., 2011). Die Früchte wachsen in so genannten Trauben, die über einen Stiel mit der Pflanze verbunden sind. Geerntet werden nicht die einzelnen Beeren, sondern die gesamten Trauben, die sich in Höhe von 1–2 m befinden. Durch teilweises Entfernen der Blätter wird erreicht, dass die

Trauben während ihres Wachstums mehr Sonnenlicht und -wärme erhalten und zugleich besser zu ernten sind.

Zusammenfassung

Die Bedingungen im Gewächshaus, insbesondere die begrenzten Platzverhältnisse, stellen die größten Herausforderungen für die Entwicklung des Ernteroboters dar. Daher werden als Grundlage für die allgemeine Konzeptfindung, z.B. für die Definition des Arbeitsraums, die Gegebenheiten bei der Ernte von Paprika verwendet.

3.1.2 Arbeitsraum

Für den ersten Prototypen wird von einem vereinfachten Szenario ausgegangen. Um Kollisionen mit benachbarten Pflanzen zu vermeiden, wird eine isolierte Pflanze im Raum betrachtet. Ein Konzept, wie dieses in der Realität erreicht werden könnte und welcher Platz sich hierdurch ergeben würde, ist in Bild 3.4 dargestellt. Die drei Abbildungen illustrieren zum einen den Prozess in dem die benachbarten Pflanzen zur Seite geschoben werden. Zum anderen wird die Pflanze, an welcher die Früchte geerntet werden sollen, in Richtung des Manipulators verschoben. Durch diesen Eingriff entsteht der erwünschte Arbeitsraum in dem sich der Manipulator mit End-Effektor, wie in Abbildung 3.4 dargestellt, um die Pflanze herumbewegen kann.

Die Isolation der abzuerntenden Pflanze wird in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Neben einer mechanischen Variante, wie sie Abbildung 3.4 angedeutet wird, könnte die Erreichbarkeit der Pflanzen auch durch eine Änderung der Anbauweise erreicht werden.

Die vertikale Ausdehnung des gewünschten Arbeitsbereichs definiert sich über die Zone in der sich aktuell die reifen Früchte befinden. Diese misst, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, etwa einen Meter und sollte vom Manipulator abgedeckt werden können. Da sich dieser Bereich im Laufe eines Jahres (bei Paprika) verschiebt, ist hier eine Plattform notwendig, die eine grobe Einstellung der Höhe in diesem Bereich erlaubt.

3.1.3 Leistung

Eine Rentabilitätsanalyse innerhalb des CROPS Projekts, durchgeführt von der Universität Wageningen (Pekkeriet, 2011), ergab für die Ernte von Paprika bei einer effektiven Einsatzzeit von sechs Tagen in der Woche und zwanzig Stunden pro Tag eine Erntezeit von etwa 6 Sekunden pro Frucht. Würden für das Abtrennen einer Frucht etwa zwei Sekunden benötigt, so blieben für den Hin- und Rückweg zwischen Frucht und einem Ablagebehälter jeweils weitere zwei Sekunden.

Diese zwei Sekunden werden als Anhaltspunkt für die Auslegung der Manipulatoren verwendet, obgleich es bei diesem Forschungsprojekt nur am Rande um die Wirtschaftlichkeit des Systems geht.

Um die erforderliche Leistung der einzelnen Gelenke bzw. deren Antriebe berechnen zu können, wird zum einen das Gewicht des End-Effektors inklusive der

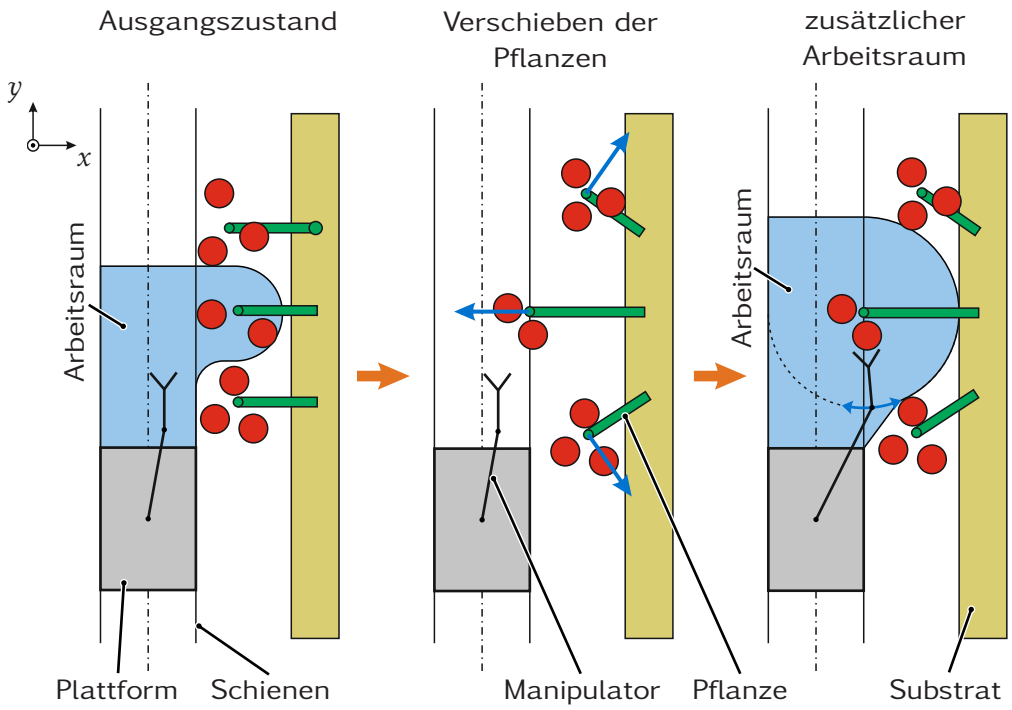


Bild 3.4: Darstellung des Arbeitsraums bei der Paprikaernte von oben – Links der ursprüngliche Arbeitsraum; in der Mitte eine Möglichkeit zur Vergrößerung; Rechts der zusätzlich gewonnene Arbeitsraum

Frucht benötigt. Zum anderen sind die Gewichte bzw. Massenträgheitsmomente der einzelnen Manipulatorsegmente zu ermitteln. Für die Auslegung der Komponenten wurden dynamische Simulationen, auf der Basis der jeweils aktuellen und verfügbaren Daten, durchgeführt (vgl. 3.3.2).

Als Grundlage der Berechnung dienen drei Trajektorien, die in Bild 3.5 dargestellt sind. Die orange Trajektorie ist eine Halbkreisbewegung in der x-y-Ebene. Die beiden anderen Pfade haben eine zusätzliche z-Komponente in positive bzw. negative Richtung. Die Trajektorien sollen vereinfacht einen typischen Pfad des End-Effektors bzw. des Tool Center Point (TCP) beschreiben. Beginnend bei der Ausgangsposition, z.B. über einem Sammelbehälter, wird der End-Effektor um eine Pflanze (dargestellt als grüner Zylinder) herum zu einer Frucht bewegt. Die beiden anderen Früchte liegen 0,5 m über bzw. unter der mittleren Position.

Um die Früchte sicher erreichen und auch greifen zu können, wird eine Genauigkeit von einem Zentimeter am TCP verlangt.

3.1.4 Modularität

Aufgrund der vergleichsweise hohen Anforderungen hinsichtlich der Beweglichkeit und des verfügbaren Arbeitsraums wurde der Manipulator zunächst für die Ernte von Paprika konzipiert. Die spätere Adaption an die Ernte von Äpfeln und Trauben sowie die Pestizidbehandlung von Wein soll durch ein modulares System ermöglicht werden.

Mittels Änderung der Kinematik, zum Beispiel durch Reduktion der Freiheitsgrade oder durch eine Anpassung der Längen der einzelnen Segmente, soll der

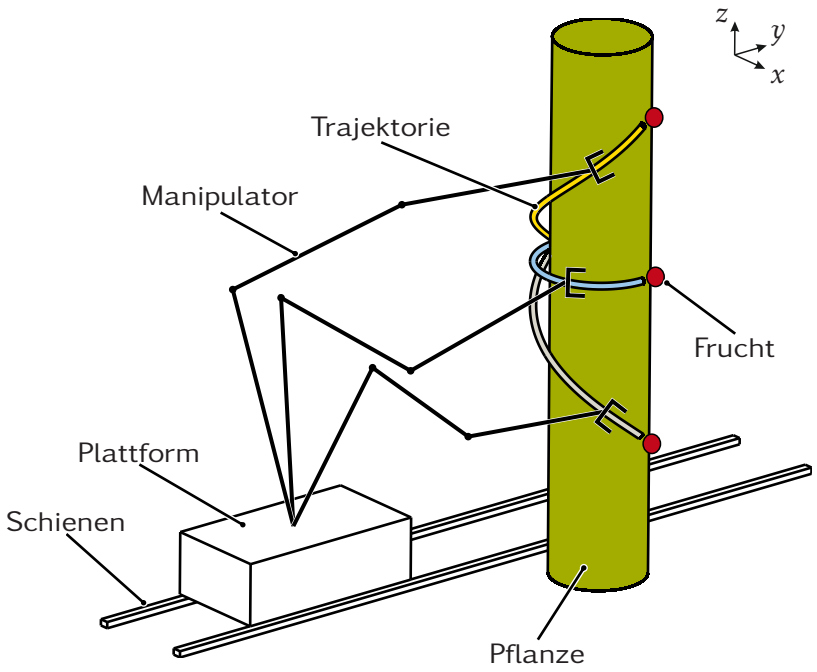


Bild 3.5: Darstellung der Trajektorien, die als Grundlage für die dynamische Berechnung verwendet wurden

Manipulator an die unterschiedlichen Arbeitsräume und Eigenschaften der Pflanzen angepasst werden. Darüber hinaus ist es notwendig, eine Schnittstelle für verschiedene End-Effektoren bereit zu stellen, da für die Behandlung bzw. Ernte von unterschiedlich gearteten Früchten entsprechend angepasste Werkzeuge benötigt werden.

3.1.5 Weitere Anforderungen

Neben den Anforderungen, die direkt aus dem Ernteprozess abgeleitet sind, gibt es eine Vielzahl an weiteren Eigenschaften, die für die erfolgreiche Nutzung des Manipulators von ausschlaggebender Bedeutung sind.

Ein sehr wichtiger Aspekt bei dem Betrieb einer Maschine ist die Sicherheit. Dabei ist vor allem darauf zu achten, Gefahren für die Umwelt, insbesondere für den Menschen, zu minimieren. Darüber hinaus ist es wichtig, dass der Manipulator vor Schäden durch sich selbst oder durch die Umwelt bewahrt wird, um eine langfristige und reibungslose Erprobung des bzw. der Prototypen zu ermöglichen.

Des weiteren gibt es eine Reihe von Anforderungen die vor allem den Produktionsprozess und die Bedienung des Manipulators betreffen:

- **Fertigungsgerechte Konstruktion:** Ein wichtiger Punkt für den schnellen Aufbau eines Prototypen ist eine fertigungsgerechte Gestaltung. Damit keine langen Fertigungszeiten den Entwicklungsprozess in die Länge ziehen, sollten die einzelnen Bauteile entsprechend der verfügbaren Fertigungsverfahren konstruiert werden.

- **Einfache Montage:** Analog zur Fertigung sollte bereits in der Konstruktion die Montage berücksichtigt werden, damit keine Verzögerungen durch Änderungen oder aufwendige Montagearbeiten entstehen.

- **Gute Transportfähigkeit:** Der Prototyp wird für den Einsatz vor Ort, für die Ernte von Paprika, Äpfeln etc. konzipiert. Daher ist es unabdingbar, dass der Manipulator zwischen den Einsatzgebieten transportiert wird. Dieser Aspekt sollte schon früh in die Entwicklung einbezogen werden, um Transportschäden zu vermeiden.

- **Zentrale Elektronik:** Für eine einfache Handhabung des Manipulators, auch in Bezug auf den Transport, ist es wünschenswert, dass die Elektronik zur Steuerung des Manipulators - soweit nicht im Arm selbst verbaut - an einem zentralen Ort untergebracht ist. Des Weiteren sollte sie vom Manipulator trennbar sein, damit sie separat transportiert oder auch ausgetauscht werden kann.

- **Schutz vor Umwelteinflüssen:** Um den Manipulator vor Nässe, Staub, Blättern oder Ähnlichem zu schützen, insbesondere beim Präzisionssprühen, sollte ein geeigneter Schutz für die Elektronik vorgesehen werden.

3.2 Mechatronisches Konzept

Die Konzeptfindung dient in erster Linie dazu, geeignete Prinzipien zu finden mit denen die zusammengestellten Anforderungen erfüllt werden können. Um eine möglichst große Vielfalt von Konzepten zu generieren, sollte man zunächst einmal versuchen, die konstruktive Umsetzbarkeit, wirtschaftliche Aspekte und Ähnliches zu ignorieren.

Für die Erfüllung der vorliegenden Aufgabe kann eine Vielzahl an potenziellen Konzepten gefunden werden. Drohnen, kletternde oder springende Mikroroboter sind nur einige der Ideen, die zu einem neuartigen Erntesystem führen könnten. Auf Grund des Zeitplans, der durch das Projekt, insbesondere durch die iterative Herangehensweise mit zwei Roboter-Generationen, gegeben ist, war es jedoch nicht möglich, einen derartigen neuen Ansatz zu verfolgen. Um zügig erste Versuche mit einem Prototypen durchführen zu können, wird ein Manipulator, ähnlich den Robotern, wie sie in Sektion 2 beschrieben werden, als Grundlage für das Konzept gewählt.

Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, ist der erste Manipulator für eine isoliert stehende Pflanze in einem Gang konzipiert. Um die Suche nach einem geeignetem Konzept weiter zu vereinfachen, wird zudem davon ausgegangen, dass in einem ersten Schritt nur eine Hälfte der Pflanze abgeerntet werden muss, da die andere Seite bei einer späteren Fahrt von der anderen Seite des Gangs aus erreicht werden kann. Eine Alternative dazu wäre ein Aufbau mit zwei Manipulatoren, mit dem beide Seiten gleichzeitig bearbeitet werden könnten.

3.2.1 Kinematisches Design

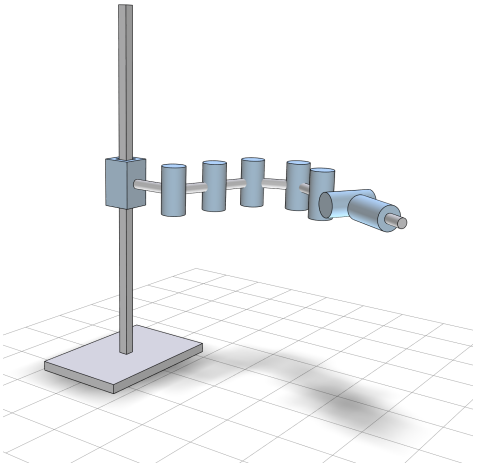
Die Basis des Manipulators ist die Kinematik. Durch diese sowie durch Beschränkungen der Gelenke, wird der Arbeitsraum eines Roboters definiert. In Kapitel 2 wurden zwei Ansätze gezeigt, um einen Ernteroboter zu entwickeln. Zum einen kann ein kommerziell erhältlicher Industrieroboter verwendet werden oder es wird ein speziell auf vorliegende das Problem zugeschnittener Roboter entwickelt. Herkömmliche Industrieroboter, wie zum Beispiel ein Scara Roboter für Pick and Place Aufgaben oder serielle Knickarmroboter (Siciliano und Khatib, 2008), die in der Fertigung in der Automobilindustrie eingesetzt werden, machen einen Großteil der jährlich verkauften Roboter weltweit aus (The International Federation of Robotics (IFR), 2014). Anpassungen an Früchte und Pflanzen bzw. den vorhandenen Arbeitsraum sind damit allerdings kaum möglich, weswegen in dieser Arbeit die Entwicklung eines neuen Manipulators beschrieben wird.

Vorauswahl Kinematiken

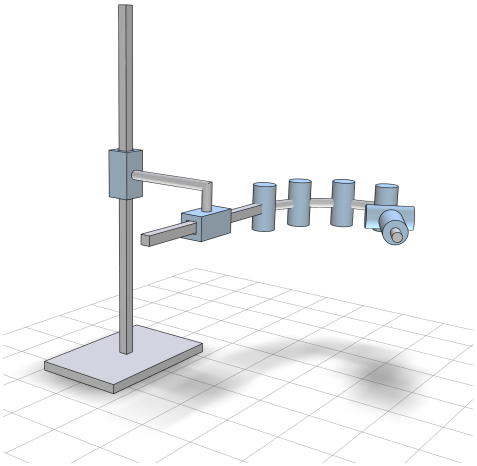
Aus einer Vielzahl an kinematischen Entwürfen wurde eine Vorauswahl aus sechs möglichen Varianten (vgl. Bild 3.6) getroffen, die genauer betrachtet und miteinander verglichen wurden. Eine Gemeinsamkeit dieser Entwürfe, die dem Bereich der reifen Früchte an einer Pflanze geschuldet ist, ist ein langes vertikales prismatisches Gelenk. Dieses soll ermöglichen, Äpfel und Paprika in dem gewünschten Bereich zu ernten. Eine weitere Gemeinsamkeit der Vorauswahl sind die letzten drei Freiheitsgrade, die so angeordnet sind, dass sie eine Art Handgelenk bilden, welches eine genaue Positionierung des End-Effektors ermöglichen soll. Des weiteren kann man die Konzepte grob in drei Gruppen unterteilen.

Die erste Gruppe K1, K2 und K3 (Abb. 3.6 (a-c)) zeichnet sich durch die horizontale Ausrichtung aus. Abgesehen von der prismatischen Achse und dem Handgelenk befinden sich alle Gelenke in einer Ebene. Die Linearachse wird für die Positionierung in der Höhe verwendet, während die restlichen Gelenke die Positionierung des Handgelenks mit End-Effektor in der Ebene übernehmen. K1 weist 4 rotatorische Freiheitsgrade in dieser Ebene auf. Dadurch soll eine hohe Beweglichkeit bei gleichzeitig großer Reichweite ermöglicht werden. Außerdem kann der Arm zusammengefaltet werden, um die Anforderungen an den begrenzten Bauraum zu erfüllen. Die Kinematik K2 besitzt anstelle des ersten rotatorischen Gelenks eine prismatische Achse. Dadurch soll die Beweglichkeit quer zu der Pflanze erhöht werden. K3 ist der Versuch, weniger Freiheitsgrade zu verwenden, um die Konstruktion und Regelung zu vereinfachen. Um den dabei auftretenden Verlust an Flexibilität auszugleichen, wird die Linearachse von Gelenk 2 verlängert. Das gleiche Prinzip kann man auf die Kinematik K1 anwenden. Ein Drehgelenk könnte entfernt werden, wenn stattdessen die Längen der restlichen Elemente angepasst würden.

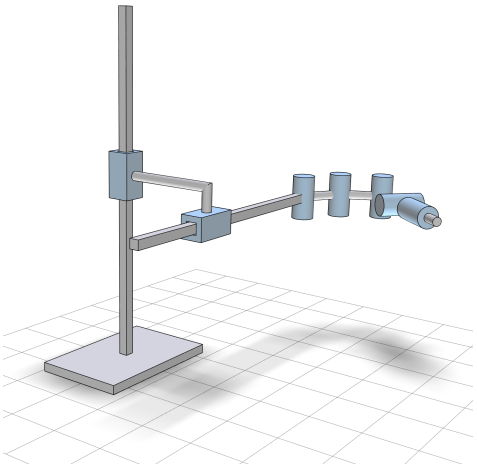
K4 ist eine Mischung aus vertikalen und horizontalen Gelenken. Die Länge des Arms kann über die drei horizontalen Gelenke variiert werden, indem sich der Manipulator zusammenfaltet oder ausstreckt. Das zweite Gelenk verschafft die nötige Freiheit, um die Bewegung um die Pflanze herum zu ermöglichen. Das sechste Gelenk ist als Ausgleich zu dieser Bewegung konzipiert. Mit dieser



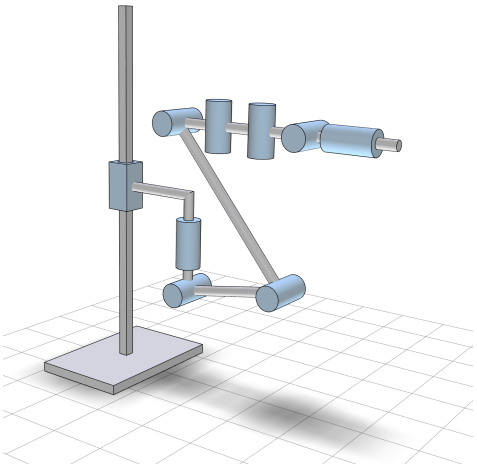
(a) K1 - PRRRRRRR



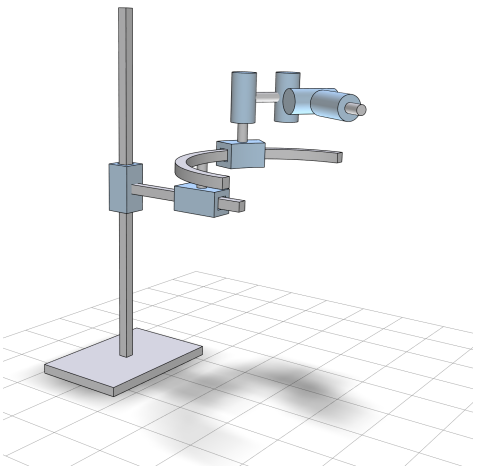
(b) K2 - PPRRRRRR



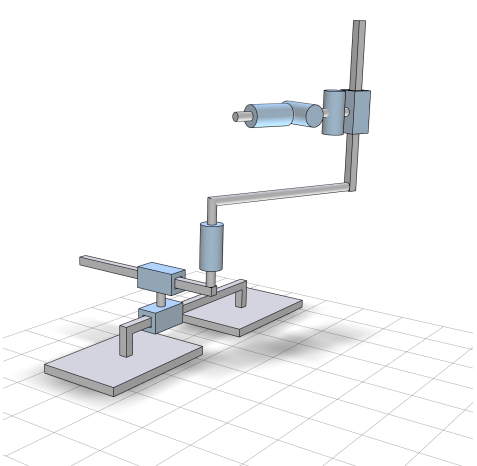
(c) K3 - PPRRRRR



(d) K4 - PRRRRRRRR



(e) K5 - PPRRRR



(f) K6 - PPRPRRR

Bild 3.6: Vorauswahl der Kinematiken der Generation 1; P - prismatisches Gelenk; R - rotatorisches Gelenk

Mischung ist eine gute Beweglichkeit im Raum gegeben, allerdings sind insgesamt neun DOF notwendig.

Die letzte Gruppe (K5 und K6) umfasst zwei Konzepte, die ausschließlich für die Paprikaernte entworfen wurden. Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, ist die grundsätzliche Idee, einen Greifer auf einer Halbkreisbahn um die Paprikapflanze herum zu führen. Deshalb sind K5 und K6 so konzipiert, dass sie diese Bewegung mit Hilfe eines einzigen DOF ausführen können. Bei der Kinematik K5 wird dies über eine halbkreisförmige Führung erreicht. An diese schließt sich ein weiterer DOF an, mit dem es möglich ist, das Handgelenk zum Inneren des Halbkreises, also in Richtung der Pflanze auszurichten. Um die halbkreisförmige Führung zu einer Pflanze bzw. von dieser weg zu bewegen, ist ein weiteres prismatisches Gelenk vorgesehen. Im Gegensatz zu dem Konzept mit einer gebogenen Führung bei K5 ist die Idee bei K6, ein rotatorisches Gelenk mit Hilfe zweier prismatischer Gelenke in die Achse der Pflanze zu positionieren. An diesem Gelenk befindet sich ein Ausleger, der in dieser Position um die Achse der Pflanze geschwenkt werden kann. Das prismatische Gelenk für die Justierung der Höhe sowie das Handgelenk befinden sich an dem Ausleger.

Auswahl der finalen Kinematik

Die Eignung einer Kinematik für die Entwicklung eines Prototyps und dessen Eignung für die Ernte von Früchten kann ohne definierte Kriterien kaum festgestellt werden. Deshalb wurden Kriterien formuliert, die eine objektive Auswahl der Kinematik ermöglichen sollten. Durch die Bewertung der unterschiedlichen Vorschläge konnte so das geeignetste Konzept bestimmt werden.

Die Kriterien, die für die Auswahl der Kinematik herangezogen wurden, sind:

- **Konstruktiver Aufwand:** Die Kinematik lässt keinen direkten Schluss auf eine bestimmte Konstruktion zu. Allgemein kann jedoch angenommen werden, dass sich der Aufwand z.B. mit steigender Anzahl der Freiheitsgrade vergrößert. Es kann abgeschätzt werden, wie groß der Aufwand für die Entwicklung von ähnlichen oder sehr verschiedenen Gelenken ist oder wie komplex die Konstruktion der Struktur abhängig von unterschiedlichen Eigenschaften einer Kinematik sein könnte.

- **Steuerung und Regelung:** Mit einer steigenden Anzahl an DOFs, steigt sowohl die Komplexität des elektronischen Aufbaus als auch der Kommunikation zwischen Steuerrechner und Gelenken. Daher können Konzepte notwendig werden, die z.B. eine höhere Bandbreite des Daten-Busses erlauben. Manipulatoren mit bis zu 7DOFs sind in der Regelung der Stand der Technik, für eine größere Anzahl an Freiheitsgraden, kann oder muss weiterer Aufwand betrieben werden, um die Redundanz des Systems ausnutzen zu können.

- **Modularität:** Wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben, ist es ein wesentlicher Aspekt des Projekts CROPS, einen Manipulator zu entwickeln, der sich für verschiedene Aufgaben adaptieren lässt. Um diesem Anspruch gerecht zu

Tabelle 3.1: Bewertung der sechs Kinematiken

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Anzahl DOF	8	8	7	9	7	7
Konstruktiver Aufwand	+	0	+	–	0	– –
Steuerung und Regelung	+	+	++	0	++	++
Modularität	0	+	+	++	– –	– –
Flexibilität	–	0	–	++	– –	–
Taktzeit	0	+	0	0	++	++
Arbeitsraum/Bauraum	+	+	0	++	+	+

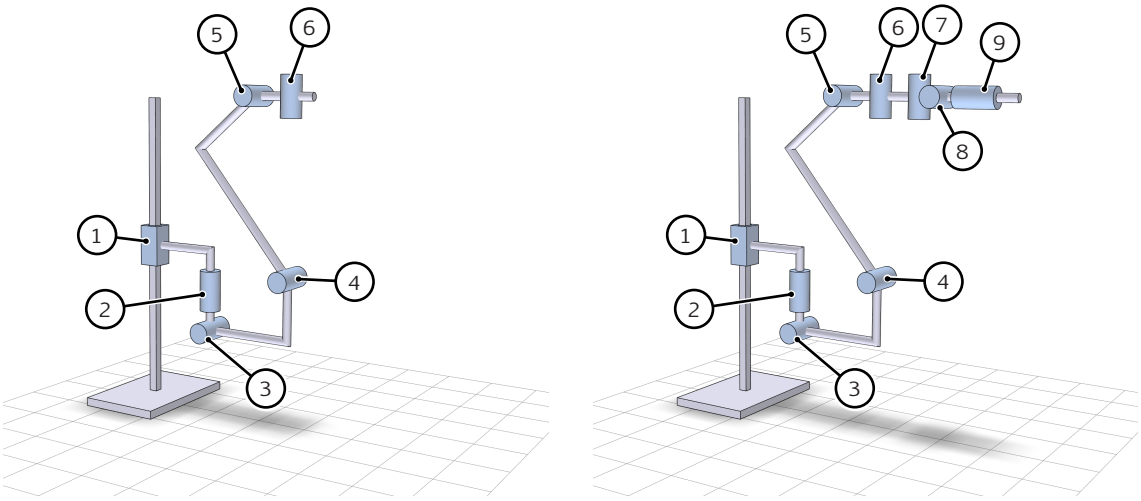
werden, ist es erforderlich, schon bei der Auswahl des Konzepts die Möglichkeit eines modularen Aufbaus zu berücksichtigen. Im konkreten Fall bedeutet dies, festzustellen, ob und wie die Kinematik sinnvoll ergänzt, reduziert oder verändert werden kann, um für die unterschiedlichen Anforderungen eine passende Alternative bereitzustellen.

- **Flexibilität:** Im Gegensatz zur Modularität soll die Flexibilität nicht ein Maß für die Adaptierbarkeit an unterschiedliche Tätigkeiten sein, sondern für die Eignung, sich innerhalb eines Szenarios an wechselnde Bedingungen anzupassen. Insbesondere in Umgebungen mit vielen Hindernissen ist es erforderlich, einen gewissen Grad an Redundanz bereitzustellen, um die Hindernisse umgehen und so die ausgewählten Ziele erreichen zu können.

- **Taktzeit:** Eine vorgegebene Taktzeit könnte prinzipiell durch das Anpassen der Leistung eines Manipulators erreicht werden. Durch den zur Verfügung stehenden Bauraum ist es allerdings nicht möglich, die Aktorik beliebig zu vergrößern. Somit muss bewertet werden, ob ein Design auf Grund seiner Kinematik gut für die Aufgabe(n) geeignet ist oder ob besonders großer Aufwand betrieben werden muss, um die zeitlichen Vorgaben erfüllen zu können.

- **Arbeitsraum vs. Bauraum:** Der Arbeitsraum eines Manipulators kann leicht durch das Verändern von Segmentlängen angepasst und vergrößert werden, wodurch sich voraussichtlich auch der Bauraum vergrößert. Für den Manipulator ist ein großer Arbeitsraum bei kleinem Bauraum wichtig. Daher ist das Verhältnis zwischen diesen beiden für die Entwicklung des Armes zu beachten.

Tabelle 3.1 zeigt die Bewertung der Kinematiken anhand der beschriebenen Kriterien. Deutlich zu erkennen ist, dass die beiden Kinematiken K5 und K6 sehr gut für die Ernte von Paprika geeignet sind. Durch die einfachen Kinematiken, die genau auf die speziellen Anforderungen zurecht geschnitten sind, verringert sich der Aufwand für die Regelung und es können sehr kurze Taktzeiten erreicht werden. Allerdings haben diese Konzepte den Nachteil, dass sowohl Modularität als auch Flexibilität stark begrenzt sind. Das sechste Konzept ist zudem schwierig umzusetzen, da aufwändige und steife Linearführungen für die Positionierung des Auslegers integriert werden müssten.



(a) 6DOF Konfiguration (b) 9DOF Konfiguration

Bild 3.7: Kinematik der Generation 1

Die vier restlichen Kinematiken besitzen keine gravierenden Nachteile. Die Flexibilität der Varianten K1–K3 ist auf Grund der Ausrichtung und der Anzahl der Gelenke aber eher gering. Ausschlaggebend für die Auswahl des Konzepts waren die guten Werte für Modularität und Flexibilität, die Variante K4 aufzuweisen hat. Sie ergeben sich durch die Anordnung der Gelenke und die dadurch entstehenden Möglichkeiten. Gerade zu Beginn des Projekts ist es sehr wichtig, eine höhere Flexibilität zu haben, weswegen der vergrößerte Aufwand für die Konstruktion der insgesamt neun Gelenke des ersten Prototyps in Kauf genommen werden kann.

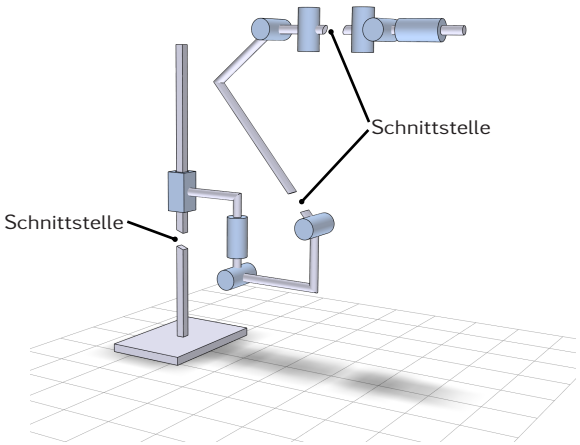


Bild 3.8: Schnittstellen der Kinematik der ersten Generation

In Abbildung 3.7 ist die Kinematik K4 der ersten Manipulator-Generation in zwei möglichen Konfigurationen dargestellt. Zum einen ist eine Variante mit

6DOFs (Abb. 3.7*a*) dargestellt, die für den gezielten Einsatz von Sprühmitteln oder für die Apfel- bzw. Traubenernte geeignet wäre, zum anderen die Version mit 9DOFs (Abb. 3.7*b*), die für die Ernte von Paprika gedacht ist. Bild 3.8 zeigt die möglichen Schnittstellen an dem Kinematischen Konzept.

3.2.2 Struktur

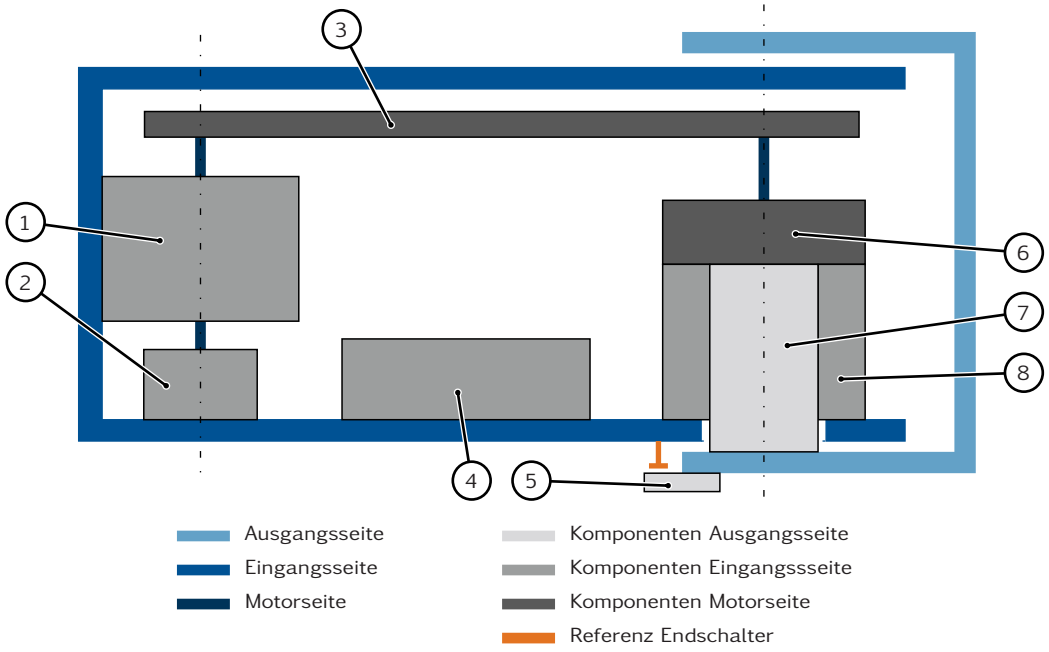
Für die Gestaltung der Struktur eines Manipulators gibt es zwei gegensätzliche Herangehensweisen. Man kann die Struktur besonders steif gestalten, was meistens ein höheres Gewicht mit sich bringt, oder man erlaubt eine gewisse Flexibilität, wodurch das Gewicht verringert aber der Aufwand für die Regelung deutlich erhöht wird.

- Eine sehr steife Konstruktion vereinfacht die Regelung, da hierbei von ideal steifen Komponenten ausgegangen wird. Mit dieser Annahme kann der TCP im Raum direkt mithilfe der zugrunde liegenden Kinematik und den Positionen der einzelnen Gelenke nach Orin und Schrader (1984) berechnet werden, wohingegen für eine flexible Struktur dies nicht mehr möglich ist. Neben den Positionen der Gelenke ist vor allem eine Aussage über den Zustand der flexiblen Elemente notwendig, um eine genaue Bestimmung der Position des TCP zu erreichen.

- Flexible Elemente können prinzipiell in zwei Bereiche eines Manipulators integriert werden. Zum einen kann die Struktur zwischen den Gelenken eine niedrige Steifigkeit aufweisen (wie z.B. bei Richter und Pfeiffer (1991); Höbarth et al. (2011)), oder es können direkt in den Gelenken nachgiebige Elemente integriert werden (Schiavi et al., 2008; Wolf und Hirzinger, 2008; Albu-Schäffer et al., 2011; Laffranchi et al., 2011). Bei beiden Methoden ist eine zusätzliche Sensorik erforderlich, um den Einfluss der verringerten Steifigkeit zu erfassen.

Der Einsatz von flexiblen Manipulatoren ist besonders dann von Interesse, wenn eine Kooperation zwischen Mensch und Maschine gewünscht ist. Für das vorliegende Szenario ist keine Kooperation mit Menschen erforderlich. Es wird vielmehr eine schnelle und einfache Lösung (sowohl seitens der Konstruktion als auch der Regelung) gesucht. Daher wurde entschieden, einen Manipulator mit steifer Struktur zu entwickeln.

Für dynamische Bewegungen des Manipulators ist eine gute Gewichtsverteilung entscheidend. Abbildung 3.9 zeigt das vereinfacht dargestellte Konzept der rotatorischen Gelenke. Der Motor und die Elektronik werden soweit möglich an der Eingangsseite der Gelenke platziert, um so das Trägheitsmoment des Armes niedrig zu halten. Die Struktur bildet das Gerüst für den Antrieb, die Sensorik und Elektronik der Gelenke. Bei der Konstruktion ist daher neben der Fertigung und Montage auch die Platzierung und Anbindung der Komponenten zu berücksichtigen. Darüber hinaus muss, je nach Gelenk die Verbindung zu dem vorherigen bzw. nachfolgenden Gelenk, gerade in Bezug auf die gewünschte Modularität, bedacht werden.



1 Motor
2 Inkremental Encoder
3 Riementrieb
4 Motorsteuerung
5 Endschalter
6 Getriebe Eingang
7 Getriebe Ausgang
8 Getriebe Gehäuse

Bild 3.9: Schematische Darstellung eines Gelenks mit Riementrieb

Die vorhandenen Fertigungsmöglichkeiten (siehe Kapitel 3) und das Verhältnis von Kosten, Gewicht und Steifigkeit bedingen die Verwendung von einfach zu fertigenden Bauteilen aus Aluminium, die zu der Struktur miteinander verschraubt werden.

3.2.3 Aktorik

Es gibt viele verschiedene Antriebsarten, die sich in Leistung, Baugröße, Gewicht, Kosten, Betriebsmedium und vielen anderen Aspekten unterscheiden. Die am meisten verbreiteten Typen sind pneumatische, hydraulische und elektrische Antriebe. Im Folgenden werden diese genauer beschrieben, um Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen und darauf basierend, die Auswahl des grundlegenden Antriebssystems vorzunehmen.

Elektrischer Antrieb Elektrische Antriebe sind die wohl am meisten genutzten Aktoren in der Robotik. Sowohl Industrieroboter wie z.B. von KUKA[2] oder ABB[3], experimentelle Laufmaschinen (Hirai et al., 1998; Kaneko et al., 2002; Lohmeier et al., 2009), als auch verschiedene Roboter in der Landwirtschaft (Kitamura und Oka, 2006; Han et al., 2012) werden mit diesen angetrieben. Es werden üblicherweise rotatorische Motoren eingesetzt, die direkt als Antrieb von Drehgelenken verwendet werden können.

2 http://www.kuka-robotics.com/
3 http://new.abb.com/

Die Motoren bieten einen hohen Wirkungsgrad, haben ein gutes Leistungsgewicht und sind vor allem in einer großen Anzahl an Varianten erhältlich. Dank der breiten Auswahl kann für jeden Einsatzzweck ein passender Motor gefunden werden.

Hydraulik Maschinen im Bauwesen oder Pressen, die eine hohe Leistungsdichte benötigen, werden üblicherweise mit hydraulischen Aktoren betrieben. Aber auch verschiedene Roboter, die z.B. eine hohe Traglast erreichen sollen, werden mit ihnen ausgerüstet.

Die Aktoren bieten eine sehr hohe Leistungsdichte. Sie sind einfach zu regeln, haben eine lange Lebensdauer und sind sehr robust gegenüber Umwelteinflüssen. Dafür besteht bei dem Öl, welches als Betriebsmedium genutzt wird, die Gefahr von Leckagen und der Verschmutzung der Umwelt. Für das Öl wird zudem eine aufwendige Aufbereitung benötigt, um eine lange Lebensdauer zu garantieren. Für einen stationären Roboter kann der Öldruck zugeführt werden, wobei hier Strömungsverluste in den Leitungen berücksichtigt werden müssen. Für ein flexibles System muss die Ölpumpe etc. mitgeführt werden.

Pneumatik Konstruktiv betrachtet, ist das Prinzip der Pneumatik dem der Hydraulik sehr ähnlich. Die gängigen Antriebe sind lineare Zylinder sowie rotatorische Motoren. Eine Alternative sind pneumatische Muskeln, die durch ihren besonderen Aufbau, beschrieben in Daerden und Lefeber (2000), unter Druck eine Zugkraft entwickeln. Bei ihnen ist jedoch, wie bei echten Muskeln, ein antagonistisches Setup notwendig, um ein vollständiges Gelenk zu verwirklichen. Die Eignung eines derartigen Aufbaus für den Ernteroboter wurde von Jörg Baur in Baur et al. (2014b) untersucht. Der wesentliche Unterschied zur Hydraulik besteht bei der Pneumatik im Betriebsmedium Luft mit seinen speziellen Eigenschaften. Luft hat den Vorteil der einfachen Verfügbarkeit und ist unbedenklich für Mensch und Umwelt. Zudem sind die Strömungsverluste in den Leitungen auf Grund der niedrigen Viskosität gering. Von Bedeutung ist jedoch die hohe Kompressibilität der Luft. Bei der Bereitstellung von hohen Drücken wird das Medium stark komprimiert, was zu einer starken Erwärmung und somit Energieverlusten führt. Auch kann eine die plötzliche Dekompression des Mediums – z.B. bei einem Leitungsdefekt – große Zerstörungen verursachen. Daher werden normalerweise nur Drücke von 6–10 bar genutzt, was wiederum eine niedrigere Antriebskraft zur Folge hat.

Auswahl Hydraulik als Betriebsmedium für einen Manipulator ist eine Alternative (Boston Dynamics, 2013) zu den gängigen elektrischen Antrieben, die sich vor allem durch das hohe Leistungsgewicht und eine einfache Regelung auszeichnet. In einer Umgebung, wie dem Gewächshaus ist jedoch der Einsatz von Hydraulikölen wegen möglicher Leckagen zu vermeiden, zudem ist die Aufbereitung des Öls und dessen Bereitstellung aufwendig. Im Gegensatz dazu könnte eine Pneumatik ohne Bedenken in der Umgebung von Pflanzen eingesetzt werden. Allerdings ergeben sich hier Nachteile hinsichtlich des Wirkungsgrads und weil

der Druck aus Sicherheitsgründen begrenzt sein muss. Die Regelung ist bedingt durch die Kompressibilität des Mediums sehr aufwendig.

Die aufgeführten Nachteile der Hydraulik und Pneumatik sowie die einfache Verfügbarkeit von elektrischen Motoren und deren große Vielfalt gaben den Ausschlag für die Entwicklung eines elektrisch betriebenen Manipulators. Hinzu kommt die große Erfahrung mit elektrischen Antrieben am Lehrstuhl (Gienger, 2005; Lohmeier, 2010), die eine deutlich kürzere Entwicklungszeit gegenüber den anderen Antrieben verspricht.

Motor und Getriebe

Die Auswahl passender Getriebe kann erst nach der Festlegung der Motoren erfolgen, da hierfür Eigenschaften wie Drehzahl und Drehmoment bekannt sein müssen, um die entsprechenden Übersetzungen und Getriebegrößen bestimmen zu können.

Motoren Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Motortypen. Die bedeutendsten Gruppen sind Drehstrom-, Wechselstrom- und Gleichstrommotoren. Der bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC) hat sich in der Robotik auf Grund des hohen Leistungsgewichts durchgesetzt (Gombert et al., 1994; Vischer und Khatib, 1995; Lohmeier et al., 2006). Die Antriebe verfügen über eine elektrische Kommutierung und werden daher oft auch als EC-Motoren bezeichnet. Da die Kommutierung z.B. über Hall-Sensoren oder einen angeschlossenen Encoder stattfindet, entfällt der Schleifkontakt, der bei normalen Gleichstrommotoren notwendig ist. Ein weiterer Vorteil von BLDC-Motoren ist die Verwendung von Permanentmagneten auf der Rotorseite. Somit muss nur die Wärme des Stators abgeführt werden, welches eine deutlich effizientere Kühlung des Motors ermöglicht.

Prinzipiell sind BLDC-Motoren auch als Direktantrieb geeignet. Allerdings ist das Gewicht eines Direktantriebes im Vergleich zu einer Kombination aus Motor mit Getriebestufe deutlich höher und damit nur sinnvoll, solange keine Rücksicht auf das Gewicht genommen werden muss. Für den Antrieb der Linearachse wäre ein Direktantrieb vorstellbar, da sich der Motor an der Basis des Roboters befinden kann und dementsprechend nicht bewegt werden muss. Durch den Direktantrieb, der eine bessere Dynamik als eine Motor-Getriebe-Kombination bietet, kann der Aufbau des Gelenkes deutlich einfacher gestaltet werden. Für die restlichen Gelenke empfiehlt sich eine Kombination aus Motor und Getriebe.

Getriebe Für die Anbindung an elektrische Motoren kommen eine Vielzahl von Getrieben in Betracht. Die einzelne Auswahl ist stark abhängig von den Anforderungen, die an das Getriebe gestellt werden. Wichtig sind hier:

- **Untersetzung:** Üblicherweise haben BLDC-Motoren Nenndrehzahlen von mehreren tausend Umdrehungen pro Minute. Die Abtriebsgeschwindigkeiten der Gelenke hingegen befinden sich im Bereich von 0 bis 60 $^{1}/_{\mathrm{min}}$. Um diesen Unterschied auszugleichen, sind Getriebe mit einer hohen Untersetzung notwendig.

- **Drehmoment pro Gewicht bzw. Bauraum:** Die Gelenke des Manipulators müssen hohe Drehmomente aufbringen, um die dynamischen Bewegungen des Arms realisieren zu können. Damit der Arm trotzdem leicht und schmal gebaut werden kann, sind hierfür Getriebe mit einer hohen Leistungsdichte notwendig.

- **Wirkungsgrad:** Der Wirkungsgrad ist entscheidend, um eine realistische Aussage über das Moment, welches auf der Abtriebsseite tatsächlich zur Verfügung steht, tätigen zu können. Zum anderen ist der Wirkungsgrad zu beachten, da die Leistung, die nicht mechanisch zur Verfügung steht, als Abwärme von dem Motor weggeführt werden muss. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass vor allem bei hohen Lasten ein guter Wirkungsgrad wünschenswert ist.

- **Getriebespiel:** Ist das Getriebespiel zu groß, kann es bei wechselnder Belastung zu Schlägen im Getriebe kommen, die, insbesondere bei hohen Lasten, Schäden verursachen können. Daneben verringert ein großes Spiel die Genauigkeit des Manipulators, was sich in einer seriellen Konfiguration, mit vielen aufeinander folgenden Gelenken deutlich bemerkbar machen kann.

- **Trägheit:** Die Rotationsträgheit der Komponenten auf der Antriebsseite des Getriebes hat einen entscheidenden Einfluss auf die Dynamik eines Antriebs. Neben der Trägheit des Motors inklusive Antriebswelle ist die Trägheit des Getriebes der größte Einflussfaktor und sollte dementsprechend niedrig sein.

- **Steifigkeit:** Für den Roboter wurde ein Ansatz gewählt, der auf einer hohen Steifigkeit beruht. Damit dies nicht durch den Aufbau der Gelenke zunichte gemacht wird, müssen auch die Getriebe eine hohe Steifigkeit aufweisen.

Eine hohe Untersetzung ist ein notwendiges Kriterium für die Auswahl des Getriebes, daher kommen nur wenige Typen für den Roboter in Frage. Ein klassisches einstufiges Stirnrad Zahngetriebe z.B. sollte maximal eine Untersetzung von 1:5 besitzen. Daher würden sich hier nur mehrstufige Varianten eignen. In die engere Auswahl kommen folglich nur mehrstufige Planetengetriebe, Harmonic Drive (HD) und Zykloidgetriebe die jeweils Untersetzungen von 1:100 oder weniger erreichen können.

Tabelle 3.2 bietet einen Überblick über die Eigenschaften der drei Getriebe, auf Grund derer die Entscheidung für eine Getriebeart gefällt wurde.

Planeten- und Zykloidgetriebe sind normalerweise in Versionen mit integrierter Lagerung erhältlich. Das hat zwar den Vorteil, dass man ein fertiges Getriebe in die Konstruktion integrieren kann, doch werden die Getriebe dadurch deutlich schwerer. Nicht nur auf Grund der Lagerung, sondern vor allem auf Grund der Wirkungsweise, hat das HD ein wesentlich besseres Verhältnis zwischen nutzbarem Drehmoment und Gewicht.

Das HD zeichnet sich durch einen flexiblen Zwischenkörper aus, der während der Bewegung ständig verformt wird. Unter anderem dadurch lässt sich mit

Tabelle 3.2: Vergleich verschiedener Getriebetypen mit hoher Untersetzung

	Planetengetriebe	Harmonic Drive (HD)	Zykloidgetriebe
Drehmoment	sehr hohes Gewicht bezogen auf das Drehmoment	sehr gutes Verhältnis zwischen Drehmoment und Gewicht	hohes Drehmoment bei hohem Gewicht
Wirkungsgrad	sehr hoch (bis 99 %) pro Stufe	hoch (bis zu 85 %)	sehr hoch (bis 97 % bei Volllast)
Getriebespiel	nahezu spielfrei bei sehr genauen Getrieben (hoher Aufwand)	nahezu spielfrei	nahezu spielfrei
Trägheit	hoch	niedrig	hoch
Steifigkeit	sehr hoch	mittel	hoch

einem HD kein sehr hoher Wirkungsgrad erzielen. Hier haben die beiden anderen Getriebetypen einen deutlichen Vorteil (Sensinger und Lipsey, 2012).

Für eine Eigenentwicklung, bei der das Getriebe in die Struktur integriert werden kann, ist es auf Grund des deutlich besseren Leistungsgewichts sinnvoll, ein HD-Getriebe zu verwenden trotz des schlechteren Wirkungsgrades und der niedrigeren Steifigkeit.

Eine weitere Möglichkeit, die Untersetzung zu erhöhen und damit gleichzeitig das Trägheitsmoment des Manipulators zu verringern, ist der Einsatz eines Riementriebes. In Abbildung 3.9 ist der Antrieb inklusive Riemen dargestellt. Durch die geeignete Auswahl von Riemen und Riemenscheiben, kann das Moment am Getriebe vergrößert werden. Gleichzeitig kann der Motor aus der Gelenkachse an den Anfang eines Elementes versetzt werden.

3.2.4 Sicherheit/Bremsen

Softwarefehler oder defekte Hardware können dazu führen, dass während des Betriebs die Stromzufuhr einzelner oder aller Gelenke ausfällt. Dadurch kann die Bewegung unterbrochen werden und der Arm auf Grund der Schwerkraft zu Boden sinken, da die Aktorik nicht mehr funktionstüchtig ist. Dies ist ebenso der Fall, wenn der Manipulator nach einer Nutzung ausgeschaltet wird. Um eine Beschädigung des Roboters oder der Umgebung zu verhindern, werden Bremsen für die von der Schwerkraft betroffenen Gelenke vorgesehen.

Die Bremsen für diesen Einsatzzweck müssen keine aktiven Arbeitsbremsen sein, die in die Bewegung des Manipulators miteinbezogen werden. Für die Anforderungen an die Sicherheit, sind Haltebremsen, die auch für einen Not-Stopp eingesetzt werden können, ausreichend. Um sie in das Gelenkkonzept integrieren zu können, sollten sie ein gutes Leistungsgewicht aufweisen, wie es z.B. Permanentmagnet-Bremsen tun. Werden diese auf der Motorseite eingesetzt, können bereits Bremsen mit kleinen Haltemomenten verwendet werden, um die Bewegung des Armes zu stoppen.

3.2.5 Sensorik

Mit Hilfe von Sensoren lassen sich nahezu beliebige Eigenschaften von Systemen erfassen. In Bezug auf die erste Generation des Manipulators werden so wenig Sensoren wie möglich verwendet, um die Komplexität des Systems gering zu halten. Lediglich ein Inkrementalgeber für die Bestimmung der genauen Position der Motorwelle sowie ein Sensor zur Bestimmung der Anfangs- bzw. Endposition kommen pro Gelenk zum Einsatz.

Inkrementalgeber (Encoder)

Ein Inkrementalgeber wird eingesetzt, um die Position zwischen zwei Bauteilen zu bestimmen. Für den Manipulator werden sowohl Drehgeber (für rotatorische Bewegungen), als auch lineare Inkrementalgeber eingesetzt.

Drehgeber Die rotatorischen Encoder werden zur Positionsbestimmung der Motoren verwendet. Dabei wird die relative Position zwischen Rotor und Stator gemessen. Dies geschieht zum einen als Feedback für die Regelung, zum anderen, um die richtige Bestromung der Spulen definieren zu können[4]. Es gibt verschiedenste Funktionsprinzipien, die für unterschiedliche Aufgaben und Bedingungen geeignet sind. Ein sehr einfaches, klein bauendes und günstiges Prinzip sind optische Drehgeber. Diese bieten eine ausreichende Anzahl an Inkrementen, um so für die Positionsmessung von Motoren eingesetzt werden zu können.

Über das Untersetzungsverhältnis des Getriebes und unter der Annahme, dass die Gelenke sehr steif sind, kann mit dem Motorencoder die Position des Gelenkes bestimmt werden. Allerdings lässt sich mit den hier eingesetzten inkrementalen Encodern nur eine relative Position bestimmen. Um die tatsächliche Verdrehung des Gelenkes zu erfassen, muss einmalig die tatsächliche Position über eine Referenzfahrt bestimmt werden.

Lineare Inkrementalgeber Das erste Gelenk erhält neben dem Motordrehgber einen zusätzlichen absoluten, linearen Encoder. Mit diesem kann, anders als mit einfachen inkrementellen Encodern, zu jeder Zeit die absolute Position des Schlittens erfasst werden. Dadurch kann die Referenzfahrt, wie im nächsten Abschnitt beschrieben, entfallen. Zum einen wird hierdurch die Zeit zur Inbetriebnahme des Manipulators verkürzt. Zum anderen kann verhindert werden, dass auf Grund einer ungeschickten Konfiguration des Manipulators Schäden an der Hardware oder Umgebung entstehen, da zu dem Zeitpunkt der Referenzfahrt die genaue Lage des Schlittens und somit auch des gesamten Arms noch nicht bekannt ist.

Wie schon bei den rotatorischen, gibt es auch bei den linearen Encodern eine Vielzahl an Wirkprinzipien. Der Encoder, der in der ersten Generation zum Einsatz kommt, ist ein sogenannter Seilzugencoder. Durch die Abwicklung eines Seils auf einer Trommel wird ein an der Trommel angebrachtes Potentiometer verstellt. Auf Grund der Widerstandsänderung am Potentiometer kann auf die genaue Position des Seilendes geschlossen werden. Da der Widerstand des Potentiometers

4 Dies ist für die elektrische Kommutierung der BLDC-Motoren notwendig.

unabhängig von der Stromversorgung ist, kann zu jedem Zeitpunkt die absolute Position des Seils erfasst werden.

Endschalter

Aus Sicherheitsgründen werden an allen rotatorischen Gelenken Endschalter angebracht. Falls sich ein Gelenk wegen eines Fehlers über den normalerweise erlaubten Bereich hinaus bewegt, löst ein Endschalter aus und die Bewegung wird gestoppt. Außerdem werden als Alternative für absolute Encoder auf der Abtriebsseite eines Gelenks Endschalter verwendet, um die genaue Position des Gelenks zu erfassen. Zu diesem Zweck muss eine Referenzfahrt gemacht werden, bei der sich das Gelenk so weit dreht bis ein Endschalter ausgelöst wird. Damit kann die Position des entsprechenden inkrementellen Encoders mit einer zuvor gespeicherten Position des Endschalters abgeglichen werden.

