

Rene NEURAUTER

Adaptiver Roboter mit dreieckiger Struktur (ARDS)

BACHELORARBEIT

verfasst im Rahmen des gemeinsamen Bachelorstudiums von
LFUI und UMIT – Joint Degree Programme

eingereicht an der

LEOPOLD-FRANZENS-UNIVERSITÄT INNSBRUCK
FAKULTÄT FÜR TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN



zur Erlangung des akademischen Grades

BACHELOR OF SCIENCE

Leiter der Lehrveranstaltung:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Gerstmayr

Institut für Mechatronik

Innsbruck, September 2017

Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Michael Pieber, Institut für Mechatronik

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Gerstmayr für die anregenden Diskussionen und die stets motivierenden Ratschläge im Zuge seiner Tätigkeit als Betreuer herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch meinem Mitbetreuer Dipl.-Ing. Michael Pieber für die tatkräftige Unterstützung in jedem Bereich meiner Bachelorarbeit, insbesondere für die unzähligen Stunden im Labor.

Weiters bedanke ich mich bei meinen Kommilitonen und Arbeitskollegen des Arbeitsbereichs Maschinenbau und Konstruktionstechnik für ihre Mithilfe.

Vergelt's Gott!

Kurzfassung

Schnell wechselnde Anforderungen und Einsatzgebiete an und für Roboter zeigen den Bedarf neuer Ansätze auf. Eine Lösung bildet ein adaptiver modularer Roboter. Durch Hinzufügen oder Entfernen einzelner Module kann ein solches System angepasst werden. Weiters ist mit Modulen, welche ihre Form ändern können, eine individuelle Formgebung möglich. Eine Reaktion auf externe Einflüsse ist durch eine programmierbare Nachgiebigkeit möglich. Aktive Verbindungsmechanismen zwischen den einzelnen Modulen ersparen manuelle Assemblierung und bieten die Möglichkeit einer Automatisierung.

Um ein Modul aus seiner Grundposition in eine weitere freie Position zu bringen, werden mehrere Dreiecksmodule aufgebaut. Zudem werden ein aktiver Anbindungsmechanismus zum Verbinden und Trennen einzelner Module und eine Kraftsensorik zur Realisierung einer programmierbaren Nachgiebigkeit entwickelt.

Das ausgearbeitete und aufgebaute Konzept basiert auf einem adaptiven Roboter mit dreieckiger Grundstruktur (ARDS). Durch den Einsatz neuester 3D-Druck-Technik wurden mehrere Dreiecksmodule aufgebaut.

Ein Kraftsensor auf Basis einer optischen Wegmessung, aktive Anbindungen, die mittels eines Elektromagneten einen Mechanismus zum Öffnen und Schließen in Bewegung setzen, sowie Scherengelenke, mit dem Ziel einen definierten Drehpunkt zu erhalten, werden in dieser Arbeit beschrieben.

Mit der Realisierung eines adaptiven modularen Roboters mit exakten Knotenpunkten und den erhaltenen Ergebnissen dieses Aufbaus legt ARDS den Grundstein für eine programmierbare Materie. Ferner ist ARDS die weltweit erste Entwicklung und Umsetzung eines ebenen selbst-rekonfigurierbaren adaptiven modularen Roboters, dessen vollständige Funktion auch im Versuch gezeigt werden konnte.

Abstract

The fields of application for robots are growing fast and the requirements on robots are getting more complex. This trend raises the need for new approaches in robotics. One solution to many problems is an adaptive modular robot. By adding or removing single modules it is possible to adapt the size and complexity of the system. With shape-changing modules it is also possible to modify the form of a given system. The response to external influences on the robot is given by programmable compliance. Active connection-mechanisms between single modules spare the need of manual assembling and offer the possibility of automation.

Multiple modules are able to change the overall topology of the system by moving a module from its basic position to another. In order to demonstrate this capability of a modular system several individual modules are needed. Also an active connection-mechanism to link and separate single modules and force-sensors to realize a programmable compliance are designed.

The finalized and constructed concept is based on an adaptive robot with triangular structure (ARDS). By using the latest 3D printing technology it is possible to realize the constructional requirements. A newly developed powersensor based on optical distance measurement, active connections which use electric magnets to open and close, as well as spherical joint mechanisms form the final solution are presented. With the results of the structure, ARDS goes one step further to a fully programmable matter.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	1
2	Stand der Forschung	3
2.1	Modulare Roboter	3
2.2	Gelenksmechanismen	4
2.3	Anbindungsmechanismen	5
3	Konzeption und konstruktive Realisierung	7
3.1	Scherengelenke	8
3.1.1	Grundlagen	8
3.1.2	Auslegung	10
3.1.3	Konstruktion	13
3.2	Nachgiebigkeit	17
3.2.1	Funktionsprinzip	17
3.2.2	Konstruktion	18
3.3	Aktive Anbindung	21
3.3.1	Konstruktion	21
3.3.2	Verbindungs - Modi	22
3.4	Peripherie	23
4	Elektronik	26
4.1	Sensor - Platine	26
4.1.1	Schaltung	28
4.2	Aktuator - Platine	29
4.2.1	Schaltung	30
4.3	Haupt-Platine	31
4.4	Erarbeitung eines Kraft-Spannungs-Polynoms	32
4.5	Korrektur der Nichtlinearität der Aktuatoren	35
5	Ergebnisse und Auswertung	38
5.1	Ansteuerung eines Elements	38
5.2	Nachgiebigkeit	40
5.3	Umordnung von ARDS	43
6	Zusammenfassung & Ausblick	47

7 Anhang	49
Literaturverzeichnis	58

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird die Motivation zur Entwicklung eines adaptiven Roboters mit dreieckiger Struktur (ARDS) erläutert. Ferner wird das Ziel dieser Arbeit und daraus resultierende Punkte definiert.

Zunächst werden in Kapitel 2 aktuelle Forschungsergebnisse in den Bereichen Modularer Roboter, Gelenks- und Verbindungsmechanismen untersucht. Kapitel 3 und 4 beschreiben die Vorgehensweise zur Erarbeitung der in Kapitel 5 präsentierten Ergebnisse. Abschließend werden die Lösungen in Kapitel 6 zusammengefasst und ein Ausblick auf noch folgende Arbeiten gegeben.

1.1 Motivation

Die Nachfrage nach vielseitig einsetzbaren Robotern wächst stetig. Während Industrieroboter meist nur für einzelne Tätigkeiten ausgelegt werden, sind es vor allem rekonfigurierbare Roboter die sich wechselnden Anforderungen anpassen können. Werden mehrere Module solcher Roboter zu einer größeren Struktur aufgebaut, ist es möglich beliebige Formen für verschiedenste Einsatzgebiete zu realisieren. Da der Aufbau der einzelnen Module identisch ist, können bestehende Strukturen erweitert oder verkleinert, sowie defekte Module ausgetauscht werden.

Einen weiteren Punkt im Zusammenhang mit der Anpassbarkeit von Robotern an ihre Umgebung bildet die Nachgiebigkeit. Gibt ein Roboter bei Wirken einer Last über einem definierten Schwellwert aktiv nach, kann er beispielsweise bewusst geformt werden oder sich an die Form seiner Umgebung anpassen. Zusätzlich können Überlastungen und damit einhergehende Beschädigungen vermieden werden.

Die Kombination eines modularen rekonfigurierbaren Roboters und einer integrierten Kraftmessung zur Realisierung einer Nachgiebigkeit sowie ein aktiver Mechanismus zur Verbindung einzelner Module bilden den Kern dieser Arbeit.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Konzipierung und Konstruktion eines adaptiven modularen Roboters mit Dreiecksstruktur (ARDS) zum Aufbau beliebiger zweidimensionaler Strukturen.

- Der Roboter soll verschiedene ebene Gestalten annehmen und seine Topologie ändern können. Durch den Zusammenschluss mehrerer Module soll es möglich sein, ein Dreieck aus seiner Grundposition in eine weitere freie Position zu bringen. Diese Umordnung wird schematisch in Abb. 1.1 dargestellt.
- Weiters soll der Roboter bei extern einwirkenden Kräften eine programmierbare Nachgiebigkeit aufweisen.
- Zusätzlich soll ein aktiver Schließ- bzw. Öffnungsmechanismus implementiert werden, welcher das Verbinden einzelner Module automatisiert und somit keine manuelle Assemblierung mehr nötig ist.

