
Entwicklung eines wasserhydraulisch aktuierten, humanoiden Roboterarmes aus Kunststoffspritzgussteilen

DIPLOMARBEIT

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Vincze
Projektass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Zillich

eingereicht an der

Technischen Universität Wien
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik

von

Wolfgang Schönauer
Matrikelnummer 0825964
Sahulkastraße 26/6/6
1100 Wien

Wien, 5. Juni 2016

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während meiner Studienzeit motiviert und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank geht an Prof. Markus Vincze und Dr. Michael Zillich, welche als Betreuer diese Arbeit ermöglicht haben. Ebenso bedanke ich mich bei Prof. Grafinger für die Unterstützung bei den konstruktiven Herausforderungen dieser Arbeit.

Weiters möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern der Firma Blue Danube Robotics bedanken, allen voran bei Dr. Walter Wohlking.

Auch TUW-Racing, dem Rennteam der TU Wien gebührt besonderer Dank. Während meiner langjährigen Mitgliedschaft habe ich so vieles gelernt, was mich technisch und menschlich vorangebracht hat.

Ich möchte mich auch herzlich bei meiner Freundin, Theresa Gustenau, bedanken, die mich immer motiviert und aufgeheitert hat.

Zu guter Letzt möchte ich mich auch bei meiner Familie bedanken, welche mich immer unterstützt hat und mir auch das Studium ermöglicht hat.

Wien, 5. Juni 2016

Abstract

This thesis covers the development of a humanoid robotic arm for the robot *Blue*. *Blue* is designed for household use and therefore must operate in an environment which is designed for humans. This results in certain requirements for the arm, such as dimensions, range of motion of the joints and maximum forces of the actuators.

At the beginning of the development various existing artificial arms were analyzed, which served partly as an inspiration for the arm to be developed.

The concept of the robotic arm includes a supporting case of injection molded plastic half-shells, which together make up a robot arm with seven degrees of freedom. The robotic arm is to be powered by water hydraulic actuators.

The project extended over several construction phases, with prototypes made at each phase. Based on these prototypes the current construction was evaluated. Here, both aesthetic changes, as well as conceptual changes were made.

With the third design iteration eventually a calculation of the actuator and bearing forces that perform in the arm was made. For this purpose load cases and trajectories were derived from the expected activities of *Blue* and analyzed by means of a recursive Newton-Euler algorithm. The recursive Newton-Euler algorithm was also slightly modified to calculate the driving forces as well as the bearing forces.

With the forces found acting on the parts a strength analysis of the components, via FE simulations, was made. In a first simulation step opportunities for improvement or weakness' of the design were found, which were then eliminated by design changes. A second simulation step finally confirmed the impact of the changes and fulfillment of the strength requirements.

Kurzzusammenfassung

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Entwicklung eines humanoiden Roboterarmes für den Roboter *Blue*. *Blue* kommt im Haushalt zum Einsatz und muss daher in einem Umfeld agieren, welches für den Menschen entworfen ist. Dadurch ergeben sich einige Anforderungen an den Arm, wie Abmessungen, Bewegungsspielraum der Gelenke und maximale Kräfte der Aktoren.

Zu Beginn der Entwicklung wurden diverse vorhandene künstliche Arme analysiert, welche schließlich teilweise als Inspiration für den zu entwickelnden Roboterarm dienten.

Das Konzept des Roboterarmes sieht eine tragende Hülle aus spritzgegossenen Kunststoffhalbschalen vor, welche zusammen einen Roboterarm mit sieben Freiheitsgraden ergeben. Der Roboterarm soll durch wasserhydraulische Aktuatoren angetrieben werden.

Das Projekt erstreckte sich über mehrere Konstruktionsphasen, wobei für jede Phase Prototypen gefertigt wurden, anhand derer die aktuelle Konstruktion beurteilt wurde. Hierbei wurden sowohl ästhetische Änderungen, als auch konzeptionelle Änderungen vorgenommen.

Anhand der dritten Konstruktionsiteration wurde schließlich eine Berechnung der Antriebs- und Lagerkräfte im Arm durchgeführt. Dazu wurden aus den zu erwarteten Haushaltstätigkeiten von *Blue* Lastfälle und Trajektorien hergeleitet und diese mittels des Recursive-Newton-Euler Algorithmus analysiert. Der Recursive-Newton-Euler Algorithmus wurde außerdem leicht modifiziert um neben den Antriebskräften auch die Lagerkräfte zu berechnen.

Mit den gefundenen, auf die Teile wirkenden, Kräften wurden schließlich Festigkeitsanalysen der Bauteile mittels FE-Simulationen angestellt. Hierbei wurden bei einem ersten Simulationsdurchgang Verbesserungspotentiale bzw. Schwächen der Konstruktion aufgezeigt, welche dann durch konstruktive Änderungen beseitigt wurden. Ein zweiter Simulationsdurchgang bestätigte schließlich die Wirkung der Änderungen und die Erfüllung der Festigkeitsvorgaben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	IX
1 Anforderungen und Ziele	2
1.1 Der Roboter Blue	2
1.2 Einsatzspektrum des Roboters	3
1.3 Abgeleitete Anforderungen	3
2 Übersicht über vorhandene Roboterarme	5
2.1 ASIMO	5
2.2 Robonaut 2	5
2.3 Nao	6
2.4 Pepper	6
2.5 Humanoid Robotics Project	6
2.6 Boston Dynamics Atlas	7
2.7 Utah-Arm	7
3 Grundlagen der Roboterkinematik	9
4 Konzept	12
4.1 Kinematik des humanoiden Arms	12
4.2 Grundlegende Abmessungen	13
4.3 Gelenkgrenzen	14
4.4 Auswahl des Antriebes	14
4.5 Fertigungsverfahren	15
4.6 Tragende Hülle	15
4.7 Gelenksubstitution	17
5 Konstruktion	19
5.1 Längsgelenke	19
5.1.1 Momentübertragung	20
5.1.2 Antrieb	20
5.2 Quergelenke	22
5.2.1 Antrieb	22
5.3 Erste Version	26
5.4 Ellbogenabdeckung	28
5.5 Zweite Version	29
5.6 Dritte Version	31

6	Inverse Dynamik Simulation	34
6.1	Simulationsskript	34
6.2	Rekursiver Newton Euler Algorithmus	40
6.3	Aufgaben und Trajektorien	44
6.3.1	Zimmertür öffnen	44
6.3.2	Kühlschrantür öffnen	45
6.3.3	Getränk nehmen	45
6.3.4	Schiebetür öffnen	46
7	Berechnung der Kräfte	47
7.1	Körper 5: Handgelenk	47
7.2	Körper 4: Unterarm	49
7.3	Körper 3: Ellbogen	51
7.4	Körper 2: Oberarm	53
7.5	Körper 1: Schulter	55
8	Finite Elemente Simulation	57
8.1	Grundlagen zum Festigkeitsnachweis	57
8.2	Material	58
8.3	Simulation Unterarm	61
8.3.1	Erste Simulation	62
8.3.2	Änderung der Konstruktion	62
8.3.3	Zweite Simulation	64
8.4	Simulation Ellbogen	66
8.4.1	Erste Simulation	67
8.4.2	Änderung der Konstruktion	67
8.4.3	Zweite Simulation	69
8.5	Simulation Oberarm	70
8.5.1	Erste Simulation	70
8.5.2	Änderung der Konstruktion	71
8.5.3	Zweite Simulation	72
8.6	Simulation Schulter	73
8.6.1	Erste Simulation	73
8.6.2	Änderung der Konstruktion	74
8.6.3	Zweite Simulation	74
9	Zusammenfassung und Ausblick	77
A	Matlab Funktionen	78
A.1	readInertiaFile	78
A.2	trajectory	80
A.3	differentiate	81

B Simulationsergebnisse	83
B.1 Zimmertür öffnen	84
B.1.1 Trajektorie	84
B.1.2 Kräfte und Momente	86
B.2 Kühlschrankschranktür öffnen	90
B.2.1 Trajektorie	90
B.2.2 Kräfte und Momente	92
B.3 Getränk nehmen	96
B.3.1 Trajektorie	96
B.3.2 Kräfte und Momente	98
B.4 Schiebetür öffnen	102
B.4.1 Trajektorie	102
B.4.2 Kräfte und Momente	104
Literatur	108

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vorversion von <i>Blue</i>	3
1.2	Tätigkeit des Roboters <i>Blue</i>	4
2.1	<i>ASIMO</i> und <i>Robonaut 2</i>	6
2.3	<i>HRP-2 Promet</i> und <i>Atlas</i>	8
2.4	Foto des Utah-Arms	8
4.1	Skizze eines Menschlichen Arms	13
4.2	Spitzendruck und Leistungsdichte verschiedener Aktuatortechnologien . .	15
4.3	Skizzen zur tragenden Hülle	17
4.4	Gelenksubstitution	18
5.1	Längsgelenk Schema	19
5.2	Polygonverbindung	20
5.3	Schema Linearzylinder	21
5.4	Quergelenk Schema	23
5.5	Schema Linearzylinder	23
5.6	Kurbelgetriebe	24
5.7	Eingebaute Antriebe	25
5.8	Schnittansichten der beiden Lagertypen	26
5.9	Erste Version Farbdarstellung	26
5.10	Foto des ersten Prototyps	27
5.11	Detail erster Prototyp	27
5.12	Armachel und Elbogenabdeckung	28
5.13	Erste Version Querlager	29
5.14	Erste Version Farbdarstellung	30
5.15	Foto des zweiten Prototyps	30
5.16	Dritte Version Längslager	31
5.17	Dritte Version Farbdarstellung	32
5.18	Hydraulikträger der einzelnen Armteile	33
5.19	Foto des dritten Prototyps	33
6.1	Posen Türdrücker	44
6.2	Posen Getränk nehmen	45
6.3	Posen Getränk nehmen	46
6.4	Posen Schiebetür	46
7.1	Lagerflächen des Handgelenks	48
7.2	Lagerflächen des Handgelenks	49

7.3	Lagerflächen des Ellbogens	51
7.4	Lagerflächen des Oberarms	53
7.5	Lagerflächen des Schulterteiles	55
8.1	Materialdiagramme verschiedener Polyamide	60
8.2	Aufbau der FE-Simulation des Unterarms	62
8.3	Von Mises Vergleichsspannungen des Unterarms	63
8.4	Betrag der Verschiebungen des Unterarms	63
8.5	Änderungen am Unterarm	64
8.6	Betrag der Verschiebungen des Unterarms	65
8.7	Aufbau der FE-Simulation des Ellbogens	67
8.8	Betrag der Verschiebungen des Ellbogens	68
8.9	Änderungen am Ellbogen	68
8.10	Betrag der Verschiebungen des Ellbogens	69
8.11	Aufbau der FE-Simulation des Oberarms	70
8.12	Betrag der Verschiebungen des Oberarms	71
8.13	Änderungen am Oberarm	71
8.14	Betrag der Verschiebungen des Oberarms	72
8.15	Aufbau der FE-Simulation der Schulter	73
8.16	Betrag der Verschiebungen der Schulter	74
8.17	Änderungen an der Schulter	75
8.18	Betrag der Verschiebungen der Schulter	76
B.1	Trajektorie im Arbeitsraum	84
B.2	Gelenkwinkel	85
B.3	Lagerkräfte Gelenk 1: Schulter	86
B.4	Lagerkräfte Gelenk 2: Oberarm	87
B.5	Lagerkräfte Gelenk 3: Ellbogen	88
B.6	Lagerkräfte Gelenk 4: Unterarm	89
B.7	Trajektorie im Arbeitsraum	90
B.8	Gelenkwinkel	91
B.9	Lagerkräfte Gelenk 1: Schulter	92
B.10	Lagerkräfte Gelenk 2: Oberarm	93
B.11	Lagerkräfte Gelenk 3: Ellbogen	94
B.12	Lagerkräfte Gelenk 4: Unterarm	95
B.13	Trajektorie im Arbeitsraum	96
B.14	Gelenkwinkel	97
B.15	Lagerkräfte Gelenk 1: Schulter	98
B.16	Lagerkräfte Gelenk 2: Oberarm	99
B.17	Lagerkräfte Gelenk 3: Ellbogen	100
B.18	Lagerkräfte Gelenk 4: Unterarm	101
B.19	Trajektorie im Arbeitsraum	102
B.20	Gelenkwinkel	103
B.21	Lagerkräfte Gelenk 1: Schulter	104
B.22	Lagerkräfte Gelenk 2: Oberarm	105

B.23 Lagerkräfte Gelenk 3: Ellbogen	106
B.24 Lagerkräfte Gelenk 4: Unterarm	107

Tabellenverzeichnis

1.1	Spezifikation des Roboters <i>Blue</i>	2
4.1	Denavit-Hartenberg Parameter eines menschlichen Arms	12
4.2	Armabmessungen der Stichproben	13
4.3	Gelenkgrenzen	14
4.4	Eigenschaften verschiedener Aktuatortechnologien	16
5.1	Denavit-Hartenberg Parameter der dritten Konstruktionsiteration	33

hh

1 Anforderungen und Ziele

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Armes für Heim-Assistenzroboter. Herausforderung hierbei sind, dass der Arm einerseits kräftig genug sein muss um alltäglich im Haushalt anfallende Aufgaben erledigen zu können, andererseits soll er auch preisgünstig produziert werden können. Da *Blue* außerdem in ständigem Kontakt mit Menschen ist, muss der Arm schon vom Konzept her so sicher sein, dass sich Menschen nicht verletzen können. Hier wird vor allem die Gefahr des Einklemmens von Fingern bei Bewegungen des Armes betrachtet. Der im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelte Roboterarm soll das Hauptinstrument für die Umgebungsinteraktion des Roboters *Blue* werden.

1.1 Der Roboter Blue

Blue ist ein halbautonomer Service-Roboter, welcher körperlich behinderte Menschen im Alltag unterstützen soll. Dabei gibt es zahlreiche Manipulationsaufgaben zu erledigen, wie das Öffnen von Türen und das Tragen von Gegenständen. Ebenso kann er für Telepräsenz-Aufgaben eingesetzt werden. Die Hülle von *Blue* ist mit einer berührungsempfindlichen Oberfläche überzogen. Diese Hülle, genannt *Airskin*, besteht aus Luftpolstern mit eingebautem Drucksensor, welcher Berührungen registriert. *Blue* wird außerdem von wasserhydraulischen compliant Aktuatoren angetrieben. Diese Technologien helfen den sicheren Einsatz in einer Umgebung mit Menschen zu gewährleisten. Der fertige Roboter soll folgende Spezifikationen haben: Abbildung 1.1 zeigt ein 3D-Rendering einer Vorversion

Größe der Basis	47 cm × 47 cm
Höhe	110 cm bis 135 cm
Masse	60 kg
Freiheitsgrade	24 (4 Torso, 4 Hals, 8 Arm + Hand)
Greifen	4-Finger unteraktuierte Hand
Fortbewegung	4 individuell steuerbare Räder
Sensoren	Aktives 3D, Kamera, taktile Sensoren und Umgebungssensoren
Benutzerinteraktion	Tablet, Sprachsteuerung, Berührungssinterface
Betriebssystem	ROS, Linux, Android

Tabelle 1.1: Spezifikation des Roboters *Blue*

des Roboters.

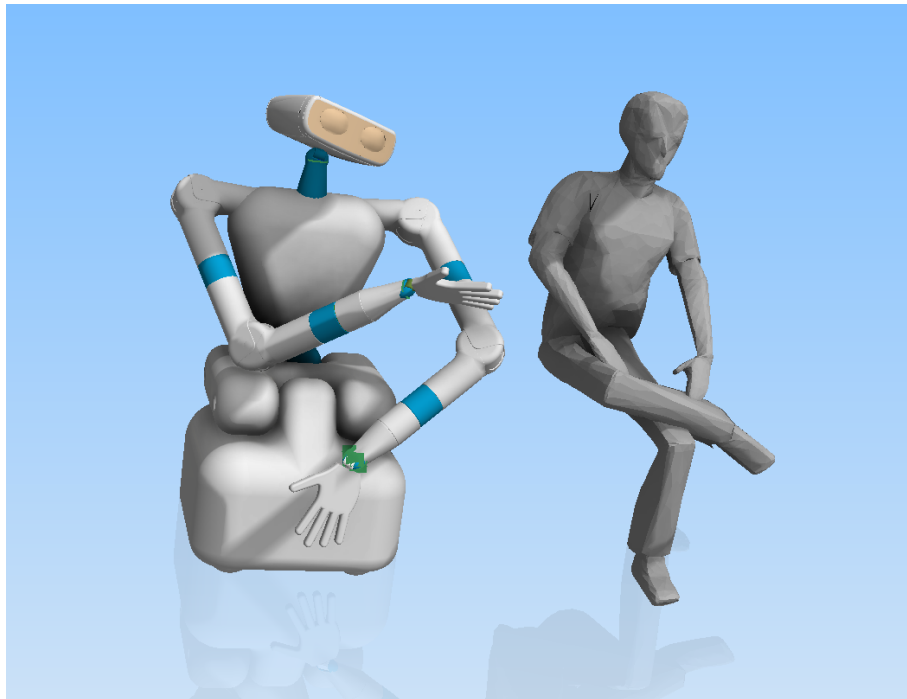


Abbildung 1.1: Eine Vorversion des Roboters *Blue* im Größenvergleich mit einem Menschen.
Copyright: *Blue Danube Robotics GmbH*

1.2 Einsatzspektrum des Roboters

Wie gerade beschrieben ist der Roboter *Blue* ein mobiler Assistentenroboter für den Heimeinsatz. Der Einsatz im Eigenheim bedingt, dass keine für den Roboter optimierten Objekte und Einrichtungsgegenstände zu Verfügung stehen. Der Roboter muss also auf die selbe Art und Weise mit der Umgebung interagieren wie ein Mensch. Daher ist ein humanoider Arm mit einer humanoiden Hand die naheliegende Wahl. Ebenso muss der Antrieb des Arms in der Lage sein die für die Umgebungsinteraktion notwendigen Kräfte aufzubringen.

Abbildung 1.2 zeigt ein Beispiel für einen Einsatz des Roboters *Blue*. Für den Arm an sich lässt sich dieser Einsatz in einzelne Bewegungen mit jeweils eigenen Lastprofilen und Trajektorien zerlegen.

1.3 Abgeleitete Anforderungen

Zusammengefasst lassen sich folgende Anforderungen ableiten

- humanoider Arm mit 7 Freiheitsgraden und menschlichen Abmessungen
- genug Kraft um Haushaltstätigkeiten durchzuführen
- sicherer Umgang mit Menschen

- geschlossene Hülle um Eindringen von Gegenständen und Körperteilen zu verhindern
- ansprechendes, humanoides Design
- hohe Wartbarkeit, muss zerlegbar sein

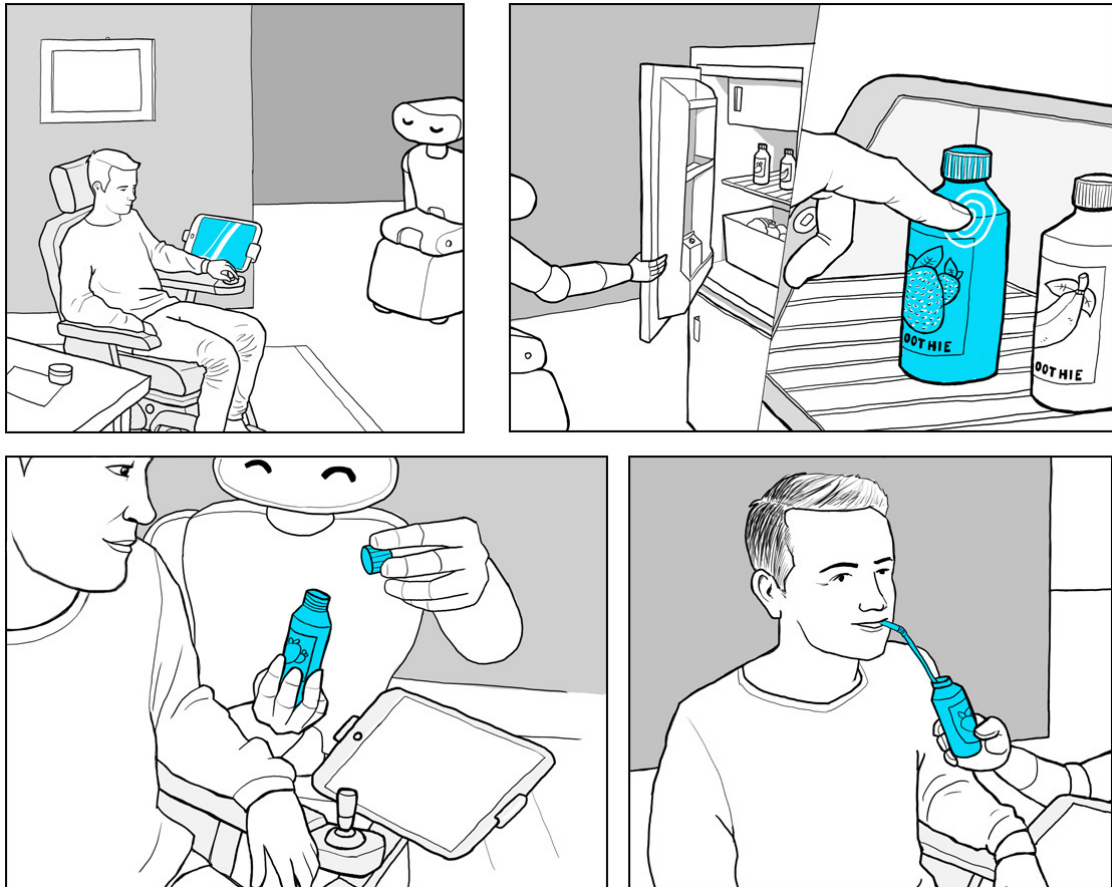


Abbildung 1.2: In dieser Grafik wird eine Tätigkeit des Roboters *Blue* dargestellt. Der Benutzer schickt *Blue* zum Kühlschrank, welchen dieser öffnet. Daraufhin wählt der Benutzer einen Gegenstand aus dem Kühlschrank, welchen *Blue* ihm dann überbringt. Copyright: *Blue Danube Robotics GmbH*

2 Übersicht über vorhandene Roboterarme

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über vorhandene Roboterarme im Bereich (teil-) humanoide Service-Roboter gegeben, welche zum Teil als Inspiration für den entwickelten Roboterarm erhielten. Ebenso werden Vor- und Nachteile der einzelnen Konstruktionen besprochen.

2.1 ASIMO

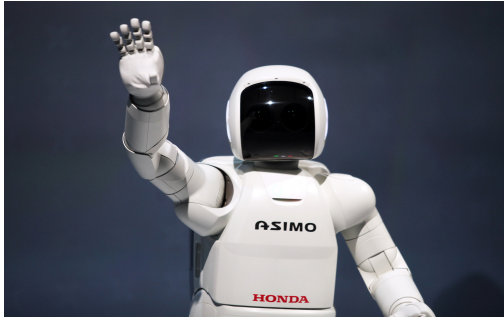
ASIMO steht für **A**dvanced **S**tep In **I**nnovative **M**obility und ist ein vom japanischen Unternehmen Honda entwickelter humanoider Roboter. Die aktuelle 5. Generation von *ASIMO* aus dem Jahr 2011 hat eine Gesamthöhe von 1.3 m und eine Masse von 48 kg. Die Arme von *ASIMO* haben sieben Freiheitsgrade, was einem humanoiden Arm entspricht. *ASIMO* wurde außerdem von Anfang an für den Einsatz in einem menschlichen Lebensraum entwickelt, daher bietet dessen Konstruktion sich besonders als Inspirationsquelle an. [1]

Die Arme von *ASIMO* sind, wie bei den meisten seiner Artgenossen, mit Elektromotoren angetrieben. Die Kunststoffhülle ist geschlossen, es können also keine Fremdkörper eindringen. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei Bewegungen nahe der Grenzwinkel Finger oder andere Körperteile eines unachtsamen Benutzers eingeklemmt werden. Beim Ellbogen sowie in der Achsel kann es daher zu Quetschungen kommen.

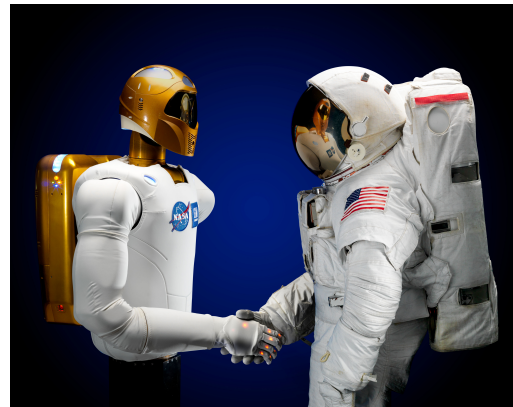
2.2 Robonaut 2

Der von der US-Amerikanischen Raumfahrtbehörde *NASA* und dem US-Unternehmen *General Motors* entwickelte antropomorphe Robotertorso *Robonaut 2* ist für den Einsatz auf der Internationalen Raumstation *ISS* entworfen. Durch seine humanoide Form soll er einfache, repetitive oder gefährliche Einsätze ebenso gut lösen können wie seine menschlichen Vorbilder. An den Roboter angepasste Umgebungen oder Werkzeuge sind somit nicht notwendig. Ein *Robonaut 2* startete im Februar 2011 mit der Space-Shuttle Mission STS-133 zur Internationalen Raumstation und wurde dort ausführlichen Versuchsreihen unterzogen. [2]

Robonaut 2 hat zwei mit elastischen Textilien überzogene Arme. Damit lässt sich das Eindringen von Fremdkörpern sehr effektiv verhindern. Da diese Textilien allerdings dehnbar sein müssen kann es auch hier möglich sein Finger in den Arm hineinzustecken, welche bei einer Bewegung dann gequetscht werden.



(a) *ASIMO* (2010) winkt in die Kamera.
Foto: "ASIMO (2010)": Flickr/Ars Electronica, Lizenz: CC BY-NC-ND 2.0



(b) *Robonaut 2* schüttelt die Hand seines menschlichen Gegenparts.
Foto: "jsc2010e089924": Flickr/NASA Robonaut, Lizenz: CC BY 2.0

Abbildung 2.1: *ASIMO* und *Robonaut 2*

2.3 Nao

Nao ist ein von dem französischen Unternehmen *Aldebaran Robotics* hergestellter humanoider Roboter. Er ist 58 cm groß und frei programmierbar. Sein Körper hat 25 Freiheitsgrade, womit er menschliche Bewegungen relativ gut nachahmen kann. Aufgrund dessen ist *Nao* seit 2008 die Standard-Hardwareplattform der *RoboCup Soccer League*. [3]

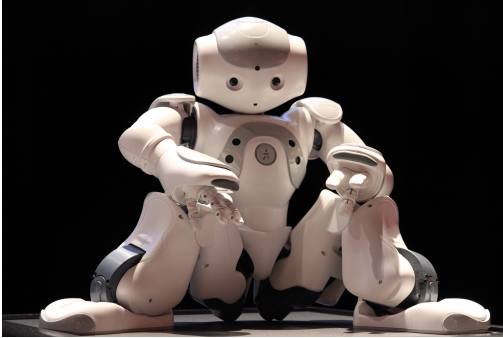
2.4 Pepper

Wie *Nao* stammt auch *Pepper* von *Aldebaran Robotics*. *Pepper* ist ähnlich wie *Blue* ein (teilweise) humanoider Roboter, der mit Menschen zusammenleben soll. Jedoch ist *Pepper* ausschließlich darauf ausgelegt mit Personen zu kommunizieren und wird vom Hersteller daher als *Emotional Companion* bezeichnet. *Pepper* ist 120 cm groß und hat eine Masse von 28 kg. Der Bildschirm, welcher prominent auf der Brust platziert ist dient dazu Emotionen des Roboters zu zeigen. [4]

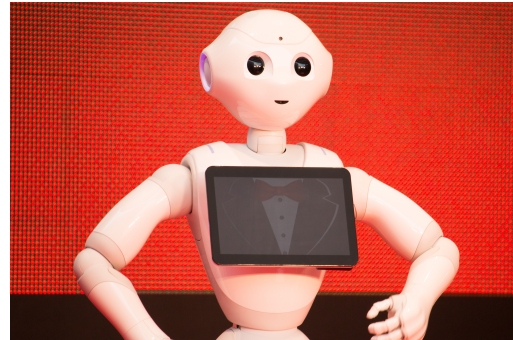
Die Ausrichtung auf Kommunikation hat sich auch auf das Design der Arme niedergeschlagen. So sind die Arme zwar sehr ästhetisch und auch sicher - es existieren keinerlei Öffnungen, allerdings darf deren Kraft und Fähigkeit zur Objektmanipulation bezweifelt werden.

2.5 Humanoid Robotics Project

Das *Humanoid Robotics Project* ist ein japanisches Projekt zur Entwicklung von Robotern als Haushaltshilfe, welches im Jahre 1997 mit Robotern vom Typ *Honda P3* begann. Mittlerweile wurden mehrere Generationen an humanoiden Robotern entwickelt. Abbildung 2.3a zeigt die dritte Generation *HRP-2 Promet* von 2002.



(a) *Nao* sitzt. Der kleine Roboter kann sich aus jeder Pose wieder aufrichten.
Foto: "and Nao": Flickr/Pierre Metivier,
Lizenz: CC BY-NC 2.0



(b) Der Roboter *Pepper* auf der Eröffnung des 28. Tokyo International Film Festival. Der Bildschirm auf der Brust dient unter anderem zur Darstellung der Emotionen des Roboters.
Foto: "Pepper at Opening Ceremony of the 28th Tokyo International Film Festival": Flickr/Dick Thomas Johnson, Lizenz: CC BY 2.0

2.6 Boston Dynamics Atlas

Atlas von Boston Dynamics ist ein hochmobiler humanoider Roboter. Er bewegt sich zweibeinig durchs Gelände und kann mit seinen Armen Gegenstände heben und tragen, sowie mit seiner Umgebung interagieren. *Atlas* hat 28 hydraulisch aktuierte Freiheitsgrade und seine Hände sind darauf ausgelegt mit Werkzeugen umzugehen, welche für den Menschen entworfen wurden. [5] Abbildung 2.3b zeigt den Roboter.

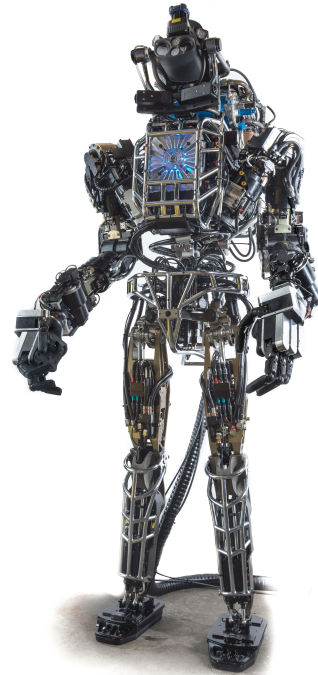
Wie man unschwer erkennen kann fehlt *Atlas* jede Form von Haut oder Hülle, welche das Eindringen von Gegenständen oder menschlichen Fingern verhindert. Vielmehr erinnert sein Erscheinungsbild an ein Skelett. Während also optisch keine Inspiration für den Roboterarm zu erwarten ist, tut sich *Atlas* durch seine hydraulischen Antriebe hervor. Betrachtet man die Arme des Roboters genauer erkennt man, dass alle Armgelenke durch hydraulische Drehantriebe (vermutlich Schwenkantriebe) aktuiert sind. An den Beinen wiederum kann man unschwer hydraulische Linearantriebe sehen.

2.7 Utah-Arm

Das in Salt Lake City im US-Bundesstaat Utah beheimatete Unternehmen *Motion Control, a division of Fillauer, Inc.* vertreibt seit 1981 unter dem Namen *Utah-Arm* Armprothesen. Der *Utah-Arm* ersetzt Ellbogen, Unterarm, Handgelenk und Hand und schließt direkt am Oberarmstumpf an. Aus mechanischer Sicht hat der *Utah-Arm* die Besonderheit, dass die Achse des Ellbogengelenks nicht im Zentrum des Ober- und Unterarmteils liegt, sondern wie ein Scharnier an der Innenseite des Ellbogens. Dies ermöglicht eine ästhetisch ansprechende Formgebung und bietet einige weitere Vorteile, auf die in den folgenden Kapiteln noch näher eingegangen wird.



(a) HRP-2 im Science Museum Tokio
Foto: "HRP-2 front Science Museum Tokyo": Wikimedia/Morio, Lizenz: CC BY-SA 3.0



(b) *Atlas* von Boston Dynamics
Foto: "Front view of the humanoid robot Atlas, created by DARPA and Boston Dynamics": DARPA, Lizenz: Public Domain

Abbildung 2.3: *HRP-2 Promet* und *Atlas*

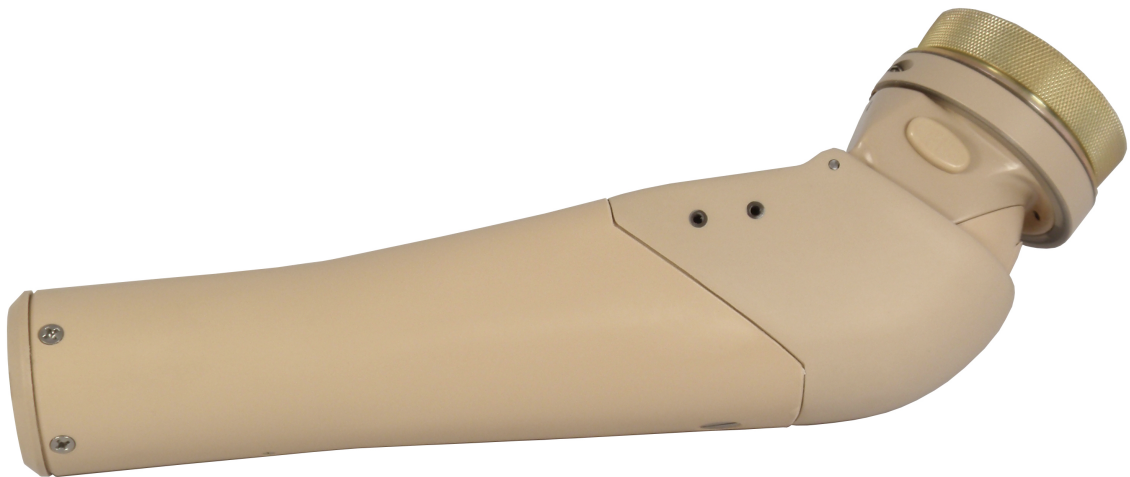


Abbildung 2.4: Foto der Utah-Arm-Prothese. Man sieht sehr deutlich die exzentrische Achse des Ellbogengelenks, welche maßgeblich zur ansprechenden Optik beiträgt. Foto freundlicherweise zur Verfügung gestellt von *Motion Control, a division of Fillauer, Inc.*

3 Grundlagen der Roboterkinematik

Bevor in den folgenden Kapiteln auf die Dimensionierung des Roboterarmes sowie die verschiedenen Berechnungen eingegangen wird, sollen hier einige Grundlagen vorgestellt werden. In der Robotik hat sich die Beschreibung von Roboterarmen als serielle kinematische Starrkörperkette durchgesetzt. Zusammen mit der Denavit-Hartenberg-Konvention ermöglicht diese Betrachtungsweise den Zugriff auf den großen Fundus von Robotikalgorithmen.

Die Kinematik stellt die Zwangsbedingungen in der Anordnung der einzelnen Körper des Roboterarmes dar. Die elastische Verformung der Körper wird hierfür vernachlässigt, wodurch die einzelnen Glieder als Starrkörper angenommen werden können.

Der Roboterarm wird als kinematische Kette angesehen, wobei jedes Glied sein eigenes Koordinatensystem besitzt.

Jeder Punkt P besitzt einen Ortsvektor \mathbf{p}_i für jedes Koordinatensystem Σ_i . Die Umrechnung zwischen diesen Ortsvektoren und damit die Darstellung des Punktes in den verschiedenen Koordinatensystemen erfolgt mit homogenen Transformationen:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{p}_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{P}_{i-1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} {}^{i-1}\mathbf{R}_i & {}^{i-1}\mathbf{d}_i \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}}_{{}^{i-1}\mathbf{T}_i} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{p}_i \\ 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{P}_i} \quad (3.1)$$

wobei ${}^{i-1}\mathbf{d}_i$ den Verschiebungsvektor zwischen den Nullpunkten, dargestellt im Σ_{i-1} und ${}^{i-1}\mathbf{R}_i$ die Rotationsmatrix zwischen den beiden Systemen bezeichnet. Für die Inverse homogene Transformation gilt:

$$\left({}^{i-1}\mathbf{T}_i\right)^{-1} = {}^i\mathbf{T}_{i-1} \quad (3.2)$$

Durch Hintereinanderausführung der homogenen Transformationen (und ihrer Inversen) lassen sich nun Punkte von einem beliebigen Koordinatensystem Σ_j in ein anderes Σ_i umrechnen:

$$\mathbf{P}_i = \underbrace{{}^i\mathbf{T}_{i+1} \, {}^{i+1}\mathbf{T}_{i+2} \cdots {}^{j-1}\mathbf{T}_j}_{{}^i\mathbf{T}_j} \mathbf{P}_j \quad \forall i < j \quad (3.3)$$

Für eine kinematische Kette lassen sich homogene Transformationen systematisch mit den Denavit Hartenberg Konventionen angeben¹. Hierbei wird die Anordnung der beiden Koordinatensysteme durch die Ausführung von vier einzelnen homogenen Transformationen beschrieben:

¹Zur Erklärung der Denavit-Hartenberg Konvention sei an einschlägige Fachliteratur wie [6] oder [7] verwiesen

1. Rotation um den Gelenkwinkel θ_i um die Bewegungsachse z_{i-1} . Die x_{i-1} -Achse liegt danach parallel zur x_i -Achse.

$$\text{Rot}(z_{i-1}, \theta_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. Translation entlang der Bewegungsachse z_{i-1} um den Gelenkabstand d_i , bis z_{i-1} und x_i sich schneiden.

$$\text{Trans}(z_{i-1}, d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Translation entlang der x_{i-1} -Achse um die Armelementlänge a_i , bis die Ursprünge der Koordinatensysteme zusammenfallen.

$$\text{Trans}(x_{i-1}, a_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. Rotation um dem Verwindungswinkel α_i um die Achse x_{i-1} , bis die z_{i-1} -Achse mit der z_i -Achse zusammenfällt.

$$\text{Rot}(x_{i-1}, \alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Zusammengesetzt ergibt sich folgende homogene Transformation:

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \mathbf{Rot}(z_{i-1}, \theta_i) \mathbf{Trans}(z_{i-1}, d_i) \mathbf{Trans}(x_{i-1}, a_i) \mathbf{Rot}(x_{i-1}, \alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dabei sind folgende Voraussetzungen notwendig:

1. Die z_{i-1} -Achse liegt entlang der Bewegungsachse des i -ten Gelenks.
2. Die x_i -Achse ist normal zu der z_{i-1} -Achse und zeigt von ihr weg. Sie ist das Kreuzprodukt von z_{i-1} -Achse und z_i -Achse.

3. Die y_i -Achse komplettiert auf ein rechtshändiges Koordinatensystem.

Die Inverse der homogenen Transformationsmatrix 3.4 lautet:

$${}^i\mathbf{T}_{i-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) & 0 & -a_i \\ -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\alpha_i) & -d_i \sin(\alpha_i) \\ \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & -d_i \cos(\alpha_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

4 Konzept

Am Beginn der Entwicklung des Roboterarmes steht die Erstellung eines allgemeinen Konzepts. Dieses beinhaltet die Dimensionierung des Armes und seiner Gelenkgrenzen in Anlehnung an den menschlichen Arm, sowie die Auswahl des Antriebskonzepts und der Fertigungsmethode. Außerdem wird die Abbildung der menschlichen Gelenke in einen kinematisch äquivalenten Roboterarm thematisiert.

4.1 Kinematik des humanoiden Arms

Der menschliche Arm hat sieben Freiheitsgrade. Jeweils drei sind in den Kugelgelenken in der Schulter und im Handgelenk vereint, der letzte Freiheitsgrad ist das Knickgelenk im Ellbogen. Für freie Orientierung und Positionierung der Hand im Raum sind sechs Freiheitsgrade notwendig. Der siebente Freiheitsgrad ist redundant. Beim humanoiden Arm äußert sich dies dadurch, dass bei fixierter Schulter und Hand, der Ellbogen noch Bewegungsspielraum hat.

Humanoide Arme sind ein Spezialfall aus der Kategorie der kinematischen Ketten und lassen sich daher auch mit den in der Robotik üblichen Denavit-Hartenberg Parametern angeben. Die Denavit-Hartenberg Parameter eines solchen Armes sind in Tabelle 4.1 dargestellt. In der Denavit-Hartenberg Konvention besteht ein menschlicher Arm aus

Gelenk	α_i	a_i	θ_i	d_i
1	$\pi/2$	a_1	θ_1	d_1
2	$\pi/2$	a_2	θ_2	d_2
3	$\pi/2$	a_3	θ_3	d_3
4	$\pi/2$	a_4	θ_4	d_4
5	$\pi/2$	a_5	θ_5	d_5
6	$\pi/2$	a_6	θ_6	d_5
7	$\pi/2$	a_7	θ_7	d_6

Tabelle 4.1: Denavit-Hartenberg Parameter eines menschlichen Arms

sieben einzelnen Gelenken, wobei sich die Gelenke die der Schulter und dem Handgelenk zuzuordnen sind jeweils im selben Punkt treffen. Beim menschlichen Arm entspricht d_3 der Länge des Oberarmes und d_5 der Länge des Unterarmes. Die Parameter d_1 , d_2 , d_4 , d_6 und d_7 sind ebenso wie sämtliche a_i gleich Null.

Beim entwickelten Roboterarm sind diese Parameter jedoch aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Antriebe und Lager nicht möglich. Die Gelenke müssen räumlich getrennt

Person	d_5	d_3	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	
Weiblich 1	25	24	33	24	23	20	15.5	cm
Weiblich 2	29	25	37	26	24	21	16	cm
Weiblich 3	35	26	34.5	30	26	19.5	15.5	cm
Männlich 1	28	25	43	32	30	23	18	cm
Männlich 2	27	28	54	36	31	30	17	cm
Männlich 3	31	24	40	25	25	22	16	cm
Männlich 4	34	27	36	28.5	28	22	18	cm
Männlich 5	31	25	36	28	24	22	16	cm
Männlich 6	30	27	37.5	30	24	19	15	cm
Mittelwert	30.0	25.7	39.0	28.8	26.1	22.1	16.3	cm

Tabelle 4.2: Armabmessungen der Stichproben. Alle Werte sind jeweils in cm

voneinander sein. Die Anordnung der Gelenke und die damit einhergehenden Denavit-Hartenberg Parameter werden in den folgenden Kapitel thematisiert.

4.2 Grundlegende Abmessungen

Um einen Anhaltswert für die Abmessungen der einzelnen Armglieder zu erhalten wurden einige Stichproben von menschlichen Armabmessungen im sozialen Umfeld des Autors genommen.