Endschalter gibt es in unterschiedlichsten Funktionsweisen und Ausführungen. Am gebräuchlichsten sind mechanische Schalter, Lichtschranken und Hall-Sensoren. Da sich mechanische Schalter durch häufige Betätigung abnutzen und verschieben können und Lichtschranken empfindlich gegenüber Staub und Schmutz sind, wurden Hall-Sensoren als geeignete Lösung gewählt. Weil das Funktionsprinzip auf Magnetismus beruht, gibt es keine Störungen durch die pflanzliche Umgebung.

3.2.6 Elektronik

Eine Frage, die bei der Auslegung des elektronischen Systems des Manipulators geklärt werden muss, ist, ob ein zentrales oder dezentrales Hardwaresystem aufgebaut werden soll.

- Ein zentrales System hat den großen Vorteil, dass man die benötigten Komponenten (Motor Controller und Recheneinheit) an einem gemeinsamen Ort unterbringen kann, der außerhalb des Manipulators liegen kann. So muss man keine besondere Rücksicht auf den Platz oder die Anordnung der Komponenten nehmen. Allerdings bedeutet das auch, dass alle Informationen von den verbauten Sensoren sowie die Motorleistungen über entsprechende Leitungen durch den gesamten Arm bis zu der zentralen Einheit geführt werden müssen.

- Bei einem dezentralen System befinden sich die Motor Controller in unmittelbarer Nähe zu den Motoren und Sensoren und können direkt mit diesen verbunden werden. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Controllern und der zentralen Recheneinheit erfolgt über einen oder mehrere Datenbusse.

Auf Grund der hohen Anzahl an Freiheitsgraden wurde ein dezentrales System verwendet. Die hohe Zahl an Kabeln, die bei einem zentralen System innerhalb des Arms geführt werden müsste und das damit einhergehende Gewicht, sprechen gegen die Verwendung dessen. Ein weiterer Grund, der ein zentrales System

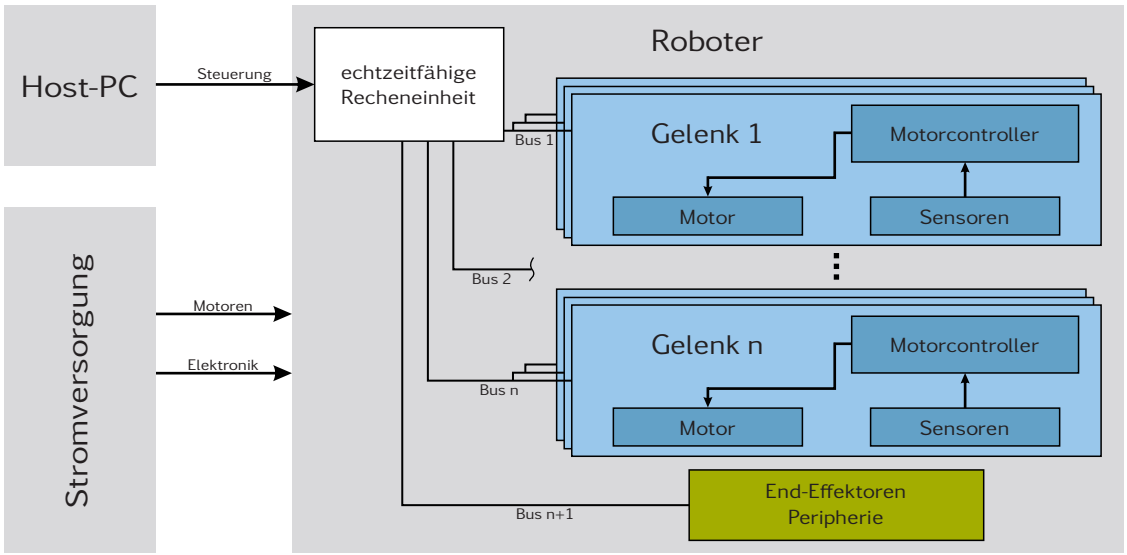


Bild 3.10: Exemplarische Darstellung des Kontrollschemas für eine dezentrale Elektronik

nahezu unmöglich machen würde, ist der modulare Aufbau des Manipulators. Wollte man diesen konsequent umsetzen, müssten alle Module und Interfaces mit den Leitungen und Verbindungen für alle Motoren und Sensoren ausgerüstet werden.

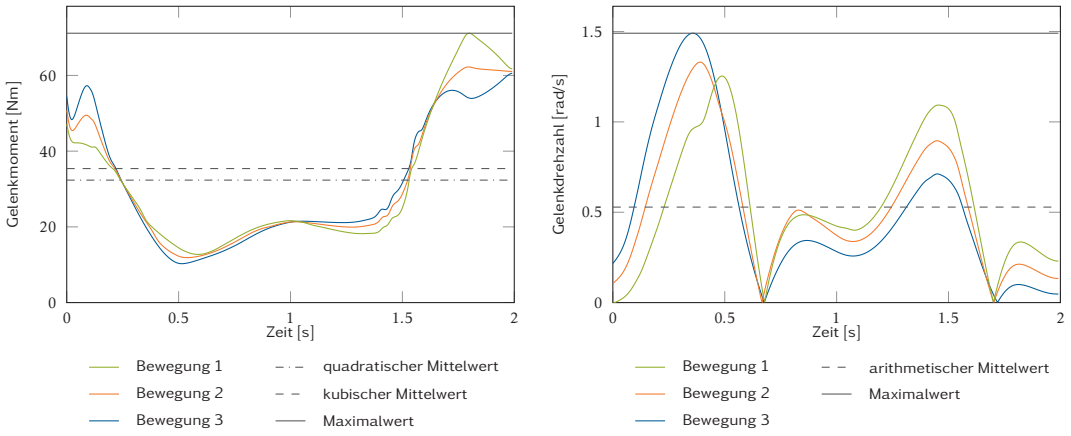
Abbildung 3.10 zeigt den Aufbau des gewählten elektronischen Schemas. Die Befehle für eine Bewegung erfolgen von einem Host-PC aus. Die Berechnung der inversen Kinematik und die Ansteuerung der einzelnen Gelenke findet auf einer zentralen Recheneinheit statt. Damit keine Verzögerungen in der Berechnung der Gelenkpositionen auftreten und somit die Bewegung des Manipulators stören, muss auf dem Steuerrechner ein echtzeitfähiges Betriebssystem laufen. Darüber hinaus muss dieser den Anschluss eines oder mehrere Busse erlauben, die für die Ansteuerung der Motorcontroller oder zusätzlicher Peripherie benötigt werden. Die Motorcontroller selbst sind mit den Motoren und Sensoren verbunden und verarbeiten die Signale bzw. steuern den Strom der Motoren.

3.3 Konstruktive Umsetzung

Das nachfolgende Kapitel beschreibt die Konstruktion der Manipulatoren der ersten Generation. Es wird auf die Auswahl der einzelnen Komponenten, wie Motoren, Getriebe und Sensoren, als auch auf die einzelnen Gelenke und ihren Aufbau eingegangen.

Die Konstruktion des Manipulators, bzw. der Bauteile, aus denen der Manipulator zusammengesetzt ist, findet mit Hilfe der Software CATIA V5R21 von Dessault Systèmes statt. Die Software erlaubt es komplexe Teile zu konstruieren, Baugruppen zu erstellen, die Kinematik darzustellen und Zeichnungen für die Fertigung abzuleiten. Des Weiteren ist die Möglichkeit gegeben, schnelle FEM Analysen von Bauteilen und Baugruppen durchzuführen.

Für eine fertigungsgerechte Konstruktion wurde Rücksicht auf die in der Werk-



(a) Drehmomentverlauf (b) Drehzahlverlauf

Bild 3.11: Ausgangsmoment und Drehzahl des dritten Gelenks

statt des Lehrstuhls vorhandenen Maschinen genommen. Neben der 3+2-Achs-CNC-Fräse DMU50 stehen verschiedene kleinere Fräsen sowie mehrere Drehbänke zur Verfügung, die eine Bearbeitung von Metallen und Kunststoffen ermöglichen.

3.3.1 Auswahl und Auslegung der Getriebe

Die Auslegung orientiert sich an den Anforderungen der Gelenke, die Aufgrund eines dynamischen Modells erstellt wurden. Gleichung (3.1) beschreibt Bewegungsgleichungen basierend auf dem Newton-Euler-Verfahren. Hierbei ist mit $\boldsymbol{M}$ die Massenmatrix darstellt, mit $\boldsymbol{h}$ die Zentrifugal-, Coriolis- und Gewichtskräfte und $\bar{\boldsymbol{Q}}$ die generalisierten Momente wie Motor- und Reibmomente. Die Gelenkwinkel, bzw. deren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen werden über den Vektor $\boldsymbol{q} \in \mathbb{R}^9$ und dessen Ableitungen definiert. Für eine genauere Beschreibung sei auf die Arbeit von Baur et al. (2013) und Baur (2014) verwiesen, die auf Ulbrich (1996) sowie Pfeiffer und Schindler (2014) aufbaut.

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \bar{\boldsymbol{Q}} \tag{3.1}$$

Abbildung 3.11 zeigt das Ergebnis der dynamischen Berechnung für das dritte Gelenk anhand der drei Trajektorien, die in Abschnitt 3.1.3 vorgestellt wurden. Auf der linken Seite (Abb. 3.11*a*) ist das Abtriebsmoment über der Zeit dargestellt. Darüber hinaus sind der Maximalwert sowie der quadratischer Mittelwert (QMW) und der kubischer Mittelwert (KMW) eingezeichnet.

Der Geschwindigkeitsverlauf an der Abtriebsseite und der arithmetischer Mittelwert (AMW) sind in dem zweiten Schaubild (Abb. 3.11*b*) zu sehen. Die Werte lassen sich mit Hilfe des Abtriebmoments τ_{Ab} und der Drehzahl am Abtrieb n_{Ab} bestimmen. Hierzu werden die Verläufe in N Teile mit der Dauer t_i unterteilt. Die

Daten der restlichen Gelenke finden sich in Anhang C.

$$\tau_{KMW} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=0}^{N} \left| n_{Ab,i} \tau_{Ab,i}^{3} \right| t_i}{\sum_{i=0}^{N} \left| n_{Ab,i} \right| t_i}} \tag{3.2}$$

$$n_{AMW} = \frac{\sum_{i=0}^{N} \left| n_{Ab,i} \right| t_i}{\sum_{i=0}^{N} t_i} \tag{3.3}$$

Die HD-Getriebe werden auf Vorgabe von Harmonic Drive mit der etwas konservativeren Variante, dem KMW (Gl. (3.2)) ausgelegt. Mit dem Sicherheitsfaktor $f_{S,G}$ kann das durchschnittliche Moment $\tau_{G,nenn} = f_{S,G}\tau_{KMW}$ bestimmt werden, mit dem das Getriebe belastete werden darf. Entsprechend kann das maximale Moment sowie die mittlere und maximale Drehzahl bestimmt werden. Aus diesen Daten kann anhand der Herstellerangaben eine geeignete Getriebereihe und -größe ausgewählt werden.

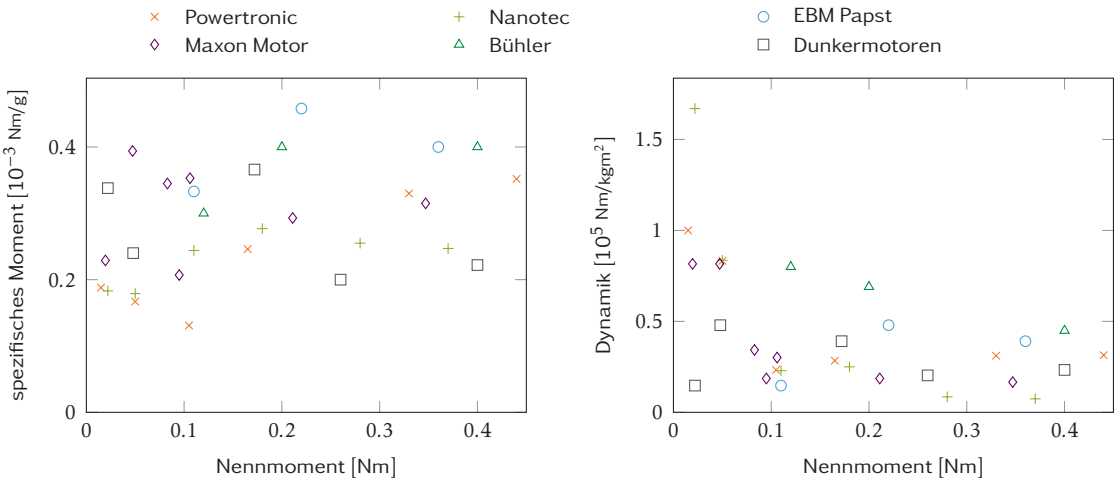
Die Untersetzung des Getriebes ist sowohl von den Motoren als auch von dem Riementrieb, der zwischen Motor und dem HD platziert ist, abhängig und kann daher erst endgültig definiert werden, wenn die anderen Komponenten ermittelt sind. Für den Riementrieb verhält es sich entsprechend. Die Auswahl der Motoren, des Riementriebs und der Untersetzung des HD wird daher iterativ durchgeführt.

3.3.2 Auswahl und Auslegung der Motoren

Die Motoren, die für die erste Generation verwendet wurden, teilen sich auf drei Hersteller auf. Die Gelenke 2–7 werden mit BLDC-Motoren in einem Gehäuse von der Firma MaxonMotor betrieben. In Gelenk 1 kommt ein gehäuseloser BLDC-Motor von der Firma TQ Systems zum Einsatz und in den Gelenken 8 und 9 ebenso gehäuselose BLDC-Motoren der Firma Allied Motion Technologies. Die Aufteilung ist an die speziellen Begebenheiten der einzelnen Gelenke angepasst.

Auf Grund der kurzen Zeitspanne für die Entwicklung des ersten Manipulators wurden soweit möglich Motoren mit Gehäuse und integrierten Encodern verwendet. In Gelenk 1 konnte auf Grund der Platzverhältnisse kein Getriebe eingebaut werden, daher musste hier ein Direktantrieb gefunden werden, der einen ruhigen Lauf bietet und die notwendigen hohen Momente zur Verfügung stellt. Es wurde ein Motor von TQ Systems (vgl. 4.4.1) verwendet, der durch seine hohe Anzahl an Polpaaren die geforderte Dynamik und das Drehmoment für den Direktantrieb bietet. Für die Gelenke 8 und 9 konnten bei den betrachteten Herstellern[5] keine kleinen Motoren mit einem ausreichend hohem Nennmoment gefunden werden. Daher wurden hier gehäuselose Motoren von Allied Motion Technologies verbaut.

5 EBM Papst, Nanotec, Powertronic, Dunkermotoren, Bühler und Maxon Motor



(a) Vergleich anhand des Nennmoments bezogen auf das Gewicht

(b) Vergleich anhand des Nennmoments bezogen auf die Rotorträgheit

Bild 3.12: Vergleich von BLDC-Motoren mit Gehäuse von verschiedenen Herstellern

Für die Auslegung der Motoren werden die gleichen Daten wie in 3.3.1 verwendet. Hierzu wird jedoch im Gegensatz zu den Getrieben der QMW

$$\tau_{QMW} = \sqrt{\frac{1}{t_{ges}} \sum_{i=0}^{N} t_i \tau_{Ab,i}^2} \tag{3.4}$$

herangezogen (vgl. Gienger (2005); Lohmeier (2010)). Der Wert wird analog zu der Berechnung des mittleren Getriebemoments aus Verläufen der Abtriebsmomente τ_{Ab} bestimmt. Demnach ergibt sich das durchschnittliche Motormoment mit dem Sicherheitsfaktor $f_{S,M}$ und der Untersetzung k, bestehend aus der Untersetzung des HDs und des Riementriebs, zu $\tau_{M,nenn} = \frac{f_{S,M}\tau_{QMW}}{k}$. Entsprechend können mit einem Sicherheitsfaktor das maximale Moment sowie die Nenn- und Maximaldrehzahl ermittelt werden.

Gienger (2005) verwendet das von ihm benannte „Spezifisches Dynamische Moment“ bei dem er das am Gelenk zur Verfügung stehende Dauerdrehmoment mit der Masse des Motors ins Verhältnis setzt. Der Index kann allerdings erst erstellt werden, wenn alle Daten für den Antrieb, sowohl Motor als auch Getriebe, vorhanden sind. Für die Auswahl des Motors können, wie in Krishnan (1987) beschrieben, verschiedene Faktoren wie Kosten, Leistungsdichte, Verhältnis von Moment zu Motorträgheit, Geschwindigkeitsbandbreite und so weiter herangezogen werden. Die Kriterien, die zu diesem Zeitpunkt in der Entwicklung betrachtet werden können, sind die Leistungsdichte und das Verhältnis von Moment und Rotorträgheit. Da die Leistungsdichte P_M/m_M $[W/kg]$ von der Wicklung und somit von der Spannung abhängig ist, wurde hier wie in Lohmeier (2010) ein spezifisches Nennmoment verwendet. So kann unabhängig von der Drehzahl oder der Spannung, die durch eine geeignete Wicklung angepasst werden können, eine Entscheidung über die am besten geeigneten Motoren getroffen werden.

Das spezifische Nennmoment berechnet sich aus dem Nennmoment $\tau_{M,nenn}$ und der Masse m_M zu $\tau_{M,nenn}/m_M$ $[^{Nm}/_{kg}]$. Die Dynamik berechnet sich aus dem Nennmoment und der Rotationsträgheit I_M des Rotors τ_{M_nenn}/I_M $[^{rad}/_{s^2}]$. In Abbildung 3.3.2 sind die beiden Werte über dem Nennmoment für verschiedene Hersteller dargestellt.

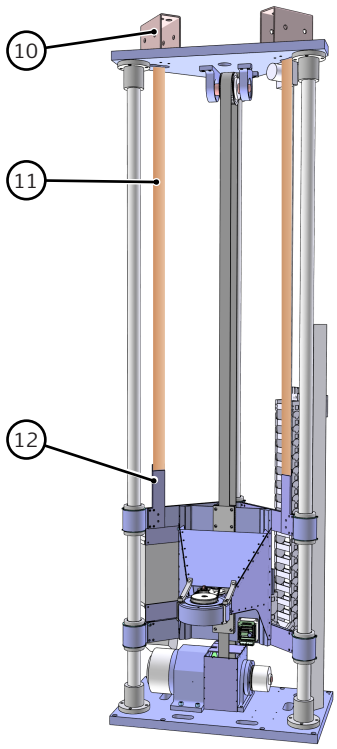
Der Vergleich der Hersteller lässt keinen eindeutigen Schluss zu. Die Motoren von EBM Papst und Bühler zeigen sowohl bei dem spezifischen Nennmoment als auch bei der Dynamik gute Werte, allerdings haben die Hersteller jeweils nur drei Motorgrößen im Angebot, die den Anforderungen entsprechen. Da es für die Konstruktion und den Entwurf der Elektronik von Vorteil ist sich auf einen Hersteller zu beschränken und die Unterschiede der einzelnen Gelenke auf Grund der Kinematik sehr groß sind, wurden Motoren der Firma Maxon Motor verwendet, die die größte Auswahl an BLDC-Motoren bietet.

3.3.3 Gelenk 1 (Linearachse)

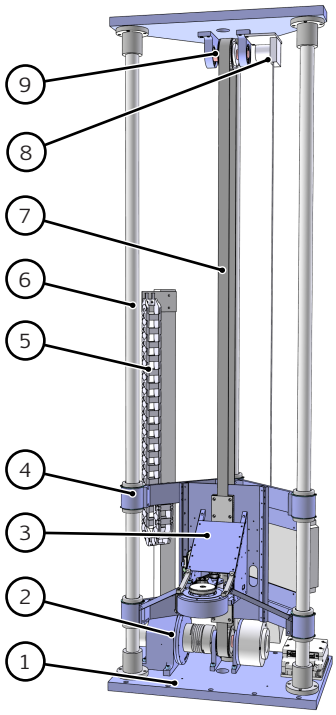
Abbildung 3.13 zeigt die beiden Linearachsen der ersten Generation. Zwischen dem ersten (links) und dem zweiten Prototypen (rechts) sind leichte Unterschiede festzustellen, auf die, neben den allgemeinen technischen Details, im Folgenden eingegangen wird.

Der gesamte Manipulator kann über die Grundplatte (1) mittels der darin befindlichen Löcher an einer der Plattformen der Projektpartner befestigt werden. Die drei Präzisionswellen aus gehärtetem Stahl (6) der Firma IGUS (Igus, 2010) bilden die Führung der Linearachse. Als Lager (4) für den Schlitten (3) kamen in einer ersten Variante Gleitlager von der Firma IGUS zum Einsatz. Diese wurden durch lineare Kugellager der Firma SKF/INA ersetzt, da beim Betrieb mit den Gleitlagern ein Stick-Slip Effekt auftrat, der durch den Tausch beseitigt werden konnte. Auf der Grundplatte befindet sich zudem der Antrieb (2), der in Bild 3.14 genauer dargestellt ist. Dieser sorgt mit Hilfe des Riemens (7) für den Antrieb des Schlittens. Den Abschluss der Linearachse bildet eine Platte, an der das obere Riemenrad (9) befestigt ist. Der absolute Seilzug-Encoder (8) BCG05 der Firma SICK AG (Sick, 2010), mit dem die Referenzierung der Linearachse durchgeführt wird, ist neben dem Riemenrad angebracht. Das Ende des Seils ist am Schlitten befestigt. Um die Kabel sicher zum Schlitten zu führen und dabei zu verhindern, dass sich die Kabel verhaken oder zu stark knicken, wird eine Energiekette (5) verwendet.

Das Gewicht des Arms beträgt ca. 16kg. Bei einem Bruch der Antriebswelle oder beim Reißen des Riemens würde der Arm ungebremst fallen. Damit selbst in diesem unwahrscheinlichen Fall die Sicherheit für umstehende Personen sowie für den Arm selbst gewährleistet ist, wurde ein System aus Konstantkraftfedern (KKFs) (11) in Prototyp 1 installiert. Die Befestigung an der Linearachse erfolgt über zwei Halter (10), in die jeweils zwei Federn gegenüberliegend montiert sind. Die Enden (12) werden am Schlitten befestigt. Die vier Federn, die zusammen auf eine konstante Zugkraft von 160 N kommen, kompensieren die Gewichtskraft des Arms und verhindern somit ein ungewolltes Abstürzen. Ein weiterer wichtiger Grund für die Installation der Federn ist die Reduzierung der benötigten



(a) Linearachse des ersten Prototypens



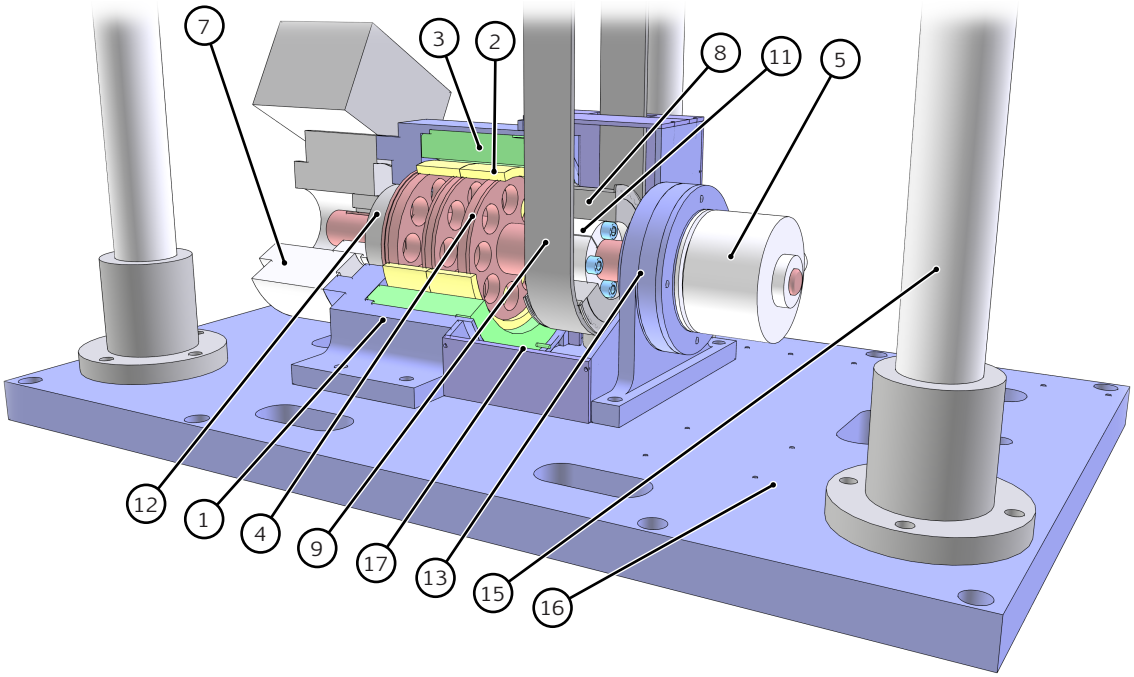
(b) Linearachse des zweiten Prototypens

1 Grundplatte
2 Antrieb
3 Schlitten
4 Linearlager
5 Energiekette
6 Linearführung
7 Zahnriemen
8 Seilzugencoder
9 Umlenkrolle
10 Halterung KKF
11 Konstantkraftfeder (KKF)
12 Halterung KKF Schlitten

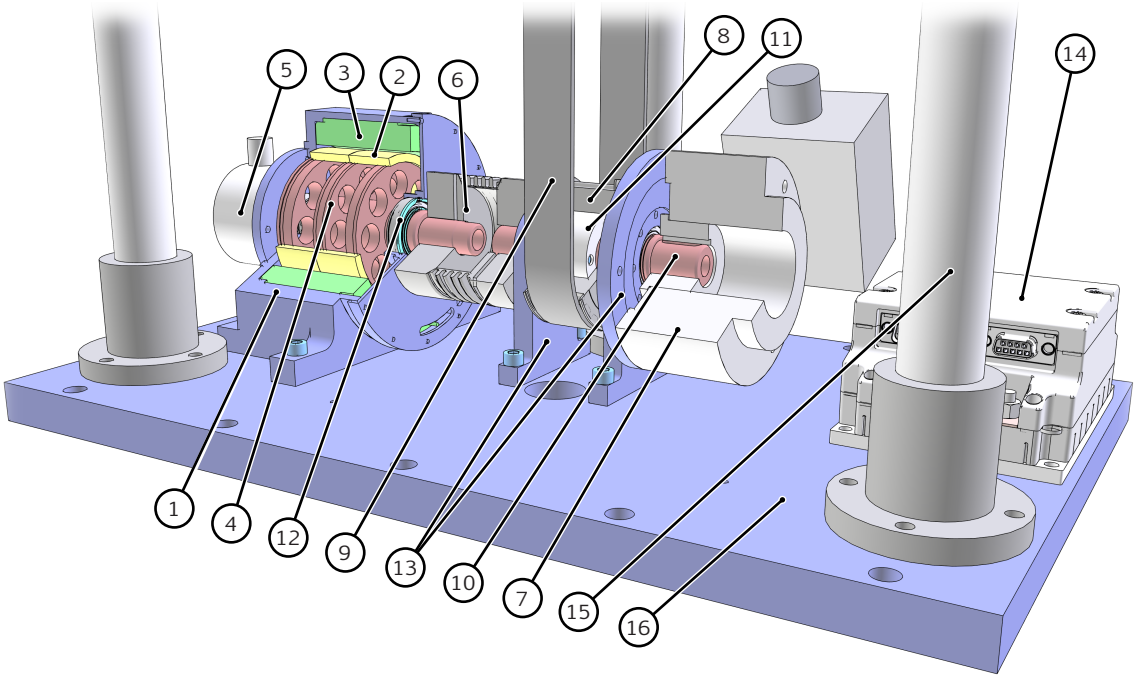
Bild 3.13: Darstellung des ersten Gelenkes. Vergleich zwischen Prototyp 1 und Prototyp 2

Antriebskraft. Durch die vorhandene Gewichtskompensation muss diese nicht mehr durch den Motor erfolgen.

Der Antrieb der Linearachse (Abbildung 3.14) ist auf der Grundplatte (16) des Systems verschraubt. Bei dem Motor handelt es sich um einen gehäuselosen Motor der Firma TQ-Systems (TQSystems, 2012). Der Einbau einer gleichwertigen fertigen Lösung aus Motor mit Gehäuse, Bremse und Encoder war aus Platzgründen nicht möglich. Der Stator des Motors (3) ist in einem Gehäuse (1) eingeklebt. Der Rotor (2) wird entsprechend auf der Motorwelle (4) verklebt. Im Unterschied zum zweiten Prototypen, befinden sich bei der ersten Version (Abbildung 3.14*b*) Motor, Bremse und Riemen auf einer Welle, was bedeutet, dass insbesondere mit der Ausrichtung des Motors und der Welle die Montage und Demontage sehr aufwendig ist. Der zweite Prototyp (Abbildung 3.14*b*) besitzt als Weiterentwicklung eine zusätzliche Welle (10) für den Riementrieb. Der Motor inklusive Lagerung (12) kann somit getrennt und unabhängig von den übrigen Komponenten montiert und demontiert werden. Im Gegenzug dafür ist eine Kupplung (6) des Typs BKC/60 von der Firma R+W Kupplungen (R+W, 2012) verbaut, die den Motor mit der



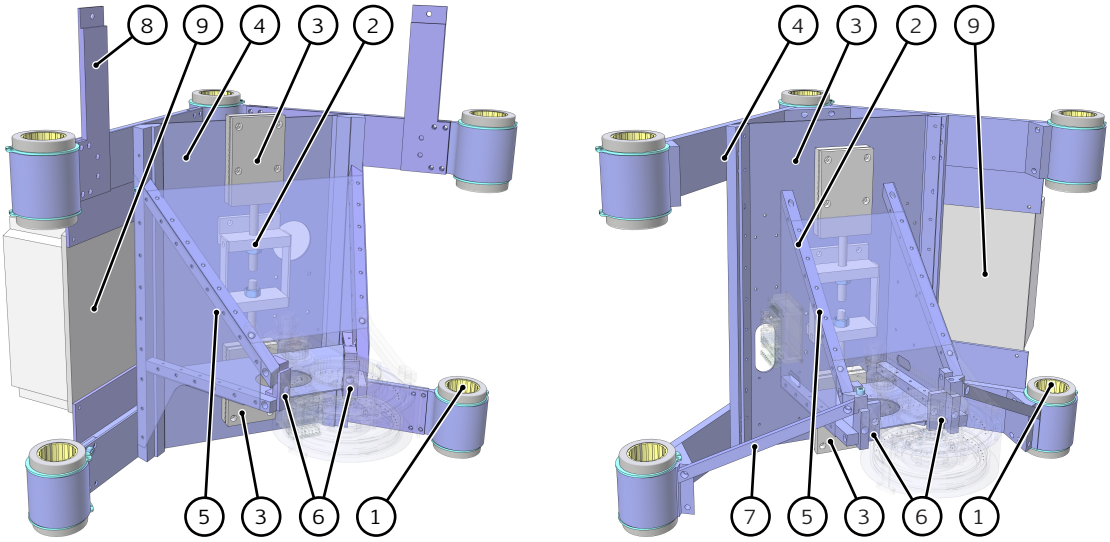
(a) Prototyp 1



(b) Prototyp 2

1 Motorgehäuse	7 Sicherheitsbremse	13 Lagerblöcke
2 Motor Rotor	8 Synchronscheibe	14 Motor Controller
3 Motor Stator	9 Zahnriemen	15 Linearführungen
4 Motorwelle	10 Antriebsachse	16 Grundplatte
5 Encoder	11 Spannbuchse	17 Abdeckung
6 Kupplung	12 Motorlager	

Bild 3.14: Vergleich der Antriebe des ersten Gelenks zwischen erstem und zweitem Prototyp



(a) Prototyp 1 (b) Prototyp 2

1 Linearlager
2 Aufhängung Zahnriemen
3 Spannplatten
4 Grundkörper
5 Körper 2
6 Anschluss Gelenk 2
7 Versteifungsstreben
8 Anschluss KKF
9 Sensorbox

Bild 3.15: Vergleich der Schlitten des ersten Gelenks zwischen erstem und zweitem Prototyp

Antriebswelle verbindet. Direkt am Motor ist ein Encoder (5) des Typs BHG der Firma Baumer (Baumer, 2011) angeschlossen. Ein Riemenrad (8), das mit einer Spannhülse (11) auf die entsprechende Welle montiert ist, treibt den Zahnriemen (9) an. Aus Sicherheitsgründen ist eine Bremse (7) der Firma Kendrion Binder Magnete GmbH (Kendrion, 2011a) installiert, die direkt an der Welle des Riemens angreift. Auf Grund von Aussparungen in der Grundplatte, die für die Montage im Labor gedacht sind, konnte bei dem ersten Prototyp die Motor Steuerung (14) nicht auf der Grundplatte platziert werden und befindet sich auf einer externen Platte (nicht dargestellt). Die drei Rundstangen (15), die als lineare Führung dienen, sind mit Blöcken auf der Grundplatte fixiert.

Die beiden Schlitten der Linearachsen sind in Bild 3.15 zu sehen. Die Anordnung der Linearlager (1) und des Anschlusses des zweiten Gelenks (6) sind identisch. Die Position der Spannplatten (3) zur Aufnahme des Riemens und die Aufhängung an den Schlitten (2) wurde leicht an die veränderte Geometrie der Struktur (4) angepasst. Der Grundkörper (4), der die Verbindung zwischen den Lagern umfasst, wurde nur leicht angepasst. Der zweite Körper (5) des Schlittens, der auf dem Grundkörper aufgesetzt ist, wurde komplett überarbeitet. Die eigentliche Struktur wurde verkleinert, dafür wurden zusätzliche Streben (7) angebracht, die die seitliche Stabilität des Systems erhöhen.

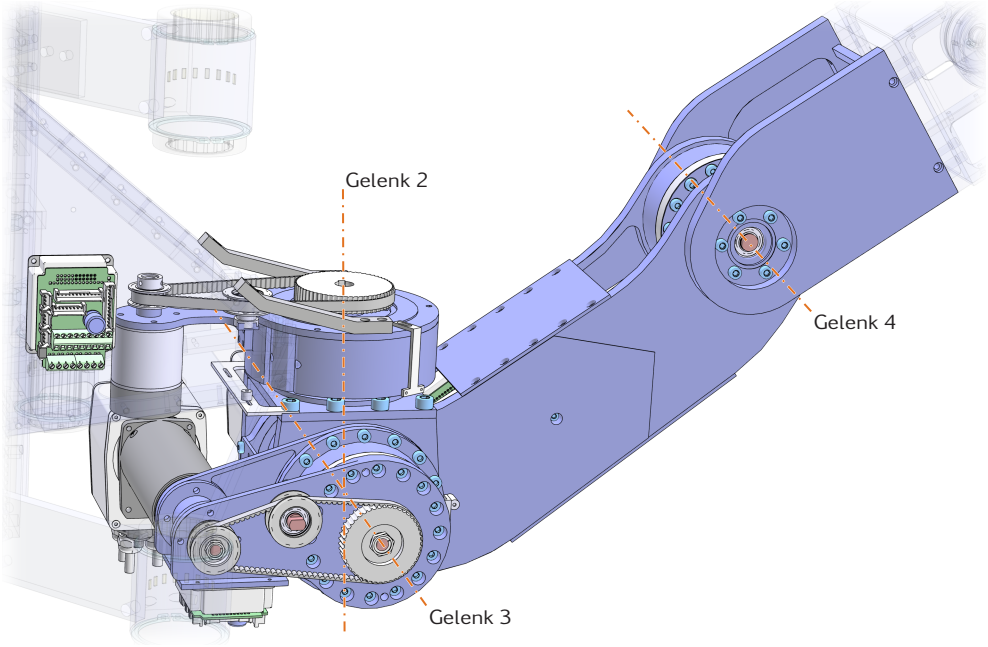
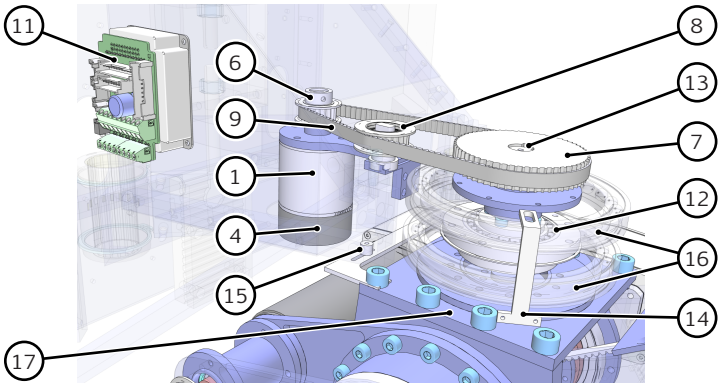


Bild 3.16: Übersicht über die Gelenk 2 bis 4

3.3.4 Gelenk 2-4

Bild 3.16 zeigt eine Übersicht über die Gelenke zwei bis vier. Das zweite Gelenk ist direkt mit der Struktur des Schlittens der Linearachse verbunden. Der Aufbau ist bei allen drei Gelenken der gleiche. Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, ist es vorgesehen, das Gewicht und vor allem seine Verteilung innerhalb des Armes möglichst effektiv zu gestalten. Das bedeutet, dass sich die größten Massen so nah wie möglich an der Basis des Arms befinden sollten. Hierfür wurden Riementriebe verwendet, die zum einen die Leistung von den Motoren zu den Gelenken übertragen, zum anderen eine weitere Möglichkeit bieten, die Untersetzung des Antriebsstrangs und die Position des Antriebs anzupassen.

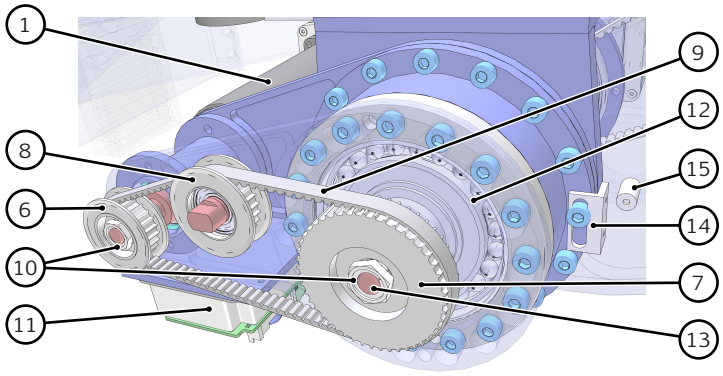
Der Ausschnitt 3.17*a* zeigt eine Detailansicht des zweiten Gelenks. Der Antrieb erfolgt über einen Motor (1) der EC-i Serie der Firma Maxon Motor (Maxon, 2011). Der Encoder (4) der MR Serie ist in Kombination mit dem Motor erhältlich. Die Befestigung erfolgt über einen Ausleger, der an der Struktur des Gelenks befestigt ist. Die Motorsteuerung (11) befindet sich in unmittelbarer Nähe, so dass die Verbindungen zu den elektronischen Komponenten einfach hergestellt werden können. Die Kraftübertragung zu dem Getriebe (12) der CSD Serie von Harmonic Drive (HarmonicDrive, 2011a) erfolgt, wie beschrieben, über einen Riementrieb. Dieser besteht aus den beiden Riemenrädern (6), (7) die sich auf der Motor- sowie Getriebewelle (2), (13) befinden, dem Riemen (9) und einer Spannrolle (8), die über eine exzentrische Aufnahme befestigt ist. Durch das Verdrehen der Spannrolle in ihrer Aufnahme kann die notwendige Vorspannung des Riementriebs eingestellt werden.



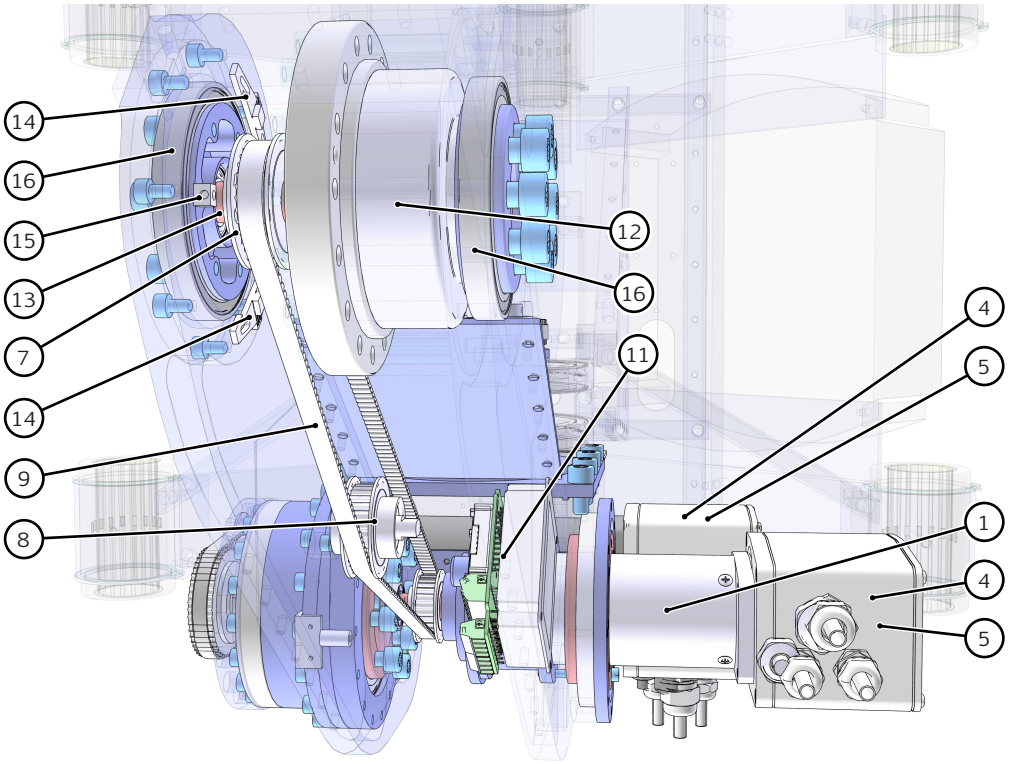
1 Motor
2 Motorwelle
3 Lagerung Motorwelle
4 Encoder
5 Bremse
6 Riemenrad Motor
7 Riemenrad Getriebe
8 Spannrolle
9 Riemen

(a) Detailansicht des Gelenks 2

10 Spannhülse
11 Motorsteuerung
12 Getriebe
13 Welle Getriebe
14 Endschalter + Halterung
15 Magnet + Halterung
16 Lagerung Gelenk
17 Abtriebsseite



(b) Detailansicht des Gelenks 3



(c) Detailansicht des Gelenks 4

Bild 3.17: Detailansichten der Gelenke 2 bis 4

Die Getriebewelle treibt den Wavegenerator[6] des HD an. Der Flexspline ist direkt an der Abtriebsseite (17) des Gelenks befestigt, welches die Aufnahme für das dritte Gelenk darstellt. Die Lagerung des weiteren Arms wird über zwei große Rillenkugellager (16) ermöglicht, die in einer O-Anstellung miteinander verspannt sind. Durch die Anstellung kann das Moment, das durch das Gewicht des Arms entsteht, optimal aufgenommen werden. Die Referenzierung der Lage wird über zwei Endschalter (14) und die entsprechenden Magnete (15) ermöglicht. Die Magnete sind über Langlöcher befestigt, so dass sie entsprechend der gewünschten Gelenkgrenzen angepasst werden können.

Die Gelenke 3 und 4, in einer Detailansicht dargestellt in 3.17*b* und 3.17*c*, verfügen über einen nahezu gleichen Aufbau. Die Unterschiede bestehen in der veränderten Motorisierung, dem dazu passenden Getriebe und natürlich in der unterschiedlichen Struktur. Da die Gelenke gegen die Schwerkraft wirken, befindet sich zudem eine Bremse (5) an den Motoren (1), die in Notsituationen oder im ausgeschalteten Zustand eine nicht gewollte Bewegung des Arms verhindert. Die Motoren sind aus der Reihe EC, die Encoder sind HEDL-9140 und die Bremsen AB 28 und werden in einem Paket von Maxon Motor bezogen. Die Getriebe stammen aus der CSG Familie von Harmonic Drive (HarmonicDrive, 2011b). Auf Grund der größeren Momente, die auf die Riemenräder wirken, werden diese mit Spannhülsen (10) auf der Motor- und Getriebewelle (2), (13) befestigt.

3.3.5 Gelenk 5-6

Für den Manipulator mit sechs bzw. neun Freiheitsgraden wird das Modul mit den Gelenken 5 und 6 benötigt. Dieses kann direkt an der Schnittstelle von Gelenk 4 befestigt werden. Die Kabel zur Energieversorgung und zur Signalübertragung werden hinter der Schnittstelle auf einer Platine in Gelenk 5 eingesteckt. Die Öffnungen auf der Seite von Gelenk 5 (vgl. Bild 3.18) werden genutzt um die Kabel von Gelenk 5 zu 6 weiterzuführen. Da die Öffnung in der Achse von Gelenk 5 liegt, kann dieses einen großen Bereich überstreifen, ohne dass die Kabel zu stark beansprucht werden. Die Abbildung zeigt ein CAD Modell des zweiten Prototyps. Im Gegensatz zu der ersten Version befinden sich bei der Schnittstelle zu Gelenk 4 Aussparungen die eine einfachere Montage und Demontage des Moduls erlauben.

Die Anordnung des Antriebsstrangs ist wie bei den Gelenken zuvor: Motor → Riemen → Getriebe. Bei Gelenk 5, zu sehen in Bild 3.19*a*, gibt es auf Grund der Form der Struktur und der eingeschränkten Platzverhältnisse sowohl an der Anals auch Abtriebsseite einige Änderungen. Als Antrieb kommt eine Motor-Encoder-Kombination (1), (4) aus einem EC-max Motor und einem Encoder der MR Reihe von MaxonMotor zum Einsatz. Da diese Kombination nicht in Verbindung mit einer Bremse zu erhalten ist und den vorhandenen Bauraum übersteigen würde, ist eine Permanentmagentbremse von Kendrion (Kendrion, 2011b) auf einer zusätzlichen Welle im Riementrieb montiert. Die Bremse besteht aus einem Rotor (5), der fest auf der Welle verklebt ist und einem mit der Struktur verschraubten

6 Ein Harmonic Drive Getriebe besteht aus einem Wavegenerator, einem Flexspline und dem Circular Spline. Eine genaue Beschreibung kann unter http://harmonicdrive.de/ gefunden werden.

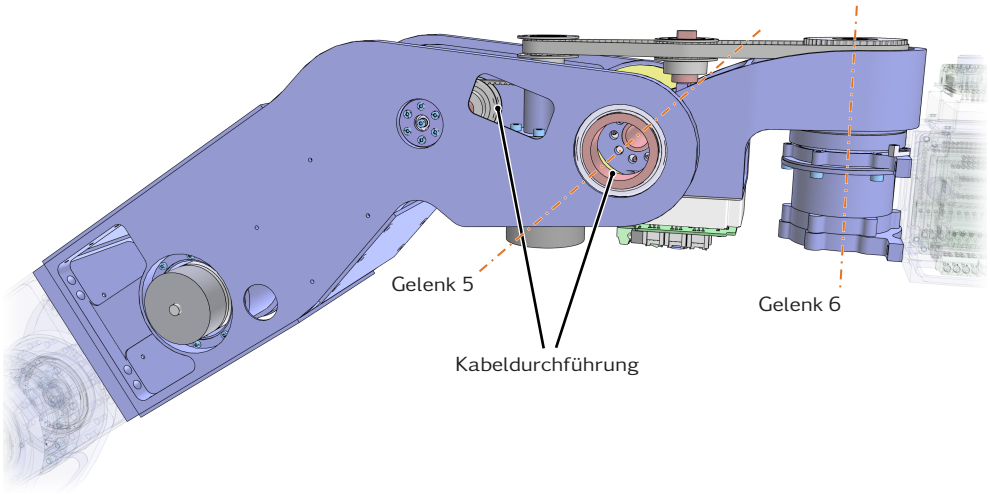


Bild 3.18: Übersicht über die Gelenke 5 und 6

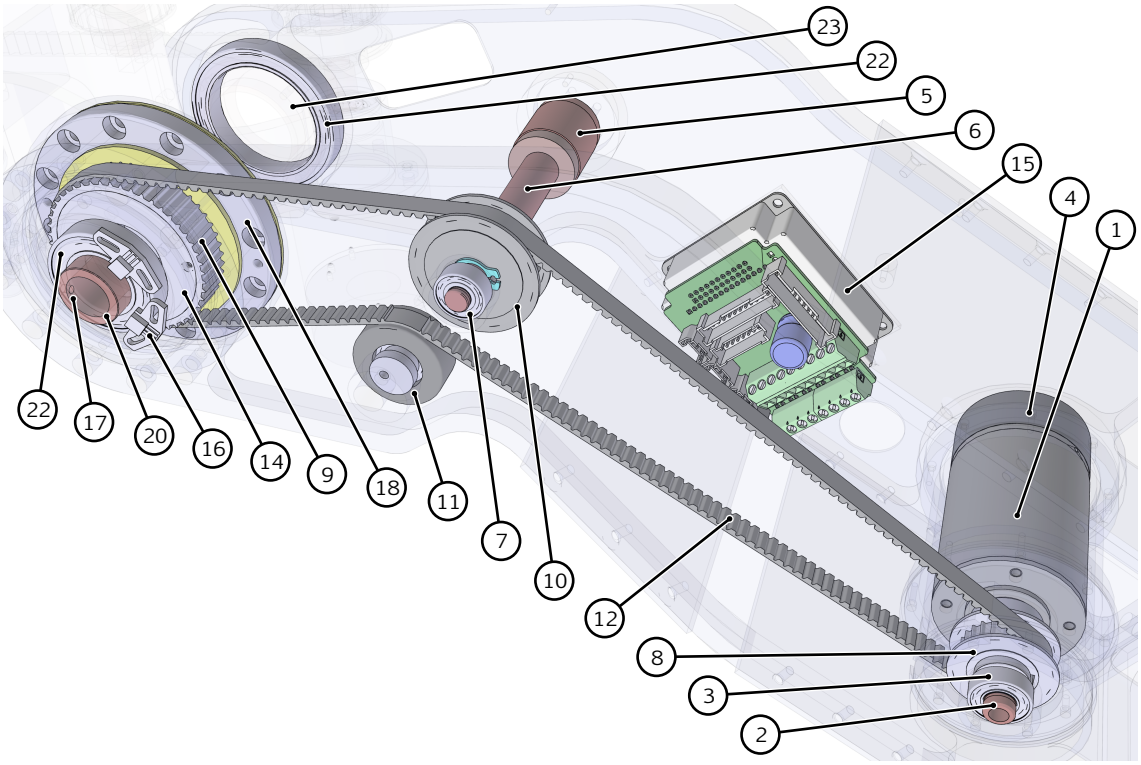
Stator (6). Eine weitere Besonderheit ist die Lagerung des Riemenrads (8), das mit dem Wavegenerator des Harmonic Drive Getriebes (15) verschraubt ist. Da der Bauraum keine herkömmliche Lagerung mit Wälzlagern erlaubt, werden Gleitlager (13) verwendet, die sich auf der Abtriebsseite (20) abstützen.

Gelenk 6 ist in Abbildung 3.19*b* gezeigt. Den Abschluss des Teilstücks aus den Gelenken 5 und 6 bildet ein Interface (23), an dem weitere Gelenke oder die Halterung für den Sprühkopf (siehe Abschnitt 3.6.2) angebracht werden können. Eine Platine zur Verbindung der Stromleitungen bzw. der Daten-Busse von zusätzlichen Gelenken befindet sich im Inneren des Gehäuses über dem Motorcontroller (15).

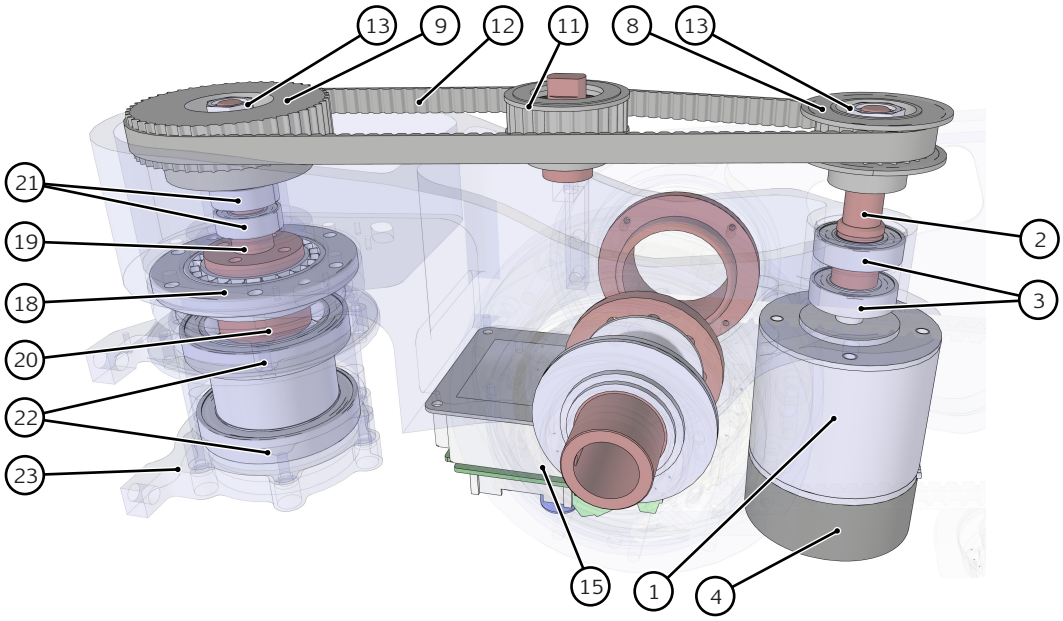
3.3.6 Gelenk 7-9 (Handgelenk)

Die letzten drei Gelenke des Manipulators werden auf Grund ihrer Funktion, die in der Ausrichtung des End-Effektors besteht, als „Handgelenk“ bezeichnet. Für die konstruktive Umsetzung des Handgelenks musste teilweise von dem allgemeinen Konzept des Aufbaus der Gelenke abgewichen werden. Durch die sehr beengten Platzverhältnisse an oder zwischen den Pflanzen wurde das Gelenk sehr schmal gebaut, daher wurden diesbezüglich einige Veränderungen vorgenommen, die im folgenden beschrieben werden. Bild 3.20 zeigt einen Überblick über die drei Gelenke des Handgelenks.