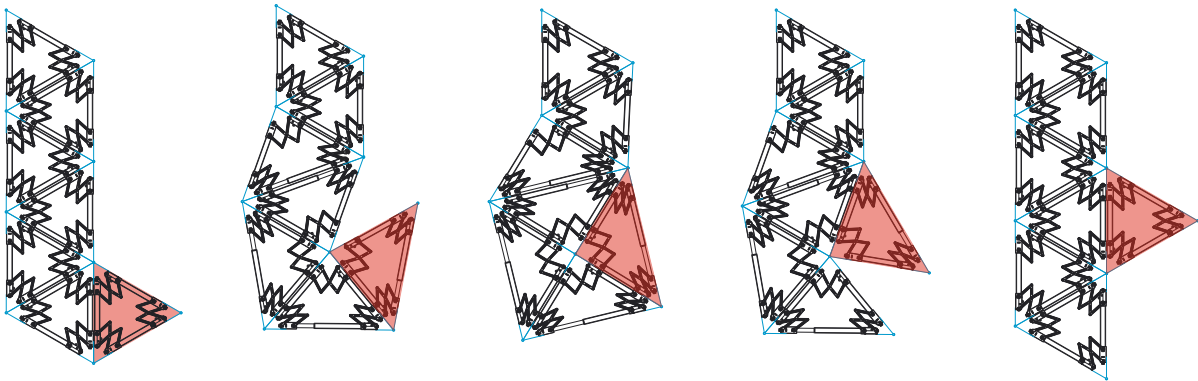


Abbildung 1.1: Umordnung eines Moduls von ARDS am Beispiel von sieben adaptiven dreieckigen Elementen.

2 Stand der Forschung

Dieses Kapitel behandelt den aktuellen Stand der Forschung im Bereich modularer Roboter (MR). Ausgehend vom bestehenden dreidimensionalen System „Adaptiver Roboter mit tetraedischer Struktur“ (ARTS) [15], [6], [16] werden weitere dreidimensionale MR betrachtet. Im Anschluss wird zur Vereinfachung der tetraedischen Struktur ein zweidimensionales System gezeigt. Darauf folgt ein Überblick über die Möglichkeiten der Verbindungsmechanismen.

2.1 Modulare Roboter

MR können sich zu größeren Strukturen mit unterschiedlichen Formen aufbauen. Die Funktionsweise eines solchen Aufbaus wird v.a. durch die Geometrie der einzelnen Robotermodule bestimmt. Die Mehrheit der bestehenden Systeme verwendet Quader mit einer quadratischen Grundfläche wie EM-Cubes [4] oder M-Blocks [17] als Grundstruktur oder Tetraeder mit einer dreieckigen Grundfläche wie Odin [13] oder ARTS [15], siehe Abb. 2.1 und 2.2.

Da jeder Quader in vier oder mehr Tetraeder aufgeteilt werden kann, lassen Letztere genauere Strukturen zu. Weiters bildet ein Tetraeder die einfachste räumliche geometrische Grundform, welche beliebige (lineare) Deformationen ausführen kann; weshalb diese im Folgenden näher betrachtet werden.

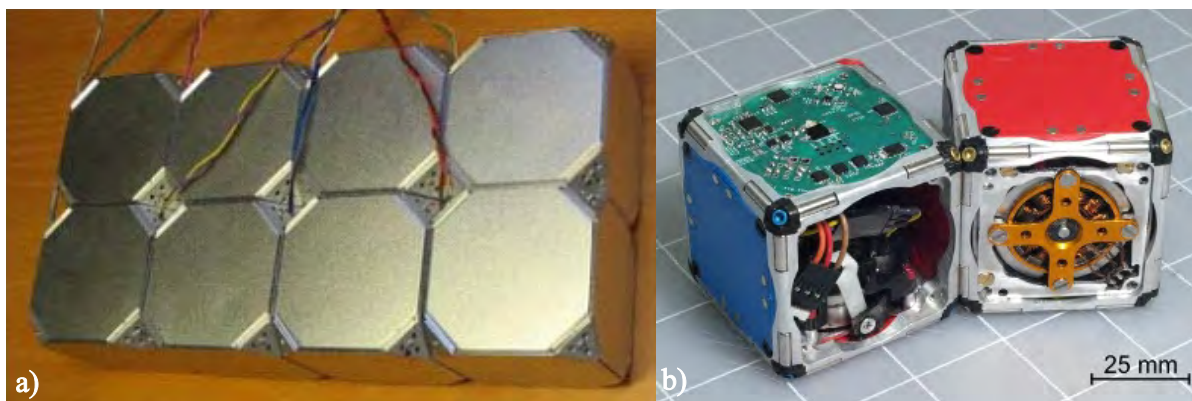


Abbildung 2.1: Modulare Roboter mit quadratischer Grundfläche - a) EM-Cubes [4]; b) M-Blocks [17].

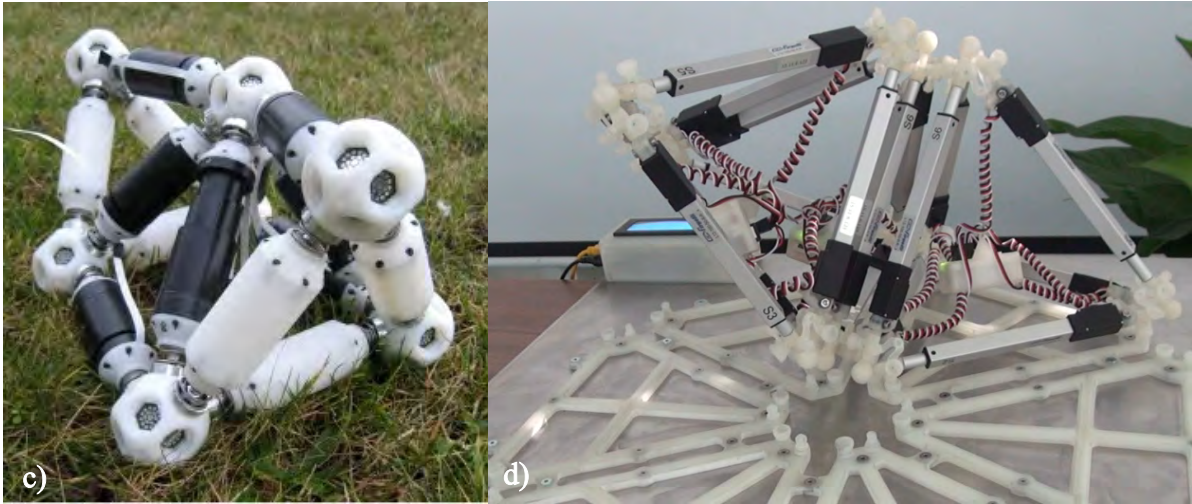


Abbildung 2.2: Modulare Roboter mit dreieckiger Grundfläche - c) Odin [13]; d) ARTS [15].

Eine Besonderheit von Odin und ARTS ist die Adaptierbarkeit durch in der Länge änderbare Seitenkanten. Einen wesentlichen Unterschied der beiden Konzepte zeigt die Assemblierbarkeit. Während Odin manuell assembliert werden muss, ist ARTS in der Lage seine Topologie eigenständig zu ändern. Durch eine integrierte Stromversorgung und einen Microcontroller können einzelne Module von ARTS, im Gegensatz zu Odin, unabhängig voneinander agieren. Die Kommunikation der einzelnen Module funktioniert über Funk.

Eine detaillierte Aufzählung von über 90 verschiedenen MR zeigt, dass keiner dieser Roboter, ausgenommen ARTS, die Form seiner Module ändern, sowie eine Umordnung von Modulen realisieren kann [3].

2.2 Gelenksmechanismen

Im Unterschied zu MR wie EM-Cubes oder M-Blocks können modulare rekonfigurierbare Roboter wie ARTS oder Odin ihre Topologie ändern. Diese Formänderung setzt voraus, dass die Eckpunkte der einzelnen Module drehbar gelagert oder flexibel sind. Unterschiede zeigen sich in der Realisierung einer exakten Geometrie. Zum Beispiel kann die Nachahmung eines FE-Netzes durch MR mit verschiedenen Gelenkskonzepten nur ansatzweise erreicht werden.