Gemessen wurde jeweils der Armumfang an der Schulter (in der Achsel), am Bizeps, am Ellbogen, in der Mitte des Unterarms und am Handgelenk. Ebenso wurde der Abstand zwischen Schulter und Ellbogen sowie zwischen Ellbogen und Handgelenk gemessen, wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist. Im Laufe der Entwicklungen wurde allerdings klar, dass

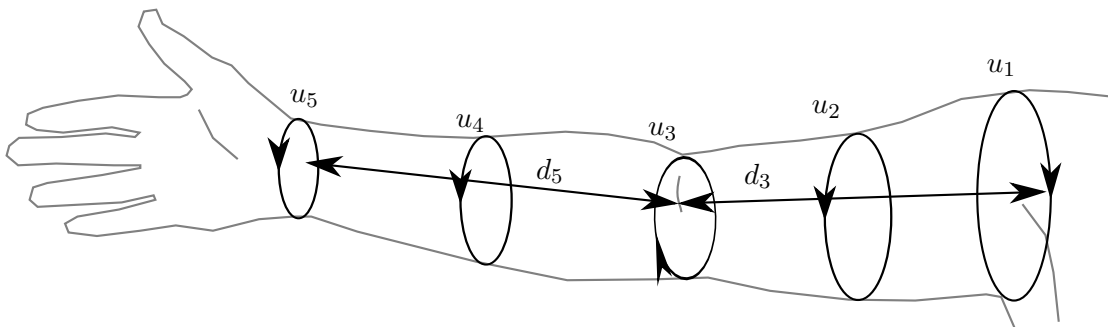


Abbildung 4.1: Skizze eines Menschlichen Arms. Die gemessenen Umfänge u_1 bis u_5 , sowie die DH-Parameter d_3 und d_5 sind eingezeichnet.

die gemessenen menschlichen Abmessungen, übertragen auf dem Roboterarm, unästhetisch wirken. Daher wurden die Maße für die beiden Prototypen noch angepasst. Die Messergebnisse sind in Tabelle 4.2 gesammelt.

Gelenk	1	2	3	4	5	6	7
Bewegungsspielraum	180	85	180	105	180	90	40 °

Tabelle 4.3: Gelenkgrenzen

4.3 Gelenkgrenzen

Der menschliche Körper hat in allen seinen Gelenken Grenzen. Wir können weder unseren Kopf um 360° drehen, noch unsere Beine wie Räder rotieren lassen. Technische Konstruktionen müssen diesen Einschränkungen nicht unterliegen, es bietet jedoch oft Vorteile solche Gelenkgrenzen einzubauen. Für einen humanoiden Roboterarm ist der offensichtlichste Vorteil, dass wenn menschliche Gelenkgrenzen nachgebildet werden nur Posen möglich sind, die auch ein menschlicher Arm einnehmen kann. Es kommt also zu keinen unnatürlichen und damit für den Benutzer befremdlichen Armstellungen. Weiters ist *Blue* darauf ausgelegt in Umgebungen zu operieren, welche für die Interaktion mit Menschen ausgelegt sind. Durch Gelenkgrenzen ist also keine Einschränkung der Funktionalität gegeben. Ein weiterer Vorteil ist, dass Kabel und Leitungen nicht durch Schleifringe oder ähnliches gelegt werden müssen, wenn diese flexibel genug sind. Man erspart sich also einiges an Bauteilen und damit Gewicht, wenn Gelenkgrenzen in Kauf genommen werden. Die Gelenkgrenzen unterscheiden sich von Person zu Person teilweise recht stark. Glücklicherweise stellen Haushaltsgegenstände und die räumlichen Gegebenheiten, mit denen sich Menschen umgeben keine allzu großen Herausforderungen an die Beweglichkeit. Auf den Roboterarm angewendet, bedeutet dies, dass die Gelenkgrenzen deutlich niedriger ausfallen können, als bei den meisten Menschen. *Blue* muss nicht mal mit seinem eigenen Körper interagieren können. Beispielsweise wird er sich nicht waschen oder sich eine Krawatte binden. Hier können also weitere Einschränkungen getroffen werden, welche die Konstruktion deutlich vereinfachen. Tabelle 4.3 zeigt die letztendlich gewählten Bewegungsspielräume.

4.4 Auswahl des Antriebes

John McBean und Cynthia Breazeal geben in ihrer Arbeit über elektromagnetische Linearaktuatoren [8] eine Übersicht über verschiedenste Arten von Aktuatoren. Dazu werden die beiden Größen Spitzendruck und (Massen-) Leistungsdichte eingeführt. Der Spitzendruck (in MPa) ist die maximale Kraft, die ein Aktuator erzeugen kann dividiert durch seine Querschnittsfläche. Die Leistungsdichte (in W/kg) entspricht der Leistung, welche ein Aktuator leisten kann dividiert durch seine Masse. Beide Kenngrößen sind sehr wichtig um sowohl hohe Momente im Arm erzeugen zu können als auch eine geringe Masse des Armes zu ermöglichen. Abbildung 4.2 zeigt verschiedene Aktuatortechnologien in Bezug auf diese beiden Kenngrößen. Es ist ersichtlich, dass hydraulische Aktuatoren die höchsten Werte in beiden Größen erreichen. Weitere Eigenschaften der Aktuatortechnologien sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Durch die hohe Leistungsdichte, den hohen Spitzendruck und die geringe Umweltbe-

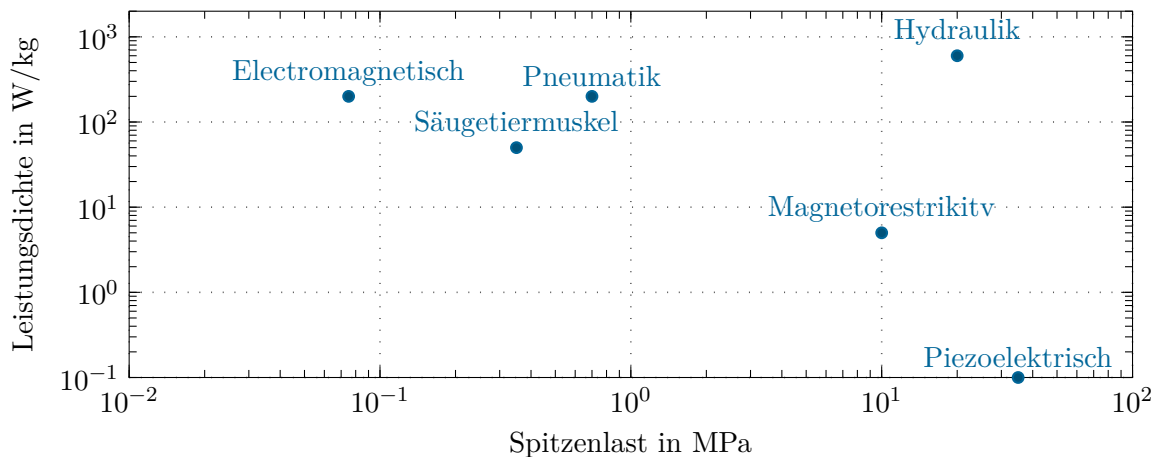


Abbildung 4.2: Übersicht über Spitzendruck und Leistungsdichte verschiedener Aktuator-technologien nach [8]

leistung eignet sich die durch *Blue Danube Robotics GmbH* vorgegebene Technologie der Wasserhydraulik also äußerst gut für den Einsatz in diesem Roboterarm. Der Nachteil des im Vergleich zu Elektrischen Aktuatoren hohen Peripherieaufwands lässt sich dadurch verringern, dass Pumpe und Ventile nicht im Arm selbst verbaut sein müssen, sondern in der Roboterbasis Platz finden können. Dadurch fehlt diese Masse in den Armen, wo sie unerwünscht ist und trägt zum niedrigen Schwerpunkt und damit zur höheren Stabilität des gesamten Roboters bei.

4.5 Fertigungsverfahren

Die Außenhaut von *Blue* soll großteils im Spritzgussverfahren aus Kunststoff hergestellt werden. Dadurch ergeben sich besondere Herausforderungen für die Konstruktion. Für die Außenhaut sind somit Formen für die Innen- und Außenkontur notwendig. Eine Folge davon ist, dass die einzelnen Armglieder aus zwei Halbschalen bestehen müssen, welche jeweils in eine Hauptrichtung entformt werden müssen. Die Bauteilgeometrie muss sich stark an dieser Entformrichtung orientieren. Auch muss auf Auszugsschrägen und Hinterschnitte geachtet werden.

4.6 Tragende Hülle

Die Anforderung keine Finger oder Gegenstände in den Arm eindringen zu lassen bedingt eine geschlossene Außenhaut. Es ist jetzt naheliegend diese Außenhaut auch zur Übertragung der Kräfte zu nützen und damit die Funktion von einer reinen Schutzabdeckung auf ein tragendes Element zu erweitern. Betrachtet man die Armteile näherungsweise als Hohlzylinder mit einem Kreisring als Querschnittsfläche, wie in Abbildung 4.3a dargestellt, kann man die Querschnittsfläche A und das Flächenträgheitsmoment I anschreiben als:

$$A = \pi (r_a^2 - r_i^2) \quad (4.1)$$

Technologie	Eigenschaften
Elektromagnetisch	Schnell, hohe compliance, leise, wenige bewegliche teile, ohne mechanische Umformer (Getriebe) schwach
(Öl-) Hydraulisch	Hohe Steifigkeit, viel Peripherie notwendig (Ventile, Leitungen, Pumpen), mittlere bis hohe Geschwindigkeiten
Pneumatisch	Schnell, Hohe Effizienz, schwierig zu regeln wegen Kompressibilität der Luft, viel Peripherie notwendig, laut
Magnetorestriktiv	Sehr hohe Geschwindigkeiten möglich, nur unidirektionale aktuierung, viel Peripherie notwendig (Magnete, Spulen)
Piezoelektrisch	Sehr kurzer Verfahrensweg, Sehr schnell, leise, braucht hohe Spannungen
Wasserhydraulisch	Nicht brennbar, Umweltfreundlich, geringere Betriebskosten (Entsorgungskosten), kein Betrieb unter 0 °C

Tabelle 4.4: Eigenschaften verschiedener Aktuatortechnologien nach [8] und Wasserhydraulik

$$I = \frac{\pi}{4} (r_a^4 - r_i^4) \quad (4.2)$$

mit dem inneren Radius r_i und dem äußeren Radius r_a . Während also das Flächenträgheitsmoment mit der vierten Potenz der Radien zunimmt, nimmt die Querschnittsfläche und damit die Masse des Bauteils nur mit der zweiten Potenz der Radien zu. Als Konsequenz daraus ergibt sich, dass je größer die Radien werden, desto größer wird das Verhältnis von Flächenträgheitsmoment zu Querschnittsfläche:

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{4} (r_a^2 + r_i^2) \quad (4.3)$$

Mit der Entscheidung für eine tragende Hülle wird also auch das Gesamtgewicht gering gehalten im Vergleich zu einer Lösung mit Außenhaut und einer tragenden Innenstruktur.

Wenn man den ausgestreckten Roboterarm nun als einseitig eingespannten Balken (siehe Abbildung 4.3b) der Länge l annimmt, an dessen der Einspannung gegenüberliegendem Punkt eine Kraft F angreift, so wie dies beim Halten eines Gegenstandes der Fall ist, kann man durch folgende Formel die Durchbiegung ξ des Balkens bestimmen:

$$\xi = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (4.4)$$

wobei E den Elastizitätsmodul des Werkstoffes kennzeichnet. Schließlich kann man noch die Wandstärke w einführen, so dass gilt:

$$w = r_a - r_i \quad (4.5)$$

Aufgrund der Gleichungen 4.4, 4.2 und 4.5 lässt sich nun eine minimale Wandstärke bestimmen bei der eine bestimmte Durchbiegung nicht unterschritten wird. Die Armlänge kann man aus Tabelle 4.2 zu $d_5 + d_3 \approx 0.55$ m entnehmen. Dieser Wert wird noch um 0.1 m

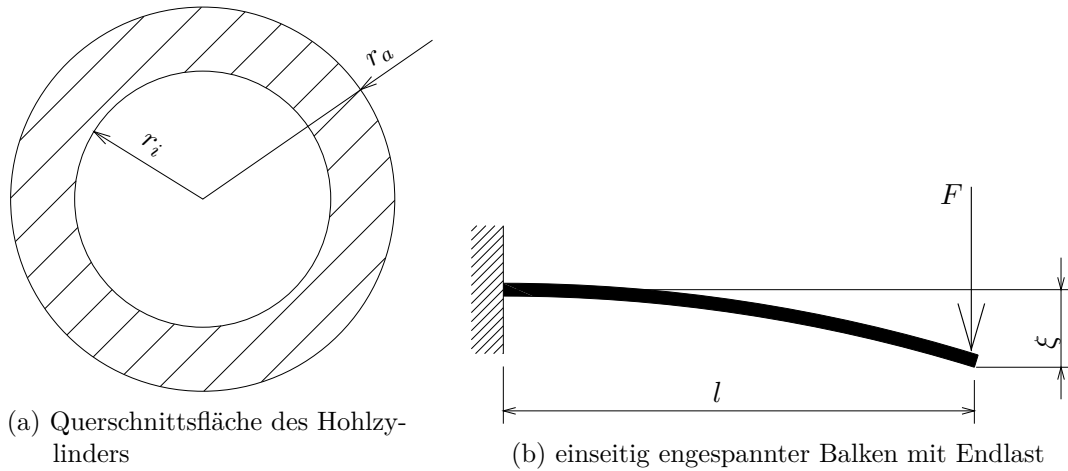


Abbildung 4.3: Skizzen zur tragenden Hülle

auf $l = 0.65$ m verlängert um den Lastpunkt nicht am Handgelenk sondern ca. in der Mitte der Handfläche zu erhalten. Als Elastizitätsmodul soll $E = 13\,000$ MPa gelten, was einem modernen Hochleistungspolymer mit 50% Glasfaseranteil entspricht.¹ Als Kraft wird $F = 30$ N angenommen, womit eine ruhende Masse von etwa 3 kg abgebildet wird. Als maximal erlaubte Durchbiegung wird $\xi = 5$ mm festgelegt. Nimmt man einen minimalen Außenradius $r_a = 26$ mm an, was in etwa dem Mittelwert des Handgelenkumfangs aus Tabelle 4.2 entspricht so ergibt sich das folgende Polynom vierter Ordnung mit dem Parameter d :

$$0 = \xi - \frac{4}{3} \frac{Fl^3}{E\pi (r_a^4 - (r_a - w)^4) i} \quad (4.6)$$

Von den vier Nullstellen dieses Polynoms liegt die einzig physikalisch sinnvolle bei $w \approx 0.8$ mm. Mit der Wahl der Wandstärke zu $w = 2$ mm ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von 2.5

4.7 Gelenksubstitution

Wie bereits erwähnt besteht der humanoide Arm aus je einem Kugelgelenk in der Schulter und dem Handgelenk und einem Drehgelenk im Ellbogen. Die Konzentration dreier Freiheitsgrade in einem Kugelgelenk stellt eine große Herausforderung dar. Einfacher und kinematisch äquivalent ist die Aufteilung des Kugelgelenks in drei Drehgelenke. Die meisten aktuellen Roboterarme implementieren diese Aufteilung, beispielsweise *Nao*, *Robonaut 2* oder die verschiedenen Inkarnationen von *ASIMO*, welche in Kapitel 2 vorgestellt wurden. Abbildung 4.4 zeigt diese Gelenksubstitution. Diese Arbeit befasst sich mit den oberen fünf Gelenken. Richtet man nun die Gelenke des Arms entlang der Achse des ersten Schultergelenks aus kann man eine Einteilung der Gelenke treffen: Gelenke

¹Die Online-Materialdatenbank CAMPUS 5.2 nennt für Zytel 70G50HSLA ein Elastizitätsmodul von 13 000 MPa.

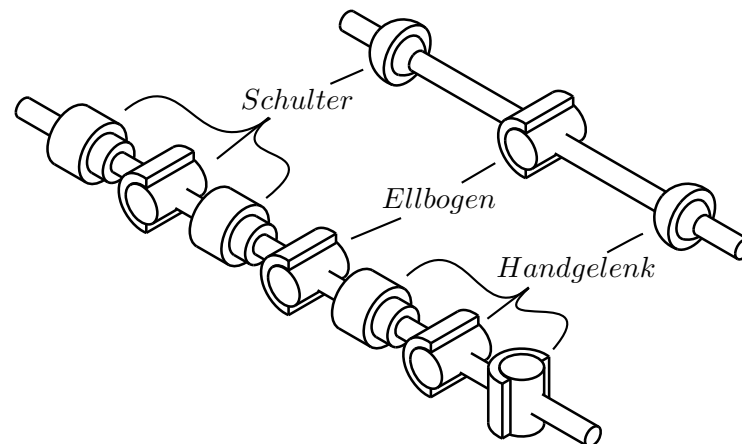


Abbildung 4.4: Die Kugelgelenke der Schulter und des Handgelenks werden jeweils durch drei Drehgelenke substituiert.

deren Achsen parallel zur Achse des ersten Schultergelenks liegen werden im folgenden als Längsgelenke bezeichnet. Alle Längsgelenke haben nahezu die gleichen Anforderungen zu erfüllen und lassen sich daher vorerst gemeinsam betrachten. Gelenke deren Achsen quer zur Achse des ersten Schultergelenks liegen werden Quergelenke benannt. Ebenso lassen sich die beiden Quergelenke aufgrund ihres Anforderungsprofils gemeinsam betrachten. Jedoch haben Quergelenke und Längsgelenke jeweils aus konstruktiver Sicht deutlich verschiedene Anforderungen zu erfüllen. Diese beiden Gelenktypen werden daher in diesem Kapitel getrennt betrachtet.

5 Konstruktion

Nachdem im vorigen Kapitel mit dem Konzept die Grundlage für die Konstruktion gelegt wurde geht dieses Kapitel nun zuerst auf die Umsetzung der Gelenke ein. Danach folgt die Vorstellung der unterschiedlichen Konstruktionsphasen mit den diversen konstruktiven Änderungen und der jeweiligen hergestellten Prototypen.

5.1 Längsgelenke

Längsgelenke können durch folgende grundlegende Eigenschaften charakterisiert werden. Die Achse des Längsgelenks befindet sich zwischen dem vorherigen und dem nachfolgenden Gelenk im Inneren des Armes. Dazwischen kann die Lagereinheit des Gelenks beliebig entlang seiner Achse verschoben werden. Entlang der Achse ist außerdem genug Bauraum für den Antrieb vorhanden. Andererseits trennt ein Längsgelenk den Bauraum des Ober- oder Unterarmes in zwei voneinander getrennte Volumen. Einzig und allein die Welle des einen Armteils dringt in das Volumen des zweiten Armteils ein. Es ist daher fast zwingend erforderlich, dass sämtliche Kabel und Hydraulikleitungen durch diese Welle geführt werden. Eine hohle Welle mit ausreichendem Innendurchmesser ist also notwendig. Die Lagerung der Längsgelenke muss Kräfte längs und vor allem der quer zur Gelenkachse aufnehmen können.

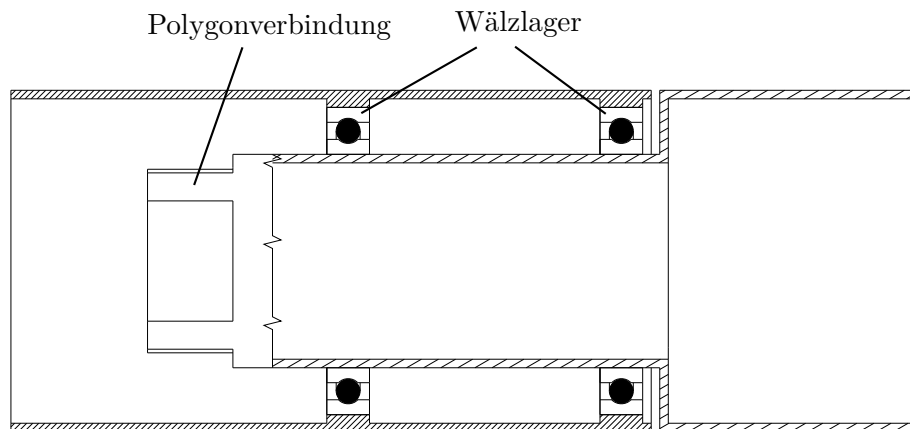


Abbildung 5.1: Das Längsgelenk beinhaltet zwei Wälzlager als Fest- und Loslager und eine Polygonverbindung für die Momentübertragung.

5.1.1 Momentübertragung

Eine Polygonverbindung ist selbstzentrierend und hinsichtlich der Kerbwirkung vielfach günstiger als andere Formschlussverbindungen [9]. Während bei Umformverfahren für die Herstellung einer Polygonverbindung vielfach Spezialwerkzeuge notwendig sind, ist dieser Nachteil beim Urformen nicht mehr gegeben. Im Gegenteil sind Polygonverbindungen mit Gussverfahren sogar einfacher herzustellen als z.B. Verzahnungen, da keine Hinterschnitte notwendig sind, wenn (wie hier geplant) die Entformrichtung quer zur Achsrichtung steht. Das Polygonprofil P4C besteht aus Teilen eines Kreises und Teilen einer Trochoide. [10]. Der Kreis, die Trochoide und der sich ergebende Polygonzug sind in Abbildung 5.2 dargestellt.

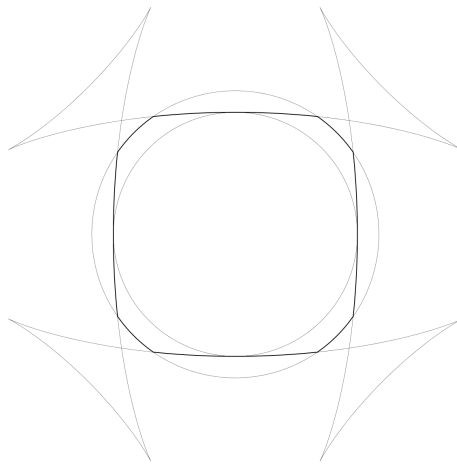


Abbildung 5.2: Die Polygonverbindung setzt sich aus Teilen einer Trochoide und Teilen eines Kreises zusammen

5.1.2 Antrieb

In den Quergelenken sind Drehantriebe in Form von doppelt wirkenden Schwenkflügelantrieben verbaut. Diese Schwenkflügelantriebe können zwischen zwei Endpositionen frei drehen und können in beiden Drehrichtungen das selbe Maximalmoment zur Verfügung stellen. In einem Schwenkflügelantrieb können mehrere Schwenkflügel verbaut sein. Jeder Schwenkflügel leistet den selben Beitrag zur Drehmomentbildung. Das Gesamtdrehmoment ist daher der Drehmomentbeitrag eines einzelnen Schwenkflügels mal der Anzahl der Schwenkflügel:

$$\tau = m \int_{r_1}^{r_2} \rho dF(d\rho) d\rho = m \int_{r_1}^{r_2} \rho b (p_A - p_B) d\rho \quad (5.1)$$

mit der Anzahl der Schwenkflügel m , dem Radius des äußeren Ende des Schwenkflügels r_2 , dem Radius des inneren Ende des Schwenkflügels r_1 , dem Druck in Kammer A p_A , dem Druck in Kammer B p_B und der über den Radius des Schwenkflügels variablen Breite des

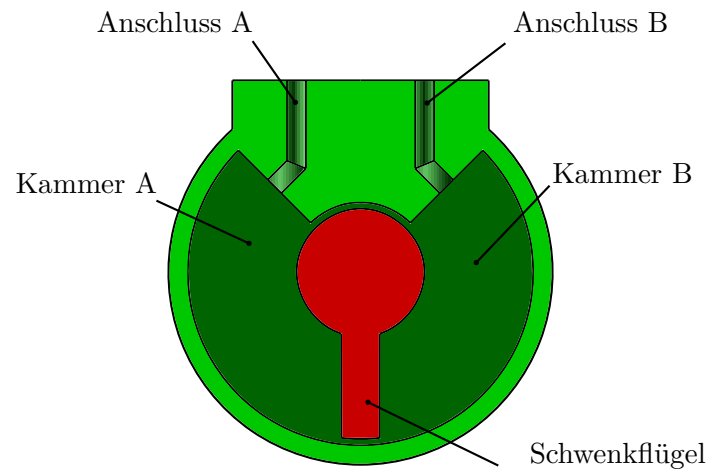


Abbildung 5.3: Verschiedene Drücke in den Kammern A und B verursachen ein Drehmoment auf den Schwenkflügel.

Schwenkflügels b . Wenn nun die Breite b des Schwenkflügels konstant ist über den Radius r , also der Schwenkflügel rechteckige Flächen hat vereinfacht sich diese Gleichung zu:

$$\tau = \frac{mb}{2} (r_2^2 - r_1^2) (p_A - p_B) \quad (5.2)$$

Das Maximal- und Minimalmoment der Schwenkantriebe ergibt sich somit zu:

$$\tau_{max} = -\tau_{min} = \frac{mb}{2} (r_2^2 - r_1^2) p_{sys} \quad (5.3)$$

und ist damit nur von den Konstruktionsparametern des Antriebs (m , r_1 , r_2 und b) und dem Systemdruck p_{sys} abhängig.

5.2 Quergelenke

Die Quergelenke haben einige, den Längsgelenken gegensätzliche Eigenschaften. Die Achse der Quergelenke steht beiderseits aus dem Bauraum des Armes hinaus. Es ist daher nicht möglich den Antrieb außerhalb des Gelenkbauraums in Gelenkachse zu platzieren. Sämtliche Kabel und Hydraulikleitungen müssen hier quer zur Gelenkachse verlegt werden. Es wäre zwar möglich die Leitungen ebenso wie beim Längsgelenk durch eine hohle Welle zu führen, allerdings stößt man dabei auf viele weitere Problemstellungen. Naturgemäß befindet sich das Quergelenk immer zwischen zwei Längsgelenken. Im Bauraum zwischen den Gelenken, also quer zur Achse des Quergelenks ist wiederum viel Platz für dessen Antrieb vorhanden.

In Anlehnung an den *Utah-Arm*, welcher in Abschnitt 2.7 vorgestellt wurde lässt sich ein Quergelenk mit exzentrischer Achse konstruieren. Im Vergleich mit einer Querachse, welche die beiden Längsachsen des vorangehenden und des darauffolgenden Gelenks schneidet ergeben sich einige Vorteile:

- Ein Ästhetischeres Erscheinungsbild als andere Bauweisen bieten wird ermöglicht, wie sich beispielsweise im Vergleich von *Utah-Arm* mit *Robonaut 2* zeigt.
- Dadurch, dass die Achse am Rand des Armquerschnitts liegt bleibt der gesamte Querschnitt zum Einbau des Aktuators. Es sind daher größtmögliche Hebellängen für den Hydraulikzylinder möglich.
- Hydraulikleitungen und Kabel müssen nicht durch die Achse geführt werden. Es können daher Wellen mit geringem Durchmesser und daher auch Lager mit kleinen Abmessungen verwendet werden.
- Eine Bauweise, bei der das Eindringen von Gegenständen verhindert wird ist sehr einfach möglich.¹

Abbildung 5.4 zeigt nun ein solcherart konstruiertes Quergelenk.

5.2.1 Antrieb

In den Quergelenken sind Linearantriebe in Form von doppelt wirkenden asymmetrischen Hydraulikzylindern verbaut. Abbildung 5.5 zeigt ein Schema eines solchen Zylinders. Die Kammern des Zylinders sind mit hydraulischen Proportionalventilen verbunden womit der Zylinder gesteuert werden kann.

Die vom Linearzylinder geleistete gestellte Kraft lässt sich durch folgende Gleichung darstellen:

$$F_i = A_A \cdot p_A - A_B \cdot p_B \quad (5.4)$$

wobei F_i die Kraft des Linearzylinders in Ausfahrriichtung, A_A die Fläche des Kolbens auf der Seite A, A_B die Fläche des Kolbens auf der Seite B, p_A der Druck auf die Fläche A und p_B der Druck auf die Fläche B ist.

¹Für Bewegungswinkel unter 90° ist die Bauweise äußerst einfach. Für größere Bewegungswinkel ist etwas mehr konstruktiver Aufwand nötig, was im Kapitel 5.4 thematisiert wird.

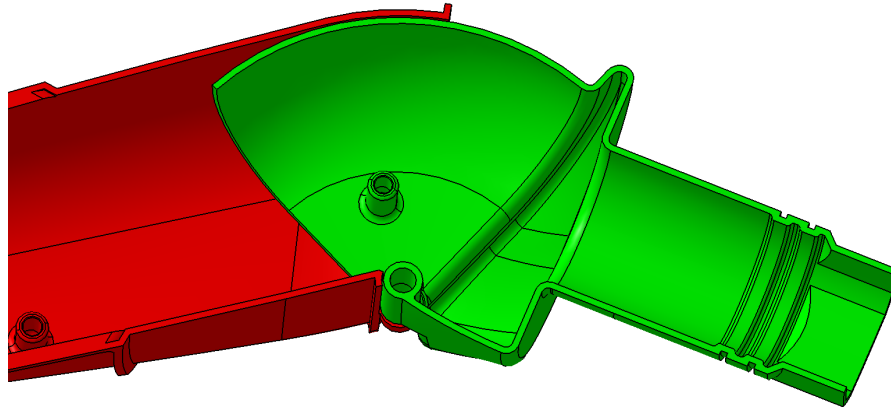


Abbildung 5.4: Konzept des Quergelenks, dargestellt als Schnitt im Oberarmgelenk. Das Quergelenk beinhaltet Gleitlager für die Gelenkachse sowie zwei weitere Achsen für die Anbindung der beiden Enden des Hydraulikzylinders. Der Oberarm ist rot dargestellt während die Schulter in grün gehalten ist.

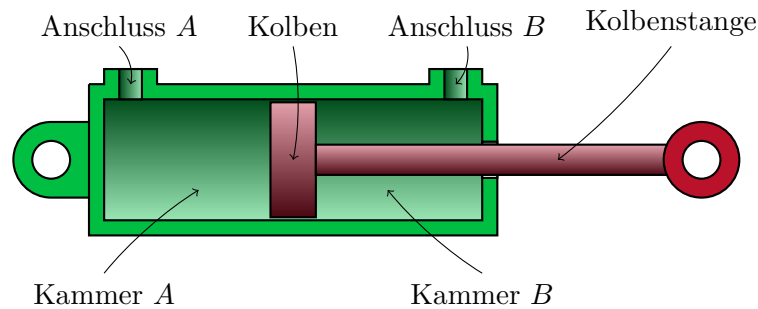


Abbildung 5.5: Verschiedene Drücke in den Kammern A und B schieben den Kolben im Zylinder hin und her. Die Fläche A_B ist um den Querschnitt der Kolbenstange kleiner als A_A .

Um maximale Kraft in eine Richtung aufzubringen muss nun in der jeweiligen Seite der Systemdruck und auf der gegenüberliegenden Seite Null Druck anliegen. Es ergeben sich also folgende Maximal- und Minimalkräfte in die jeweiligen Richtungen:

$$F_{li,max} = A_A \cdot p_{sys} \quad (5.5)$$

$$F_{li,min} = -A_B \cdot p_{sys} \quad (5.6)$$

Abbildung 5.7 zeigt eine Version des eingebauten Linearantriebs beim Ellbogen.

Das Kurbelgetriebe wandelt diese Kraft in ein Moment um, welches letztendlich das Gelenk dreht. Das Verhältnis von Moment zu Kraft ergibt sich aus den Geometrischen Gegebenheiten des Linearzylinders und dessen Einbauparameter. Die Lager des Linearzylinder und die Achse des Gelenks spannen das Dreieck $\triangle K_1 K_2 A$ auf. Der Abstand $r = \overline{AK_1}$ ist die Hebellänge, also der Abstand zur Achse an dem die Kraft des Zylinders angreift. $l = \overline{AK_2}$ bezeichnet den Abstand des fixierten Lagers zur Achse. Zwischen diesen

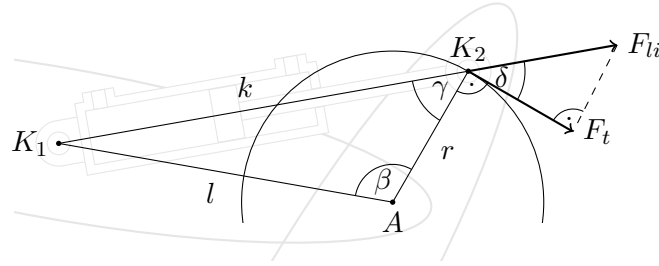


Abbildung 5.6: Die Lager des Linearzylinder und die Achse des Gelenks spannen das Dreieck $\triangle K_1K_2A$ auf. Die Punkte K_1 und K_2 bezeichnen die Lager des Linearzylinders und der Punkt A die Gelenkachse. Von der angreifenden Kraft F_{li} wird nur der zum Hebel normale Anteil F_t verwendet.

beiden Geraden wird der Winkel β aufgespannt. Bei einer Gelenkbewegung beschreibt der Punkt K_2 eine Kreisbahn um den Punkt A . Die Drehmomenterzeugende Kraft ist dabei die Tangentialkomponente F_t der Linearzylinderkraft F_{li} . Diese ergibt sich durch die Projektion der Linearzylinderkraft F_{li} auf die Kreistangente im Punkt K_1 zu $F_t = F_{li} \cdot \cos(\delta)$, daher ist das Moment:

$$\tau = F_t \cdot r = F_{li} \cdot r \cdot \cos(\delta) \quad (5.7)$$

Am Punkt K_1 kann man erkennen, dass δ , γ und ein rechter Winkel zusammen einen Winkel von 180° aufspannen. Es gilt also:

$$180^\circ = \gamma + 90^\circ + \delta \Rightarrow \delta = \frac{\pi}{2} - \gamma \quad (5.8)$$

Nun ist das Problem auf das bestimmen des Winkels γ des Dreiecks $\triangle K_1K_2A$ umgeformt. Dank der drei gegebenen Größen l , r und β ist dieses Problem einfach mithilfe des Kosinussatzes zu lösen. So liefert der β -Kosinussatz für die gegebenen Größen die Länge k der dritten Dreiecksseite, und der γ -Kosinussatz schließlich den gesuchten Winkel γ .

$$k^2 = r^2 + l^2 - 2rl \cos(\beta) \quad \Rightarrow \quad k = \sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos(\beta)} \quad (5.9)$$

$$l^2 = r^2 + k^2 - 2rk \cos(\gamma) \quad \Rightarrow \quad \gamma = \arccos\left(\frac{k^2 - l^2 + r^2}{2kr}\right) \quad (5.10)$$

Kombiniert man nun Gleichung 5.8, Gleichung 5.9 und Gleichung 5.10 und setzt diese in Gleichung 5.7 ein erhält man das Gesuchte Moment als Funktion der Zylinderkraft und des Winkels β :

$$\tau = F_{li} \cdot r \cdot \sqrt{-\frac{\sin(\beta)^2 l^2}{2rl \cos(\beta) - l^2 - r^2}} \quad (5.11)$$

Der Winkel β stimmt allgemein nicht mit dem jeweiligen Gelenkwinkel θ oder q überein, sondern ist um einen jeweiligen Offsetwinkel verschoben:

$$\beta = q_i + \beta_{off} = \theta + q_{off} + \beta_{off} \quad (5.12)$$

Die maximal möglichen Momente hängen also nicht nur von den Konstruktionsparametern des Antriebs (A_A und A_B), den Einbauparametern (β_{off} , l und r) und dem

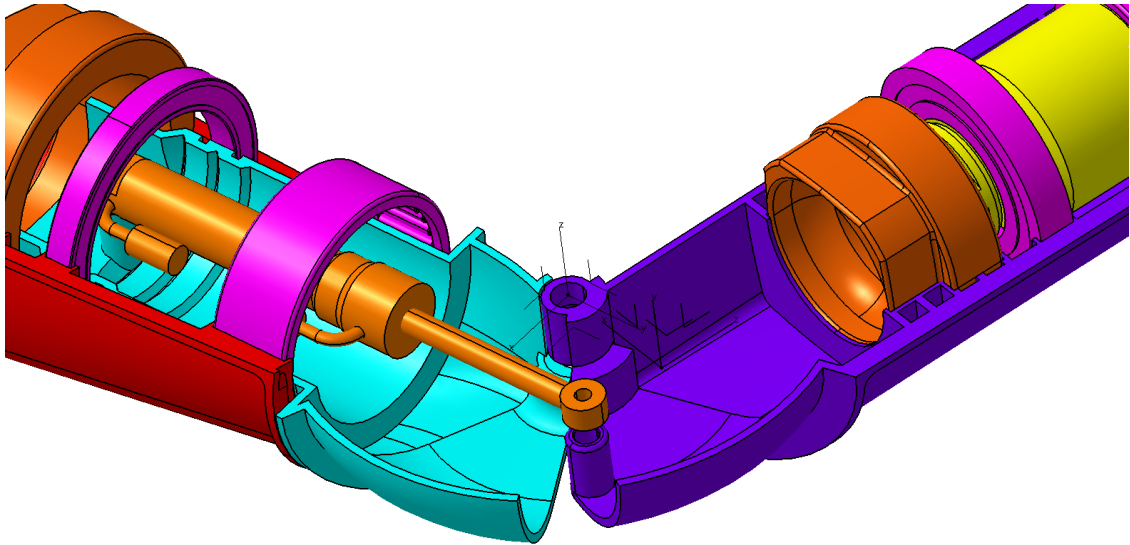


Abbildung 5.7: Darstellung der eingebauten Antriebe. Die Linearantriebe sowie die Schwenkantriebe sind orange, der Oberarm rot, der Ellbogen cyan und der Unterarm violett dargestellt.

Systemdruck p_{sys} ab. Ebenso spielt der aktuelle Gelenkwinkel q eine bedeutende Rolle, so dass das verfügbare Maximalmoment nicht konstant über die Gelenkstellung ist. Kombiniert man nun Gleichungen 5.11 und 5.4 kommt man auf das Moment, welches der Linearzylinder zur Verfügung stellt:

$$\tau = (A_A \cdot p_A - A_B \cdot p_B) \cdot r \cdot \sqrt{-\frac{\sin(\beta)^2 l^2}{2rl \cos(\beta) - l^2 - r^2}} \quad (5.13)$$

beziehungsweise mit Gleichung 5.6, die Maximalmomente in die beiden Richtungen:

$$\tau_{max} = A_A \cdot p_{sys} \cdot r \cdot \sqrt{-\frac{\sin(\beta)^2 l^2}{2rl \cos(\beta) - l^2 - r^2}} \quad (5.14)$$

$$\tau_{min} = -A_B \cdot p_{sys} \cdot r \cdot \sqrt{-\frac{\sin(\beta)^2 l^2}{2rl \cos(\beta) - l^2 - r^2}} \quad (5.15)$$

Abbildung 5.7 zeigt Versionen der eingebauten Schwenkantriebe beim Oberarm-Ellbogen-Gelenk und beim Unterarm-Handgelenk-Gelenk.

5.3 Erste Version

In einer ersten Version des Armes wurden die bisherigen Überlegungen umgesetzt. In dieser Phase wurde das Augenmerk hauptsächlich auf die Ästhetik und die mechanische Funktion gelegt. Weiters wurde ein Protoyp des Ellbogengelenks mittels selektiven Lasersinterns (SLS) hergestellt.²

Bei dieser Version wurden die Querlager als Gleitlager *Igus GFM060804* mit Passschulter-schraube *DIN ISO 7379 06x60* mit M5-Gewinde und Unterlegscheiben als Reibpartner ausgelegt. Die Längslager bestehen aus Gleitlagern *Igus GFM055507* mit dem inneren Bauteil als Reibpartner. Abbildung 5.8 zeigt Schnittansichten der beiden Lagertypen.

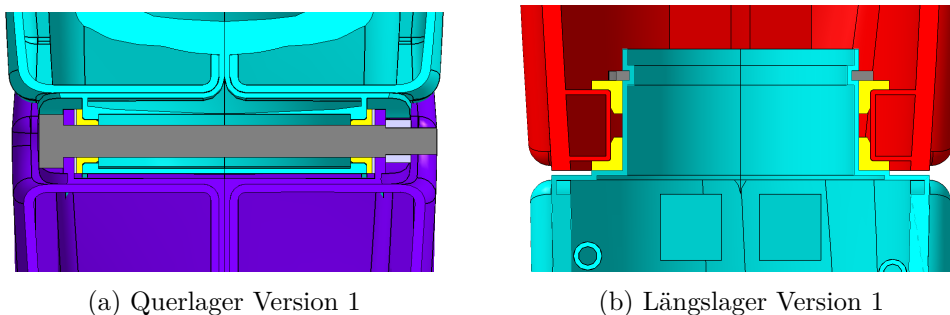


Abbildung 5.8: Schnittansicht durch Ellbogen-Unterarm-Querlager und Oberarm-Ellbogen-Längslager

Abbildung 5.9 zeigt ein 3D-Modell der gesamten Konstruktion in den Farben, in denen die einzelnen Armglieder im weiteren Verlauf des Skriptums gekennzeichnet sind.

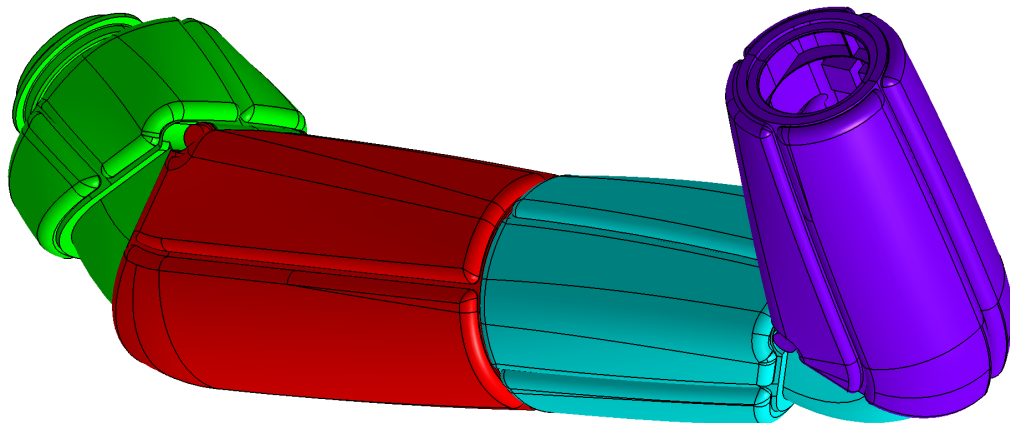


Abbildung 5.9: Die erste Version des Roboterarms komplett mit Airskin. Das Schulterbauteil ist grün, der Oberarm rot, der Ellbogen cyan und der Unterarm violett dargestellt.

²Beim selektiven Lasersintern wird das Werkstück Schicht für Schicht aus einem (Kunststoff-) Pulver aufgebaut. Hierbei wird mit einem Laser die Schichtkontur des Bauteils eingeschmolzen und danach eine neue Schicht Pulver aufgetragen.