Die drei Motorsteuerungen (11) für die Antriebe des Handgelenks sind in Abbildung 3.21*a* bzw. 3.21*c* zu sehen. Sie befinden sich aus den genannten Platzgründen nicht direkt an den vorderen Gelenken, weswegen alle Kabel von den Motoren und Sensoren der Gelenke 8 und 9 entlang der anderen Gelenke bis zu den Controllern geleitet werden müssen. Die zweite Änderung im Vergleich zu den vorangegangenen Gelenken betrifft die Anordnung der Komponenten im Antriebsstrang von Gelenk 7. So folgt nicht wie sonst der Riementrieb direkt dem Motor, sondern das Getriebe wird zwischen Motor und Riemen platziert (siehe Abb. 3.21). Hierdurch kann die Abtriebsseite des Gelenks verkleinert werden, allerdings muss bei



(a) Detailansicht Gelenk 5



(b) Detailansicht Gelenk 6

1 Motor	7 Lagerung Bremse	13 Spannhülsen	19 Welle Getriebe Eingang
2 Motorwelle	8 Riemenrad Motor	14 Gleitlager	20 Welle Getriebe Ausgang
3 Lagerung Motor	9 Riemenrad Getriebe	15 Motor Steuerung	21 Lagerung Getriebe
4 Encoder	10 Riemenrad Bremse	16 Endschalter	22 Lagerung Abtrieb
5 Bremse	11 Spannrolle	17 Magnet + Halterung	23 Abtriebsseite
6 Welle Bremse	12 Riemen	18 Getriebe	

Bild 3.19: Detailansicht der Gelenke 5 und 6

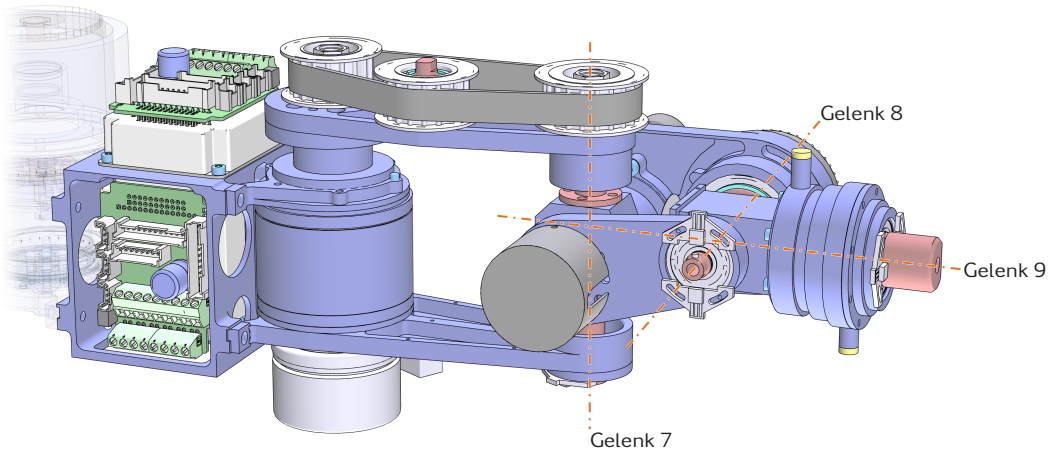


Bild 3.20: Übersicht über die Gelenke 7 bis 9

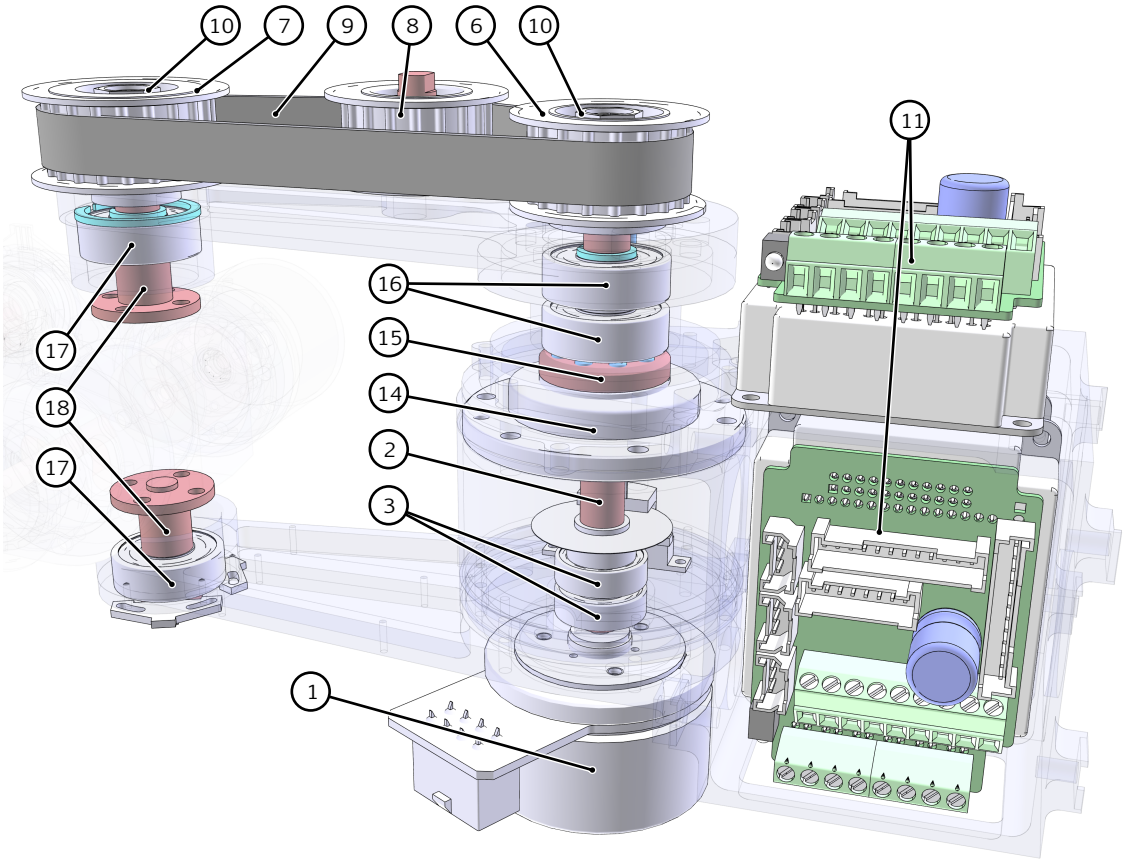
dieser Variante der Riemen das gesamte Abtriebsmoment übertragen. Auf Grund der beengten Platzverhältnisse und der niedrigen Momente, die in dem Gelenk auftreten, wurde dennoch diese Variante gewählt.

Der Motor (1) ist ein Außenläufermotor (EC-flat). Außenläufermotoren sind nur in einer Spezialanfertigung mit einem Encoder erhältlich, daher wurde anstatt dessen der optische Encoder AEDB 9140 der Firma Avago (Avago, 2012) verwendet (Abb. 3.21*c*). Er besteht aus einer Encoderscheibe (5), die auf einer erweiterten Motorwelle (2) befestigt ist, und dem Encoder (4), der im Gehäuse montiert ist. Der Ausgang des Getriebes (14) wird über eine Welle (15) an ein Riemenrad (6) übertragen, welches auf Grund der hohen Momente – wie das Riemenrad auf der Abtriebsseite (7) – über Spannhülsen fixiert ist. Das achte Gelenk wird über zwei Wellenstücke (18) angebunden und ist im Gehäuse, welches sich wie eine Spange um das Gelenk schließt, gelagert (17).

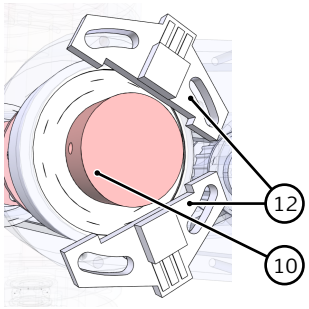
Bei dem achten Gelenk (Abb. 3.22) konnte die ursprüngliche Anordnung von Motor und Getriebe wieder umgesetzt werden. Da kein passender Motor mit Gehäuse von Maxon Motor erhältlich war, wurde für das Gelenk ein Kit-Motor der Firma Allied Motion Technologies verbaut (Allied, 2011). Der Motor besteht aus einem Stator (1), der im Gehäuse, und einem Rotor (2) (Abb. 3.22*b*), der auf der Welle (3) verklebt ist. Wie bei Gelenk 5 wird eine Bremse von Binder verwendet. Der Rotor (11) der Bremse ist auf der Motorwelle befestigt, deren Stator (12) wird im Gehäuse verschraubt. Entsprechend erfolgt die Messung der Position mit dem Encoder (5), (6).

Der Antrieb erfolgt wie gehabt über einen Riementrieb (6), (7), (8), (9), (10), der den Wavegenerator des HD (15) antreibt. Die Lagerung (17) des Getriebeeingangs erfolgt über eine Welle (16), die in der Abtriebsseite (19) des Gelenks gelagert ist, welches wiederum im Gehäuse gelagert ist (18).

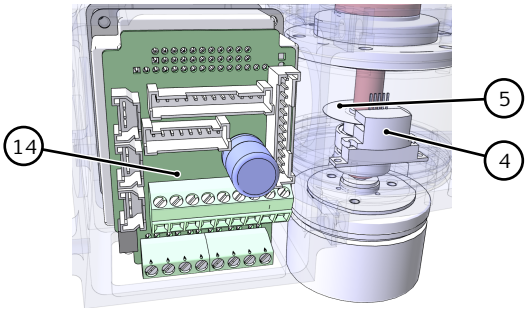
Das letzte Gelenk (Abb. 3.23) wurde in einer ersten Version von einem DC-Motor von Maxon Motor angetrieben. Auf Grund des kleinen Drehmoments und der dadurch fehlenden Dynamik, insbesondere bei schweren End-Effektoren



(a) Detailansicht Gelenk 7



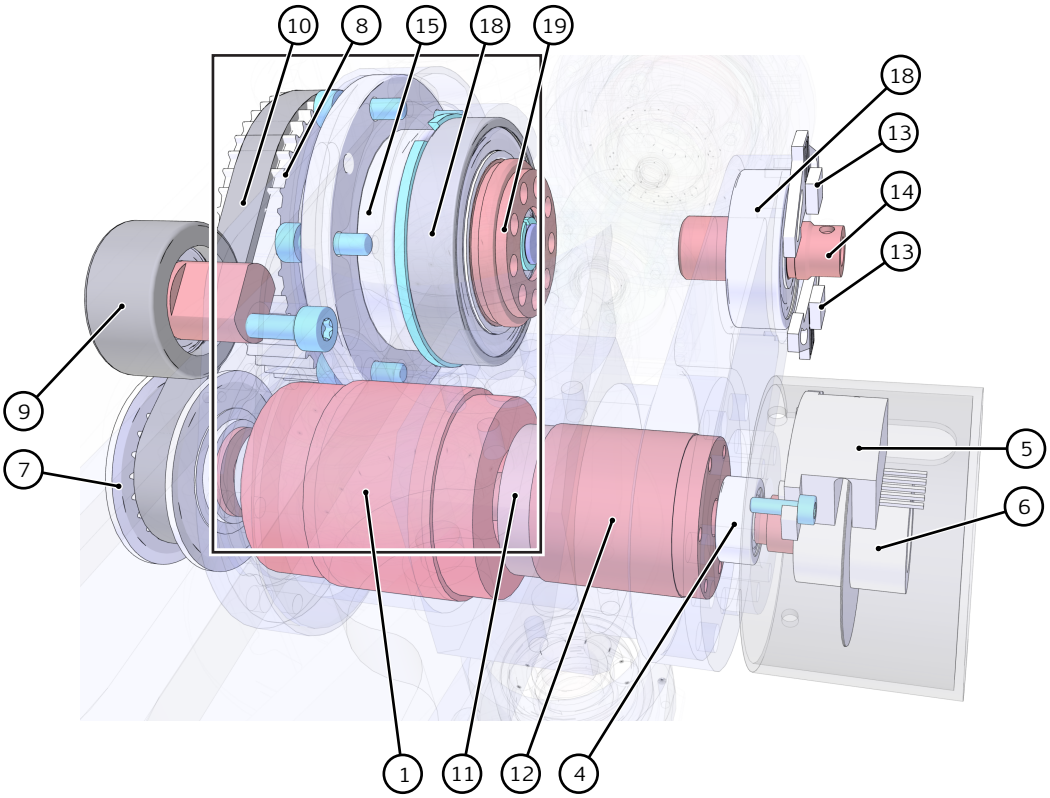
(b) Detailansicht Endschalter



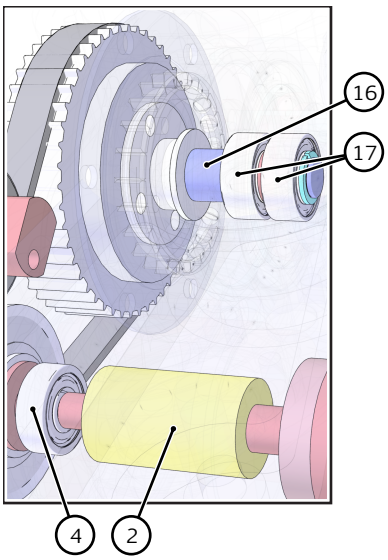
(c) Detailansicht Encoder

1 Motor	6 Riemenrad Antrieb	11 Motorsteuerung	15 Welle Getriebe Ausgang
2 Motorwelle	7 Riemenrad Abtrieb	12 Endschalter	16 Lagerung Getriebe
3 Lagerung Motor	8 Spannrolle	13 Magnet + Halterung	17 Lagerung Abtrieb
4 Encoder	9 Riemen	14 Getriebe	18 Abtriebsseite
5 Encoderscheibe	10 Spannhülsen		

Bild 3.21: Detailansicht des Gelenks 7



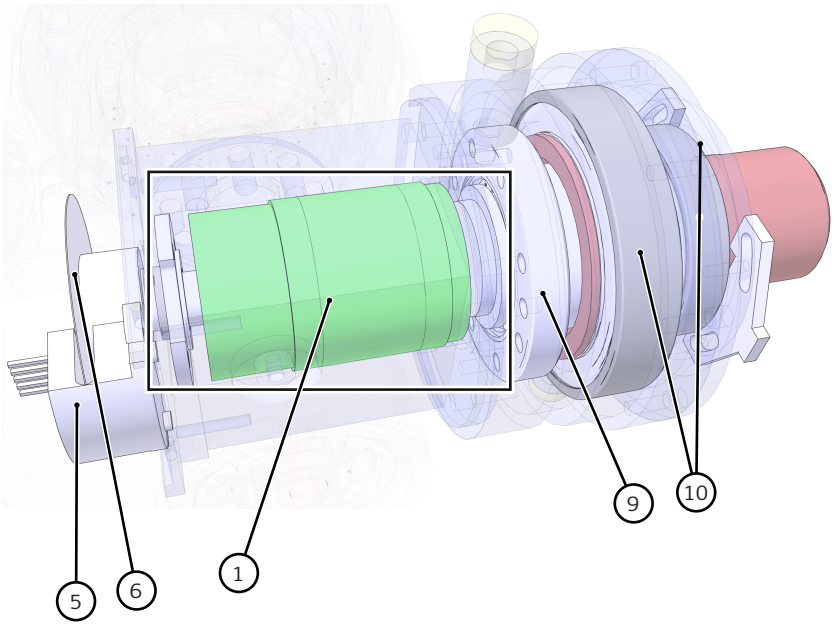
(a) Detailansicht Gelenk 8



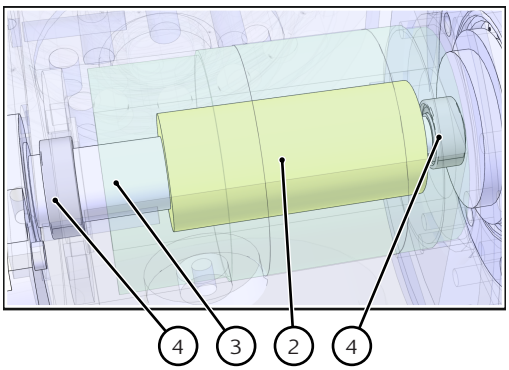
(b) Ausschnitt Gelenk 8

1 Motor Stator
2 Motor Rotor
3 Motor-/ Bremswelle
4 Lagerung Motor/Bremse
5 Encoder
6 Encoderscheibe
7 Riemenrad Motor
8 Riemenrad Getriebe
9 Spannrolle
10 Riemen
11 Bremse Stator
12 Bremse Rotor
13 Endschalter
14 Magnet + Halterung
15 Getriebe
16 Welle Getriebe Eingang
17 Lagerung Getriebe
18 Lagerung Abtrieb
19 Abtriebsseite

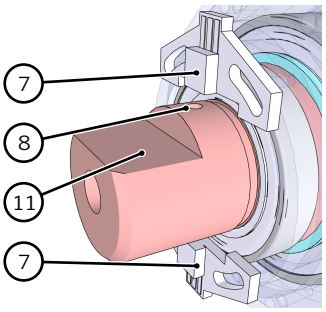
Bild 3.22: Detailansicht des Gelenks 8



(a) Detailansicht Gelenk 9



(b) Ausschnitt Motor Gelenk 9



(c) Schnittstelle End-Effektoren

1 Motor Stator
2 Motor Rotor
3 Motorwelle
4 Lagerung Motor
5 Encoder
6 Encoderscheibe
7 Endschalter
8 Magnet + Halterung
9 Getriebe
10 Lagerung Abtrieb
11 Interface End-Effektor

Bild 3.23: Detailansicht des Gelenks 9

wurde dieser durch einen Kit-Motor von Allied Motion ersetzt. Abbildung 3.23*a* zeigt den Stator (1), der im Gehäuse verklebt ist. Der Rotor (2) (Abb. 3.23*b*) befindet sich wie die Encoderscheibe (6) auf der Welle (3), die den Eingang zum Getriebe bildet. Das Getriebe stammt aus der Serie HFUC von Harmonic Drive (HarmonicDrive, 2011c), welches in einer Größe erhältlich ist, die in dem Gehäuse verbaut werden konnte. Der Ausgang des Getriebes (siehe Abb. 3.23*c*) ist direkt mit der Ausgangswelle verbunden, welche gleichzeitig das Interface (11) für die End-Effektoren darstellt. Die Endschalter (7) werden durch den Magneten (8) ausgelöst, der in der Welle (11) eingeklebt ist.

Bild 3.24: Manipulator in 6DOF Konfiguration mit Schutzhülle und End-Effektor für Präzisionssprühen

3.3.7 Schutz gegenüber Umwelteinflüssen

Für den Einsatz im Gewächshaus bei hoher Luftfeuchtigkeit oder im Freien ist der erste Prototyp auf Grund der offen liegenden Elektronik nur unter besonderer Vorsicht zu verwenden. Gelangen Tropfen auf die Elektronik, besteht die Gefahr von Kurzschlüssen, die die Elektronik zerstören können. Da aber beim Einsatz für das Präzisionssprühen die Bildung von Tropfen unvermeidlich ist, war es notwendig, einen Spitzschutz für den Manipulator zu entwickeln. Der Student Harald Desing hat diese Aufgabe als studentische Hilfskraft übernommen und eine Hülle entwickelt, die alle relevanten Teile der 6DOF-Konfiguration des ersten Prototypen, die für das Aufbringen von Pestiziden gedacht ist, vor Nässe schützt.

Die Hülle, die in Bild 3.3.7 auf dem Manipulator montiert zu sehen ist, besteht aus zwei Teilen. Eine starre Abdeckung aus PVC umgibt den Schlitten der Linearachse und ist mit diesem verschraubt. Die Hülle des restlichen Armes besteht aus einem leichten Ripstop-Nylon(200 g/m²), das zusätzlich mit thermischen Polyurethan beschichtet ist. Das Gewebe ist sehr reißfest und durch die Beschichtung bis zu einer Wassersäule von 10.000 mm dicht. Zudem ist es hitzeverschweißbar und kann somit zu einer geschlossenen Hülle verarbeitet werden. Ein Schlauch aus diesen Material umgibt die vorderen Gelenke und wird über eine Halterung aus PVC mit der Abdeckung des Schlittens verschraubt. Den Abschluss bei Gelenk

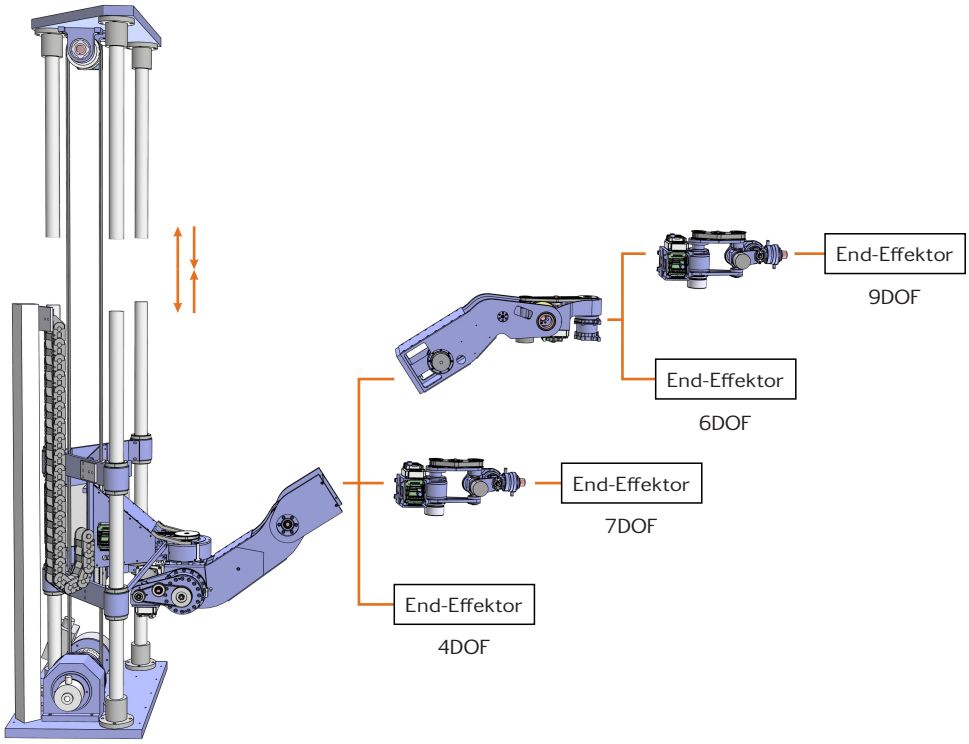


Bild 3.25: Mögliche Konfiguration des modularen Manipualtors der ersten Generation

6 bildet eine Halterung, an welcher der End-Effektor für das Sprühen befestigt werden kann. Durch die Hülle ergibt sich eine Einschränkung des Arbeitsraums. So kann das zweite Gelenk anstatt der normalerweise ±100 ° nur noch ±40 ° mit montierter Hülle geschwenkt werden.

3.3.8 Modularität

In Bild 3.25 ist eine Darstellung der theoretischen Konfigurationen der Manipulatoren gezeigt. Die Versionen mit sechs und neun DOF wurden für die Verwendung vorgesehen und können direkt genutzt werden (vlg.Kapitel 3.6). Die beiden Varianten mit vier bzw. sieben DOF können mit Hilfe eines einfachen mechanischen Adapters aufgebaut und verwendet werden. Zusätzlich zu der Umkonfiguration ist es möglich die Abstände zwischen den Modulen durch entsprechende Zwischenstücke anzupassen. Auch die Linearachse kann durch einen Austausch der drei Führungsstangen in der Länge verändert werden.

3.4 Sensorik

Die einzige Sensorik des Maniulators besteht aus den Encodern und Endschaltern der einzelnen Gelenke und muss dementsprechend sicher und fehlerfrei betrieben werden können. Insbesondere die Endschalter, die für die Referenzfahrt und als Sicherheit gegen Überschreiten der Gelenkwinkel verwendet werden, müssen unabhängig von äußeren Einflüssen zuverlässig funktionieren.

Tabelle 3.3: Übersicht der Gelenke mit Inkrementaldrehgebern

Gelenk	Encoder Bezeichnung	Striche [-]	Untersetzung [-]	Auflösung [°][1]
1[2]	Baumer BHG	320000	232	$1{,}81{\cdot}10^{-4}$
2	Maxon Encoder MR, Typ L	1024	300	$2{,}93{\cdot}10^{-4}$
3	Maxon ENC-HEDL-9140	500	320	$5{,}62{\cdot}10^{-4}$
4	Maxon ENC-HEDL-9140	500	177,78	$1{,}01{\cdot}10^{-3}$
5	Maxon Encoder MR, Typ L	1024	320	$2{,}75{\cdot}10^{-4}$
6	Maxon Encoder MR, Typ L	1024	192	$4{,}58{\cdot}10^{-4}$
7	Avago AEDB 9140	500	111,11	$1{,}62{\cdot}10^{-3}$
8	Avago AEDB 9140	500	218,18	$8{,}25{\cdot}10^{-4}$
9	Maxon Encoder MR, Typ M	512	100	$1{,}76{\cdot}10^{-3}$
9.1[3]	Avago AEDB 9140	500	100	$1{,}8{\cdot}10^{-3}$

[1] Theoretische Auflösung an der Abtriebsseite der Gelenke
[2] Linearachse: Untersetzung entspricht Umrechnungsfaktor von rotatorischer in lineare Bewegung [mm]/[Umdrehung]; Auflösung in [mm]
[3] Geänderte Version von Prototyp 2

3.4.1 Encoder

Tabelle 3.3 gibt eine Überblick über die verwendeten Encoder. Da es sich bei Gelenk 1 um einen Direktantrieb handelt, wird ein Encoder mit einer hohen Auflösung verwendet, um eine genaue Positionierung zu gewährleisten. Der Encoder der Firma Baumer (BHG1P.05A320000-E2-5) basiert auf einem optischen Abtastprinzip. Die Impulszahl pro Umdrehung ist programmierbar zwischen 4096 und 320000. Für die ersten Prototypen wird die Auflösung von 320000 Impulsen pro Umdrehung gewählt. Durch die 4-fach Auswertung und die Übersetzung von 232 $^{\text{mm}}/_{\text{Umdrehung}}$ von rotatorischer auf translatorische Bewegung der Linearachse ergibt sich eine theoretische Auflösung von $1{,}81 \cdot 10^{-5}$ mm.

Die Motoren von MaxonMotor werden in einem Paket mit den dazu passenden Encodern gekauft. Die Encoder (MR Typ M und Typ L) in den Gelenken 2,5,6 und 9 basieren auf einem magnetoresistiven Prinzip und erreichen eine Strichzahl von 512 bzw. 1024. Für die restlichen Gelenke werden optische Drehgeber verwendet. Die Motoren der Gelenke 3 und 4 können mit entsprechenden optischen Encodern (ENC-HEDL-9140) bezogen werden. Der Außenläufermotor von Gelenk 7 sowie die beiden gehäuselosen Motoren der Gelenke 8 und 9.1 werden mit den baugleichen Modellen der Firma Avago (AEDB 9140) bestückt. Die Aufhängung mitsamt dem Encoder des Gelenks 8 ist in Abbildung 3.26 dargestellt. Das Gehäuse (1) mit der LED und Photoelektrode wird an der Aufhängung montiert. Die Schlitzscheibe (2) wird auf der Motorwelle befestigt.

Durch die Untersetzung der Getriebe und Riemen in den Antriebssträngen der rotatorischen Gelenke, wird trotz der vergleichsweise kleinen Auflösung der Encoder eine sehr gute Auflösung an der Abtriebsseite erreicht. Für Gelenk 9, das mit der kleinsten Untersetzung und der niedrigsten Auflösung versehen ist, ergibt sich eine theoretische Auflösung von $3{,}14{\cdot}10^{-5}$ rad. Die Werte für die restlichen Gelenke können Tabelle 3.3 entnommen werden.

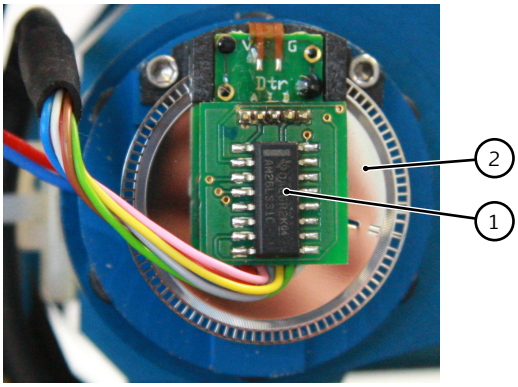


Bild 3.26: Inkrementeller Encoder der Firma Avago montiert am achten Gelenk; Encoder mit Linedriver (1) und Encoderscheibe (2)

3.4.2 Endschalter

Wie in Kapitel 3.2.5 beschrieben, werden für die Endschalter Hall-Sensoren in Verbindung mit Magneten verwendet. Die Hall-Sensoren sind auf Platinen gelötet, auf denen die notwendige Elektronik und das Kabel zum Anschluss an die Motorsteuerungen platziert sind (Bild 3.27). Für die Ausrichtung und Befestigung der Platinen befinden sich Langlöcher in den Ecken. Dabei ist vor allem zu beachten, dass die Endschalter erst außerhalb des vorgesehenen Arbeitsbereichs auslösen. Eine exakte Positionierung ist nicht notwendig, da die Lage in Bezug zu der Referenz nach der Montage ausgemessen und als Parameter festgehalten wird.

Absolut Encoder Linearachse

Die Linearachse wird im Gegensatz zu den anderen Gelenken nicht mit einem Endschalter referenziert. Anstatt dessen wird ein absoluter Seilzugencoder der Firma SICK AG eingesetzt (BCG05-L1KM01PP). Der Encoder hat einen Messbereich von einem Meter und kann eine Verstellgeschwindigkeit von 4 m/s auflösen. Der eigentliche Encoder besteht aus einem Potenziometer und liefert eine Spannung zwischen 0 und 10 V proportional zur ausgezogenen Seillänge. Das Signal wird verwendet um die ungefähre Position des Schlittens festzustellen. Danach wird eine Referenzfahrt bis zum nächsten Indexsignal des Motor Encoders durchgeführt, um die Position exakt zu bestimmen. Wie die anderen Endschalter ist auch der Seilzugencoder als Sicherheitsmechanismus aktiv und wird ausgelöst, sobald die eingestellten Grenzen überschritten werden sollten.

3.5 Elektronik

Wie in Kapitel 3.2.6 beschrieben, wird für die Steuerung des Manipulators bzw. der einzelnen Gelenkmotoren ein dezentrales System aufgebaut. Die hierfür verwendeten Motor Controller und das dazu passende Bussystem werden im Folgenden beschrieben.

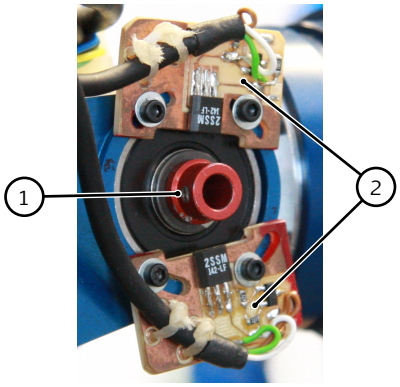


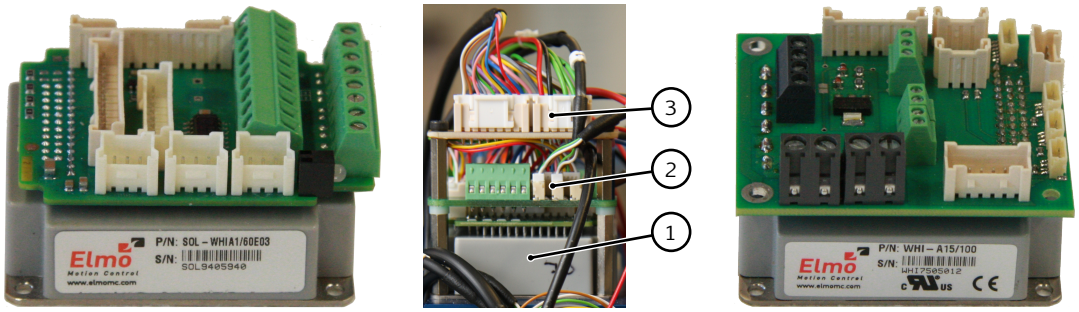
Bild 3.27: Endschalter des Gelenkes 8; Platinen mit Hall-Sensoren (2) und Magnet (1) auf der Gelenk-Achse

3.5.1 Motor Controller

Die Motor Controller werden von der Firma Elmo Motion Control bezogen (Elmo, 2011). Sie sind klein, leicht und besitzen eine hohe Leistungsdichte. Daher sind sie besonders gut für einen Einsatz in Robotern geeignet. Da sie zudem unter anderem in dem Humanoiden Laufroboter LOLA (Lohmeier, 2010) am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik eingesetzt wurden, gibt es bereits ein umfassendes Fachwissen in der Programmierung und dem Handling der Controller, welches für einen weiteren Einsatz dieser spricht.

Für die rotatorischen Freiheitsgrade werden Solo Whistle Controller mit 1–10 A der Simple IQ Baureihe eingesetzt. Sie sind für eine maximale Spannung von 60 V ausgelegt. Sie bieten Anschlüsse für den Encoder und die Hall-Sensoren der Motoren, sowie genügend digitale Ein- und Ausgänge, um die Endschalter auslesen und die Bremsen schalten zu können. Der Motor der Linearachse wird über einen Controller der Baureihe Drum mit 50 A Nennstrom betrieben. Die genauen Daten der Motorsteuerungen zu den jeweiligen Gelenken können dem Anhang B entnommen werden.

Die Controller können in verschiedenen Regelmodi betrieben werden. Je nach Bedarf ist es möglich, sie auf Strom-, Geschwindigkeits- oder Positionsebene zu verwenden. Für den Manipulator wird vorwiegend die Regelung auf Positionsebene verwendet (Baur, 2014). Die Ansteuerung der Motoren mit den notwendigen Strömen wird der internen Regelschleife der Controller überlassen.



(a) Solo Whistle mit Platine für Bremse und Encoder

(b) Solo Whistle mit Zusatzplatinen (Gelenk 7)

(c) Whistle mit neu entwickelter Platine

Bild 3.28: Motorsteuerungen der ersten Generation

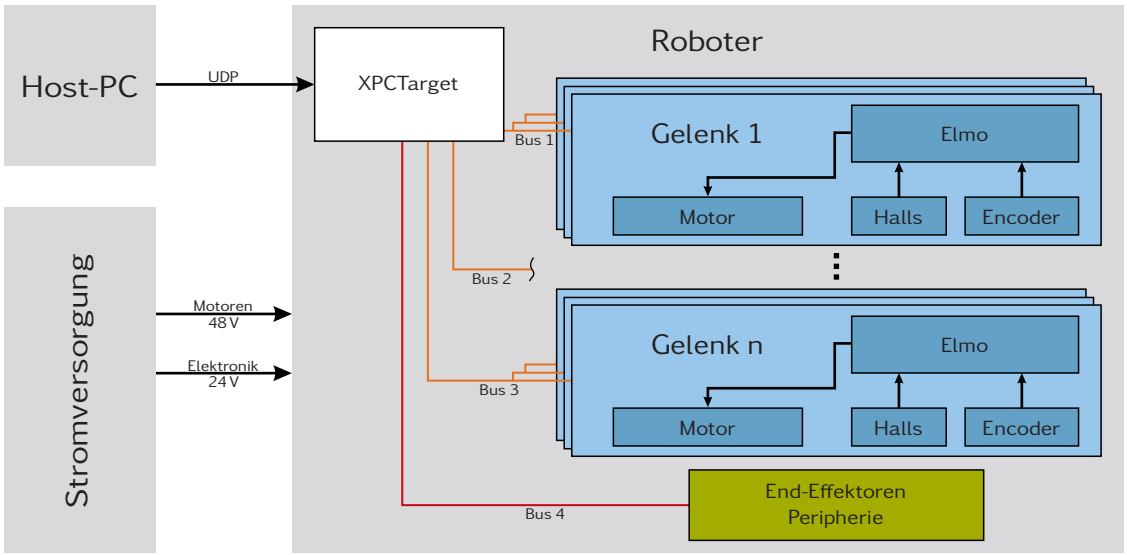


Bild 3.29: Schema des dezentralen Elektronikaufbaus

In Abbildung 3.28*a* ist ein herkömmlicher Controller der Baureihe Solo Whistle zu sehen, wie er für den ersten Prototypen der ersten Generation vorgesehen war. Da zusätzliche Anschlüsse notwendig waren, wurde der Controller um zwei Platinen, wie in Abbildung 3.28*b* gezeigt, erweitert. Neben dem eigentlichen Controller (1) befinden sich auf der unteren der beiden Platinen (2) der Anschluss und die Elektronik für die Bremse, die eine zusätzliche Stromzufuhr benötigt, sowie die Stecker für die Endschalter. Die zweite Platine (3) ermöglicht den Gebrauch von zwei einzelnen Steckern für die Hall-Sensoren und den Encoder. Hierdurch ist das Handling einfacher als bei einem gemeinsamen Anschluss direkt auf dem Solo Whistle.

Das Bild 3.28*c* zeigt einen Whistle Controller mit selbst entworfener Platine für den zweiten Prototypen. Anstelle der zusätzlichen Platinen auf dem Solo Whistle wurde eine vollständige Platine entworfen, die alle benötigten Bauteile und Stecker für den Anschluss der Peripherie enthält und auf einem Whistle montiert werden kann.

3.5.2 Bussystem

Mit der Auswahl der Motor Controller, die das Kommunikationsprotokoll CanOpen unterstützen, wurde das Bussystem bereits auf Controller Area Network (CAN) festgelegt. Die maximale theoretische Datenrate für einen CAN-Bus beträgt 1 Mbit/s bei einer Kabellänge von bis zu 40 m. Da bei Regelzeiten im Millisekundenbereich bei nur einem Bus die Bandbreite zu begrenzt wäre, werden vier Busse parallel betrieben. Dieser Aufbau erlaubt eine Taktzeit von 5 ms.

Die zentrale Recheneinheit bildet ein Server auf dem das Real-Time-Betriebssystem XPCTarget von MathWorks läuft. Der Server beinhaltet zwei CAN-Karten, die über jeweils zwei Schnittstellen verfügen. An diesen sind die vier CAN-Busse angeschlossen, über die die Motor Controller gesteuert werden. Das Schema ist in Abbildung 3.29 dargestellt.

3.6 Ergebnisse

Ein wichtiger Schritt für eine zweite überarbeitete und verbesserte Version des Ernteroboters ist die Evaluierung der ersten Generation. Dabei sollen Schwächen und Stärken untersucht werden, damit diese in der nächsten Konstruktion berücksichtigt werden können. Zu diesem Zweck werden sowohl die 9DOF als auch die 6DOF Konfiguration getestet.

Der erste Teil der nachfolgenden Beschreibung beschäftigt sich mit den Eigenschaften der beiden Manipulatoren der ersten Generation. Dabei wird sowohl auf den Arbeitsraum, als auch auf die Genauigkeit des Systems eingegangen. Der zweite Teil beschreibt die Versuche, die bei den Projektpartnern aus den Niederlanden, Belgien und Italien mit dem ersten Prototypen durchgeführt wurden, sowie deren Ergebnisse.

3.6.1 Eigenschaften des Manipulators

Die beiden Manipulatoren der ersten Generation sind nahezu baugleich, daher wird im Folgenden keine Unterscheidung zwischen den beiden Versionen gemacht.

Arbeitsraum

In Abbildung 3.30 wird der theoretisch mögliche maximale Arbeitsraum von der Seite, von oben und einer perspektivischen Ansicht dargestellt.

Mit einer Reichweite von 1,235 m (vgl. 3.30*a*) in einem konstanten vertikalen Bereich von ca. 1 m (vgl. 3.30*b*) können die Anforderungen bezüglich des Arbeitsraums für die Ernte von Paprika und anderer Früchte sehr gut erfüllt werden.

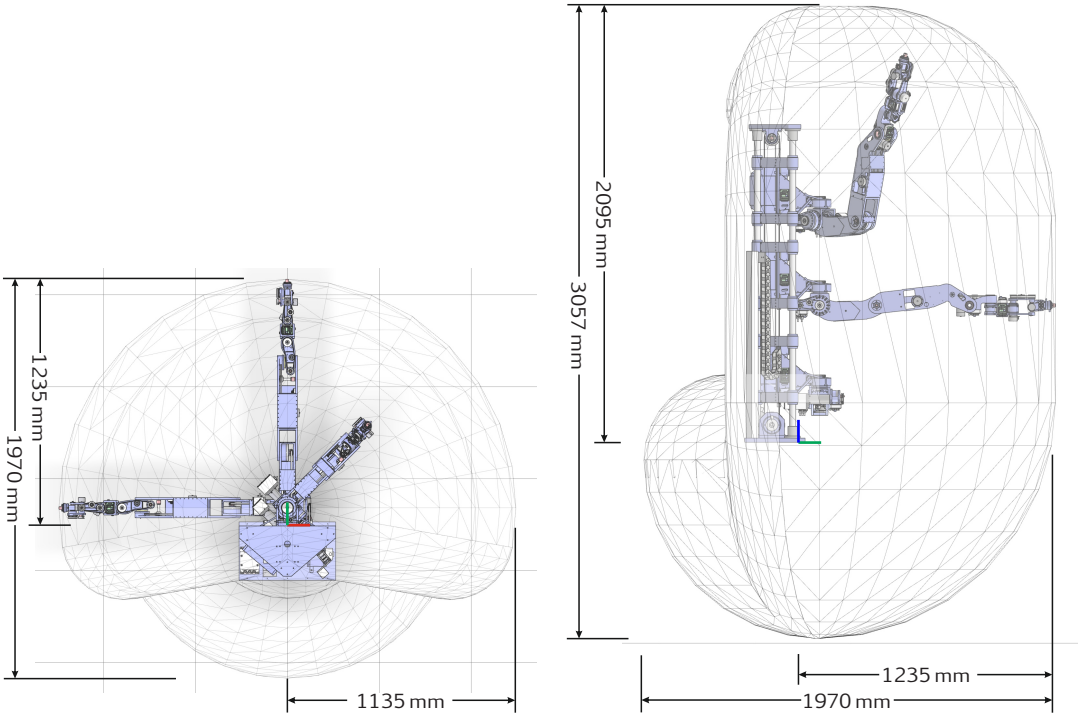
Sowohl im unteren, als auch im oberen Bereich des Arbeitsraums steht ein gewisser Spielraum zur Verfügung. Lediglich zur Rückseite des Manipulators ist der Arbeitsraum eingeschränkt. Dies ist bedingt durch den Aufbau der Linearachse. Der Schwenkbereich des zweiten Gelenks ist durch die Stangen der Führung auf $\pm 100\,°$ eingeschränkt. Da sich der Hauptarbeitsbereich vorne (bei der Ernte von Äpfeln und Trauben sowie dem Präzisionssprühen) bzw. auf den Seiten (Ernte von Paprika) befindet, bedeutet dies keine Einschränkung für den Einsatz des Roboters.

Messung der Genauigkeit

Für eine erfolgreiche Ernte sind verschiedene Voraussetzungen zu erfüllen. Die Früchte müssen z.B. erkannt und lokalisiert werden können. Außerdem muss der Manipulator den Bereich in dem sich die Frucht befindet anfahren können. Darüber hinaus wurde in den Anforderungen für den Manipulator eine Genauigkeit der Position des TCP von ca. einem Zentimeter festgelegt.

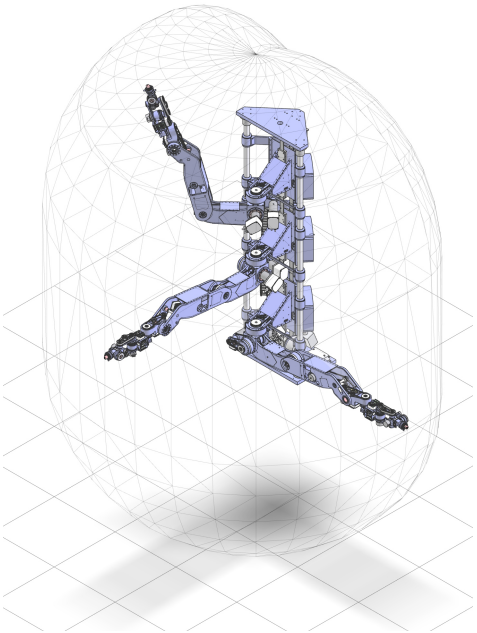
Die Überprüfung der Präzision des Roboters wurde mit Hilfe des optischen Tracking Systems Polaris von NDI[7] (Tabelle B.5 können die Daten zum Messbereich und der Genauigkeit des Messsystems entnommen werden) durchgeführt.

7 http://www.ndigital.com/



(a) Ansicht von oben

(b) Ansicht von der Seite



(c) Perspektivische Ansicht

Bild 3.30: Arbeitsraumdarstellung des Manipulators der ersten Generation in der Konfiguration mit 9DOF

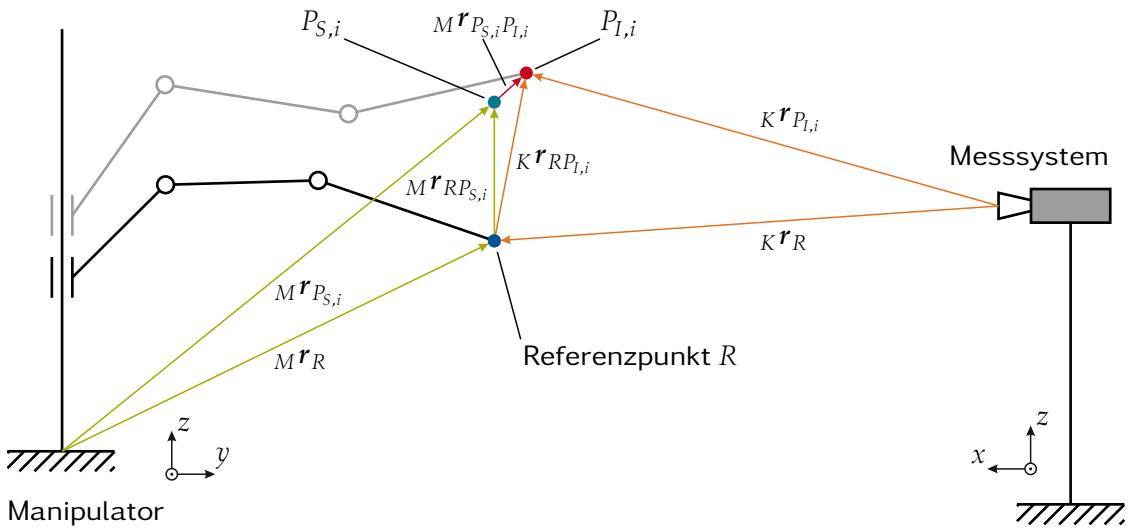


Bild 3.31: Berechnung der Manipulatorgenauigkeit

Das Messgerät emittiert eine Infrarotstrahlung, deren Reflexion von zwei Kameras erfasst wird, um daraus eine Position im Raum zu ermitteln. Da die Strahlung von allen Flächen mehr oder weniger stark zurückgeworfen wird, wird ein spezieller Tracker mit mindestens drei Markern eingesetzt, die eine besonders hohe Reflexion bieten. Der Tracker ist eine beliebige, möglichst schwach reflektierende Struktur, auf der die Marker in einem definierten Abstand angebracht werden können. Die Marker selbst sind Kugeln mit einem Durchmesser von etwas mehr als einem Zentimeter, die mit einer reflektierenden Folie beklebt sind. Durch die hohe Intensität der Reflexion und den definierten Abstand zwischen den Markern, kann der Tracker in der Umgebung als Ziel erkannt werden. Der Abstand und die Ausrichtung des Trackers werden mittels Triangulation bestimmt.

Für die Vermessung des Manipulators wurde ein Tracker an dem TCP befestigt. Dann wurde auf der schwarz eingezeichneten Bahn (siehe Abbildung 3.32) ein Würfel mit den Kantenlängen 0,7 m x 0,4 m x 0,4 m (x, y, z) abgefahren. Für die Auswertung wurden neben der Messung des Tracking Systems die vorgegebenen Gelenkwinkel $\boldsymbol{q}_{soll}$ sowie die tatsächlichen Gelenkwinkel $\boldsymbol{q}_{ist}$ aufgezeichnet.

Da es mit dem Messsystem leider nicht möglich war, sowohl den Tracker am TCP als auch einen weiteren Tracker an der Basis des Manipulators aufzunehmen, wurden die Abweichung der angefahrenen Punkte in Bezug zu dem Mittelpunkt des Würfels ausgewertet. Hierfür wurde davon ausgegangen, dass eine vorhandene konstante Verschiebung bzw. Verdrehung des vermessenen Würfels in den drei Raumrichtungen durch eine einfache Anpassung des Vektors zwischen dem Basis-Koordinatensystem und dem Koordinatensystem des ersten Gelenkes ausgeglichen werden kann.

Abbildung 3.31 stellt das Vorgehen zur Bestimmung der Genauigkeit dar. Mit dem Kamera-System werden die Ortsvektoren ${}_K\boldsymbol{r}_{P_{I,i}}$ zu den Punkten des Würfels im Koordinatensystem K der Kamera erfasst. Neben den Positionen werden auch die Informationen über die Drehung zwischen dem Kamerasystem und dem Trackersystem T festgehalten. Mit ihrer Hilfe werden die Koordinaten der Messpunkte in das Trackersystem des Referenzpunkts überführt, welches laut

vorheriger Annahme dem Koordinatensytem M des Manipulators entspricht.

Die Vektoren ${}_M\boldsymbol{r}_R$ bzw. ${}_M\boldsymbol{r}_{P_{S,i}}$ können mit Hilfe der direkten Kinematik und der aufgezeichneten Gelenkwinkel $\boldsymbol{q}_{ist}$ bestimmt werden. Die Differenz

$$ {}_M\boldsymbol{r}_{RP_{S,i}} = {}_M\boldsymbol{r}_{P_{S,i}} - {}_M\boldsymbol{r}_R \tag{3.5} $$

beschreibt somit die Lage der abgefahrenen Würfelpunkte in Relation zu dem Referenzpunkt. Entsprechend kann der Vektor

$$ {}_K\boldsymbol{r}_{RP_{I,i}} = {}_K\boldsymbol{r}_{P_{I,i}} - {}_K\boldsymbol{r}_R \tag{3.6} $$

bestimmt werden. Nach der Transformation in das Manipulatorsystem ergibt die Differenz zwischen ${}_M\boldsymbol{r}_{RP_{S,i}}$ und ${}_M\boldsymbol{r}_{RP_{I,i}}$ den gesuchten Fehler in der Positionierung ${}_M\boldsymbol{r}_{P_{S,i}P_{I,i}}$.

In Abbildung 3.32 ist der Fehler zwischen dem Referenzpunkt (blau) und den restlichen 26 gemessenen Koordinaten dargestellt. Die Messung des Würfels wurde zehnmal durchgeführt und die erhaltenen Koordinaten über die Versuche gemittelt. Die Standardabweichung σ des Vektors ${}_M\boldsymbol{r}_{P_{S,i}P_{I,i}}$ über die zehn Messungen zeigt Abbildung 3.33.

Die Differenz zwischen den vom Tracking-System gemessenen und den durch den Manipulator vorgegebenen Positionen liegt in einem Bereich von 0 – 7 mm und erfüllt somit die Anforderungen an den Manipulator. Die vorhandene Ungenauigkeit kann anhand von fünf Gründen erklärt werden:

- **Steifigkeit der Manipulator-Struktur:** Durch die Gewichtskraft des Arms, wird dieser in negativer Z-Richtung ausgelenkt. Das Ausmaß dieser Auslenkung hängt von der Steifigkeit des Manipulators und dessen aktueller Gelenkkonfiguration ab.

- **Offset in den Gelenken:** Die Gelenke des Manipulators werden nach dem Start referenziert (siehe 3.2.5). Die Offsets, die zwischen dem End-Schalter und der Null-Stellung der Gelenke bestehen, wurden so genau wie möglich eingestellt. Dennoch können hierbei leichte Abweichungen zu den idealen Werten auftreten. Des Weiteren kann die Position in der die Hall-Sensoren als Referenz auslösen leicht variieren.

- **Ungenauigkeiten in der Fertigung:** Die Positionierung des TCP wird basierend auf den Daten, die dem CAD-Modell des Manipulators entnommen wurden, berechnet. Durch Ungenauigkeiten in der Fertigung oder der Montage können die Abstände bzw. Winkel zwischen den einzelnen Gelenken leichte Abweichungen zu den CAD-Werten aufweisen.

- **Ungenauigkeiten in der Gelenkpositionierung:** Die Drehgeber, die für die Positionierung der Motoren und damit auch Gelenke verwendet werden, können in ihrer Position um wenige Inkremente schwanken. Durch die nachfolgende Untersetzung des Riemens und des HD ist diese Ungenauigkeit allerdings vernachlässigbar klein. Stärker zum Tragen könnten dagegen die Elastizitäten in dem Riementrieb und den Getrieben kommen. Durch

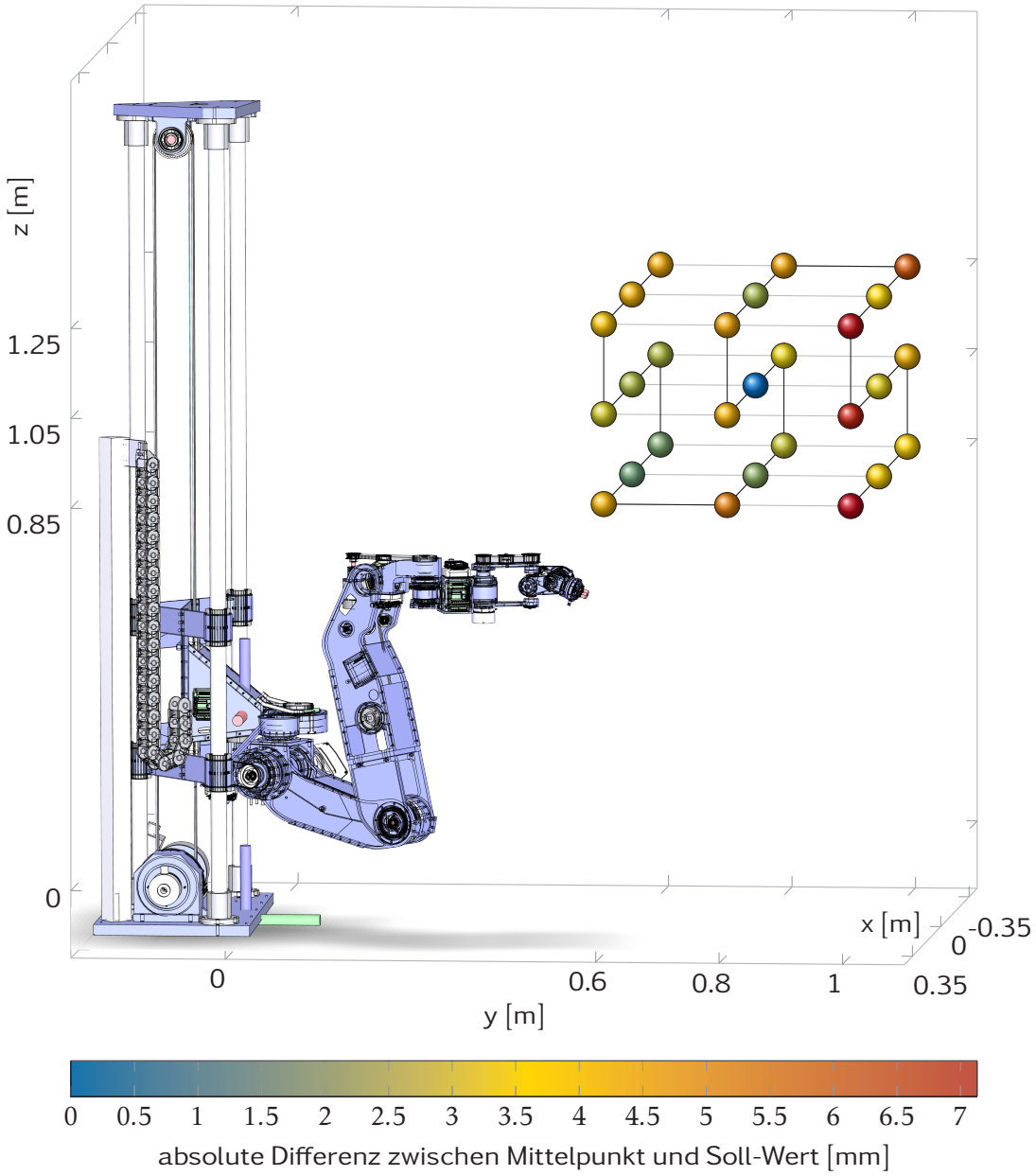


Bild 3.32: Darstellung der Genauigkeit des zweiten Prototypen

diese kann sich die tatsächliche Gelenkposition leicht von der vorgegebenen unterscheiden.

- **Ungenauigkeiten in der Messung:** Die Erfassung der Position des TCP erfolgte durch das NDI Polaris Tracking-System. Dieses weist eine Genauigkeit von ca. 0,3 mm in dem verwendetem Messvolumen auf. Diese Ungenauigkeit muss bei der Betrachtung der Auswertung ebenfalls berücksichtigt werden.