Odin verwendet flexible Seitenkanten, um Topologieänderungen zuzulassen. Mit dieser Lösung können zwar größere Strukturen aufgebaut, deren Geometrie aber nur bedingt bestimmt werden.

Einen weiteren Lösungsansatz, um ein FE-Netz nachzuahmen, verfolgt ARTS mit der

Realisierung von Drehpunkten durch Kugelgelenke und durch Verbindung der einzelnen Elemente an den Seteinfächen der Tetraeder. Um jedoch exakte Knotenpunkte und Seitenkanten ähnlich des FE-Netzes zu erhalten, müssten sich die Anbindungspunkte innerhalb der Seitenflächen befinden und mit Hilfe eines Mechanismus verschieben können. Somit lassen sich auch hiermit keine exakten Geometrien realisieren.

Mit der Verwendung von Scherengelenken, ähnlich derer von Tetrobot [8] in Abb. 2.3, kann ein Drehpunkt außerhalb der Geometrie eines Moduls erzeugt werden. Dadurch ist es möglich, Elemente in ein FE-Netz einzubetten. Der Drehpunkt der einzelnen Module fiele dann mit den Knotenpunkten des Netzes zusammen.

Um exakte Knotenpunkte und Kanten zu erhalten, werden Scherengelenke für die Verwendung an ARDS adaptiert.

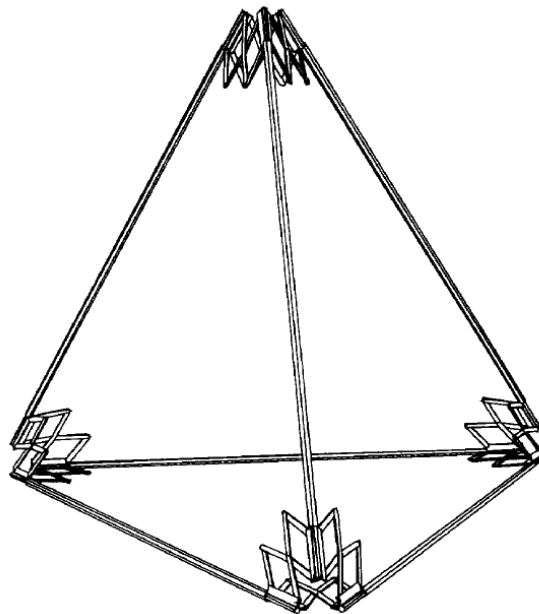


Abbildung 2.3: Skizze von Tetrobot, einem tetraedischen Roboter mit Scherengelenken [8].

2.3 Anbindungsmechanismen

Ein weiterer Bestandteil jedes MR sind Anbindungsmechanismen. Sowohl passive als auch aktive Methoden wurden hierfür entwickelt und verwendet. Es folgt ein kurzer Überblick:

Der zweidimensionale Roboter Programmable Parts nutzt Permanentmagnete, um eine Anbindung zwischen einzelnen Modulen zu schaffen. Weitere Lösungen zeigen Solder Cu-

bes [14] (Lötverbindung), Vacuubes [5] (Vacuum), Claytronics [9] (Elektromagnetismus), Molecubes [19] (Mechanische Anbindung) in Abb. 2.4 und Abb. 2.5.

Der für ARDS gewählte Anbindungsmechanismus verbindet die Vorteile einer mechanischen und elektromagnetischen Anbindung durch eine elektromagnetisch aktivierbare Mechanik.

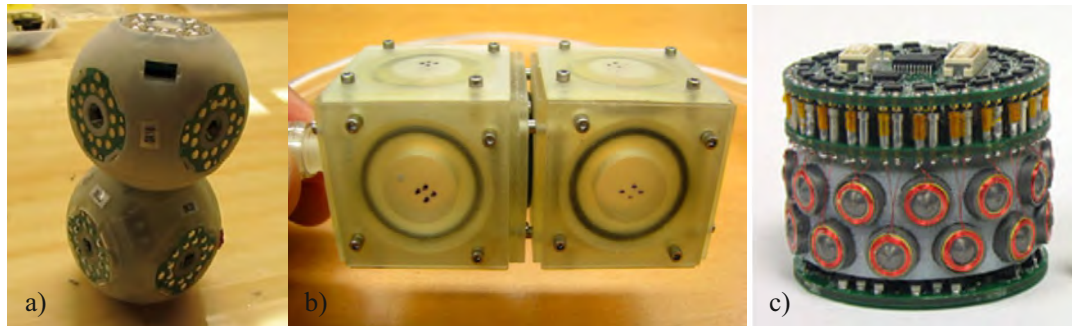


Abbildung 2.4: Anbindungsmechanismen - a) Solder Cubes [14] (Lötverbindung); b) Vacuubes [5] (Vacuum); c) Claytronics [9] (Elektromagnetismus).

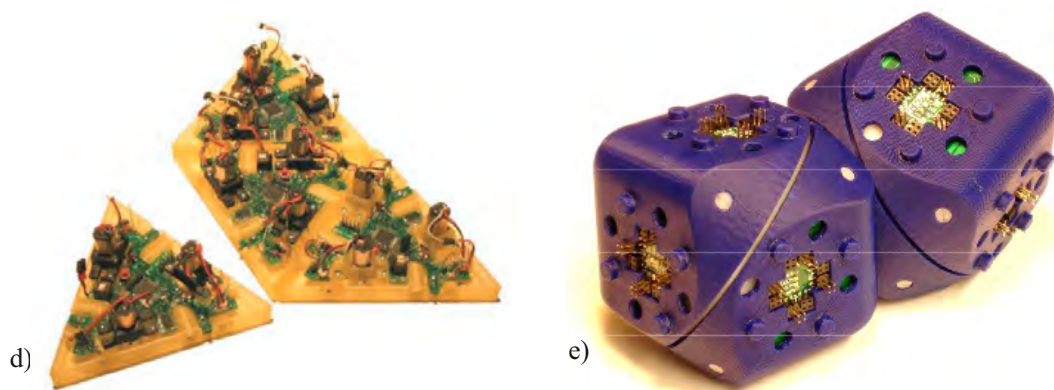


Abbildung 2.5: Anbindungsmechanismen - d) Programmable Parts [9] (Permanentmagneten); e) Molecubes [19] (Mechanische Anbindung).

3 Konzeption und konstruktive Realisierung

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Entwicklung von ARDS beschrieben. Angefangen mit der Auslegung der Geometrie der Scherengelenke in Abschnitt 3.1 über die Konstruktion und Entwicklung eines Mechanismus zur Nachgiebigkeit in Abschnitt 3.2 bis hin zu einer aktiven Anbindung in Abschnitt 3.3. Weitere, periphere Komponenten werden in Abschnitt 3.4 beschrieben.

Zu Anfang jedes Abschnitts werden theoretische Grundlagen oder entwickelte Funktionsprinzipien erklärt. Mit diesen werden dann die Komponenten ausgelegt und konstruiert. Hergestellt werden alle Komponenten nach Rapid Prototyping Vorbild mit einem ProJet 3510 HD MJP-3D-Drucker [1]. Das verwendete Material lautet: VisiJet M3 Navy [1].

Um einen Überblick des Gesamtsystems zu erlangen, werden in Abb. 3.1 die einzelnen Komponenten und deren Funktion gezeigt und in Abb. 3.2 deren Platzierung dargestellt.