Da schon zu dieser Phase ersichtlich war, dass das Ellbogengelenk aufgrund seines großen Bewegungsspielraums kritisch ist, wurde ein erster Prototyp des Ellbogengelenks mittels selektiven Lasersinterns gefertigt. Während sich das Querlager wie erwünscht



Abbildung 5.10: Der erste Prototyp besteht nur aus den Ellbogen und Unterarmteilen.

verhielt und auch keine große Reibkräfte hervorrief, wurde beim Ellbogengelenk eine Fehlkonstruktion festgestellt. Durch den großen Bewegungsspielraum des Ellbogens ist auf der gegenüberliegenden Seite der Achse ein großes Schild notwendig um eine ständig geschlossene Außenfläche zu gewährleisten. In komplett gestreckten Zustand ist dieses Schild vollständig im Unterarm und verkleinert die Durchtrittsfläche vom Ellbogen in den Unterarm beträchtlich. Tatsächlich wird die Fläche so klein, dass kein Hydraulikzylinder mehr durchgeführt werden kann. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Mit

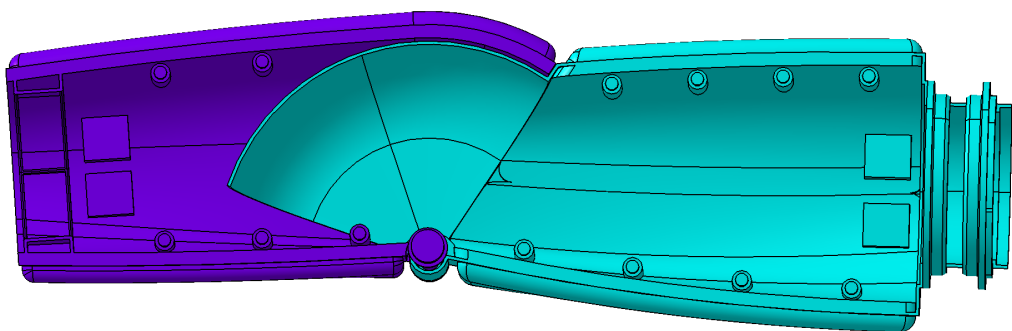


Abbildung 5.11: Detail des Ellbogengelenks des ersten Prototyps. Man sieht, dass nicht viel Platz übrig bleibt, um einen Hydraulikzylinder vom Ellbogen in den Unterarm zu führen.

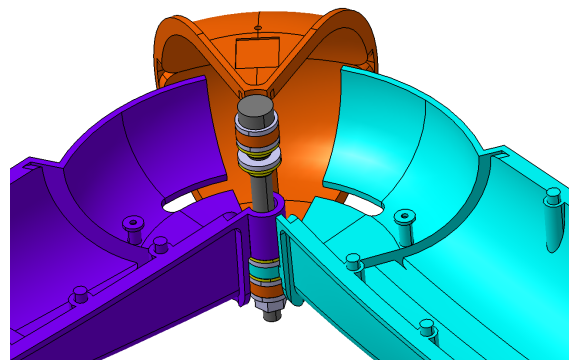
der Lösung dieses Problems befasst sich der folgende Abschnitt 5.4.

5.4 Ellbogenabdeckung

Das Ellbogengelenk hat einen besonders großen Bewegungspielraum, was Ursache für einige konstruktive Herausforderungen ist. Mit dem ersten Prototypen des Ellbogengelenks (siehe Abschnitt 5.3) wurde festgestellt, dass die bisherigen Überlegungen bezüglich des Quergelenks diesen Herausforderungen nicht gewachsen sind. Eine mögliche Lösung für dieses Problem findet sich bei mittelalterlichen Plattenrüstungen. Diese Ritterrüstungen bestehen ähnlich dem entwickelten Roboterarm aus starren Hüllen, welche an Gelenkstellen miteinander verbunden sind. Die wichtigste Aufgabe von Körperrüstungen ist es Gegenstände (in dem Fall Waffen) vom Eindringen in den Rüstungsinnenraum (also dem Körper des Gerüsteten) abzuhalten. Dies deckt sich mit einer der Hauptanforderungen für den Roboterarm. Es ist also naheliegend, dass auch die mittelalterlichen Rüstungsmacher vor dem selben Problem standen den Ellbogen abzudecken. Tatsächlich finden sich an diesen jahrhundertealten Rüstungen Lösungen die als Inspiration dienen können. Bei vielen Plattenrüstungen gibt es am Ellbogen eine sogenannte Armkachel, welche beweglich mit den Oberarm- und Unterarmplatten verbunden ist und dadurch den Ellbogen jederzeit abdeckt. Abbildung 5.12a zeigt eine solche Armkachel an einer schwedischen Plattenrüstung. Abbildung 5.12b zeigt einen Entwurf für die Ellbogenabdeckung. Man sieht, wie trotz des großen Öffnungswinkels ein Eindringen eines Gegenstandes in das Innere des Armes verhindert wird.



(a) Armkachel einer Ritterrüstung von ca. 1600 bis 1640



(b) Ellbogenabdeckung in Anlehnung an eine Armkachel.

Abbildung 5.12: Armkachel und Ellbogenabdeckung

Foto: "Rustningsdel": Wikimedia Commons/Miguel Herranz, Lizenz: CC BY-SA

5.5 Zweite Version

Ein zweiter Prototyp des kompletten Armes wurde nun mittels Stereolithografie-Verfahren gefertigt.³ Dieser Roboterarm wurde für Versuchs- und Ausstellungszwecke sogar teilweise mit Airskin überzogen. Der zweite Prototyp beinhaltet die in Abschnitt 5.4 erdachte Ellbogenabdeckung. Durch das neue Bauteil am Ellbogengelenk ist eine veränderte Lagerung notwendig, welche in Abbildung 5.13 dargestellt ist. Die Querlagerung in der Schulter, sowie die Längslager wurden unverändert von der zweiten Version übernommen. Eine

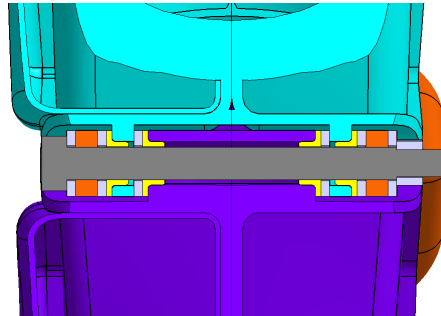


Abbildung 5.13: Querlager der zweiten Version. Die Passschulter schraube sitzt fest in der Ellbogenabdeckung während das Ellbogenbauteil und der Unterarm mittels Gleitlagern gelagert sind.

3D-Darstellung des Armes ist in Abbildung 5.9 zu sehen. Eine Erkenntnis des zweiten Prototyps war, dass die großen Gleitlager der Längsgelenke zu viel Reibung verursachen. Weiters wurden die Proportionen des zweiten Prototyps nicht als ästhetisch empfunden, weshalb in Folge vor allem die Abmessungen des Oberarms und des Ellbogens deutlich verändert wurden.

³Beim Stereolithografie-Verfahren wird das Werkstück aus einem lichtsensitiven Kunststoff gefertigt. Hierbei wird das Bauteil Schicht für Schicht mit einem Laser in einem Bad aus diesem Photopolymer ausgehärtet. Nachdem eine Schicht ausgehärtet wurde fährt die Plattform mit dem Bauteil tiefer ins Bad hinein um eine neue Schicht zu ermöglichen.

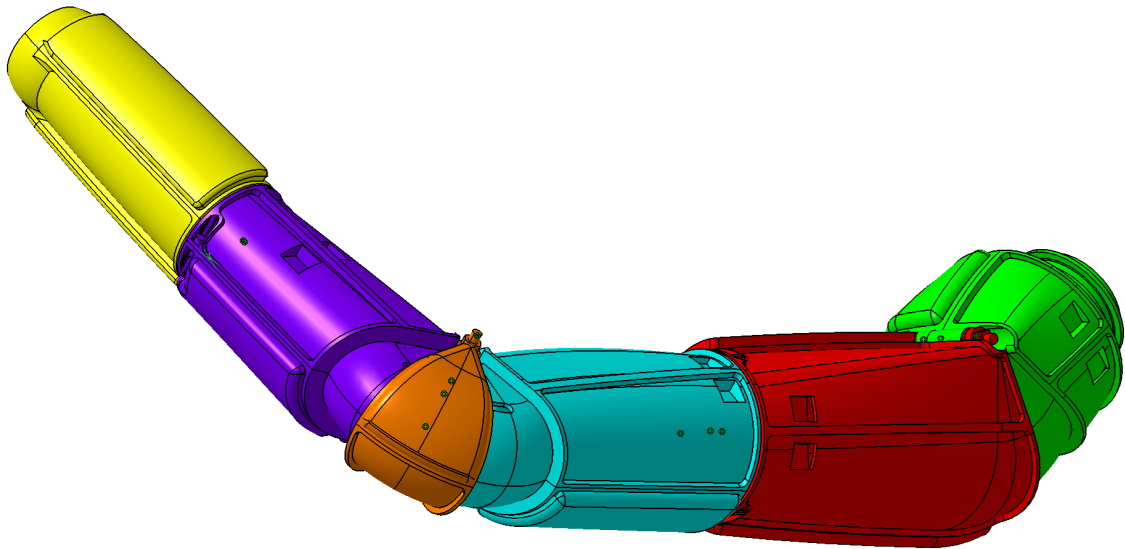


Abbildung 5.14: Die zweite Version des Roboterarms komplett mit Airskin. Das Schulterbauteil ist grün, der Oberarm rot, der Ellbogen cyan und der Unterarm violett dargestellt. Die neue Ellbogenabdeckung ist orange dargestellt.

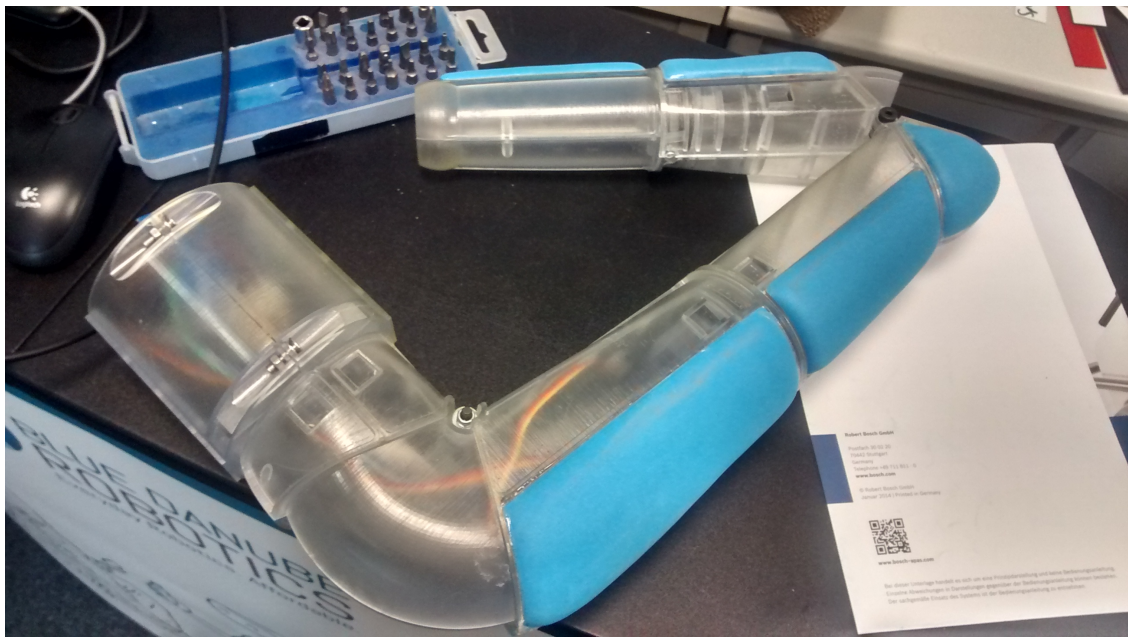


Abbildung 5.15: Der zweite Prototyp wurde teilweise mit Airskin überzogen und mit Elektronik ausgestattet.

5.6 Dritte Version

Die dritte Konstruktionsiteration weist vielfältige Änderungen im Vergleich zu den Vorgängern auf. Als augenscheinlichste Änderung wurden die Proportionen des Armes geändert. Die Länge zwischen Schultergelenk und Ellbogengelenk wurde verringert um ein ästhetischeres Erscheinungsbild zu erhalten. Dadurch wird der Bereich zwischen Ellbogen und Schulter nun nicht mehr auf zwei annähernd gleich große Baugruppen aufgeteilt. Dies ist eine Folge der geänderten Platzverhältnissen im Arminneren. Die Umstellung der Längslager von reibungsstarken Gleitlagern auf reibungsarme Wälzlager und die gleichzeitige deutliche Erhöhung des Lagerabstands machten dies notwendig. Abbildung 5.16 zeigt das Prinzip des neuen Längslagers am Beispiel des Handgelenk-Unterarm-Lagers. Das

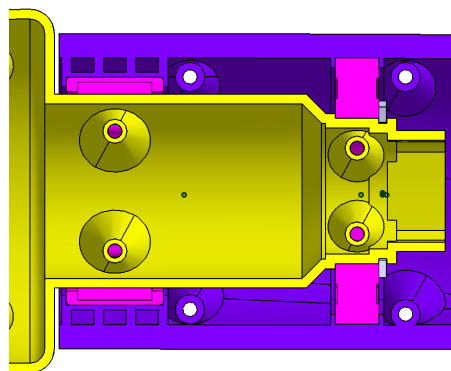


Abbildung 5.16: Längslager der dritten Version. Die beiden Wälzlager sind als Fest- und Loslager ausgeführt.

Oberarmbauteil stellt nun in diesem Bereich den Großteil der Hülle dar, während das kurze Ellbogenbauteil optisch in den Hintergrund tritt. Außerdem wurde die Form und die Position der Airskin verändert um optisch auf einen menschlichen Arm mit seinen Muskeln anzuspielen. Diese optischen Änderungen sind in Abbildung 5.17 zu sehen.

Im Oberarm-Ellbogen-Lager sowie im Torso-Schulter-Lager kommen nun jeweils eine *Schaeffler HK5020* Nadelhülse als Loslager, sowie ein *Misumi B6810ZZ* doppelt abgeschirmtes Rillenkugellager als Festlager zum Einsatz. Im Unterarm-Handgelenk Lager wird aufgrund der beengteren Platzverhältnisse ein *Igus Xiros BB-16006-B180-10-ES* Polymerkugellager als Festlager und eine *Schaeffler HK4020* Nadelhülse als Loslager verwendet.

Diese Konstruktionsiteration ist die erste, welche die Möglichkeit bietet Antriebe einzubauen. Um unabhängig von der Entwicklung eigener Antriebe zu sein wurden mehrere Hydraulikkomponenten des Unternehmens *PREMACON GmbH*, welches sich auf den Liebherr-Bagger-Modellbau spezialisiert hat, erworben. Für die Aktuierung des Schulter-Oberarm-Gelenks wurde ein *60200009* Hydraulikzylinder mit 16 mm Kolbendurchmesser und 50 mm Hub angeschafft. Das Ellbogen-Unterarm-Gelenk kommt mit einem *62000017* Hydraulikzylinder mit 12 mm Kolbendurchmesser und 51 mm Hub aus. Für die Schwenkantriebe gab es leider nicht so eine große Auswahl, weshalb für beide Antriebe auf einen *SMC CRB2* Schwenkantrieb zurückgegriffen wurde.

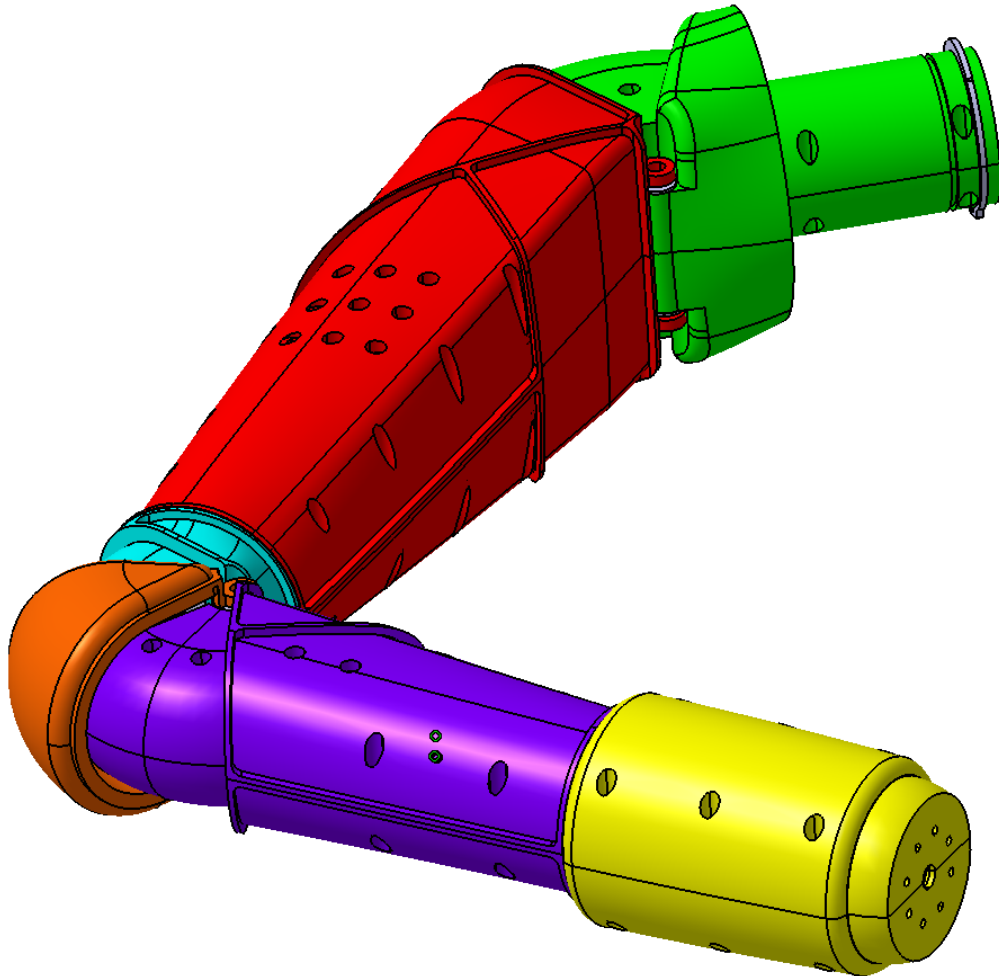


Abbildung 5.17: Die dritte Version des Roboterarms.

Um diese und in Zukunft auch diverse andere Antriebe in dem Prototyp einbauen zu können wurden Hydraulikträger-Elemente konstruiert, welche als Schnittstelle zwischen den Hüllen des Prototyps und den mechanischen Anschlüssen der zugekauften Hydraulikelemente dienen. Diese Hydraulikträger sind so konstruiert, dass sie auf einem handelsüblichen 3D-Filamentdrucker ohne Stützmaterial ausgedruckt werden können. Abbildung 5.18 zeigt die einzelnen Hydraulikträger.

Die beiden Halbschalen jedes Armglieds können bei dieser Version erstmals miteinander verschraubt werden. Der Handgelenkdummy bietet am Hand-Ende einen Lochkreis um diverse Handdummys verschrauben zu können. Die einzelnen Armteile bieten eine Vielzahl an Verschraubmöglichkeiten um Trägerelemente für die Antriebe aufzunehmen. Tabelle 5.1 zeigt die Denavit-Hartenberg-Parameter der dritten Konstruktionsversion. Der dritte Prototyp wurde ebenfalls im SLS-Verfahren gefertigt.

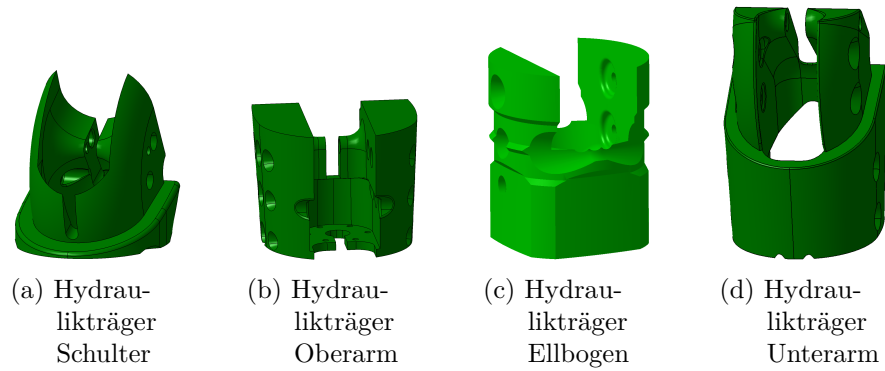


Abbildung 5.18: Hydraulikträger der einzelnen Armteile



Abbildung 5.19: Der dritte Prototyp wurde komplett mit dem SLS-Verfahren aus Kunststoff hergestellt.

Nr.	Bezeichnung	$\alpha_i/^\circ$	a_i/mm	d_i/mm	$q_{lim}/^\circ$
1	Schulter	90	-40	0	180
2	Oberarm	90	-45	0	58
3	Ellbogen	90	-29	280	180
4	Unterarm	90	-32	0	105
5	Handgelenk	90	0	250	180
6	-	-90	0	0	90
7	-	90	0	0	40

Tabelle 5.1: Denavit-Hartenberg Parameter der dritten Konstruktionsiteration mitsamt den Bezeichnungen der Körper und der Gelenksgrenzen

6 Inverse Dynamik Simulation

Das Simulationsmodell zum berechnen der notwendigen Kräfte wurde mithilfe der Robotics Toolbox in MATLAB entwickelt. Die Robotics Toolbox von Peter Corke [6] bietet viele Funktionen zum Erstellen und Simulieren eines Roboterarmes. Die Simulationsumgebung setzt sich aus folgenden Programmen und Modulen zusammen:

- MATLAB R2014a
- Robotics Toolbox for Matlab (Release 9.10)
- ARTE: A ROBOTICS TOOLBOX FOR EDUCATION

Das Modul ARTE dient zur graphischen Anzeige der 3D-Modelle des Arms in den MATLAB Plots. Zusätzlich zu den obigen Modulen wurden noch einige Funktionen geschrieben um den Umgang mit der Simulationsumgebung zu vereinfachen. Diese Funktionen werden im Anhang A erläutert.

6.1 Simulationskript

In diesem Abschnitt wird das MATLAB Simulationskript Stück für Stück vorgestellt. Selbstgeschriebene Funktionen werden entweder direkt hier erklärt oder im Anhang A vorgestellt. Alle anderen Funktionen sind entweder Teil von MATLAB und seinen Toolboxes oder der Robotics Toolbox .

Zuerst muss die Robotics Toolbox zum MATLAB Pfad hinzugefügt und gestartet werden:

```
%% Robotics Toolbox starten
addpath(' ../../MATLAB/rvctools ');
startup_rvc;
```

Nun werden die Denavit-Hartenberg-Parameter des Armes sowie Gelenklimits und Gelenkoffsetwinkel festgelegt. Diese Parameter werden als Vektoren bzw. Matrizen gespeichert, wobei die Indizes der Vektoren bzw. der letzte Index der Matrizen dem Index des Gelenks entsprechen. Ebenso wird die Anzahl der Gelenke festgelegt. All diese Daten werden im Struct `param` gespeichert. Diese Daten sind ebenso in Tabelle 5.1 zu finden.

```
%% Parameter festlegen
param.n = 7;
% DH-Parameter
% Gelenk      1      2      3      4      5      6      7
param.alpha = [ pi/2  pi/2  pi/2  pi/2  pi/2  -pi/2  pi/2 ];
param.a =     [ -40  -45  -29  -32  0      0      0      ]/1000;
```

```

param.d = [ 0 0 280 0 250 0 0 0 ]/1000;
% Gelenklimits & Offsets
param.offsets = [ -45 -175 -180 -175 -90 45 70 ]*pi/180;
param.qlim = [ 0 0 0 0 0 0 0 ;...
              180 85 180 105 180 90 40 ]*pi/180;

```

Im nächsten Schritt werden die Trägheitsparameter, also Masse, Schwerpunktslage und Massenträgheitsmoment aus den Parameterfiles geladen. Die Funktion `readInertiaFile` wird in Anhang A.1 näher erläutert. Wie schon bei den Denavit-Hartenberg-Parametern werden auch hier die Parameter in Vektoren bzw. Matrizen in dem Struct `param` gespeichert.

```

%% Traegheitsparameter laden
[param.m(1),param.r(:,1),param.J(:,:,1)] = readInertiaFile('inertia1.txt');
[param.m(2),param.r(:,2),param.J(:,:,2)] = readInertiaFile('inertia2.txt');
[param.m(3),param.r(:,3),param.J(:,:,3)] = readInertiaFile('inertia3.txt');
[param.m(4),param.r(:,4),param.J(:,:,4)] = readInertiaFile('inertia4.txt');
[param.m(5),param.r(:,5),param.J(:,:,5)] = readInertiaFile('inertia5.txt');
[param.m(6),param.r(:,6),param.J(:,:,6)] = readInertiaFile('inertia6.txt');
[param.m(7),param.r(:,7),param.J(:,:,7)] = readInertiaFile('inertia6.txt');

```

Aus den Daten im Struct `param` werden nun n Objekte des Typs `Revolute` erstellt und im Vektor `L` gespeichert. Schließlich wird ein Objekt des Typs `SerialLink` erstellt, welches die `Revolute`-Objekte zu einer kinematischen Kette verbindet und diese im Objekt `robot` speichert. Dieses Objekt erhält nun alle Daten zum Roboterarm und wird daher im weiteren Verlauf ständig referenziert.

Für den Fall, dass das Skript mit verschiedenen Parametern wiederholt aufgerufen wird, wird der Vektor `L` zu Beginn gelöscht, sollte er schon existieren. Dadurch ist garantiert, dass auf jedem Fall mit den neuesten Daten gearbeitet wird.

```

%% Roboterarm erstellen
% Sollte 'L' schon existieren, dann löschen
if exist('L','var')
    clear L;
end

% 'L' befüllen
for i=1:param.n
    L(i) = Revolute( 'd',param.d(i), 'a',param.a(i),...
                  'alpha',param.alpha(i) ,...
                  'r',param.r(1:3,i), 'm',param.m(i), 'I',param.J(:,:,i), 'Jm',0 ,...
                  'qlim', param.qlim(:,i),...
                  'offset', param.offsets(i) );
end

% Arm mit den in 'L' enthaltenen Gelenken erstellen
robot = SerialLink(L);

```

Das Objekt `robot` ist noch nicht vollständig bedatet. Ohne weitere Änderungen geht die Robotics Toolbox davon aus, dass die erste Achse des Roboterarmes in Richtung der positiven z -Achse zeigt. Im vorliegenden Fall steht diese erste Achse jedoch seitlich und 5° nach vorne und oben geneigt aus dem Robotertorso heraus. Es ist also eine Transformation der Armbasis notwendig. Die homogene Transformationsmatrix der Basis setzt sich aus einigen elementaren Rotationen zusammen. Translationen werden vernachlässigt. Der Ursprung des Weltkoordinatensystems wird daher mit dem Ursprung des Basiskoordinatensystems übereinstimmen. Die homogene Transformationsmatrix der Basis lautet:

$$\text{robot.base} = \text{Rot}_y\left(\frac{-5\pi}{180}\right) \text{Rot}_z\left(\frac{5\pi}{180}\right) \text{Rot}_z(\pi) \text{Rot}_y\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (6.1)$$

mit der elementaren Rotation als homogene Transformationsmatrix:

$$\text{Rot}_y(\Phi) = \begin{bmatrix} \cos(\Phi) & 0 & \sin(\Phi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\Phi) & 0 & \cos(\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Rot}_z(\Phi) = \begin{bmatrix} \cos(\Phi) & -\sin(\Phi) & 0 & 0 \\ \sin(\Phi) & \cos(\Phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ebenso wird eine Transformation des Werkzeugkoordinatensystems durchgeführt. Das dient im vorliegenden Fall dazu, dass der Tool-Center-Point nicht mitten im Handgelenk sondern in etwa beim Handballen liegt. Die Handtransformation ist eine einfache Translation:

$$\text{robot.tool} = \text{Trans} \left(\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Um die grafische Repräsentation des Roboters etwas aufzupeppen und außerdem eine Kontrolle der eingegebenen Parameter zu vereinfachen wird der Pfad zu den 3D-Dateien der Roboterkonstruktion festgelegt. Dadurch kann die Robotics Toolbox ein 3D-Abbild des Roboters erstellen.

```
%% Weitere Daten
% Transformation der Basis
robot.base = troy(-5*pi/180)*troz(5*pi/180)*troz(pi)*troty(-pi/2);
% Werkzeugtransformation
robot.tool = transl([0,-0.02,0.1]);
% Pfad zu den 3D-Modellen (STL-Files)
robot.model3d = 'Roboterarm/Armv3';
```

Schließlich werden die Schlüsselpunkte der abzufahrenden Trajektorie erstellt. Da die inverse Kinematik mit einem numerischen Verfahren gelöst wird und sich je nach Startwert eine andere Konfiguration ergeben kann, wird hier ein Startwert für die Gelenkwinkel \mathbf{q}_0 festgelegt:

$$\mathbf{q}_0 = [\theta_{1,0} \quad \theta_{2,0} \quad \theta_{3,0} \quad \theta_{4,0} \quad \theta_{5,0} \quad \theta_{6,0} \quad \theta_{7,0}] \quad (6.3)$$

Dieser Startwert muss nicht mit einer möglichen Winkelkonfiguration übereinstimmen, mit welcher der erste Trajektorienpunkt erreicht wird. Die Trajektorie wird im sechsdimensionalen Arbeitsraum erstellt, welcher sich aus den kartesischen Koordinaten der

Handposition sowie deren Orientierung in Eulerwinkeln¹ ergibt. Jeder Punkt dieses Arbeitsraumes lässt sich als sechsdimensionaler Vektor angeben: $P_i = [x_i, y_i, z_i, \Phi_i, \Theta_i, \Psi_i]^T$. Die Trajektorien-schlüsselpunkte 1 bis m werden nun in eine Matrix `traj` in der folgenden Form eingefügt:

$$\text{traj} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & \Phi_1 & \Theta_1 & \Psi_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & \Phi_2 & \Theta_2 & \Psi_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & z_m & \Phi_m & \Theta_m & \Psi_m \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Die Zeitabstände werden als Vektor der Zeitpunkte, an denen die Schlüsselposition erreicht sein sollen, erstellt:

$$\text{time} = [t_1 \quad t_2 \quad \dots \quad t_m] \quad (6.5)$$

Ebenso werden Nutzlast sowie externe Kräfte auf die Hand festgelegt und letztendlich die Trajektorie benannt. Die externen Kräfte und Momente werden auch als sechsdimensionaler Vektor angegeben. Die externen Momente werden im Zuge dieser Simulationen nicht verwendet, sie werden daher auf 0 gesetzt und es wird nicht weiter darauf eingegangen.

$$\text{fext} = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z] = [\mathbf{F}^T \quad \mathbf{0}] \quad (6.6)$$

Die Nutzlast wird über die Funktion `payload` gesetzt. Als Parameter werden die Masse der Nutzlast sowie ihre Position im Handkoordinatensystem übergeben. Als Beispiel sei hier die Trajektorie *Türdrücker* angegeben:

```
% Trajektorie 'tuerdruecker' erstellen
q0 = [ 90, 45, 0, 90, 0, 45, 20 ]*pi/180;
traj = [
%   x       y       z       phi     theta    psi
    0.2,    0.5,   -0.1    pi/2,    pi/2,    pi/2    ;...
    0.2,    0.5,   -0.15   pi/2,    pi/2,    pi/2    ;...
    0.2,    0.45,  -0.15   pi/2,    pi/2,    pi/2    ];
time = (0:size(traj,1)-1)*1;
force = [ 0, 0, 16 ]';
fext = [ force', 0, 0, 0 ];
robot.payload( 0, [0,0,0] );
name = 'tuerdruecker';
```

Schließlich wird die Funktion `simandplot7` aufgerufen, welche die angeforderte Trajektorie mit dem erstellten Roboterarm simuliert und die Simulationsergebnisse anzeigt und abspeichert.

```
%% Simulieren und anzeigen
[ td, q, qp, qpp, tau, M, F, Mdyn, Fdyn ] = simandplot7(name, robot,...
    time, traj, q0, fext );
```

¹In der Robotics Toolbox wird die ZYZ-Konvention verwendet[6]

Die Funktion `simandplot7` beinhaltet die Trajektorienerstellung, den Aufruf der inversen Kinematik Berechnung sowie den Aufruf des Recursive-Newton-Euler (RNE) Algorithmus und das Abspeichern und Abbilden der Simulationsergebnisse. Zuerst wird zu den Startwerten der Gelenkwinkel q_0 mit der Funktion `fkine` die homogene Transformation des Handkoordinatensystems T_0 errechnet. Daraus werden die kartesischen Koordinaten xyz_0 sowie die Eulerwinkel eul_0 extrahiert.

```
function [ td, q, qp, qpp, tau, M, F, Mdyn, Fdyn ] = simandplot7( name,...
    robot, t, traj, q0, fext )
%SIMANDPLOT7 simuliert eine Trajektorie mit einen Roboterarm, plottet das
%Ergebnis und speichert es ab.

% Startpose
T0 = robot.fkine( q0 ); % Endeffektortransformation bei Startgelenkwinkeln
[~,xyz0] = tr2rt(T0); % kartesische Koordinaten
eul0 = tr2eul(T0); % Eulerwinkel
```

Als nächstes wird eine Zwischentrajektorie erstellt, welche den Arm von der Startposition in die erste gewünschte Trajektorienposition überführt. Dieser Zwischenschritt ist zwar nicht notwendig, vereinfacht jedoch die Handhabung, da nicht bei jeder Änderung der Trajektorie neue Startwerte errechnet werden müssen. Mithilfe der Funktion `trajectory` (siehe Anhang A.2) wird nun eine zyklische Trajektorie zwischen den Schlüsselposen T_0 und der ersten Schlüsselpose der gewünschten Trajektorie erstellt. Diese Trajektorie ist im sechsdimensionalen Arbeitsraum und wird als nächstes in eine Folge von homogenen Transformationsmatritzen umgewandelt, welche als Parameter für die inverse Kinematik `ikcon` dienen. Die Funktion `ikcon` berechnet numerisch die Lösung der inversen Kinematik mit Berücksichtigung der Gelenkwinkelgrenzen. Als Ergebnis dieses Zwischenschritts erhalten wir die Gelenkwinkel für die erste Schlüsselpose der gewünschten Trajektorie.

```
% Trajektorie von Startpose zur ersten Schlüsselpose
traj0 = [ xyz0' eul0; traj(1,:) ]; % Schlüsselposen
t01 = [ 0; 1 ]; % Zeitpunkte
[~, Pd0] = trajectory( t01, traj0, 1e-1, 'cycloidal' ); % Zwischenwerte
T01 = rt2tr(eul2r(Pd0(:,4:6)),Pd0(:,1:3)'); % umwandeln in hom.
q = robot.ikcon( T01, q0 ); % inverse Kinematik
q1 = q(end,:); % neuer Startpunkt
```

Nach dem selben Prinzip wird nun die gewünschte Trajektorie errechnet und mithilfe von `ikcon` in entsprechenden Gelenkwinkel umgerechnet. Danach wird mithilfe der Funktion `differentiate` (siehe Anhang A.3) die entstandene Trajektorie geglättet und zweifach abgeleitet um Gelenkgeschwindigkeiten und Gelenkbeschleunigungen zu erhalten.

```
% restliche Trajektorie
dt = 1e-2; % Zeitschritte
[td, Pd] = trajectory( t, traj, dt, 'cycloidal' ); % Zwischenwerte
Td = rt2tr(eul2r(Pd(:,4:6)),Pd(:,1:3)'); % umwandeln in hom. Tra.
```

```
% Inverse Kinematik
q = robot.ikcon( Td, q1 );           % inverse Kinematik
[qp, qpp, q] = differentiate(q, dt); % glätten und differenzieren
```

Mithilfe der Gelenkgeschwindigkeiten und Gelenkbeschleunigungen lässt sich nun der Recursive-Newton-Euler Algorithmus aufrufen, mit dem die generalisierten Momente sowie alle Momente und Kräfte auf die Armglieder während der Trajektorie errechnet werden. Der RNE-Algorithmus wird in Abschnitt 6.2 vorgestellt.

```
% Momente
[tau, M, F, Mdyn, Fdyn] = erne( robot, q, qp, qpp, fext );
```

Nachdem nun alle Berechnungen fertig sind, werden die Ergebnisse in einer `.dat`-Datei mit dem Trajektoriennamen als Dateinamen abgespeichert.

```
% speichere Simulationsergebnisse
filename = [name, '.dat'];
T = table( td, Pd, q, qp, qpp, tau );
writetable( T, filename, 'Delimiter', '\t' );
```

Diese `.dat`-Dateien dienen als Grundlage für die in Anhang B abgebildeten Plots.

Außerdem werden die Schlüsselposen visualisiert und als `.png`-Dateien abgespeichert.

```
% Schlüsselposen plotten und speichern
figure('Name', [name, ' Animation']);
for i=1:size(traj,1)
    index = t(i)/dt+1;
    W = [ -0.3, 0.3, -0.1, 0.6, -0.3, 0.1 ]*1;
    robot.plot3d( q(index,:), 'workspace', W, 'alpha', 0.5 );
    if i>1
        hold on
        plot3( traj(1:i,1), traj(1:i,2), traj(1:i,3), '-yo',...
            'LineWidth',3, 'MarkerFaceColor','c', 'MarkerSize',10 );
        hold off;
    end
    title( sprintf( 'Pose %d, t = %0.3f s', i, td(index) ) );
    saveas(gcf, sprintf( '%s_%03d.png', name, i ) );
end
```

Die entstandenen Grafiken sind ebenso in diesem Kapitel zu sehen (Abbildungen 6.1, 6.2, 6.3 und 6.4).

Schließlich wird noch die gesamte Trajektorie animiert angezeigt um eine visuelle Kontrolle zu ermöglichen.

```
% Animation abspielen
W = [ -0.3, 0.3, -0.1, 0.6, -0.4, 0.1 ]*1;
robot.plot3d( q , 'workspace', W, 'delay', dt );
```


6.2 Rekursiver Newton Euler Algorithmus

Zum Berechnen der während der Trajektorien in den Gliedern herrschenden Kräfte wird der Recursive-Newton-Euler Algorithmus eingesetzt. Dieser Algorithmus zeichnet sich durch seine numerische Effizienz aus². Als Grundlage des Algorithmus dient das d'Alembertsche Prinzip, nach dem alle auf den Körper wirkenden Kräfte und Momente sich in Summe aufheben müssen. Der hier verwendete Algorithmus lehnt sich an [7] und die Implementierung in der Robotics Toolbox an. Im Vergleich zu [7] wurde jedoch die Notation vereinfacht und nur die Gleichungen für Rotationsgelenke übernommen.

Bevor der RNE-Algorithmus näher beleuchtet wird, werden noch einige vorkommende Größen vorgestellt. Da in jedem Schritt diverse Größen von einem Koordinatensystem Σ_i in ein auf dem Roboterarm benachbartes Koordinatensystem Σ_{i-1} (oder andersherum) transformiert werden, sind die Rotationsmatrix ${}^{i-1}\mathbf{R}_i$ und der Ortsvektor des Ursprung von Σ_i , dargestellt in Σ_{i-1} sehr wichtig.³

$${}^{i-1}\mathbf{R}_i = {}^i\mathbf{R}_{i-1}^T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix} \quad \mathbf{p}_i^* = \begin{bmatrix} a_i \\ d_i \sin(\alpha_i) \\ d_i \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

Weiters werden noch die Trägheitsmatrix \mathbf{I}_i des Körpers i , bezogen auf Σ_i und die Masse m_i des Körpers i verwendet.

In der Vorwärtsiteration werden ausgehend von der Roboterbasis (im vorliegenden Fall dem Torso) die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der einzelnen Armglieder bestimmt. Die Rotationsgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}_i$ von Σ_i gegenüber Σ_{i-1} , dargestellt in Σ_i , lässt sich aus der Rotationsgeschwindigkeit von Σ_{i-1} und der ersten Zeitableitung der generalisierten Koordinate q_i berechnen:

$$\boldsymbol{\omega}_i = {}^i\mathbf{R}_{i-1} (\boldsymbol{\omega}_{i-1} + \mathbf{z}_0 \dot{q}_i) \quad (6.7)$$

Die Rotationsbeschleunigung $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ beinhaltet wiederum die Rotationsbeschleunigung $\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1}$ sowie die zweite Zeitableitung der generalisierten Koordinate q_i .

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = {}^i\mathbf{R}_{i-1} (\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} + \mathbf{z}_0 \ddot{q}_i + \boldsymbol{\omega}_{i-1} \times \mathbf{z}_0 \dot{q}_i) \quad (6.8)$$

Die Zeitableitung der linearen Geschwindigkeit $\dot{\mathbf{v}}_i$ lautet:

$$\dot{\mathbf{v}}_i = \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \mathbf{p}_i^* + \boldsymbol{\omega}_i \times \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{p}_i^* + {}^i\mathbf{R}_{i-1} \dot{\mathbf{v}}_{i-1} \quad (6.9)$$

Die lineare Beschleunigung \mathbf{a}_i ergibt sich schließlich zu:

$$\mathbf{a}_i = \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \mathbf{s}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{s}_i + \dot{\mathbf{v}}_i \quad (6.10)$$

Mit den Größen $\boldsymbol{\omega}_0$, $\dot{\boldsymbol{\omega}}_0$ und $\dot{\mathbf{v}}_0$ lassen sich die Rotationsgeschwindigkeit und (Rotations-) Beschleunigung der Basis ausdrücken. Durch $\boldsymbol{\omega}_0 = \dot{\boldsymbol{\omega}}_0 = \mathbf{0}$ und $\dot{\mathbf{v}}_0 = \mathbf{g}$ wird eine stillstehende Basis mit der angreifenden Erdbeschleunigung abgebildet.

²Der Anzahl der Operationen des RNE-Algorithmus ist proportional zur Anzahl der Gelenke n . [7]

³Da ${}^{i-1}\mathbf{R}_i$ eine orthogonale Matrix ist gilt $({}^{i-1}\mathbf{R}_i)^{-1} = {}^{i-1}\mathbf{R}_i^T$.

In einem zweiten Schritt wird nun vom letzten Armglied (also der Hand) zurück iteriert und die Kräfte und Momente auf die einzelnen Armglieder berechnet. Die Kraft \mathbf{F}_i , welche der Körper i erfährt, setzt sich aus der Kraft welcher der Körper $i + 1$ ausübt, und der aufgrund des zweiten Newtonschen Axioms folgenden Kraft zusammen:

$$\mathbf{F}_i = {}^i\mathbf{R}_{i+1}\mathbf{F}_{i+1} + m_i\mathbf{a}_i \quad (6.11)$$

Der Körper i erfährt auch ein Moment \mathbf{M}_i . Dieses setzt sich aus dem vom Körper $i + 1$ ausgeübten Moment und den Momenten aufgrund der linearen Beschleunigung sowie aufgrund der Rotationsgeschwindigkeit und der Rotationsbeschleunigung zusammen:

$$\mathbf{M}_i = {}^i\mathbf{R}_{i+1} \left(\mathbf{M}_{i+1} + {}^i\mathbf{R}_{i+1}^T \mathbf{p}_i^* \times \mathbf{F}_{i+1} \right) + (\mathbf{p}_i^* + \mathbf{s}_i) \times (m_i\mathbf{a}_i) + \mathbf{I}_i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times (\mathbf{I}_i\boldsymbol{\omega}_i) \quad (6.12)$$

Externe Kräfte und Momente auf die Hand können durch setzen von $\mathbf{M}_{n+1} = \mathbf{M}_E$ und $\mathbf{F}_{n+1} = \mathbf{F}_E$ berücksichtigt werden.