Die Abweichungen der Positionen in einer gestreckten Konfiguration sind tendenziell etwas größer als in Positionen, die nahe am Roboter liegen. Daher lässt sich ein kleiner Anteil der Ungenauigkeit auf die Durchbiegung des Arms zurückführen. Dies ist auch aus der Aufschlüsselung der Abweichungen in die drei

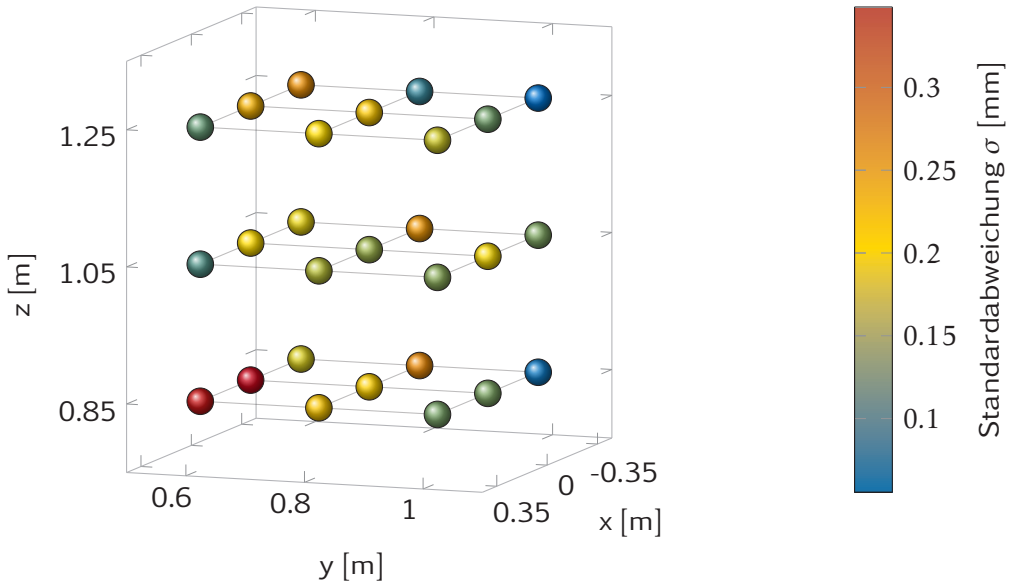


Bild 3.33: Darstellung der Wiederholgenauigkeit des zweiten Prototypen

Raumrichtungen ersichtlich (vgl. C.1). Allerdings ist auch zu sehen, dass eben nicht nur eine Differenz in z-Richtung vorhanden ist, sondern je nach Position auch in x- und y-Richtung. Dies lässt auf einen Offset in den Gelenken und/oder Ungenauigkeiten bei der Fertigung schließen.

Falls für andere Anwendungen eine genauere Positionierung erforderlich sein sollte, bietet sich eine Kalibrierung (z.B. wie in Campion et al. (2002); Aoyagi et al. (2010) oder Lei et al. (2004) beschrieben) des Roboters an. Mit dieser können Fehler aus der Fertigung oder in den Gelenkwinkeln erkannt und in die Planung des Manipulators integriert werden, um die Genauigkeit zu verbessern.

3.6.2 Versuche in einer realen Umgebung

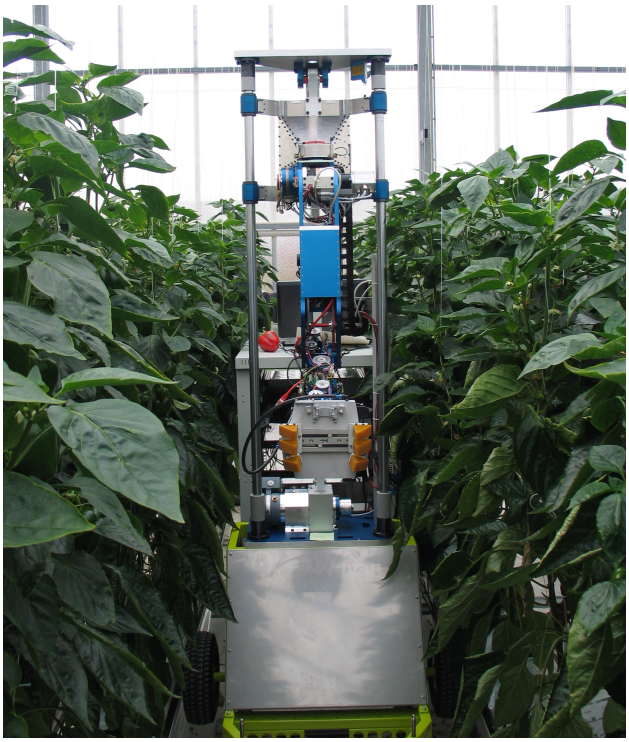
Die Tests, die im Labor durchgeführt wurden, um die prinzipielle Eignung des Manipulators für die Ernte festzustellen, sind ein erster Indiz, jedoch noch keine Garantie, dass die Funktion im realen Einsatz gewährleistet werden kann. Daher sind Versuche zur Ernte von Paprika und Äpfeln und zum Besprühen von Weinreben unabdingbar. Im Folgenden sind die Ergebnisse aus den ersten Versuchen in einer realen Umgebung dargestellt.

9 DOF - Erntekonfiguration

In der Version mit 9DOF wurde der Manipulator sowohl zur Ernte von Paprika in den Niederlanden als auch zur Ernte von Äpfeln in Belgien eingesetzt.

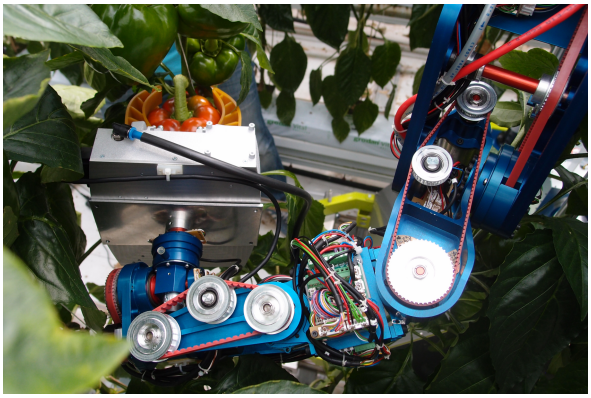
Paprikaernte Abbildung 3.34 zeigt den Manipulator bei Tests in einem Gewächshaus in Wageningen (Niederlande). In Bild 3.34*a* befindet sich der Roboter auf einer Plattform[8], die von der Firma Jentjens hergestellt wurde. Sie dient zur

8 In Kapitel 4.7.3 ist die selbe Plattform von der Seite zu sehen



(a) Manipulator mit Plattform in einem Gewächshausgang

(b) Ernte einer Frucht von der Seite aufgenommen



(c) Ernte einer Frucht von oben aufgenommen

(d) Manipulator mit geernteter Frucht

Bild 3.34: Versuche im Gewächshaus bei der Ernte von Paprika in Wageningen (Niederland)

Fortbewegung des Manipulators auf dem Schienensystem des Gewächshauses. Des Weiteren kann eine grobe Einstellung des Einsatzbereichs des Manipulators entsprechend der Höhe der Pflanzen getätigt werden. Die Fotos 3.34*b* – *d* zeigen den Manipulator inklusive Greifer bei ersten Ernteversuchen von Paprika. Der Greifer wurde von der Firma FESTO entwickelt. Die Greifbacken beruhen auf dem Prinzip des Finray-Effekts. Eine genaue Beschreibung des Systems ist in Gauchel und Saller (2012) zu finden.

Zur Evaluation des Manipulators wurden von den Partnern aus Wageningen Versuche durchgeführt, bei denen überprüft wurde, wie gut der Manipulator

Paprikafrüchte erreichen konnte. Dabei lag die Erfolgsquote bei 91,8 % von 217 zufällig getesteten Früchten (Hemming et al., 2013). Bei 30 % der Früchte war allerdings erst ein zweiter Anlauf erfolgreich, da zuvor keine direkte Bahn gefunden wurde. Die genaue Position der Früchte wurde bei den ersten Tests noch manuell an den Manipulator übergeben, da das Sichtsystem, das diese Aufgabe bei späteren Versuchen (siehe Kapitel 4.7.3) übernahm, zu diesem Zeitpunkt noch nicht einsatzbereit war.

Früchte, die sich auf der Vorderseite, also auf der dem Manipulator zugewandten Seite, befanden, konnten in 97 % der Fälle erreicht werden, wohingegen dies bei Früchten auf der Rückseite nur zu 83 % gelang.

Apfelernte Die Versuche für die Apfelernte in Leuven (Belgien) wurden sowohl an einem Testaufbau im Labor als auch auf einer Apfelplantage durchgeführt. Abbildung 3.35*a* zeigt zwei Bilder eines Erntevorgangs im Labor. Die Position der Äpfel wurde mit einem Sichtsystem, das aus zwei ASUS Xtion-Systemen[9] bestand, ermittelt. Mit diesem kann eine 2,5D-Karte des Sichtbereichs erstellt werden. In Bild 3.35*b* ist die Erntemaschine der Firma CNH zu sehen, die die Plattform, auf der der Manipulator befestigt wird, transportiert. Sie befindet sich an der Rückseite und ist von einem Zelt vor Licht und Wettereinflüssen geschützt. In Abbildung 3.35*c* und 3.35*d* ist der Manipulator auf der Plattform bei der Ernte zu sehen. Das Greifsystem ist wie bei der Paprikaernte von der Firma Festo entwickelt worden.

Die Apfelernte wurde an 51 Früchten getestet, von denen alle mit dem Manipulator erreicht werden konnten. Die vollständigen Ergebnisse sowie Details zu der Plattform und der Sensorik können Wouters et al. (2014) bzw. Nguyen et al. (2013) entnommen werden.

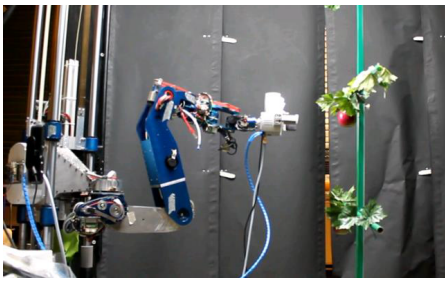
6 DoF - Sprühkonfiguration

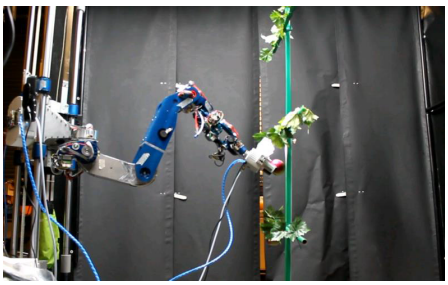
Das gezielte Besprühen von mit Schädlingen befallenen Weinreben wurde in Mailand (Italien) getestet. Da die Anforderungen an die Beweglichkeit des Manipulators nur sehr gering waren, wurde hier die Version mit sechs Freiheitsgraden verwendet.

In Abbildung 3.36*a* ist der Manipulator auf der dafür entwickelten Plattform zu sehen. Neben dem Manipulator befindet sich das Erkennungssystem für die Schädlinge sowie der Steuerungsschrank des Arms. Das zweite Bild (3.36*b*) zeigt den Aufbau im Gewächshaus mit den Testpflanzen. Des Weiteren ist die für diesen Zweck hergestellte Hülle (vgl. 3.3.7) zu sehen, die den Arm vor dem versprühten Fluid schützt.

Die Genauigkeit des Systems inklusive Sprühkopf wurde anhand von Zielen ermittelt, die aus einer Entfernung von etwa 0,6 m besprüht wurden. Die Abweichung hierbei lag bei etwa einem Zentimeter. Sie setzt sich sowohl aus der Ungenauigkeit des Manipulators, als auch aus der Ungenauigkeit des Sprühkopfes zusammen (Osterman et al., 2013; Oberti et al., 2013, 2014).

9 http://www.asus.com/de/

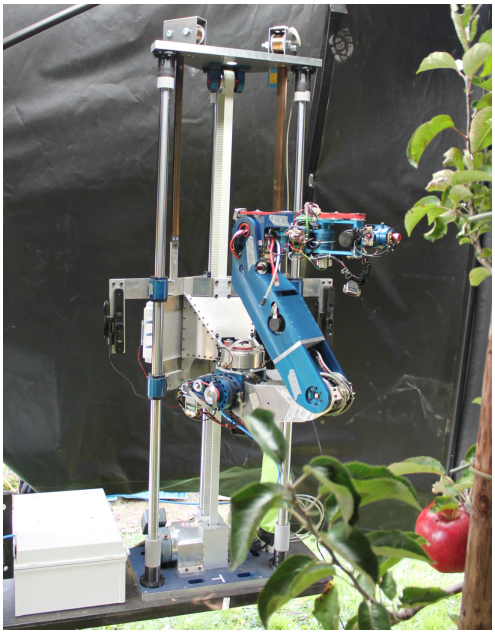




(a) Versuchsaufbau mit Kunstoffpflanze und Früchten

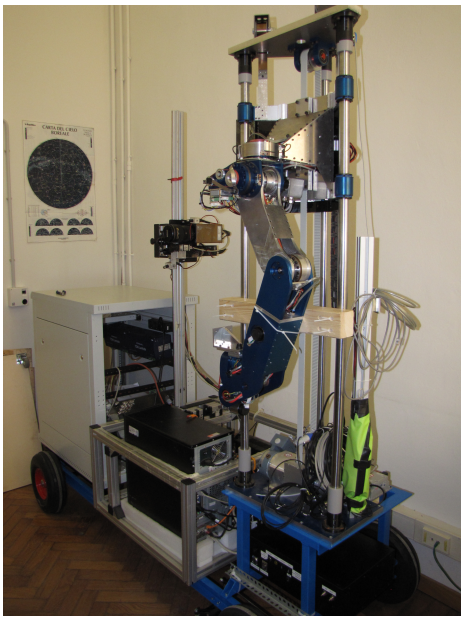
(b) Traktor als Träger der Plattform bei der Apfelernte

(c) Manipulator auf der Plattform unter Licht- und Wetterschutz



(d) Manipulator mit seitlich angebrachten Sensoren zur Detektierung der Früchte

Bild 3.35: Versuche zur Ernte von Äpfeln in Leuven (Belgien)



(a) Manipulator in Transportposition auf der Plattform für das Sprühen von Trauben

(b) Manipulator mit Schutzhülle und Sprühkopf bei Versuchen im Gewächshaus

Bild 3.36: Versuche im Gewächshaus zum Sprühen von Trauben in Mailand (Italien)

Evaluation des Manipulators durch die Projektpartner

Die Ergebnisse der Ernteversuche wurden in den vorherigen Abschnitten beschrieben. Neben der Erfolgsquote bei der Ernte, hat insbesondere das Handling des Manipulators einen großen Einfluss auf den erfolgreichen Einsatz des Erntero boters. Um Schwächen in diesem Bereich zu ermitteln, wurde ein Fragebogen mit entsprechenden Bewertungsmöglichkeiten an alle Projektpartner verteilt.

Die Verbesserungen die vorgeschlagen wurden sind folgend zusammengefasst:

- Die Sicherheit für die Umgebung ist nur bedingt gegeben, da keine Sensorik für die Detektion von Objekten (außer den Früchten) in der Reichweite des Manipulators vorhanden ist.
- Der Manipulator ist nicht ausreichend vor Beschädigungen geschützt. Dies resultierte in losen Kabeln oder Blättern, die die Riemen blockierten.
- Die Referenzfahrt dauert lange. Darüber hinaus kann es bei unglücklicher Stellung der Gelenke zu Selbstkollisionen kommen.
- Es gibt keinen Schutz gegen Luftfeuchtigkeit bei der Konfiguration mit neun DOF
- Die Schnittstellen zwischen den Elementen, oder zum End-Effektor sollten vereinfacht und erweitert werden.

3.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird die Konzipierung, die Entwicklung und die mit der ersten Generation des Ernteroboters gewonnenen Versuchsergebnisse vorgestellt. Auf der Basis der Anforderungen, die von Seiten der Partner und des Projekts gestellt wurden, fand die Entwicklung eines mechatronischen Konzepts statt. Dieses wurde in zwei nahezu baugleichen Prototypen umgesetzt.

Ein besonderes Merkmal der Manipulatoren ist deren Modularität. Diese ist notwendig, um die verschiedenen Aufgaben - die Ernte von Paprika, Äpfeln und Trauben sowie das Präzisionssprühen - bewältigen zu können. Die Konstruktion ist für eine einfache Konfiguration mit vier, sechs oder neun Freiheitsgraden gedacht. Es sind zwar weitere Kombinationen denkbar, doch sind diese nur mit einem zusätzlichen Adapter zu realisieren (indem z.B. das Handgelenk an die Konfiguration mit vier Freiheitsgraden geschraubt wird, so dass eine 7DOF Variante entsteht).

Zur Evaluierung des Konzepts wurde der erste der beiden Manipulatoren an die Projektpartner ausgeliehen. Diese haben Versuche zur Ernte von Paprika und Äpfeln sowie zum gezielten Besprühen von Weinreben durchgeführt. Die Erfolgsquote bei den Tests bezüglich der Erreichbarkeit der Früchte war mit über 83 % bei der Paprika- und 100 % bei der Apfelernte sehr gut. In Laborversuchen konnten die in einer realen Umgebung gewonnenen Testergebnisse, und somit auch das kinematische Konzept, bestätigt werden. Allerdings ergaben sich auch verschiedene Ansatzpunkte für eine Überarbeitung und Weiterentwicklung von Konstruktion, Sensorik und Handling.

- **Bremsen:** Es sollte beachtet werden, dass jedes Gelenk eine Bremse erhält. Im Moment sind die Gelenke, die gegen die Schwerkraft wirken, mit Bremsen versehen. Allerdings ist es auch jetzt schon möglich, dass einzelne Gelenke, die keine Bremse besitzen, in bestimmten Stellungen gegen die Schwerkraft wirken und somit beim Ausschalten oder bei Stromverlust sich ungewollt weiterbewegen. Besonders für eine neue Generation, in der eine höhere Modularität umgesetzt werden soll, müssen alle Gelenke Bremsen besitzen.

- **Schutz vor Umwelteinflüssen:** Die Funktionsfähigkeit der Prototypen wird gefährdet durch den fehlenden Schutz von Kabeln und Elektronik. Durch Kollisionen mit der Umgebung kam es zu vereinzelten Kabelbrüchen, die vor dem weiteren Betrieb repariert werden mussten. Daher ist es notwendig, dass offen-liegende Elektronik, Kabel sowie die Riementriebe eine Abdeckung erhalten, damit kein Schaden am Manipulator oder an der Umgebung entsteht. Die Hülle (Kap. 3.3.7), die als Schutz gegen Feuchtigkeit entwickelt wurde, schützt zwar den Manipulator und dessen Komponenten, allerdings wird durch sie auch die Bewegungsfreiheit stark eingegrenzt. Zudem wurde de Hülle nur für die Konfiguration mit sechs Freiheitsgraden angefertigt.

- **Referenzfahrt:** Ein störender Aspekt während des Testbetriebs war die Referenzfahrt, die nach jeden Neustart des Systems durchgeführt werden muss. Da sie viel Zeit in Anspruch nimmt, ist ein anderes System wünschenswert,

welches ohne Referenzfahrt funktioniert. Dies wird für einen späteren autonomen Betrieb ohnehin benötigt, da bei der Referenzfahrt immer eine Person anwesend sein muss, um notfalls den Manipulator stoppen zu können.

- **Konstruktion und Fertigung:** Nicht nur die Funktion des Arms kann verbessert werden. Auch Entwicklung und Konstruktion sowie Fertigung und Montage lassen sich optimieren. So sollten einheitliche Bauteile und Baugruppen verwendet werden. Durch sie ließen sich nicht nur Konstruktion, Fertigung und Montage, sondern auch die Inbetriebnahme vereinfachen und beschleunigen.
- **Kalibrierung:** Unabhängig von der Entwicklung der nächsten Generation können auch bei den bisherigen Manipulatoren Verbesserungen durchgeführt werden. So hat sich bei der Messung der Genauigkeit herausgestellt, dass diese zwar ausreichend ist, jedoch durch eine Kalibrierung noch verfeinert werden kann.

4 Manipulator der zweiten Generation

In diesem Kapitel wird die zweite Generation des Ernte-Manipulators und dessen Entwicklung vorgestellt (vgl. Bild 4.1). Dieser Prototyp bot die Möglichkeit, die Verbesserungsvorschläge und Änderungswünsche, die sich bei den Versuchen mit der ersten Generation ergaben, zusammen mit neuen Ideen umzusetzen und kleinere Schwächen zu beheben. Der Manipulator wurde am Ende des Projekts mit dem Sensorsystem und Greifer zu einem vollständigen Ernteroboter zusammengesetzt und im Feld getestet.

Bild 4.1: Prototyp der zweiten Generation

4.1 Erweiterte Anforderungen

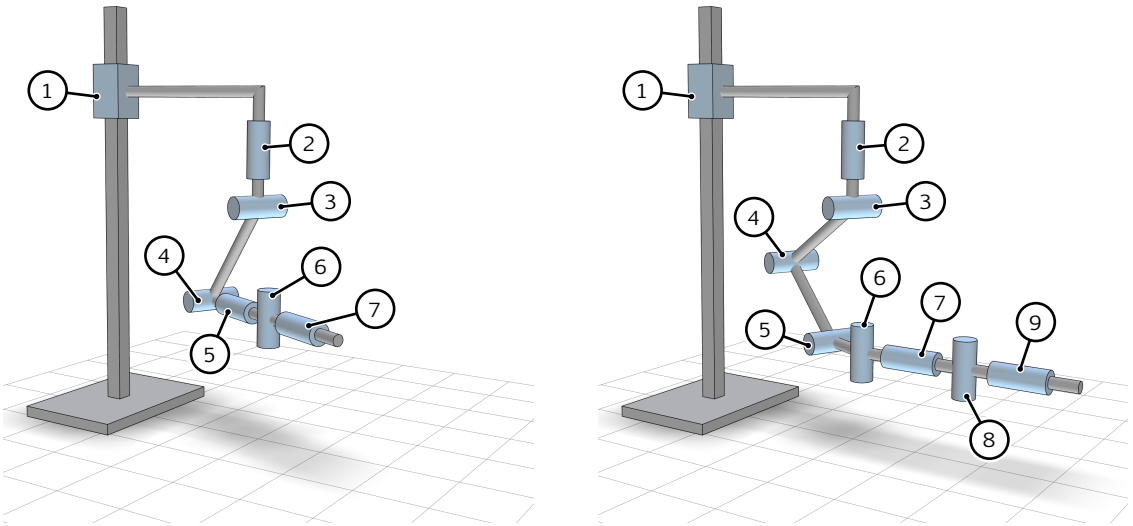
Die Anforderungen an die zweite Generation setzen sich aus den schon bekannten Anforderungen an die erste Generation sowie weiteren Kriterien, die sich erst durch die Evaluation der ersten Prototypen ergaben, zusammen. In Kapitel 3.1 können die ursprünglichen Bedingungen an den Manipulator nachgelesen werden. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Neuerungen beschrieben.

Der erste Roboter ist nur in der 6DOF-Konfiguration zum Sprühen vor Umwelteinflüssen geschützt (siehe Kapitel 3.3.7), da durch die Tropfenbildung und den Sprühnebel die Gefahr vor Kurzschlüssen besonders groß ist. Dennoch können z.B. auch durch die hohe Luftfeuchtigkeit in den Gewächshäusern die Komponenten des Manipulators geschädigt werden. Abgesehen von der Gefahr für den Manipulator ist das Anlegen der Hülle aufwendig und zeitintensiv und beschränkt den Arm stark in seiner Bewegungsfreiheit. Bei der neuen Version sollte daher für alle Konfigurationen sichergestellt sein, dass die Komponenten vor Nässe, Staub und Ähnlichem geschützt sind. Neben der Gefahr durch Umwelteinflüsse sind vor allem Schäden an der Elektronik und der Verkabelung durch Kollisionen oder Hängenbleiben an der Umgebung verantwortlich für Ausfälle. Um dies zu vermeiden, müssen die entsprechenden Komponenten auch vor physischem Kontakt geschützt werden.

Ein wichtiger Aspekt in der Entwicklung des Ernteroboters ist dessen Eignung für eine Vielzahl unterschiedlicher Einsatzgebiete. In der ersten Version wurde diesem Umstand mit einem teilweise modularen Konzept entsprochen. Dafür wurden mehrere Schnittstellen integriert, durch die es möglich ist, den Arm zu rekonfigurieren. In der neuen Version sollte dieses Konzept weiter ausgearbeitet und verbessert werden. Dies macht mehr Schnittstellen erforderlich, um eine größere Vielfalt an Konfigurationen zu ermöglichen. Zudem müssen die Schnittstellen derart aufgebaut sein, dass die Montage und Demontage von einzelnen Elementen einfach und schnell erfolgen kann. Damit einzelne Elemente weitestgehend beliebig angeordnet werden können, müssen alle Gelenke mit Bremsen ausgestattet werden, um die Sicherheit des Systems in jeder Position zu gewährleisten.

Eine Anforderung, die vor allem das Handling des Manipulators verbessern soll, ist der Verzicht auf die Referenzfahrt. Diese ist bei jedem Neustart des Systems notwendig und erfordert einen gewissen Zeit- und Personenaufwand. Da nicht auf eine Initialisierung der Gelenke verzichtet werden kann, muss ein anderes System verwendet werden, um die exakten Positionen der Gelenke zu ermitteln.

Im Hinblick auf eine mögliche Verwendung eines weiterentwickelten Manipulators in der Industrie werden Faktoren wie die Entwicklungszeit oder auch eine einfache und kosteneffiziente Fertigung interessant. Da der Prototyp immer noch innerhalb eines Forschungsprojektes entsteht, soll dies weiterhin nur ein untergeordneter Aspekt sein. Dennoch soll durch die Verwendung von gleichen oder ähnlichen Konzepten und Komponenten der Aufwand für die Konstruktion und die Fertigung so weit wie möglich reduziert werden.



(a) 7DoF Konfiguration (b) 9DoF Konfiguration

Bild 4.2: Kinematik der Generation 2

4.2 Mechatronisches Konzept

Auf Grund der geänderten Anforderungen musste das Konzept, welches für die erste Generation erarbeitet wurde, erneuert werden. Insbesondere die Verkleidung der Komponenten und die höhere Modularität sind mit einem Riementrieb so, wie er in der ersten Generation verwendet wurde, nicht zu erreichen. Dennoch dient das erste Konzept mit den Erfahrungen, die damit gemacht wurden, als Basis für die Weiterentwicklung.

4.2.1 Kinematisches Design

Die Kinematik der ersten Prototypen hat in der realen Anwendung sowie in Versuchen im Testszenario sehr gut funktioniert. Daher wurde diese nur leicht verändert. In Abbildung 4.2 sind zwei Varianten mit 7 (*a*) bzw. 9 (*b*) Freiheitsgraden dargestellt, welche für die angedachten Anwendungen besonders geeignet sind. Durch das modulare Konzept, welches in Kapitel 4.2.2 vorgestellt wird, sind theoretisch beliebige andere Konfigurationen möglich.

Eine weitere leichte Veränderung zu der ersten Generation ist die Anordnung der drei letzten Gelenke. In Kapitel 3.3.6 wurde der Aufbau des ersten Handgelenks beschrieben. Dieses wurde als eine zusammenhängende Einheit umgesetzt, um eine möglichst kompakte Konstruktion zu ermöglichen. Das neue Handgelenk soll, wie der Rest des Arms, modular aufgebaut sein.

Abbildung 4.3 zeigt die Schnittstellen der zweiten Generation, wie sie in der Konstruktion umgesetzt wurden.

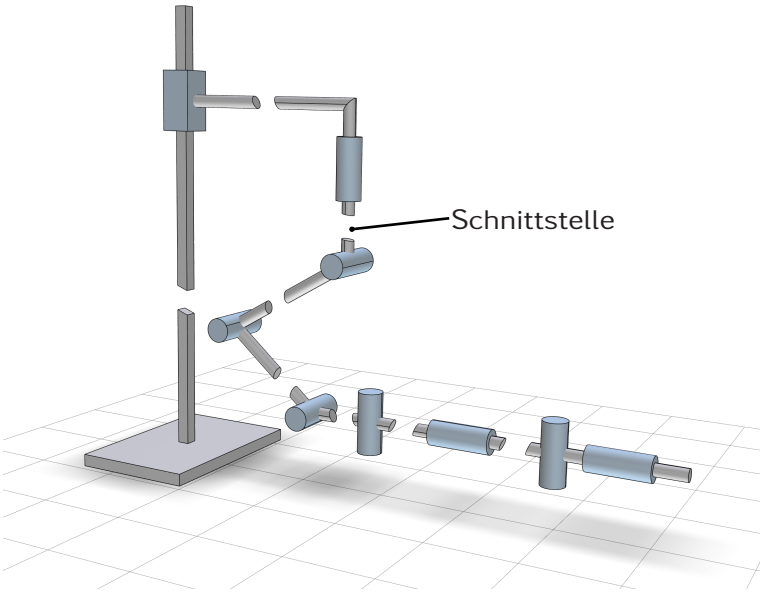
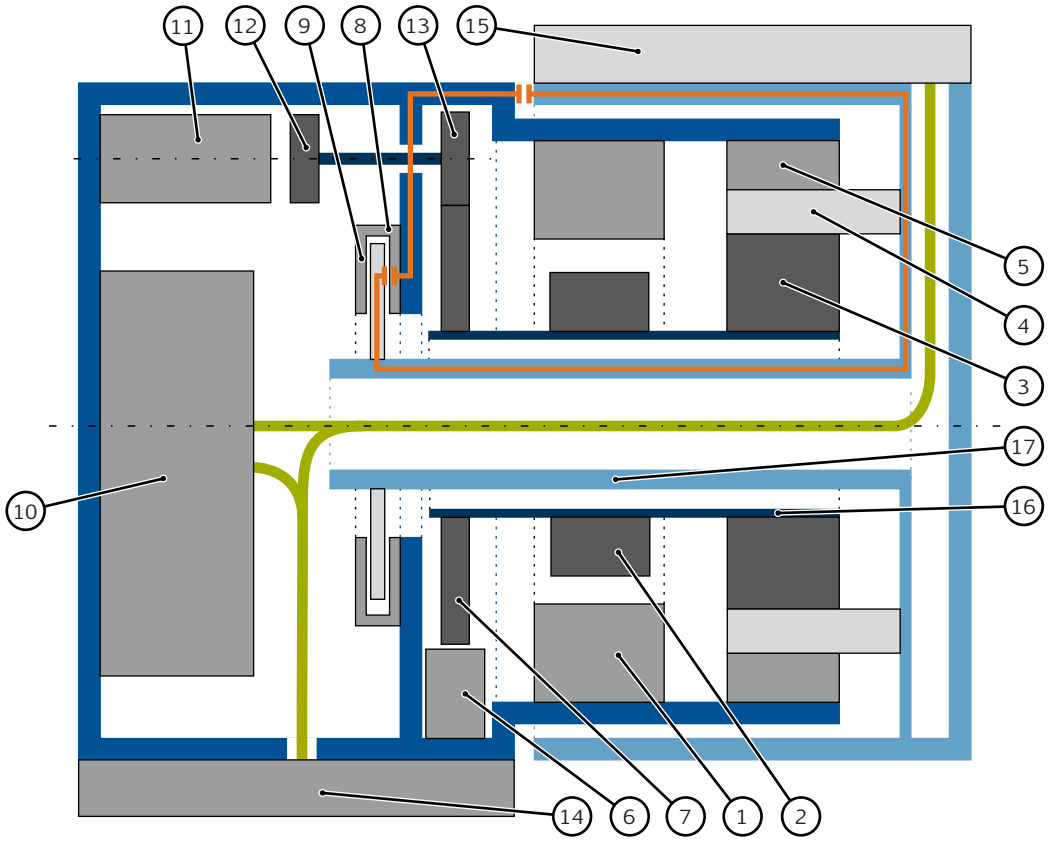


Bild 4.3: Darstellung der Kinematik mit möglichen Schnittstellen an denen der Manipulator von Generation 2 getrennt und umkonfiguriert werden kann

4.2.2 Struktur und Aktorik

Der Grundgedanke bei der Entwicklung der ersten Mechanik war, das Gewicht des Arms so weit wie möglich in Richtung der Basis des Roboters zu verschieben, um eine bessere Dynamik des Systems zu erreichen. Hierfür wurden Riemen zwischen Motor und Getriebe eingesetzt, die erlaubten, die Motoren für die Gewichtsverteilung besser zu platzieren. Die speziellen Formen der Gelenke, die durch dieses Konzept entstanden sind, sowie die frei liegenden Riemen widersprechen jedoch den aktualisierten Anforderungen, die Modularität zu erhöhen und die sensiblen Komponenten abzuschirmen. Daher wurde auch das Konzept der Struktur und Aktorik grundlegend geändert.

Jedes Gelenk - außer der Linearachse - wird ein eigenes vollständig integriertes Modul. Mit diesem Ansatz können die Anforderungen, die sich durch die Versuche mit der ersten Generation ergeben haben, erfüllt werden. Indem die Module mit passenden Schnittstellen ausgerüstet werden, lassen sie sich nahezu beliebig anordnen. So kann auf Unterschiede zwischen den verschiedenen Anwendungen oder auch innerhalb einer Anwendung problemlos reagiert werden. Durch den integrierten Ansatz sind alle Komponenten eines Gelenks in einem Gehäuse untergebracht und können so vor Nässe, Staub und Kontakten mit der Umgebung geschützt werden. Konsequenterweise müssen auch die Kabel innerhalb des Gehäuses von der Antriebs- zur Abtriebsseite geführt werden. Um dies zu realisieren, wird entweder eine Drehdurchführung oder eine zentrische Hohlwelle, durch welche die Kabel geführt werden können, benötigt. Eine Drehdurchführung hat den Vorteil, dass beliebig viele Umdrehungen möglich sind, ohne dass die Kabel Schaden nehmen. Drehdurchführungen sind allerdings teuer, groß und nur für eine begrenzte Anzahl an Kabeln erhältlich. Daher wird eine zentrische Hohlwelle innerhalb der Module verwendet. Zwar sind die Module dadurch auf



1	Motor Stator	7	Inkrementalencoder Scheibe	13	Bremse Anbindung
2	Motor Rotor	8	Absolut Encoder	14	Schnittstelle Eingang
3	Getriebe Eingang	9	Absolutencoder Scheibe	15	Schnittstelle Ausgang
4	Getriebe Ausgang	10	Motorsteuerung	16	Motorwelle
5	Getriebe Gehäuse	11	Bremse Stator	17	Hohlwelle
6	Inkremental Encoder	12	Bremse Rotor		

Bild 4.4: Schematische Darstellung des Modulaufbaus

einen begrenzten Winkelbereich festgelegt, doch dieser ist für die angedachte Anwendung ausreichend. Durch die Nutzung einer Hohlwelle ist definiert, dass nur Komponenten verwendet werden können, die entweder selbst eine Hohlwelle besitzen oder außerhalb dieser platziert werden können.

Die Skizze in Abbildung 4.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Moduls. Zu sehen sind der Motor (1), (2) und das Getriebe (3), (4), (5), die jeweils eine Hohlwelle besitzen, sowie die Bremse (11), (12), die über eine Getriebestufe (13) mit der Motorwelle (16) verbunden ist. Im Gegensatz zu den Motoren, die bisher verwendet wurden, empfiehlt es sich in diesem Aufbau gehäuselose Motoren zu verwenden, die entsprechend des vorhandenen Bauraums in das Modul eingepasst werden können. Auf Grund der Überlegungen zu den Antrieben (vgl. Kapitel3.2.3), bei

der ersten Generation, sollen auch bei diesem Prototypen bürstenlose Gleichstrommotoren in Verbindung mit Harmonic Drive Getrieben zum Einsatz kommen. Darüber hinaus sprechen die Erfahrungen, die bei der Entwicklung und der Inbetriebnahme der ersten beiden Manipulatoren gewonnen wurden, für die Beibehaltung des Aktorik-Prinzips.

Das dargestellte Schema kann auf verschiedene Größen von Modulen angewendet werden, die jeweils einen bestimmten Leistungsbereich abdecken. Um die Konstruktion und die Fertigung zu vereinfachen, werden nur drei Größen entwickelt. Durch die Mehrfachverwendung der einzelnen Modulgrößen kann eine übermäßige Teilevielfalt vermieden werden und die Fertigung und Montage in kleiner Serie geschehen. Die drei Modulgrößen werden an die benötigten Leistungen angepasst, sind jedoch abhängig von den verfügbaren Komponenten. Damit die Adaption der verschiedenen Größen einfach umzusetzen ist, werden, wenn möglich, nur Motoren, Getriebe etc. aus der gleichen Baureihe verwendet. Als zusätzliche Hilfe für die Montage und die Inbetriebnahme der Gelenke sind an der An- und Abtriebsseite Markierungen am Gehäuse vorgesehen, die es erlauben die Nullstellung eines Moduls genau einzustellen.

4.2.3 Sensorik

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschreiben, sollen die Sensoren der unterschiedlichen Modulgrößen möglichst gleich sein, um den Aufwand bei Konstruktion und Auswahl zu minimieren. Es können zwar nicht exakt die gleichen Sensoren verbaut werden, da die Größe der Module und damit der verfügbare Bauraum unterschiedlich ist. Allerdings können alle Sensoren aus ein und der selben Baureihe ausgewählt werden, um die gleichen Eigenschaften und Anschlüsse zu nutzen.

Zum Einsatz kommen sollen, wie schon in der vorherigen Version, inkrementelle Drehgeber (vgl. Abbildung 4.4) (6), (7), welche die Position des Motors messen und dessen Kommutierung übernehmen können. Da diese auf der Motorachse befestigt sein müssen, benötigen auch sie eine Hohlwelle. Die Auflösung soll hoch genug sein, um eine exakte Messung der Position und somit auch der Drehzahl zu ermöglichen. Ferner soll in Verbindung mit einem weiteren Encoder, der sich auf der Abtriebsseite des Gelenks befindet, die Steifigkeit des Gelenks gemessen werden können.

Für den zweiten Drehgeber ist ein Absolutencoder (8), (9) vorgesehen. Dieser kann verwendet werden, um die Verdrehung des Gelenks zwischen An- und Abtriebsseite zu messen (Kapitel 4.7.1). Dafür ist eine besonders hohe Strichzahl notwendig, um in einem kleinen Winkelbereich auflösen zu können. Der Absolutencoder dient aber auch dazu, beim Starten des Manipulators die genauen Positionen der Gelenke festzustellen. Dadurch werden die in der ersten Version verwendeten Endschalter überflüssig. Der Absolutencoder muss mit der Antriebsseite und der Abtriebsseite verbunden sein, um die Position der beiden Seiten zueinander messen zu können. Damit dies möglich ist, muss eine Verbindung zwischen den Seiten hergestellt werden. Mit der Hohlwelle (17), die für die Kabelführung gedacht ist, kann dies umgesetzt werden. Dafür ist auch hier eine Hohlwelle des Encoders Voraussetzung, um den Drehgeber entsprechend in den

Modulen einbauen zu können.

Das Konzept der Sensoren der Linearachse hat bei den ersten Manipulatoren wie gewünscht funktioniert und muss daher nicht verändert werden. Wie bei den anderen Gelenken kommt ein inkrementeller Encoder für die Positionsbestimmung des Motors und ein absoluter, in diesem Fall linearer, Encoder für die Positionsbestimmung der Achse zum Einsatz. Da sich diese Encoder nicht in einem Modul befinden, werden sie so ausgewählt und verbaut, dass sie den Anforderungen an ein wasserfestes Design gerecht werden.

4.2.4 Elektronik

Eine großes Problem der ersten Manipulatoren sind die offen liegenden Kabel und die Elektronik, die sich zu einem Großteil an der Außenseite des Manipulators befindet. Sie können durch Kontakt mit der Umgebung beschädigt werden und zum Ausfall der Manipulatoren führen. Dies soll durch das neue Konzept der integrierten Module vermieden werden. Dafür wird die Elektronik innerhalb der Module platziert (vgl. Abbildung 4.4) (10) und ist so vor Beschädigungen geschützt. Damit dieses Konzept erfolgreich umgesetzt werden kann, muss sowohl die Anbindung der Elektronik, als auch die Anbindung der Module selbst einfach und sicher erfolgen. Zu diesem Zweck werden mehrere Schnittstellen (14), (15) entworfen. Innerhalb des Moduls ermöglicht eine Schnittstelle die einfache Montage und Demontage der Motorsteuerung. Außerhalb werden über zwei Schnittstellen die vorhergehenden und nachfolgenden Module angeschlossen.

Die Möglichkeit des einfachen und schnellen Verbindens bzw. Trennens soll auch für die Linearachse gelten. Daher ist am Schlitten der Linearachse eine Schnittstelle entsprechend der der Module vorgesehen, die zur Anbindung eben dieser genutzt werden kann. Auf der anderen Seite der Linearachse, sollen die Kabel, die zu der externen Steuereinheit führen, genauso einfach und sicher handhab- und trennbar sein.

Neben der Verbesserung der Anschlüsse und der Kapselung der Elektronik, wird auch die Leistung der Komponenten gesteigert. Insbesondere der langsame CAN-Bus wird durch einen EtherCAT-Bus[1] mit einer deutlich höheren Bandbreite ersetzt. Im Gegensatz zu den bisher für die Ansteuerung der Elektronik benötigten drei Bussen, kann die Anbindung der Motorsteuerungen auf einen Bus reduziert werden. Zur Verwendung von externen Komponenten (z.B. End-Effektoren oder eine Taktile Hülle) werden zudem ein Ethernet sowie ein CAN-Bus vorgesehen.

4.3 Modulare Robotik

Das mechatronische Konzept der zweiten Manipulator Generation sieht einen modularen Aufbau vor. Hierfür ist es notwendig, dass alle Komponenten zum Betrieb eines solchen Moduls (Motor, Getriebe, Elektronik, etc.) in diesem selbst untergebracht sind. Ein Bereich, in dem solche Module eingesetzt werden, beschäftigt sich mit selbst-rekonfigurierbaren Robotern. Diese Systeme sind dafür

1 http://www.ethercat.org/

gedacht, Aufgaben in einer sich ändernden Umgebung durchzuführen. Beispiele sind in Schmitz et al. (1998); Ünsal et al. (2001); Salemi et al. (2006) oder Yim et al. (2000, 2007) zu finden. Sproewitz et al. (2009) z.B. beschreibt Module aus denen Möbel für unterschiedliche Situationen gebildet werden können.

Eine Gemeinsamkeit der rekonfigurierbaren Roboter ist der Aufbau aus beliebig vielen – jedoch immer gleichen – Modulen. Für den hier beschriebenen Manipulator ist ein solcher Aufbau nicht möglich, da sich die benötigte Leistung der Gelenke teilweise deutlich unterscheidet (siehe 3.3.1). In Gombert et al. (1994) oder Matsumaru (1995) wird der Aufbau modularer Roboter beschrieben, die dem in dieser Arbeit beschriebenen ähneln. Auch in Lohmeier et al. (2006) werden modulare Antriebseinheiten beschrieben, die für den humanoiden Roboter LOLA entworfen wurden. Allerdings bietet keines der Systeme eine Schnittstelle, wie sie für ein schnelles und einfaches Umbauen des Manipulators erforderlich wäre. Ein weiterer Baustein für einen modularen Manipulator sind die Zwischenstücke, die verwendet werden, um eine bestimmte Kinematik zu gestalten. Said et al. (2000) zeigt eine Möglichkeit für das Design solcher Elemente.

Kommerzielle Module, die für den Manipulator genutzt werden könnten, sind von Schunk erhältlich. Die Module der PRL-Serie (Schunk, 2011) bieten einen Funktionsumfang, der prinzipiell für den Aufbau des Arms geeignet wäre. Aus mehreren Gründen werden diese dennoch nicht eingesetzt. Die maximalen Geschwindigkeiten der größten Module (PRL-120), die für die Gelenke 1-3 verwendet werden könnten, liegen bei etwa 4 $^{1}/_{\text{min}}$. Wie in Kapitel 4.5 gezeigt wird, werden für diese Gelenke jedoch Geschwindigkeiten von 20–25 $^{1}/_{\text{min}}$ benötigt. Ein weiterer Grund gegen ein kommerzielles System ist die Beschränkung des Zugriffs auf die Motorcontroller und somit der Verlust der Möglichkeit eigene Regelungen zu implementieren.

4.4 Konstruktive Umsetzung

Die Verwirklichung des Konzepts für die zweite Generation wird im Wesentlichen mit den gleichen Tools und Methoden wie bei der ersten Generation durchgeführt. Durch das modulare Konzept kann die Teilevielfalt reduziert werden. Um darüber hinaus auch eine schnelle und einfache Fertigung und Montage des Prototypen zu garantieren, wird hierauf bei der Konstruktion ein besonderes Augenmerk gelegt. Des weiteren werden Teile der Struktur mit Hilfe des Tools Optistruct von Hyperworks topologieoptimiert, um eine möglichst leichte, jedoch weiterhin steife Struktur zu erhalten.

4.4.1 Auswahl und Auslegung der Getriebe und Motoren

Die Konzeption der Module hat eine entscheidende Auswirkung auf die Auswahl der Motoren und Getriebe. Zum einen empfiehlt es sich, Motoren zu verwenden, die ohne Gehäuse, als Kit aus Rotor und Stator geliefert werden und somit einfacher an die Struktur eines Moduls angepasst werden können. Zum anderen ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Abmessungen, insbesondere

an den Innendurchmesser, wegen der innen liegenden Kabelführung und der Anordnung der Komponenten in dem Modul.

Durch das dynamische Modell, welches im Laufe des Projekts immer weiter verbessert wurde, und mit der Kinematik, die für die zweite Generation angepasst wurde, können gute Aussagen über die Kräfte und Momente getätigt werden, die in den einzelnen Gelenken des neuen Manipulators zu erwarten sind. Die Kurven, die in Abbildung 4.5 beispielhaft für das dritte Gelenk dargestellt sind, beruhen auf einer Simulation, die anhand von realen Trajektorien (die Positionen der Paprika wurden im Gewächshaus ermittelt) erstellt wurden. Auf der Basis von zehn repräsentativen Bewegungen (jeweils fünf zu Früchten auf der linken und fünf auf der rechten Gangseite), wurden die Profile für den Betrieb der Motoren und Getriebe erstellt.

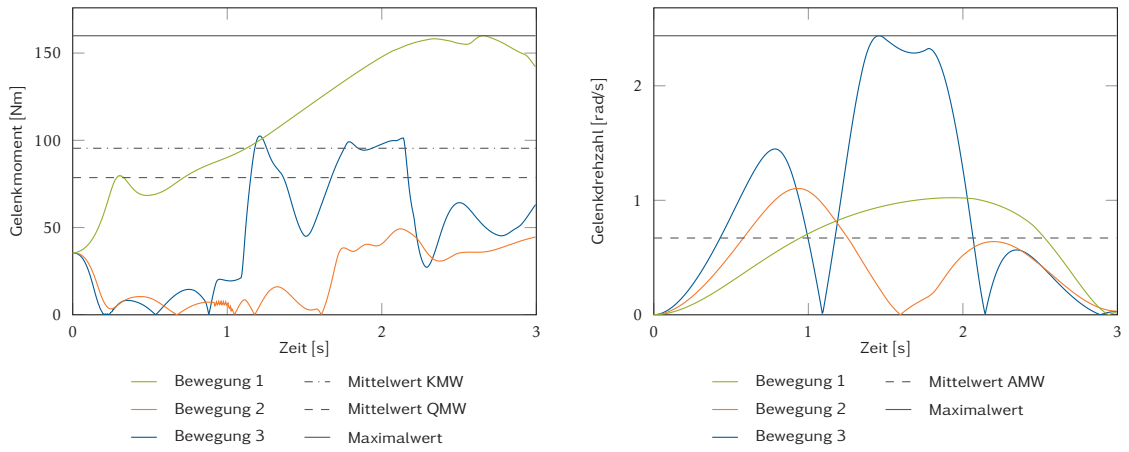
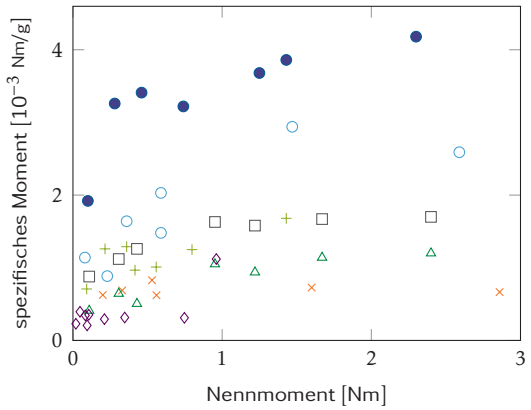


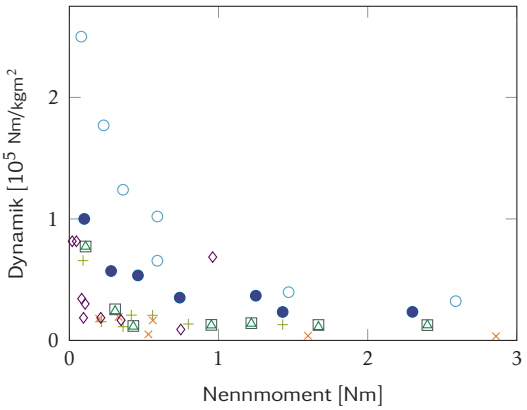
Bild 4.5: Momentenverlauf an der Abtriebsseite im dritten Gelenk bei drei unterschiedlichen Erntebewegungen (links); Drehzahl der gleichen Bewegungen an der Abtriebsseite (rechts)

Die Bestimmung der benötigten Motor- und Getriebeleistungen erfolgt analog zu der Auslegung für die erste Generation (vgl. Abschnitt 3.3.2 und 3.3.1). Die linke Seite der Abbildung 4.5 zeigt den Verlauf des Moments an der Abtriebsseite des dritten Gelenks für drei ausgewählte Bewegungen (zur besseren Übersicht sind nur drei der insgesamt zehn simulierten Bewegungen dargestellt). Für die Auswahl der geeigneten Komponenten werden die Mittelwerte QMW und KMW sowie die maximal auftretenden Momente berücksichtigt. Entsprechend werden die Drehzahlen, die auf der rechten Seite der Abbildung 4.5 dargestellt sind, anhand ihres Mittelwerts und des Maximums bei der Auslegung berücksichtigt. Die Momenten- und Drehzahlverläufe der restlichen Gelenke sind in Anhang C zu finden.

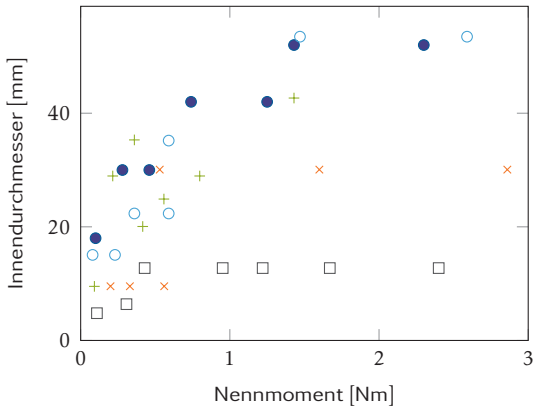
Um die Produkte verschiedener Hersteller auf ihre Eignung zu prüfen, wurden deren Motoren entsprechend der Ausführung aus Kapitel 3.3.2 miteinander verglichen. Neben den fünf Herstellern, die ihre Motoren in einer gehäuselosen Variante anbieten, wurden als Referenz die Motoren von MaxonMotor, die in der ersten Generation zum Einsatz kamen, sowie Motoren von der Firma Kollmorgen in einer Version mit Gehäuse evaluiert.



(a) Auf Masse normiertes Nennmoment über dem Nennmoment



(b) Auf Rotorträgheit normiertes Nennmoment über dem Nennmoment



(c) Innendurchmesser über dem Nennmoment

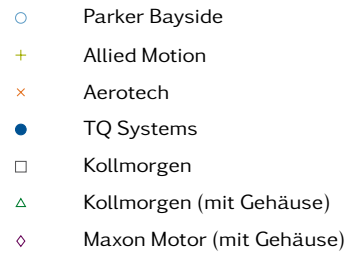


Bild 4.6: Vergleich verschiedener Motorhersteller anhand des spezifischen Nennmoments (*a*), der Dynamik (*b*) und des Innendurchmessers (*c*) der Motoren

In Abbildung 4.6*a* ist das auf die Masse normierte Nennmoment über dem Nennmoment dargestellt. Es ist sehr gut zu sehen, dass die Motoren von TQ Systems das größte Drehmoment bezogen auf ihr Gewicht bereitstellen. Die beste Dynamik, also ein hohes Moment bezogen auf die Rotorträgheit, bieten die Motoren von Parker Bayside (vgl. 4.6*b*). Durch ihre guten Werte eignen sich somit sowohl die Motoren von TQ Systems als auch von Parker Bayside besonders gut für eine Anwendungen in der Robotik. Ein weiteres ausschlaggebendes Kriterium, welches neben den reinen Leistungsdaten entscheidend für die Auswahl für einen Einsatz in dem Manipulator war, ist der Innendurchmesser der Rotoren. In Abbildung 4.6*c* ist dieser entsprechend der Nennmomente aufgetragen.

Wie zu erwarten war, sind die Motoren von MaxonMotor und Kollmorgen, die mit einem Gehäuse geliefert werden, den anderen Motoren in den untersuchten Kategorien teilweise deutlich unterlegen. Dies ist zum einen auf das zusätzliche Gewicht des Gehäuses sowie der Vollwelle zurückzuführen. Zum anderen ist der Einsatzbereich von Motoren der Firma MaxonMotor deutlich weiter gefasst und daher nicht so sehr auf die Anforderungen in der Robotik ausgerichtet. Durch den Wechsel von den Motoren der ersten Generation zu Antrieben ohne Gehäuse kann

Tabelle 4.1: Daten der Linearachse

Generation	Länge [mm]	Arbeitshub [mm]	Gewicht [kg] Linearachse[1]	Schlitten
1	1530	900	ca. 32	5,3[2]
2	1962	1100	66,6	6,5

[1] ohne Schlitten
[2] inklusive Gelenk 2

folglich eine spürbare Verbesserung der Leistung erreicht werden.

Die Motoren von TQ Systems und Parker Bayside sind jeweils sehr gut für die Anwendung geeignet. Da Motoren von Parker Bayside bereits im humanoiden Laufroboter LOLA ihre Arbeit verrichten, ist eine gewisse Erfahrung im Umgang mit den Motoren und ein Kontakt zur Firma am Lehrstuhl vorhanden. Dennoch wurde letztendlich die Entscheidung zu Gunsten von Motoren von TQ Systems gefällt. TQ Systems konnte auf Grund der geographischen Nähe einen schnellen Support und die fachgerecht Verklebung der Motoren in die von uns bereitgestellten Gehäuse gewährleisten.