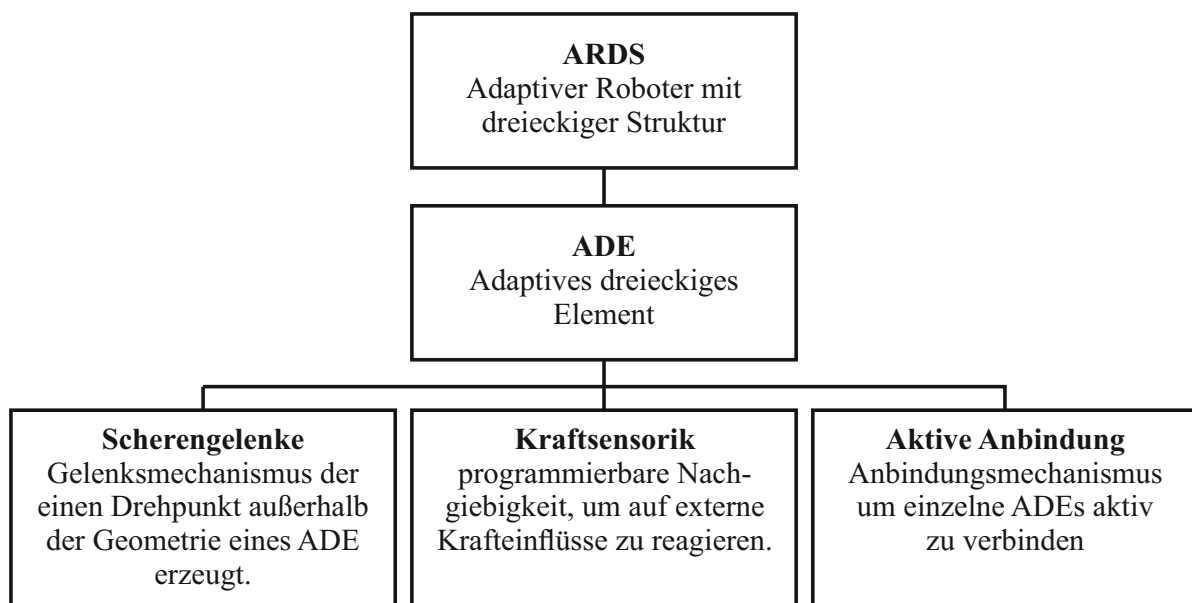


Abbildung 3.1: Überblick über das Gesamtsystem ARDS.

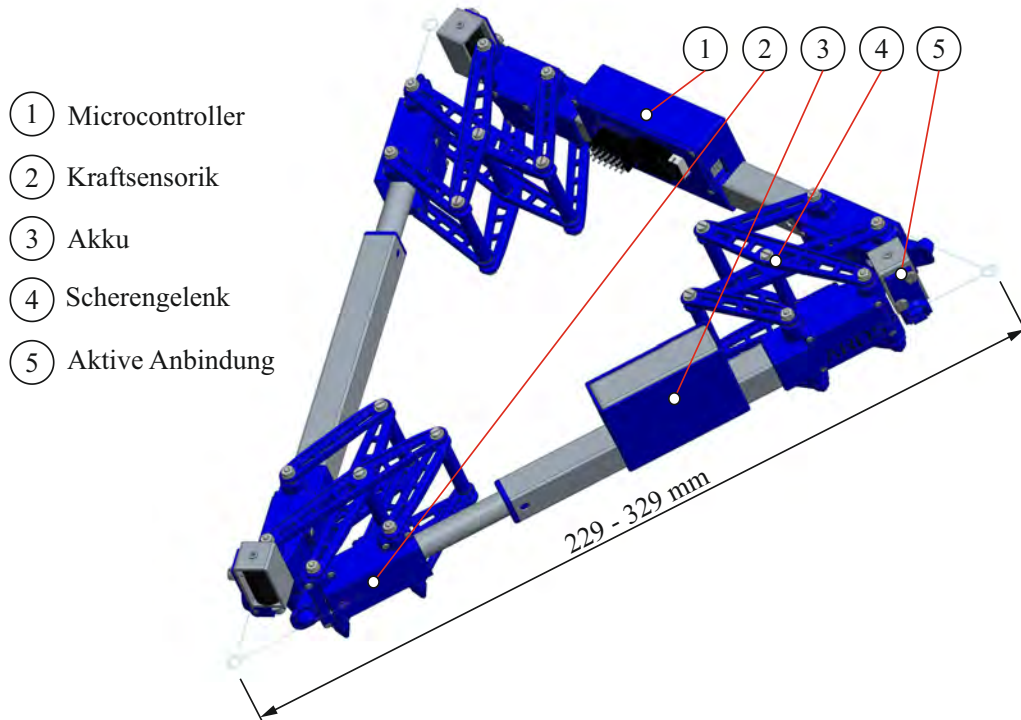


Abbildung 3.2: Aufbau eines adaptiven dreieckigen Elements (ADE).

3.1 Scherengelenke

Die aktuelle Lösung von ARTS lässt aufgrund des Anbindungsmechanismus in Kombination mit Kugelgelenken keine exakten Geometrien zu [15]. Zuzufolge der endlich großen Seitenkanten und Gelenke müssen sich Module von ARTS innerhalb eines idealisierten Netzes befinden. Um dennoch geschlossene adaptierbare Strukturen aufbauen zu können wird ein Mechanismus benötigt, der einen Drehpunkt erzeugt, welcher außerhalb des Moduls im Schnittpunkt der idealisierten Tetraeder liegt, siehe Abb. 3.3. Zunächst wird die Problematik in der Ebene betrachtet. Die Struktur des Tetraeders wird daher auf die dreieckige Grundfläche beschränkt, konkret auf eine Dreiecksstruktur.

Um eine Formänderung von ARDS zu ermöglichen, werden an den Eckpunkten der ADEs Gelenke benötigt, die eine Rotation in der Ebene zulassen. Da einzelne ADEs von ARDS endlich große Seitenkanten besitzen, wird ein Mechanismus ausgelegt und konstruiert, der um einen virtuellen Punkt außerhalb der Geometrie eines Elements rotiert, siehe Abb. 3.4. Dadurch wird es möglich, dass verbundene Elemente um denselben Drehpunkt rotieren, siehe Abb. 3.7.

3.1.1 Grundlagen

Die im Tetrobot [7] verwendeten sphärischen Gelenke können durch eine zweidimensionale Interpretation als ein stabiles Gelenk für ebene Anwendungen ausgelegt werden.

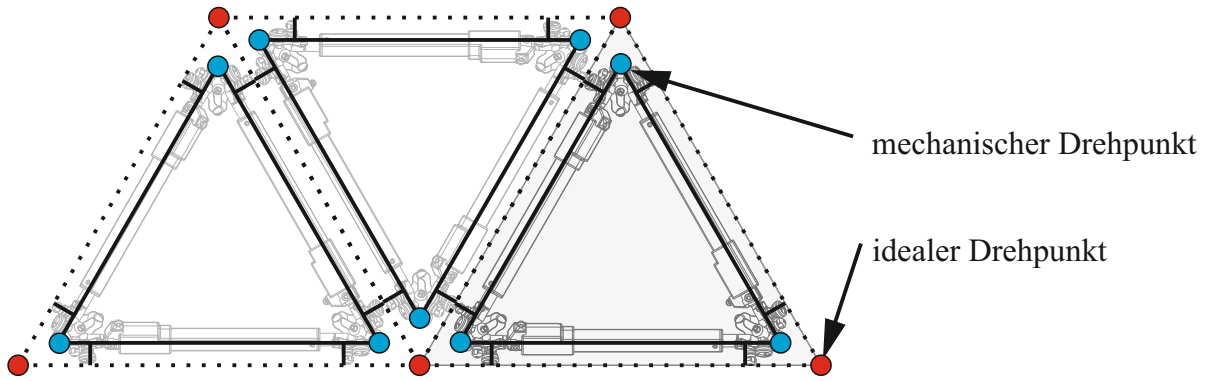


Abbildung 3.3: Mechanischer und idealer Drehpunkt des FE-Netztes anhand von ARTS [15].

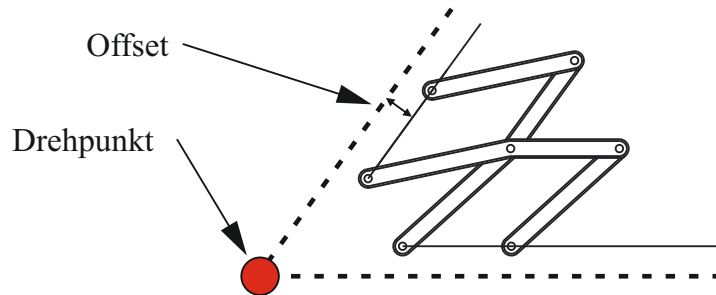


Abbildung 3.4: Prinzipische Skizze eines Scherengelenks und dessen Drehpunkt.