In Anlehnung an die RNE-Implementierung in der Robotics Toolbox ergibt sich folgender syntaktisch vereinfachte Algorithmus⁴

```

 $\boldsymbol{\omega} \leftarrow \mathbf{0}$ 
 $\dot{\boldsymbol{\omega}} \leftarrow \mathbf{0}$ 
 $\dot{\mathbf{v}} \leftarrow \mathbf{g}$ 
 $\mathbf{z}_0 \leftarrow [0 \ 0 \ 1]^T$ 
for  $i = 1 \dots n$  do {Vorwärtsiteration}
   $\mathbf{R} \leftarrow {}^{i-1}\mathbf{R}_i$ 
   $\dot{\boldsymbol{\omega}} \leftarrow \mathbf{R}^T (\dot{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{z}_0\dot{q}_i + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{z}_0\dot{q}_i)$ 
   $\boldsymbol{\omega} \leftarrow \mathbf{R}^T (\boldsymbol{\omega} + \mathbf{z}_0\dot{q}_i)$ 
   $\dot{\mathbf{v}} \leftarrow \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{p}_i^* + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{p}_i^* + \mathbf{R}^T \dot{\mathbf{v}}$ 
   $\mathbf{a} \leftarrow \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{s}_i + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{s}_i + \dot{\mathbf{v}}$ 
   $\mathbf{F}_{T,i} \leftarrow m_i\mathbf{a}$ 
   $\mathbf{M}_{T,i} \leftarrow \mathbf{I}_i\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_i\boldsymbol{\omega})$ 
end for
 $\mathbf{M} \leftarrow \mathbf{M}_E$ 
 $\mathbf{F} \leftarrow \mathbf{F}_E$ 
for  $i = n \dots 1$  do {Rückwärtsiteration}
   $\mathbf{R} \leftarrow {}^i\mathbf{R}_{i+1}$ 
   $\mathbf{M} \leftarrow \mathbf{R} \left( \mathbf{M} + \mathbf{R}^T \mathbf{p}_i^* \times \mathbf{F} \right) + (\mathbf{p}_i^* + \mathbf{s}_i) \times \mathbf{F}_{T,i} + \mathbf{M}_{T,i}$ 
   $\mathbf{F} \leftarrow {}^i\mathbf{R}_{i+1} \mathbf{F} + \mathbf{F}_{T,i}$ 
   $\tau_i \leftarrow \mathbf{M}^T {}^i\mathbf{R}_{i-1} \mathbf{z}_0$ 
end for

```

Der RNE-Algorithmus wurde auch in MATLAB umgesetzt. Im Gegensatz zu der Robotics Toolbox Implementierung stellt der übergebene Parameter `fext` jedoch die Kraft im Inertialsystem dar und nicht im Hand-Koordinatensystem. Außerdem werden nicht nur

⁴Durch geschickte Reihenfolge der Berechnungen lässt es sich vermeiden die meisten Zwischenwerte dauerhaft zu speichern. In MATLAB ergibt sich dadurch eine deutlich bessere Lesbarkeit des Codes, da viele Indizes eingespart werden.

die generalisierten Momente τ_i , sondern auch die Kraft- und Momentvektoren \mathbf{M} und \mathbf{F} für jedes Armglied ausgegeben. Aus diesen Größen lassen sich anschließend die Kräfte an den Lagern der Konstruktion bestimmen, worauf in Kapitel 8 eingegangen wird.

```
function [ tau, Mout, Fout, Mdyn, Fdyn ] = erne( robot, Q, Qp, Qpp, fext )
%ERNE Extended Recursive Newton Euler Algorithmus
% Reverse Newton Euler Algorithmus nach Robotics: Control, Sensing,
% Vision, and Intelligence von Fu, Gonzales und Lee
% erweitert um Lagerkräfte speziell für den entwickelten Roboterarm

z0 = [0 0 1]';

FT = zeros(3,robot.n);
MT = zeros(3,robot.n);
Rb = t2r(robot.base); % Basistransformation

for t=1:size(Q,1)
    q = Q(t,:);
    qp = Qp(t,:);
    qpp = Qpp(t,:);

    % Schritt 1 – Vorwärtsrechnen: Geschwindigkeiten und Beschleunigungen
    % der Körper berechnen
    w = Rb'*[0 0 0]';
    wp = Rb'*[0 0 0]';
    vp = Rb'*robot.gravity; % Gravitation in KS(I) berücksichtigen
    for i=1:robot.n
        R = t2r(robot.links(i).A( q(i) ));
        p = [ robot.links(i).a;...
            robot.links(i).d*sin(robot.links(i).alpha);...
            robot.links(i).d*cos(robot.links(i).alpha)];
        s = robot.links(i).r';
        m = robot.links(i).m;
        I = robot.links(i).I;

        wp = R'*( wp + z0*qpp(i) + cross(w,z0*qp(i)) );
        w = R'*( w + z0*qp(i) );
        vp = cross(wp,p) + cross(w,cross(w,p)) + R'*vp;
        a = cross(wp,s) + cross(w,cross(w,s)) + vp;

        FT(:,i) = m*a;
        MT(:,i) = I*wp + cross(w,I*w);
    end
end
```

```
% Schritt 2 – Rückwärtsrechnen: Kräfte auf Antriebe und Lager berechnen
R = Rb*t2r(robot.A(1:robot.n,q));
s = robot.tool(1:3,4);
F = R\fext(1:3)'; % Externe Kräfte und Momente von
M = R\fext(4:6)'+cross(s,F); % KS(I) nach KS(n) transformieren
for i=robot.n:-1:1
    if i == robot.n
        R = eye(3,3);
    else
        R = t2r(robot.links(i+1).A( q(i+1) ));
    end
    p = [ robot.links(i).a;...
          robot.links(i).d*sin(robot.links(i).alpha);...
          robot.links(i).d*cos(robot.links(i).alpha)];
    s = robot.links(i).r';

    M = R*(M+cross(R'*p,F)) + cross(p+s,FT(:,i)) + MT(:,i);
    F = R*F + FT(:,i);

    Mout(t,i,:) = M;
    Fout(t,i,:) = F;
    Mdyn(t,i,:) = cross(p+s,FT(:,i)) + MT(:,i);
    Fdyn(t,i,:) = FT(:,i);
    tau(t,i) = M'*t2r(robot.links(i).A( q(i) ))'*z0;
end
end
```

6.3 Aufgaben und Trajektorien

Wie schon erwähnt muss *Blue* im Alltag eine Reihe von Aufgaben erledigen, welche auch an den zu entwickelnden Roboterarm Anforderungen stellen. Einige der häufigsten mit höherem Kraftaufwand verbundenen Aufgaben wurden durchsimuliert um Anhaltswerte für die benötigten Kräfte der Aktuatoren zu sammeln. Schon alleine bei der in Abbildung 1.2 dargestellten Aufgabe sind viele Tätigkeiten zu erledigen. *Blue* muss die Kühlschrankschranktür öffnen und ein Getränk herausnehmen. Eventuell muss er am Weg zum Kühlschrank noch eine Zimmertür öffnen.

6.3.1 Zimmertür öffnen

Eine der häufigsten Aufgaben für *Blue* ist es daher Türen zu öffnen. Hierbei ist der Türdrücker⁵ die größte Herausforderung. *Blue* muss den Türdrücker hinunterdrücken und hinuntergedrückt zu sich ziehen. Die Norm DIN EN 1906 beschreibt Anforderungen an Türdrücker. Das maximale Bedienmoment für Türdrücker ist mit 2.4 N m angegeben [11, S.13]. Nimmt man nun an, dass die Türklinke in einem Abstand von 10 cm zu ihrer Drehachse betätigt wird ergibt sich eine Kraft von 24 N. Der Kraftvektor für die Simulation ist also: $F_{ext} = [0 \ 0 \ 24]^T$. Die einzelnen Punkte im Arbeitsraum sind wie folgt und werden in Sekundenabständen abgefahren:

1. Greifen des Türdrückers im Punkt $P_1 = [0.2 \ 0.5 \ -0.1 \ -\frac{\pi}{2} \ 0 \ -\pi]^T$
2. Hinunterdrücken des Türdrückers zum Punkt $P_2 = [0.2 \ 0.5 \ -0.15 \ -\frac{\pi}{2} \ 0 \ -\pi]^T$
3. Herziehen der Tür zum Punkt $P_3 = [0.2 \ 0.45 \ -0.15 \ -\frac{\pi}{2} \ 0 \ -\pi]^T$

Mithilfe der inversen Kinematik aus der Robotics Toolbox ergeben sich an diesen Arbeitspunkten die Posen, welche in Abbildung 6.1 dargestellt sind. Die dazugehörigen Trajektorienverläufe sind in Anhang B.1 dargestellt.

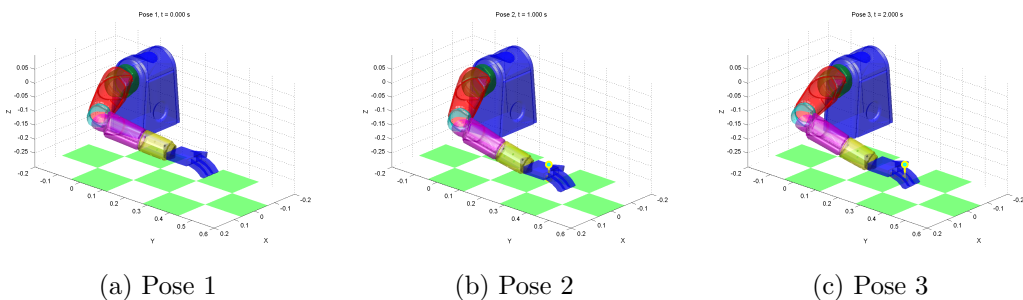


Abbildung 6.1: Der Türdrücker wird 5 cm heruntergedrückt und 5 cm herangezogen. Damit ist die Tür nicht mehr im Schloss.

⁵gängiger sind die Bezeichnungen Türklinke oder Türschnalle

6.3.2 Kühlschrantür öffnen

Blue muss ebenso dazu in der Lage sein die Tür eines handelsüblichen Kühlschranks zu öffnen. Im Gegensatz zu einer Zimmertür muss der Roboter den Griff der Kühlschrantür zu sich ziehen. Hierbei muss eine deutliche Haltekraft überwunden werden, welche die Kühlschrantür geschlossen hält. Die Haltekraft wird als konstant angenommen. Für die maximal wirkenden Momente macht dies keinen Unterschied. Ein handelsüblicher Kühlschrank lässt sich mit etwa 17 N Kraftaufwand öffnen. Es wirkt also der Kraftvektor $F_{ext} = [0 \ 17 \ 0]^T$. Zusammengefasst nehmen wir an, dass *Blue* die Kühlschrantür 5 cm mit einem Kraftaufwand von 17 N m ziehen muss und dabei die folgenden beiden Punkte im Arbeitsraum innerhalb einer Sekunde durchfährt:

1. Greifen des Kühlschrantürgriffs im Punkt $P_1 = [0 \ 0.5 \ 0 \ -\frac{\pi}{2} \ 0 \ -\frac{\pi}{2}]^T$
2. Ziehen der Kühlschrantür bis zum Punkt $P_2 = [0 \ 0.45 \ 0 \ -\frac{\pi}{2} \ 0 \ -\frac{\pi}{2}]^T$

Die dazugehörigen Posen sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Trajektorienverläufe sind in Anhang B.2 zu sehen.

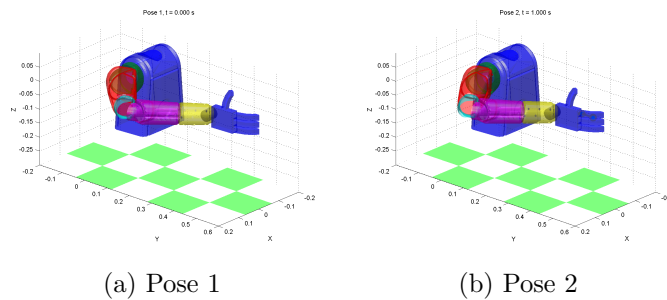


Abbildung 6.2: *Blue* muss die Kühlschrantür 5 cm zu sich ziehen

6.3.3 Getränk nehmen

Eine weitere Aufgabe von *Blue* besteht darin Gegenstände zu überbringen. Dazu muss er diese zuerst aufheben und danach zu sich holen. Je näher sich eine Masse an der Drehachse der Basis von *Blue* befindet, desto weniger Zentrifugalkräfte wirken auf diese Masse, wenn sich *Blue* während seiner Botenfahrt dreht. Als Beispielaufgabe wird nun das Herausnehmen eines 0.5 kg-Getränks aus dem offenen Kühlschrank simuliert. Die ganze Bewegung umfasst drei Posen im Arbeitsraum:

1. Greifen des Getränks im Punkt $P_1 = [0 \ 0.6 \ -0.05 \ -\frac{\pi}{2} \ -\frac{\pi}{6} \ -\frac{\pi}{2}]^T$
2. Hochheben des Getränks auf den Punkt $P_2 = [0 \ 0.6 \ 0 \ -\frac{\pi}{2} \ -\frac{\pi}{6} \ -\frac{\pi}{2}]^T$
3. Heranführen des Getränks auf den Punkt $P_3 = [0 \ 0.45 \ 0 \ -\frac{\pi}{2} \ -\frac{\pi}{6} \ -\frac{\pi}{2}]^T$

Diese Posen sind in der Abbildung 6.3 dargestellt. In Anhang B.3 sind die Trajektorienverläufe dargestellt. Dazwischen wird innerhalb von einer Sekunde verfahren.

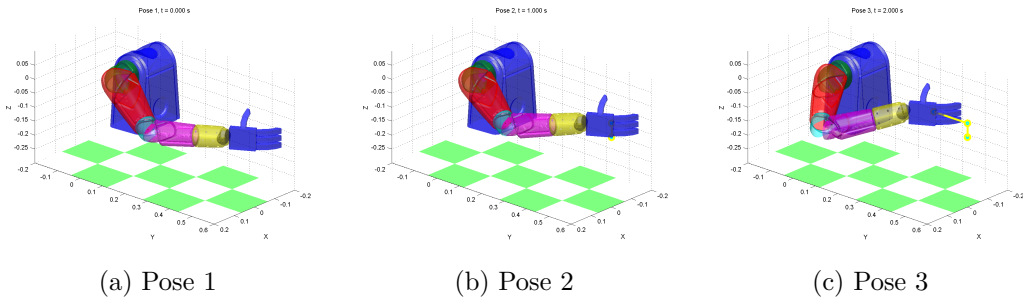


Abbildung 6.3: *Blue* muss das Getränk 5 cm anheben und zu sich führen.

6.3.4 Schiebetür öffnen

In vielen Haushalten sind statt der normal aufschwingenden Türen Schiebetüren verbaut. Diese werden gänzlich anders betätigt und stellen daher für *Blue* eine andere Art von Herausforderung dar. In der DIN EN 1527 sind die jeweils höchsten zulässigen Werte für die Anfangsreibung für Schiebetüren (und Falttüren) angegeben. Die Anfangsreibung wird in N angegeben und stellt *die erforderliche Kraft zum Einleiten der Bewegung des zu prüfenden Türflügels* dar[12, S.13]. Es wird eine konstante Kraft über den gesamten Verfahrensweg der Schiebetür simuliert. Da die Schiebetür aber nicht nur komplett offen oder komplett geschlossen sein kann, sondern auch überall dazwischen stationär stehen kann und auch hier dieselbe Anfangsreibung zu überwinden ist stellt das keine Einschränkung dar. Für die Simulation wird eine Schiebetür mit der Anfangsreibung 15 N verwendet. Die Tür wird in positiver x -Richtung bewegt. Damit ist der externe Kraftvektor $F_{ext} = [-15 \ 0 \ 0]^T$. Die Punkte im Arbeitsraum lauten:

1. Greifen des Türgriffs bei $P_1 = [-0.2 \ 0.5 \ -0.1 \ -\frac{\pi}{2} \ -\frac{\pi}{6} \ -\frac{\pi}{2}]^T$
2. Ziehen der Tür bis zum Punkt $P_2 = [0.2 \ 0.5 \ -0.1 \ -\frac{\pi}{2} \ -\frac{\pi}{6} \ -\frac{\pi}{2}]^T$

In der Abbildung 6.4 sind die beiden dazugehörigen Posen dargestellt. Anhang B.4 zeigt die dazugehörigen Trajektorienverläufe. Die ganze Bewegung dauert eine Sekunde.

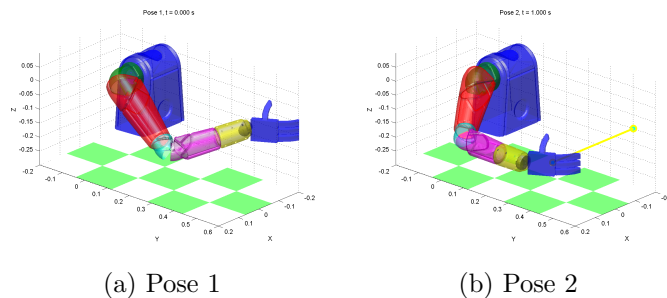


Abbildung 6.4: Die Schiebetür wird von links nach rechts geschoben.

7 Berechnung der Kräfte

Bevor die konstruierten Teile FE-Simuliert werden, müssen zuerst für jeden Körper alle darauf wirkenden Kräfte und Momente bestimmt werden. Als Grundlage dafür dienen die vom RNE-Algorithmus berechneten Kräfte und Momente. In diesem Abschnitt wird nun für jeden Körper das Kräfte- und Momentengleichgewicht aufgestellt um so die Lagerkräfte zu bestimmen. Hierbei wird beim Handgelenk (Körper 5) begonnen und sukzessive bis zur Schulter (Körper 1) fortgeschritten. Dadurch können Änderungen am aktuellen Körper, welche sich auf den nächsten Körper auswirken berücksichtigt werden. Die Nummerierung der Körper stammt aus Tabelle 5.1.

7.1 Körper 5: Handgelenk

Das Handgelenk selbst wird, da es sich nur um eine Attrappe handelt, nicht FE-simuliert. Um jedoch die Lagerkräfte auf das nächste Bauteil zu bestimmen wird auch hier eine Statik-Berechnung durchgeführt. Das Handgelenk hat mit dem Festlager, dem Loslager und der Polygonverbindung Kontakt. Diese Kontakte schränken die Freiheitsgrade des Körpers ein, wobei folgende Annahmen getroffen werden:

- Die Summe der Kräfte und Momente, welche aufgrund von Trägheit und Gravitation wirken, sowie der Kräfte und Momente, die die Hand auf das Handgelenk ausübt, ist bekannt.
- Das Festlager nimmt Kräfte in alle drei Raumrichtungen auf,
- das Loslager nimmt die zu seiner Achse orthogonalen Kräfte auf und
- die Polygonverbindung nimmt das Moment um ihre Achse auf.

Die gesperrten Freiheitsgrade bewirken Stützkkräfte an den jeweiligen Angriffsflächen, welche in Abbildung 7.1 dargestellt sind. Um die Berechnung zu vereinfachen wird weiters angenommen, dass diese Stützkkräfte an den Flächenschwerpunkten der Lagerflächen wirken. Die Ortsvektoren der Lagerflächenschwerpunkte werden mit \mathbf{r} bezeichnet und liegen aufgrund der Rotationsymmetrie dieses Bauteils alle auf der y-Achse.

Durch Freimachen des Körpers erhält man das Momentengleichgewicht:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\mathbf{M}_5}_{\text{externe}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ r_{L,5,y} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{L,5,x} \\ 0 \\ F_{L,5,z} \end{bmatrix}}_{\text{Loslager}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ r_{F,5,y} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{F,5,x} \\ F_{F,5,y} \\ F_{F,5,z} \end{bmatrix}}_{\text{Festlager}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \tau_5 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Antrieb 5}} \quad (7.1)$$

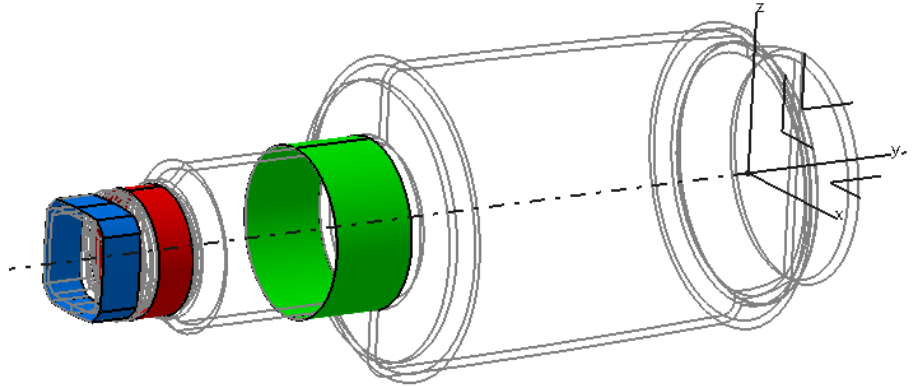


Abbildung 7.1: Die Lagerflächen des Handgelenks sind farblich hervorgehoben: Die Polygonverbindung ist blau, das Festlager ist rot und das Loslager ist grün.

und das Kräftegleichgewicht:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\mathbf{F}_5}_{\text{externe}} + \underbrace{\begin{bmatrix} F_{L,5,x} \\ 0 \\ F_{L,5,z} \end{bmatrix}}_{\text{Loslager}} + \underbrace{\begin{bmatrix} F_{F,5,x} \\ F_{F,5,y} \\ F_{F,5,z} \end{bmatrix}}_{\text{Festlager}} \quad (7.2)$$

mit den unbekannten Fest- und Loslagerkräften $F_{F,5,x}$, $F_{F,5,y}$, $F_{F,5,z}$, $F_{L,5,x}$, $F_{L,5,z}$, und dem Antriebsmoment τ_5 . Die externen Kräfte \mathbf{F}_5 und Momente \mathbf{M}_5 wurden mit dem RNE-Algorithmus aus Abschnitt 6.2 berechnet.

Diese linearen Gleichungssysteme lassen sich nun zusammengefasst in Matrixform anschreiben:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{F,5,y} & 0 & r_{L,5,y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -r_{F,5,y} & 0 & 0 & -r_{L,5,y} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{F,5,x} \\ F_{F,5,y} \\ F_{F,5,z} \\ F_{L,5,x} \\ F_{L,5,z} \\ M_{P,5,z} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_5 \\ \mathbf{F}_5 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

Der Rang der Koeffizientenmatrix ist gleich dem Rang der erweiterten Koeffizientenmatrix und der Anzahl der Unbekannten. Damit ist das Gleichungssystem eindeutig lösbar. Anhang B zeigt die berechneten Kräfte der verschiedenen Trajektorien.

7.2 Körper 4: Unterarm

Über das Fest- und Loslager sowie über den Antrieb werden nun Kräfte und Momente vom Handgelenk auf den Unterarm übertragen. Der Unterarm gibt über die Gleitlager nun Kräfte auf den Ellbogen und den Hydraulikzylinder weiter. Wie schon beim Handgelenk werden einige Annahmen getroffen:

- Die Summe der Kräfte und Momente, welche aufgrund von Trägheit und Gravitation wirken, sowie der Kräfte und Momente, welche das Handgelenk über Fest und Loslager sowie über die Polygonverbindung auf den Unterarm ausübt, ist bekannt.
- Die Gleitlager des Gelenks zum Ellbogen nehmen Kräfte in allen drei Raumrichtungen auf. Die Kraft in Achsrichtung der beiden Gleitlager ist gleich groß.
- Die Gleitlager der Verbindung zum Hydraulikkolben nehmen Kräfte orthogonal zu ihrer gemeinsamen Achse auf. Die Kräfte an diesen Gleitlagern sind gleich groß und ihre Richtung (ihr Verhältnis) ist bekannt. Die resultierende Kraft ist in Axialrichtung des Hydraulikzylinders.

Abbildung 7.2 zeigt die Lagerflächen farblich hervorgehoben.

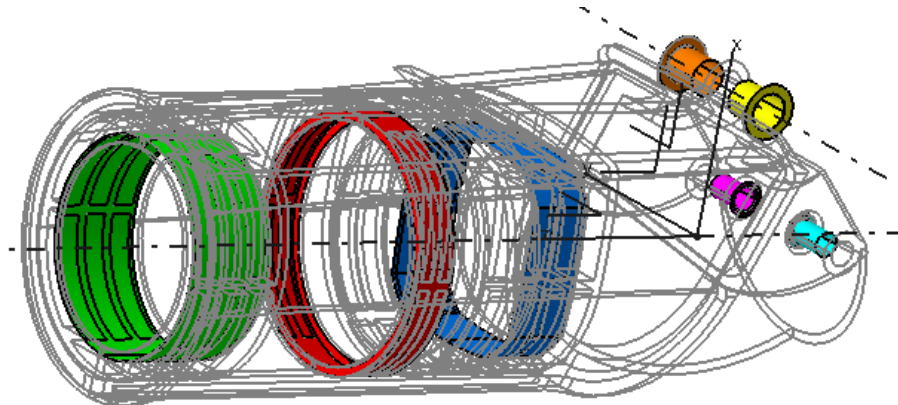


Abbildung 7.2: Die Lagerflächen des Unterarms sind farblich hervorgehoben: Die Polygonverbindung ist blau, das Festlager ist rot und das Loslager ist grün. Die Gleitlager des Gelenks zum Ellbogen sind gelb und orange und die Gleitlager der Verbindung zum Hydraulikkolben sind cyan und magenta.

Es ergeben sich nun die Gleichgewichtsbedingungen der Momente:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\mathbf{M}_4}_{\text{externe}} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{R,4,x} \\ r_{R,4,y} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{R,4,x} \\ F_{R,4,y} \\ F_{R,4,z} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager R}} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{R,4,x} \\ -r_{R,4,y} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{S,4,x} \\ F_{R,4,y} \\ F_{S,4,z} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager S}} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{T,4,x} \\ 0 \\ r_{T,4,z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_{T,4,x} F_{T,4} \\ 0 \\ e_{T,4,z} F_{T,4} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager T}} \quad (7.4)$$

und die Gleichgewichtsbedingungen der Kräfte:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\mathbf{F}_4}_{\text{externe}} + \underbrace{\begin{bmatrix} F_{R,4,x} \\ F_{R,4,y} \\ F_{R,4,z} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager R}} + \underbrace{\begin{bmatrix} F_{S,4,x} \\ F_{R,4,y} \\ F_{S,4,z} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager S}} + \underbrace{\begin{bmatrix} e_{T,4,x} F_{T,4} \\ 0 \\ e_{T,4,z} F_{T,4} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager T}} \quad (7.5)$$

mit den unbekanntten Kräften $F_{R,4,x}$, $F_{R,4,y}$, $F_{R,4,z}$, $F_{S,4,x}$, $F_{S,4,z}$ und $F_{T,4}$. Der Vektor $\mathbf{e}_{T,4}$ ist ein Einheitsvektor und zeigt in Richtung der Achse des Hydraulikzylinders. Der Hydraulikzylinder verbindet die beiden Gleitlager $T4$ des Unterarms und $T3$ des Ellbogens. Stellt man den Ortsvektor $\mathbf{r}_{T,3}$ in Σ_4 dar, lässt sich diese Richtung einfach bestimmen:

$$\mathbf{e}_{T,4} = \frac{\mathbf{r}_{T,3}^* - \mathbf{r}_{T,4}}{\|\mathbf{r}_{T,3}^* - \mathbf{r}_{T,4}\|} \quad \text{mit} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{T,3}^* \\ 1 \end{bmatrix} = {}^4\mathbf{T}_3 \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{T,3} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

Die zusammengefassten Gleichungen 7.4 und 7.5 lassen sich wie schon im vorigen Abschnitt in Matrixform anschreiben:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{R,4,y} & 0 & -r_{R,4,y} & 0 \\ 0 & 0 & -r_{R,4,x} & 0 & -r_{R,4,x} & e_{T,4,x} r_{T,4,z} - e_{T,4,z} r_{T,4,x} \\ -r_{R,4,y} & 2r_{R,4,x} & 0 & r_{R,4,y} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & e_{T,4,x} \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & e_{T,4,z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{R,4,x} \\ F_{R,4,y} \\ F_{R,4,z} \\ F_{S,4,x} \\ F_{S,4,z} \\ F_{T,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_4 \\ \mathbf{F}_4 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

Erneut ist der Rang der Koeffizientenmatrix gleich dem Rang der erweiterten Koeffizientenmatrix und der Anzahl der Unbekannten. Damit ist auch dieses Gleichungssystem eindeutig lösbar.

Die Kräfte an Fest- und Loslager sowie das Moment an der Polygonverbindung wurden schon bei der Berechnung des Handgelenks berechnet und werden in das Koordinatensystem des Unterarms transformiert:

$$-{}^4\mathbf{R}_5 \begin{bmatrix} F_{F,5,x} \\ F_{F,5,y} \\ F_{F,5,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{F,4,x} \\ F_{F,4,y} \\ F_{F,4,z} \end{bmatrix} \quad -{}^4\mathbf{R}_5 \begin{bmatrix} F_{L,5,x} \\ 0 \\ F_{L,5,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{L,4,x} \\ F_{L,4,y} \\ 0 \end{bmatrix} \quad -{}^4\mathbf{R}_5 \begin{bmatrix} 0 \\ M_{A,5} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{A,4} \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

mit

$${}^4\mathbf{R}_5 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & \sin(\theta_5) \\ \sin(\theta_5) & 0 & -\cos(\theta_5) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

7.3 Körper 3: Ellbogen

Auf den Ellbogen werden über die beiden Gelenk-Gleitlager Kräfte vom Unterarm übertragen. Weiters überträgt der Hydraulikzylinder eine Kraft auf die Gleitlager des Hydraulikzylinders. Über Fest- und Loslager sowie über die Polygonverbindung werden Kräfte und Momente an den Oberarm weitergegeben. Folgende Annahmen werden zur Berechnung der Kräfte getroffen:

- Die Summe der Kräfte und Momente, welche aufgrund von Trägheit und Gravitation wirken, sowie der Kräfte und Momente, welche der Unterarm und der Hydraulikzylinder über die Gleitlager auf den Ellbogen ausüben, ist bekannt.
- Das Festlager nimmt Kräfte in alle drei Raumrichtungen auf,
- das Loslager nimmt die zu seiner Achse orthogonalen Kräfte auf und
- die Polygonverbindung nimmt das Moment um ihre Achse auf.

Der Ellbogen lässt sich nun sehr ähnlich dem Handgelenk berechnen. Abbildung 7.3 zeigt die Lagerflächen farblich hervorgehoben.

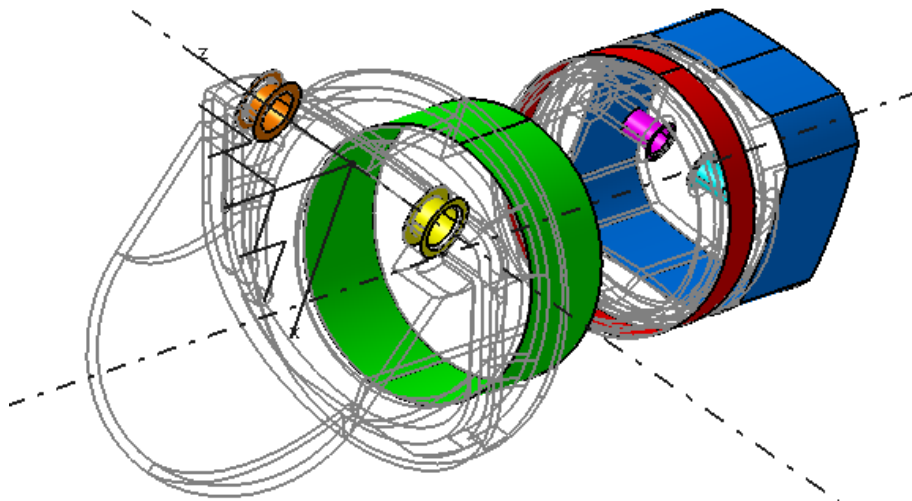


Abbildung 7.3: Die Lagerflächen des Ellbogens sind farblich hervorgehoben: Die Polygonverbindung ist blau, das Festlager ist rot, das Loslager ist grün, die Gleitlager des Gelenks sind orange und gelb und die Gleitlager der Hydraulikachse sind magenta und cyan.

Durch Freimachen des Körpers erhält man das Momentengleichgewicht:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\mathbf{M}_3}_{\text{externe}} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{L,3,x} \\ r_{L,3,y} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{L,3,x} \\ 0 \\ F_{L,3,z} \end{bmatrix}}_{\text{Loslager}} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{F,3,x} \\ r_{F,3,y} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{F,3,x} \\ F_{F,3,y} \\ F_{F,3,z} \end{bmatrix}}_{\text{Festlager}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \tau_3 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Antrieb 3}} \quad (7.10)$$

und das Kräftegleichgewicht:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\mathbf{F}_3}_{\text{externe}} + \underbrace{\begin{bmatrix} F_{L,3,x} \\ 0 \\ F_{L,3,z} \end{bmatrix}}_{\text{Loslager}} + \underbrace{\begin{bmatrix} F_{F,3,x} \\ F_{F,3,y} \\ F_{F,3,z} \end{bmatrix}}_{\text{Festlager}} \quad (7.11)$$

mit den unbekanntem Fest- und Loslagerkräften $F_{F,3,x}$, $F_{F,3,y}$, $F_{F,3,z}$, $F_{L,3,x}$, $F_{L,3,z}$, und dem Antriebsmoment τ_3 . Der RNE-Algorithmus liefert auch hier die externen Kräfte \mathbf{F}_3 und Momente \mathbf{M}_3 .

Wie bereits bei Ellbogen und Unterarm lässt sich dieses linearen Gleichungssysteme in Matrixform anschreiben:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{F,3,y} & 0 & r_{L,3,y} & 0 \\ 0 & 0 & -r_{F,3,x} & 0 & -r_{L,3,x} & 1 \\ -r_{F,3,y} & r_{F,3,x} & 0 & -r_{L,3,y} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{F,3,x} \\ F_{F,3,y} \\ F_{F,3,z} \\ F_{L,3,x} \\ F_{L,3,z} \\ M_{P,3,y} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_3 \\ \mathbf{F}_3 \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

Der Rang der Koeffizientenmatrix ist erneut gleich dem Rang der erweiterten Koeffizientenmatrix und der Anzahl der Unbekannten. Damit ist auch dieses Gleichungssystem eindeutig lösbar.

Die Kräfte den Gleitlagern wurden schon bei der Berechnung des Unterarms berechnet und werden nur in das Koordinatensystem des Ellbogens transformiert werden:

$$-{}^3\mathbf{R}_4 \begin{bmatrix} F_{F,4,x} \\ F_{F,4,y} \\ F_{F,4,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{F,3,x} \\ F_{F,3,y} \\ F_{F,3,z} \end{bmatrix} \quad -{}^3\mathbf{R}_4 \begin{bmatrix} F_{L,4,x} \\ 0 \\ F_{L,4,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{L,3,x} \\ F_{L,3,y} \\ 0 \end{bmatrix} \quad -{}^3\mathbf{R}_4 \begin{bmatrix} 0 \\ M_{A,4} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{A,3} \end{bmatrix} \quad (7.13)$$

mit

$${}^3\mathbf{R}_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & \sin(\theta_4) \\ \sin(\theta_4) & 0 & -\cos(\theta_4) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.14)$$

In Anhang B sind die berechneten Kräfte der verschiedenen Trajektorien dargestellt.

7.4 Körper 2: Oberarm

Der Oberarm- und Unterarmteil ähneln einander vom Konstruktiven Aufbau und der Kinematik sehr stark. Die zugehörigen Gleichungen ähneln sich daher ebenfalls sehr stark: Genau wie beim Oberarm werden durch das Fest- und Loslager sowie über den Antrieb Kräfte und Momente vom Ellbogen auf den Oberarm übertragen. Der Oberarm gibt über die Gleitlager die Kräfte auf die Schulter und den Hydraulikzylinder weiter. Die getroffenen Annahmen sind demnach dieselben:

- Die Summe der Kräfte und Momente, welche aufgrund von Trägheit und Gravitation wirken, sowie der Kräfte und Momente, welche der Ellbogen über Fest und Loslager sowie über die Polygonverbindung auf den Oberarm ausübt, ist bekannt.
- Die Gleitlager des Gelenks zur Schulter nehmen Kräfte in allen drei Raumrichtungen auf. Die Kraft in Achsrichtung der beiden Gleitlager ist gleich groß.
- Die Gleitlager der Verbindung zum Hydraulikkolben nehmen Kräfte orthogonal zu ihrer gemeinsamen Achse auf. Die Kräfte an diesen Gleitlagern sind gleich groß und ihre Richtung (ihr Verhältnis) ist bekannt. Die resultierende Kraft ist in Axialrichtung des Hydraulikzylinders.

Abbildung 7.4 zeigt die Lagerflächen farblich hervorgehoben.

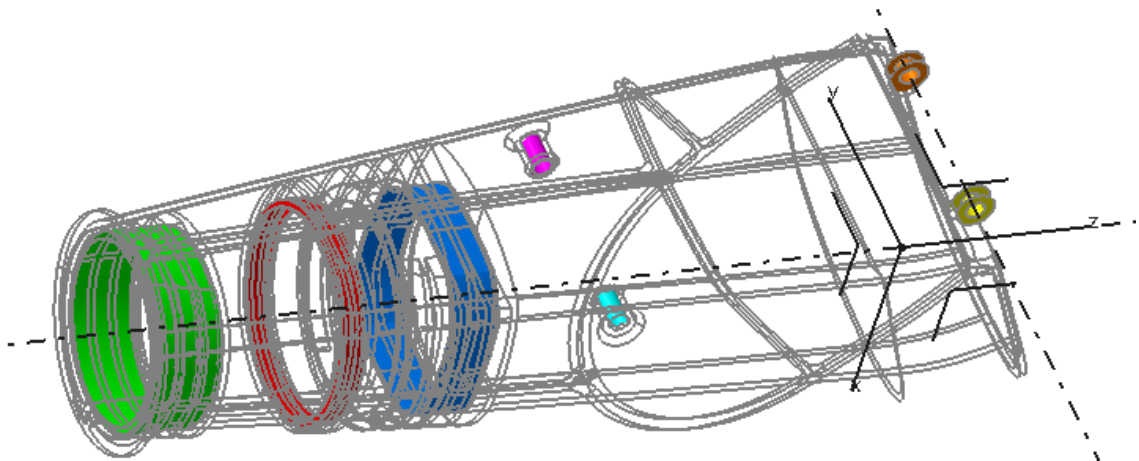


Abbildung 7.4: Die Lagerflächen des Oberarms sind farblich hervorgehoben: Die Polygonverbindung ist blau, das Festlager ist rot, das Loslager ist grün, die Gleitlager des Gelenks sind orange und gelb und die Gleitlager der Hydraulikachse sind magenta und cyan.

Die Gleichgewichtsbedingungen der Momente lauten:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\mathbf{M}_2}_{\text{externe}} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{R,2,x} \\ r_{R,2,y} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{R,2,x} \\ F_{R,2,y} \\ F_{R,2,z} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager R}} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{R,2,x} \\ -r_{R,2,y} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{S,2,x} \\ F_{R,2,y} \\ F_{S,2,z} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager S}} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{T,2,x} \\ 0 \\ r_{T,2,z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_{T,2,x} F_{T,2} \\ 0 \\ e_{T,2,z} F_{T,2} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager T}} \quad (7.15)$$

Die Gleichgewichtsbedingungen der Kräfte lauten:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\mathbf{F}_2}_{\text{externe}} + \underbrace{\begin{bmatrix} F_{R,2,x} \\ F_{R,2,y} \\ F_{R,2,z} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager R}} + \underbrace{\begin{bmatrix} F_{S,2,x} \\ F_{R,2,y} \\ F_{S,2,z} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager S}} + \underbrace{\begin{bmatrix} e_{T,2,x} F_{T,2} \\ 0 \\ e_{T,2,z} F_{T,2} \end{bmatrix}}_{\text{Gleitlager T}} \quad (7.16)$$

mit den unbekanntten Kräften $F_{R,2,x}$, $F_{R,2,y}$, $F_{R,2,z}$, $F_{S,2,x}$, $F_{S,2,z}$ und $F_{T,2}$. Der Vektor $\mathbf{e}_{T,2}$ ist wie schon beim Ellbogen ein Einheitsvektor und zeigt in Richtung der Achse des Hydraulikzylinders. Der Hydraulikzylinder verbindet die beiden Gleitlager $T2$ und $T1$ des Oberarms und der Schulter. Stellt man den Ortsvektor $\mathbf{r}_{T,1}$ in Σ_2 dar, lässt sich diese Richtung einfach bestimmen:

$$\mathbf{e}_{T,2} = \frac{\mathbf{r}_{T,1}^* - \mathbf{r}_{T,2}}{\|\mathbf{r}_{T,1}^* - \mathbf{r}_{T,2}\|} \quad \text{mit} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{T,1}^* \\ 1 \end{bmatrix} = {}^2\mathbf{T}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{T,1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7.17)$$

Auch die Matrixform ist im Prinzip gleich mit der des Unterarms:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{R,2,y} & 0 & -r_{R,2,y} & 0 \\ 0 & 0 & -r_{R,2,x} & 0 & -r_{R,2,x} & e_{T,2,x} r_{T,2,z} - e_{T,2,z} r_{T,2,x} \\ -r_{R,2,y} & 2r_{R,2,x} & 0 & r_{R,2,y} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & e_{T,2,x} \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & e_{T,2,z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{R,2,x} \\ F_{R,2,y} \\ F_{R,2,z} \\ F_{S,2,x} \\ F_{S,2,z} \\ F_{T,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_2 \\ \mathbf{F}_2 \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

Erneut ist der Rang der Koeffizientenmatrix gleich dem Rang der erweiterten Koeffizientenmatrix und der Anzahl der Unbekannten. Damit ist auch dieses Gleichungssystem eindeutig lösbar.

Die Kräfte an Fest- und Loslager sowie das Moment an der Polygonverbindung wurden schon bei der Berechnung des Ellbogens berechnet und werden nun noch in das Koordinatensystem des Oberarms transformiert:

$$-{}^2\mathbf{R}_3 \begin{bmatrix} F_{F,3,x} \\ F_{F,3,y} \\ F_{F,3,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{F,2,x} \\ F_{F,2,y} \\ F_{F,2,z} \end{bmatrix} \quad -{}^2\mathbf{R}_3 \begin{bmatrix} F_{L,3,x} \\ 0 \\ F_{L,3,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{L,2,x} \\ F_{L,2,y} \\ 0 \end{bmatrix} \quad -{}^2\mathbf{R}_3 \begin{bmatrix} 0 \\ M_{A,3} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{A,2} \end{bmatrix} \quad (7.19)$$

mit

$${}^2\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & 0 & \sin(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & 0 & -\cos(\theta_3) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

Die berechneten Kräfte der verschiedenen Trajektorien finden sich in Anhang B.