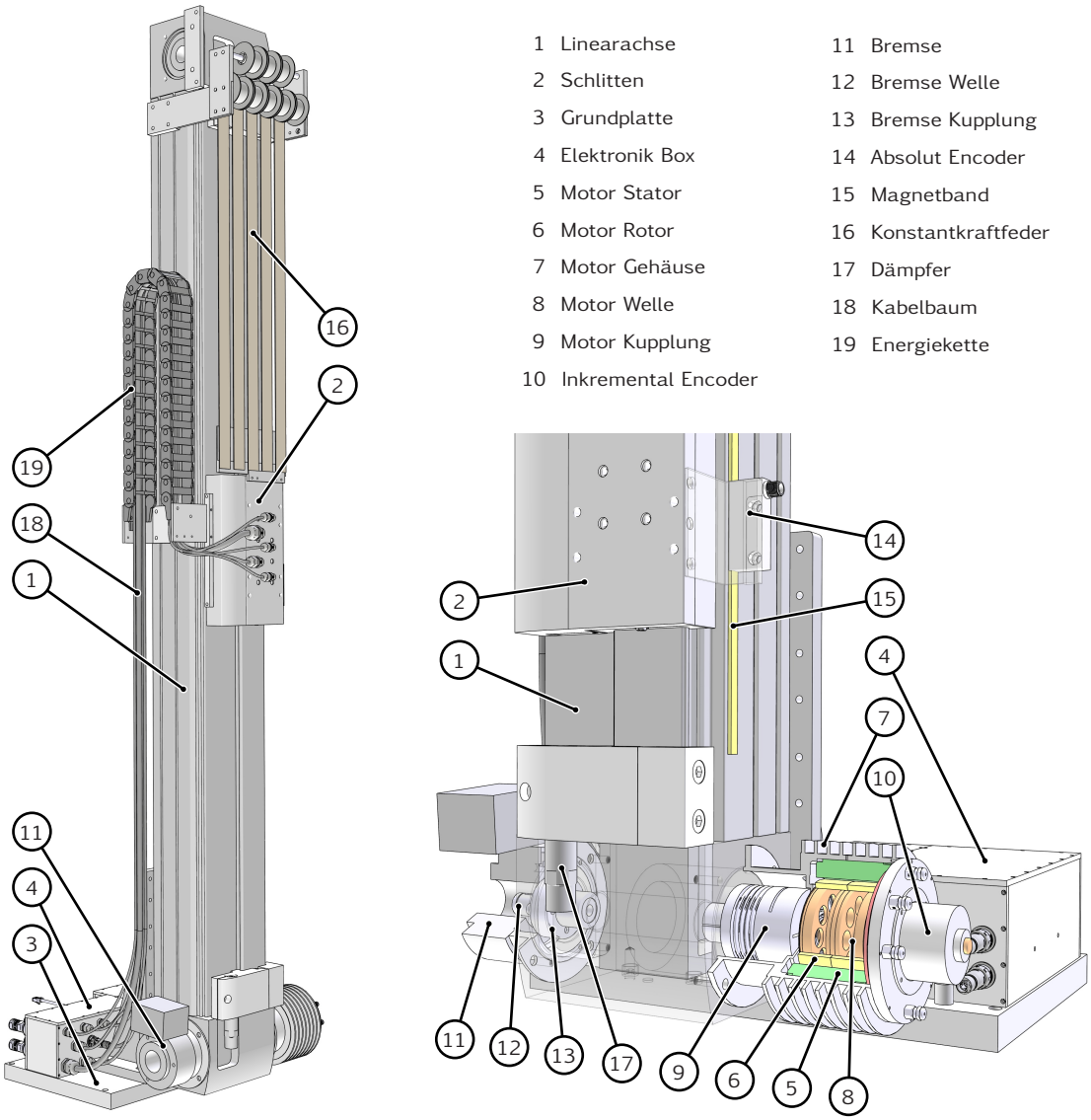
Da sich für die Getriebe durch das neue Konzept keine entscheidenden Änderungen ergeben haben, kommen wie gehabt Produkte der Firma Harmonic Drive zum Einsatz. Die Auswahl der Baureihe ist neben den Leistungsdaten auch hier vor allem von dem benötigten Innendurchmesser abhängig. Anhand der simulierten Belastungen wurden für das mittlere und kleine Modul Getriebe der Serie CSD, für die großen Module der Serie CPL gewählt.

Die Untersetzungen der Getriebe können entsprechend der Anforderungen an jedes Gelenk individuell (im Rahmen der verfügbaren Untersetzungen) angepasst werden.

4.4.2 Linearachse

Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, wurde die Linearachse der ersten Generation selbst entwickelt. Da diese zwar leicht war, aber nicht die gewünschte Steifigkeit aufwies, wurde entschieden, für die zweite Generation eine kommerzielle Linearachse zu verwenden. Es gibt mehrere Hersteller, die Linearführungen mit sehr ähnlichen Eigenschaften anbieten. Da die Firma Festo am CROPS Projekt beteiligt ist und geeignete lineare Führungen im Sortiment hat, wurde eine entsprechende Achse des Typs EGC-185-TB (Festo, 2013) verwendet. In Tabelle 4.4.2 sind die Eigenschaften der Linearführungen der beiden Generationen gegenübergestellt. Deutlich ist der Unterschied im Gewicht der Achsen zu sehen. Darüber hinaus wurde die Achse von Festo etwas länger gewählt, so dass sie auch einen höheren Arbeitshub bietet.

In Abbildung 4.7 ist die Linearachse (1) im eingebauten Zustand zu sehen. Sie ist durch zwei stabile Aluminiumwinkel an der Grundplatte (3) befestigt. Hinter der Achse befindet sich eine abgedichtete Box, in der sich die Motorsteuerung, ein Cello der Gold Serie (vgl. Kapitel 4.6.1) mit 35 A von Elmo, Stromverteilung und Steuerung der Bremse befinden. Sowohl der Anschluss an das Steuer-Rack, als



(a) Linearachse (b) Grundplatte mit Elektronik

Bild 4.7: Linearachse der zweiten Generation

auch die Weiterführung der Kabel (18) zum Manipulator erfolgen über gedichtete Stecker. Der Kabelbaum wird über eine Energiekette (19) an den Schlitten (2) geleitet. Dieser, und somit auch der gesamte Arm, ist mit mehreren Konstantkraftfedern (KKFs) (16) an der Linearachse befestigt. Die Federn wurden in der ersten Generation erfolgreich als Gewichtsausgleich getestet und sind nun von Anfang an in die Konstruktion integriert.

Abbildung 4.7*b* zeigt eine Detailansicht des Antriebs des ersten Gelenks. Wie in den vorangegangenen Manipulatoren wird der Motor der Größe 115 (5), (6) der Firma TQ Systems verwendet. Der Motor ist in einem eigenen Gehäuse (7) gelagert, welches an dem Endstück der Linearachse verschraubt wird. Die Anbindung der Welle (8) an die Eingangseite der Linearachse findet über eine Balgkupplung (9) des Typs BK7 der Firma R+W Kupplungen statt. Wie bisher wird ein Encoder

Tabelle 4.2: Leistungsdaten der drei Modulgrößen

Größe	Untersetzung ratio	Max. Geschwindigkeit [1/min]	Drehmoment [Nm] Nominal	Max.
Groß	**50**	**60**	**71.5**	**216**
	80	37,5	114.4	304
	100	**30**	**143**	**333**
	120	25	172	353
	160	19	216	372
Mittel	50	100	14	39
	100	**50**	**28**	**57**
	160	31	34	64
Klein	50	170	4.8	12
	100	**85**	**7.7**	**19**

(10) der Firma Baumer verwendet, um die Position des Motors zu messen. Zur Sicherheit ist auch weiterhin eine Bremse (11) von der Firma Binder verbaut. Diese befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite des Motors und wird durch eine separate Welle (12) mit einer Kupplung (13) an die Linearachse angeschlossen. Die Erfassung der absoluten Position des Schlittens erfolgt durch den linearen Absolutencoder TTK70 der Firma Sick. Dieser besteht aus einem Lesekopf (14), der an dem Schlitten angebracht ist, und einem magnetischem Maßband (15), welches an der Struktur der Achse befestigt ist.

4.4.3 Antriebsmodule

Die Module wurden in drei verschiedenen Größen entwickelt (groß, mittel und klein). Die Auslegung basiert, wie schon in Kapitel 4.4.1 beschrieben, auf möglichst realitätsnahen Trajektorien. Die Belastungen, die in den Gelenken 2 bis 4 auftreten, sind die höchsten, daher kommen hier die großen Module zum Einsatz. Die mittleren Module werden für die Gelenke 5 und 6 verwendet. Die letzten drei Gelenke sind am wenigsten belastet und werden durch die kleinen Module realisiert.

Tabelle 4.2 stellt alle möglichen Konfigurationen der drei Modulgrößen dar. Diese Variationen werden durch die Änderung der Untersetzung der Getriebe erreicht. Die tatsächlich verwendeten Kombinationen sind fett dargestellt. Die Maße und das Gewicht der Module können Tabelle 4.3 entnommen werden. Das kleine Modul wurde in zwei Ausführungen hergestellt (sowohl mit einer, als auch mit zwei Achsen). Das grundsätzliche Konzept, wie es in Abbildung 4.4 dargestellt ist, ändert sich dabei nicht. Wegen des knapp bemessenen Bauraums werden jedoch die Gehäuse zweier Gelenke zu einem gemeinsamen Gehäuse zusammengefasst. Der genaue Aufbau der einzelnen Modulgrößen wird folgend beschrieben.

Tabelle 4.3: Maße und Gewicht der drei Modulgrößen

Größe	Maße [mm] Durchmesser/Breite x Höhe	Länge	Gewicht [kg]
Groß	146	175	4.293
Mittel	104.5	128	1.806
Klein (1 Achse)	86 x 105	128	1.13
Klein (2 Achsen)	94 x 138,5	137	1.67

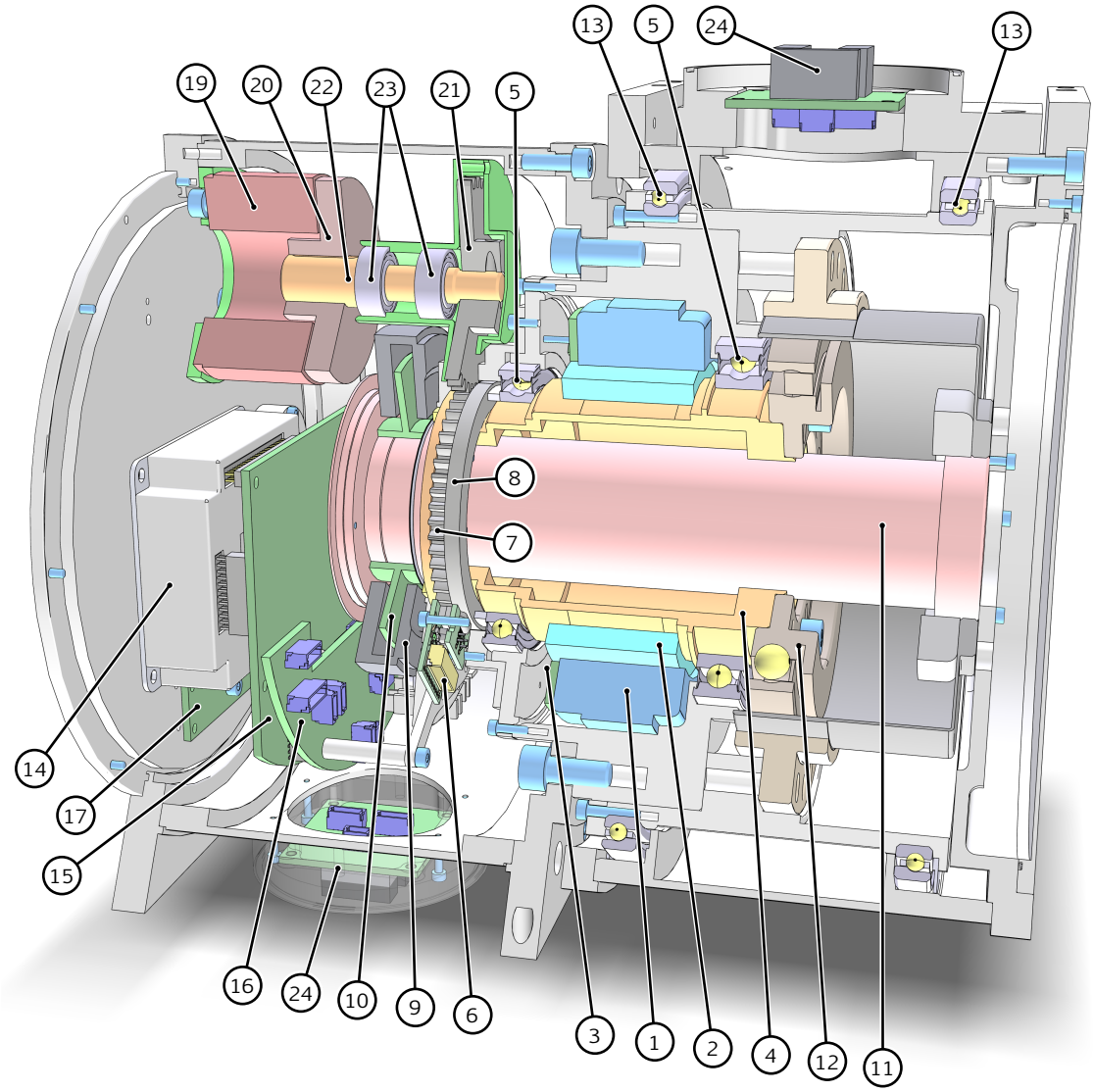
Modul Groß

Die am stärksten belasteten rotatorischen Gelenke des Manipulators sind die Gelenke 2 – 4. Vor allem die Gelenke 3 und 4, die den Arm gegen die Schwerkraft bewegen, benötigen leistungsstarke Antriebe. Das Gelenk 2 wird nicht ganz so hoch belastet, daher kann eine niedrigere Untersetzung gewählt werden, was gleichzeitig höhere Geschwindigkeiten ermöglicht (siehe Anhang Kapitel C für genaue Angaben zu den benötigten Momenten und Drehzahlen). Somit ergeben sich zwei unterschiedliche Konfigurationen, in denen das große Modul gebaut wird. Bei der Konstruktion müssen keine Änderungen vorgenommen werden, da sich die Maße der Getriebe für unterschiedliche Untersetzungen nicht verändern.

Der genaue Aufbau der Antriebseinheit kann der geschnittenen Ansicht aus Abbildung 4.8 entnommen werden. Der Rotor (2) des Motors der Firma TQ Systems (Größe 85x13) ist auf der Motorwelle (4) verklebt, welche im Gehäuse über zwei Rillenkugellagern (5) gelagert ist. Die Welle ist direkt mit dem Wavegenerator des HD (12) der Serie CPL verschraubt. Der Circular Spline des Getriebes sowie der Stator des Motors (1) sind mit der Antriebsseite des Gelenks verschraubt. Der Flexspline sitzt an der Abtriebsseite und sorgt somit für die Kraftübertragung von An- zu Abtriebsseite.

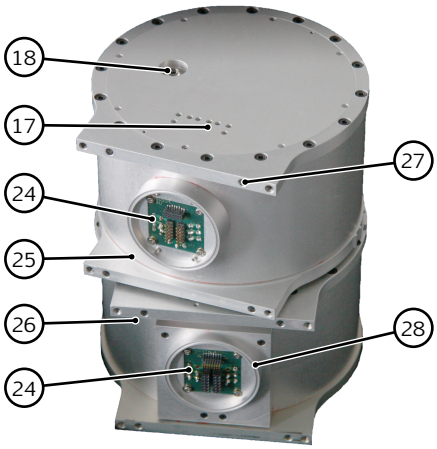
Die genaue Position der Abtriebsseite in Bezug auf die Antriebsseite kann mit dem absolut Encoder DS-70 der Firma Netzer gemessen werden. Der Encoder (9) ist an der Antriebsseite befestigt, wohingegen die Encoderscheibe (10) über die Hohlwelle (11) mit der Abtriebsseite verbunden ist. Die Initialisierung des Motors erfolgt durch einen Hall-Sensor (3), der an dem Motor verklebt ist. Die Messung der Position wird durch einen Encoder (6) der Firma Sensitec (siehe Kapitel 4.5.1 für eine genauere Beschreibung) durchgeführt. Als Maßscheibe für die Erfassung der Position wird ein Zahnrad (7) verwendet, für den Indexpuls eine Scheibe (8) mit einer einzelnen Kerbe. Neben der Verwendung als Encoderscheibe wird das Zahnrad auch für die Anbindung der Permanentmagnetbremse genutzt. Diese ist über ein weiteres Zahnrad (21), das in einem zusätzlichem Gehäuse gelagert ist (23), mit der Motorwelle verbunden. Die Bremse besteht aus einem Rotor (20), der sich auf der Zahnradwelle (22) befindet und einem Stator (19), der über eine zusätzliche Halterung am Gehäuse befestigt ist.

Die Motor-Elektronik wird auf dem Deckel befestigt. Sie besteht aus der Motorsteuerung (14) von Elmo (Whistle Gold, 20 A), der Anschlussplatine der Motorsteuerung (15), einem Board mit Status LEDs (17) und einer USB Buchse (18), die



1	Motor Stator	9	Absolut Encoder	17	Status LEDs
2	Motor Rotor	10	Absolut Encoder Scheibe	18	USB Verbindung
3	Motor Hall Sensor	11	Hohlwelle	19	Bremse Stator
4	Welle Motor	12	Harmonic Drive	20	Bremse Rotor
5	Lagerung Motor	13	Lagerung Abtriebsseite	21	Zahnrad Bremse
6	Inkremental Drehgeber	14	Motorsteuerung	22	Welle Bremse
7	Drehgeber Scheibe	15	Platine Motorsteuerung	23	Lagerung Bremse
8	Drehgeber Index Scheibe	16	Platine Modul	24	Platine Schnittstelle

Bild 4.8: Explosionsansicht des großen Moduls



17 LED Statusleuchten
18 USB Anschluss
24 Elektrisches Interface
25 Antriebsseite
26 Abtriebsseite
27 Löcher für Passstifte
28 Nut für O-Ringe

Bild 4.9: Ansicht der Verbindung auf Modulseite beispielhaft für das große Modul

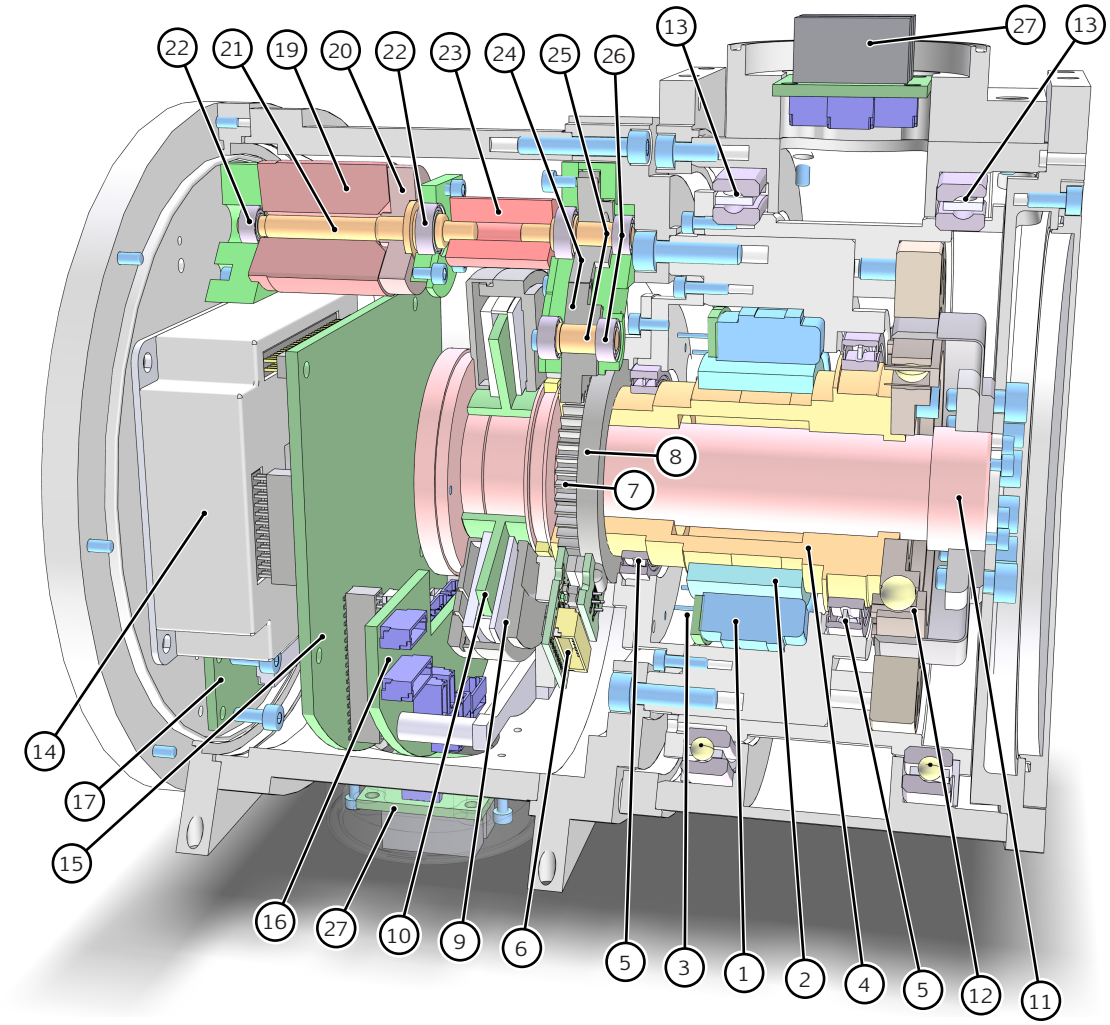
eine direkte Verbindung[2] zum Motorcontroller erlaubt und damit zur Inbetriebnahme oder bei Störungen des Gelenks genutzt werden kann. Die Verbindung der Elektronik mit dem Modul erfolgt über eine weitere gehäuseseitige Platine (16). Eine detailliertere Beschreibung der Elektronik findet sich in Kapitel 4.6.1. Die elektrischen Interfaces zu dem vorhergehendem und dem nachfolgendem Element werden über zwei Platinen (24) realisiert. Die Lagerung der Abtriebsseite erfolgt über zwei Dünnringlager (13). Die Schrägkugellager sind hierfür in einer O-Anordnung in dem Gehäuse eingebaut, um eine hohe Stabilität für die nachfolgenden Gelenke zu gewährleisten.

Abbildung 4.9 zeigt die Seitenansicht eines großen Moduls. Neben der An- und der Abtriebsseite (25), (26) sind auch die beiden Interfaces zu sehen. Die Verwendung von Passstiften (27) ermöglicht zum einen die Übertragung von hohen Kräften, zum anderen werden sie als Führung für das Anbauen eines Zwischenelements verwendet. Die Fixierung erfolgt über Schrauben. Die elektrische Verbindung (24) wird beim Aufsetzen eines Gegenstücks automatisch hergestellt. Die O-Ringe (28) sorgen für eine vollständige Dichtung der Gelenke.

Modul Mittel

Konzeptbedingt ist der Aufbau des mittelgroßen Moduls kaum von dem des großen Moduls zu unterscheiden. Die Komponenten wurden entsprechend der niedrigeren Leistung, für die die Einheit ausgelegt ist, angepasst. In der Explosionsansicht (Abbildung 4.10) wird die Anordnung der einzelnen Bauteile dargestellt. Der Motor (1), (2) besitzt die Größe 50x21, das Getriebe (8) ist ein HD aus der Reihe CSD mit der Größe 20. Die Encoder (9), (10) bzw. (6) sind von der Firma Netzer bzw. Snesitec (eine genaue Beschreibung ist in Abschnitt 4.5 zu finden). Die Elektronik, unter anderem der Elmo Whistle (14) der Gold Reihe mit 10 A befindet sich auf einem abnehmbaren Deckel. Die Bremse (17), (18) ist von der Firma Kendrion.

2 Über den USB-Anschluss ist ein direkter und vollständiger Zugriff auf den Motorcontroller möglich



1	Motor Stator	10	Absolut Encoder Scheibe	19	Bremse Stator
2	Motor Rotor	11	Hohlwelle	20	Bremse Rotor
3	Motor Hall Sensor	12	Harmonic Drive	21	Welle Bremse
4	Welle Motor	13	Lagerung Abtriebsseite	22	Lagerung Bremse
5	Lagerung Motor	14	Motorsteuerung	23	Kupplung
6	Inkremental Drehgeber	15	Platine Motorsteuerung	24	Zahnrad Anbindung
7	Drehgeber Scheibe	16	Platine Modul	25	Welle Anbindung
8	Drehgeber Index Scheibe	17	Status LEDs	26	Lagerung Anbindung
9	Absolut Encoder	18	USB Verbindung	27	Platine Schnittstelle

Bild 4.10: Geschnittene Ansicht des mittleren Moduls

Einen wesentlichen Unterschied gibt es bei der Anbindung der Bremse. Diese ist ander als bei der großen Variante nicht mit einem, sondern über zwei Zahnradstufen (24) realisiert. Dies ist erforderlich, da der Abstand zwischen der Motorwelle (4) und der Welle der Bremse (21) so groß ist, dass ein ausreichend großes Zahnrad einen zu großen Bauraum hat. Des Weiteren ist die Bremse über eine Kupplung (23) von der Motorseite trennbar und befindet sich in einem eigenen Gehäuse. Durch diesen Aufbau kann der vorgegebene Abstand zwischen Stator (19) und Rotor (20) einfacher vor dem Zusammenbau des Moduls eingestellt werden. Die Bremse ist auf dem Moduldeckel befestigt und wird beim Schließen des Moduls mit der

Kupplung verbunden.

Modul Klein

Das Handgelenk des Manipulators besteht aus drei Achsen, die jeweils durch ein kleines Modul realisiert werden sollen. Wegen der Ausrichtung der Achsen und des knappen Konstruktionsraums wurde entschieden, die letzten zwei Gelenke in einem Gehäuse unterzubringen. Dennoch wird der grundsätzliche Aufbau der Gelenke beibehalten.

In Abbildung 4.11 ist ein Schnitt des kleinen Moduls mit einer Achse zu sehen. Die Anordnung der wesentlichen Komponenten vom Motor (1) – (5) über Getriebe (8) zu Bremse (19) – (26) sowie des inkrementellen (6), (7), (11) und absoluten Encoders (12), (13) entsprechen dem Konzept aus Abbildung 4.4. Die Motor-Elektronik (14) befindet sich zusammen mit dem USB-Anschluss (18) und den Statusleuchten[3] auf dem Deckel des Gehäuses und kann zusammen mit diesen abgenommen werden. Die Verbindung der Elektronik wird durch zwei Platinen (eine im Gehäuse (16) sowie der Platine des Elmos (15)) hergestellt. Der Anschluss zu den Gelenken vor und hinter dem Modul wird über die Schnittstelle (27) realisiert[4].

Abbildung 4.12 zeigt einen Schnitt des Moduls mit zwei Achsen (1), (2). Der Aufbau der Gelenke entspricht der Version mit einer Achse, lediglich das Gehäuse (3) ist so angepasst, dass beide Achsen aufgenommen werden können. Die Motorsteuerungen (6), (7) mit den dazugehörigen Platinen (8), (9) können mit den Deckeln (4) und (5) abgenommen werden. Die Gegenstücke (10) , (11) sind in dem Gehäuse verschraubt. Die elektrische Verbindung der beiden Gelenke über die normalerweise verwendeten Schnittstellen ist nicht notwendig. Die beiden internen Platinen werden direkt miteinander verbunden, wodurch weiterer Bauraum eingespart werden kann[5]. Eine Schnittstelle zu einem Gelenk nach der Achse 2 (2) ist nicht vorgesehen, könnte jedoch nachgerüstet werden.

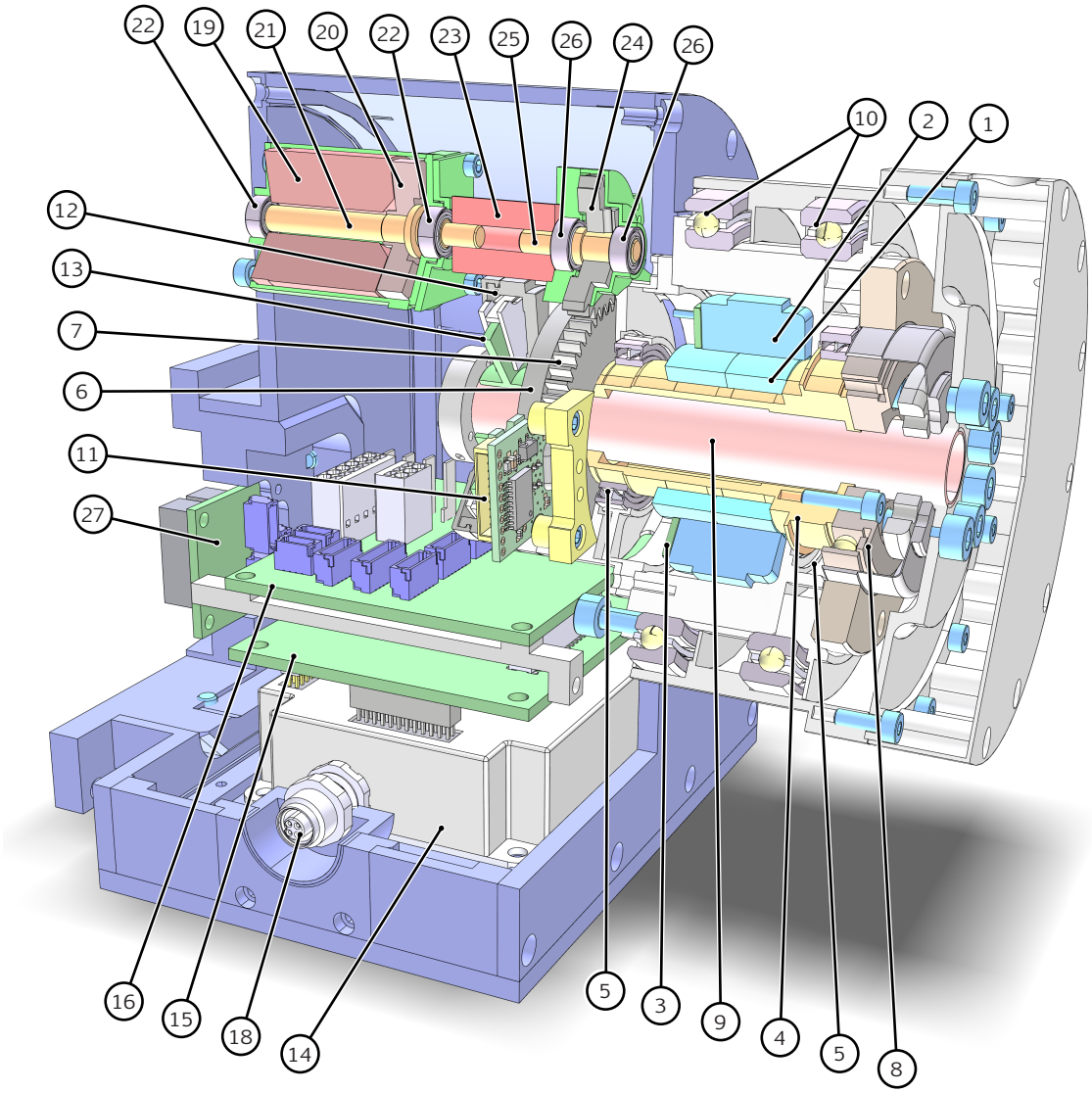
4.4.4 Zwischenstücke

Um aus einzelnen Gelenken einen vollständigen Manipulator zusammen zu fügen werden zusätzliche Elemente benötigt, die die Gelenke miteinander verbinden. Durch die Form dieser Elemente kann die Kinematik des Roboters individuell angepasst werden. Die hier dargestellten Segmente werden verwendet, um die Kinematik, die in Kapitel 4.2.1 erarbeitet wurde, zu verwirklichen. Die Zwischenstücke haben dabei mehrere Aufgaben zu erfüllen. Wie erwähnt, müssen die Elemente derart gestaltet sein, dass sich nach dem Verbinden mit den Modulen die geforderten Abstände und Ausrichtungen zwischen den Achsen ergeben. In Abbildung 4.13*a* ist das Element zu sehen, welches die Gelenke 2 und 3 miteinander verbindet. Die beiden Endstücke (4) zeigen in die gleiche Richtung, sind jedoch

3 befinden sich auf der Rückseite der Abbildung

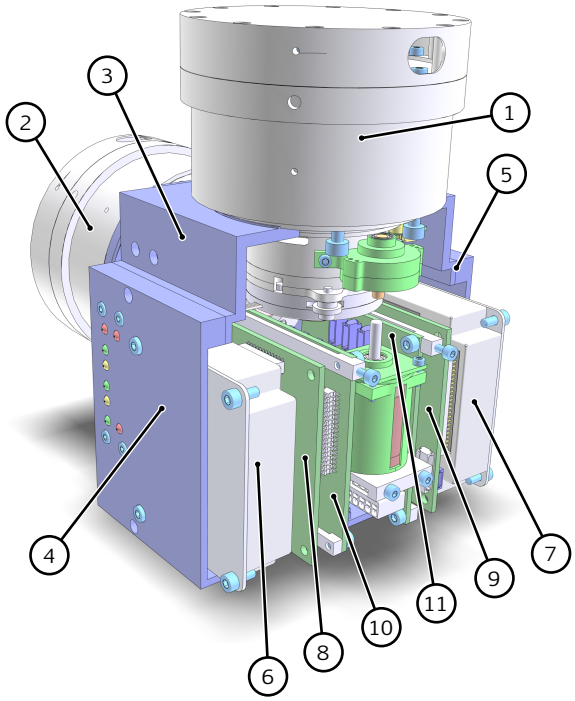
4 Die zweite Schnittstelle wird mit einem zusätzlichen Bauteil, welches in der Schnittzeichnung nicht dargestellt ist, auf die Abtriebsseite aufgesetzt

5 Die Schnittstelle zu dem vorangehenden Gelenk ist nicht dargestellt. Sie wird an der Achse 1 (1) über ein weiteres Bauteil angebracht



1	Motor Rotor	10	Lagerung Abtriebsseite	19	Bremse Stator
2	Motor Stator	11	Inkremental Encoder	20	Bremse Rotor
3	Motor Hall Sensor	12	Absolut Encoder	21	Bremse Welle
4	Motor Welle	13	Absolut Encoder Scheibe	22	Bremse Lagerung
5	Motor Lagerung	14	Elmo Motorsteuerung	23	Bremse Kupplung
6	Encoder Index Ring	15	Elmo Platine	24	Bremse Zahnrad
7	Encoder Zahnrad	16	Gelenk Zwischenplatine	25	Bremse Zahnrad Welle
8	Harmonic Drive	17	Status LEDs	26	Bremse Zahnrad Lagerung
9	Hohlwelle	18	USB Anschluss	27	Platine Schnittstelle

Bild 4.11: Geschnittene Ansicht des kleinen Moduls mit einer Achse



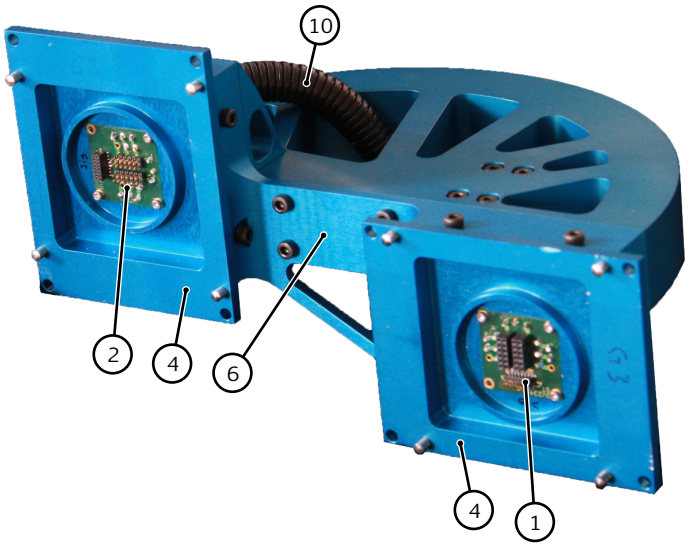
1	Achse 1	5	Deckel Elektronik 2	9	Platine Motorsteuerung 2
2	Achse 2	6	Motorsteuerung 1	10	Platine Gelenk 1
3	Gemeinsames Gehäuse	7	Motorsteuerung 2	11	Platine Gelenk 2
4	Deckel Elektronik 1	8	Platine Motorsteuerung 1		

Bild 4.12: Geschnittene Ansicht des kleinen Moduls mit zwei Achsen

um 90° zueinander verdreht. Die Struktur (6) verbindet die beiden Schnittstellen miteinander und muss die Kräfte und Momente, die zwischen den beiden Gelenken wirken, übertragen. Auf Grund der Ausrichtung der beiden Schnittstellen und der hohen Belastungen, die in diesem Teil des Manipulators wirken, wurde die Struktur topologieoptimiert (siehe Kapitel 4.4.4). Die Kraftübertragung findet über vier Passstifte (9) statt, die gleichzeitig als Führung für eine einfache und sichere Montage dienen. Fixiert werden die Gelenke mit Hilfe von Schrauben (8) an den Zwischenstücken.

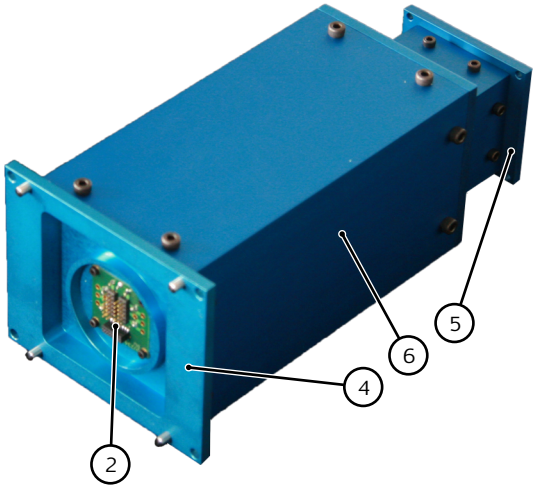
Neben der mechanischen Verbindung werden auch der Strom und die Datenbusse über die Zwischenstücke übertragen. Die Verbindung findet über je eine Platine für die Antriebsseite (1) und die Abtriebsseite (2) statt. Um die Elektronik vor Nässe und Schmutz zu schützen, werden die Kabel, da wo sie nicht innerhalb der Struktur verlegt werden können, durch einen gedichteten Kabelkanal (10) geleitet. Um auch die Schnittstelle zu den Modulen zu dichten, befindet sich an den Zwischenstücken die entsprechende Gegenfläche (7) zu den O-Ring-Nuten an den Modulen (vgl. Abb. 4.9).

In Abbildung 4.13*b* und 4.13*c* sind zwei Elemente zur Verbindung zwischen einem großen und einem kleinen Modul (*b*) bzw. zwischen zwei kleinen Modulen (*c*) dargestellt. Der einfache Aufbau mit Rechteckprofilen erlaubt eine stufenlose Anpassung der Länge eines solchen Elements. Alle Übergänge zwischen den einzelnen Bestandteilen der Zwischenstücke sind mit einer Flächendichtung versehen, was eine geschützte Führung der Kabel im Inneren der Elemente erlaubt.

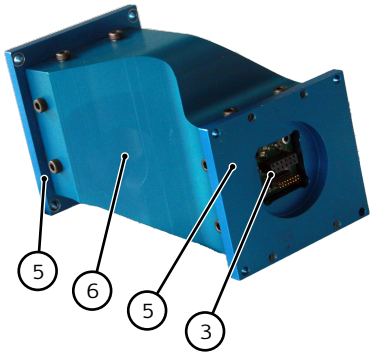


1 Platine AnS groß
2 Platine AbS groß
3 Platine AnS klein
4 Endstück groß
5 Endstück klein
6 Struktur
7 Gegenseite O-Ring
8 Löcher Verschraubung
9 Führungszapfen
10 Kabelkanal

(a) groß/groß



(b) groß/klein



(c) klein/klein

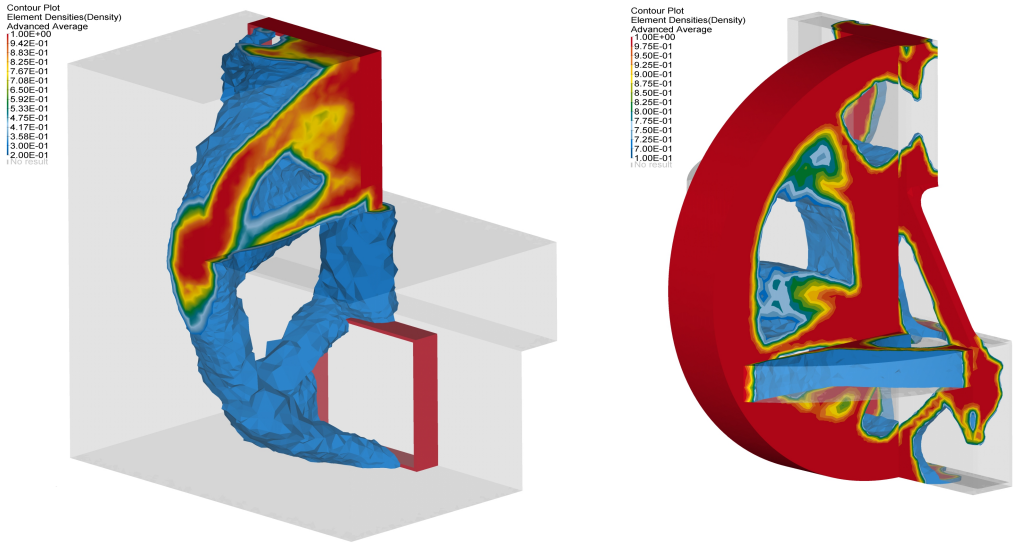
Bild 4.13: Zwischenstücke

Beim Übergang von einem großen zu einem kleinen Modul wird auf Grund des niedrigeren Leistungsbedarfs die Anzahl der Stromkabel reduziert. In Bild 4.13*c* sieht man exemplarisch eine Platine (3) für den Anschluss eines mittleren oder kleinen Moduls.

Topologieoptimierung

Die geraden Zwischenstücke (vgl. Abb. 4.13*b*) sind aus einfachen Vierkantprofilen aufgebaut. Die etwas aufwendigeren Teile, wie in Abbildung 4.13*a* oder 4.13*c*, bieten sich dagegen für eine Topologieoptimierung an, um das Gewicht der Konstruktion zu reduzieren.

Ein Finite-Elemente-Modell, basierend auf dem vorhandenen Bauraum, wurde entsprechend der dynamischen Belastungen in unterschiedlichen Bewegungen berechnet (vgl. Kapitel 4.4.1). Hierzu wurde die eine Seite des Bauteils fest einge-



(a) Größtmöglicher Bauraum (grau) und das Ergebnis der ersten Optimierung

(b) Optimierung eines fortgeschrittenen Modells, welches auf den Ergebnissen von vorhergegangenen Topologieoptimierungen beruht

Bild 4.14: Zwei Stufen der Topologieoptimierung des Elementes zwischen den Gelenken zwei und drei

spannt, die andere Seite mit mehreren Lastfällen beaufschlagt. Mit dem Solver Optistruct der Firma Altair, der für die Topologieoptimierung verwendet wurde, ist es möglich, als Optimierungsaufgabe die Minimierung der Masse unter Beachtung einer maximalen Spannung durchzuführen. Als weitere Nebenbedingungen wurden maximal zulässige Verschiebungen für einzelne Knoten vorgegeben.

Abbildung 4.14 zeigt zwei Zwischenschritte der Optimierung des Elements zwischen den Gelenken 2 und 3. Im linken Bild (4.14*a*) ist der ursprüngliche Optimierungsraum (grau) und das Ergebnis des Optimierungsschritts zu sehen. Die Farben von Blau bis Rot stellen die Dichte der finiten Elemente auf einer normierten Skala von 0 bis 1 dar. Für die Darstellung der relevanten Bereiche werden die Gebiete mit einer Dichte von weniger als 0,3 ausgeblendet, wodurch sich ein erster Anhaltspunkt für eine geeignete Geometrie ergibt. Das zweite Bild (4.14*b*) zeigt eine fortgeschrittene Optimierung des gleichen Bauteils. Die Ergebnisse eines Durchlaufs wurden dazu verwendet, eine neues Modell mit einem angepasstem Optimierungsraum zu erzeugen. Neben der Reduzierung der Bauteilmasse wurden bei der letzten Optimierung Kriterien für die Fertigung des Bauteils berücksichtigt, um zum Beispiel eine Bearbeitung mit der CNC-Fräse zu ermöglichen. Das fertige Bauteil ist in Abbildung 4.13*a* zu sehen.

4.5 Sensorik

Die Sensorik der Gelenke besteht aus einem inkrementellen Encoder auf der Antriebsseite und einem absoluten Encoder auf der Abtriebsseite. Mit dieser

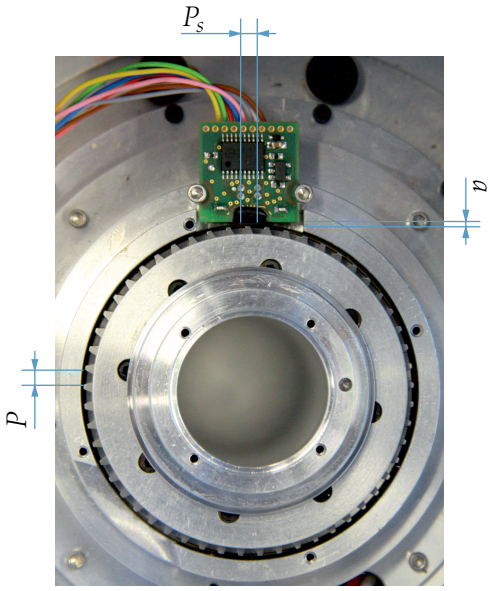


Bild 4.15: Inkrementeller Encoder mit Zahnrad im eingebauten Zustand (großes Modul); a - Abstand zwischen Encoder Modul und Zahnrad, P - Zahnteilung, P_s - Teilung am Sensor

Kombination kann der Motor wie bei der ersten Generation geregelt werden. Zusätzlich kann die genaue Position der Abtriebsseite zu jeder Zeit bestimmt und die Verdrehung des Gelenks gemessen werden.

4.5.1 Inkrementelle Encoder

Der Aufbau der Module setzt einen Motorencoder voraus, der eine Hohlwelle besitzt. Darüber hinaus sollte er einen sehr kleinen Bauraum haben und eine hohe Auflösung bieten. Die Firma Sensitec GmbH (Sensitec, 2011) bietet Sensoren, die den magnetoresistiven Effekt nutzen, um die Zähne von Zahnrädern zu erkennen. Der mit einem passenden Zahnrad kombinierte Sensor (EBR7811) kann somit als Encoder verwendet werden.

Die Auflösung ergibt sich aus einem internen Interpolationsfaktor und der Zähnezahl. Bei einem Interpolationsfaktor von 100 können mit einer 4-fach Auswertung 400 Flanken pro Zahn aufgelöst werden. Mit einer Zähnezahl von 53 ergibt sich eine Strichzahl von 21200 (siehe Tabelle 4.4). Die Sensoren werden mit einer festen Teilung P_s, gemessen am Sensor, ausgeliefert. Diese entspricht der Zahnteilung P des Zahnrads auf den Sensor projiziert. Der Abstand a des Sensors zu dem Kopfkreis D_a des Zahnrads ist entscheidend für die Berechnung. Die ideale Zähnezahl z und der Abstand zwischen Zahnrad und Sensor können mit dem Zahnradmodul m gemäß (4.1) und (4.2) bestimmt werden.

$$P_s = \frac{(D_a + a)\pi}{z} \tag{4.1}$$

$$a = \frac{mz}{p} \tag{4.2}$$

Der Faktor p beschreibt die Zahnstruktur. Bei einer Evolventen-Verzahnung wird dieser mit dem Wert 5 angegeben.

Der Antrieb der Linearachse wird mit dem gleichen Drehgeber betrieben, der in der ersten Manipulator-Version (vgl. Abschnitt 3.4.1) verwendet wurde.

Tabelle 4.4: Übersicht der Gelenke mit Inkrementaldrehgebern

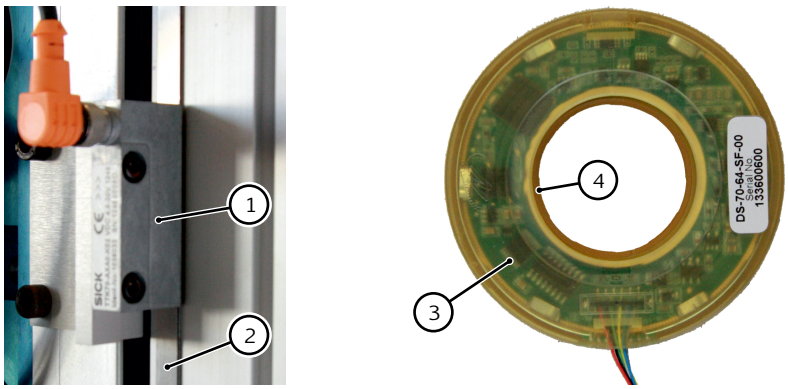
Gelenk	Encoder Bezeichnung	Striche	Untersetzung	Auflösung Abtriebsseite [°][1]
1[2]	Baumer BHG	160.000	232	$3{,}62 \cdot 10^{-4}$
2	Sensitec EBR7811QBL	21.200	50	$3{,}4 \cdot 10^{-4}$
3 – 4	Sensitec EBR7811QBL	21.200	100	$1{,}7 \cdot 10^{-4}$
5 – 9	Sensitec EBR7811PBL	21.200	100	$1{,}7 \cdot 10^{-4}$

[1] Theoretische Auflösung an der Abtriebsseite der Gelenke
[2] Linearachse: Untersetzung entspricht Umrechnungsfaktor von rotatorischer in lineare Bewegung [mm]/[Umdrehung]; Auflösung in [mm]

4.5.2 Absolutencoder

Die Absolutencoder der Gelenke unterliegen den gleichen Anforderungen wie die übrigen Komponenten. Hochwertige Encoder mit einer hohen Auflösung und einer großen Hohlwelle konnten von der Firma Netzer Precision Motion Sensors (Netzer, 2012) bezogen werden. Die unterschiedlichen Größen und Auflösungen können der Tabelle 4.5 entnommen werden.

Der Encoder für das große Modul ist in Bild 4.16*a* dargestellt. Er setzt sich aus einer Scheibe (4) und einem Lesekopf (3) zusammen. Der Lesekopf ist im Gehäuse auf der Antriebsseite befestigt. Die Scheibe sitzt auf der Hohlwelle, die an der Abtriebsseite befestigt ist (vgl. Kapitel 4.2.2). Die Encoder werden direkt an die Elmo Motorsteuerung angeschlossen und kommunizieren über das SSI-Protokoll. Das große und das mittlere Modul besitzen dafür eine interne Datenverarbeitung, wohingegen bei den Encodern für die kleinen Module eine zusätzliche Platine im Gehäuse untergebracht werden muss.



(a) Linearer Absolutencoder

(b) Rotatorischer Absolutencoder des großen Moduls

Bild 4.16: Linearer Absolutencoder der Firma SICK (1) mit magnetischem Maßband (2) (links) und rotatorischer Absolutencoder (3) inklusive Encoderscheibe (4) der Firma Netzer (rechts)

Der Absolutencoder für die Linearachse stammt von der Firma SICK AG (Sick, 2013) und ist in Bild 4.16*a* dargestellt. Er besteht aus einem Lesekopf (1) und

Tabelle 4.5: Übersicht der absoluten Encoder

Gelenk	Encoder Bezeichnung	Striche[2]	Auflösung [°]
1[1]	SICK TTK70	–	1
2 – 4	Netzer DS-70-SF-00	2^{17}	$2{,}75{\cdot}10^{-3}$
5 – 6	Netzer DS-58-20-SG-00-2	2^{18}	$1{,}37{\cdot}10^{-3}$
7 – 9	Netzer DS-37-16-DF-0	2^{17}	$2{,}75{\cdot}10^{-3}$

[1] Linearachse: Auflösung in [µm]
[2] Die Encoder mit einer Auflösung von 2^{18} Strichen für die Gelenke 2 – 4 und 7 – 9 konnten wegen Lieferprobleme nicht verbaut werden

einem Magnetband (2). Das Band wird an der Linearführung, der Lesekopf auf dem ersten Element befestigt.

4.6 Elektronik

Die Elektronik der zweiten Generation unterscheidet sich vom Aufbau her nicht von der der ersten Generation. Bei der Auswahl der Komponenten wurden allerdings Veränderungen vorgenommen, um die Leistung und die Benutzerfreundlichkeit des Manipulators zu steigern.

4.6.1 Motorsteuerung

Die Leistungselektronik für die einzelnen Motoren wird wie bei den früheren Prototypen von der Firma Elmo Motion Control bezogen. Die bisherigen Motorsteuerungen der SimpleIQ Reihe wurden jedoch durch Produkte der Gold Reihe ausgetauscht. Neben kleineren Änderungen auf die hier nicht eingegangen werden soll, sind vor allem zwei Unterschiede entscheidend für den Wechsel. Zum einen wird das EtherCAT Protokoll unterstützt, welches im nächsten Abschnitt weiter erläutert wird, zum anderen verfügen die Produkte der GoldLine über die Möglichkeit, mehrere Encoder parallel auszulesen. Dies ist durch das veränderte Manipulator-Konzept mit zusätzlichen absoluten Encodern notwendig geworden. Dabei ist es von Vorteil, beide Enocder eines Gelenks direkt über die Motorsteuerung einlesen zu können, ohne zusätzliche Hardware verwenden zu müssen. Die Feedback-Variante E der verwendeten Steuerungen erlaubt, simultan einen inkrementellen sowie einen absoluten Drehgeber einzulesen.

Abbildung 4.17 zeigt den Aufbau der elektronischen Systeme. An der Benutzerschnittstelle und der echtzeitfähigen Recheneinheit selbst hat sich zu Generation 1 nichts verändert. Der Unterschied liegt, wie bereits beschrieben, in der Anbindung der Motorcontroller. Diese sind nun mit einem einzelnen EtherCAT-Bus verbunden. Darüber hinaus stehen nun zwei zusätzliche Kanäle, ein CAN und ein Ethernet, zur Verfügung, um End-Effektoren oder eine anderer Peripherie anbinden zu können (vgl. Kapitel 5).

Die Leistungselektroniken der Gelenke setzen sich aus dem Typ Cello der Linearachse sowie dem Typ Whistle für die rotatorischen Gelenke zusammen. Die

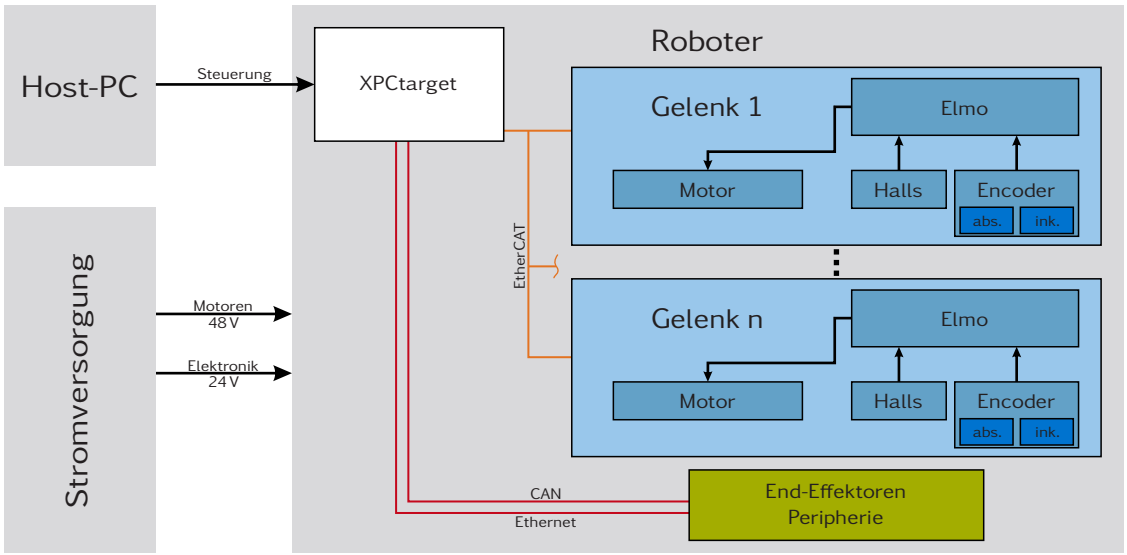
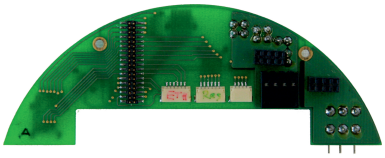


Bild 4.17: Schema des dezentralen Elektronikaufbaus der zweiten Generation

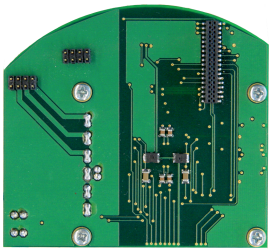
Motorsteuerung der vertikalen Achse befindet sich in einer gedichteten Box zusammen mit zusätzlich benötigten elektronischen Komponenten (vgl. Abb. 4.7*a*). Die Anschlüsse, z.B. für die Encoder oder den Motor, sind mithilfe von wasserdichten Buchsen an das Äußere der Box gelegt, um so eine einfache Verbindung zu ermöglichen. Bei den rotatorischen Gelenken gestaltet sich die Integration einfacher, da die Module als geschlossene Systeme entworfen wurden. Alle Module besitzen einen Deckel, der zu Wartungszwecken abgenommen werden kann, auf dem sich die Steuerung befindet. Um im eingebauten Zustand eine Verbindung zu dem Gelenk herzustellen, wurden zwei Platinen entwickelt, die miteinander verbunden werden können. Bild 4.18 zeigt auf der linken Seite die beiden Platinen. In Abbildung 4.18*b* ist die Platine zu sehen, die auf dem Motorcontroller befestigt wird. Auf ihr sind die Komponenten untergebracht, die für die Anschlüsse notwendig sind. Die tatsächlichen Buchsen für die Motorkabel, Encoder, Busse und den Strom befinden sich auf der zweiten Platine (4.18*a*). Die beiden Platinen werden bei der Montage des Deckels ineinander gesteckt. In Abbildung 4.18*c* sind die Platinen (3) / (4) im zusammengebauten Zustand zu sehen. Des weiteren kann man erkennen, wie die eine Platine auf dem Controller (1) befestigt ist. Daneben befindet sich eine weitere Leiterplatte (2), auf der die Status LEDs untergebracht sind. Sie ist fix zwischen der Controller-Platine und dem Deckel eingebaut. Die Leistungsdaten der Motorsteuerungen können der Tabelle in Anhang B entnommen werden.