Abb. 3.5 wird herangezogen, um die kinematischen Zusammenhänge der Scherengelenke zu verdeutlichen. Die Punkte C, D, G, I sind die Gelenke auf den Seitenkanten jedes ADE. A, B, K, J bilden die auf das virtuelle Dreieck projizierten Gelenkspunkte. Mit den drei Parametern $L1, L2, L3$ ergeben sich folgende Dimensionen des Gelenks:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{L3}{L1} \right) \quad (3.1)$$

$$AB = CD = EF = FH = GI = JK = L2 \quad (3.2)$$

$$CE = DF = FG = HI = \frac{L3}{\sin(\phi)} \quad (3.3)$$

$$AC = BD = GK = IJ = L3 \quad (3.4)$$

Der Winkel α beschreibt die Position der virtuellen Kanten. ϕ ist der Winkel zwischen DF und FH bzw. GF und FE . Er beeinflusst die schlussendliche Größe und die erreichbaren minimalen sowie maximalen Winkel des Scherengelenks. Durch Einsetzen der zuvor bestimmten Parameter $L1$ und $L3$ ergibt sich ϕ zu Gl. (3.1).

Einen weiteren wichtigen Punkt für die Anwendung an ARDS bildet der Parameter $L3$, welcher den Abstand zwischen einer Seitenkante eines ADE zum umhüllenden virtuellen

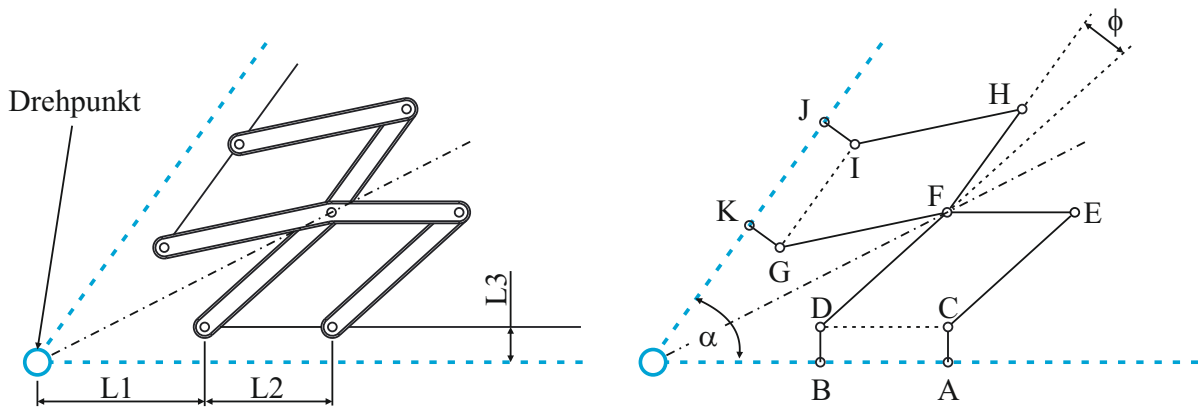


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung eines Scherengelenks [7].

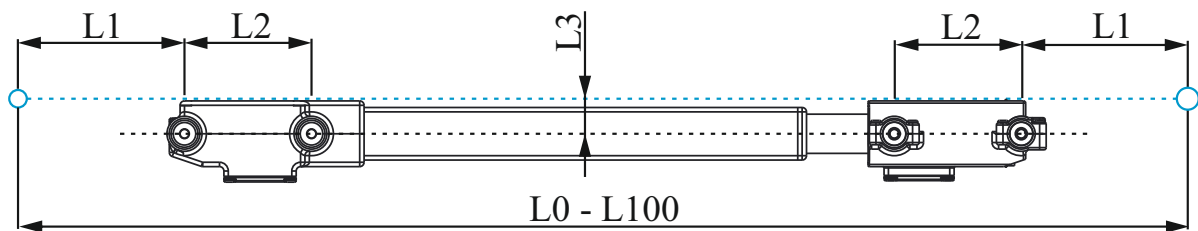


Abbildung 3.6: Draufsicht auf einen Aktor samt Anbindungen für Scherengelenke und virtuellem Drehpunkt.

Dreieck widerspiegelt.

Der Parameter $L1$ bestimmt die Entfernung des Drehpunktes zum Scherengelenk. Eine Veränderung der Länge $L2$ führt bei Vergrößerung zu mehr und bei Verkleinerung zu weniger Stabilität des Mechanismus.

In Abb. 3.5 ist ersichtlich das v.a. der Abstand $L1$ aber auch $L3$ die Dimensionen des virtuellen Dreiecks festlegen. In der konkreten Anwendung an ARDS sind vor allem die Abmessungen der beweglichen Seitenkanten, den Aktuatoren [2], für genannte Parameter bestimmend, vgl. Abb. 3.6 und 3.7.

Um das Ziel einer Umordnung einzelner Module von ARDS zu gewährleisten, muss der eingeschlossene Winkel zwischen zwei Aktuatoren jedes ADE 90° erreichen können. Der maximale und minimale erreichbare Winkel ist über trigonometrische Beziehungen und die Kinematik der Aktuatoren und Scherengelenke gegeben, siehe Gln. (3.5) und (3.6).

3.1.2 Auslegung

Die verwendeten Aktuatoren haben laut Datenblatt einen Hub von 100 mm. Der Abstand zweier auf einer Kante liegender Drehpunkte wird daher bei eingefahrenem Aktuator als L_0 und bei ausgefahrenem Aktuator als L_{100} bezeichnet.

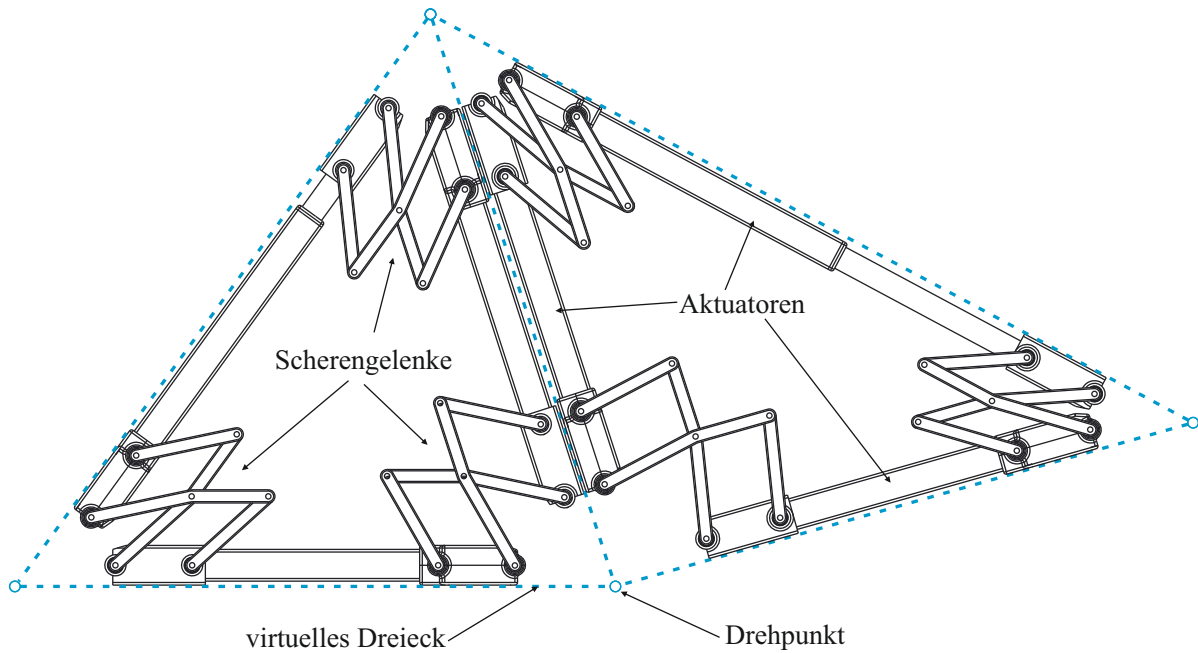


Abbildung 3.7: Schematischer Aufbau zweier ADE.