7.5 Körper 1: Schulter

Auf die Schulter werden über die beiden Gelenk-Gleitlager Kräfte vom Oberarm übertragen. Weiters überträgt der Hydraulikzylinder eine Kraft auf die Gleitlager des Hydraulikzylinders. Über Fest- und Loslager sowie über die Polygonverbindung werden Kräfte und Momente an den Torso weitergegeben. Folgende Annahmen werden zur Berechnung der Kräfte getroffen:

- Die Summe der Kräfte und Momente, welche aufgrund von Trägheit und Gravitation wirken, sowie der Kräfte und Momente, welche der Oberarm und der Hydraulikzylinder über die Gleitlager auf die Schulter ausüben, ist bekannt.
- Das Festlager nimmt Kräfte in alle drei Raumrichtungen auf,
- das Loslager nimmt die zu seiner Achse orthogonalen Kräfte auf und
- die Polygonverbindung nimmt das Moment um ihre Achse auf.

Damit lässt sich die Schulter genau so wie der Ellbogen berechnen. Abbildung 7.5 zeigt die Lagerflächen farblich hervorgehoben. Durch Freimachen des Körpers erhält man das

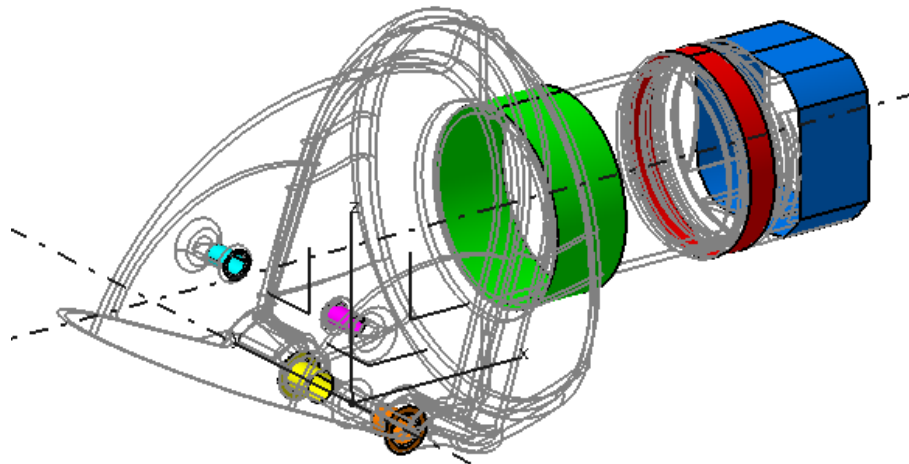


Abbildung 7.5: Die Lagerflächen des Schulterteiles sind farblich hervorgehoben: Die Polygonverbindung ist blau, das Festlager ist rot, das Loslager ist grün, die Gleitlager des Gelenks sind orange und die Gleitlager der Hydraulikachse sind magenta.

Momentengleichgewicht:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\mathbf{M}_1}_{\text{externe}} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{L,1,x} \\ r_{L,1,y} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{L,1,x} \\ 0 \\ F_{L,1,z} \end{bmatrix}}_{\text{Loslager}} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{F,1,x} \\ r_{F,1,y} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{F,1,x} \\ F_{F,1,y} \\ F_{F,1,z} \end{bmatrix}}_{\text{Festlager}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \tau_1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Antrieb 1}} \quad (7.21)$$

und das Kräftegleichgewicht:

$$\mathbf{0} = \underbrace{\mathbf{F}_1}_{\text{externe}} + \underbrace{\begin{bmatrix} F_{L,1,x} \\ 0 \\ F_{L,1,z} \end{bmatrix}}_{\text{Loslager}} + \underbrace{\begin{bmatrix} F_{F,1,x} \\ F_{F,1,y} \\ F_{F,1,z} \end{bmatrix}}_{\text{Festlager}} \quad (7.22)$$

mit den unbekanntem Fest- und Loslagerkräften $F_{F,1,x}$, $F_{F,1,y}$, $F_{F,1,z}$, $F_{L,1,x}$, $F_{L,1,z}$, und dem Antriebsmoment $M_{P,1,y}$. Der RNE-Algorithmus liefert auch hier die externen Kräfte \mathbf{F}_1 und Momente \mathbf{M}_1 .

Wie bereits bei Ellbogen und Unterarm lässt sich dieses lineare Gleichungssysteme in Matrixform anschreiben:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{F,1,y} & 0 & r_{L,1,y} & 0 \\ 0 & 0 & -r_{F,1,x} & 0 & -r_{L,1,x} & 1 \\ -r_{F,1,y} & r_{F,1,x} & 0 & -r_{L,1,y} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{F,1,x} \\ F_{F,1,y} \\ F_{F,1,z} \\ F_{L,1,x} \\ F_{L,1,z} \\ M_{P,1,y} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{F}_1 \end{bmatrix} \quad (7.23)$$

Der Rang der Koeffizientenmatrix ist gleich dem Rang der erweiterten Koeffizientenmatrix und der Anzahl der Unbekannten. Damit ist das Gleichungssystem eindeutig lösbar.

Die Kräfte den Gleitlagern wurden schon bei der Berechnung des Unterarms berechnet und werden nur in das Koordinatensystem des Ellbogens transformiert:

$$-{}^1\mathbf{R}_2 \begin{bmatrix} F_{F,2,x} \\ F_{F,2,y} \\ F_{F,2,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{F,1,x} \\ F_{F,1,y} \\ F_{F,1,z} \end{bmatrix} \quad -{}^1\mathbf{R}_2 \begin{bmatrix} F_{L,2,x} \\ 0 \\ F_{L,2,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{L,1,x} \\ F_{L,1,y} \\ 0 \end{bmatrix} \quad -{}^1\mathbf{R}_2 \begin{bmatrix} 0 \\ M_{A,2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{A,1} \end{bmatrix} \quad (7.24)$$

mit

$${}^1\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & 0 & -\cos(\theta_2) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.25)$$

Auch für diesen Körper finden sich die berechneten Kräfte der verschiedenen Trajektorien in Anhang B.

8 Finite Elemente Simulation

Als Simulationsumgebung kommt die CATIA Arbeitsumgebung *GPS (Generative Part Structural Analysis)* zum Einsatz. Diese bietet den Vorteil, dass direkt in der Konstruktionssoftware simuliert werden kann.

8.1 Grundlagen zum Festigkeitsnachweis

Die Festigkeitsberechnung von Kunststoffen ist deutlich komplizierter als bei Metallen. Die mechanischen Eigenschaften von thermoplastischen Kunststoffen hängen unter anderem von Temperatur, Zeit und der Höhe und Art der aufgeprägten Beanspruchung ab. Diese Abhängigkeiten sowie das komplexe Verformungsverhalten erfordert einen hohen Aufwand zur experimentellen Identifikation der Materialkennwerte. Es müssen also Vereinfachungen getroffen werden. [13, S.187]

Da üblicherweise die thermoplastischen Polymerwerkstoffe bis in den nichtlinearen Bereich verformt werden, liefert eine Berechnung nach der Elastizitätstheorie von der Realität abweichende Ergebnisse. Solange die Beanspruchung allerdings nahe genug dem viskoelastischen Bereich ist, werden die Formeln der Elastizitätstheorie sogar empfohlen um den Aufwand vertretbar zu halten. [13, S.188]

Es wird vorgeschlagen eine einachsige Vergleichsspannung (in diesem Fall die von-Mises Vergleichsspannung) mit dem zulässigen Spannungswert zu vergleichen. Dieser maximal zulässige Spannungsbereich wird um den Sicherheitsbeiwert und um etwaige Werkstoffabminderungsfaktoren reduziert. Es wird die folgende Formel vorgeschlagen [13, S.189ff]:

$$\sigma_{v,max} \leq \sigma_{zul} = \frac{K}{S \cdot A} \quad (8.1)$$

mit dem maximal auftretenden Wert der Vergleichsspannung $\sigma_{v,max}$, dem Dimensionierungskennwert K , dem Sicherheitsbeiwert S und dem Werkstoffabminderungsfaktor A .

Als Dimensionierungskennwert K dient die Fließgrenze bzw. die Bruchgrenze des Werkstoffs. Die Fließgrenze ist diejenige Spannung, oberhalb derer eine plastische Verformung eintritt. Im Gegenzug bedeutet dies, dass sich der Werkstoff bei Spannungen unterhalb der Fließgrenze elastisch verhält. Die Fließgrenze wird σ_y , nach dem englischen Ausdruck yield strength, bezeichnet. Bei einigen Werkstoffen wird keine Fließgrenze angegeben. An ihre Stelle tritt die Bruchgrenze σ_b , bei welcher der Werkstoff versagt.

Als Sicherheitsbeiwert S wird $S = 1.5$ gewählt.

Der Werkstoffabminderungsfaktor A lässt sich nach [13, S.192] aufteilen in:

$$A = A_T \cdot A_{st} \cdot A_{dyn} \cdot A_A \cdot A_W \quad (8.2)$$

- Da in CAMPUS 5.2 sämtliche mechanischen Materialdaten unter anderem bei 23°C angegeben sind, können wir den Faktor für den Temperatureinfluss auf $A_T = 1$ setzen und somit vernachlässigen.
- A_{st} dient zur Berücksichtigung der Zeitdauer der statischen Belastung. Wir wählen einen Wert von $A_{st} = 1.3$, wie er für eine Belastungsdauer von wenigen Stunden vorgeschlagen wird.
- Mit A_{dyn} kann der Einfluss dynamischer Belastung berücksichtigt werden, wobei Werte zwischen 1.3 und 1.6 vorgeschlagen werden. Da die inverse Dynamiksimulation und der RNE-Algorithmus ohnehin Kräfte und Momente infolge dynamischer Beschleunigungen berücksichtigt wird dieser Faktor vernachlässigt, also $A_{dyn} = 1$ gesetzt
- Da *Blue* keinen extremen Temperaturen, Chemikalien oder starker Strahlung ausgesetzt wird, wird der Alterungseinfluss mit $A_A = 1$ vernachlässigt.
- Letztlich gilt es noch die Änderung der Werkstoffkennwerte in Bezug auf Wasseraufnahme des Kunststoffes zu berücksichtigen. Da in Wohnräumen immer eine gewisse Luftfeuchtigkeit vorhanden ist und *Blue* noch dazu mit Wasserhydraulik angetrieben wird, werden die in CAMPUS 5.2 vorhandenen Materialdaten für *feuchten* Kunststoff hergenommen. Damit ist die Wasseraufnahme berücksichtigt und der Abminderungsfaktor kann zu $A_W = 1$ gesetzt und somit vernachlässigt werden.

Es ergibt sich schließlich ein Werkstoffabminderungsfaktor:

$$A = 1 \cdot 1.3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1.3 \quad (8.3)$$

Dadurch lässt sich Gleichung 8.1 anschreiben als:

$$\sigma_{v,max} \leq \sigma_{zul} = \frac{K}{S \cdot A} = \frac{K}{1.5 \cdot 1.3} = \frac{K}{1.95} \quad (8.4)$$

Die maximale Belastung muss also etwa das Zweifache unter dem Dimensionierungskennwert liegen!

8.2 Material

Nach [13, S.201] lässt sich das Materialverhalten faserverstärkter Thermoplaste mit guter Genauigkeit durch Linearisierung annähern. Hierzu wird die Spannungs-Dehnungs-Kurve an der zu erwartenden Spannung σ durch eine Sekante linearisiert. Man erhält dadurch das Sekantenmodul:

$$E_S = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad (8.5)$$

Die Materialdatenbank CAMPUS 5.2 stellt für viele Kunststoffe Materialdaten zur Verfügung. Darunter Spannungs-Dehnungs-Kurven und Sekantenmoduln für viele verschiedene Kunststoffe.

Für die tragenden Teile des Roboterarms werden Materialien mit hoher Fließgrenze benötigt.

Unter den Kunststoffen mit den höchsten Fließgrenzen finden sich in CAMPUS 5.2 vorwiegend Polyamide und glasfaserverstärkte Polyamide. Polyamide verschiedener Hersteller mit gleichem Glasfasergehalt haben nahezu die selben mechanischen Eigenschaften, wie in Abbildung 8.1 zu sehen ist.

Je nach Material ergibt sich also eine unterschiedliche maximal zulässige Spannung. Von den in Abbildung 8.1 dargestellten Materialien bietet Zytel 70G50HSLA mit 189 MPa die höchste Bruchspannung. Im den folgenden Berechnungen wird also von diesem Werkstoff ausgegangen. Da sich Polyamide mit gleichem Glasfaseranteil jedoch nur geringfügig unterscheiden kann davon ausgegangen werden, dass es einige Alternativen zu Zytel 70G50HSLA gibt.

Die maximal zulässige Spannung mit Zytel 70G50HSLA ergibt sich anhand Gleichung 8.1 zu:

$$\sigma_{zul} = \frac{K}{S \cdot A} = \frac{189 \text{ MPa}}{1.5 \cdot 1.3} \approx 97 \text{ MPa} \quad (8.6)$$

Diese Spannung entspricht im Spannungs-Dehnungsdiagramm einer Dehnung von ca. $\varepsilon_{zul} \approx 1\%$. Das Sekantenmodul ergibt sich somit zu:

$$E_S = \frac{\sigma_{zul}}{\varepsilon_{zul}} = \frac{97 \text{ MPa}}{0.01} = 9700 \text{ MPa} \quad (8.7)$$

Dieser Wert wird als Elastizitätsmodul für die Simulation hergenommen.

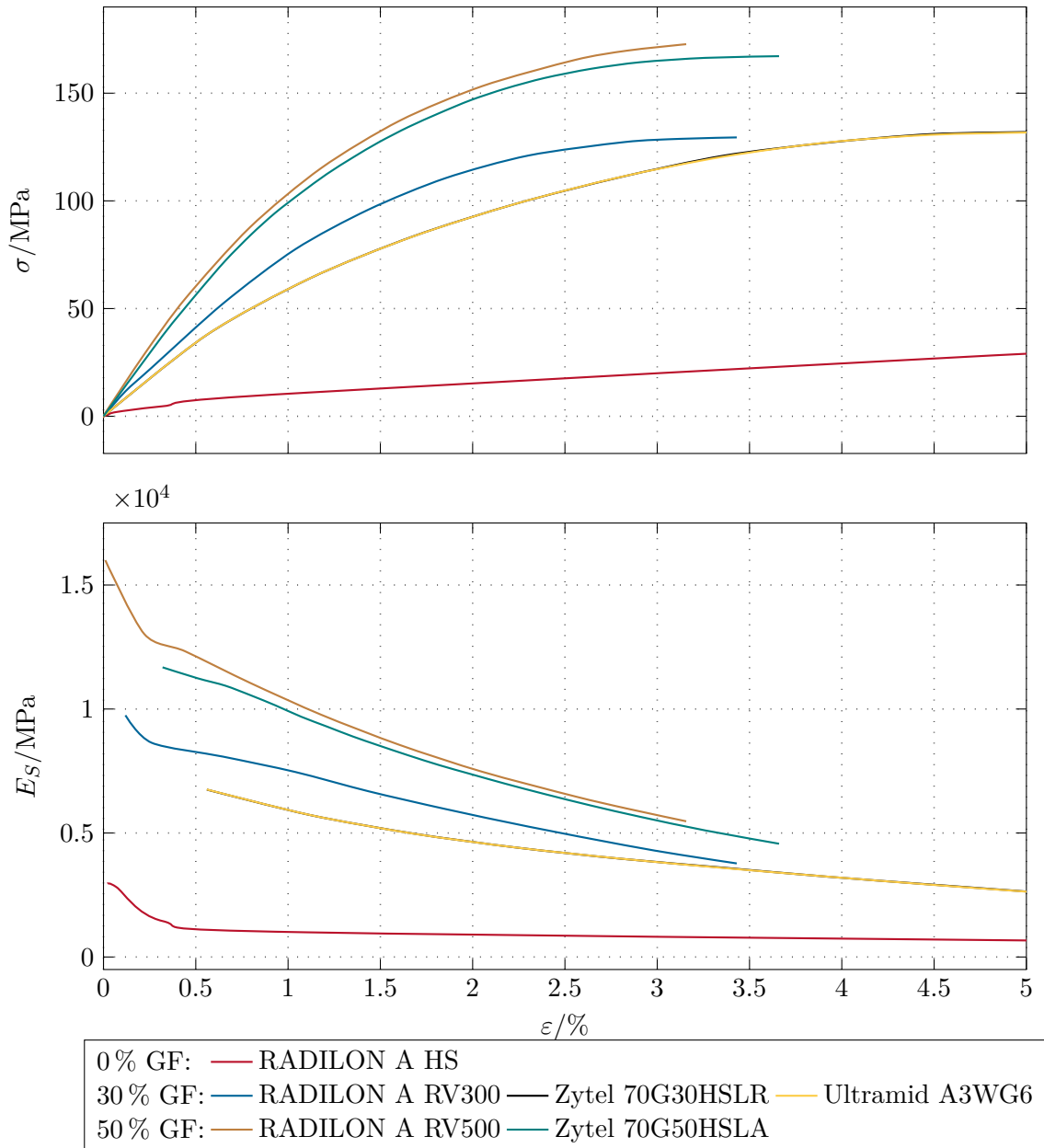


Abbildung 8.1: Spannungs-Dehnungsdiagramme und Sekantenmodul-Dehnungsdiagramme verschiedener feuchter Polyamide bei 23 °C. Materialien mit dem selben Glasfasergehalt verhalten sich beinahe deckungsgleich. Im Falle von Ultramid A3WG6 und Zytel 70G30HSLR verdecken sich die beiden Kennlinien sogar tatsächlich! Am rechten Ende der Kennlinien steht entweder die Fließgrenze oder der Bruch, jedenfalls aber der jeweilige Dimensionierungskennwert.

Daten aus CAMPUS 5.2

8.3 Simulation Unterarm

Da die Geometrie des Bauteils um die Gleitlager deutlich kleiner ist als um die Wälzlager und die Polygonverbindung, können wir dort die größeren Kräfte vermuten. Als Kriterium für die Auswahl des simulierten Trajektorienpunkts soll die quadratische Norm des Kraftvektors $F_{T,4}$ gelten, also die vom Linearzylinder ausgeübte Kraft. Der Trajektorienpunkt mit der maximalen Kraft soll simuliert werden. Das Maximum der Linearzylinderkraft aus allen Trajektorien tritt mit 209.6 N bei 0.56 s während der Trajektorie *Schiebetür öffnen* auf. Die Kräfte an den Lagern ergeben sich zu:

$$F_{R,4} = \begin{bmatrix} -107.1 \\ 0.6 \\ -24.4 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{S,4} = \begin{bmatrix} -114.8 \\ 0.6 \\ 43.1 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{T,4} = \begin{bmatrix} 207.8 \\ 0.0 \\ -27.0 \end{bmatrix} \text{ N} \quad (8.8)$$

$$F_{F,4} = \begin{bmatrix} -49.7 \\ 17.2 \\ 7.9 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{L,4} = \begin{bmatrix} 62.8 \\ -20.2 \\ 0.0 \end{bmatrix} \text{ N} \quad M_{P,4} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ 0.1 \end{bmatrix} \text{ N m} \quad (8.9)$$

Zum Einleiten der Kräfte und Momente werden drei virtuelle Kontaktteile verwendet. Das Handgelenk-Bauteil und seine Lager und Antriebe werden durch ein virtuelles Kontaktteil dargestellt. Die Lagerflächen der Polygonverbindung, des Fest- und des Loslagers dienen als Stützelemente. Dieses virtuelle Kontaktteil wird als Randbedingung fest eingespannt. Die Lagerflächen der Gleitlager R4 und S4 dienen als Stützelemente des zweiten virtuellen Kontaktteils, welches den Ellbogen-Bauteil darstellt. Dieses virtuelle Kontaktteil wird mit der Summe der Kräfte $F_{R,4}$ und $F_{S,4}$ belastet. Das dritte virtuelle Kontaktteil stellt die Gleitlager T4 dar, welche als Verbindung zum Hydraulikkolben dienen. Es wird mit $F_{T,4}$ belastet. Abbildung 8.2 zeigt die virtuellen Kontaktteile sowie die Lasten und Randbedingungen.

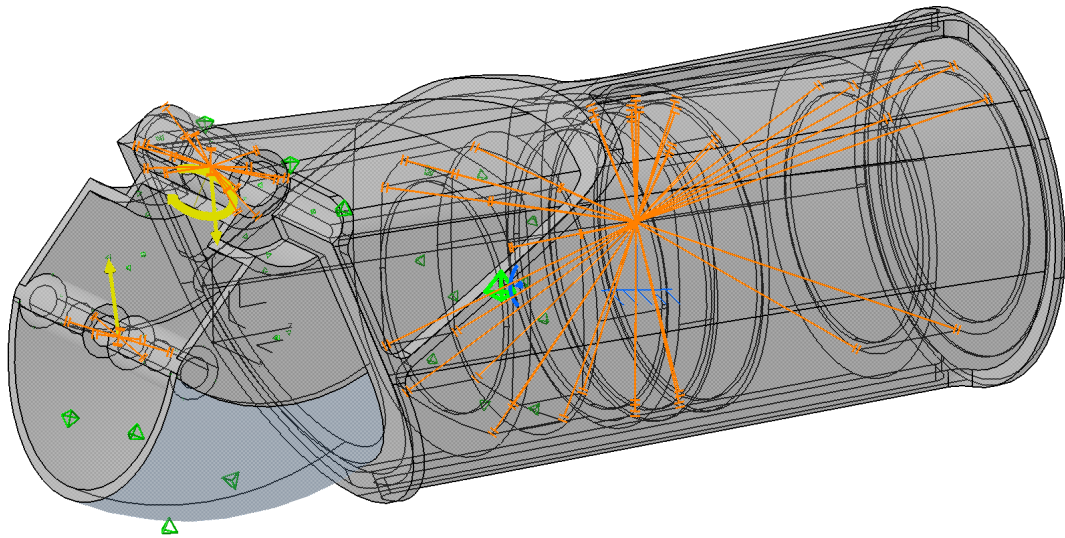


Abbildung 8.2: Aufbau der FE-Simulation des Unterarms. Die virtuellen Kontaktteile sind orange, die Lasten sind in gelb dargestellt und die Randbedingung in blau. Die grünen Tetraeder sind proportional zur Größe der Netzelemente in ihrer Nähe dargestellt.

8.3.1 Erste Simulation

In einem ersten Schritt wird ein vereinfachtes Bauteil simuliert um Ansätze für eine Verbesserung der Bauteilgeometrie zu finden. Ausgehend von der relativ groben Vernetzung von 5 mm wurde das Netz an den interessanten Stellen lokal verfeinert um den globalen Fehler auf schließlich 9.83 % zu senken.¹ Abbildung 8.3 zeigt die berechneten Vergleichsspannungen nach von Mises. Wie erwartet treten rund um die Gleitlager deutlich höhere Vergleichsspannungen auf als bei den Wälzlagern und der Polygonverbindung. Auch an den Kanten des Bauteils treten wie erwartet höhere Spannungen auf. Während die Vergleichsspannungen also alle im unkritischen Bereich liegen, treten doch deutliche Verschiebungen von über 0.2 mm auf. Die Steifigkeit des Gesamtbauteils ist also eindeutig zu gering. Abbildung 8.4 zeigt die Verschiebungen im Bereich um die Gleitlager.

8.3.2 Änderung der Konstruktion

Um die auftretenden Spannungen und Verschiebungen zu verringern werden fünf konstruktive Änderungen vorgenommen.

- Die Kanten um die Gleitlager R4 und S4 werden verrundet um eine bessere Kraftübertragung zu ermöglichen. Die Spannungen entlang dieser Kanten werden dadurch deutlich verringert.
- Ebenso wird die Kante, an welcher die Kraft von den Gleitlagern zu den Wälzlagern

¹In [14] wird ein globaler Fehlergrad von unter 10% empfohlen um eine quantitative Spannungs- und Verformungsaussage zu gewährleisten.

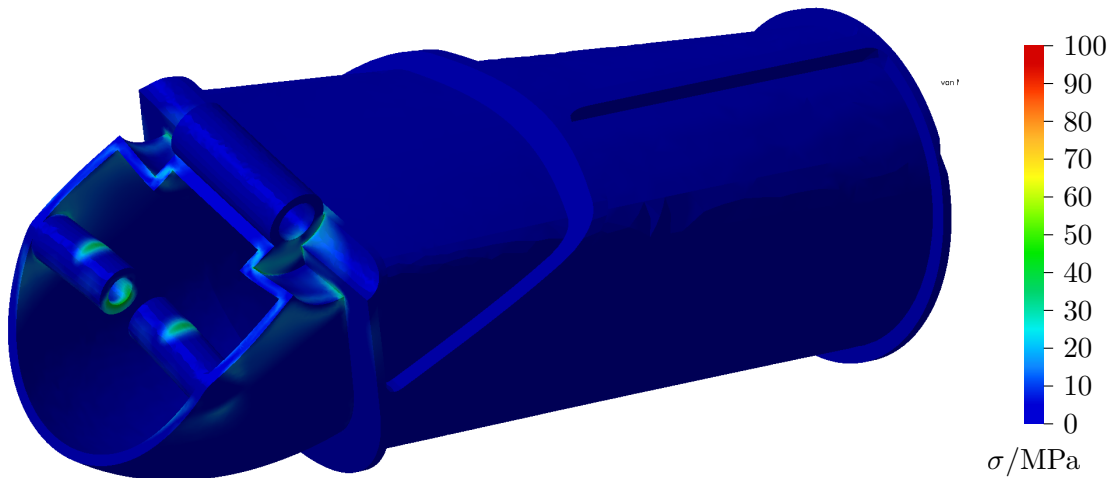


Abbildung 8.3: Von Mises Vergleichsspannungen des Unterarms. Bereiche mit geringer Vergleichsspannung sind blau, Bereiche mit einer Vergleichsspannung von > 97 MPa sind rot dargestellt.

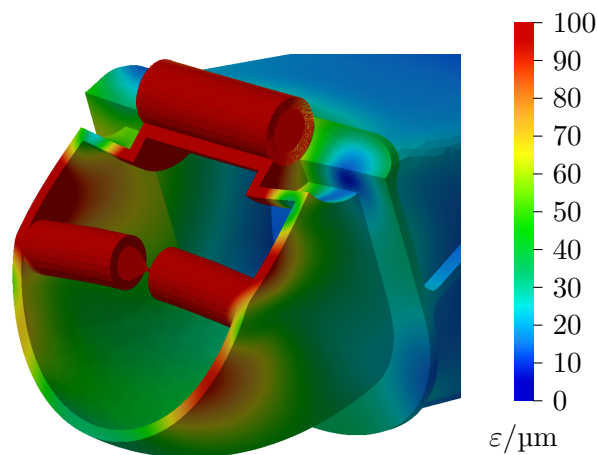


Abbildung 8.4: Betrag der Verschiebungen des Unterarms. Bereiche mit geringen Verschiebungen sind blau, Bereiche mit Verschiebungen größer als 0.1 mm sind rot dargestellt.

und der Polygonverbindung übertragen wird, verrundet. Auch diese Maßnahme dient der besseren Kraftübertragung

- Um die Spannungsspitzen an dem Gleitlager T4 zu verringern wird die Lagerung des Kolbens verändert. In der neuen Konstruktion ist nun nicht mehr die Welle fix mit dem Auge des Kolbens verbunden und mit Gleitlagern im Unterarm-Bauteil gelagert. Stattdessen ist die Welle fix mit dem Unterarm-Bauteil verschraubt und das Gleitlager sitzt zwischen dem Auge des Kolbens und der Welle. Durch die größere Lagerfläche werden die lokalen Spannungen am Bauteil reduziert. Durch die

Verschraubung der Welle mit dem Bauteil ergibt sich außerdem ein weiterer Punkt an dem die beiden Bauteilhälften zusammengehalten werden.

- Zwischen der Wellenhalterung, welche das Gleitlager T4 ersetzt und den Gleitlagern R4 und S4 ist wird die Kraft bisher außen herum geleitet. Um hier einen direkteren Kraftweg zu ermöglichen wird eine Wand eingezogen.
- Um die Wellenhalterung zusätzlich in z -Richtung abzustützen wird hier eine Versteifung eingesetzt. Weitere Verrundungen sorgen für einen besseren Spannungsverlauf an den Übergangsstellen.

Abbildung 8.5 zeigt die geänderten Konstruktionsmerkmale.

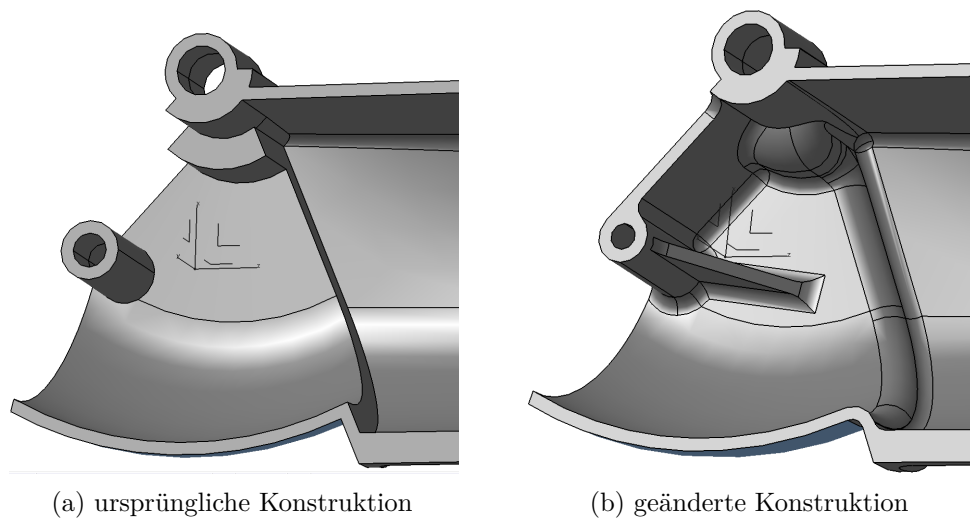


Abbildung 8.5: Vergleich der ursprünglichen mit der geänderten Konstruktion des Unterarms.

8.3.3 Zweite Simulation

Mit der veränderten Konstruktion wird nun eine zweite Finite-Elemente-Simulation mit den selben Randbedingungen und Kräften gestartet. Um eine qualitative Beurteilung der auftretenden Spannungen und Verschiebungen zu ermöglichen wird das Netz mithilfe einer globalen Adaptivität ausgehend von einer relativ großen Netzgröße (12.224 mm) automatisch verfeinert. Im Vergleich zum Verfeinern von Hand sind dazu zwar mehr Systemressourcen notwendig², allerdings muss der Benutzer nicht immer wieder selbst Hand anlegen und kann den Computer mit der Berechnung alleine lassen. Dadurch lässt sich dadurch der globale Fehler in diesem Fall auf 4.01 % senken, womit das Kriterium für eine qualitative Analyse erfüllt ist. Die Vergleichsspannungen liegen weiterhin in einem unkritischen Bereich und auch die Verschiebungen wurden deutlich reduziert. Die gesetzten

²Während der mehrstündigen Berechnung wird beispielsweise eine 50 GB große Festplattenpartition mühelos vollgeschrieben.

Maßnahmen zur Versteifung des Bauteils haben also die gewünschte Verbesserung erzielt. Die maximale am Bauteil auftretende Verschiebung liegt bei 0.06 mm.

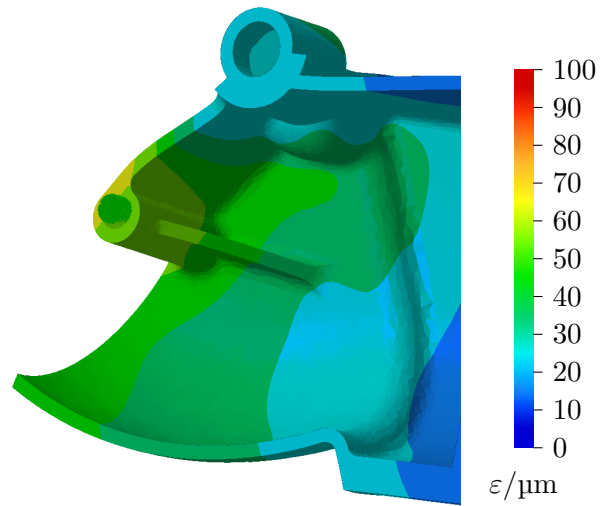


Abbildung 8.6: Betrag der Verschiebungen des Unterarms. Bereiche mit geringen Verschiebungen sind blau, Bereiche mit Verschiebungen größer als 0.1 mm sind rot dargestellt.

8.4 Simulation Ellbogen

Bei der Simulation des Ellbogen-Bauteils werden die Erkenntnisse der Unterarm-Simulation eingesetzt. Die konstruktiven Veränderungen des Unterarm-Bauteils bringen auch notwendige konstruktive Veränderungen des Ellbogen-Bauteils mit sich. So werden die entsprechenden Kanten um die Gleitlager ebenso verrundet wie beim Unterarm. Wie schon beim Unterarm sollen auch hier die größten Kräfte auf das Gleitlager T3 bzw. die Wellenhalterung als Kriterium für die Auswahl des Lastfalles dienen. Erwartungsgemäß treten die höchsten Kräfte hier im selben Arbeitspunkt wie beim Unterarm auf, nämlich bei 0.56 s während der Trajektorie *Schiebetür öffnen*. Die zugehörigen Lagerkräfte und Momente ergeben sich zu:

$$F_{R,3} = \begin{bmatrix} -35.3 \\ -104.1 \\ -0.6 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{S,3} = \begin{bmatrix} 31.0 \\ -118.7 \\ -0.6 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{T,3} = \begin{bmatrix} -5.6 \\ 209.5 \\ 0.0 \end{bmatrix} \text{ N} \quad (8.10)$$

$$F_{F,3} = \begin{bmatrix} -109.1 \\ 13.7 \\ -5.9 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{L,3} = \begin{bmatrix} 119.3 \\ 0.0 \\ 5.9 \end{bmatrix} \text{ N} \quad M_{P,3} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 1.1 \\ 0.0 \end{bmatrix} \text{ N m} \quad (8.11)$$

Wie schon beim Unterarm werden auch hier zur Einleitung der Kräfte drei virtuelle Kontaktteile verwendet. Ein virtuelles Kontaktteil bildet das Oberarm-Bauteil ab und ist an den Lagerflächen von Festlager, Loslager und Polygonverbindung definiert. Ein weiteres virtuelles Kontaktteil an den Innenflächen der Wellenhalterung (ehemals Gleitlager T3) bildet die Welle als Verbindung zum Hydraulikzylinder ab. Letztlich wird noch die Gelenkverbindung zum Unterarm durch ein virtuelles Kontaktteil an den Gleitlagern R3 und S3 dargestellt. Abbildung 8.7 zeigt den Aufbau der Simulation.

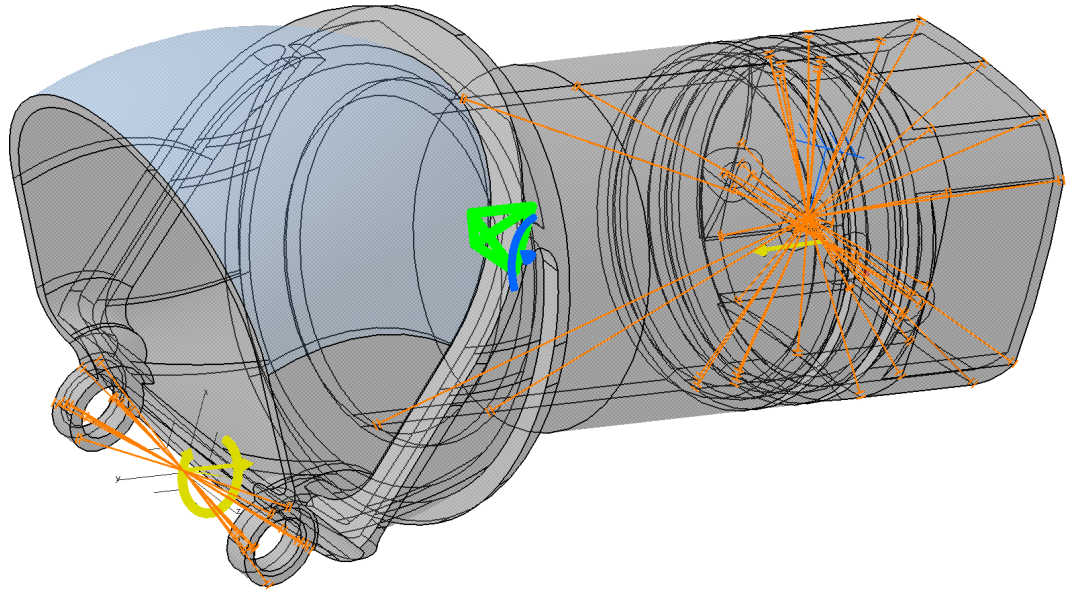


Abbildung 8.7: Aufbau der FE-Simulation des Ellbogens. Die virtuellen Kontaktteile sind orange, die Lasten sind in gelb dargestellt und die Randbedingung in blau. Die grünen Tetraeder sind proportional zur Größe der Netzelemente in ihrer Nähe dargestellt.

8.4.1 Erste Simulation

Wie bereits beim Unterarm wird in einer ersten Simulation zuerst auf die Unterschreitung der 10 %-Marke des globalen Fehlers hingearbeitet. Mittels einer automatischen Netzanpassung wurde der globale Fehler auf 10.48 % reduziert, was für diesen Zweck genügen soll. Die von-Mises Vergleichsspannungen sind mit einem Maximalwert von 85.3 MPa erneut unkritisch. Jedoch sind die Verschiebungen auch bei diesem Bauteil deutlich zu hoch mit einer maximalen Verschiebung von 0.195 mm. Abbildung 8.8 zeigt die Verschiebungen des Ellbogen-Bauteils. Wie sich unschwer feststellen lässt sind die beiden Gleitlagerstellen R3 und S3 großen Verschiebungen ausgesetzt, was auf eine geringe Steifigkeit des Bauteils zurückzuführen ist. Tatsächlich wird der gesamte Abschnitt des Bauteils vor (in positiver y -Richtung) den Wälzlager verbogen.

8.4.2 Änderung der Konstruktion

Wie schon beim Unterarm werden um die auftretenden Spannungen und Verschiebungen zu verringern, einige konstruktive Änderungen vorgenommen.

- Der scharfe Sprung vom Innendurchmesser der Lager auf den Außendurchmesser des Ellbogengelenks wird durch eine Fase entschärft. Damit ist für eine bessere Krafteinleitung gesorgt und das Bauteil neigt an dieser Stelle weniger zum Knicken. Als Folge dieser Änderung muss der Lagerabstand von 50 mm auf 42 mm verringert werden. Da der Lagerabstand von Fest- und Loslager ursprünglich aber ohnehin sehr großzügig bemessen war sind die Auswirkungen vernachlässigbar.

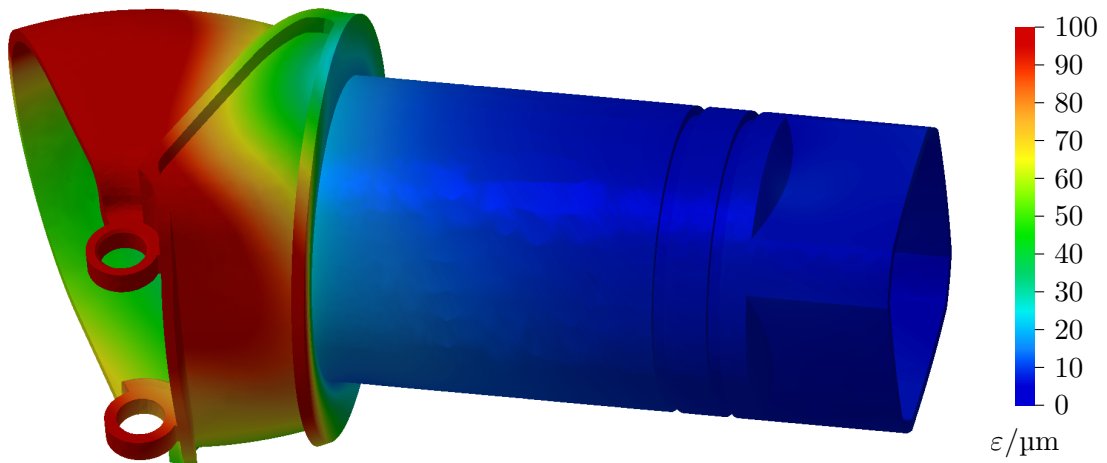


Abbildung 8.8: Betrag der Verschiebungen des Ellbogens. Bereiche mit geringen Verschiebungen sind blau, Bereiche mit Verschiebungen größer als 0.1 mm sind rot dargestellt.

- Die Fläche unter der Airskin wurde um 1 mm auf 3 mm aufgedickt. Die dickere Wandstärke wirkt sich positiv auf die Steifigkeit an dieser Stelle aus.
- Im Inneren des Bauteils wurden einige Rippen eingefügt, welche das Bauteil weiter versteifen.
- Schließlich wurden noch an dem Auge für die Gleitlager R3 und S3 einige Verrundungen durchgeführt um eine bessere Kraftleitung zu erzielen.

Abbildung 8.9 zeigt die geänderten Konstruktionsmerkmale.

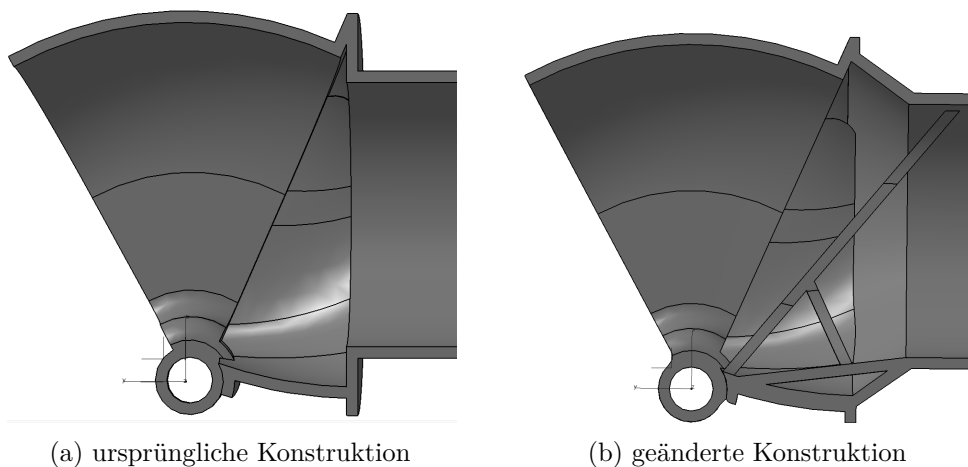


Abbildung 8.9: Vergleich der ursprünglichen mit der geänderten Konstruktion des Ellbogens.

8.4.3 Zweite Simulation

Für die zweite Simulation wurde erneut ein globaler Fehler von unter 5 % angestrebt. Da die automatische Netzverfeinerung nach über 72 Stunden Rechenzeit den globalen Fehler auf nur 6.13 % reduzieren konnte, soll dieser Wert genügen. Man kann also im weiteren davon ausgehen, dass die Ergebnisse plausibel sind. Durch die getroffenen konstruktiven Maßnahmen wurde die maximale Verschiebung auf 0.097 mm reduziert, was als ausreichend klein angenommen wird.