4.6.2 Bussystem

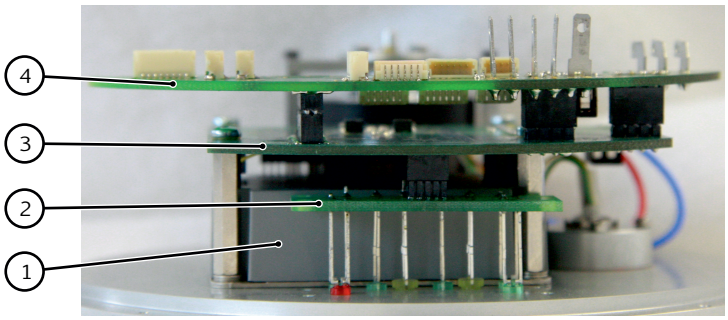
In der ersten Generation wurden ein bzw. mehrere CAN-Busse verwendet, um die Verbindung zu den Motorsteuerungen herzustellen. Hierfür waren drei parallele Busse notwendig bei einer Taktrate von 5 ms. Daher wurde, wie schon im Abschnitt zuvor beschrieben, auf Motorcontroller gewechselt, die das EtherCAT-Protokoll unterstützen. Das Protokoll, welches von der Firma Beckhoff entwickelt wurde, eignet sich besonders für Automatisierungsaufgaben, bei denen



(a) Platine Modul



(b) Platine Elmo



(c) Zusammengebaute Darstellung der Platinen

Bild 4.18: Individualisierte Platinen des großen Moduls; Platine der Motorsteuerung (*b*) / (3), das Gegenstück, welches im Modul befestigt ist (*a*) / (4) und eine Ansicht des zusammengesteckten Systems inklusive Elmo (1) und der Platine mit LEDs (2)

Echtzeitanforderungen bestehen.

„Die theoretische effektive Datenrate liegt durch Ausnutzung der Full-Duplex-Eigenschaft sogar bei über 100 MBit/s“ (EtherCAT Technology Group, 2014). Im Gegensatz zu dem bisher verwendeten CAN-Bus ist dies mindestens eine Verhundertfachung der Datenrate. Dadurch ist es ohne weiteres möglich, die Taktrate des Busse auf 1 kHz zu erhöhen und gleichzeitig mehr Daten (z.B. der Absolutsensoren) zwischen der zentralen Recheneinheit und den Motorcontrollern auszutauschen. Prinzipiell wäre hiermit auch eine Regelung auf der Stromebene[6] möglich, die zu einem späteren Zeitpunkt in den Manipulator integriert werden könnte.

4.7 Ergebnisse

Der Manipulator der zweiten Generation stellt den finalen Prototypen im Rahmen des Projekts dar. Auch wenn es keinen direkten Nachfolger geben wird, wurde eine Evaluation durchgeführt, um einen Vergleich zu den ersten Manipulatoren zu ziehen und Empfehlungen für ähnliche neue Projekte geben zu können.

4.7.1 Messungen der Module

Zwei der größten Veränderung gegenüber der ersten Generation sind der konsequente modulare Aufbau sowie die Absolutencoder auf der Abtriebsseite der Gelenke. Der Aufbau erlaubt es die Module unabhängig vom Gesamtsystem zu montieren und zu testen. Jörg Baur hat in Baur et al. (2014a) und Baur (2014) eine detaillierte Beschreibung der dynamischen Modellierung inklusive der Reibung

6 Zur Zeit findet Controller-intern eine Kaskadenregelung mit einer Taktzeit von 50 µs statt.

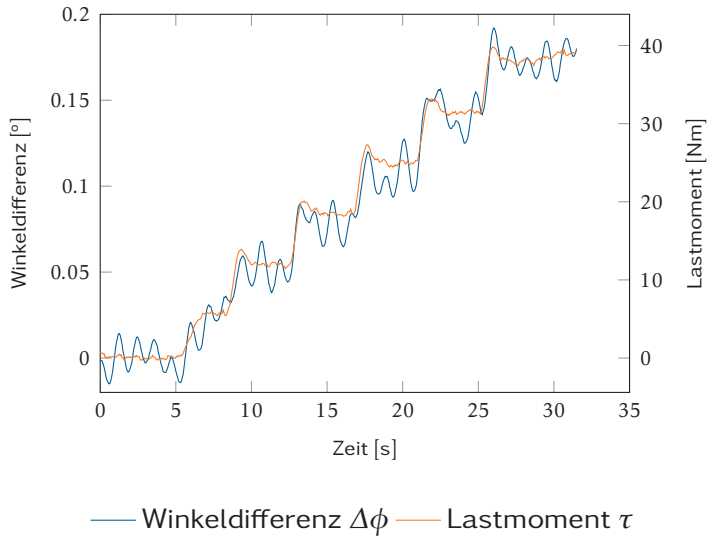


Bild 4.19: Messung der Modulsteifigkeit

innerhalb der Gelenke vorgestellt. Im folgenden soll daher die Möglichkeiten der Momentenmessung mit den Modulen untersucht werden.

Der Prüfstand für die Module besteht aus einer Aufnahme für die unterschiedlichen Modulgrößen. Über eine Kupplung ist ein Drehgeber an die Module angeschlossen, mit dem die genaue Position der Abtriebsseite bestimmt werden kann. Daran angeschlossen ist ein Momentensensor und schließlich eine Bremse mit der ein Lastmoment simuliert werden kann.

Auf Grund der Verdrehung und der Länge eines Stabs kann dessen Steifigkeit bestimmt werden. Da die Länge des Moduls konstant ist, kann diese bei der folgenden Betrachtung vernachlässigt werden. Somit kann durch die Verdrehung des Moduls, in diesem Fall durch die Messung der Differenz der Positionen des An- und Abtriebs $\Delta\phi$, sowie des gemessenen Moments τ die Steifigkeit des Moduls

$$c_{ges} = \frac{\tau}{\Delta\phi} \tag{4.3}$$

bestimmt werden. Durch den Aufbau des Prüfstands wird bei der so bestimmten Steifigkeit nicht nur das Modul, sondern die gesamte Strecke zwischen dem Motor und dem Drehgeber des Prüfstands inklusive der Kupplung am Prüfstand betrachtet. Die Steifigkeit des Moduls c_{mod} lässt sich daher mit der Steifigkeit der Kupplung c_{kup} durch

$$\frac{1}{c_{ges}} = \frac{1}{c_{mod}} + \frac{1}{c_{kup}} \tag{4.4}$$

berechnen (unter der Annahme, dass die Steifigkeit des Moduls konstant ist).

Umgekehrt kann nun im regulären Einsatz aus der Differenz der Position des Motor-Drehgebers und der des absoluten Drehgebers in Verbindung mit der Steifigkeit auf das Moment am Abtrieb geschlossen werden. Die theoretische Auflösung des Momentensensors RES_τ, die mit diesem Aufbau erreichbar ist,

ergibt sich aus der kleinsten Auflösung der beiden Encoder RES_{abs} und RES_{ink}, der Untersetzung des Getriebes n sowie der Steifigkeit c_τ zu

$$RES_\tau = min(RES_{abs}; RES_{ink} * n) * c_\tau. \tag{4.5}$$

Abbildung 4.7.1 zeigt beispielhaft die Verdrehung eines großen Moduls (inklusive Kupplung) auf dem Prüfstand bei einem Moment zwischen 0–40 Nm und einer Motorgeschwindigkeit von $10\,\mathrm{min}^{-1}$. Die Torsionssteifigkeit des Moduls ergibt sich aus der Messung zu etwa $c_{mod} = 100 \cdot 10^3\,\mathrm{Nm/Umdr.}$. Damit kann die theoretische Auflösung RES_τ zu $0{,}76\,\mathrm{Nm/Strich}$ errechnet werden.

4.7.2 Eigenschaften des Manipulators

Analog zu der Evaluierung der ersten Generation wurde auch für den finalen Manipulator der Arbeitsraum sowie die Genauigkeit der Position des TCP und die Wiederholgenauigkeit bestimmt.

Arbeitsraum

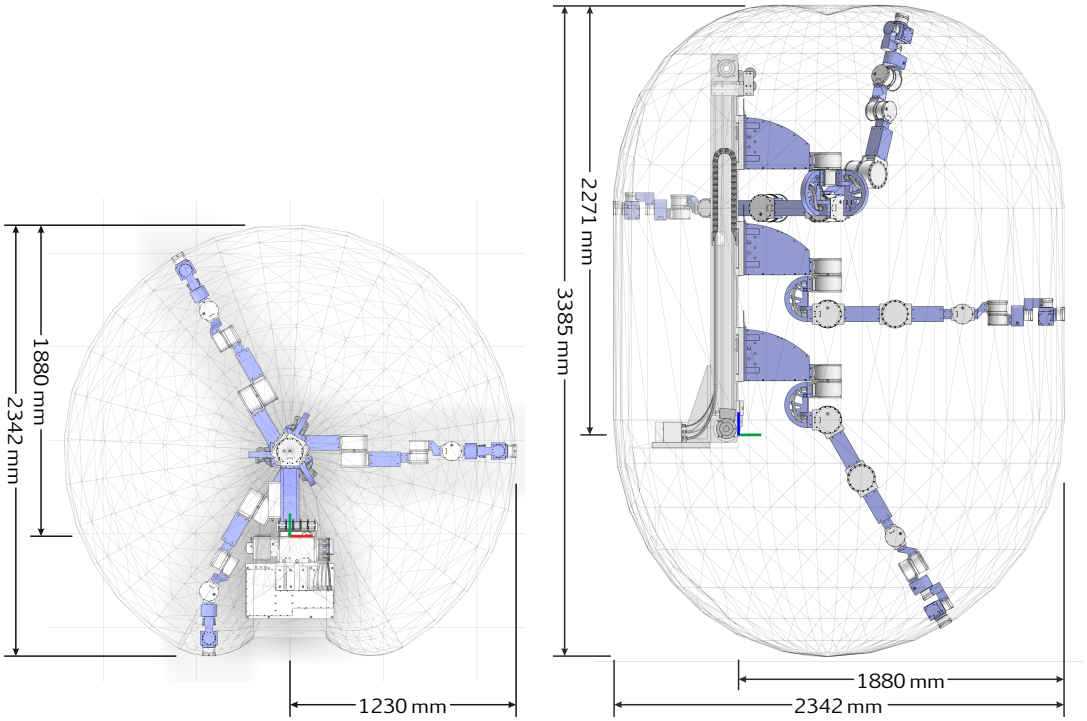
Die Ergebnisse der Feldtests mit dem ersten Arm zeigten durchweg gute Ergebnisse. Dennoch konnten nicht alle Früchte erreicht werden. Daher wurde bei der zweiten Generation die Kinematik überarbeitet und optimiert. Durch das neue modulare Konzept und die eben erwähnte veränderte Kinematik ergibt sich ein größerer Arbeitsraum (siehe Abbildung 4.20).

In Abbildung 4.20*a* ist der maximal erreichbare Arbeitsraum von oben zu sehen. Im Gegensatz zu der ersten Version kann ein größerer Bereich um den Manipulator bearbeitet werden, da das Gelenk 2 weiter nach vorne verschoben wurde und somit der Drehbereich des Gelenks deutlich größer ist (siehe Tabelle B.2). Der Radius hat sich durch die Konstruktion leicht erhöht. Abbildung 4.20*b* zeigt den Manipulator in einer seitlichen Ansicht. Der Kernarbeitsbereich, in dem die zu erntenden Früchte zu finden sind, hat sich kaum verändert. Die Linearachse ist etwas länger, daher hat der Arbeitsbereich in z-Richtung zugenommen.

Messung der Genauigkeit

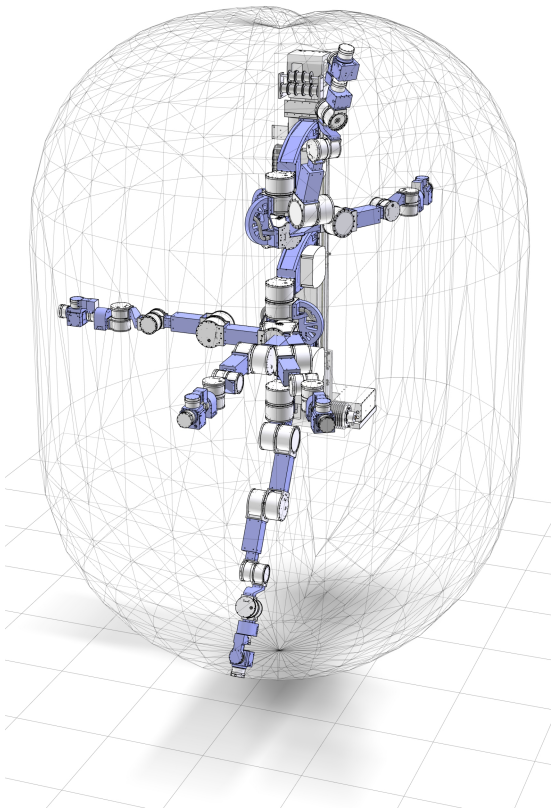
Die Genauigkeit der zweiten Generation wurde analog zu der Vermessung der ersten Generation durchgeführt (vgl. 3.6.1). Dementsprechend kam das gleiche Messsystem (NDI Polaris) zum Einsatz und die Auswertung wurde wieder in Relation zu dem Bezugspunkt in der Mitte des Würfels gemacht.

In Bild 4.21 ist die Abweichung der Position gemittelt aus zehn Versuchen dargestellt. Im Vergleich zu der ersten Generation ist diese etwas höher, allerdings bezogen auf einen größeren Bereich, der vermessen wurde. Wie zuvor gibt es mehrere mögliche Gründe für die Differenz zwischen der vorgegebenen und der tatsächlichen Lage des TCP. Am wahrscheinlichsten sind fertigungsbedingte Abweichungen, die durch eine Kalibrierung ermittelt und ausgeglichen werden können. Im Gegensatz zu der ersten Generation sollte ein Fehler durch falsche



(a) Ansicht von oben

(b) Ansicht von der Seite



(c) Perspektivische Ansicht

Bild 4.20: Arbeitsraumdarstellung des Manipulators der zweiten Generation in der Konfiguration mit 9DOF

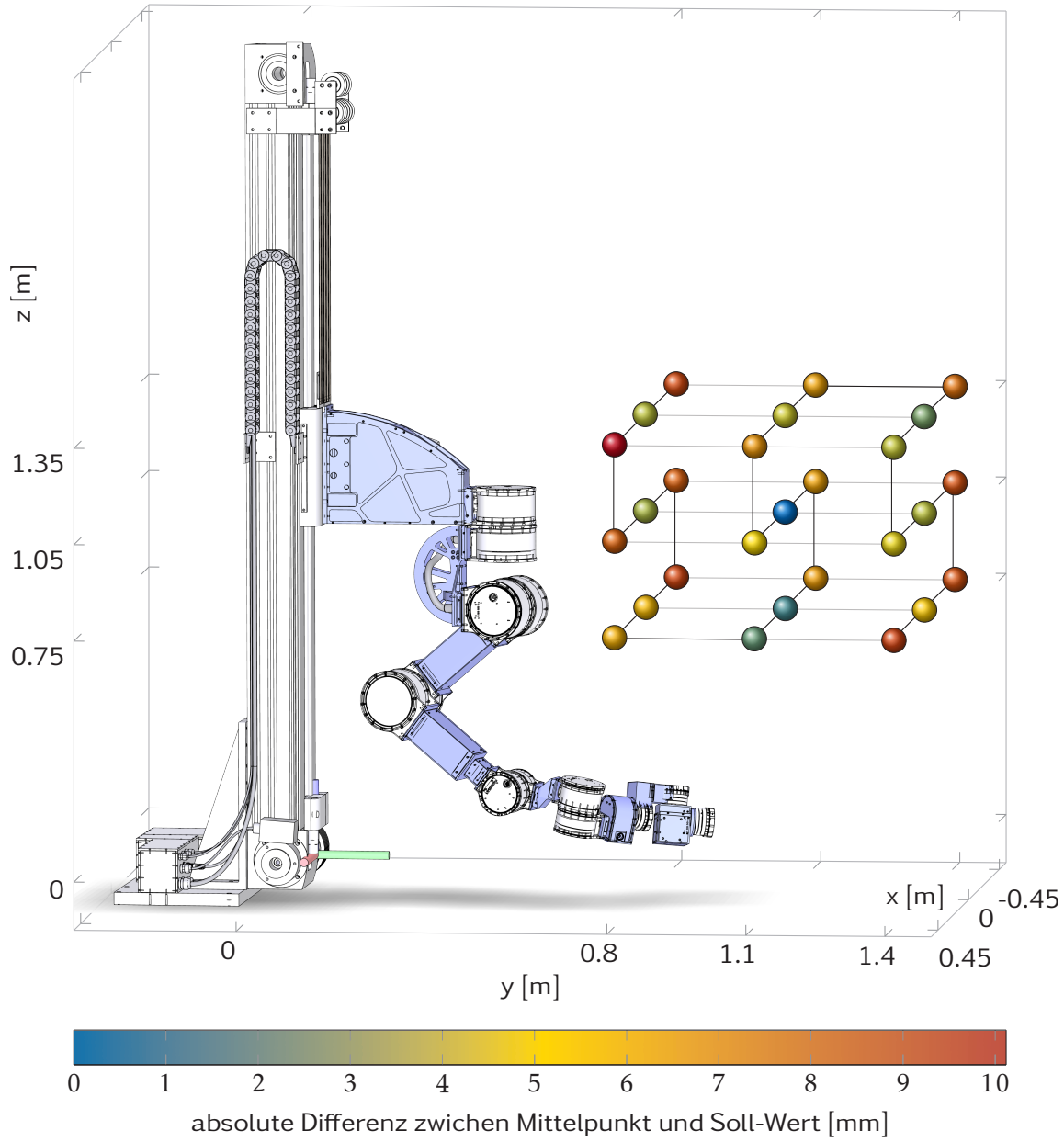


Bild 4.21: Darstellung der Genauigkeit der zweiten Generation

Offsets in den Gelenken nicht vorhanden sein. Bei der Konstruktion wurde speziell hierfür eine Markierung angebracht, um die Gelenke genau einstellen zu können.

Die Wiederholgenauigkeit, die in Abbildung 4.22 dargestellt wird, hat sich im Vergleich zu der ersten Generation verbessert. Allerdings ist auch hier auf Grund des Messfehlers des Messsystems, der über dem Bereich der Wiederholgenauigkeit liegt, nur bedingt eine Aussage möglich. Ausgehend von einem konstanten Messfehler, könnte ein Grund für die bessere Wiederholgenauigkeit auch die höhere Auflösung der Encoder in den Gelenken sein.

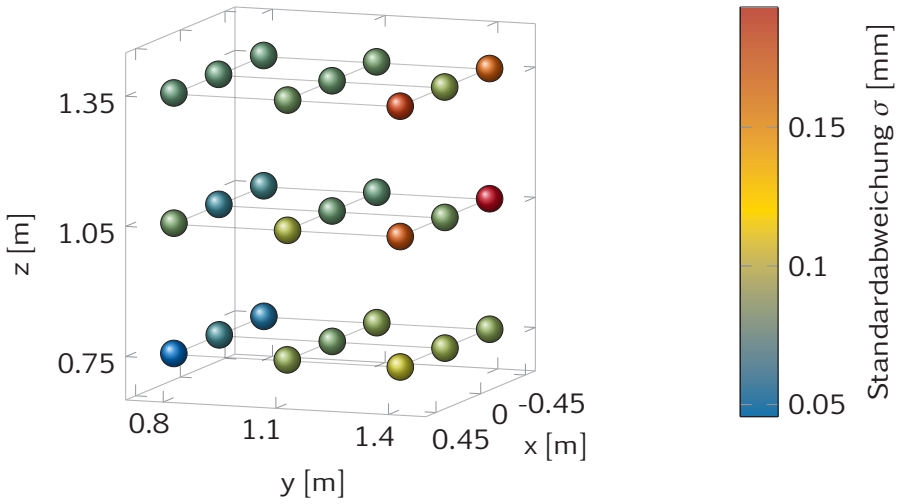


Bild 4.22: Darstellung der Wiederholgenauigkeit der zweiten Generation

4.7.3 Versuche in einer realen Umgebung

Zum Ende des Projekts konnten nur noch Tests im Labor und bei den Partnern aus Wageningen mit der zweiten Manipulatorgeneration durchgeführt werden. In Abbildung 4.23*a* ist der Manipulator in der 7DOF Konfiguration auf der Plattform für die Ernte von Paprikas zu sehen. Auf der zweiten Plattform ist das Sichtsystem mit Beleuchtung montiert. In Bild 4.23*b* und 4.23*c* ist der Manipulator in der 9DOF Variante bei der Ernte mit dem Greif- und Schneidewerkzeug von FESTO abgebildet.

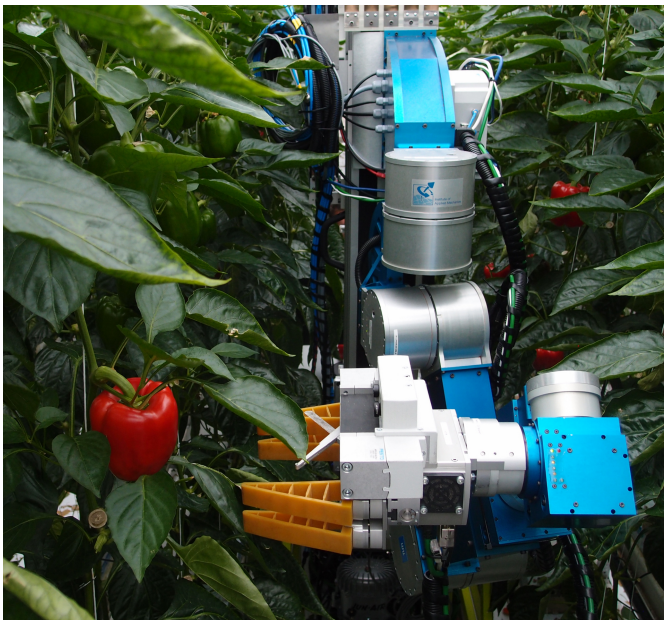
Die Versuche im Gewächshaus wurden mit zwei unterschiedlichen Greifern jeweils in einer original Umgebung und in einem vereinfachtem Umfeld mit entfernten Blättern durchgeführt. Die Erfolgsrate beim Greifen der Früchte variierte in den vier Szenarien zwischen 52 und 95 % (Bac et al., 2015). Die Hauptursache für das nicht erfolgreiche Greifen lag in der fehlerhaften Lokalisierung der Früchte durch das Kamerasystem. Die Misserfolge in den Greifversuchen auf Grund einer ungenauen Positionierung oder einer nicht möglichen Erreichbarkeit, die durch den Manipulator verursacht wären, sind in der Auswertung nicht explizit beziffert.

4.8 Zusammenfassung

Die Ergebnisse und Erfahrungen, die mit der ersten Generation des Ernteroboters gesammelt werden konnten, beeinflussten sehr stark die Überarbeitung des Manipulator-Konzepts. Insbesondere die offene und gegenüber Umwelteinflüssen anfällige Elektronik gab Anlass ein Konzept mit geschlossenen Modulen zu verfolgen.

Die erweiterten Anforderungen und deren Auswirkungen auf das Konzept wurden, ebenso wie die konstruktive Umsetzung des Konzepts mit Schwerpunkt auf neu designten Modulen, verbesserter Sensorik und Elektronik, ausführlich beschrieben. Zum Schluss wurde die finale Manipulator-Generation evaluiert. Dabei

(a) Manipulator mit Plattform und Sensorik in einem Gewächshaus in den Niederlanden



(b) Der Ernteroboter bei der Ernte einer Paprika mit dem Fin-Ray Greifer der Firma Festo

(c) Das gesamte System aus Manipulator und Sensorik in einem Gang des Gewächshauses

Bild 4.23: Erste Ernteversuche von Früchten in einem Gewächshaus in Wagening (Niederland) mit dem finalen Ernteroboter

wurden sowohl die Module einzeln, als auch das System im Ganzen betrachtet.

Die Feldtests mit dem gesamten Erntesystem konnten, bezüglich des hier vorgestellten Manipulators, sehr erfolgreich durchgeführt werden. Bereits bei der ersten Generation war die Erreichbarkeit der Früchte sehr hoch, was mit dem neuen Arm bestätigt werden konnte. Die gesteigerte Leistung der Module ermöglichte weiterhin ein zügiges Ernten. Leider wurden keine konkreten Tests unter realen Anwendungsbedingungen durchgeführt, die dies bestätigen können. In Laborversuchen konnten die meisten Früchte mit einer Taktzeit von 1,5 – 2 s angefahren werden.

Auf Grund des geschlossenen Systems und der verbauten Absolutencoder gab es weder Probleme mit der Elektronik, noch wurde die Startzeit des Systems als unangenehm oder störend empfunden. Das vereinfachte Handling der Module hat die Möglichkeit, die Konfiguration zu ändern, erheblich verbessert.

Die Vermessung der Genauigkeit ergab ein zwiespältiges Ergebnis. Einerseits liegt die gemessene Abweichung noch in dem Rahmen, der innerhalb des Projekts definiert worden ist, andererseits konnte sie im Vergleich zur ersten Generation nicht verbessert werden. Die gemessene Wiederholgenauigkeit zeigt, dass der Arm eine sehr genaue Positionierung zulässt. Um die absolute Genauigkeit zu erhöhen, ist eine Kalibrierung des Systems und eine Modellierung, die die Elastizitäten des Arms berücksichtigt, notwendig.

5 Taktile Hülle

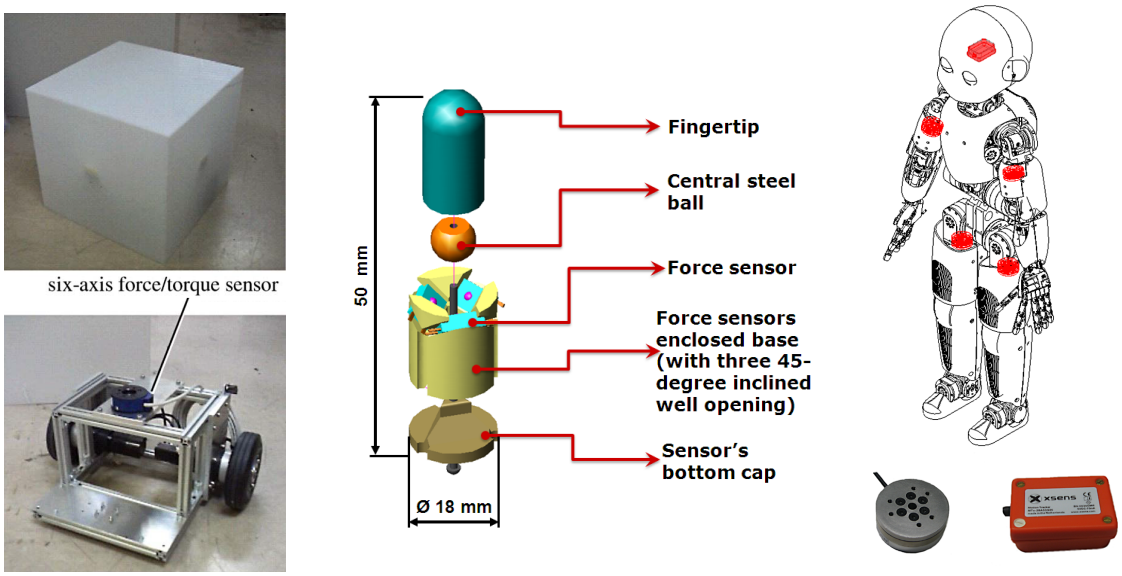
Der Mensch ist durch die Verknüpfung seiner fünf Sinne in der Lage, komplexe Aufgaben durchzuführen. Die Fähigkeit, visuelle und taktile Wahrnehmungen zu verbinden, ist bei der Ernte von Paprika von großem Vorteil. Ohne den Tastsinn wäre auch der Mensch nur auf visuelle Informationen angewiesen, welche in diesem Szenario vor allem durch einer unüberschaubaren Anzahl von Blättern dominiert werden. Alles was sich hinter diesen befindet, ist nur auf Grund von Erfahrungen zu erahnen. Erst durch den Einsatz des Tastsinns kann der Mensch durch die Blätter hindurchgreifen und den Weg zu der ausgewählten Frucht ertasten, ohne dabei die Pflanze oder sich selbst zu verletzen.

Die Manipulatoren, die in den beiden vorangegangen Kapiteln beschrieben wurden, wurden bei den Tests im Gewächshaus (vgl. Kapitel 4.7) mit optischen Sensoren ausgestattet. Mit ihnen ist es möglich, eine grobe Karte des Zielgebiets mitsamt der Früchte zu erstellen. Allerdings ist es den Sensoren, wie dem Menschen, nicht möglich, hinter die Blätter zu schauen. Um dem Manipulator ähnliche Möglichkeiten wie dem Menschen zu verleihen, wird in diesem Kapitel die Entwicklung einer taktilen Hülle vorgestellt. Diese soll die Sensorik des Roboters um einen haptischen Sinn erweitern.

5.1 Stand der Technik

Taktile Sensorik kann in den unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt werden. Als Beispiele seien die Interaktion zwischen Mensch und Maschine, das Handhaben von unbekannten Objekten oder die Vermeidung von Schäden an einer Maschine oder deren Umgebung genannt. In allen Fällen sind Sensoren wünschenswert, die einen Kontakt zwischen Maschine und Umwelt wahrnehmen können. Da sich die Situationen in denen ein Kontakt auftritt, die Kontaktpartner, die Intensität des Kontakts oder einer von vielen anderen Faktoren voneinander unterscheiden, ist die Auswahl an Sensoren sehr unterschiedlich und vielfältig.

Grundsätzlich wird unterschieden zwischen intrinsischen und extrinsischen Sensoren. Der Begriff intrinsischer Sensor ist auf die Verwendung von internen oder innen liegenden Momenten und Kräften zurückzuführen. Dazu zählen z.B. Sensoren, die auf der Basis von Momenten-Messungen in Gelenken, oder Kraft- und/oder Momenten-Messungen zwischen Roboter und End-Effektor bzw. zwischen Roboter und Hülle oder Ähnlichem eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu werden Sensoren, die in einem Array zusätzlich auf der Oberfläche eines Roboters, oder eines beliebigen anderen Mechanismus aufgesetzt sind, extrinsische Sensoren genannt. Hierunter fallen z.B. künstliche Häute bzw. haut-ähnliche Strukturen, die Kontakte, Kräfte oder andere Größen erfassen können.



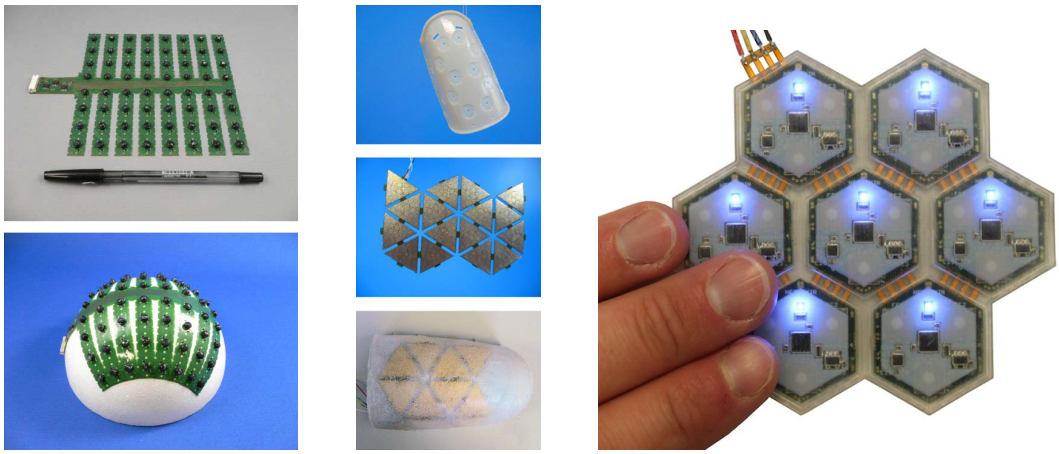
(a) Tsuji et al. (2009) (b) Xu et al. (2014) (c) Fumagalli et al. (2012)

Bild 5.1: Beispiele für intrinsische Sensoren

5.1.1 Intrinsische Sensoren

Der Begriff intirinsischer Sensor wurde von Salisbury (1984) eingeführt, der eine Methode beschreibt, wie mit einem Kraft-Momenten-Sensor eine Kraft und deren Kontaktpunkt bestimmt werden können. Das Konzept wurde vielfach übernommen und erweitert, z.B. von Bicchi et al. (1989, 1993); Iwata et al. (2001) oder Tsuji et al. (2009). Die gleiche Methode wird angewandt, um das Handling von Objekten mit einem End-Effektor zu ermöglichen (Nevins und Whitney, 1972) oder den Kontaktpunkt und die Kraft zwischen Fuß und Boden bei humanoiden Robotern zu bestimmen (Gienger, 2005; Lohmeier, 2010). In Eberman und Salisbury (1990) wird beschrieben, wie ausschließlich mit Momenten-Sensoren in den Gelenken eines Manipulators eine Kontaktkraft und deren Position bestimmt werden können. Diese Idee wurde von De Luca und Mattone (2005) aufgenommen, die jedoch anstelle eines zusätzlichen Sensors bereits vorhandene Möglichkeiten, wie die Messung von Motorströmen, nutzten, um eine Kollision zu ermitteln.

In Abbildung 5.1 sind drei Systeme gezeigt, die intrinsische Sensoren verwenden. In 5.1*a* ist ein Aufbau mit einem 6-Achs Kraft-Momenten-Sensor abgebildet, an dem die Hülle befestigt wird. Abbildung 5.1*b* zeigt einen Finger, an dessen Wurzel drei Kraftsensoren angebracht sind. Über die induzierten Kräfte kann auf die Position und den Ort eines Kontakts geschlossen werden. Im letzten Bild (5.1*c*) ist eine Kombination aus intrinsischen und extrinsischen Sensoren zu sehen. Zwischen dem Torso und den Extremitäten befinden sich 6-Achs Kraft-Momenten-Sensorn. Auf den Extremitäten sind zusätzlich Hüllen mit extrinsischen Sensoren angebracht, um die Wahrnehmung zu verbessern.



(a) Mukai et al. (2008) (b) Schmitz et al. (2011) (c) Mittendorfer und Cheng (2012)

Bild 5.2: Beispiele für extrinsische Sensoren

5.1.2 Extrinsische Sensoren

Extrinsische Sensoren bestehen aus einem Array von einzelnen Feldern, die jeweils aus einem oder mehreren Sensoren bestehen. Somit können über eine größere Fläche die gewünschten Eigenschaften gemessen werden. Anders als bei den intrinsischen Sensoren können durch die entkoppelten Felder eine Vielzahl an Kräften oder anderen Informationen registriert und unabhängig von einander verarbeitet werden. In Tise (1988) wurde ein taktiler Sensor aus einem Array von 256 Elementen vorgestellt mit dem die Form von Objekten erkannt werden konnte, die auf den Sensor gelegt wurden. Sowohl die Auflösung (Kane et al., 2000) als auch der Leistungsumfang (Castelli, 2002; Mittendorfer und Cheng, 2011; Yuji und Sonoda, 2006) haben sich seitdem deutlich gesteigert. Für die Anwendung auf humanoiden Robotern wurden flexible Elemente entwickelt, die sich an die Struktur anpassen (Lee et al., 2006; Duchaine et al., 2009) und anhand der Auswertung der Kontakte feststellen können, ob ein ungewollter Kontakt oder eine gewollte Interaktion stattfindet (Noda und Miyashita, 2012).

In Abbildung 5.2 sind drei verschiedene Systeme dargestellt. Mukai et al. (2008) beschreibt einen Sensor, der aus mehreren Drucksensoren besteht, die auf flexiblen Leiterbahnen befestigt sind (Bild 5.2*a*). Dieses Array kann auf gekrümmten Oberflächen angebracht werden und dort als Kraftsensor dienen. Die mittlere Darstellung zeigt einen Kraftsensor für den Unterarm des iCub[1] Roboters von Schmitz et al. (2011). Die dreieckigen Elemente beherbergen jeweils zwölf runde Felder, die wiederum jeweils einen kapazitiven Drucksensor darstellen (Bild 5.2*b*). Der Sensor in Abbildung 5.2*c* besteht aus sieben einzelnen Sensoren, diese jeweils, Temperatur, Beschleunigung und Normalkraft messen können. Darüber hinaus verfügen sie über einen Näherungssensor (Mittendorfer und Cheng, 2012).

Extrinsische Sensoren bieten auf Grund ihres Aufbaus mehr Möglichkeiten die

1 http://www.icub.org/

Umgebung zu erfassen. Es können (abhängig von der Anzahl der Arrays) beliebige Kräfte und deren Position bestimmt werden. Das Gleiche gilt für zusätzliche Funktionen wie die Messung von Temperatur, Abstand oder anderen physikalischen Größen. Je aufwendiger die Sensoren werden, desto höher sind die Kosten, der Aufwand der Verschaltung und Auswertung der einzelnen Sensoren und die Anfälligkeit für Fehler und Störungen der erforderlichen Hardware.
Intrinsische Systeme sind einfach aufgebaut und bieten auch nur einen begrenzten Funktionsumfang, doch sie sind auch günstiger und einfacher bzw. robuster in der Handhabung. Die Messung einer Kontaktkraft und die Bestimmung des Kontaktpunkts, die für unseren Anwendungsfall ausreichend sind, können laut Son et al. (1995) prinzipiell mit beiden Sensortypen gleichermaßen genau vorgenommen werden.

5.2 Anforderungen

Aus dem Einsatzzweck der Hülle ergeben sich folgende Anforderungen, die bei der Entwicklung berücksichtigt werden müssen:

- Die Hülle soll alle Teile des Manipulators umschließen können, die mit der Umgebung in Kontakt kommen können. Dafür muss die Sensorik klein und an die jeweiligen Teilstücke anpassbar sein.

- Ein Kontakt mit der Umgebung soll wahrgenommen werden. Es ist nicht von entscheidender Bedeutung festzustellen, ob die Hülle mit einem oder mehreren Objekten in Kontakt kommt. Dagegen soll die Richtung und die resultierende Kraft bestimmt werden. Auch im Kontakt muss eine genaue Kraftmessung über einen längeren Zeitraum möglich sein.

- Die Genauigkeit der Krafterfassung muss das Erkennen zweier Schwellwerte erlauben. Zum einen soll ab einer minimalen Kraft von etwa 1–2 N ein Kontakt festgestellt und mit in die Trajektorienplanung aufgenommen werden. Zum anderen wird eine maximale Kraft von 10 N definiert, die einen sofortigen Stopp als Sicherheitsmechanismus auslöst. Die Auflösung zwischen diesen beiden Werten soll mindestens 1 N betragen. Je feiner die Abstufung ist, desto genauer kann die Kraft berechnet und für die Regelung verwendet werden.

- Die Gestaltung der Hülle soll derart sein, dass sowohl die Umgebung als auch der Manipulator geschützt werden. Im Idealfall soll die Hülle genauso den Manipulator vor Beschädigungen durch die Umwelt schützen wie umgekehrt.

- Um die grundsätzliche Funktion des Manipulators nicht zu gefährden, muss die Hülle sehr leicht sein. Ansonsten könnte die Traglast so weit reduziert werden, dass kein sinnvoller Einsatz möglich ist.

- Bereits existierende Lösungen für ein taktiles Feedback besitzen oft eine aufwendige und/oder teure Sensorik. Die neu entwickelte Hülle soll hierzu eine einfache und günstige Alternative bieten.

Die hier aufgeführten Anforderungen können sowohl von intrinsischen als auch extrinsischen Sensoren erfüllt werden. Die in Kapitel 5.1 aufgeführten Sensoren bieten jeder für sich oder aber zusammen grundsätzliche Möglichkeiten, der gestellten Aufgabe gerecht zu werden. Dennoch gibt es nach Wissen des Autors keinen Sensor, der im Hinblick auf alle Kriterien zufriedenstellend ist.

Extrinsische Sensoren sind auf Grund der Vielzahl an einzelnen Sensoren sehr teuer. Darüber hinaus ist es sehr aufwendig, die Felder untereinander zu verschalten und die gemessenen Daten auszuwerten. Extrinsische Sensoren ermöglichen zwar eine genauere Abbildung der Umwelt bzw. der Interaktion mit dieser, sind gleichzeitig aber auch anfälliger für Fehler oder Störungen, zumal für den hier beschriebenen Einsatz nur eine Kraft bestimmt werden soll.

Intrinsische Sensoren, die Kraft-Momenten-Sensoren verwenden, sind meistens sehr groß oder, wenn sie klein und kompakt sind, nicht für die angedachten Lasten geeignet. Die Momentenmessung in den Gelenken bietet eine interessante Möglichkeit, äußere Kräfte zu erfassen, doch treten dabei verschiedene Probleme auf. Wenn nicht bereits die notwendige Sensorik vorhanden ist, ist es zwar möglich über Motorströme auf die Gelenkmomente zu schließen, doch ist dafür ein sehr genaues Modell des Roboters notwendig. Die Nachrüstung einer entsprechenden Sensorik in den Gelenken ist zumindest sehr aufwendig. Des weiteren muss die Masse der Objekte, die gehandhabt werden soll, bekannt sein, da ansonsten keine sinnvolle Aussage über externe Kräfte möglich ist.

5.3 Konzept

Bei der Konstruktion der taktilen Hülle des Manipulators wurde entschieden, einen neuen Ansatz zu verfolgen. Er sollte die oben erläuterten Anforderungen erfüllen, auf der Idee der intrinsischen Sensoren beruhen und dabei kostengünstig, raumsparend und an unterschiedliche Formen anpassbar sein sowie die erwünschten Kräfte auflösen können.

Das grundlegende Konzept entspricht dem, das in Iwata et al. (2001) vorgestellt wird. Über eine steife Hülle werden alle Kräfte und Momente, die auf diese wirken, an einen oder mehrere Sensoren geleitet, die sich zwischen der Hülle und der darunter befindlichen Struktur befinden. Mit dieser Methode kann eine resultierende Kraft und deren Kraftangriffspunkt bestimmt werden. Damit die Bewegung des Manipulators nicht durch die zusätzliche Sensorik beeinträchtigt wird, soll jedes Element mit einer eigenen Hülle umgeben werden. Dies erlaubt zum einen eine uneingeschränkte Bewegung der Gelenke, zum anderen kann so für jedes Element eine Kontaktkraft ermittelt werden.

Im einfachsten Fall wird ein handelsüblicher 6-achsiger Kraft-Momenten-Sensor als Bindeglied zwischen Hülle und Struktur eingesetzt. Dieser bietet zum einen den Vorteil einer einfachen Anbindung an die Hülle, zum anderen können die resultierenden Kräfte und Momente direkt ermittelt werden. Allerdings sind die

Sensoren sehr teuer und – was noch entscheidender ist – sehr groß. Insbesondere in den vorderen Gelenken des Manipulators wäre es auf Grund von Platzmangel nicht möglich, ein solches System einzusetzen. Daher wurde ein Konzept erarbeitet, welches auf der Basis von einfachen, kleinen und günstigen Sensoren die Entwicklung einer Alternative zu kommerziellen Kraft-Momenten-Sensoren ermöglicht.

Für das Konzept werden ein innerer und ein äußerer Rahmen benötigt. Zwischen diesen beiden Gestellen sind einachsige Kraftsensoren verteilt, die alle Kräfte und Momente vom äußeren auf den inneren Teil übertragen. Außen kann die Hülle befestigt werden, während der innere Teil an der Struktur fixiert wird. Da kein anderer Kontakt zwischen Hülle und Struktur besteht, werden alle auftretenden Kräfte durch die Sensoren registriert – vorausgesetzt, die Kräfte an den Sensoren wirken in Sensorrichtung. Die Anzahl der Messstellen muss mindestens so groß sein, dass der äußere Teil des Aufbaus zwischen diesen fixiert ist. Weitere Sensoren können je nach Anforderung hinzugefügt werden, denn auch wenn das System überbestimmt ist, können die resultierenden Kräfte und Momente berechnet werden (vgl. 5.4.3).

Durch die Verwendung von geeigneten Kraftsensoren ist es mit diesem Konzept möglich, einen Kraft-Momenten-Sensor in der Struktur zu integrieren (vgl. Xu et al. (2014)).

5.4 Mechatronische Umsetzung

Am Beispiel von Element 4, dass sich zwischen dem vierten und fünften Gelenk befindet, soll die mechatronische Umsetzung des Konzepts dargestellt werden. Im Folgenden sollen die einzelnen Komponenten und deren Auswahl genauer erläutert werden.

5.4.1 Sensorik

Für das oben beschriebene Konzept werden Sensoren benötigt, mit denen sich eine einachsige Kraft messen lässt. Da für diesen Anwendungsfall eine Fülle an möglichen Sensoren in Betracht kommen würde, wurde vorab die Auswahl auf zwei Sensoren eingegrenzt. Hierfür wurden vor allem die Maße und der Preis einer einzelnen Kraftmesseinheit berücksichtigt. Die zwei Sensoren, die genauer betrachtet wurden, werden im Folgendem kurz vorgestellt und miteinander verglichen.

Tabelle 5.1 zeigt die zwei Sensortypen und einen Überblick über ihre Eigenschaften.

Der FSS Sensor von Honeywell (Honeywell, 2014) ist ein vollständig integrierter Sensor, der auf dem piezoresistiven Effekt beruht. Durch Aufbringung einer externen Kraft verändert ein piezoresistives Silizium-Element seinen Widerstand. Die Einleitung der Kraft erfolgt über eine Stahlkugel. Hierdurch wird eine definierte Belastung des Sensors erzwungen, die in einem reproduzierbaren Ergebnis resultiert. Eine integrierte Wheatstonesche Brückenschaltung garantiert ein stabiles Ausgangssignal.

Tabelle 5.1: Vergleich der Sensoren für die taktile Hülle

Bezeichnung	FSS020	FSR400
Hersteller	Honeywell	Interlink Electronics
Messgröße	Kraft	Druck
Kosten	30 – 50 €	5 – 10 €
Messbereich	0 – 20 N	0,1 – 20 N
Wiederholbarkeit	±0,2 %	±15 %
Maße H x B x T[1]	3,74 x 9,14 x 5,59 mm^3	0,3 x 7,6 x 7,6 mm^3

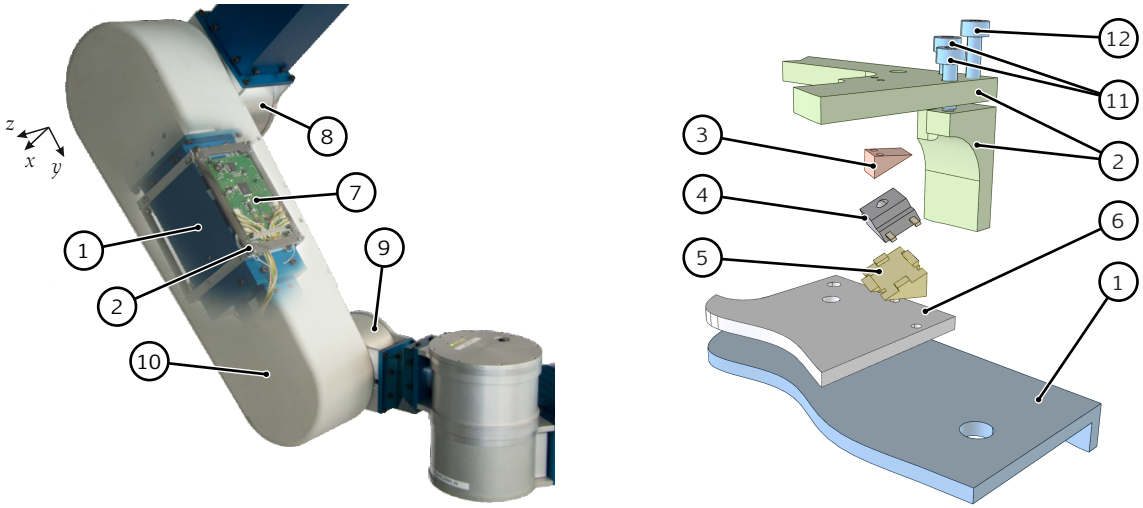
[1] FSS: Maße des Sensors ohne Anschlüsse; FSR: Maße des Sensorkopfes ohne Fahne und Anschlüsse

Der Force Sensing Resistor (FSR) der Firma Interlink Electronics (Interlink, 2014) besteht aus zwei Polymer-Lagen. Auf der einen Lage ist eine graphithaltige halbleitende Paste appliziert, auf der anderen befinden sich zwei getrennte, ineinander verschachtelte Leiterbahnen. Durch Aufbringung eines Drucks auf den Sensor kommen die Lagen miteinander im Kontakt wodurch der Widerstand zwischen den beiden Leiterbahnen sinkt. Durch die Widerstandsmessung und mit Hilfe des Zusammenhangs der Druck- und Widerstandsänderung kann die aufgebrachte Kraft bestimmt werden. Da der Sensor auf Druck reagiert und eine endliche Oberfläche besitzt, ist, damit die Resultate vergleichbar sind, darauf zu achten, dass die Krafteinleitung konsistent erfolgt. Ein Überblick über die Technologie ist in Yaniger (1991) zu finden. In Vidal-Verdú et al. (2009) und Van Den Heever et al. (2009) wird der Aufbau von extrinsischen Sensoren, die aus einer Vielzahl von FSR-Sensoren bestehen, dargestellt.

Der FSS-Sensor ist etwa um den Faktor 5 teurer und deutlich größer als der FSR Sensor. Allerdings kann dieser direkt eingesetzt werden, ohne dass eine aufwendige Kraftaufnahme konstruiert werden muss. Ausschlaggebend ist letztendlich auch nicht die bessere Wiederholbarkeit des FSS, sondern das Kriechverhalten der beiden Sensoren. Bedingt durch das Konzept ist es notwendig, eine leichte Vorspannung auf die Sensoren aufzubringen, um einen gleichmäßigen Kontakt zwischen ihnen und der Struktur zu gewährleisten. Da die Vorspannung immer vorhanden ist, verändert sich auf Grund des Kriechens des FSR-Sensors die gemessene Kraft (Flórez und Velásquez, 2010). Die FSS Kraftmesser hingegen zeigen kein Kriechenverhalten, somit lassen sich mit ihnen die Ergebnisse der Messungen reproduzieren, was maßgeblich die Wahl zu Gunsten des FSS Sensors beeinflusst hat.

Für eine möglichst hohe Genauigkeit werden die Kraftmesselemente einzeln vermessen und die damit erstellte Kennlinie als Grundlage für die spätere Kraft- und Momentenmessung an der Hülle genommen.

Die Messungen wurden mit dem Kraftmessgerät FL20 der Firma Sauter durchgeführt, das an einer vertikalen Führung befestigt ist. Die Messgenauigkeit beträgt 0,2 % der maximalen Nennlast von 20 N.



(a) Taktile Hülle am vierten Element des Manipulators

(b) Explosionsansicht des Aufbaus einer Ecke des taktilen Sensors

Bild 5.3: Aufbau der Hülle

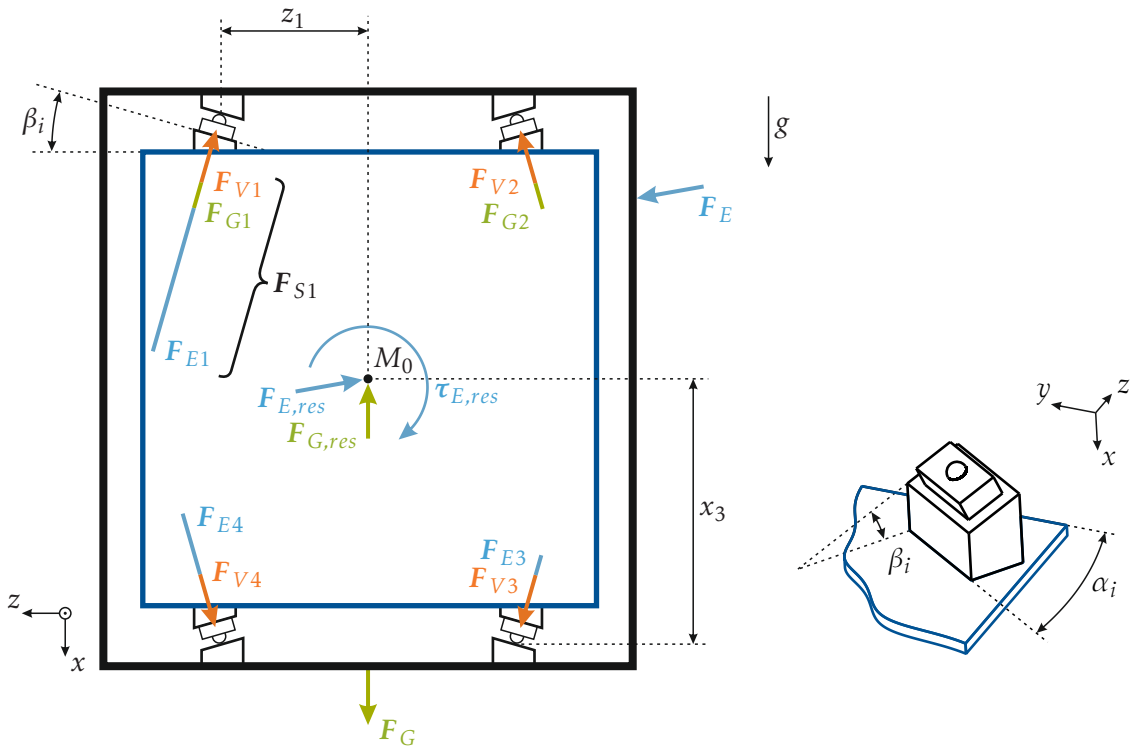
5.4.2 Mechanik

In Abbildung 5.3*a* ist der Aufbau des taktilen Sensors auf dem vierten Element (1) zu sehen. Die Konstruktion ist an die Struktur des Manipulators und die Platzverhältnisse angepasst. Der innere Rahmen (6) wird direkt am Manipulator befestigt (siehe 5.3*b*). Zur Befestigung der Sensoren ist eine Halterung (5) auf dem Rahmen angebracht, um die genaue Positionierung der Kraftsensoren (4) zu gewährleisten. Über die Halterung kann zudem die Richtung angepasst werden aus der die Kraft auf den Sensor eingeleitet wird (vgl. 5.4*b*). Der modulare Aufbau erlaubt es, die Winkel bzw. die Abstände zwischen den Sensoren zu verändern, ohne das ganze System neu zu gestalten. Der Gegenpart des Sensors ist ein Winkel (3), der an dem äußeren steifen Rahmen (2) der Konstruktion befestigt ist. Er ist so ausgeführt, dass die eingeleitete Kraft in Sensorrichtung zeigt und somit keine Querkräfte – abgesehen von Reibungskräften – eingeleitet werden, da diese durch den Sensor nicht erfasst werden könnten und zu einer Verfälschung der Messung führen. Die tatsächliche Hülle (10), die das vierte Element sowie die entsprechenden Teile des vierten (8) und fünften Gelenks (9) umfasst, ist mit dem äußeren Rahmen verschraubt.

Die Elektronik (7) zur Auswertung der Messsignale (siehe Abschnitt 5.4.4) ist in dem Freiraum innerhalb der Oberseite des Käfigs untergebracht.