Der maximale erreichbare Winkel wird durch zwei ein- und einem ausgefahrenen Aktuator realisiert, vgl. Gl. (3.5)

$$\alpha_{\max} = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{\frac{L_{100}}{2}}{L_0} \right) \quad (3.5)$$

Für den kleinsten erzielbaren Winkel laut Gl. (3.6) sind zwei Akturatoren aus-, einer eingefahren.

$$\alpha_{\min} = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{\frac{L_0}{2}}{L_{100}} \right) \quad (3.6)$$

Die aus gegebenen Gln. (3.5) und (3.6) errechenbaren Winkel hängen somit nur vom Verhältnis der Seitenlänge eines ADE bei aus- sowie eingefahrenen Aktuatoren ab. Durch kompakte Bauweise der Kraftsensorik, Integration der Drehgelenke der Scherengelenke in eine Neukonstruktion des Aktuatorgehäuses und Optimierung des Parameters L_1 ist eine kompakte Bauweise gegeben. Durch diese Maßnahmen kann das Längenverhältnis von aus- zu eingefahrenem Aktuator verbessert werden. Den begrenzenden Faktor der Optimierung stellt die Breite des Aktuatorgehäuses dar. Diese bestimmt die minimal realisierbare Länge von L_1 und damit wesentlich die Abmessungen des virtuellen Dreiecks.

Eine bereits angesprochene Maßnahme um eine kompakte Endkonstruktion zu erhalten, ist die Änderung des vom Hersteller vorgesehenen Aktuatorgehäuses. Durch Fasen an

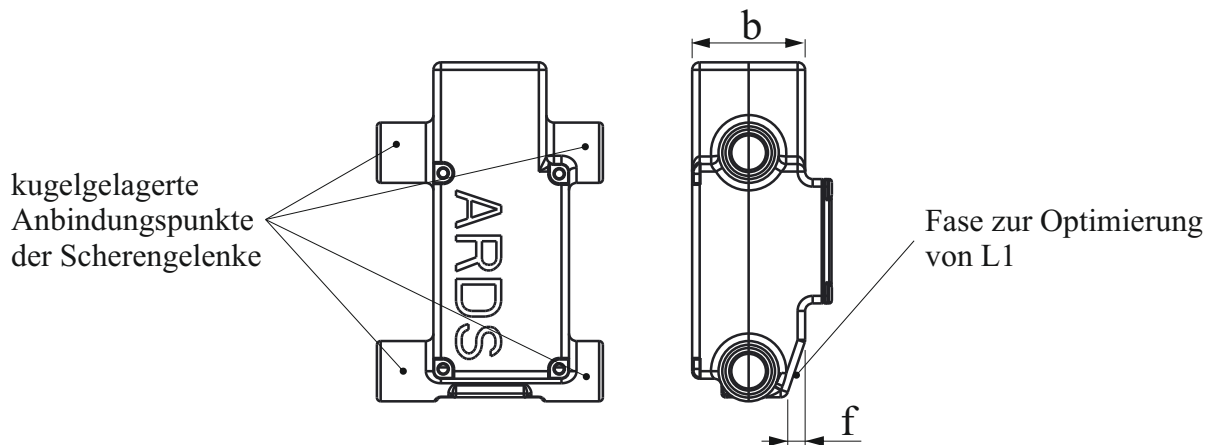


Abbildung 3.8: Gehäuse eines Aktuators mit integrierten Anbindungspunkten und Optimierungsfase.

der Innenseite des Aktuatorgehäuses kann der Parameter $L1$ weiter verkleinert werden, siehe Abb. 3.8 und Gl. (3.7).

Mit dem in Gl. (3.6) erhaltenen Ergebnis kann nach Bestimmung von $L3$ und der Fase f ein kleinstmöglicher Parameter $L1$ bestimmt werden, siehe Gl. (3.7).

$$L1 = \frac{\left(\frac{b}{2} - f\right) + L3}{\tan\left(\frac{\alpha_{\min}}{2}\right)} \quad (3.7)$$

Mehrfache Iteration der Gln. (3.5) bis (3.7) führt zu den Werten in Tab. 3.1.

Parameter	$L1$	$L2$	$L3$	b	f	L_0	L_{100}	α_{\min}	α_{\max}
Wert	38	29	8	15	1.5	229	329	40.7	91.8
Einheit	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	°	°

Tabelle 3.1: Optimierte Parameter zur Auslegung eines Scherengelenks.

Mit den Parametern aus Tab. 3.1 kann in einem weiteren Schritt die Geometrie der Scherengelenke festgelegt werden. Während $L2$ bereits bestimmt wurde, werden Gl. (3.1) bis (3.4) zur Berechnung von CE und ϕ herangezogen, siehe Tab. 3.2.

Parameter	$L2$	CE	ϕ
Wert	29	38.8	11.9
Einheit	mm	mm	°

Tabelle 3.2: Geometriedaten zur Konstruktion der Scherengelenke.

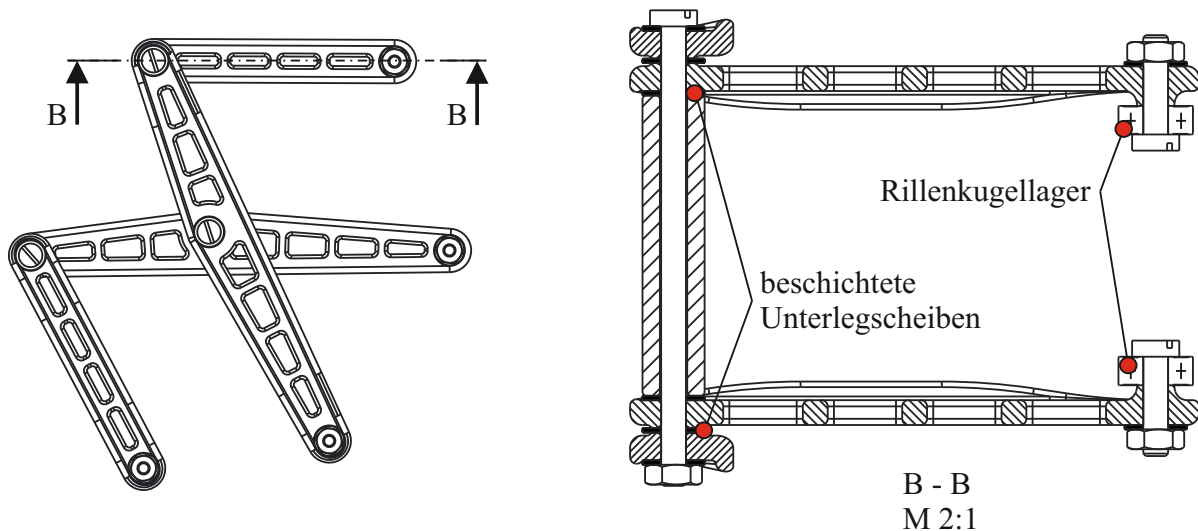


Abbildung 3.9: Aufbau der Scherengelenke mit beschichteten Unterlegscheiben und Rillenkugellagern.

3.1.3 Konstruktion

Die Verbindungen zwischen den Scherengelenken und dem Aktuator sind in das Aktuatorgehäuse integriert, siehe Abb. 3.8. Dadurch wird die Stabilität und Kompaktheit eines ADE erhöht. Die Anbindung der Scherengelenke ist kugelgelagert, wodurch die Reibung im Gelenk sinkt. Das ist darauf zurückzuführen, dass die in einem Kugellager wirkende Rollreibung geringer ist als die in Reiblagern wirkende Gleitreibung. Die Reibung in den Hauptgelenkspunkten wird mittels beschichteter Stahlscheiben minimiert, siehe Abb. 3.9. In weiterer Folge führt dies zu langlebigen Gelenken und verringertem Kraftaufwand bei der Verformung von ARDS.

Der Fokus bei der Konstruktion der Scherengelenke liegt sowohl auf hoher Biegesteifigkeit als auch einer optimierten Topologie. Eine Kombination dieser beiden Eigenschaften bieten die aus dem Stahlbau bekannten dünnwandigen C-, U- oder T-Profile. Die für den Einsatz am Scherenmechanismus verwendete U-Form weist ein hohes axiales Widerstandsmoment in den auftretenden Lastrichtungen y und z auf.

Eine Gegenüberstellung unter Vernachlässigung von Radien ergibt, dass das Widerstandsmoment der verwendeten U-Form im Vergleich zu einer Rechteck-Form je nach Belastungsrichtung zwischen 25 % und 109 % höher ist, siehe Gln. (3.8) bis (3.16).