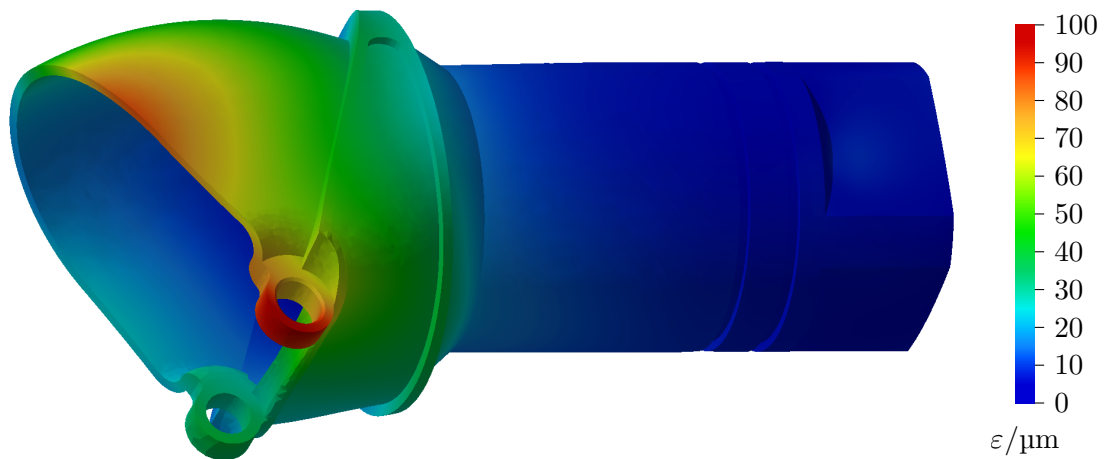


Abbildung 8.10: Betrag der Verschiebungen des Ellbogens. Bereiche mit geringen Verschiebungen sind blau, Bereiche mit Verschiebungen größer als 0.1 mm sind rot dargestellt.

8.5 Simulation Oberarm

Der Oberarm ist das größte Bauteil des ganzen Armes. Wie schon bei den vorherigen Bauteilen wird auch hier der Arbeitspunkt mit der größten Kolbenkraft simuliert. Die an den Lagern wirkenden Kräfte sind in diesem Arbeitspunkt:

$$F_{R,2} = \begin{bmatrix} -39.7 \\ -5.5 \\ 181.2 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{S,2} = \begin{bmatrix} 34.2 \\ -5.5 \\ 62.5 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{T,2} = \begin{bmatrix} -6.2 \\ 0.0 \\ -235.6 \end{bmatrix} \text{ N} \quad (8.12)$$

$$F_{F,2} = \begin{bmatrix} -69.9 \\ -30.4 \\ -6.2 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{L,2} = \begin{bmatrix} 82.2 \\ 37.8 \\ 0.0 \end{bmatrix} \text{ N} \quad M_{P,2} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ -1.2 \end{bmatrix} \text{ Nm} \quad (8.13)$$

Erneut sollen drei virtuelle Kontaktteile die Kräfte einleiten: eines, welches die Lager zum Ellbogenbauteil darstellen, und je eines für die Lager zum Schulterbauteil und zum Hydraulikzylinder.

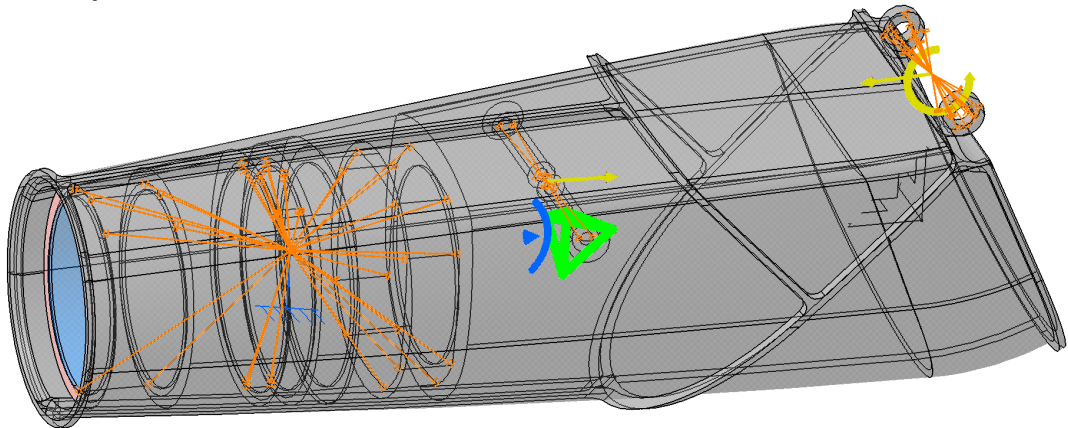


Abbildung 8.11: Aufbau der FE-Simulation des Oberarms. Die virtuellen Kontaktteile sind orange, die Lasten sind in gelb dargestellt und die Randbedingung in blau.

8.5.1 Erste Simulation

Vor der Simulation wurde die Konstruktion noch angepasst um das veränderte Ellbogenbauteil aufzunehmen. Wie schon zuvor wurde für die erste Simulation ein globaler Fehler von unter 10% angestrebt, um eine qualitative Aussage über die Spannungen und Verformungen treffen zu können. Mittels adaptiven Netz wurde der globale Fehler schließlich auf 9.27% reduziert. Die von Mises Vergleichsspannungen halten sich auf dem Großteil des Bauteils in Grenzen. Nur an einigen Kanten, welche später ohnehin verrundet werden werden Spannungsspitzen über dem Vergleichswert errechnet. Abbildung 8.12 zeigt die Verschiebung am Bauteil. Erneut ist die Verschiebung zu groß. Im Bereich der Gleitlager sind die Verschiebungen größer als 0.1 mm. Das Maximum liegt bei 0.23 mm.

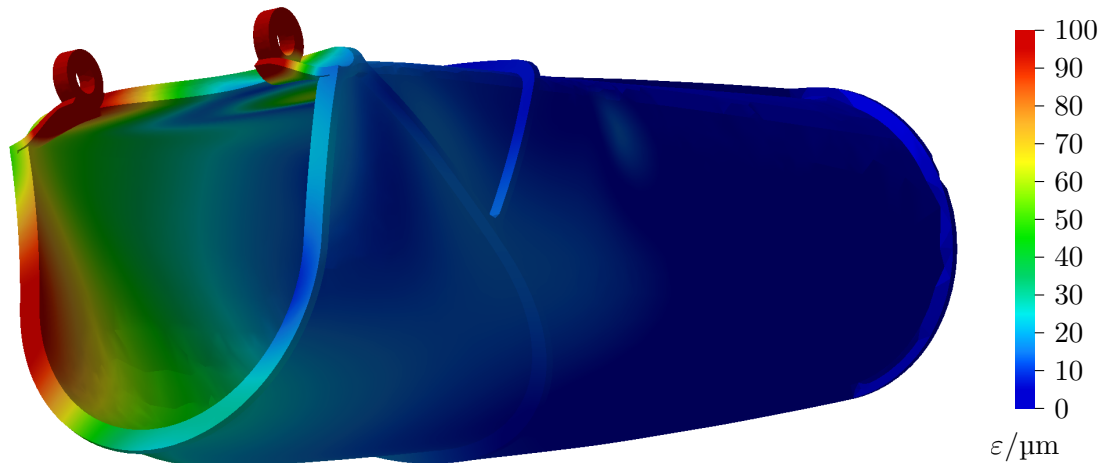


Abbildung 8.12: Betrag der Verschiebungen des Oberarms. Bereiche mit geringen Verschiebungen sind Blau, Bereiche mit Verschiebungen größer als 0.1 mm sind rot dargestellt.

8.5.2 Änderung der Konstruktion

Der Oberarm ist die größte Baugruppe des Armes und hat ebenso den größten Durchmesser. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die auftretenden Spannungen und Verschiebungen eher klein sind. Tatsächlich lässt sich die maximale Verschiebung mit äußerst wenigen Modifikationen unter 0.1 mm bringen. Als einzige Konstruktionsänderung wurde hier das Auge der Lager R2 und S2 verbreitert und gleichzeitig nach außen versetzt. Dies bewirkt einerseits geringere Kräfte durch den größeren Hebel, als auch eine bessere Kräfteinleitung in die Wand des Bauteiles. Abbildung 8.13 zeigt die geänderten Konstruktionsmerkmale.

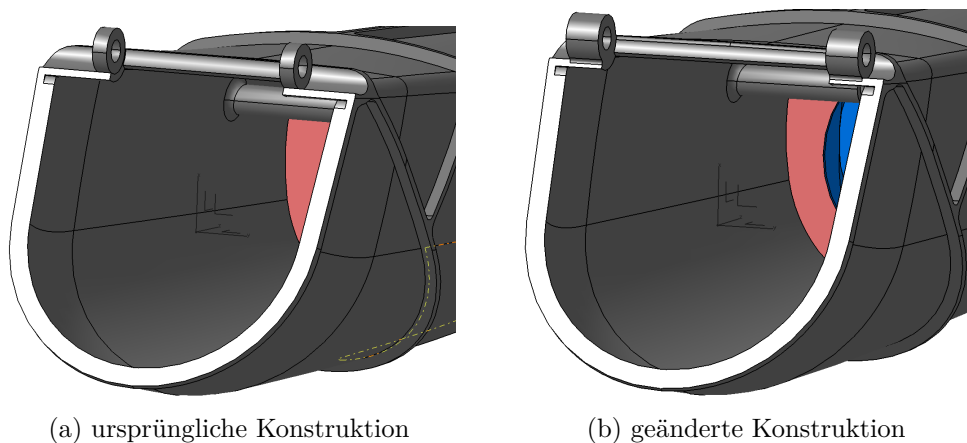


Abbildung 8.13: Vergleich der ursprünglichen mit der geänderten Konstruktion des Oberarms.

8.5.3 Zweite Simulation

In der zweiten Simulation wurde erneut ein adaptives Netz verwendet und so der globale Fehler auf 4.62 % reduziert. Die konstruktiven Maßnahmen haben zur Folge, dass sich die maximale Verschiebung auf 0.083 mm verringert. In Abbildung 8.14 kann man erkennen, dass die Verschiebungen deutlich abgenommen haben.

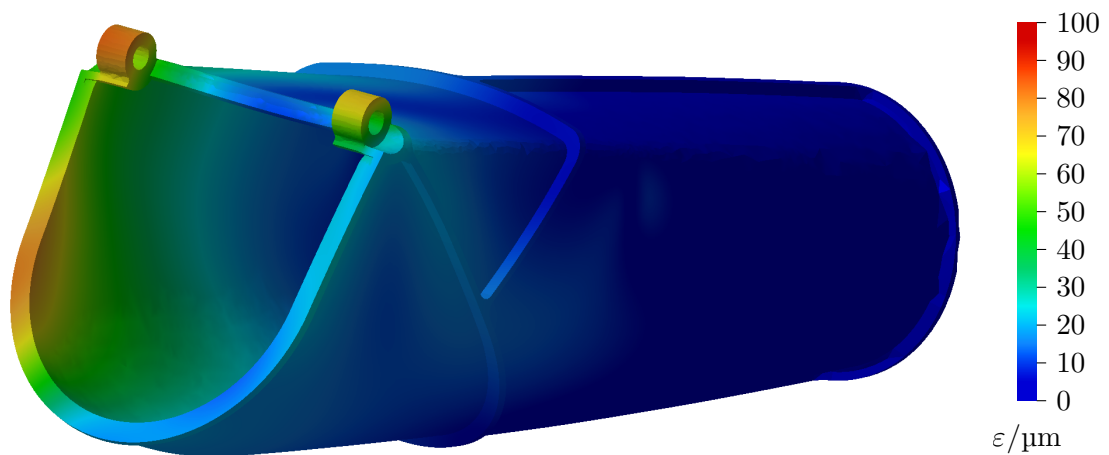


Abbildung 8.14: Betrag der Verschiebungen des Oberarms. Bereiche mit geringen Verschiebungen sind blau, Bereiche mit Verschiebungen größer als 0.1 mm sind rot dargestellt.

8.6 Simulation Schulter

Mit der Schulter wird nun das letzte Bauteil der Simulation unterzogen. Dadurch, dass die Schulter das dem Torso am nächste Bauteil ist können wir hier die größten Momente erwarten. Der simulierte Arbeitspunkt wird wieder nach der höchsten Kolbenkraft ausgewählt und stimmt damit mit dem simulierten Arbeitspunkt des Oberarms überein. An diesem Arbeitspunkt wirken in den Lagern die folgenden Kräfte:

$$F_{R,1} = \begin{bmatrix} 166.3 \\ -82.2 \\ 5.5 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{S,1} = \begin{bmatrix} 68.9 \\ 18.1 \\ 5.5 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{T,1} = \begin{bmatrix} -230.2 \\ 50.8 \\ 0.0 \end{bmatrix} \text{ N} \quad (8.14)$$

$$F_{F,1} = \begin{bmatrix} -128.5 \\ 13.2 \\ 55.9 \end{bmatrix} \text{ N} \quad F_{L,1} = \begin{bmatrix} 122.8 \\ 0.0 \\ -68.0 \end{bmatrix} \text{ N} \quad M_{P,1} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ -2.6 \\ 0.0 \end{bmatrix} \text{ N m} \quad (8.15)$$

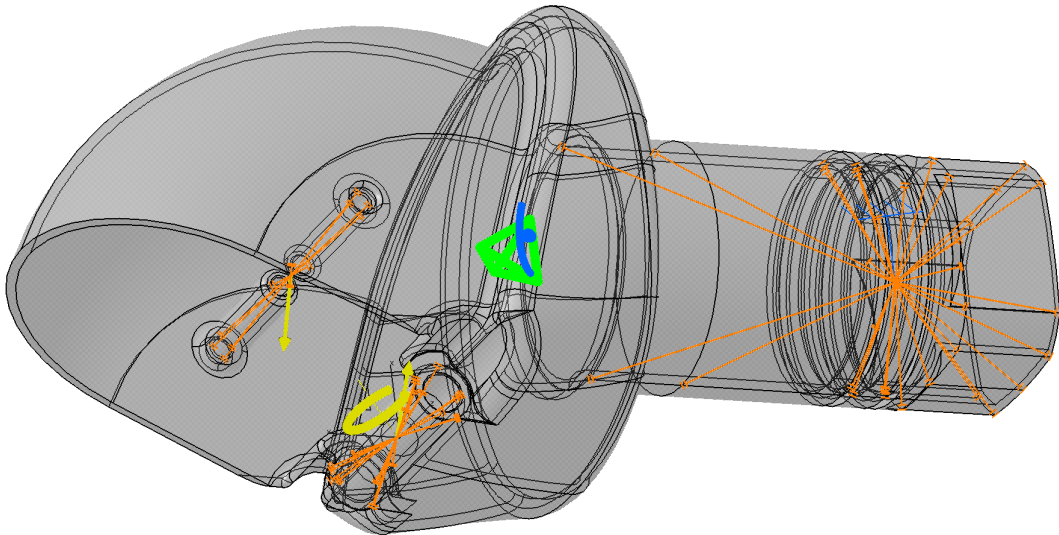


Abbildung 8.15: Aufbau der FE-Simulation der Schulter. Die virtuellen Kontaktteile sind orange, die Lasten sind in gelb dargestellt und die Randbedingung in blau.

8.6.1 Erste Simulation

Wie schon bei den bisherigen Bauteilen wurde in der ersten Simulation mittels adaptivem Netz die Unterschreitung der 10 %-Marke des globalen Fehlers angestrebt. Nach einigen Iterationen lag der globale Fehler schließlich bei 8.81 %. Die errechnete von Mises Vergleichsspannung ist mit 50.0 MPa deutlich unter dem Vergleichswert von 97 MPa und damit unkritisch. Allerdings ist erneut die maximale Verschiebung mit 1.31 mm deutlich zu groß. Abbildung 8.16 zeigt die Verschiebungen am Bauteil.

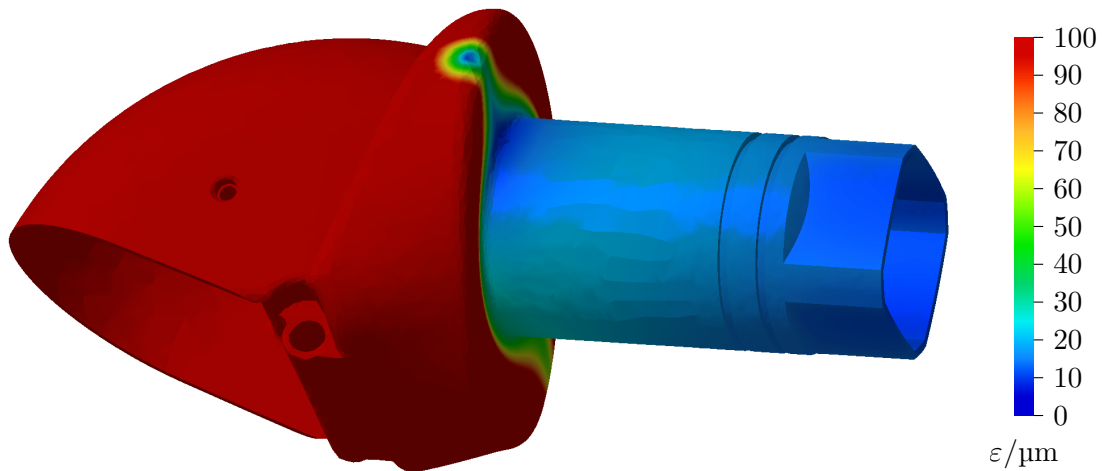


Abbildung 8.16: Betrag der Verschiebungen der Schulter. Bereiche mit geringen Verschiebungen sind blau, Bereiche mit Verschiebungen größer als 0.1 mm sind rot dargestellt.

8.6.2 Änderung der Konstruktion

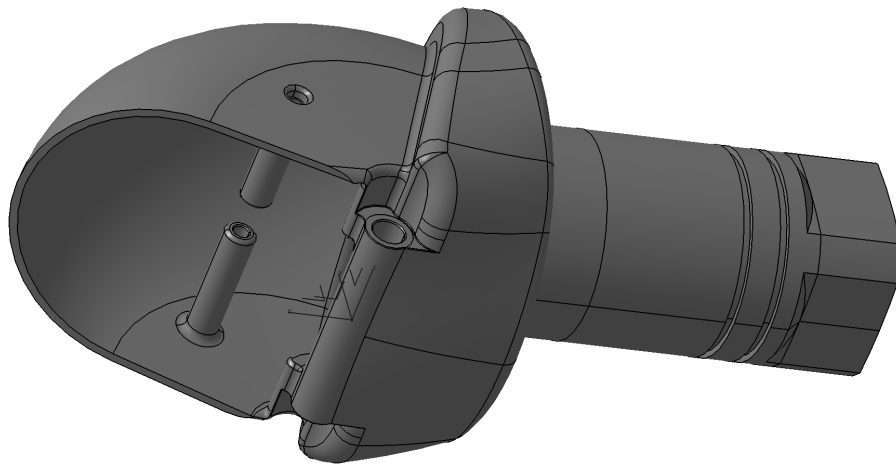
Das Schulterbauteil sticht vor allem durch den großen Durchmessersprung vom Innendurchmesser des Lagers auf den Außendurchmesser des Armes hervor. Die im Vergleich zum Außendurchmesser kleinen Lager sind vor allem auf das Bestreben Gleichteile zu verwenden zurückzuführen. In Anbetracht der Ergebnisse der ersten Simulation ist dieses Konzept allerdings zu hinterfragen. Um die deutlich zu großen Verschiebungen zu verringern werden folgende Änderungen vorgenommen:

- Um den riesigen Sprung des Durchmessers von 50 mm auf 100 mm zu verringern wird ein deutlich größeres Loslager eingesetzt. Das *Misumi NK80/25R* Nadellager bietet mit 80 mm Innendurchmesser ausreichend Platz um eine bessere Kräfteinleitung zu ermöglichen.
- Um die Kräfteinleitung weiter zu verbessern werden die Durchmesserübergänge konisch ausgeführt.
- Rippen im Inneren des Bauteils tragen weiter zur Versteifung bei.

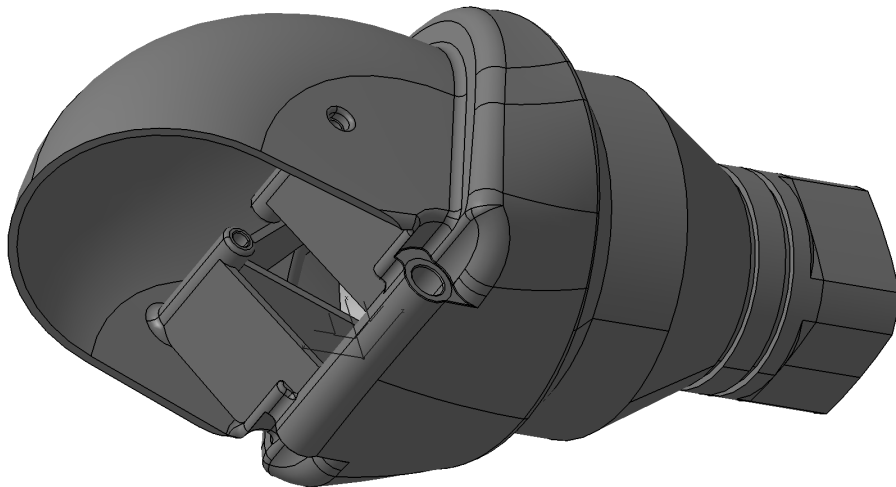
Abbildung 8.17 zeigt die geänderten Konstruktionsmerkmale.

8.6.3 Zweite Simulation

Die zweite Simulation wird abermals mit globaler Adaptivität durchgeführt, was nach einigen Durchläufen einen globalen Fehler von 9.31 % liefert. Mit 0.076 mm maximaler Verschiebung ist das geänderte Bauteil deutlich steifer. Die Änderungen waren also erfolgreich. Die maximale von Mises Vergleichsspannung liegt mit 29.7 MPa auch deutlich niedriger als zuvor.



(a) ursprüngliche Konstruktion



(b) geänderte Konstruktion

Abbildung 8.17: Vergleich der ursprünglichen mit der geänderten Konstruktion der Schulter.

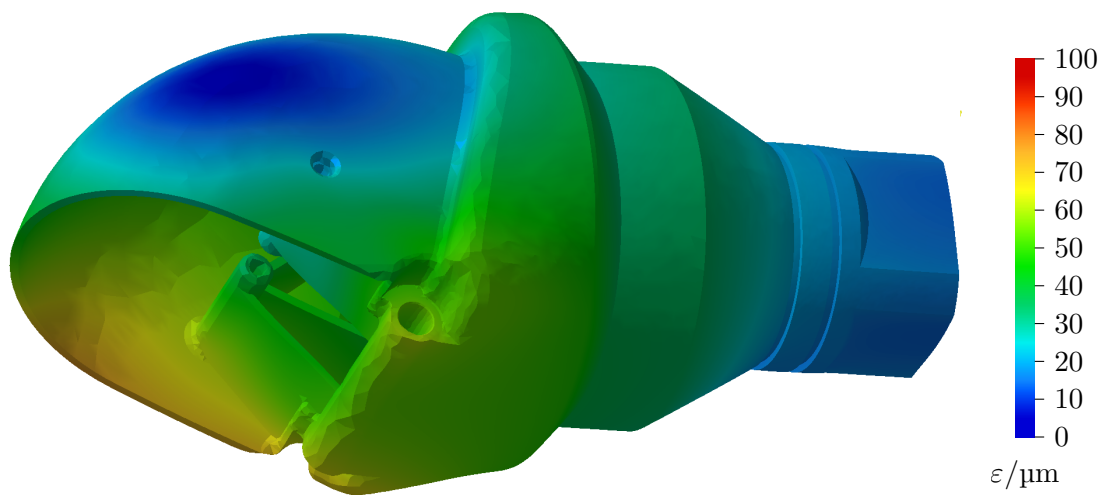


Abbildung 8.18: Betrag der Verschiebungen der Schulter. Bereiche mit geringen Verschiebungen sind Blau, bereiche mit Verschiebungen größer als 0.1 mm sind rot dargestellt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurde ein hydraulisch angetriebener humanoider Roboterarm aus Spritzgussteilen für den Roboter *Blue* entwickelt.

Ausgehend von den Herausforderungen, welche das Einsatzgebiet Haushalt an den Roboter stellt, wurden weitere Anforderungen an den Roboterarm abgeleitet.

Auf der Basis von einfachen Berechnungen und Messungen wurden die groben Konstruktionsparameter wie Abmessungen und Wandstärke bestimmt. An mehreren Iterationen von Prototypen wurden das Konstruktionskonzept weiter verfeinert bis die Konstruktion sowohl ästhetisch als auch funktionell zufriedenstellend war.

Um die Anforderungen an die Festigkeit zu kontrollieren, sowie die Kräfte der Aktoren zu verifizieren wurden einige Simulationen durchgeführt.

Bewegungsabläufe wie das Öffnen von Türen oder das Heben eines Gegenstandes, welche sich aus den Anforderungen ergeben, wurden in Trajektorien für den Roboterarm umgewandelt und mithilfe von MATLAB simuliert. Das Ergebnis dieser Simulationen waren sämtliche Antriebs- und Lagerkräfte sowie Momente im Inneren des Roboterarmes. Dafür wurde der bekannte Recursive-Newton-Euler Algorithmus erweitert um sämtliche Kräfte und Momente auszugeben. Mittels einfacher linearer Gleichungssysteme und den Konstruktionsparametern wurden aus diesen Daten die Kräfte und Momente auf Antriebe und Lager berechnet. Diese Vorgangsweise wurde in dieser Arbeit detailliert erläutert und kann in Zukunft als Grundlage für ähnliche Berechnungen dienen.

Zuletzt wurden die konstruierten Teile einer Festigkeitsanalyse unterzogen und abermals überarbeitet. Es zeigte sich, dass die ursprünglichen Annahmen über die notwendige Wandstärke hinreichend gut getroffen wurden und nur kleinere Änderungen am Design notwendig waren. Der entwickelte Roboterarm erfüllt somit alle anfangs gestellten Anforderungen.

Der nun vorhandene letzte Konstruktionsstand kann in einem nächsten Prototypen realisiert werden. Dieser nächste Prototyp sollte sich aber vorrangig mit der Fertigung als Spritzgussteil beschäftigen, ein Aufwand, welcher für die vorliegende Diplomarbeit nicht mehr betrieben wurde.

A Matlab Funktionen

A.1 readInertiaFile

Die Funktion `readInertiaFile` liest von CATIA generierte Textdateien, welche die Trägheitsparameter eines Bauteils in tabellarischer Form enthalten. Eine solche Parameterdatei erstreckt sich über mehrere hundert Spalten, daher seien hier nur die ersten Spalten dargestellt um einen Eindruck über den Dateiaufbau zu erhalten:

...				
Produkt :	Hauptkörper...Oberarm			...
Datum :	Samstag, 14 November 2015 09:24:17			...
Autor :	Wolfgang			...
...				
Component	Sub-Component	Bereich[m2]	Volumen[m3]	Dich...
...				
Hauptkörper...Oberarm		0.171	0.000165918	1000...
...				

In dieser Datei enthalten sind sowohl Masse, als auch Massenschwerpunkt sowie der Trägheitstensor. Die Funktion `readInertiaFile` liest diese Datei zuerst zeilenweise ein, wobei nur die Zeilen 6 und 8 gespeichert werden, da diese die Überschriften und die entsprechenden Werte enthalten. Dann wird in der Überschriftenzeile (Zeile 6) nach dem String `'Masse'` und sich dessen Position gemerkt. Auf der selben Position in der Wertezeile (Zeile 8) steht der entsprechende Wert welcher daraufhin ausgelesen und abgespeichert wird. Da nicht alle Werte in den passenden Einheiten vorliegen wird noch in die korrekten Einheiten umgerechnet. Dies passiert für alle gesuchten Werte. Anschließend werden die gefundenen Werte noch in die entsprechenden Datenstrukturen eingefügt und ausgegeben.

```
function [ m, r, J ] = readInertiaFile( filename )
%READINERTIAFILE lädt Trägheitsdaten aus einer von CATIA erstellten
%Textdatei
% Detailed explanation goes here

% Oeffne Datei
fileID = fopen( filename, 'r' );

% Lade Zeile 2: Produktname
fgetl(fileID);           % Zeile 1 überspringen
productline = fgetl(fileID); % Zeile 2 einlesen
productname = sscanf(productline, 'Produkt :%s' );
```

```
% Lade Zeile 6: Überschriften
fgetl(fileID);           % Zeile 3 überspringen
fgetl(fileID);           % Zeile 4 überspringen
fgetl(fileID);           % Zeile 5 überspringen
captions = fgetl(fileID); % Zeile 6 einlesen

% Finde Zeile mit Daten
found = 0;
linenum = 6;
while found == 0
    data = fgetl(fileID);
    linenum = linenum + 1;
    found = strcmp(productname,data(1:length(productname)));
end

len = 15;

% Finde und lese "Masse" ein
start = strfind( captions, 'Masse' );
str = data( start:start+len);
Masse = sscanf(str, '%f' );

% Finde und lese "Gx" ein
start = strfind( captions, 'Gx' );
str = data( start:start+len);
Gx = sscanf(str, '%f' )/1000;

% Finde und lese "Gy" ein
start = strfind( captions, 'Gy' );
str = data( start:start+len);
Gy = sscanf(str, '%f' )/1000;

% Finde und lese "Gz" ein
start = strfind( captions, 'Gz' );
str = data( start:start+len);
Gz = sscanf(str, '%f' )/1000;

% Finde und lese "Iox0" ein
start = strfind( captions, 'Iox0' );
str = data( start:start+len);
Iox0 = sscanf(str, '%f' );

% Finde und lese "Ioy0" ein
start = strfind( captions, 'Ioy0' );
```



```
str = data( start:start+len);
Ioy0 = sscanf(str, '%f' );

% Finde und lese "Ioz0" ein
start = strfind( captions, 'Ioz0' );
str = data( start:start+len);
Ioz0 = sscanf(str, '%f' );

% Finde und lese "Ixy0" ein
start = strfind( captions, 'Ixy0' );
str = data( start:start+len);
Ixy0 = sscanf(str, '%f' );

% Finde und lese "Ixz0" ein
start = strfind( captions, 'Ixz0' );
str = data( start:start+len);
Ixz0 = sscanf(str, '%f' );

% Finde und lese "Iyz0" ein
start = strfind( captions, 'Iyz0' );
str = data( start:start+len);
Iyz0 = sscanf(str, '%f' );

% setze Rückgabewerte
m = Masse;
r = [ Gx Gy Gz ]';
J = [ Iox0 Ixy0 Ixz0 ;...
      Ixy0 Ioy0 Iyz0 ;...
      Ixz0 Iyz0 Ioz0 ];

end
```

A.2 trajectory

Die Funktion `trajectory` stellt zu gegebenen Anfangs- und Endwert eine Folge an Zwischenwerten zu Verfügung, welche auf einer kontinuierlichen Trajektorie liegen. Die Funktion ist darauf ausgelegt, dass verschiedene Arten von Trajektorien, wie z.B. Trapez, Polynomial, oder Zykloid ausgegeben werden können. Versuche mit verschiedenen Trajektorientypen blieben bei dieser Diplomarbeit jedoch aus, so dass nur eine zyklode Trajektorie implementiert wurde. Die Funktion `trajectory` operiert nicht nur mit einer eindimensionalen Trajektorie, sondern kann in mehreren Dimensionen Zwischenwerte errechnen. Die Gleichung für die Zwischenwerte einer Zykloiden Trajektorie lautet wie

folgt:

$$P(t) = P_0 + \left(\frac{t}{t_f} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{t}{t_f} \right) \right) (P_f - P_0) \quad (\text{A.1})$$

mit dem Startwert P_0 , dem Endwert (oder finalem Wert) P_f , der Zeit des gewünschten Zwischenpunktes t , der Startzeit t_0 und der finalen Zeit t_f .

Die Implementierung in MATLAB ist wie folgt:

```
function [td, xd] = trajectory( t, x, dt, type )
%TRAJECTORY stellt zu gegebenen Anfangs- und Endwert eine Folge an
%Zwischenwerten zu Verfügung, welche auf einer kontinuierlichen
%Trajektorie liegen.

td = [t(1):dt:t(end)]';
xd = zeros(length(td),size(x,2));

for i=1:length(td)-1;
    tau = td(i);
    j = find(t>tau,1,'first');

    if strcmp(type,'cycloidal')
        xd(i,:) = cycloidal( x(j-1,:), x(j,:), t(j)-t(j-1), tau-t(j-1) );
    end

end
xd(end,:) = x(end,:);
end

function P = cycloidal(P0, Pf, tf, t)
    P = P0 + ( t/tf - 1/2/pi*sin(2*pi*t/tf) )*(Pf-P0);
end
```

A.3 differentiate

Die Funktion `differentiate` berechnet mittels eines Savitzky-Golay Filters eine geglättete Trajektorie sowie deren erste und zweite Zeitableitung.

```
function [ dx, ddx, sx ] = differentiate( x, dt )
%DIFFERENTIATE berechnet Zeitableitungen einer geglätteten Trajektorie
% Die Funktion differentiate dient dazu die von der Funktion ikon
% erhaltene Trajektorie im Raum der Gelenkwinkel nach der Zeit
% abzuleiten. Dazu wird ein Savitzky-Golay-Filter der Ordnung 2 mit der
% Fensterbreite 21 verwendet.

% Savitzky-Golay-Filter erstellen
```

```
[~,g] = sgolay( 2, 21 );

% Koeffizienten für Glätten, Differenzieren und zweimaliges Differenzieren
kernel = g(:,1);
dkernel = g(:,2);
ddkernel = g(:,3);

num = length(dkernel)-1;

% jede Spalte von "x" glätten, ableiten und zweifach ableiten
for i=1:size(x,2)
    % glätten
    sxm(:,i) = conv( x(:,i), kernel, 'valid');
    % ableiten
    dxm(:,i) = -conv( x(:,i), dkernel, 'valid')/dt;
    % zweifach ableiten
    ddxm(:,i) = 2*conv( x(:,i), ddkernel, 'valid')/dt/dt;
end

% Ränder auf ursprüngliche Größe erweitern
sxa = ones(num/2,1)*sxm(1,:);
sxe = ones(num/2,1)*sxm(end,:);
sx = [ sxa; sxm; sxe ];
dxa = ones(num/2,1)*dxm(1,:);
dxe = ones(num/2,1)*dxm(end,:);
dx = [ dxa; dxm; dxe ];
ddxa = ones(num/2,1)*ddxm(1,:);
ddxe = ones(num/2,1)*ddxm(end,:);
ddx = [ ddxa; ddxm; ddxe ];
end
```