Auf Grund der hohen Flächenpressung im Kontakt zwischen den Kugeln der Sensoren und der Auflagefläche, wird als Material für die Gegenstücke ein Stahl als Werkstoff verwendet. Hierdurch soll verhindert werden, dass sich Druckstellen, oder Riefen bilden, die zu einer ungewollten Einleitung von Querkräften führen könnten.

Neben den Kontaktstücken wurden auch die beiden Platten des äußeren Käfigs aus Stahl gefertigt. So kann ein Rahmen mit einer hohen Steifigkeit realisiert werden. Dies ist wichtig, um ein zu starkes Verbiegen des Rahmens zu verhindern, wodurch eine Einleitung der Kräfte auf die Sensoren in einem dafür nicht



(a) Berechnung der Kräfte und Momente in der xz-Ebene

(b) Ausrichtung der Sensoren

Bild 5.4: Berechnung der Kräfte in der Ebene

vorgesehenen Winkel stattfinden könnte.

Mit Hilfe der Stellschrauben an den Ecken des Käfigs kann eine Vorspannung auf die Sensoren eingestellt werden. So kann sichergestellt werden, dass alle Sensoren im Kontakt sind und im Ausgangszustand (ohne äußere Kräfte) gleichmäßig belastet werden. Darüber hinaus sorgt die leichte Vorspannung dafür, dass der Käfig eine definierte Position einnimmt. Das Einstellen erfolgt über jeweils drei Schrauben pro Ecke. Zwei davon (11) dienen dazu, die Platten an die seitlichen Pfosten (2) zu ziehen. Mit der dritten Schraube (12), die in ein Gewinde in den Platten geschraubt ist, kann eine Gegenkraft ausgeübt und somit ein definierter Abstand zwischen Platten und Pfosten fixiert werden.

5.4.3 Algorithmus

Die wesentliche Bedingung des vorgestellten Konzepts ist die Aufnahme aller externer Kräfte über die verbauten Kraftsensoren. Das bedeutet, dass weder eine Kraft direkt von der äußeren Seite auf die innere Seite übertragen werden darf, noch dass Querkräfte in den Sensoren entstehen, die durch diese nicht registriert werden können.

Abbildung 5.4*a* stellt beispielhaft den auf das Zweidimensionale reduzierten Fall der Berechnung dar. Die Kraftmesseinheiten sind an den Ecken des inneren Rahmens angebracht. Die Positionen der Kontaktpunkte werden über die Koordinaten x_i und z_i in Bezug auf den Punkt M_0 beschrieben. Die Ausrichtung der

Sensoren und dementsprechend die Kraftrichtung, die gemessen werden kann, wird durch die Winkel α_i definiert.

Auf den dreidimensionalen Fall bezogen, kann der Vektor der Kraft $\boldsymbol{F}_{S,i}$ entsprechend

$$\boldsymbol{F}_{S,i} = F_{S,i} \begin{pmatrix} \cos\beta_i \\ \sin\beta_i \sin\alpha_i \\ \sin\beta_i \cos\alpha_i \end{pmatrix} \tag{5.1}$$

bestimmt werden. In Abbildung 5.4*b* sind die Winkel α_i und β_i dargestellt.

Die Kräfte an den Sensoren bestehen, wie in Gleichung 5.2 dargestellt, aus drei Bestandteilen: dem jeweiligen Anteil der Vorspannkraft $\boldsymbol{F}_{V,i}$, der Gewichtskraft des Rahmens $\boldsymbol{F}_{G,i}$ und der tatsächlich wirkenden Kraftkomponente $\boldsymbol{F}_{E,i}$ der eingeprägten Kraft.

$$\boldsymbol{F}_{S,i} = \boldsymbol{F}_{V,i} + \boldsymbol{F}_{G,i} + \boldsymbol{F}_{E,i} \tag{5.2}$$

Die Vorspannkräfte $\boldsymbol{F}_{V,i}$, die zur Stabilisierung des Systems aufgebracht werden, sind Zwangskräfte, die keinen Einfluss auf das Ergebnis der Messung haben.

$$\boldsymbol{F}_V = \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{F}_{V,i} = 0 \tag{5.3}$$

Die Summe $\boldsymbol{F}_{G,res}$ der Gewichtskräfte $\boldsymbol{F}_{G,i}$ entspricht der Gewichtskraft des Rahmens und der Hülle. Mit der Masse sowie der Orientierung in Bezug auf die Erdbeschleunigung kann diese entsprechend

$$\boldsymbol{F}_{G,res} = \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{F}_{G,i} = -\boldsymbol{F}_G \tag{5.4}$$

berechnet werden.

Die resultierende Kraft $\boldsymbol{F}_{E,res}$ ergibt sich damit aus 5.2 - 5.4 zu

$$\boldsymbol{F}_{E,res} = \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{F}_{E,i} = \boldsymbol{F}_G + \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{F}_{S,i} = -\boldsymbol{F}. \tag{5.5}$$

Das Moment $\boldsymbol{\tau}_{S,res}$ um den Bezugspunkt O ergibt sich zu

$$\boldsymbol{\tau}_{S,res} = \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{F}_{S,i} \times \boldsymbol{r}_i. \tag{5.6}$$

Der Vektor $\boldsymbol{r}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ beschreibt die Position der Kraftsensoren in Bezug auf den Punkt O. Das Moment $\boldsymbol{\tau}_{E,res}$ der externen Kraft ergibt sich analog zu 5.5 zu

$$\boldsymbol{\tau}_{E,res} = \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{F}_{E,i} \times \boldsymbol{r}_i = \boldsymbol{F}_G \times \boldsymbol{r}_S + \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{F}_{S,i} \times \boldsymbol{r}_i \tag{5.7}$$

mit

$$\boldsymbol{\tau}_{G,res} = \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{F}_{G,i} \times \boldsymbol{r}_i = \boldsymbol{F}_G \times \boldsymbol{r}_S \tag{5.8}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{V,res} = \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{F}_{V,i} \times \boldsymbol{r}_i = 0. \tag{5.9}$$

Der Vektor $\boldsymbol{r}_S = (x_S, y_S, z_S)^T$ beschreibt die Position des Schwerpunkts des Gestells inklusive Hülle in Bezug auf den Punkt M_0.

Die resultierende Kraft und das Moment werden in die Planung des Manipulators miteinbezogen. Hierzu wird ein Punkt P auf der Wrench-Achse mit dem Abstand $\hat{\boldsymbol{r}}$ zu dem Ursprung O verwendet, der sich aus der Kraft und dem Moment zu 5.10 bestimmen lässt. Um die Kraftregelung zu aktivieren, wird ein Schwellenwert festgelegt, ab dem diese berücksichtigt wird.

$$\hat{\boldsymbol{r}} = \frac{\boldsymbol{F}_{E,res} \times \boldsymbol{\tau}_{E,res}}{\left|\boldsymbol{F}_{E,res} \times \boldsymbol{\tau}_{E,res}\right|} \cdot \frac{\left|\boldsymbol{\tau}_{E,res}\right|}{\left|\boldsymbol{F}_{E,res}\right|} \tag{5.10}$$

Für die Regelung wird der Kraftangriffspunkt auf der Hülle nicht benötigt, er kann jedoch, wie in Tsuji et al. (2009) beschrieben, berechnet werden. Hierzu werden die beiden Schnittpunkt der Wrench-Achse (vgl. 5.11) mit der Hülle gebildet, die die möglichen Kraftangriffspunkte darstellen. Da in dem hier vorgestellten Fall nur Druckkräfte auf die Hülle wirken, kann entsprechend der Kraftrichtung der tatsächliche Ort der Krafteinleitung bestimmt werden. Eine Voraussetzung für die eindeutige Bestimmung der Position ist eine konvexe Hülle. Ist diese nicht gegeben, kann es mehr als zwei Schnittpunkte mit der Wrench-Achse geben, so dass nicht mehr festgestellt werden kann, welcher von diesen der tatsächliche Angriffspunkt ist.

$$\boldsymbol{x} = \hat{\boldsymbol{r}} + s\boldsymbol{F}_{E,res} \tag{5.11}$$

5.4.4 Elektronik

Die Sensoren benötigen eine Versorgungsspannung und die Messsignale müssen ausgelesen und anschließend dem Steuerrechner zur Verfügung gestellt werden. Für diese Aufgaben wurde von Georg Mayr eine Platine entwickelt, die die Verbindung zwischen der Elektronik auf dem Manipulator und dem Sensor herstellt.

Abbildung 5.5 zeigt die Platine, auf der die wichtigsten Bauteile markiert sind. Für eine einfache Anbindung befinden sich jeweils vier Stecker (grün markiert) für die Messeinheiten an einer Seite des Boards. Diese werden mit einer auf der Platine geglätteten Spannung versorgt. So können Störungen des Manipulators auf die Messsignale minimiert werden.

Das analoge Signal der Kraftmesseinheiten wird von zwei Analog/Digital (AD)-Wandlern (AD7738 von Analog Devices; blau umrandet) digitalisiert. Die beiden Wandler, an denen jeweils vier Sensoren angeschlossen sind, haben eine Auflösung

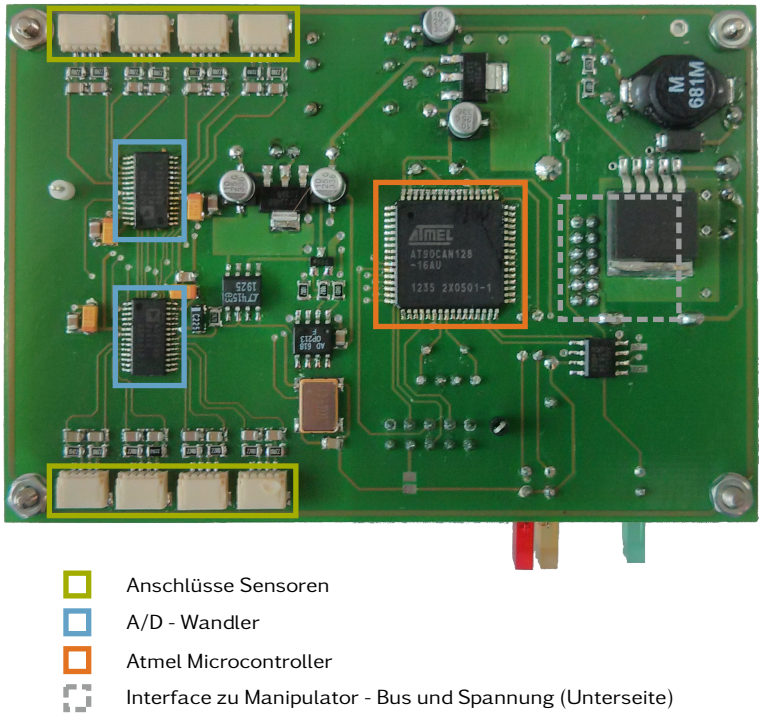


Bild 5.5: Elektronik zur Auswertung der Kraftsignale

von 24 bit. Durch die hohe Auflösung ist es möglich, auf eine Vorverstärkung der Messsignale zu verzichten, wodurch ein zusätzlicher Abgleich zwischen Signal und Verstärker entfällt. Das digitalisierte Signal wird über einen Serial Peripheral Interface (SPI)-Bus an den Mikrocontroller gesendet (orange Einrahmung). Auf dem Mikrocontroller (AT90CAN128 von Atmel) werden die Signale entsprechend der zuvor bestimmten Kennlinien zu Kräften umgerechnet und dann über den CAN-Ausgang an den CAN-Bus des Manipulators geschickt. Die Platine verfügt auf der Unterseite (grau markiert) über das gleiche Interface wie die kleinen Module des Manipulators (vgl. Kapitel 4.4.3). Sie kann darüber an die Spannungsversorgung sowie an den CAN-Bus des Manipulators angeschlossen werden.

Die Zykluszeit der Kraftmessung kann aus den folgenden drei Teilen berechnet werden:

- die Konvertierungsdauer T_{ADC} der Analog-Digital-Wandlung
- die für die SPI Übertragung benötigte Zeit T_{SPI}
- und die Übertragungsdauer T_{can} für das versenden der Nachricht

Der Ablauf im µController bei der Sensordatenerfassung ist in dem Nassi-Shneiderman-Diagramm in Bild 5.6 dargestellt.

Der Gesamtzyklus besteht aus vier gleichen Teilzyklen. Während eines Teilzyklus wird von jedem AD-Wandler jeweils ein Sensorsignal verarbeitet und über das SPI an den µController gesendet. Dieser stellt die Daten über den CAN-Bus bereit. Für die Berechnung der maximalen Zykluszeit ist entscheidend, ob die

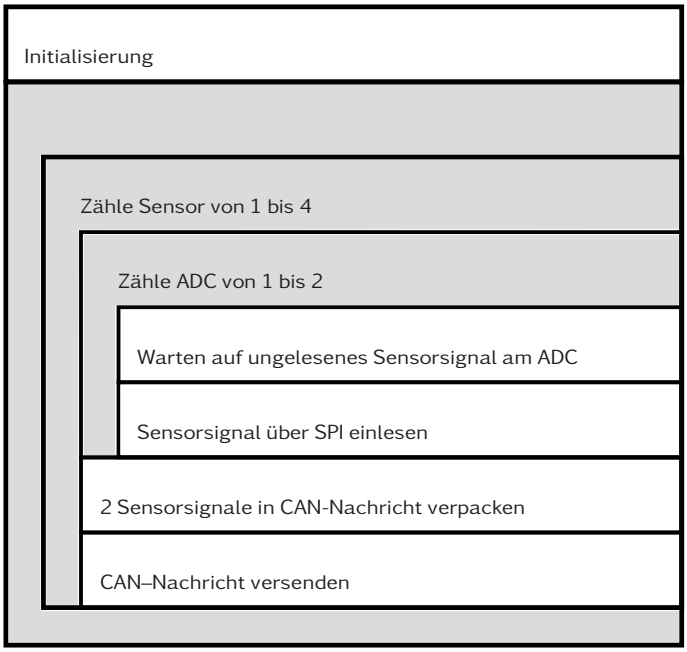


Bild 5.6: Schema der Sensordatenerfassung am µController

AD-Wandlung oder die Übertragung der Signale per SPI und CAN mehr Zeit beanspruchen. Dementsprechend berechnet sich die theoretische Zykluszeit zu

$$T_{Zyklus} \geq 4 \cdot \max(T_{CAN} + 2 \cdot T_{SPI}\,; T_{ADC}). \tag{5.12}$$

Die Inbetriebnahme der Elektronik, die Programmierung des µControllers sowie die Auswertung der Messergebnisse wurden von Sebastian Roder während seiner Bachelorarbeit vorgenommen.

5.5 Ergebnisse

Die Eignung des Konzepts für eine taktile Hülle des Ernte-Manipulators wurde durch verschiedene Versuche überprüft. Dabei wurden zum einen die gemessene Zykluszeit mit der theoretischen Vorhersage verglichen. Zum anderen wurden sowohl statische als auch dynamische Versuche mit der Hülle am Manipulator durchgeführt, die das Verhalten im realen Einsatz simulieren sollen.

Die tatsächliche Zykluszeit kann mit der Hilfe des CAN-Busses gemessen werden. Die CAN-Nachrichten enthalten einen Zeitstempel, durch den es möglich ist die Differenz zwischen zwei aufeinander folgenden Zyklen zu bestimmen. Die Dauer eines Zyklus wird durch die Konfiguration des AD-Wandlers, des Frequenzteilers der SPI-Übertragung und der Übertragungsrate des CAN-Busses bestimmt. In Bild 5.7 sind vier Messungen mit unterschiedlichen Einstellungen (vgl. Tabelle 5.2) und die dazugehörigen Schätzungen dargestellt.

Messreihe 1 und 2 zeigen das die theoretische Berechnung nur teilweise zutreffend ist. Solange die AD-Wandlung deutlich länger dauert, als die Anteile von CAN und SPI, stimmen die Werte aus Berechnung und Messung überein

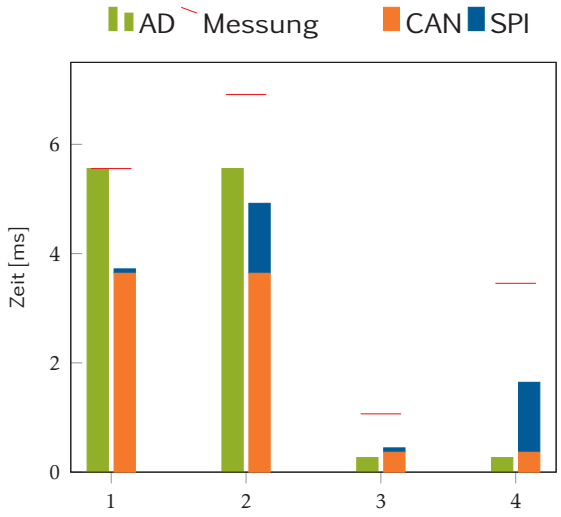


Bild 5.7: Ergebnisse der Messreihen zum Taktzyklus

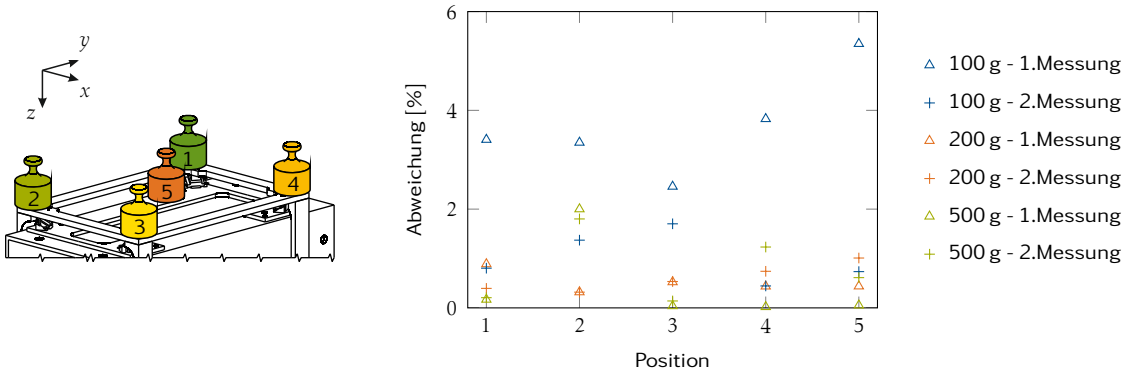
(Messreihe 1). Die zweite Messreihe zeigt, dass die Bestimmung der CAN und SPI Anteile nicht vollständig ist. Die tatsächliche Taktzeit liegt deutlich über der theoretische bestimmten. Auch die Messreihen drei und vier legen den Schluss nahe, dass ein zusätzlicher Einfluss durch einen Faktor, der sehr stark abhängig von der Auslesung der Signale über SPI ist, für die Zykluszeitberechnung besteht. Die Messungen zeigen auch, dass es mit den entsprechenden Einstellungen möglich ist, eine Taktzeit von nahezu 1 ms zu erreichen.

Tabelle 5.2: Konfiguration der Komponenten für die Messreihen 1–4

	1	2	3	4
AD-Konfiguration	$7F_H$	$7F_H$	03_H	03_H
CAN-Datenrate	100 kBit/s	100 kBit/s	1 MBit/s	1 MBit/s
SPI-Frequenzteiler	2	32	2	32

Die Versuche am Sensor wurden sowohl mit Gewichten als auch mit einem Kraftmessgerät durchgeführt, um die Genauigkeit des Kraft-Momenten-Sensors bei statischen und dynamischen Belastungen zu bestimmen. Für die statischen Versuche wurde der Rahmen an fünf Positionen (siehe 5.8*a*) mit jeweils drei unterschiedlichen Gewichten in z-Richtung belastet. Die Grafik in 5.8*b* zeigt die prozentuale Abweichungen der gemessenen Gewichte an den entsprechenden Messstellen. Die Abweichung liegt in einem Bereich von etwa 0–6 %. Die erste Messreihe mit 100 g zeigt aus einem nicht bekannten Grund eine besonders hohe Abweichung. Trotz der Ungenauigkeit liegt der absolute Messfehler bei nur 6 g. Etwas höher, bei etwa 10 g, ist der Fehler in Position 2 mit einem Gewicht von 500 g. Für den vorgesehenen Einsatzzweck im Hinblick auf eine Auflösung von 1 N sind diese Fehler vollkommen akzeptabel.

Bild 5.9 zeigt exemplarisch die Auswertung einer der dynamischen Versuche. Bei der Versuchsdurchführung wurde mit einem Kraftmessgerät an mehreren



(a) Messpositionen

(b) Abweichung der Gemessenen Werte

Bild 5.8: Statische Messung mit Gewichten

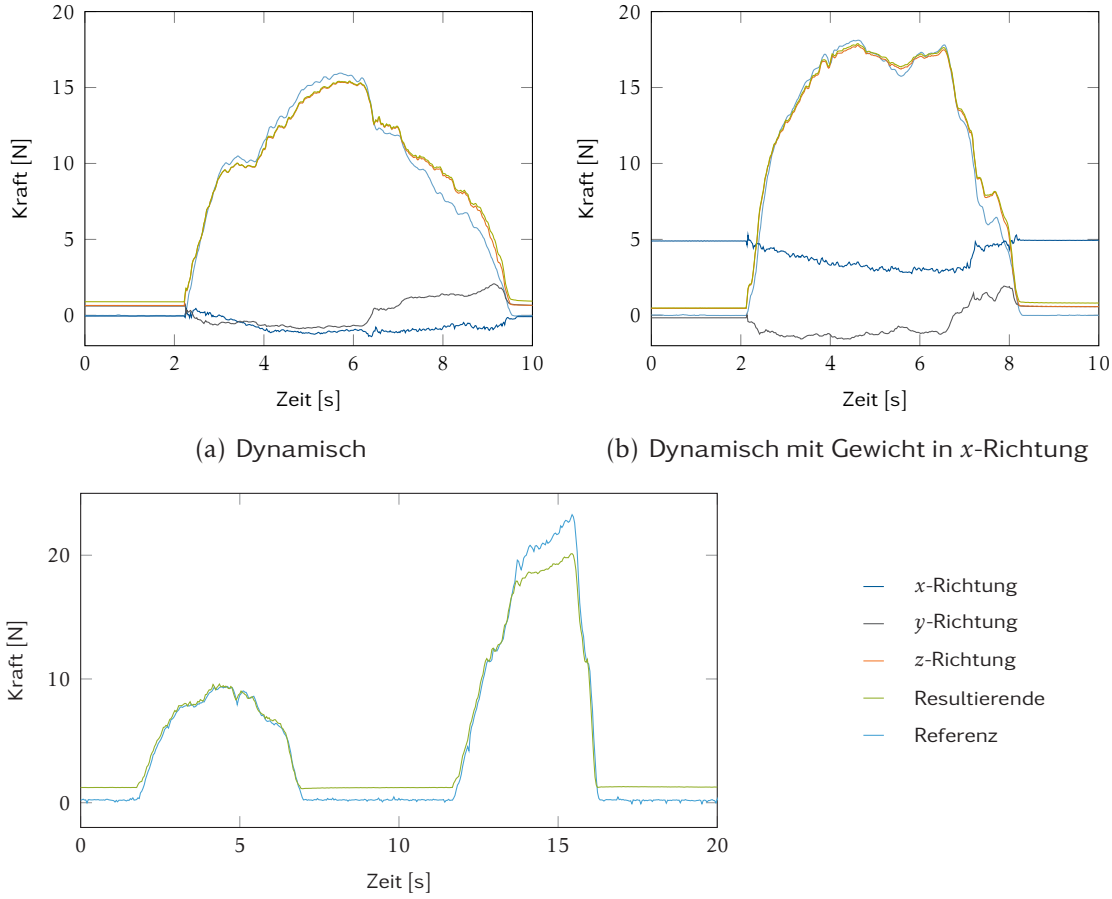
Stellen auf die montierte Hülle gedrückt. Dies geschah möglichst senkrecht zu der Oberfläche, um Querkräfte auf das Gestell und das Messgerät zu minimieren.

Die Komponenten der Kraft, gemessen durch den Sensor, sowie deren Resultierende sind über die Dauer des Versuchs aufgetragen. Als Referenz ist die Kraft, die über das externe Messgerät bestimmt wurde, dargestellt (vgl. Bild 5.9*a*). In Abbildung 5.9*b* wurde ein zusätzliches Gewicht mit 500 g in x-Richtung aufgebracht. Die Messung der resultierenden Kraft[2] funktioniert trotz zusätzlicher statischer Belastung sehr gut. In dem dritten Diagramm (5.9*c*) ist ein Sättigungseffekt bei einer höheren Last zu sehen. Dieser kann auftreten, wenn die Belastung der Sensoren zu hoch ist und ein Kontakt zwischen dem äußeren Rahmen und der Struktur auftritt. Der Bereich, in dem es zu diesem Effekt kommen kann, liegt deutlich über den 10 N, für die der Sensor ausgelegt ist. Im unbelasteten Zustand kann es zu einer Abweichung vom Nullwert kommen, was durch einen mechanischen Hysterese-Effekt erklärt werden kann, der durch die Reibung zwischen dem Sensor und der Gegenfläche entsteht. Die so verbleibende, fälschlicherweise gemessene Kraft liegt deutlich unter den 2 N, die als Schwellenwert für die Bewegungsplanung festgelegt wurden.

Abbildung 5.10 zeigt einen Versuch mit dem Manipulator und der darauf installierten Hülle. Der TCP folgt einer fest vorgegebenen horizontalen Linie, die in den Bildern 5.10*a–d* als grüner bzw. als oranger Strich dargestellt ist. Während der Bewegung kollidiert der Arm mit einem elastischen Band, das zwischen Decke und Boden gespannt ist.

Mit eingeschalteter Regelung (unten/grün) versucht der Arm durch die Ausnutzung seiner Redundanz dem Hindernis soweit wie möglich auszuweichen, während er sich ansonsten (oben/orange) ungehindert weiterbewegt. Die Methode zur Regelung mit einer auf die Hülle wirkenden Kraft wird in Schuetz et al. (2015) beschrieben. Die Bilder 5.10*a* und *b* zeigen den Anfang der Bewegung, bis zum Auftreten des Kontakts. Im dritten Bild (5.10*c*) kann ein leichter Unterschied zwischen den beiden Versuchen erkannt werden. Im unteren Versuch (mit Rege-

2 das zusätzliche Gewicht wird als konstanter Betrag in x-Richtung von der resultierenden Kraft subtrahiert



(a) Dynamisch

(b) Dynamisch mit Gewicht in x-Richtung

(c) Dynamische Belastung mit Sättigungseffekt

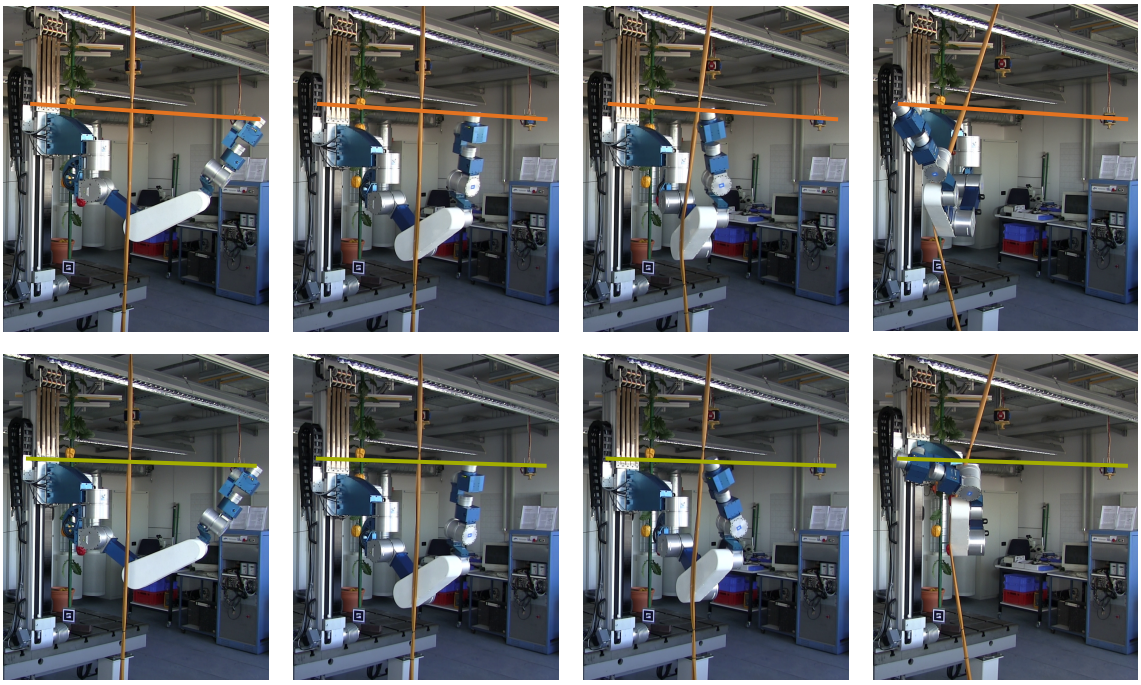
Bild 5.9: Dynamische Messung mit zusätzlichem Kraftsensor zum Abgleich

lung) ist bei Gelenk 6 eine deutlich stärkere Verdrehung zu sehen, durch die der Manipulator versucht, dem Hindernis auszuweichen.Im letzten Bild (5.10*d*) ist der Unterschied bei den beiden Versuchen in der Haltung des Arms am deutlichsten zu erkennen.

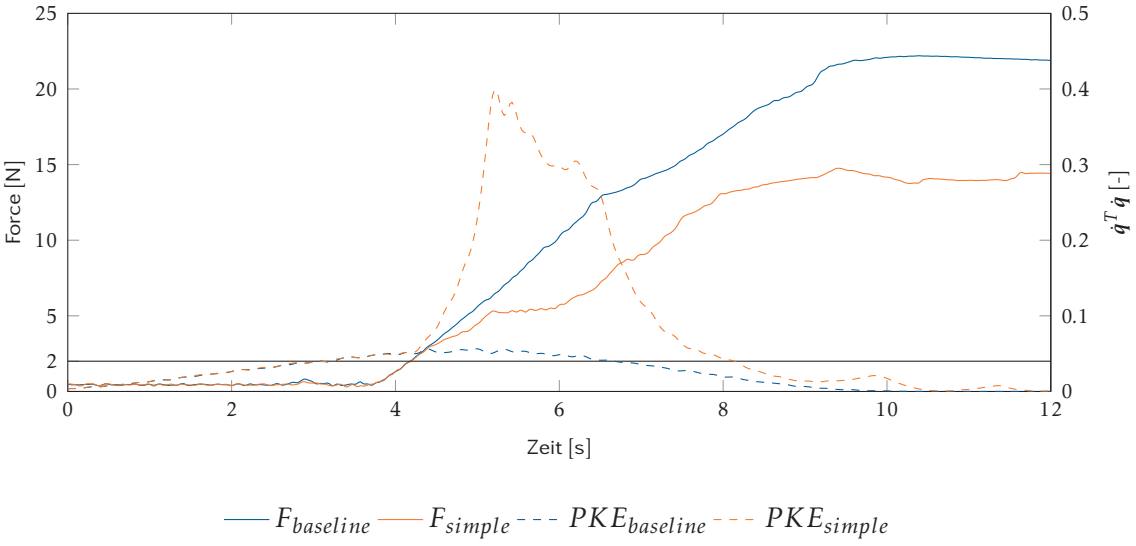
Abbildung 5.10*e* bestätigt die Beobachtung. Die Darstellung der Kraft über der Zeit der beiden Versuche zeigt deutlich, wie die Kraft durch die Regelung vermindert wird. Bis zu einem Zeitpunkt etwa vier Sekunden nach dem Start der Bewegung wird keine externe Kraft auf der Hülle gemessen. Sobald der Kontakt eintritt steigt die Kraft bei beiden Bewegungen an. Ab dem Überschreiten des Schwellwerts bei 2 N wird der Unterschied deutlich. Bei der Bewegung ohne Regelung steigt die Kraft $F_{baseline}$ stetig bis zu einem Wert von ca. 23 N[3] an. Mit der aktivierten Regelung steigt die Kraft F_{simple} nur bis etwa 15 N.

Die gestrichelten Kurven stellen die Summe der Quadrate der Gelenkgeschwindigkeiten dar. Die gestrichelte blaue Linie $PKE_{baseline}$ zeigt die optimale Bahn ohne Beeinflussung durch eine externe Kraft. Durch die Kollisionsvermeidung steigen die Geschwindigkeiten PKE_{simple} sehr stark an, da der Arm nicht mehr seiner ei-

3 Der Sicherheitsmechanismus zur Begrenzung der maximalen Kraft wurde für die Versuche deaktiviert

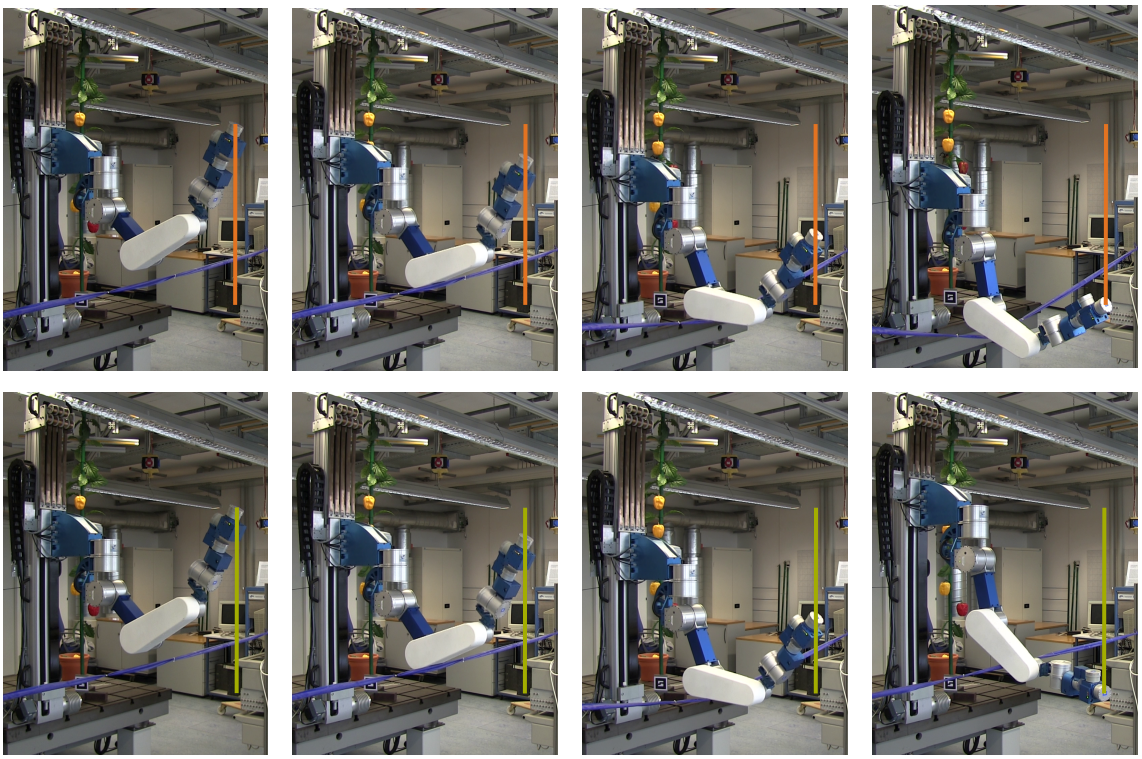


(a) Anfang Bewegung (b) Erster Kontakt (c) Mitte Bewegung (d) Ende Bewegung



(e)

Bild 5.10: Versuch mit taktiler Hülle und Manipulator. Der Manipulator fährt jeweils eine gerade Bahn (grüner Strich) und kollidiert dabei mit einem flexiblen Band; ohne Auswertung der Kraft (linke Seite der Bilder bzw. blaue Kurven); mit Auswertung (rechte Seite der Bilder bzw. orange Kurven)



(a) Anfang Bewegung (b) Erster Kontakt (c) Mitte Bewegung (d) Ende Bewegung

Bild 5.11: Versuch mit horizontalem Hindernis; oben die Bewegung (oranger Strich) mit deaktivierter Regelung; unten (grüner Strich) mit aktivierter Regelung

gentlichen Bahn folgen kann, sondern versucht entgegen der Bewegungsrichtung auszuweichen.

Abbildung 5.11 zeigt einen weiteren Versuch, dieses Mal mit einem horizontal gespanntem Hindernis. Die Wirkung des Reglers wird erst im letzten Bild 5.11*d* deutlich. In den ersten drei Sequenzen wird die Bewegung des Arms hauptsächlich durch das dritte Gelenk erzeugt. Nach Überschreiten des Kraft-Schwellwerts muss der Manipulator nach oben ausweichen, um der Trajektorie folgen zu können.

5.6 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Sensor ist es gelungen, eine einfache und günstige taktile Hülle zu entwickeln, die zudem eine Messgenauigkeit bietet, die für das vorgestellte Szenario gut geeignet ist. Die Ergebnisse der Versuche mit dem Manipulator sind sehr vielversprechend und bestätigen die Funktion der Hülle.

In einem nächsten Schritt kann die Hülle auf die anderen Elemente des Roboters erweitert werden. Um dabei die Hülle weiter zu entwickeln, bieten sich verschiedene Ansatzpunkte.

Die Konstruktion wurde während der Tests iterativ verbessert und angepasst. Für genauere Messergebnisse kann die Steifigkeit das Gestell weiter angepasst werden, damit keine unerwünschten Effekte durch Querkräfte in den Sensoren auftreten. Andererseits sollte darauf geachtet werden das Gewicht niedrig zu

halten, damit der Messbereich des Sensors nicht verkleinert wird. Für eine optimale Auslegung des Sensors können die Anordnung bzw. die Ausrichtung der Kraftmesselemente an die voraussichtlichen Belastungen der Hülle angepasst werden.

Ein Effekt, der zu einer Verfälschung der Messergebnisse führt, ist die Reibung zwischen der gehärteten Kugel des Kraftsensors und der Gegenfläche. Das Gegenstück wurde aus einem einfachen Stahl gefräst, weshalb leichte Riefen in der Oberfläche vorhanden sind, die die Reibung zwischen den Bauteilen erhöhen. Dieser Effekt kann sich auf Dauer verstärken, wenn sich die härtere Kugel des Sensors in die Oberfläche drückt. Um einer Verschlechterung der Messergebnisse entgegenzuwirken, bzw. diese noch zu verbessern, sollte hier eine polierte und gehärtete Oberfläche Verwendung finden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zum Abschluss der Arbeit soll diese noch einmal kurz zusammengefasst werden. Anschließend werden aus der Sicht des Autors Überlegungen dargestellt, wie Manipulatoren, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wurden, in der Landwirtschaft etabliert werden können und welche Voraussetzungen hierzu notwendig sind.

6.1 Zusammenfassung

Das Thema Robotik gewinnt in vielen Bereichen des täglichen Lebens zunehmend an Bedeutung. Wurden vor zehn Jahren Roboter noch hauptsächlich von der Industrie eingesetzt, sind sie heutzutage vielerorts, auch im Haushalt oder Garten anzutreffen. Auch in der Landwirtschaft schreitet die Automatisierung stetig voran. Es besteht Bedarf an Arbeitskräften, doch die Arbeitsbedingungen sind oft körperlich anstrengend oder sogar schädlich für die Gesundheit. Insbesondere die Bereiche, in denen die Arbeit von Hand erledigt werden muss, weil in ihnen keine großen Landmaschinen eingesetzt werden können, bieten sich an für eine Automatisierung mit Robotern. Dementsprechend hoch ist das Interesse an diesem Thema in Forschung und Industrie. Die Zahl der Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Pflanzenpflege und Fruchternte steigt daher stetig.

Die hier vorgestellte Arbeit ist im Rahmen des EU-Projekts CROPS entstanden. Dessen Ziel es war, einen Roboter für die Ernte von Paprikafrüchten, Äpfeln und Trauben sowie zum gezielten Besprühen von Wein zu entwickeln. Diese Arbeit befasst sich speziell mit der Entwicklung der Hardware der für den obigen Zweck benötigten Manipulatoren.

Für gewöhnliche Handhabungen in einer bekannten Umgebung, wie sie von Industrierobotern ausgeführt werden, können klare Rahmenbedingungen gestellt werden. Sollen aber Arbeiten in einer sich verändernden natürlichen Umgebung ausgeführt werden, ist es schwierig, entsprechende Anforderungen zu definieren. Daher bestand die Vorgehensweise bei der Durchführung des Projekts darin, zwei Generationen von Manipulatoren zu entwickeln, wobei die Erfahrungen aus den Versuchen mit der ersten Generation die Basis für die Entwicklung einer besseren zweiten Generation bilden sollten.

Die Anforderungen, die das Konzept für die ersten Manipulatoren am deutlichsten geprägt haben, stammen von der Paprikaernte. Der Bauraum der für den Manipulator hierbei zur Verfügung steht, ist durch die engen Gänge in den Gewächshäusern stark begrenzt. Gleichzeitig muss der Manipulator in der Lage sein, auch schwer zu erreichende Früchte anzufahren. Im Gegensatz dazu muss bei der Ernte von Äpfeln und Trauben eine hohe Präzision am End-Effektor gegeben sein. Das Behandeln von Wein mit Pestiziden wiederum verlangt eine Konstruktion, die einen ausreichenden Schutz gegen Wassertropfen bietet.

Anders als bei Ernterobotern, die für die Ernte einer speziellen Frucht entwickelt werden, wurde hier ein Konzept gesucht, mit dem die unterschiedlichen Anforderungen gleichermaßen gut erfüllt werden können. Das Konzept, das hieraus für die erste Generation entstand, besteht aus einer Kinematik mit neun Freiheitsgraden. Diese sind für die schwierigen Bedingungen bei der Paprikaernte erforderlich. Da die anderen Aufgaben diese Flexibilität nicht zwingend benötigen, wurden Schnittstellen im Manipulator vorgesehen, die einen modularen Aufbau erlauben.

Die zwei baugleichen Prototypen der ersten Generation bestehen aus einer linearen Hochachse und acht folgenden rotatorischen Gelenken. Sie können jeweils an vier Stellen getrennt werden, um die Konfiguration des Manipulators entsprechend der jeweiligen Begebenheiten zu verändern. Während einer der Prototypen im Labor getestet wurde, konnten mit dem zweiten Manipulator Versuche in einer realen Umgebung durchgeführt werden. Die Erfolgsquote bei den Tests bezüglich der Erreichbarkeit der Früchte war mit über 83 % bei der Paprika- und 100 % bei der Apfelernte sehr gut. In den Laborversuchen konnte die Präzision des Systems bestätigt werden.

Aufbauend auf den vielversprechenden Ergebnissen wurde die zweite Manipulatorgeneration entworfen. In den Entwicklungsprozess flossen die vielen positiven Erfahrungen als auch Probleme, die sich bei den Versuchen mit der ersten Generation aufgetan haben, ein. Insbesondere das offene Design, das kaum Schutz für die Elektronik der Manipulatoren bot, machte eine Weiterentwicklung erforderlich. Das überarbeitete Konzept sah eine Konstruktion aus einzelnen geschlossenen Gelenken vor. Dadurch konnte zum einen die Modularität des Systems weiter erhöht werden, zum anderen war es möglich, einen vollkommen geschlossenen und dichten Manipulator zu realisieren. Die Kinematik wurde nur leicht angepasst, so dass in der Standardkonfiguration wiederum neun Gelenke zum Einsatz kamen.

Die Feldtests mit dem zweiten Manipulator konnten sehr erfolgreich durchgeführt werden. Bereits bei der ersten Generation war die Erreichbarkeit der Früchte sehr hoch, was mit dem neuen Arm bestätigt werden konnte. Eine gesteigerte Leistung der Module ermöglichte Taktzeiten im Labor von 1,5 — 2 s bei einer gleichbleibend hohen Genauigkeit.

Bei den Versuchen hat sich allerdings auch gezeigt, dass die optischen Systeme, die zur Identifizierung der Früchte verwendet wurden nicht für die Kartografie der Pflanzen geeignet sind. Für ein autonomes System muss daher eine Lösung gefunden werden, um in einer unbekannten Umgebung eingesetzt werden zu können, ohne dabei den Manipulator oder Pflanzen zu schädigen. Aus diesem Grund wurde ein Konzept für eine taktile Hülle entworfen, die ein Feedback über Kontakte mit der Umgebung und deren Intensität bereitstellt.

Der entwickelte taktile Sensor beruht auf einem intrinsischen Konzept. Die Umsetzung wurde an die Anforderungen und die Platzverhältnisse des Manipulators der zweiten Generation angepasst. Ein erster Prototyp wurde an einem Teil des Manipulators in einem nachgestellten Szenario im Labor erfolgreich getestet. Der einfache und günstige Aufbau des taktilen Sensors und die guten Resultate der Versuche bestätigten die Eignung des Konzepts.

6.2 Ausblick

Sowohl in Laborversuchen als auch beim Einsatz in der realen Umgebung eines Gewächshauses haben die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Manipulatoren ihre Praxistauglichkeit bewiesen. Auch die taktile Hülle, die als zusätzliche Sensorik für den Manipulator entwickelt wurde, konnte erfolgreich getestet werden. Bis zu einer kommerziellen Anwendung müssten die Prototypen jedoch weiter optimiert und an Industriestandards angepasst werden. Insbesondere bei der taktilen Hülle lassen sich durch eine Optimierung der Sensoranordnung und deren Ausrichtungen sowie durch die Verwendung von leichteren und steiferen Materialien Verbesserungen erzielen.

Die Idee des Projekts war, einen Roboter zu entwickeln, der in der Lage ist, die Früchte verschiedener Pflanzen zu ernten und darüber hinaus auch die Pflanzen zu pflegen. So sollte, dadurch dass ein Gerät verschiedenste Aufgaben bewältigt, einerseits die Entwicklung vereinfacht und andererseits das potenzielle Einsatzgebiet vergrößert werden.

Wie die vorgestellte Arbeit gezeigt hat, ist dieser Ansatz nicht ganz einfach umzusetzen. Die Anforderungen an die einzelnen Aufgaben unterscheiden sich teils erheblich. Die guten Resultate der Versuche ließen sich nur durch einen aufwendigen Manipulator mit neun Freiheitsgraden erzielen. Die Sensorik, die auf optischen Systemen basiert, konnte nur für die Detektierung der Früchte eingesetzt werden. Eine Umgebungskarte mit Pflanzen, die für eine bessere Navigation des Manipulators verwendet werden könnte, konnte nicht erstellt werden.

Aus der Sicht des Autors lassen sich die angestrebten vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des Manipulators nur realisieren, wenn das modulare System, das in dieser Arbeit vorgestellt wurde, weiterverfolgt und ausgebaut wird. Mit einem Baukastenprinzip, wie es in der Automobilindustrie gängige Praxis ist, könnten einfach und schnell Ernterobter für unterschiedlichste Aufgaben konfiguriert werden. Durch das Bereitstellen von Modulen zum individuellen Gestalten der Kinematik, der Sensorik und der End-Effektoren könnten Roboter aufgebaut werden, die ihre verschiedenen Aufgaben erfolgreich meistern, auch wenn sie leistungsmäßig nicht ganz an spezialisierte Roboter heranreichen sollten.

So könnte ein einziges, vielseitig einsetzbares modulares System die Neuentwicklung einer Vielzahl von Robotern überflüssig machen und selbst eine rasche Verbreitung finden. Daher sollte auf der Basis des modularen Konzepts, das in dieser Arbeit vorgestellt wurde, weitere Forschung im Bereich der Landwirtschaftsroboter betrieben werden.

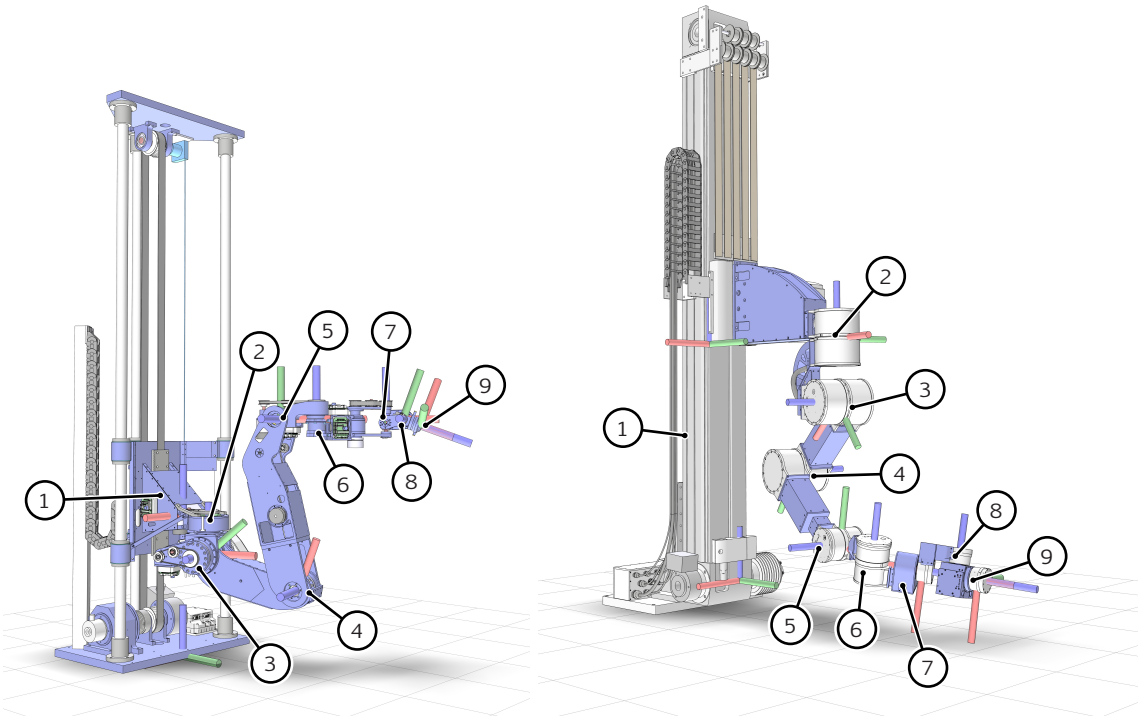
Abkürzungsverzeichnis

AD	Analog/Digital
AMW	arithmetischer Mittelwert
BLDC	bürstenloser Gleichstrommotor
CAN	Controller Area Network
DOF	Freiheitsgrad
HD	Harmonic Drive
KKF	Konstantkraftfeder
KMW	kubischer Mittelwert
QMW	quadratischer Mittelwert
SPI	Serial Peripheral Interface
TCP	Tool Center Point
WP	Arbeitspaket

Anhang A

Übersicht

Bild A.1 zeigt die beiden Manipulatoren der ersten und zweiten Generation, deren Gelenke und die Koordinatensystem in den Gelenken.



(a) Die erste Generation mit 9DOF (b) Die zweite Generation mit 9DOF

Bild A.1: Gelenke der Manipulatoren der ersten und zweiten Generation

In Tabelle A.1 sind die grundlegenden Eigenschaften der beiden Generation gegeneinander aufgestellt.

Tabelle A.1: Eigenschaften der Manipulatorgenerationen

	Generation 1	Generation 2
Höhe [mm]	1530	2046
Reichweite [mm]	1135	1230
Breite [mm]	480	480
Gewicht (gesamt) [kg]	69	120
Gewicht (Arm) [kg]	18	39
Spannung (Motoren) [V]	48	48
Spannung (Elektronik) [V]	24	24

Anhang B

System Beschreibung

Tabelle B.1 und B.2 zeigen die Eigenschaften der Gelenke bezogen auf Momente, Drehzahl und die Gelenkbeschränkungen.

Tabelle B.1: Eigenschaften der Gelenke der ersten Generation

Gelenk	Momente [Nm]		Drehzahl [1/min]	Drehbereich [°]
	nenn	max	max	
1[1]	303	1083	2,5	±450
2	14,5	36,9	50	±100
3	103,4	229	70	{-3; -120}
4	57,4	229	35	{-140; 125}
5	30	64	35	±130
6	7,7	19	78	±90
7	7,7	19	94	±115
8	7,7	19	45	±90
9	3,3	4,8	85	±180

[1] Werte der Linearachse in [N], [m/s] bzw. [mm].

Tabelle B.2: Eigenschaften der Gelenke der zweiten Generation

Gelenk	Momente [Nm]		Drehzahl [1/min]	Drehbereich [°]
	nenn	max	max	
1[1]	303	1083	2,5	±550
2	71,5	216	60	±150
3	143	333	30	{-30; 180}
4	143	333	30	±155
5	28	57	50	±130
6	28	57	50	±130
7	7,7	19	85	±160
8	7,7	19	85	±120
9	7,7	19	85	±160

[1] Werte der Linearachse in [N], [m/s] bzw. [mm].

In Tabelle B.3 und B.4 sind die Typbezeichnungen der Motoren, Getriebe und der Motorsteuerungen aufgelistet.

Tabelle B.3: Eigenschaften der Gelenke der ersten Generation

Gelenk	Motor		Getriebe		Controller[5]	
1	TQ[1]	115x50	–	–	Drum	50 A
2	MM[2]	EC-i 40	HD[4]	CSD-17-100	Whistle	50 A
3	MM	EC45	HD	CSG-25-160	Whistle	10 A
4	MM	EC45	HD	CSG-25-160	Whistle	10 A
5	MM	EC-max 40	HD	CSD-20-160	Whistle	10 A
6	MM	EC-i40	HD	CSD-14-100	Whistle	10 A
7	MM	EC32-flat	HD	CSD-14-100	Whistle	2,5 A
8	AM[1]	HT01001	HD	CSD-14-100	Whistle	2,5 A
9	AM	HT00801	HD	HFUC-8-100	Whistle	1 A

[1] TQSystems
[2] Maxon Motor
[3] Allied Motion Technologies
[4] Harmonic Drive
[5] Motorsteuerungen von Elmo Motion Control aus der SimplIQ Reihe.

Tabelle B.4: Eigenschaften der Gelenke der zweiten Generation

Gelenk	Motor		Getriebe		Controller[5]	
1	TQ[1]	115x50	–	–	Cello	35 A
2	TQ	85x13	HD[4]	CPL-32-50	Whistle	20 A
3	TQ	85x13	HD	CPL-32-100	Whistle	20 A
4	TQ	85x13	HD	CPL-32-100	Whistle	20 A
5	TQ	50x08	HD	CSD-20-100	Whistle	10 A
6	TQ	50x08	HD	CSD-20-100	Whistle	10 A
7	TQ	38x06	HD	CSD-14-100	Whistle	5 A
8	TQ	38x06	HD	CSD-14-100	Whistle	5 A
9	TQ	38x06	HD	CSD-14-100	Whistle	5 A

[1] TQSystems
[2] Harmonic Drive
[3] Motorsteuerungen von Elmo Motion Control aus der Gold Reihe.

Die Eigenschaften des NDI Polaris Tracking-Systems sind in Tabelle B.5 zu sehen.

Tabelle B.5: Eigenschaften des NDI Polaris Tracking Systems

	Messvolumen	Messgenauigkeit	Abtastrate
Pyramide	1,627 m^3	0,35 mm	60 Hz

Anhang C

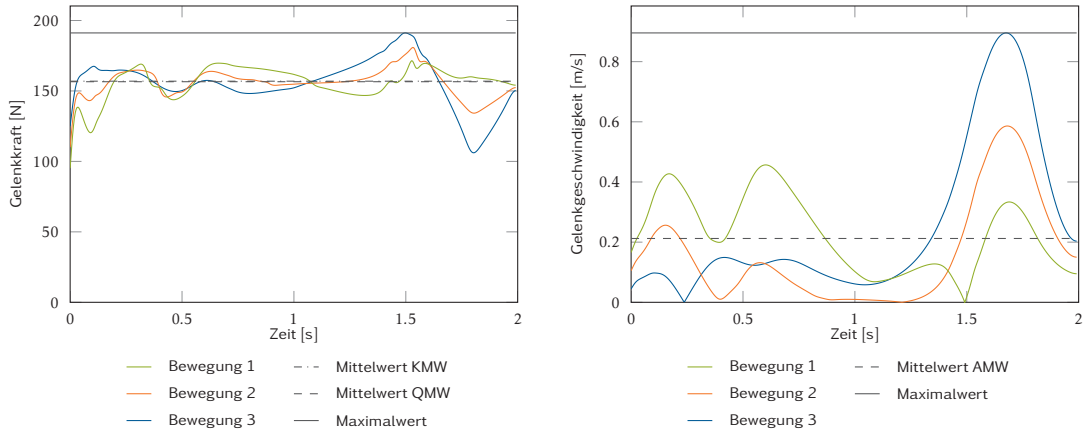
Auslegung

Die Auslegung der Manipulatoren stützt sich auf dynamische Simulationen die mit Modell der Manipulatoren durchgeführt wurden.