Vergleich von Rechteck- und U-Profil

In diesem Abschnitt wird der Einfluss durch Verwendung eines U-Profils anstelle eines Rechteck-Profils untersucht. Die aus den CAD-Dateien von ARDS stammenden Werte aus Tab. 3.3 sowie Abb. 3.10 werden zu Berechnung herangezogen.

Bezeichnung	B	b	H	h
Wert in mm	7	5	3.5	1.5

Tabelle 3.3: Querschnittsmaße des Rechteck- sowie U-Profiles.

Rechteck-Profil:

Das axiale Widerstandsmoment um die y- sowie z-Achse des Rechteck-Profiles lautet:

$$W_{y,\text{Rechteck}} = \frac{B \cdot (H - h)^2}{6} = 4.67 \text{ mm}^3 \quad (3.8)$$

$$W_{z,\text{Rechteck}} = \frac{(H - h) \cdot B^2}{6} = 16.33 \text{ mm}^3 \quad (3.9)$$

U-Profil:

Das axiale Widerstandsmoment um die y-Achse in beiden Belastungsrichtungen ergibt sich zu:

$$W_{y1,U} = \frac{I_{y,U}}{z} = 9.78 \text{ mm}^3 \quad W_{y2,U} = \frac{I_{y,U}}{H - z} = 5.84 \text{ mm}^3 \quad (3.10)$$

mit der errechneten Schwerpunktkoordinate z:

$$z = \frac{B \cdot H \cdot \left(\frac{H}{2}\right) - b \cdot h \cdot \left(H - \frac{h}{2}\right)}{B \cdot H - b \cdot h} = 1.309 \text{ mm} \quad (3.11)$$

und dem Flächenträgheitsmoment $I_{y,U}$:

$$I_{y,U} = \frac{b \cdot (H - h)^3}{12} + b \cdot (H - h) \cdot \left(z - \frac{H - h}{2}\right)^2 + \frac{(B - b) \cdot H^3}{12} + (B - b) \cdot H \cdot \left(\frac{H}{2} - z\right)^2 = 12.80 \text{ mm}^4 \quad (3.12)$$

Aufgrund der Symmetrie des U-Profiles um die z-Achse ergibt sich für $W_{z,U}$:

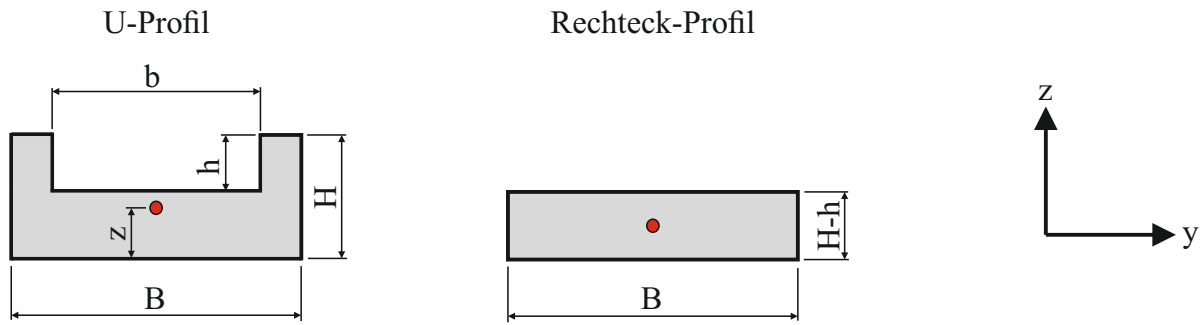


Abbildung 3.10: Skizze eines U-Profiles im Vergleich zu einem Rechteck-Profil.

$$W_{z,U} = \frac{I_{z,U}}{\frac{B}{2}} = \frac{B^3 \cdot H - b^3 \cdot h}{6 \cdot B} = 24.12 \text{ mm}^3 \quad (3.13)$$

Vergleich der Ergebnisse:

Im Folgenden wird die relative prozentuale Verbesserung der axialen Widerstandsmomente unter Verwendung eines U-Querschnitts berechnet.

$$\frac{|W_{y1,U} - W_{y,\text{Rechteck}}|}{W_{y,\text{Rechteck}}} \cdot 100 = 109 \% \quad (3.14)$$

$$\frac{|W_{y2,U} - W_{y,\text{Rechteck}}|}{W_{y,\text{Rechteck}}} \cdot 100 = 25 \% \quad (3.15)$$

$$\frac{|W_{z,U} - W_{z,\text{Rechteck}}|}{W_{z,\text{Rechteck}}} \cdot 100 = 48 \% \quad (3.16)$$

Im Bereich des Hauptgelenkpunktes des Scherenmechanismus tritt hohe Biegebelastung in y -Richtung und Kerbwirkung auf. Aus diesem Grund wird der gebogene Schenkel zur kritischen Stelle hin mit zunehmendem Querschnitt modelliert, vgl. Abb. 3.11. In geringer belasteten Bereichen wird durch optimierte Topologie Material eingespart. Dies führt zu einer leichteren Gesamtkonstruktion und geringeren Materialkosten. Das ist beim Aufbau großer Strukturen, vor allem für die sensitive Nachgiebigkeit vorteilhaft.

Um die Steifigkeit von ARDS zu erhöhen, werden die Scherengelenke doppelt ausgeführt. An der Ober- sowie Unterseite eines ADE symmetrisch zur Kraftlinie angeordnet, können die Scherengelenke ein Verdrehen der Aktuatoren unterbinden. Die jeweils übereinander liegenden spiegelgleichen Scherengelenke werden mit Distanzhülsen verschraubt. Diese Maßnahme bringt zusätzliche Steifigkeit in den Mechanismus, siehe Abb. 3.12.

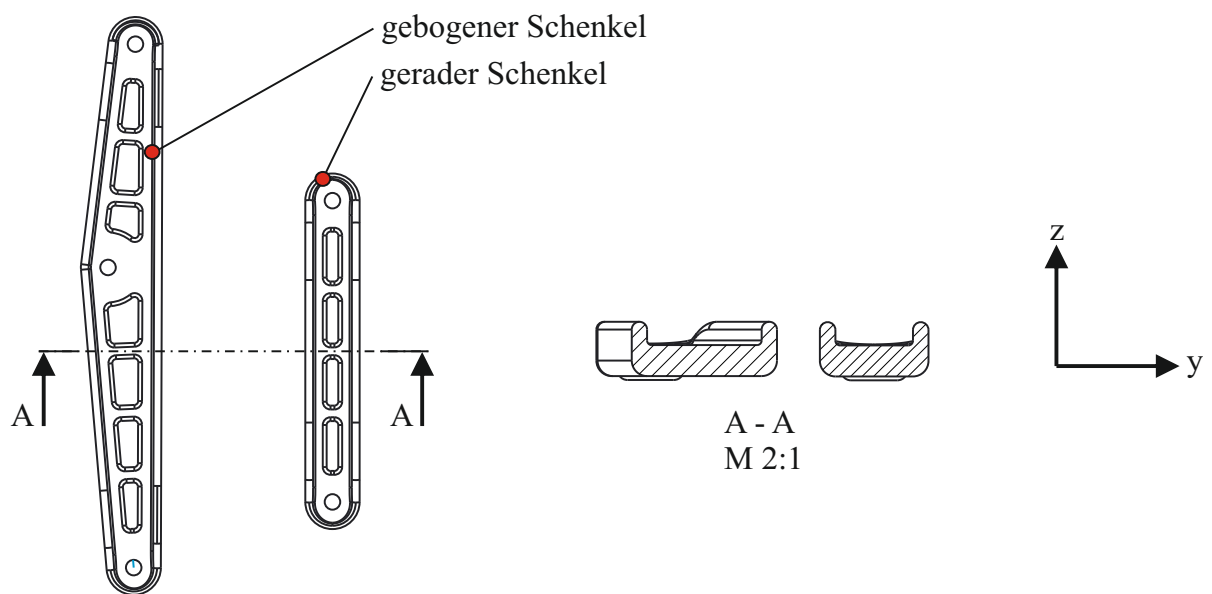


Abbildung 3.11: Querschnitt der Scherengelenke und Veranschaulichung der U-Form.