B Simulationsergebnisse

B.1 Zimmertür öffnen

B.1.1 Trajektorie

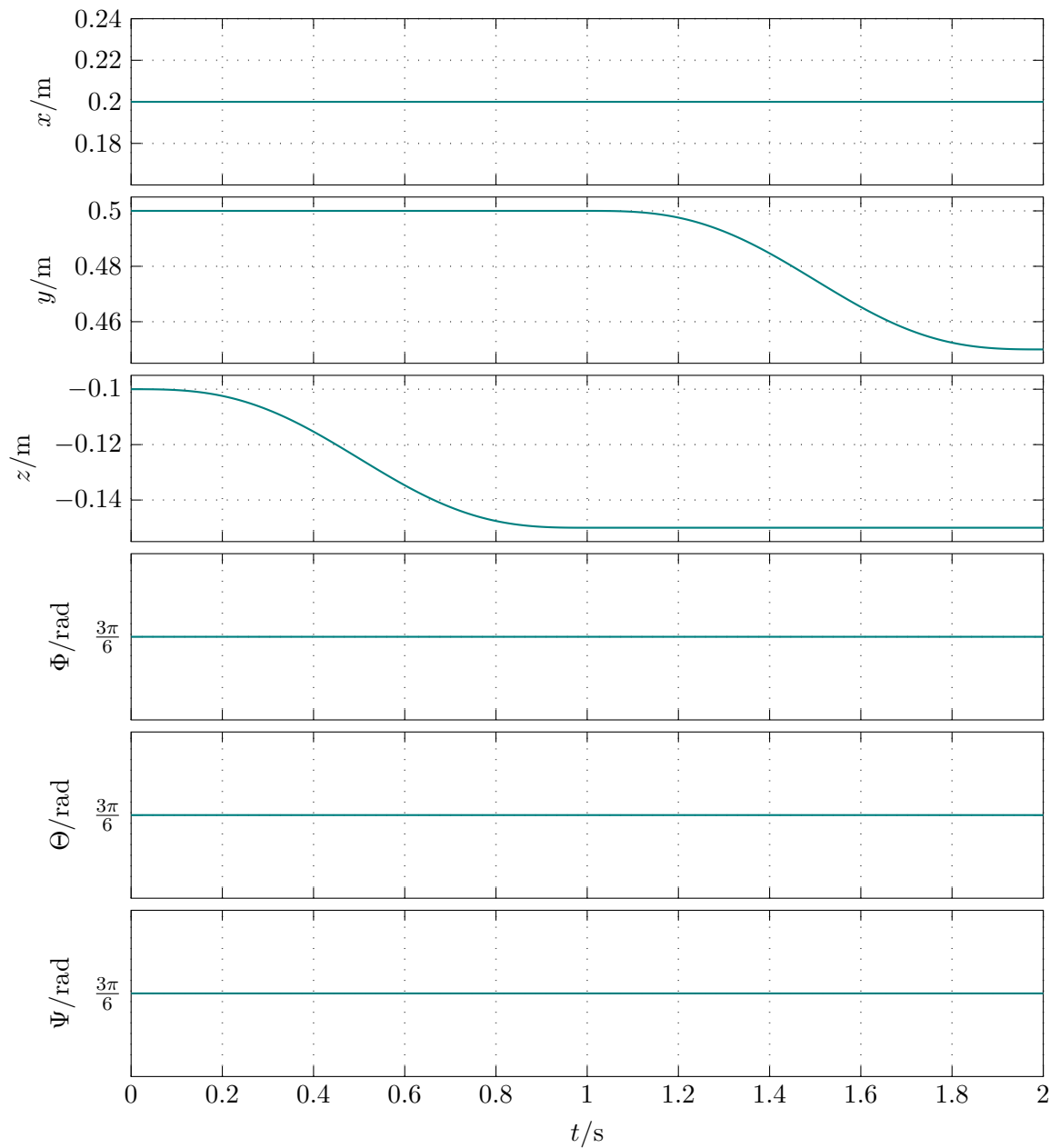


Abbildung B.1: Trajektorie im Arbeitsraum

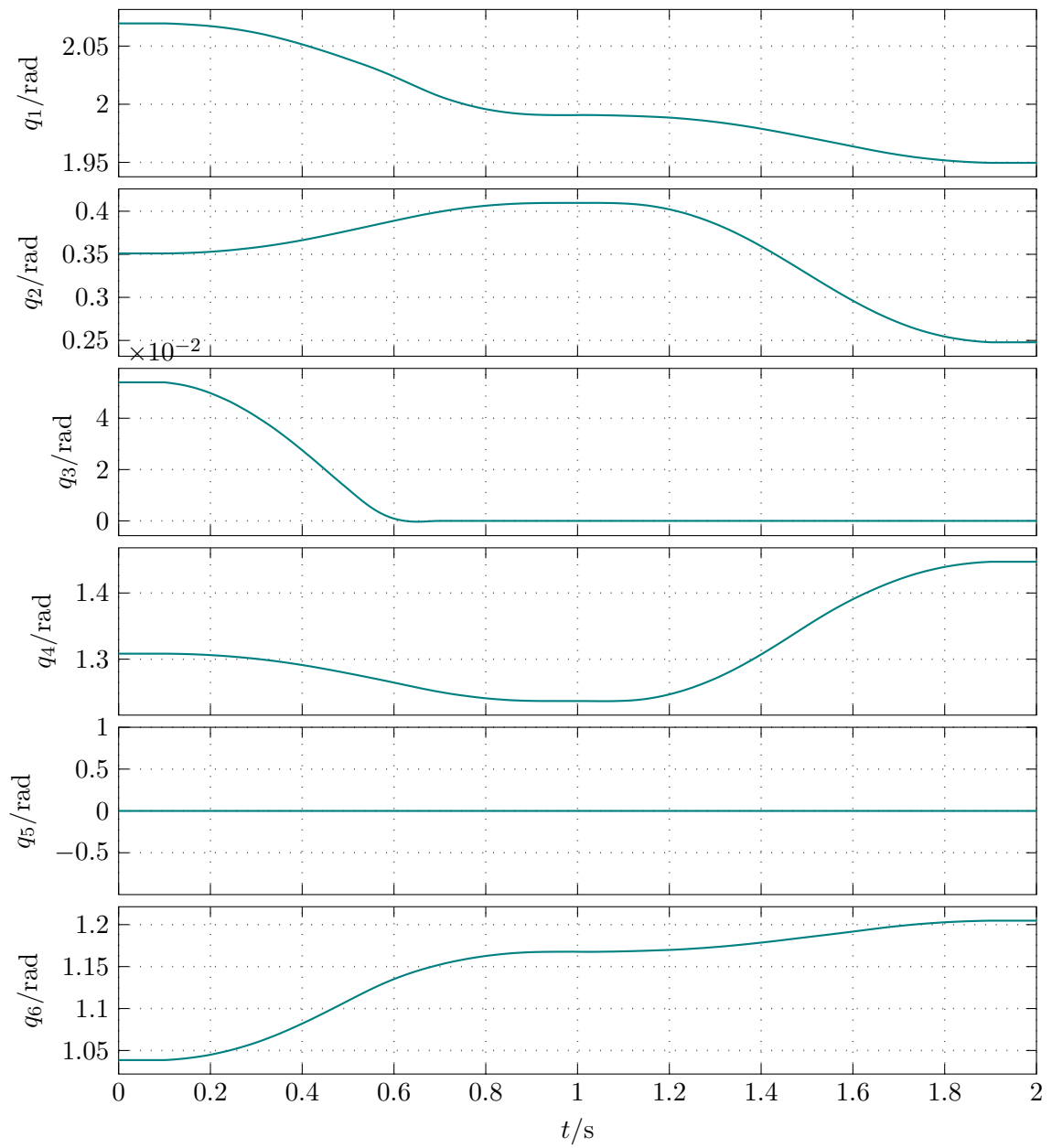


Abbildung B.2: Gelenkwinkel

B.1.2 Kräfte und Momente

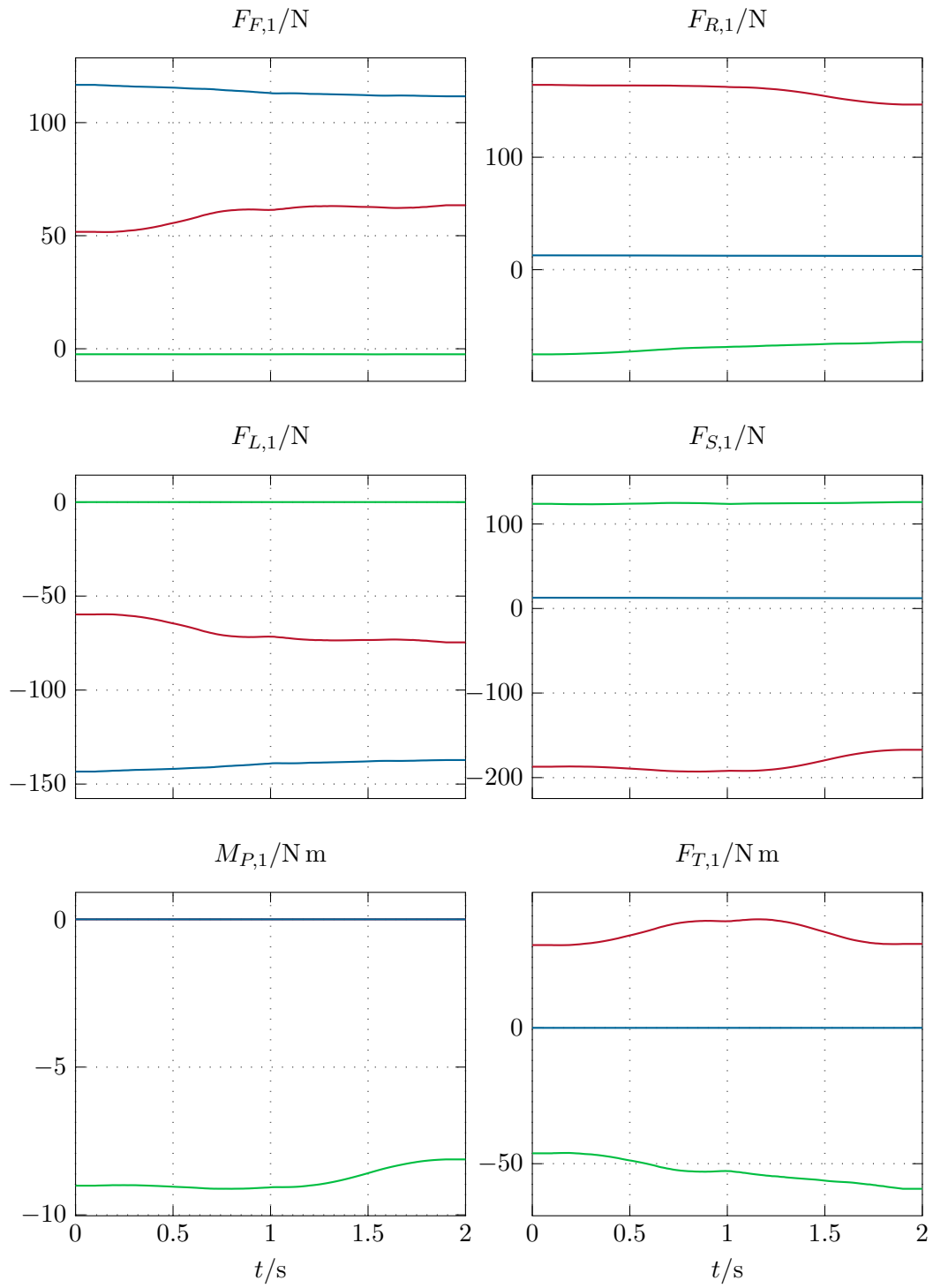


Abbildung B.3: Lagerkräfte Gelenk 1: Schulter

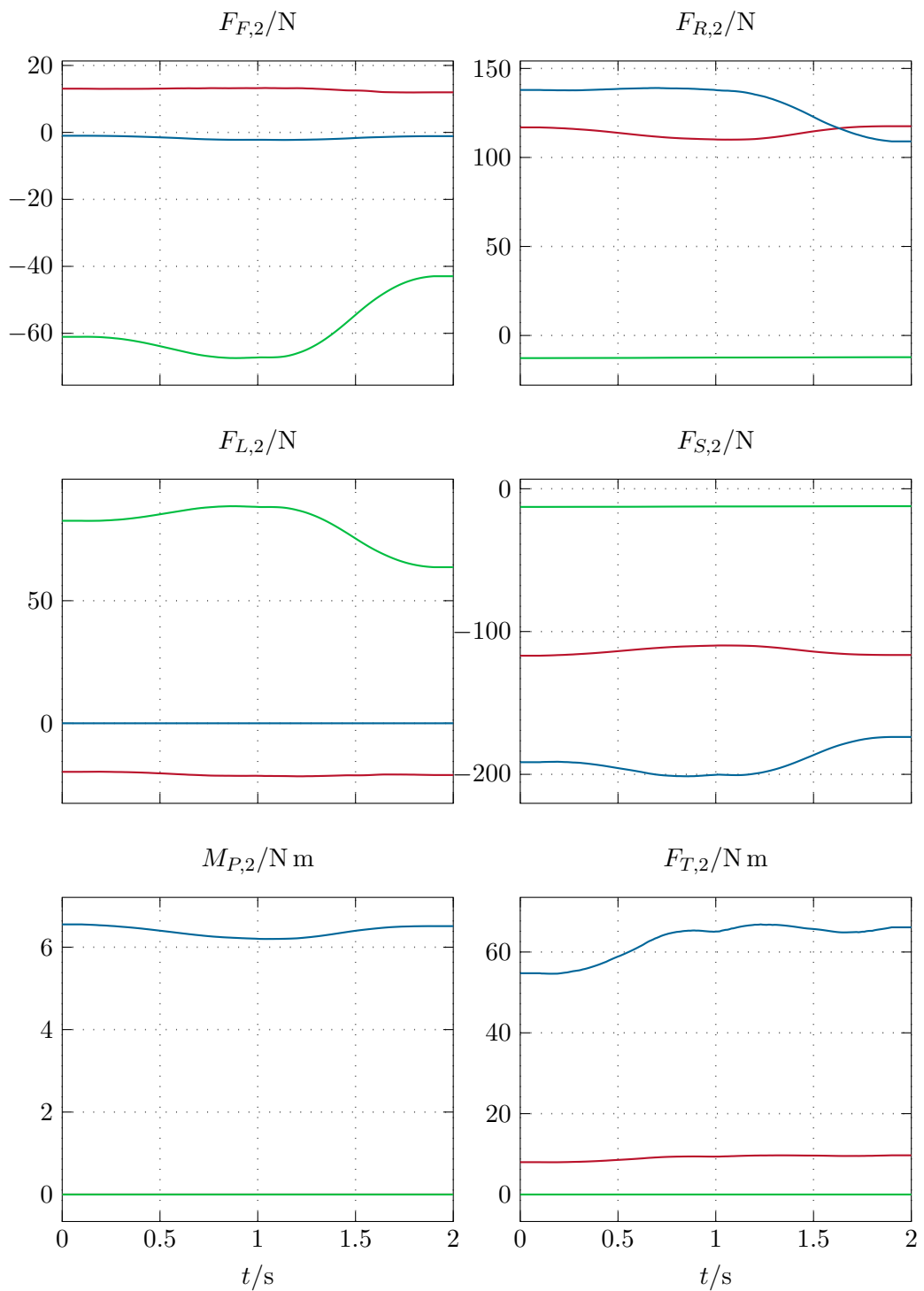


Abbildung B.4: Lagerkräfte Gelenk 2: Oberarm

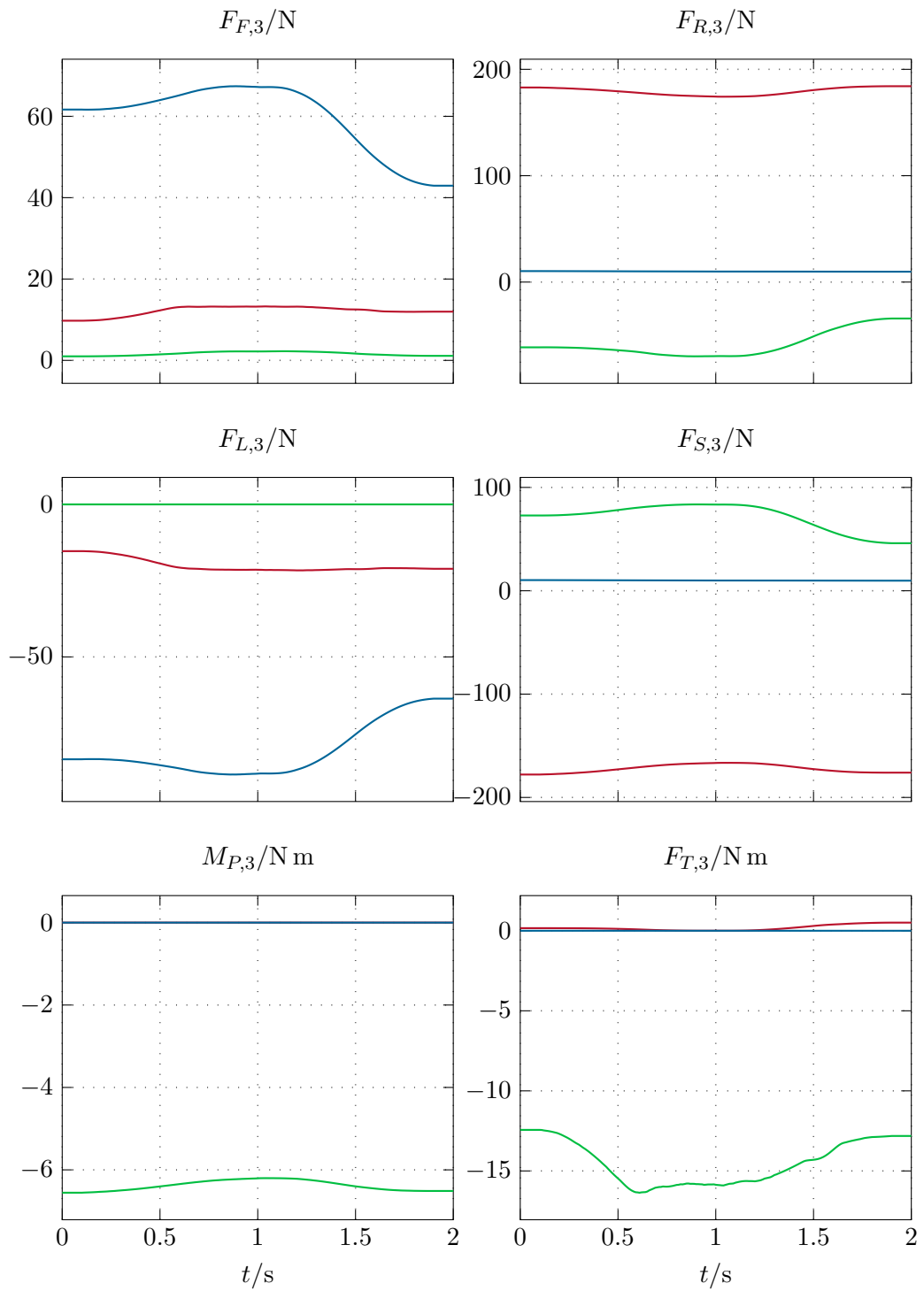


Abbildung B.5: Lagerkräfte Gelenk 3: Ellbogen

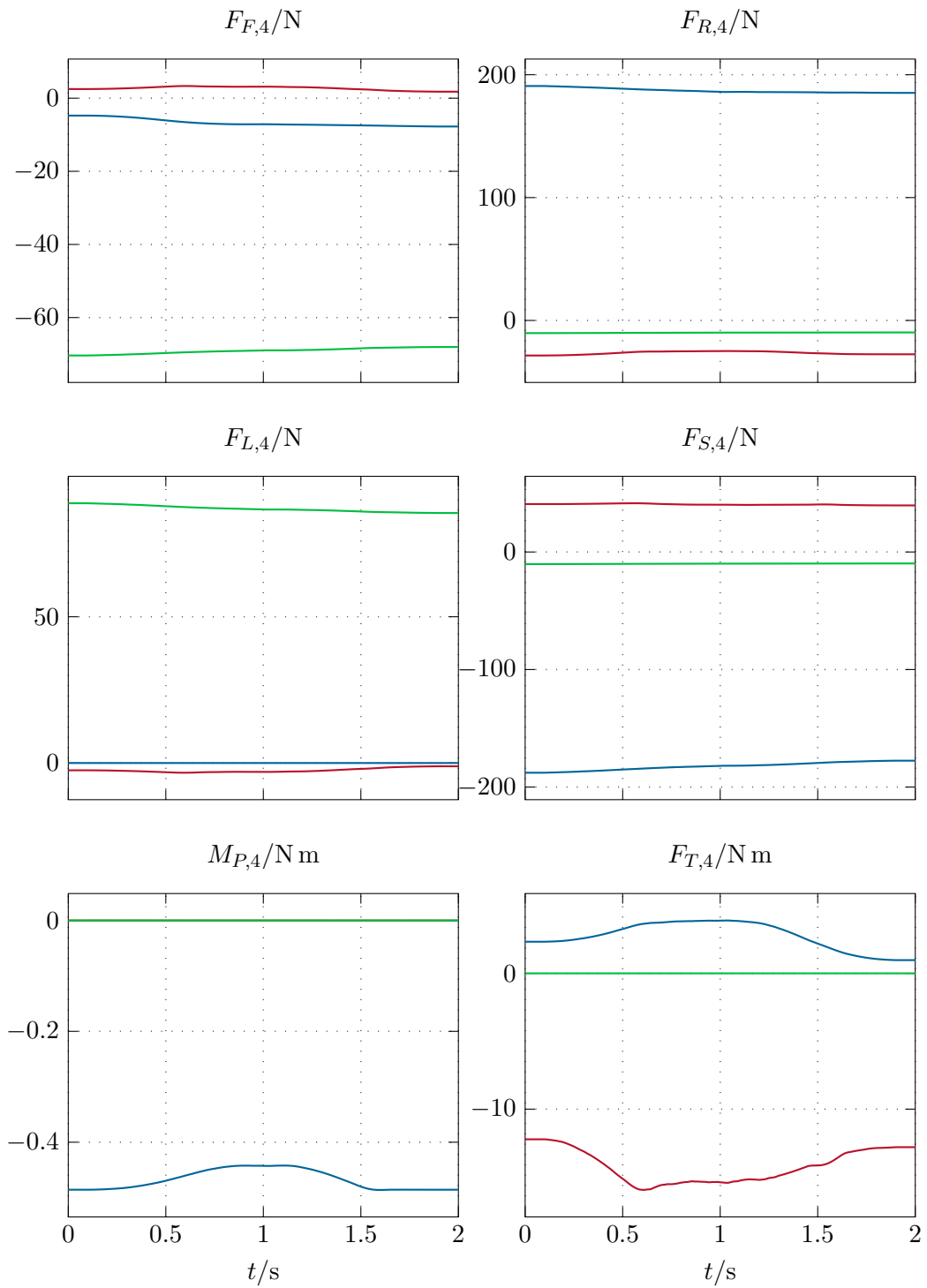


Abbildung B.6: Lagerkräfte Gelenk 4: Unterarm

B.2 Kühltür öffnen

B.2.1 Trajektorie

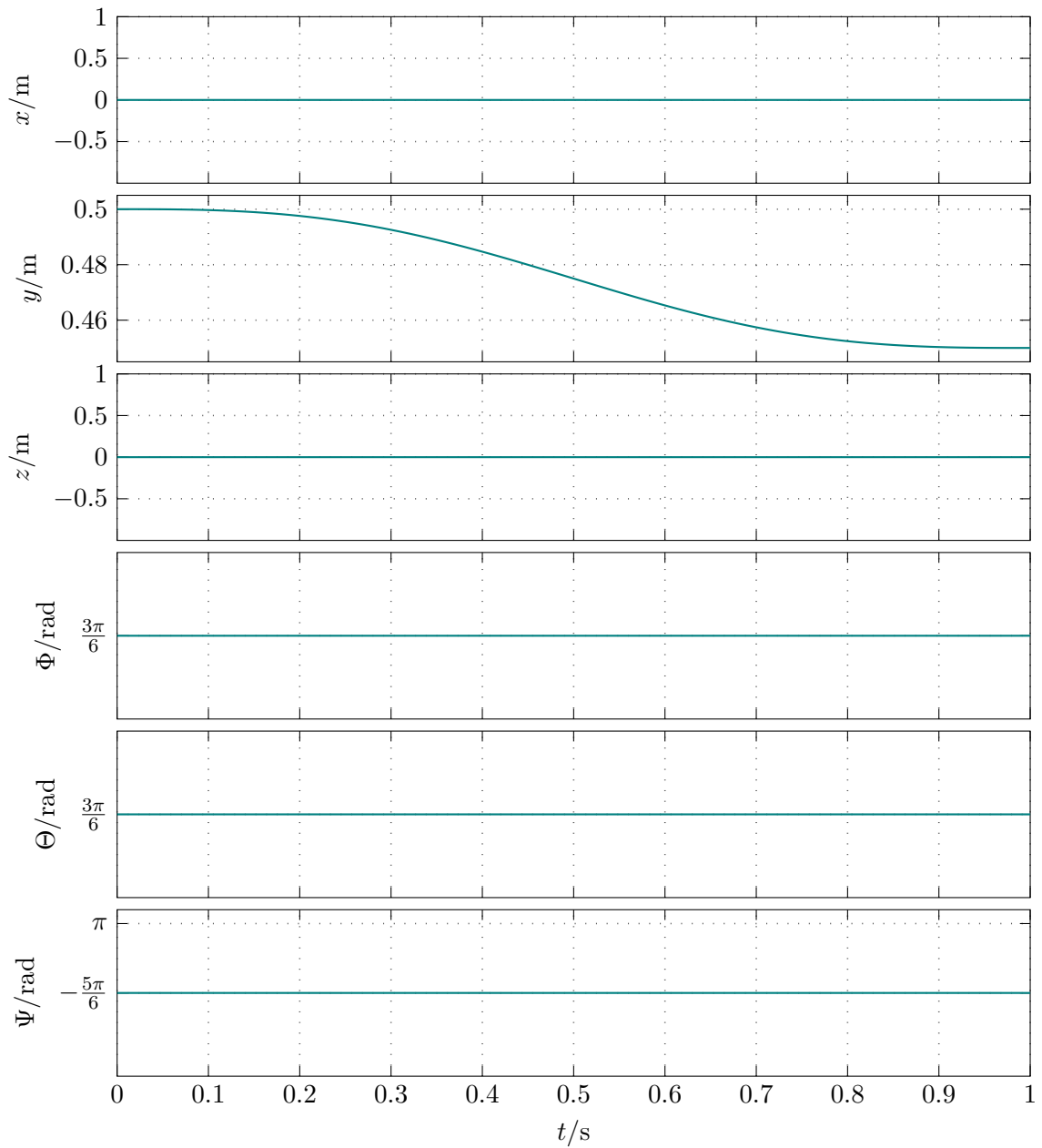


Abbildung B.7: Trajektorie im Arbeitsraum

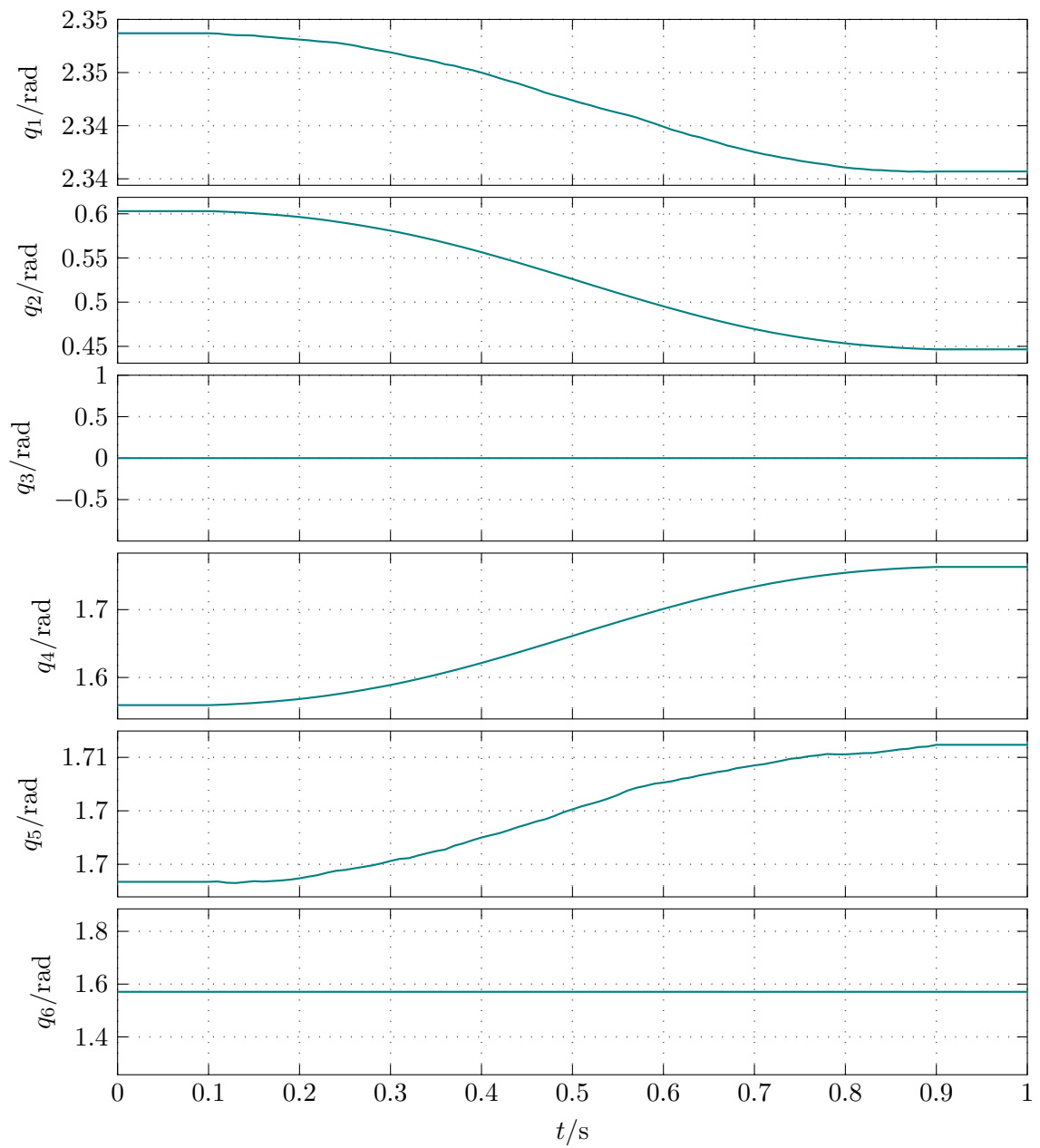


Abbildung B.8: Gelenkwinkel

B.2.2 Kräfte und Momente

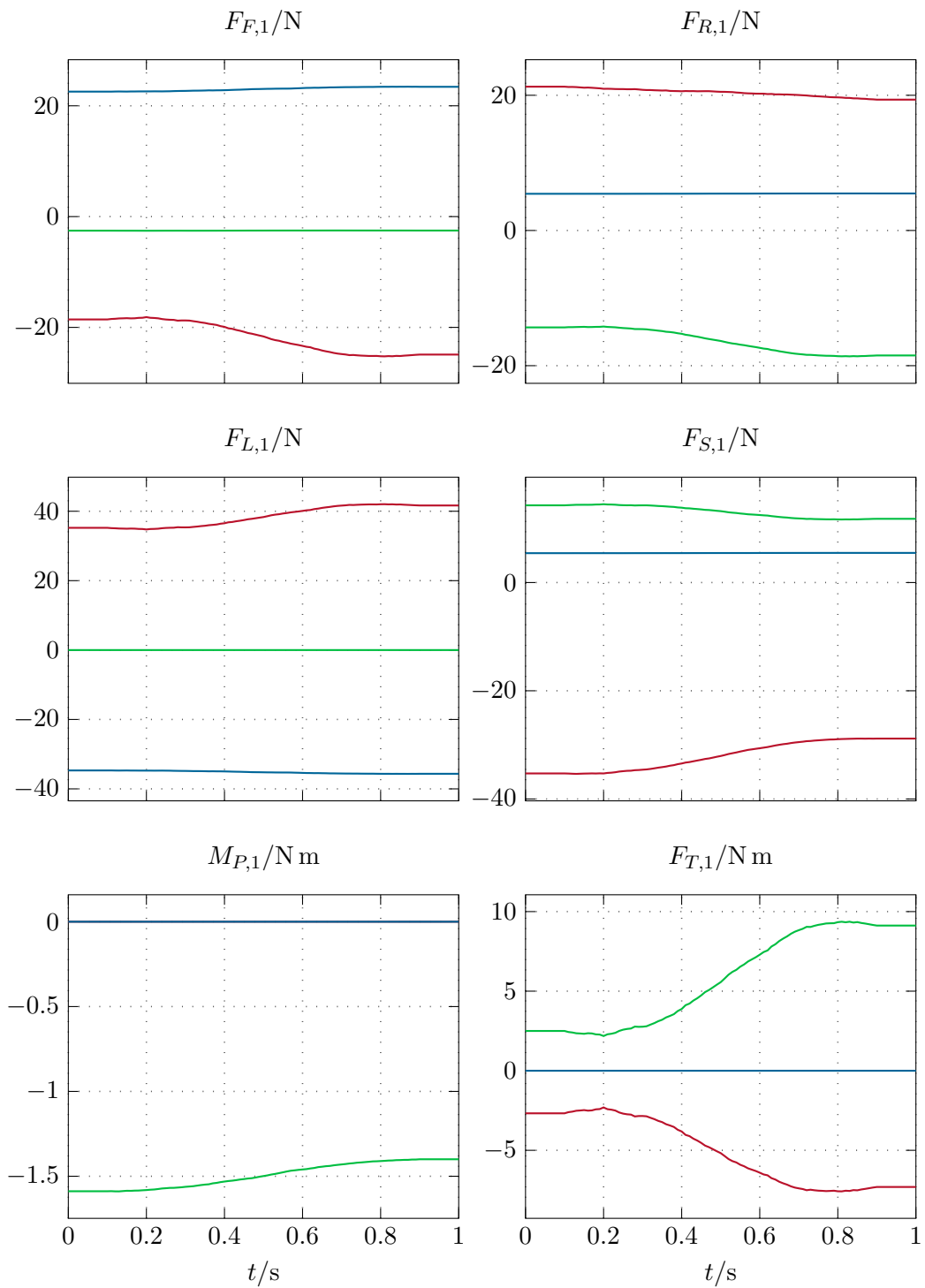


Abbildung B.9: Lagerkräfte Gelenk 1: Schulter

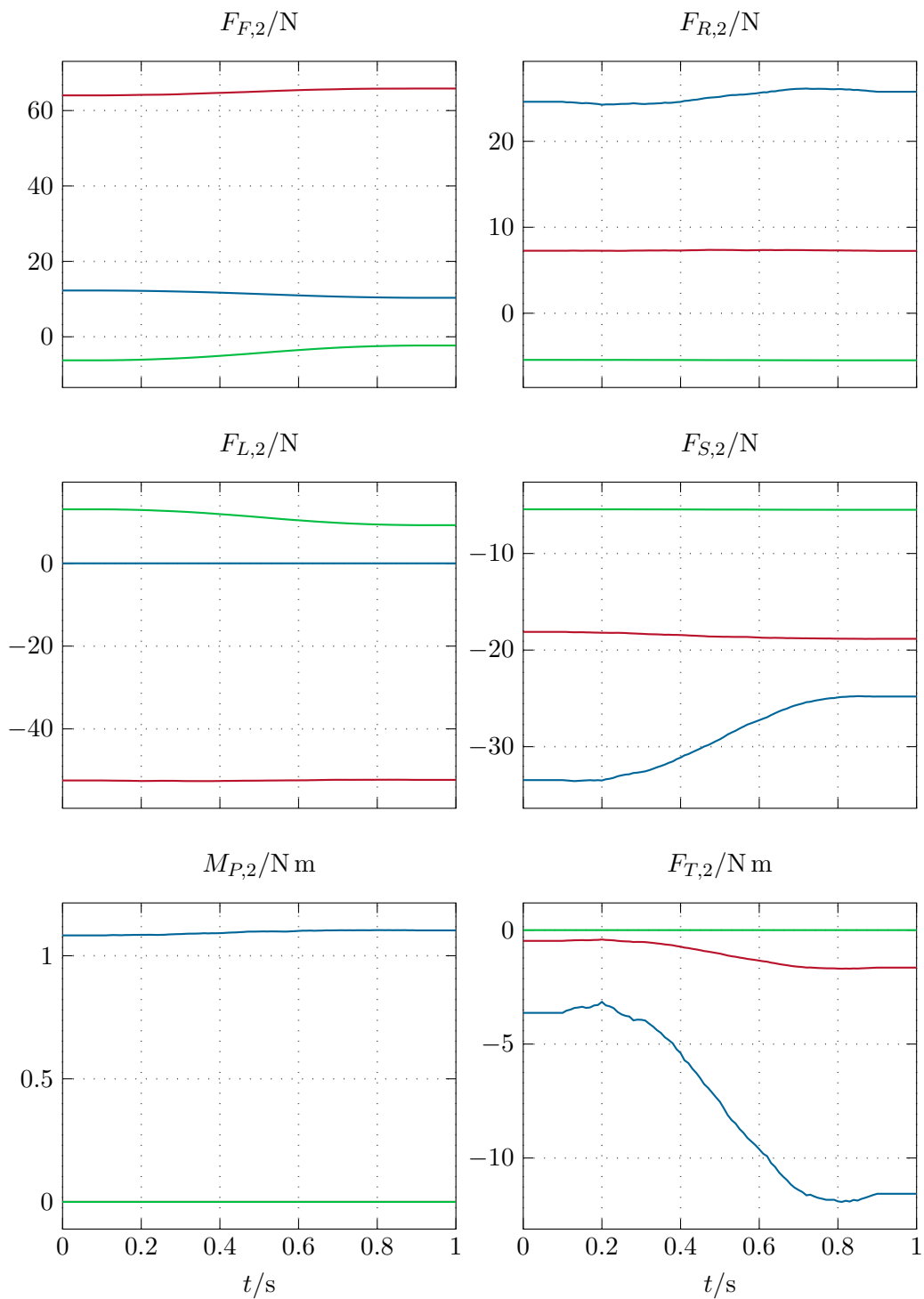


Abbildung B.10: Lagerkräfte Gelenk 2: Oberarm

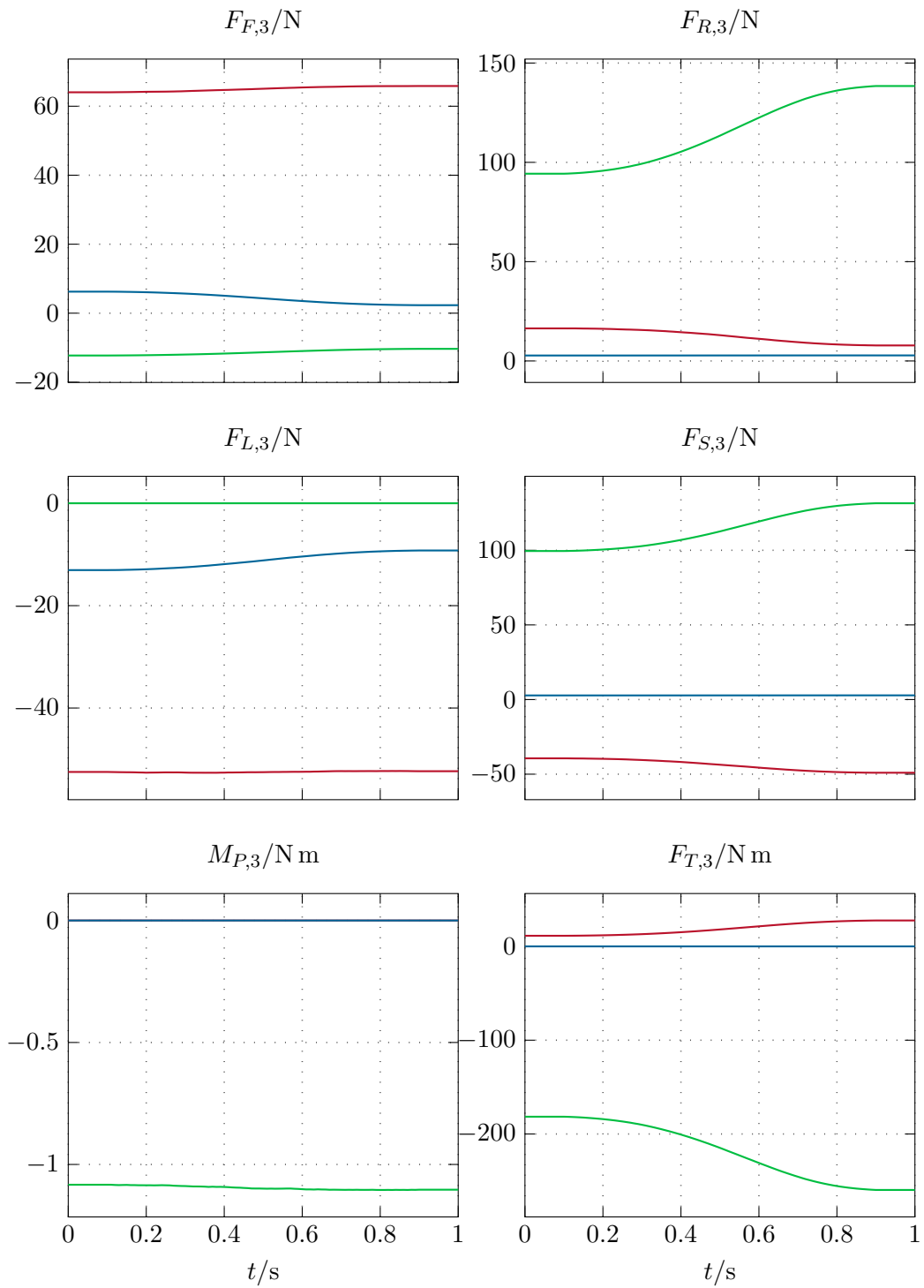


Abbildung B.11: Lagerkräfte Gelenk 3: Ellbogen

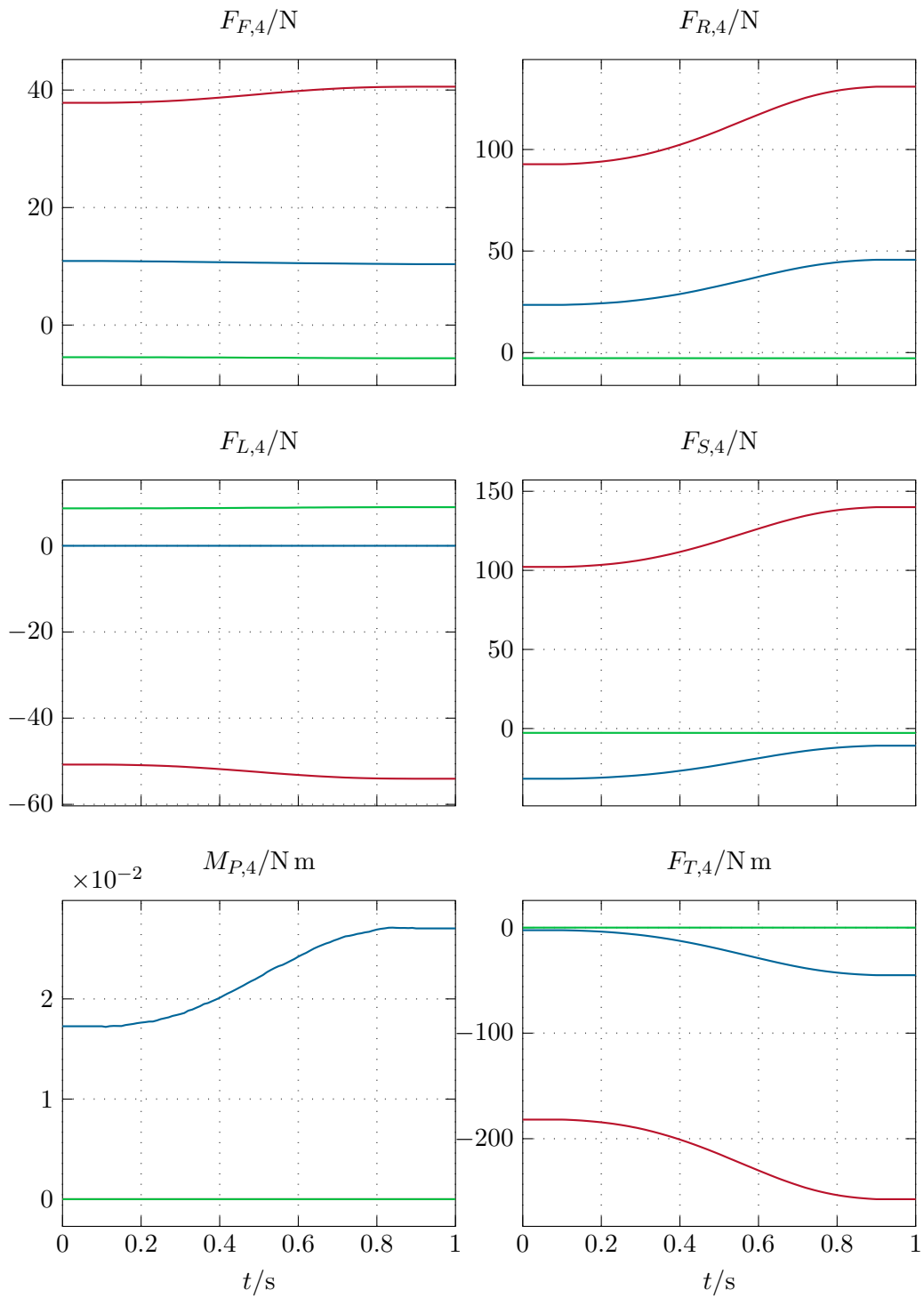


Abbildung B.12: Lagerkräfte Gelenk 4: Unterarm

B.3 Getränk nehmen

B.3.1 Trajektorie

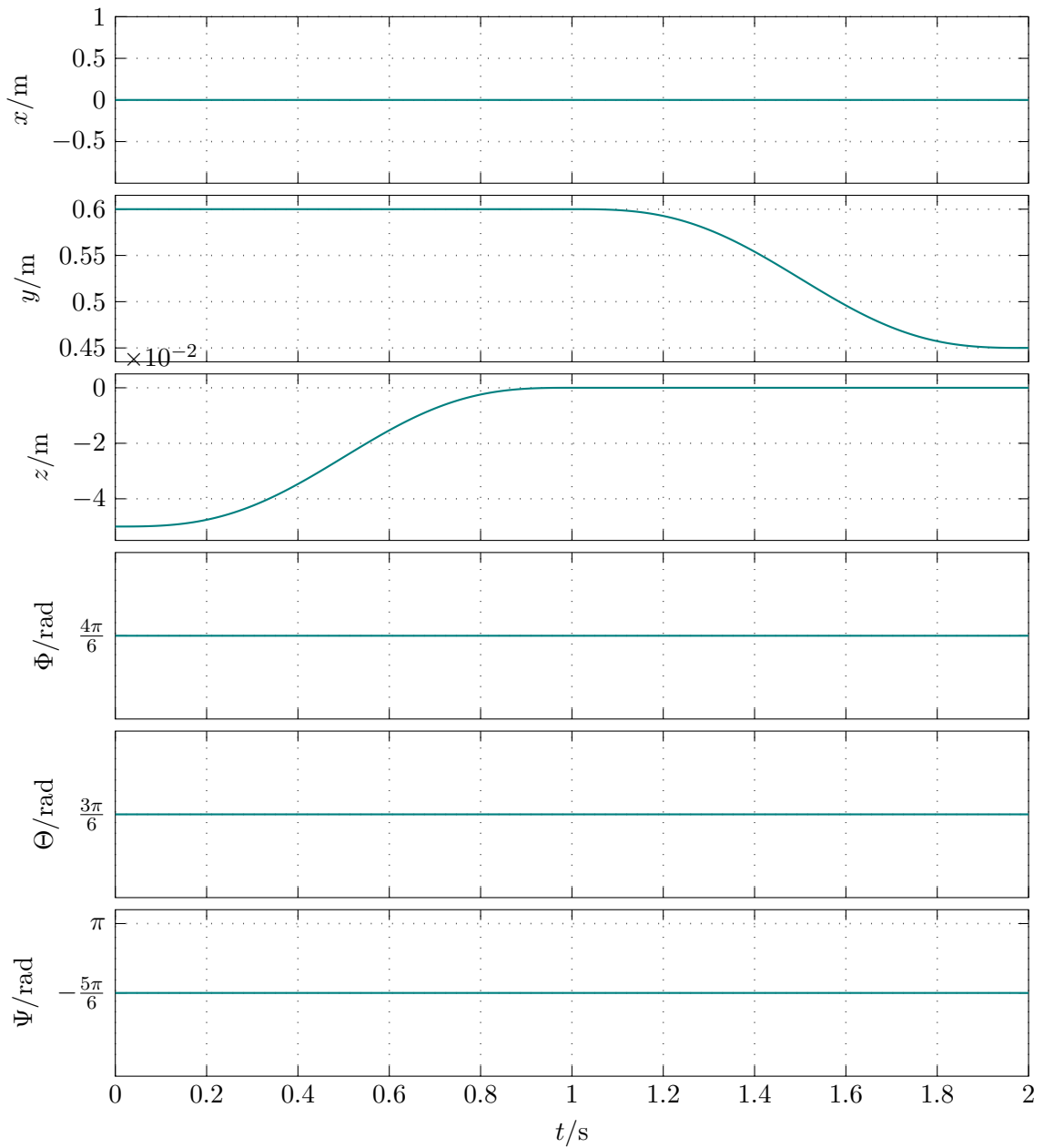


Abbildung B.13: Trajektorie im Arbeitsraum

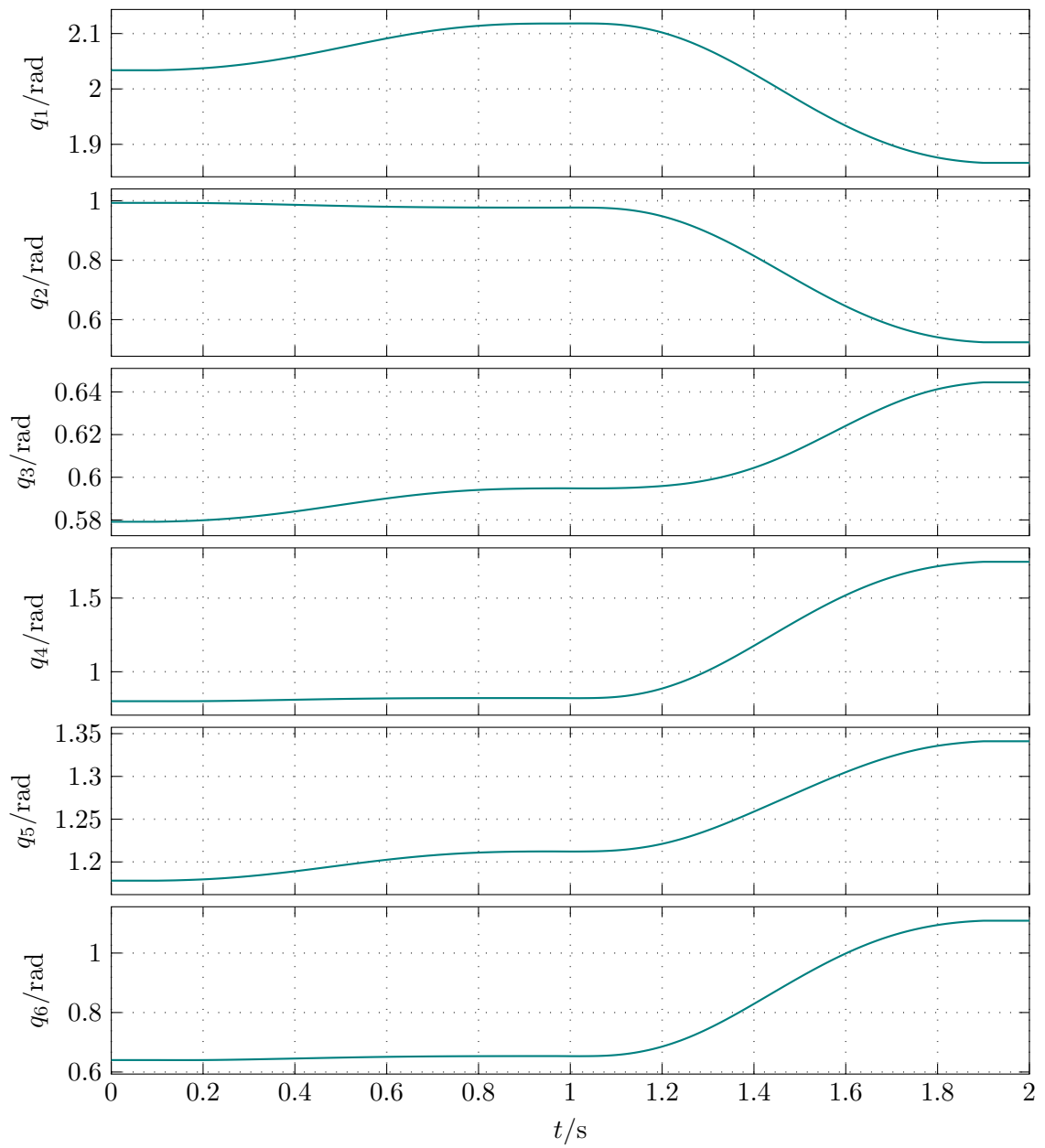


Abbildung B.14: Gelenkwinkel

B.3.2 Kräfte und Momente

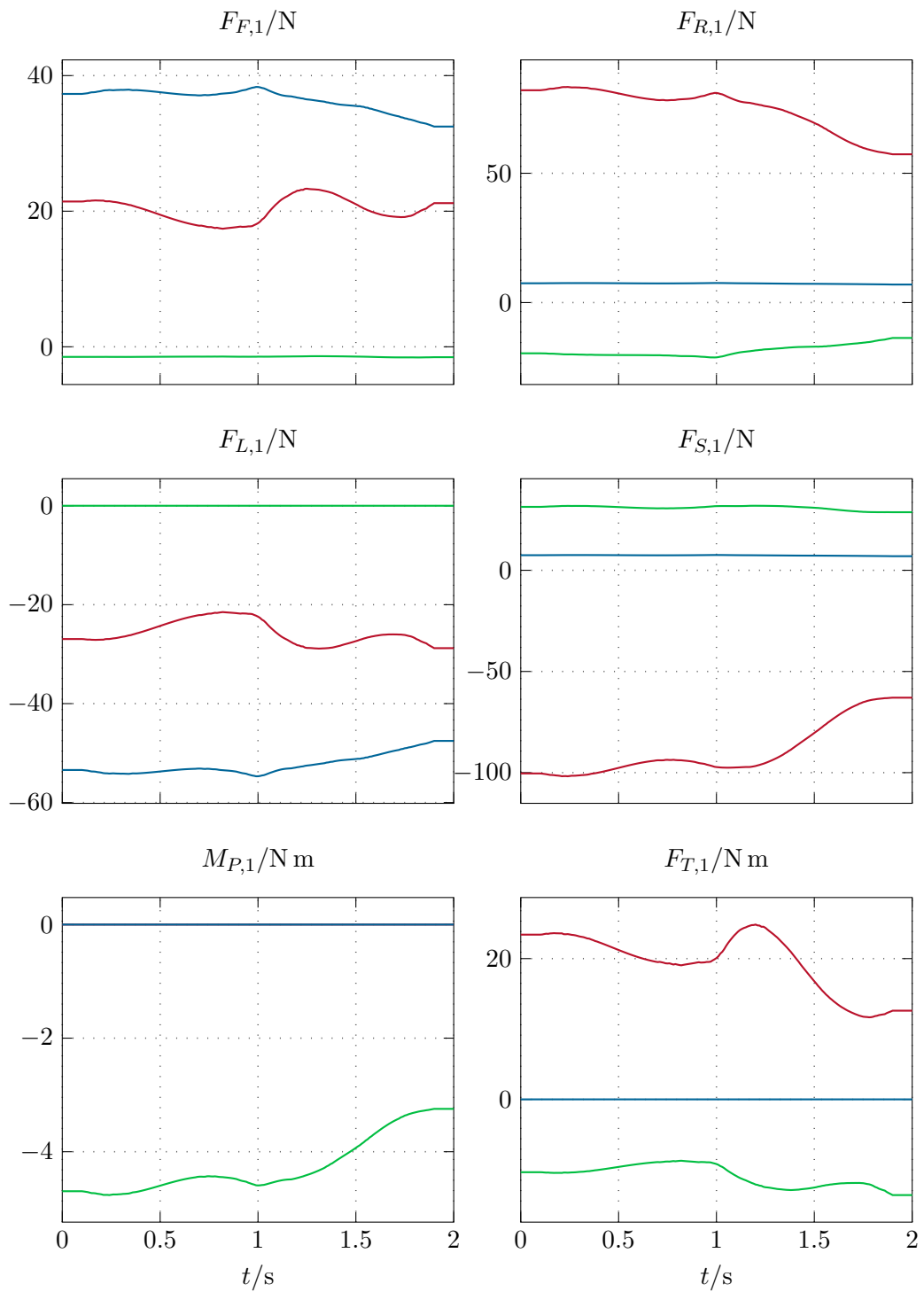


Abbildung B.15: Lagerkräfte Gelenk 1: Schulter

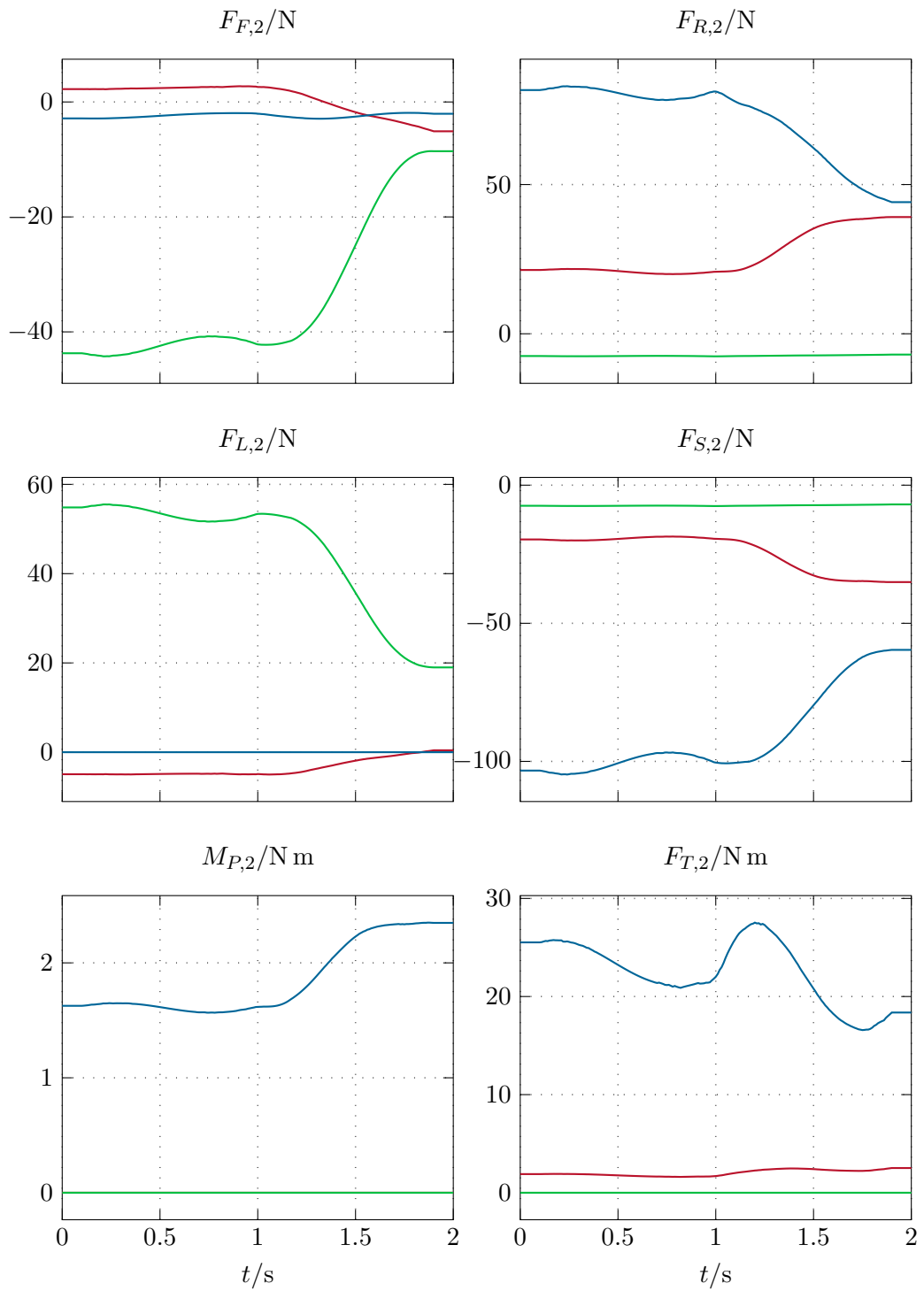


Abbildung B.16: Lagerkräfte Gelenk 2: Oberarm

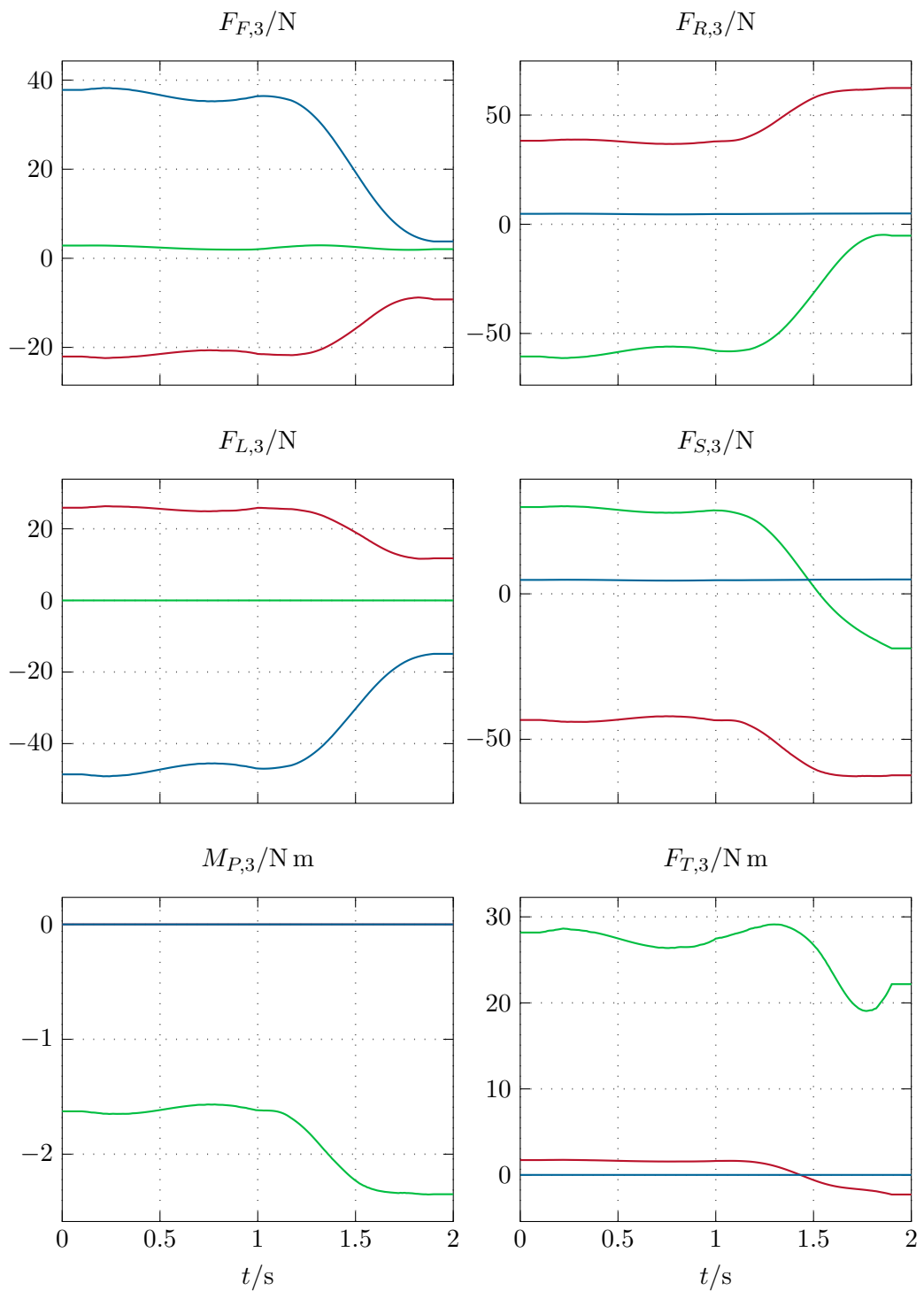


Abbildung B.17: Lagerkräfte Gelenk 3: Ellbogen

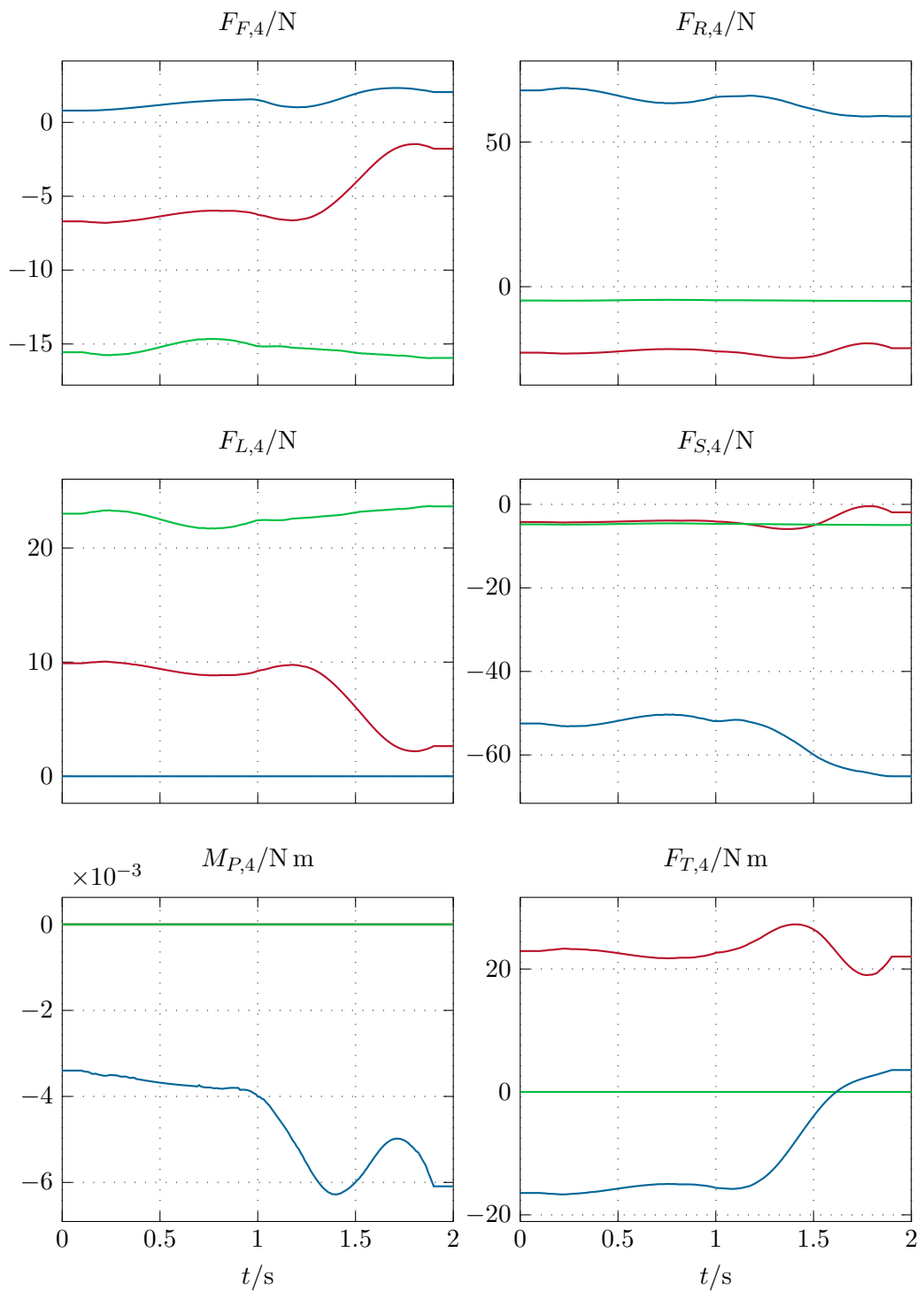


Abbildung B.18: Lagerkräfte Gelenk 4: Unterarm

B.4 Schiebetür öffnen

B.4.1 Trajektorie

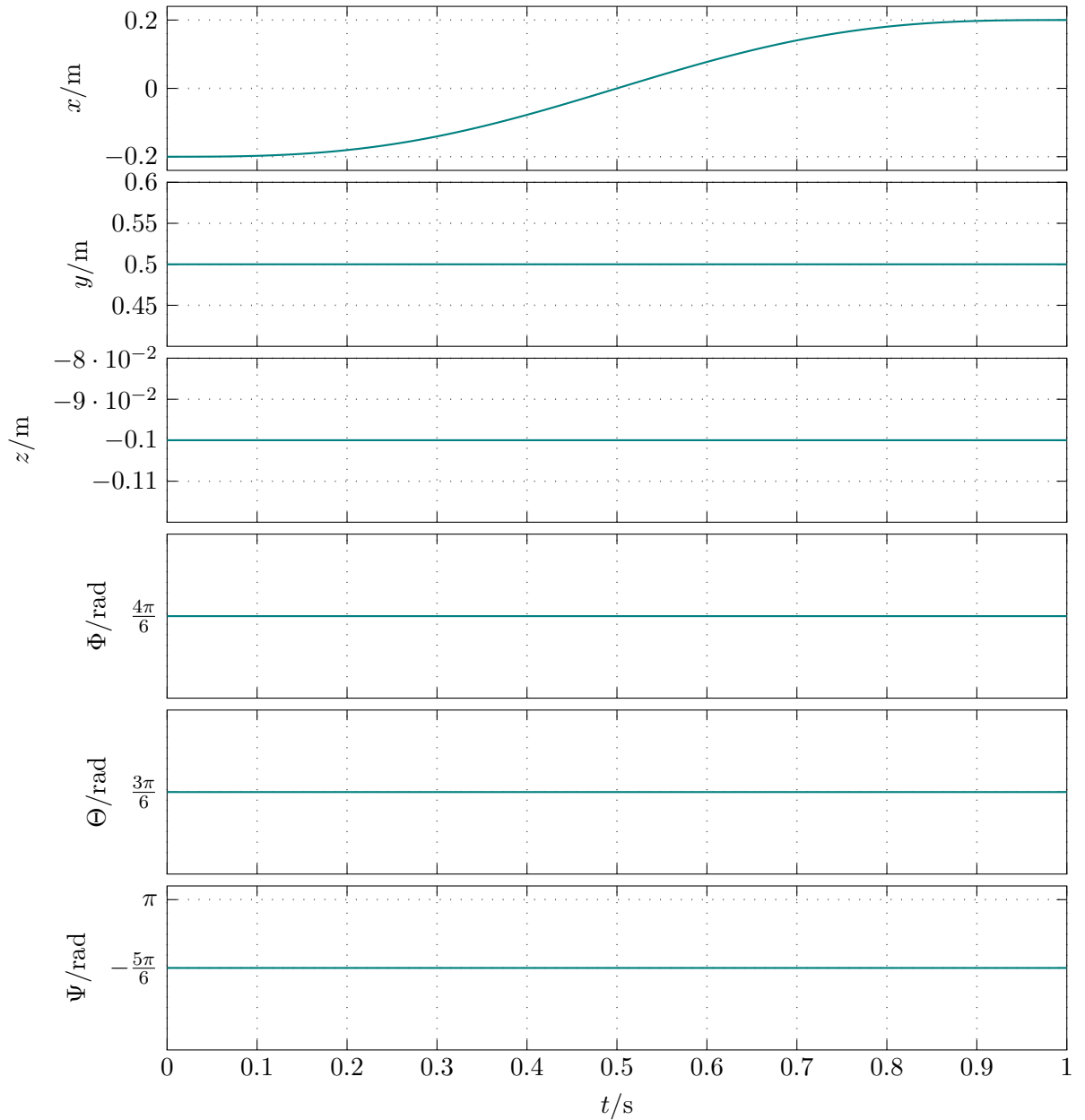


Abbildung B.19: Trajektorie im Arbeitsraum

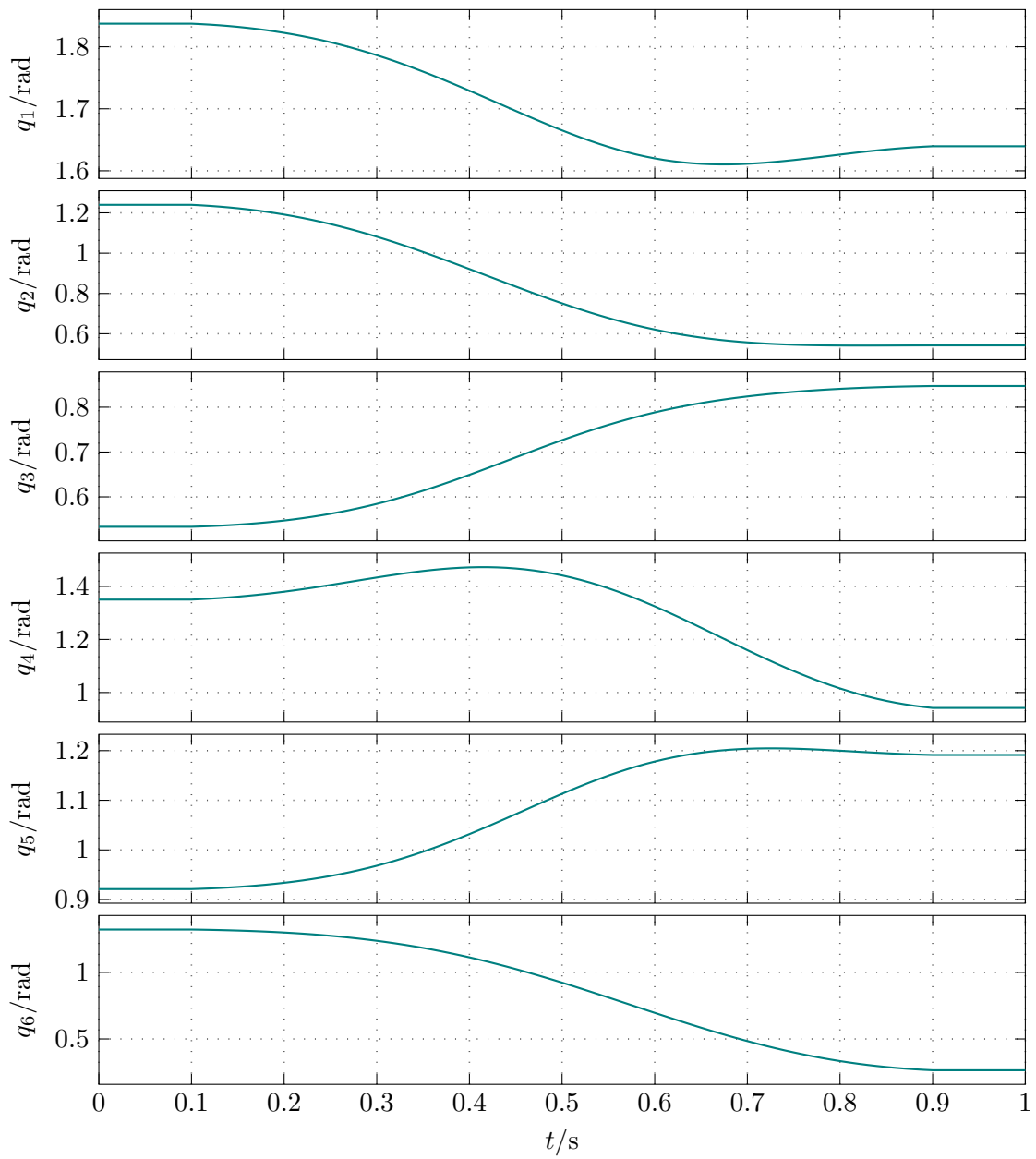


Abbildung B.20: Gelenkwinkel

B.4.2 Kräfte und Momente

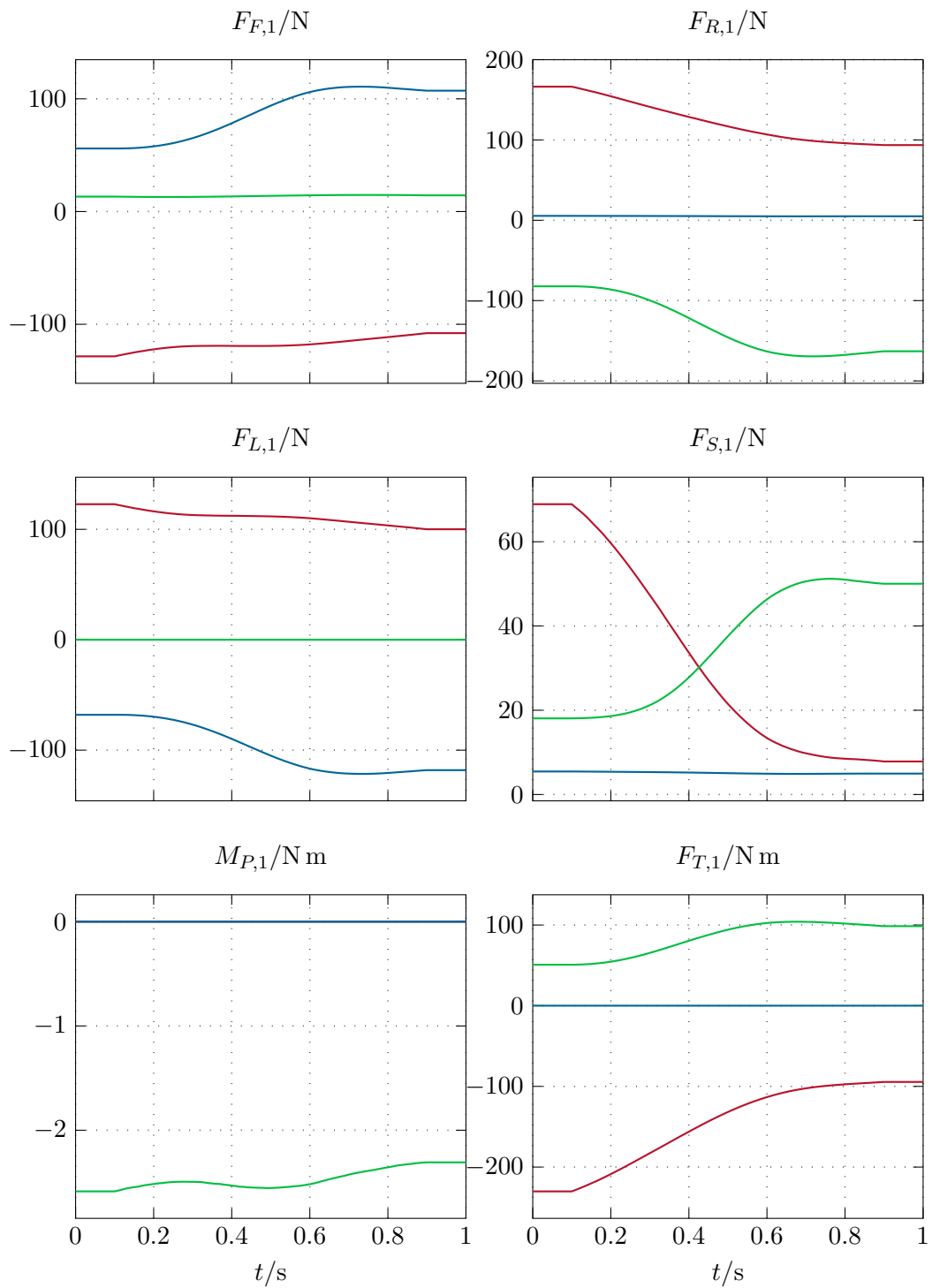


Abbildung B.21: Lagerkräfte Gelenk 1: Schulter

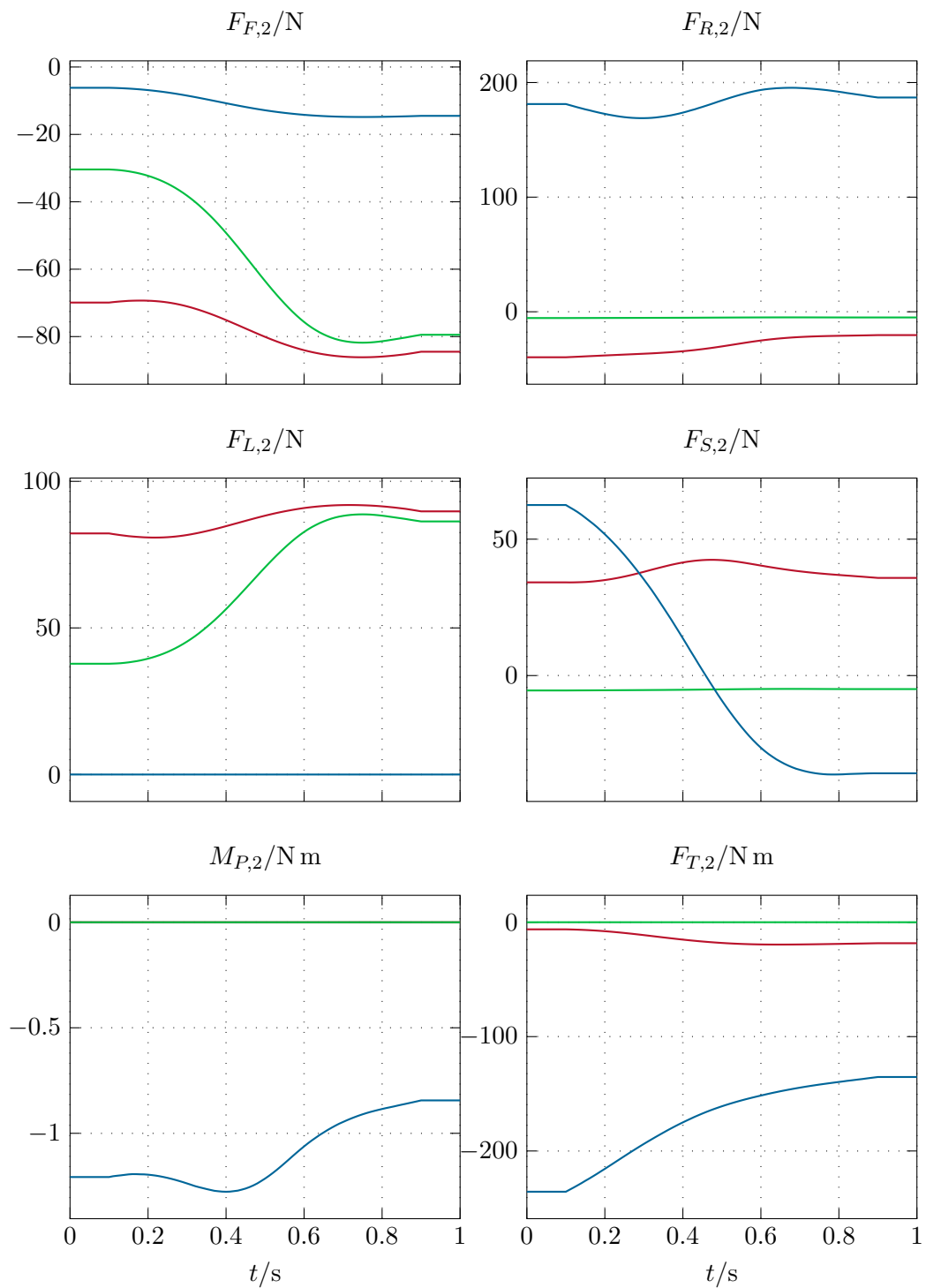


Abbildung B.22: Lagerkräfte Gelenk 2: Oberarm

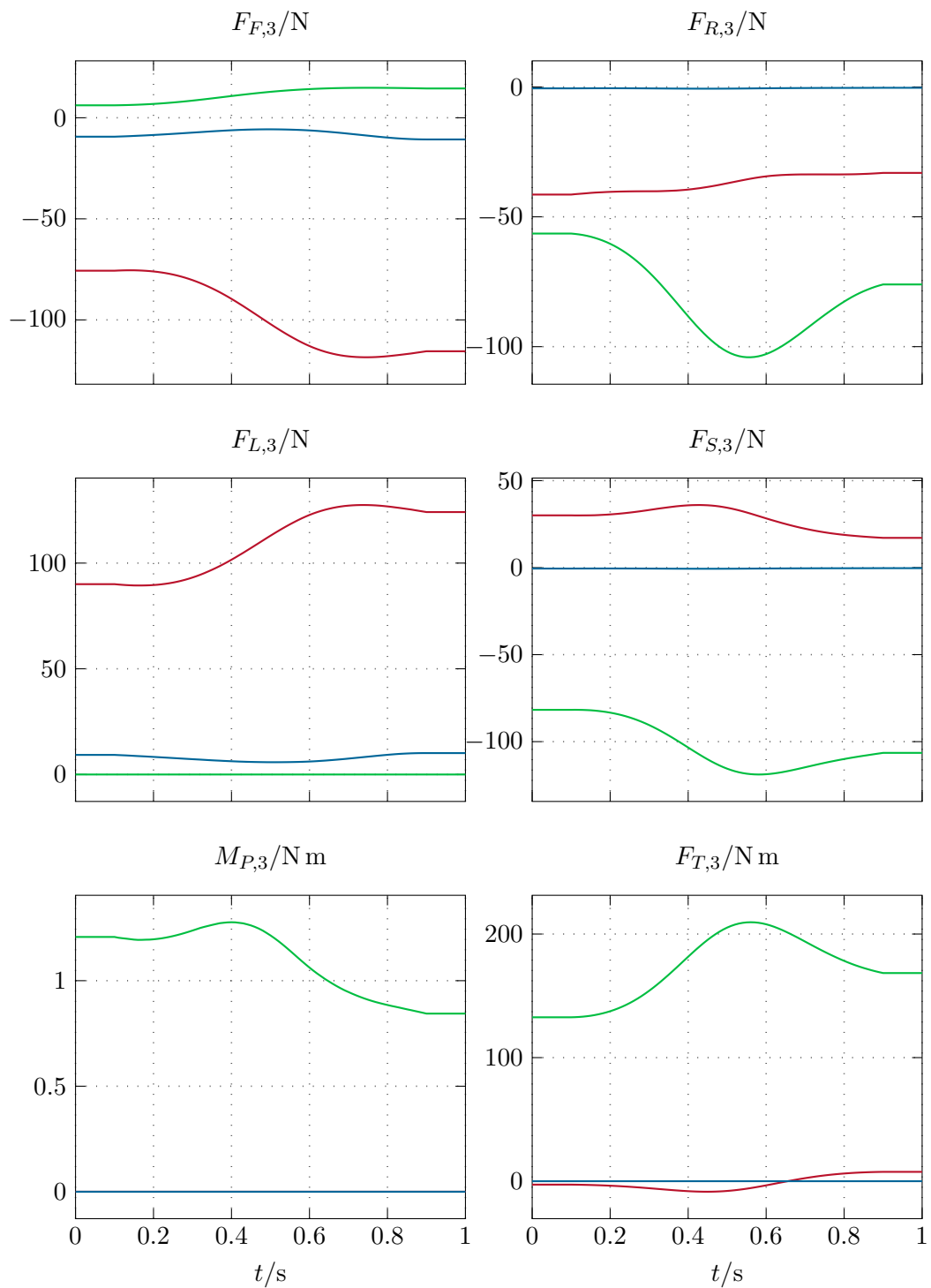


Abbildung B.23: Lagerkräfte Gelenk 3: Ellbogen

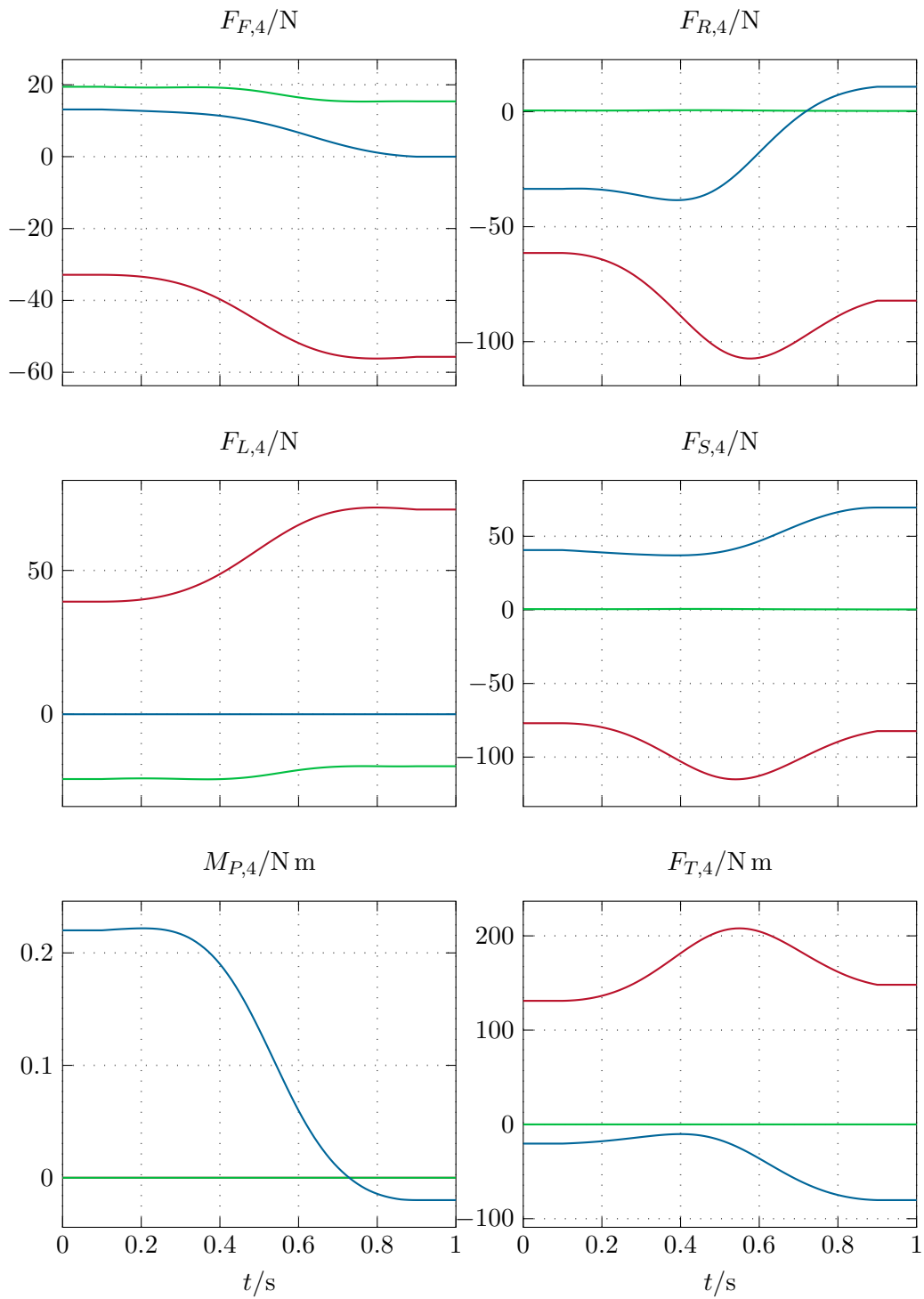