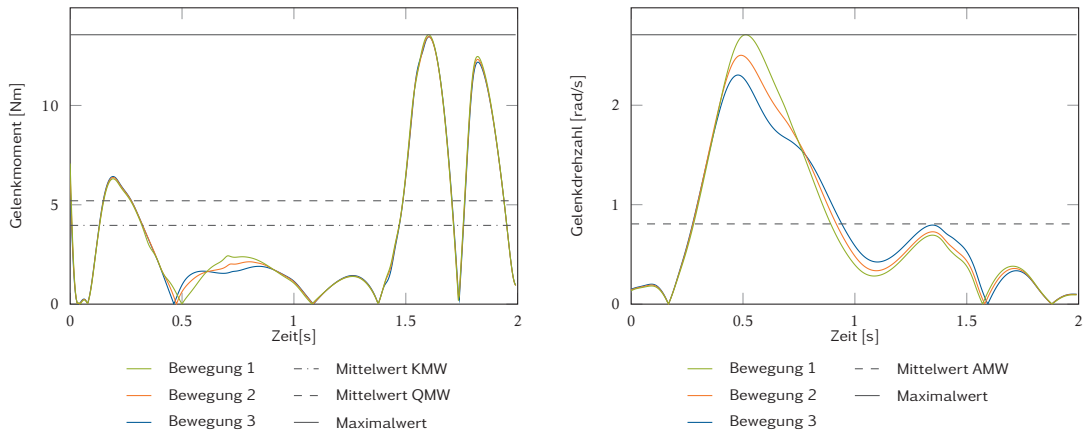
Generation 1

Im Folgenden sind die Momente und Drehzahlen der neun Gelenke des Manipulators der ersten Generation für drei beispielhafte Bewegungen dargestellt. Darüber hinaus sind der quadratische (QMW) und der kubische (KMW) Mittelwert und das Maximum der Momente sowie die mittlere (AMW) und maximale Drehzahl eingezeichnet.

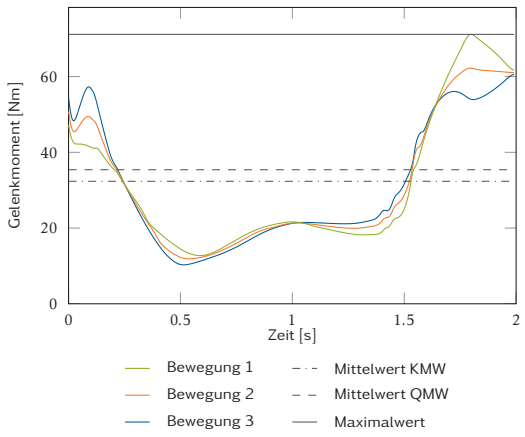
Gelenk 1

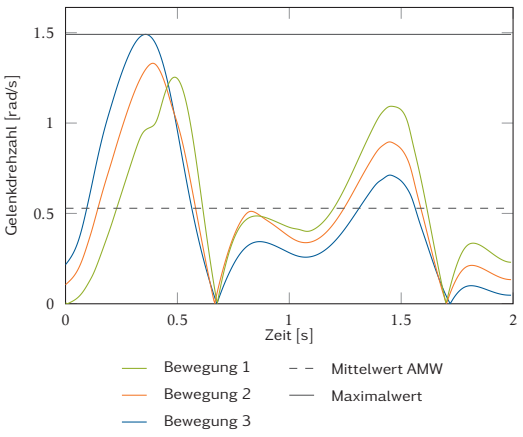


Gelenk 2

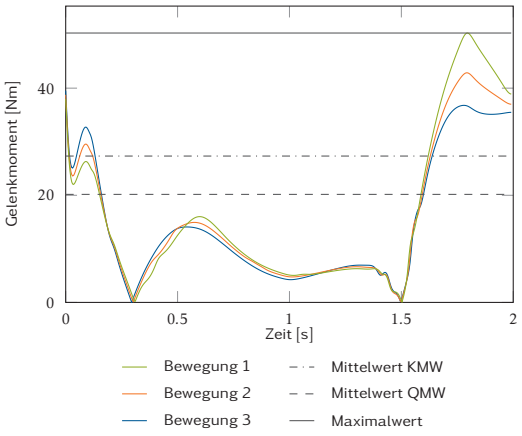


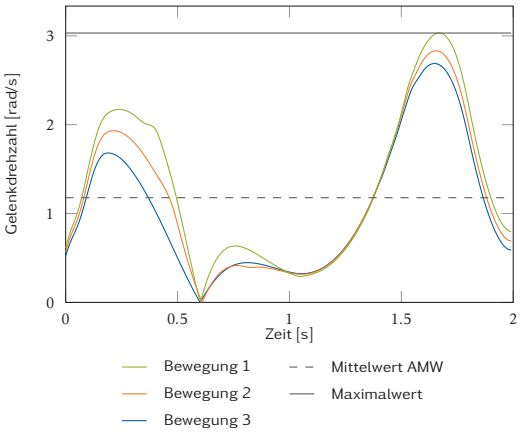
Gelenk 3



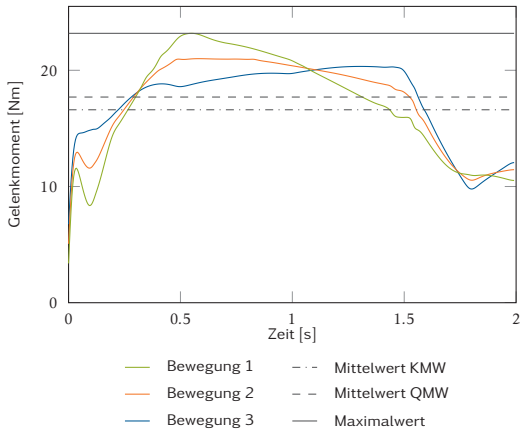


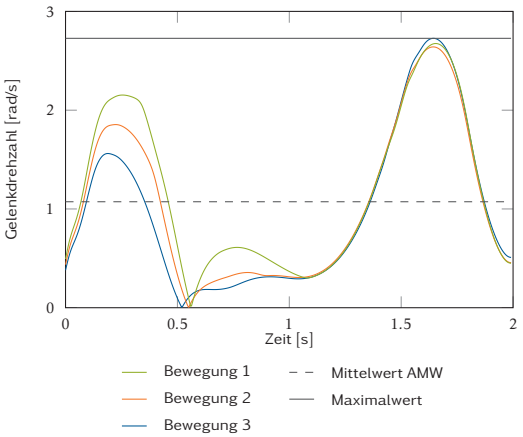
Gelenk 4



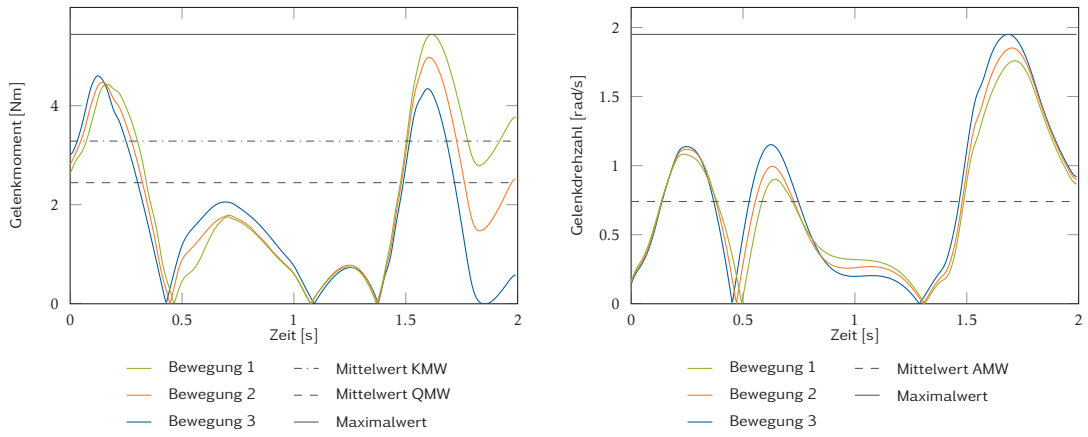


Gelenk 5

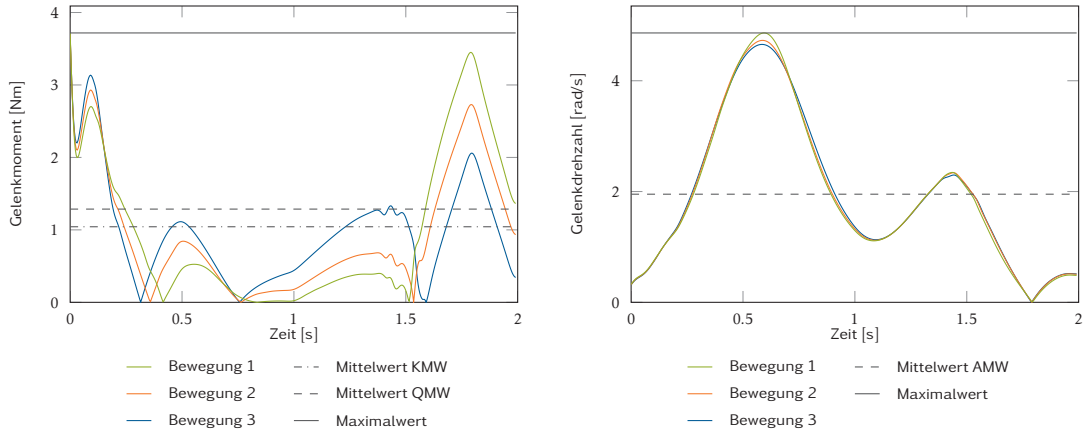




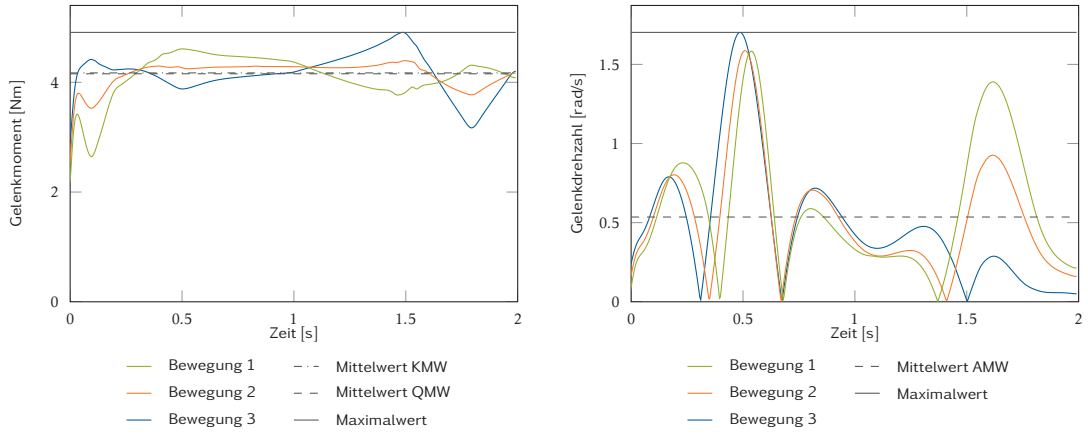
Gelenk 6



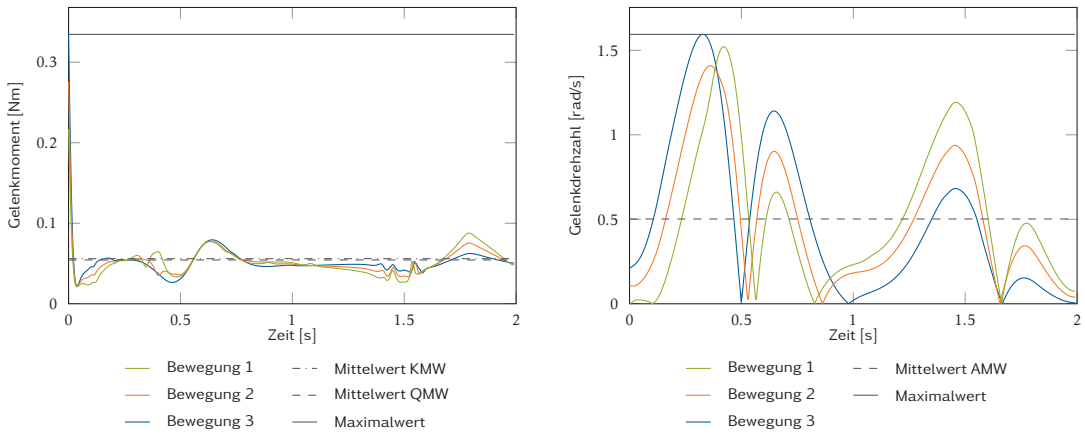
Gelenk 7



Gelenk 8



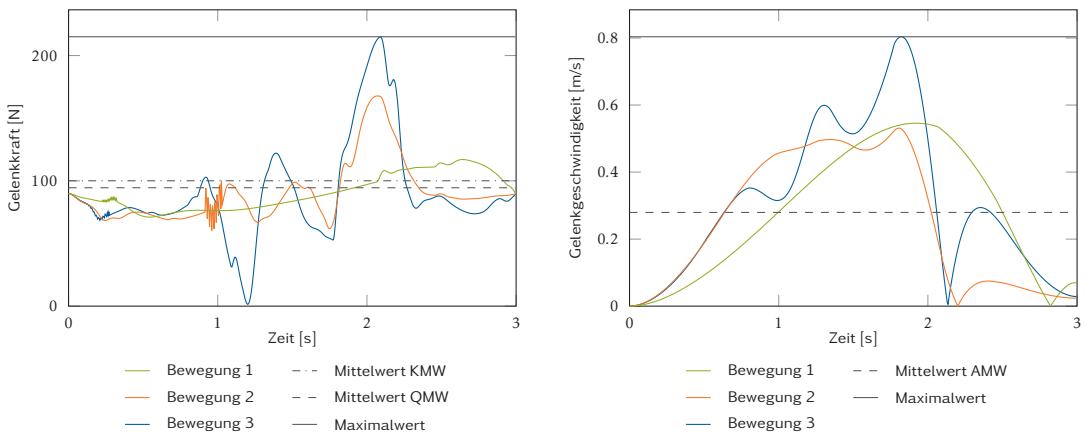
Gelenk 9



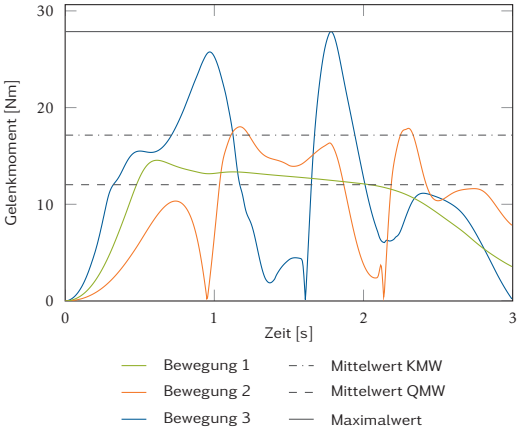
Generation 2

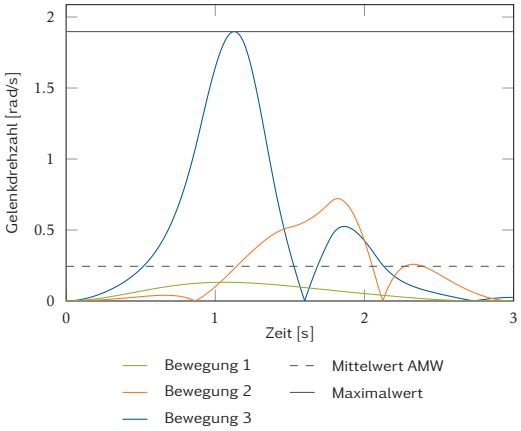
Im Folgenden sind die Momente und Drehzahlen der neun Gelenke des Manipulators der zweiten Generation für drei beispielhafte Bewegungen dargestellt. Darüber hinaus sind der quadratische (QMW) und der kubische (KMW) Mittelwert und das Maximum der Momente sowie die mittlere (AMW) und maximale Drehzahl eingezeichnet.

Gelenk 1

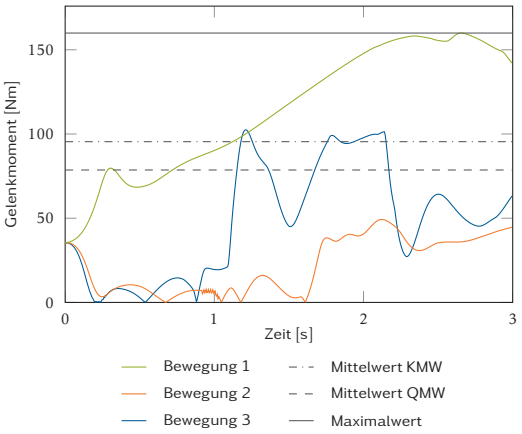


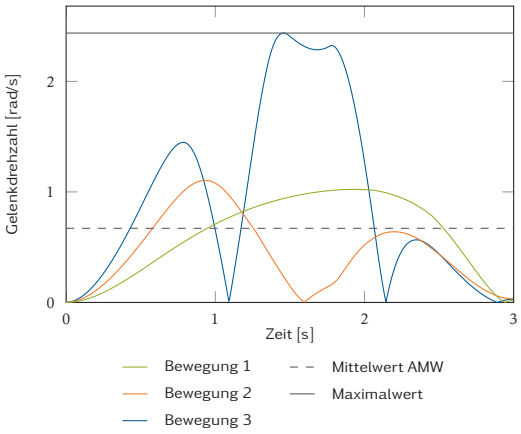
Gelenk 2



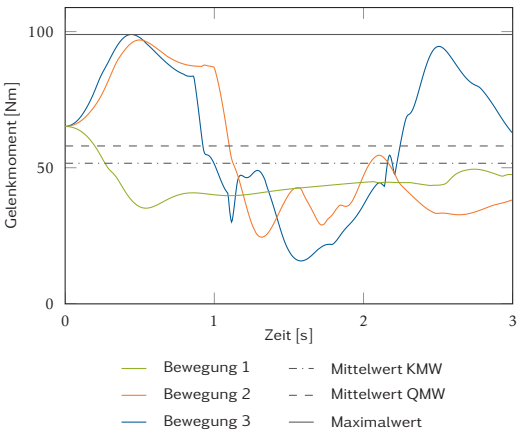


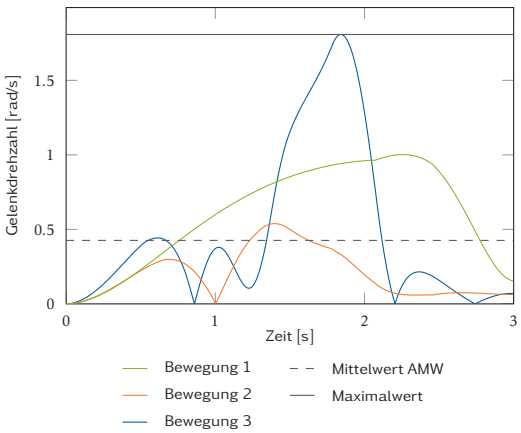
Gelenk 3



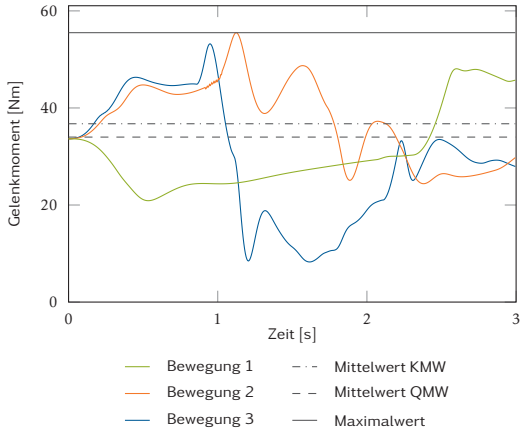


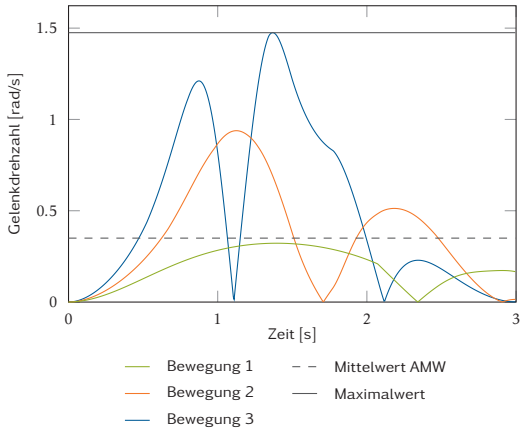
Gelenk 4



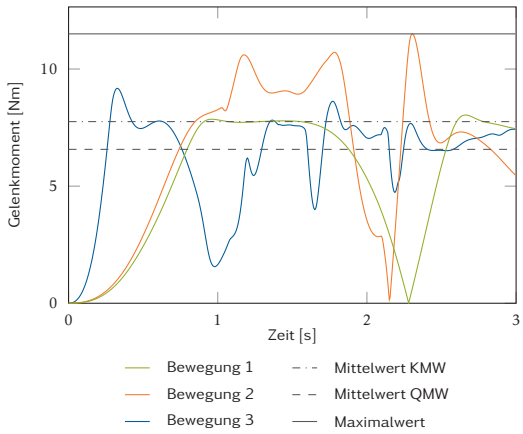


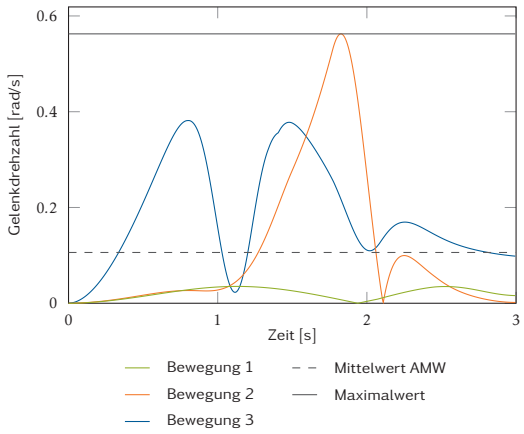
Gelenk 5



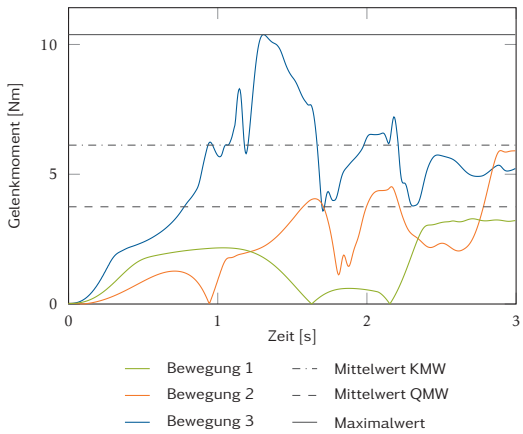


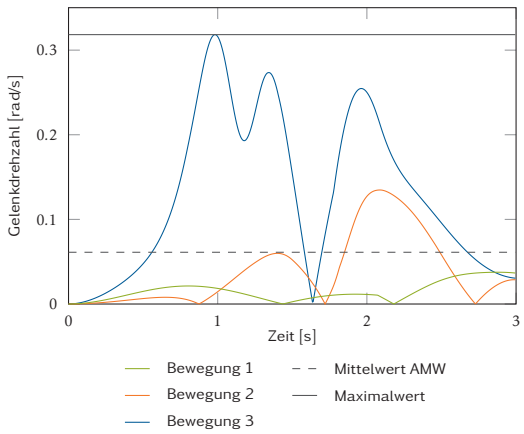
Gelenk 6



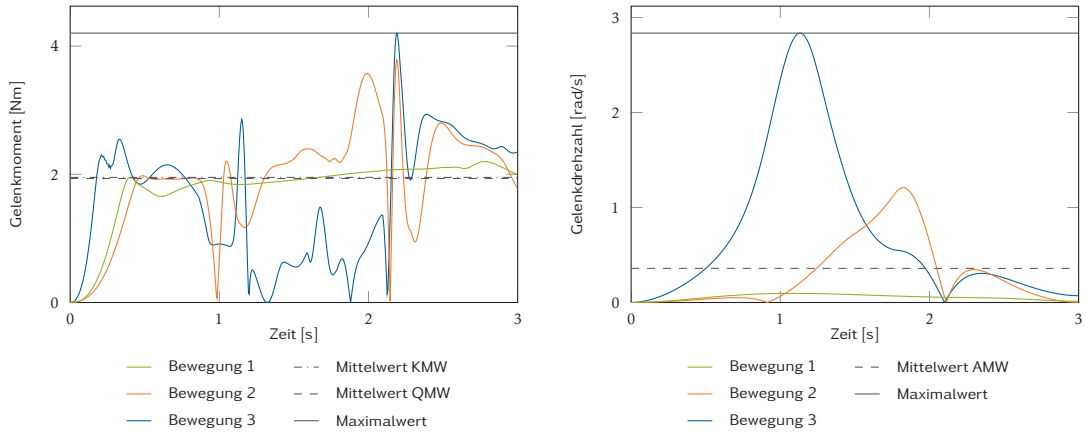


Gelenk 7





Gelenk 8



Gelenk 9

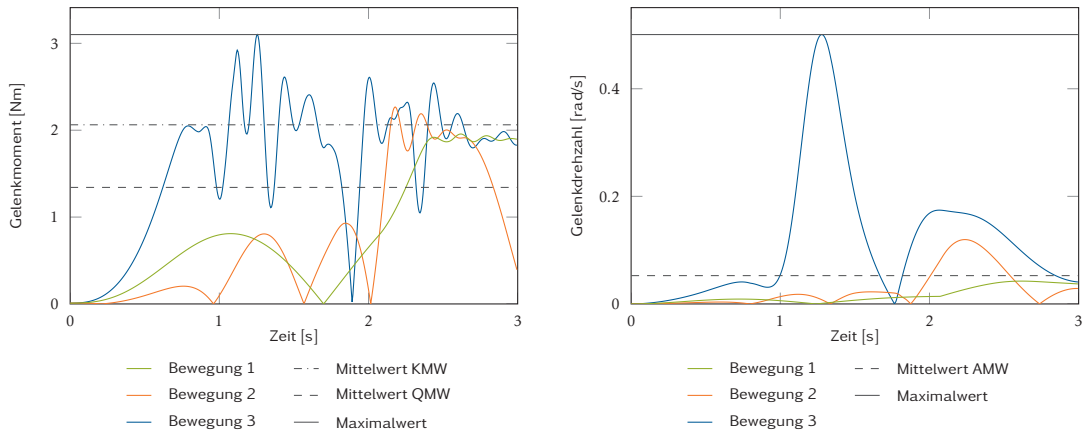


Bild C.1 und C.2 zeigen die Abweichung der Messung von den Sollwerten in den drei Raumrichtungen (vgl. Kapitel 3.6.1 und 4.7.2).

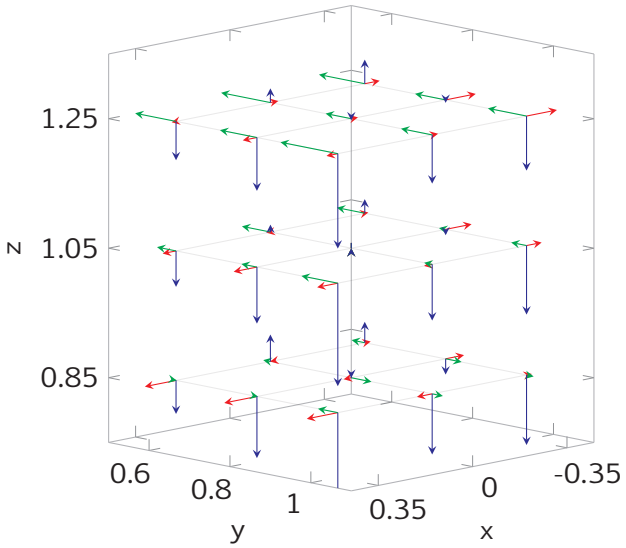


Bild C.1: Generation 1: Abweichung der Messwerte in x, y, z-Richtung von den Sollwerten

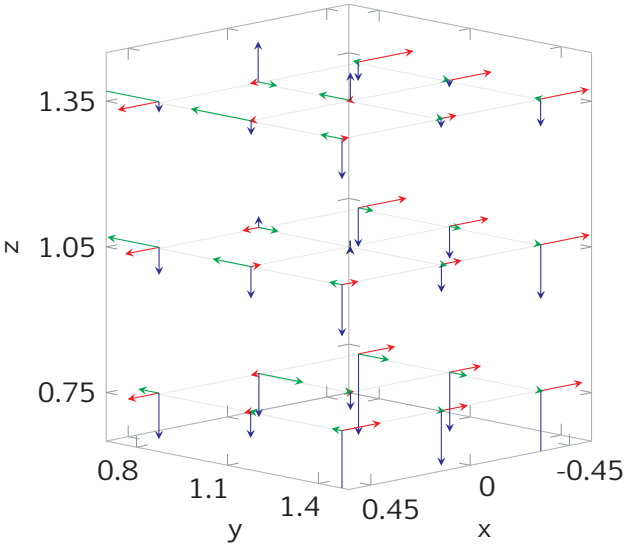


Bild C.2: Generation 2: Abweichung der Messwerte in x, y, z-Richtung von den Sollwerten

Literatur

Albu-Schäffer, A.; Eiberger, O.; Fuchs, M.; Grebenstein, M.; Haddadin, S.; Ott, C.; Stemmer, A.; Wimböck, T.; Wolf, S.; Borst, C.; Hirzinger, G. (2011). Anthropomorphic soft robotics - From torque control to variable intrinsic compliance. In: *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 70:185–207.

Aljanobi, A. A.; Al-Hamed, S. A.; Al-Suhaibani, S. A. (2010). A setup of mobile robotic unit for fruit harvesting. In: *19th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2010 - Proceedings*, pages 105–108.

Allied (2011). *HT Series High Torque Brushless Torque Motors*. Allied Motion Technologies, Dayton, Ohio USA, Produktinformation.

Aoyagi, S.; Kohama, A.; Nakata, Y.; Hayano, Y.; Suzuki, M. (2010). Improvement of robot accuracy by calibrating kinematic model using a laser tracking system -compensation of non-geometric errors using neural networks and selection of optimal measuring points using genetic algorithm-. In: *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, pages 5660–5665.

Arima, S.; Kondo, N. (1999). Cucumber Harvesting Robot and Plant Training System. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 11(3):208–212.

Avago (2012). *Motion Control Encoders in Electrical Motor Systems*. Avago Technologies, San José, California USA, Produktinformation (Englisch).

Babu Sivaraman; Thomas F Burks (2007). Robot Manipulator for Citrus Harvesting: Configuration Selection. In: *2007 Minneapolis, Minnesota, June 17-20, 2007*.

Bac, C. W.; Hemming, J.; Barth, R.; Wais, E.; Henten, E. J. V. (2015). Performance evaluation of a harvesting robot for sweet-pepper. *Autonomous Robots (submitted)*.

Bac, C. W.; van Henten, E. J.; Hemming, J.; Edan, Y. (2014). Harvesting Robots for High-value Crops: State-of-the-art Review and Challenges Ahead. *Journal of Field Robotics*.

Baeten, J.; Donné, K.; Boedrij, S.; Beckers, W.; Claesen, E. (2008). Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester. In: *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 42:531–539.

Baumer (2011). *Drehgeber und Winkelsensorik*. Baumer GmbH, Friedberg, Deutschland, Produktinformation.

Baur, J. (2014). *Agricultural Robots*. Dissertation, Technische Universität München.

Baur, J.; Dendorfer, S.; Pfaff, J.; Schuetz, C.; Buschmann, T.; Ulbrich, H. (2014a). Experimental Friction Identification in Robot Drives. In: *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

Baur, J.; Pfaff, J.; Schuetz, C.; Ulbrich, H. (2013). Dynamic modeling and realization of an agricultural manipulator. In: *Proceedings of XV International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, DINAME*.

Baur, J.; Schuetz, C.; Pfaff, J.; Ulbrich, H. (2014b). Modeling and Control of Pneumatic Artificial Muscles in an Antagonistic Set-up. In: *Joint International Conference on Multibody System Dynamics*.

Bicchi, A.; Salisbury, J. K.; Brock, D. L. (1993). Contact sensing from force measurements. *The International Journal of Robotics Research*, 12:249–262.

Bicchi, A.; Salisbury, J. K.; Dario, P. (1989). Augmentation of grasp robustness using intrinsic tactile sensing. *International Conference on Robotics and Automation*, pages 302–307.

Boston Dynamics (2013). Boston Dynamics : Dedicated to the Science and Art of How Things Move.

Bundeszentrale für politische Bildung; Destatis; Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung; Sozio-oekonomisches Panel; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin (2013). Datenreport 2013. Technical report.

Campion, G.; Fiorini, P.; Martelli, S. (2002). Robot calibration using mobile camera. In: *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1(May):141–146.

Castelli, F. (2002). An integrated tactile-thermal robot sensor with capacitive tactile array. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(1):85–90.

Daerden, F.; Lefeber, D. (2000). Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation. *European journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 47:10–21.

De Luca, A.; Mattone, R. (2005). Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005:999–1004.

D'Esnon, A.; Rabatel, G.; Pellenc, R.; Journeau, A.; Aldon, M. (1987). Magali: a self-propelled robot to pick apples. *American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection).*, no. fiche:13.

Deutscher Bauernverband (2014). Situationsbericht 2014/15. Technical report.

Devol Jr., G. C. (1961). Programmed article transfer. Patent US2988237 A.

Duchaine, V.; Lauzier, N.; Baril, M.; Lacasse, M.-A.; Gosselin, C. (2009). A flexible robot skin for safe physical human robot interaction. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3676–3681.

Eberman, B. S.; Salisbury, J. K. (1990). Determination of Manipulator Contact Information from Joint Torque Measurements. In: *Experimental Robotics I*, volume 139, chapter Lecture No, pages 463–473. Springer Berlin Heidelberg.

Edan, Y. (1995). Design of an autonomous agricultural robot. *Applied Intelligence*, 5(1):41–50.

Edan, Y.; Rogozin, D.; Flash, T.; Miles, G. E. (2000). Robotic melon harvesting. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16:831–835.

Elmo (2011). *Elmo Motion Control Catalog*. Elmo Motion Control Ltd., Petach-Tikva, Israel, Produktinformation (Englisch).

EtherCAT Technology Group (2014). EtherCAT - Der Ethernet-Feldbus. Technical report.

Festo (2013). *Zahnriemenachsen EGC-TB-KF, mit Kugelumlaufführung*. Festo AG & Co. KG, Esslingen, Deutschland, Produktinformation.

Flórez, J. A.; Velásquez, A. (2010). Calibration of force sensing resistors (fsr) for static and dynamic applications. In: *2010 IEEE ANDESCON Conference Proceedings, ANDESCON 2010*, pages 2–7.

Foglia, M. M.; Reina, G. (2006). Agricultural robot for radicchio harvesting. *J. Field Robotics*, 23(6-7):363–377.

Fumagalli, M.; Ivaldi, S.; Randazzo, M.; Natale, L.; Metta, G.; Sandini, G.; Nori, F. (2012). Force feedback exploiting tactile and proximal force/torque sensing: Theory and implementation on the humanoid robot iCub. *Autonomous Robots*, 33(4):381–398.

Gauchel, W.; Saller, S. (2012). Adaptive gripper jaws for high-value crops harvesting. In: *8th International Conference on Fluid Power (8th IFK) in Dresden*.

Gienger, M. (2005). *Entwurf und Realisierung einer zweibeinigen Laufmaschine*. Fortschrittberichte VDI, Reihe 1 378. Düsseldorf : VDI-Verl.

Gillis, K. P.; Giles, D. K.; Slaughter, D. C.; Downey, D. (2001). Injection and fluid handling system for machine-vision controlled spraying. *ASAE paper No. 1114*.

Gombert, B.; Hirzinger, G.; Plank, G.; Schedl, M. (1994). Modular concepts for a new generation of light weight robots. In: *Proceedings of IECON'94 - 20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 3.

Guo, J.; Zhao, D. A.; Ji, W.; Xia, W. (2010). Design and control of the open apple-picking-robot manipulator. In: *Proceedings - 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, ICCSIT 2010*, 2:5–8.

Han, K.-S.; Kim, S.-C.; Lee, Y.-B.; Kim, S.-C.; Im, D.-H.; Choi, H.-K.; Hwang, H. (2012). Strawberry Harvesting Robot for Bench-type Cultivation. *Journal of Biosystems Engineering*, 37(1):65–74.

HarmonicDrive (2011a). *Produktbeschreibung CSD-2A*. Harmonic Drive AG, Limburg/Lahn, Deutschland, Produktinformation.

HarmonicDrive (2011b). *Produktbeschreibung CSG-2A*. Harmonic Drive AG, Limburg/Lahn, Deutschland, Produktinformation.

HarmonicDrive (2011c). *Produktbeschreibung HFUC-2A*. Harmonic Drive AG, Limburg/Lahn, Deutschland, Produktinformation.

Harrell, R. C.; Adsit, P. D.; Pool, T. A.; Hoffman, R. (1990). The Florida Robotic Grove-LAB. *Transactions of the ASAE*, 33(2):391–399.

Hayashi, S.; Ganno, K.; Ishii, Y.; Tanaka, I. (2002). Robotic Harvesting System for Eggplants. *JARQ*, 36(3):163–168.

Hayashi, S.; Shigematsu, K.; Yamamoto, S.; Kobayashi, K.; Kohno, Y.; Kamata, J.; Kurita, M. (2010). Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test. *Biosystems Engineering*, 105:160–171.

Hayashi, S. ; Ota, T. ; Kubota, K. ; Ganno, K. ; Kondo, N. (2005). Robotic Harvesting Technology for Fruit Vegetables in Protected Horticultural Production. In: *FRUTIC 05, Information and technology for sustainable fruit and vegetable production*, pages 227–236.

Hemming, J.; Bac, W.; Van Tuijl, B. (2011). Crops Deliverable 5.1. Technical report.

Hemming, J.; Van Tuijl, B.; Bac, W.; Barth, R. (2013). Crops Deliverable 5.5. Technical report.

Hirai, K.; Hirose, M.; Haikawa, Y.; Takenaka, T. (1998). The development of Honda humanoid robot. *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, 2.

Höbarth, W.; Gattringer, H.; Staufer, P.; Bremer, H. (2011). The Lightweight Robot ElRob: Interesting Aspects in Modeling and Control. *PAMM*, 11:47–48.

Honeywell (2014). *FSS-SMT Series - Low Profile Force Sensor*. Honeywell International Inc., Golden Valley, Minnesota USA, Produktinformation (Englisch).

Igus (2010). *drylin Antriebstechnik*. igus GmbH, Köln, Deutschland, Produktinformation.

Interlink (2014). *FSR 400 Series Data Sheet*. Interlink Electronics Inc., Camarillo California USA, Produktinformation (Englisch).

Irie, N.; Taguchi, N. (2014). Asparagus Harvesting Robot. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 26(2).

Irie, N.; Taguchi, N.; Horie, T.; Ishimatsu, T. (2009). Asparagus harvesting robot coordinated with 3-D vision sensor. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*.

Iwata, H.; Hoshino, H.; Morita, T.; Sugano, S. (2001). Force detectable surface covers for humanoid robots. In: *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2:1205–1210.

Kane, B. J.; Cutkosky, M. R.; Kovacs, G. T. A. (2000). Traction stress sensor array for use in high-resolution robotic tactile imaging. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 9(4):425–434.

Kaneko, K.; Kanehiro, F.; Kajita, S.; Yokoyama, K.; Akachi, K.; Kawasaki, T.; Ota, S.; Isozumi, T. (2002). Design of prototype humanoid robotics platform for HRP. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3:2431–2436.

Kendrion (2011a). *Federdruck-Ein-/Lamellenbremse*. Kendrion Binder Magnete GmbH, Villingen-Schwenningen, Deutschland, Produktinformation.

Kendrion (2011b). *High Torque - Permanentmagnetbremse*. Kendrion Binder Magnete GmbH, Villingen-Schwenningen, Deutschland, Produktinformation.

Kitamura, S.; Oka, K. (2005). Recognition and cutting system of sweet pepper for picking robot in greenhouse horticulture. In: *IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005*, 4:1807–1812.

Kitamura, S.; Oka, K. (2006). Improvement of the ability to recognize sweet peppers for picking robot in greenhouse horticulture. In: *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, pages 353–356.

Kondo, N.; Monta, M.; Fujiura, T. (1996a). Basic constitution of a robot for agricultural use. *Advanced Robotics*, 10(4):339–353.

Kondo, N.; Monta, M.; Fujiura, T. (1996b). Fruit harvesting robots in Japan. *Advances in space research : the official journal of the Committee on Space Research (COSPAR)*, 18:181–184.

Kondo, N.; Ting, K. C. (1998a). *Robotics for Bioproduction Systems*. American Society of Agricultural Engineers.

Kondo, N.; Ting, K. C. (1998b). Robotics for Plant Production. *Artificial Intelligence Review*, 12:227–243.

Krishnan, R. (1987). Selection Criteria for Servo Motor Drives. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-23:270–275.

Laffranchi, M.; Tsagarakis, N.; Caldwell, D. G. (2011). A compact compliant actuator (CompAct™) with variable physical damping. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4644–4650.

Lee, H. K.; Chang, S. I.; Yoon, E. (2006). A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 15(6):1681–1686.

Lei, S. L. S.; Jingtai, L. J. L.; Weiwei, S. W. S.; Shuihua, W. S. W.; Xingbo, H. X. H. (2004). Geometry-based robot calibration method. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, 2:1907–1912.

Li, Y.; Xia, C.; Lee, J. (2009). Vision-based pest detection and automatic spray of greenhouse plant. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 920–925.

Lohmeier, S. (2010). *Design and Realization of a Humanoid Robot for Fast and Autonomous Bipedal Locomotion*. Dissertation, Technische Universität München.

Lohmeier, S.; Buschmann, T.; Ulbrich, H. (2009). Humanoid robot LOLA. In: *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, pages 775–780.

Lohmeier, S.; Buschmann, T.; Ulbrich, H.; Pfeiffer, F. (2006). Modular joint design for performance enhanced humanoid robot LOLA. In: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, pages 88–93. IEEE.

Mandow, A.; Gómez-de Gabriel, J. M.; Martínez, J. L.; Muñoz, V. F.; Ollero, A.; García-Cerezo, A. (1996). The autonomous mobile robot AURORA for greenhouse operation. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 3(4):18–28.

Matsumaru, T. (1995). Design and control of the modular robot system: TOMMS. In: *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:2125–2131.

Maxon (2011). *Programm 2011/12 - Hochpräzise Antriebe und Systeme*. maxon mortor gmbh, München, Deutschland, Produktinformation.

Mittendorfer, P.; Cheng, G. (2011). Humanoid multimodal tactile-sensing modules. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(3):401–410.

Mittendorfer, P.; Cheng, G. (2012). Integrating discrete force cells into multimodal artificial skin. In: *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pages 847–852.

Monta, M.; Kondo, N.; Shibano, Y. (1995). Agricultural robot in grape production system. In: *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2504–2509.

Mukai, T.; Onishi, M.; Odashima, T.; Hirano, S.; Luo, Z. (2008). Development of the tactile sensor system of a human-interactive robot \glqqRI-MAN\grqq. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(2):505–512.

Muscato, G.; Prestifilippo, M.; Abbate, N.; Rizzuto, I. (2005). A prototype of an orange picking robot: past history, the new robot and experimental results. *Industrial Robot: An International Journal*, 32(2):128–138.

Netzer (2012). *Moving Precisely With You*. Netzer Precision Motion Sensors Ltd, D.N. Misgav, Israel, Produktinformation (Englisch).

Nevins, J. L.; Whitney, D. E. (1972). The Force Vector Assembler Concept. In: *On Theory and Practice of Robots and Manipulators*, pages 273–288. Springer Berlin Heidelberg.

Nguyen, T. T.; Kayacan, E.; De Baedemaeker, J.; Saeys, W. (2013). Task and motion planning for apple harvesting robot. In: *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 4:247–252.

Nguyen, T. T.; Saeys, W.; de Baerdemaeker, J. (2011). Crops Deliverable 6.1. Technical report.

Noda, T.; Miyashita, T. (2012). Super-flexible skin sensors embedded on the whole body, self-organizing based on haptic interactions. In: *Human-Robot Interaction in Social Robotics*, pages 294–301.

Oberti, R.; Marchi, M.; Tirelli, P.; Calcante, A.; Iriti, M.; Hocevar, M.; Baur, J.; Pfaff, J.; Schütz, C.; Ulbrich, H. (2014). Crops agricultural robot: Application to selective spraying of grapevine's diseases. In: *Proceedings of the Second RHEA International Conference on Robotics and associated High-technologies and Equipment for Agriculture*, pages 49–58.

Oberti, R.; Marchi, M.; Tirelli, P.; Calcante, A.; Iriti, M.; Hočevar, M.; Baur, J.; Pfaff, J.; Schütz, C.; Ulbrich, H. (2013). Selective spraying of grapevine's diseases by a modular agricultural robot. *Journal of agricultural engineering*, 44:149–153.

Orin, D. E.; Schrader, W. W. (1984). Efficient Computation of the Jacobian for Robot Manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 3(4):66–75.

Osterman, A.; Oberti, R.; Hočevar, M.; Tirelli, P.; Marchi, M.; Calcante, A.; Malneršič, A.; Godeša, T. (2013). Crops Deliverable 7.6. Technical report.

Pedersen, S. M.; Fountas, S.; Have, H.; Blackmore, B. S. (2006). Agricultural robots—system analysis and economic feasibility. *Precision Agriculture*, 7(4):295–308.

Pekkeriet, E. J. (2011). *CROPS project deliverable 12.1: Economic viability for each application*. Wageningen UR Greenhouse Horticulture, Wageningen, The Netherlands.

Peterson, D.; Bennedsen, B. S.; Anger, W. C.; Wolford, S. D. (1999). A systems approach to robotic bulk harvesting of apples. *Transactions of the ASAE*, 42(4):871–876.

Pfeiffer, F.; Schindler, T. (2014). *Einfuehrung in die Dynamik*. Springer, Berlin.

Pilarski, T.; Happold, M.; Pangels, H.; Ollis, M.; Fitzpatrick, K.; Stentz, A. (2002). The Demeter system for automated harvesting. *Autonomous Robots*, 13:9–20.

Reed, J.; Miles, S.; Butler, J.; Baldwin, M.; Noble, R. (2001). AE—Automation and Emerging Technologies. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(1):15–23.

Richter, K.; Pfeiffer, F. (1991). A flexible link manipulator as a force measuring and controlling unit. In: *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1214–1219.

R+W (2012). *Metallbalgkupplungen*. R+W Antriebselemente, Klingenberg, Deutschland, Produktinformation.

Said, S.; Hassan, M.; Sulaiman, S. (2000). Flexible modular robotics link design. In: *2000 TENCON Proceedings. Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium (Cat. No.00CH37119)*, 2:162–166. Ieee.

Sakai, S.; Iida, M.; Osuka, K.; Umeda, M. (2008). Design and control of a heavy material handling manipulator for agricultural robots.

Sakai, S.; Iida, M.; Umeda, M. (2002). Heavy material handling manipulator for agricultural robot. In: *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, 1:1062–1068.

Salemi, B.; Moll, M.; Shen, W. M. (2006). SUPERBOT: A deployable, multifunctional, and modular self-reconfigurable robotic system. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3636–3641.

Salisbury, J. K. (1984). Interpretation of contact geometries from force measurements. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:240–247.

Sammons, P. J.; Tomonari, F.; Bulgin., A. (2005). Autonomous pesticide spraying robot for use in a greenhouse. In: *Australian Conference on Robotics and Automation*, pages 1–9.

Sarig, Y. (1993). Robotics of Fruit Harvesting: A State-of-the-art Review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54:265–280.

Scarfe, A. J.; Flemmer, R. C.; Bakker, H. H.; Flemmer, C. L. (2009). Development of an autonomous kiwifruit picking robot. In: *ICARA 2009 - Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents*, pages 380–384.

Schertz, C. E.; Brown, G. K. (1968). Basic Considerations in Mechanizing Citrus Harvest. *Transactions of the ASAE*, 11(3):343–346.

Schiavi, R.; Grioli, G.; Sen, S.; Bicchi, A. (2008). VSA-II: a novel prototype of variable stiffness actuator for safe and performing robots interacting with humans. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2171–2176. Ieee.

Schmitz, A.; Maiolino, P.; Maggiali, M.; Natale, L.; Cannata, G.; Metta, G. (2011). Methods and technologies for the implementation of large-scale robot tactile sensors. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(3):389–400.

Schmitz, D.; Khosla, P.; Kanade, T. (1998). The CMU Reconfigurable Modular Manipulator System. Technical report, Robotics Institute, Carnegie Mellon University.

Schuetz, C.; Pfaff, J.; Sygulla, F.; Rixen, D.; Ulbrich, H. (2015). Obstacle Avoidance for Redundant Manipulators Using Tactile Feedback. In: *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (eingereicht)*.

Schunk (2011). *Leichtbaumodul PRL*. Schunk GmbH & Co.KG, Produktinformation.

Sensinger, J. W.; Lipsey, J. H. (2012). Cycloid vs. harmonic drives for use in high ratio, single stage robotic transmissions. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4130–4135.

Sensitec (2011). *Incremental Sensor Module with optional Reference*. Sensitec GmbH, Lahnau, Deutschland, Produktinformation (Englisch).

Shapiro, A.; Korkidi, E.; Demri, A.; Ben-Shahar, O.; Riemer, R.; Edan, Y. (2009). Toward elevated agrobotics: Development of a scaled-down prototype for visually guided date palm tree sprayer. *Journal of Field Robotics*, 26(6-7):572–590.

Siciliano, B.; Khatib, O. (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Sick (2010). *EcoLine-Seilzug-Encoder für Messlängen bis 5 m*. SICK AG, Waldkirch, Deutschland, Produktinformation.

Sick (2013). *TTK70 SSI - Klein, hochauflösend – der Absolut-Linear-Encoder*. SICK AG, Waldkirch, Deutschland, Produktinformation.

Sivaraman, B. (2006). *Design and development of a robot manipulator for citrus harvesting*. Ph.d. thesis, University of Florida.

Son, J. S.; Cutkosky, M. R.; Howe, R. D. (1995). Comparison of contact sensor localization abilities during manipulation. In: *1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings.*, 2:96–103. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

Sproewitz, A.; Billard, A.; Dillenbourg, P.; Ijspeert, A. J. (2009). Roombots-mechanical design of self-reconfiguring modular robots for adaptive furniture. In: *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4259–4264.

Tanigaki, K.; Fujiura, T.; Akase, A.; Imagawa, J. (2008). Cherry-harvesting robot. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63:65–72.

The International Federation of Robotics (IFR) (2012). World Robotics 2012 - Industrial Robots. Technical report.

The International Federation of Robotics (IFR) (2014). World Robotics Industrial Robots. Technical report, IFR Statistical Department.

Tillett, N. (1993). Robotic Manipulators in Horticulture: A Review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 55:89–105.

Tise, B. (1988). A compact high resolution piezoresistive digital tactile sensor. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 760–764. IEEE Comput. Soc. Press.

TQSystems (2012). *Leichtbau Torque-Servomotoren*. TQ Systems GmbH, Seefeld, Deutschland, Produktinformation.

Tsuji, T.; Kaneko, Y.; Abe, S. (2009). Whole-body force sensation by force sensor with shell-shaped end-effector. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(5):1375–1382.

Ulbrich, H. (1996). *Maschinendynamik*. Teubner Studienbücher.

United Nations (2013). World Population Prospects The 2012 Revision. Technical report, United Nations.

Ünsal, C.; Kiliççöte, H.; Khosla, P. K. (2001). Modular self-reconfigurable bipartite robotic system: Implementation and motion planning. *Autonomous Robots*, 10:23–40.

Van Den Heever, D. J.; Schreve, K.; Scheffer, C. (2009). Tactile sensing using force sensing resistors and a super-resolution algorithm. *IEEE Sensors Journal*, 9(1):29–35.

Van Henten, E. J.; Hemming, J.; Van Tuijl, B. A. J.; Kornet, J. G.; Meuleman, J.; Bontsema, J.; Van Os, E. A. (2002). An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses. *Autonomous Robots*, 13:241–258.

Vidal-Verdú, F.; Barquero, M. J.; Serón, J.; García-Cerezo, A. (2009). Large area smart tactile sensor for rescue robot. In: *IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments*, pages 6–10.

Vischer, D.; Khatib, O. (1995). Design and development of high-performance torque-controlled joints. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(4):537–544.

Wolf, S.; Hirzinger, G. (2008). A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1741–1746.

Wouters, N.; Vandevoorde, K.; Lenaerts, B.; Nguyen, T. T.; Evain, S.; Guttierez, L. L.; Rutten, K.; Ketelaere, B. D.; Saeys, W. (2014). Crops Deliverable 6.8. Technical report.

Xu, Z.; Kolev, S.; Todorov, E. (2014). Design, Optimization, Calibration, and a Case Study of a 3D-Printed, Low-cost Fingertip Sensor for Robotic Manipulation. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2749–2756.

Yaniger, S. (1991). Force Sensing Resistors: A Review Of The Technology. *Electro International*, pages 666–668.

Yim, M.; Duff, D.; Roufas, K. (2000). PolyBot: a modular reconfigurable robot. In: *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:514–520.

Yim, M.; Shen, W. M.; Salemi, B.; Rus, D.; Moll, M.; Lipson, H.; Klavins, E.; Chirikjian, G. S. (2007). Modular self-reconfigurable robot systems [Grand challenges of robotics]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1):43–52.

Yuji, J. I.; Sonoda, C. (2006). A PVDF tactile sensor for static contact force and contact temperature. In: *Proceedings of IEEE Sensors*, pages 738–741.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die bei der

Fakultät für Maschinenwesen

der TUM zur Promotionsprüfung vorgelegte Arbeit mit dem Titel:

Entwicklung eines modularen Manipulators für den Garten- und Weinbau

am

Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Fakultät für Maschinenwesen

unter der Anleitung und Betreuung durch

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Ulbrich

ohne sonstige Hilfe erstellt und bei der Abfassung nur die gemäß § 6 Abs. 6 und 7 Satz 2 angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

☒ Ich habe keine Organisation eingeschaltet, die gegen Entgelt Betreuerinnen und Betreuer für die Anfertigung von Dissertationen sucht, oder die mir obliegenden Pflichten hinsichtlich der Prüfungsleistungen für mich ganz oder teilweise erledigt.

☒ Ich habe die Dissertation in dieser oder ähnlicher Form in keinem anderen Prüfungsverfahren als Prüfungsleistung vorgelegt.

☐ Die vollständige Dissertation wurde in _____ veröffentlicht. Die promotionsführende Einrichtung Fakultät für Maschinenwesen hat der Vorveröffentlichung zugestimmt.

☒ Ich habe den angestrebten Doktorgrad *noch nicht* erworben und bin *nicht* in einem früheren Promotionsverfahren für den angestrebten Doktorgrad endgültig gescheitert.

☐ Ich habe bereits am _____ bei der Fakultät für _____ der Hochschule _____ unter Vorlage einer Dissertation mit dem Thema _____ die Zulassung zur Promotion beantragt mit dem Ergebnis: _____

Die öffentlich zugängliche Promotionsordnung der TUM ist mir bekannt, insbesondere habe ich die Bedeutung von § 28 (Nichtigkeit der Promotion) und § 29 (Entzug des Doktorgrades) zur Kenntnis genommen. Ich bin mir der Konsequenzen einer falschen Eidesstattlichen Erklärung bewusst.

Mit der Aufnahme meiner personenbezogenen Daten in die Alumni-Datei bei der TUM bin ich ☒ einverstanden, ☐ nicht einverstanden.

Garching, 15. Dezember 2015 _____

(Unterschrift)