Abbildung B.24: Lagerkräfte Gelenk 4: Unterarm

Literatur

- [1] Honda Motor Co., Ltd. (2015). The Honda Humanoid Robot ASIMO, Adresse: <http://world.honda.com/ASIMO/> (besucht am 07. 11. 2015).
- [2] National Aeronautics and Space Administration. (2015). Robonaut, Adresse: <http://robonaut.jsc.nasa.gov/> (besucht am 07. 11. 2015).
- [3] Aldebaran Robotics S.A. (2015). Nao Robot, Adresse: <https://www.aldebaran.com/en/humanoid-robot/nao-robot/> (besucht am 07. 11. 2015).
- [4] —, (2015). Pepper Robot, Adresse: <https://www.aldebaran.com/en/a-robots/who-is-pepper> (besucht am 07. 11. 2015).
- [5] B. Dynamics. (2016). Boston Dynamics Atlas, Adresse: http://www.bostondynamics.com/robot_atlas.html (besucht am 24. 04. 2016).
- [6] P. I. Corke, *Robotics, vision and control; fundamental algorithms in MATLAB*, Corr. 2. print., Ser. Springer tracts in advanced robotics ; 73. Berlin [u.a.]: Springer, 2013.
- [7] K. S. Fu, R. C. Gonzalez und C. S. G. Lee, *Robotics; control, sensing, vision, and intelligence*, Ser. CAD-CAM, robotics, and computer vision. New York, NY [u.a.]: McGraw-Hill Book, 1987.
- [8] J. Mcbean und C. Breazeal, *Voice coil actuators for human-robot interaction*, USA.
- [9] H. [Roloff, W. [Matek, D. Muhs und H. Wittel, *Maschinenelemente; Roloff / Matek Maschinenelemente*, Bis 1999 als MBW u.d.T. Roloff / Matek : Maschinenelemente, Wiesbaden.
- [10] *DIN 32712-1:2009-03 Welle-Nabe-Verbindung – Polygonprofil P4C – Teil 1: Allgemeines und Geometrie*, Norm, März 2009.
- [11] *DIN EN 1906:2012-12 Schlösser und Baubeschläge – Türdrücker und Türknäufe – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 1906:2012*, Norm, Dezember 2012.
- [12] *DIN EN 1527:2013-03 Schlösser und Baubeschläge – Beschläge für Schiebetüren und Falttüren – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 1527:2013*, Norm, März 2013.
- [13] D. VDI-Wissensforum IWB, *Konstruieren mit Kunststoffen; [mit CD-ROM ; eine Sonderpublikation von Konstruktion, Fachteil Ingenieur-Werkstoffe]*, 4. Aufl. Düsseldorf: Springer-VDI-Verl., 2006.
- [14] W. Koehldorfer, *Finite-Elemente-Methoden mit CATIA V5; Berechnung von Bauteilen und Baugruppen in der Konstruktion*. München ; Wien: Hanser, 2004.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, 5. Juni 2016

Wolfgang Schönauer