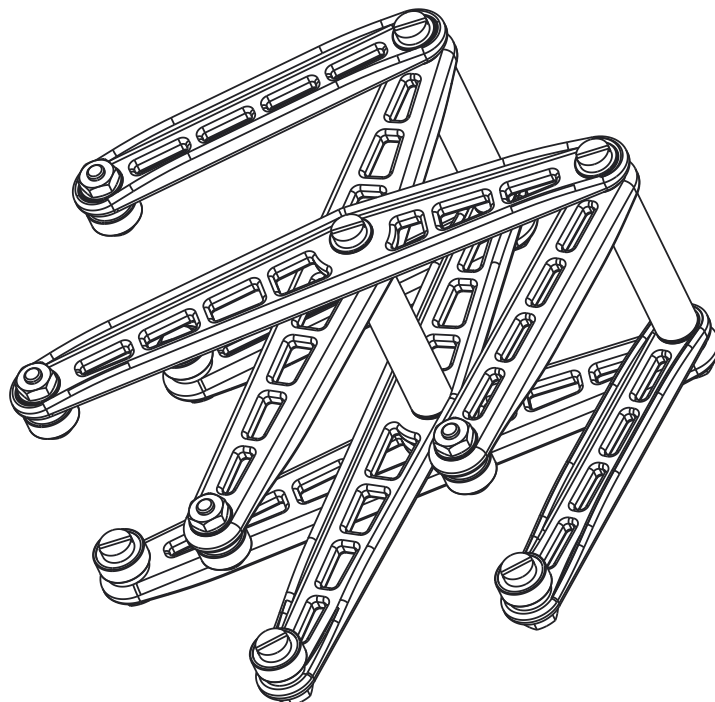


Abbildung 3.12: Konstruktion eines Scherengelenks.

3.2 Nachgiebigkeit

Damit ARDS auf äußere Einflüsse reagieren kann, werden Elemente in jedem Robotermodul benötigt, die auftretende Kräfte messen, s.g. Kraftmeseinheiten (KMEs), siehe Abb. 3.13. Um auf beliebige Krafteinwirkungen in der Ebene ansprechen zu können, wird eine KME an jeder Seitenkante eines ADE implementiert. Diese Kräfte werden mittels eines Microcontrollers ausgewertet. In weiterer Folge fahren die Aktuatoren an den belasteten Kanten bei Überschreiten einer Schwellkraft ein (Druckkräfte) oder aus (Zugkräfte). Dadurch wird dem Anwender von ARDS eine Nachgiebigkeit vermittelt.

Der Vorteil einer programmierbaren Nachgiebigkeit besteht darin, dass bestimmt werden kann, welche Kanten nachgiebig und welche unnachgiebig sind. So ist es möglich, Verschiebungen in ausgewählten Richtungen zuzulassen oder zu sperren.

3.2.1 Funktionsprinzip

Bei der Umsetzung von ARDS werden für jedes ADE drei KMEs, für jeden Aktuator eine, benötigt. Aus diesem Grund wird eine neuartige Kraftsensorik entwickelt, welche mit günstigen Standard-Elektronikkomponenten aufgebaut werden kann. Das angewandte Prinzip ähnelt einer Wegmessung mittels optischer Sensorik.

Ein gefedertes aktives Sensorelement bewegt sich in Richtung der einwirkenden Kraft. In der Mitte dieses Elements befindet sich eine Ausnehmung. Ober- und unterhalb des Sensorelements befinden sich zwei starre Gehäuse mit gleichgroßen Ausnehmungen. Befindet sich die Sensorik in der Ruhelage, überschneiden sich die Ausnehmungen zu 50%. Wirkt aus der Ruhelage heraus nun eine Zugkraft, bewegt sich das aktive Sensorelement und der überschneidende Querschnitt wird kleiner. Das Gegenteil bilden auftretende Druckkräfte, der Querschnitt wird größer, siehe Abb. 3.14.

Wird an einem der beiden starren Gehäuse eine Lichtquelle, am anderen ein Lichtsensor angebracht, dann kann die je nach Querschnitt durchtretende Lichtmenge gemessen werden.

Die am Sensor abfallende Spannung wird durch einen Microcontroller ausgewertet und anhand eines angenäherten Polynoms in eine Kraft umgerechnet.

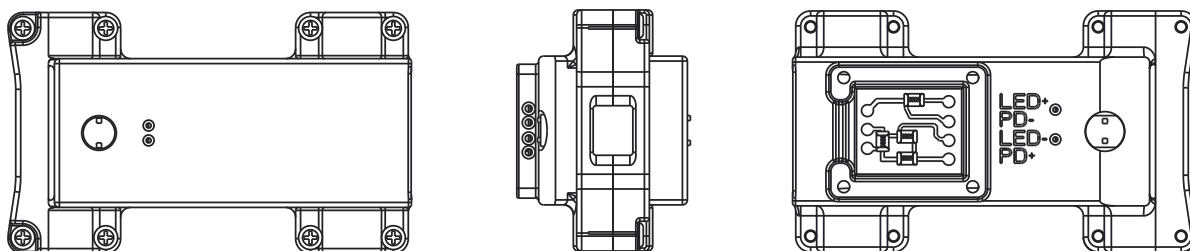


Abbildung 3.13: Ansichten der Kraftmeseinheit mit integrierter Elektronik.

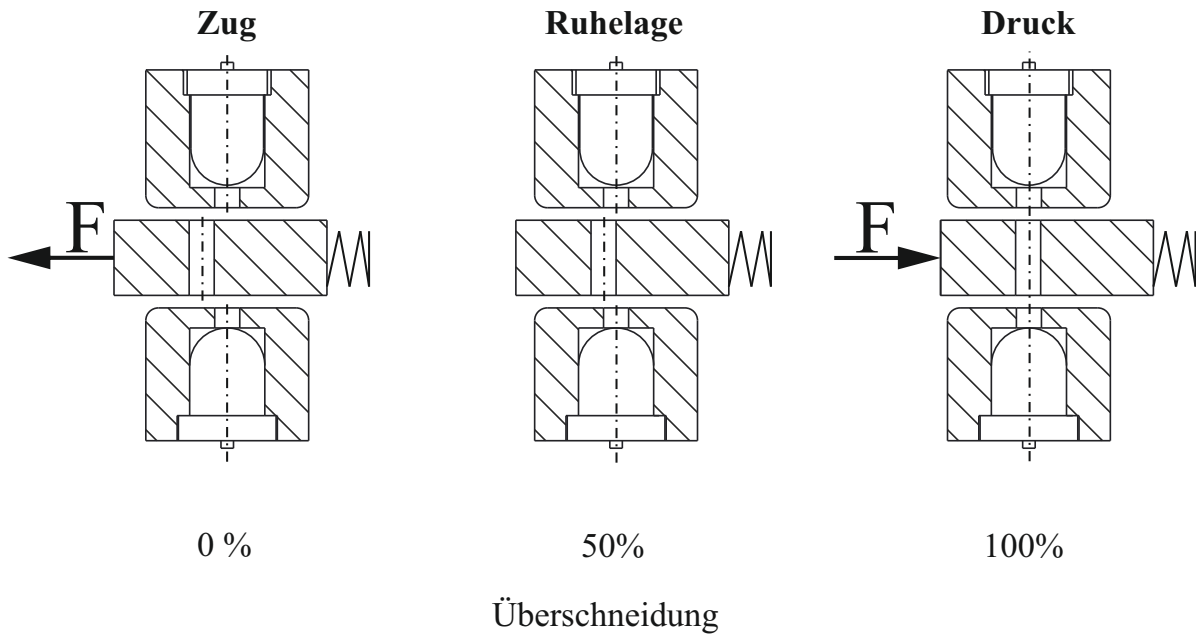


Abbildung 3.14: Prinzip der optischen Wegmessung und Stellungen des aktiven Sensorelements.

3.2.2 Konstruktion

Ein wichtiger Punkt bei der Konstruktion der KME ist eine kompakte Bauweise der Kraftsensorik (KS), siehe Abb. 3.15. Mit einer Länge von 9 mm hat der KS einen minimalen Einfluss auf das Verhältnis zwischen L_0 und L_{100} . In weiterer Folge ist durch die Kompaktheit ein großer Winkel α_{\max} möglich, siehe Gl. (3.5).

Um den Einfluss des Umgebungslichts auf das sensitive Infrarotsender und -empfängerpaar zu minimieren, sind diese beiden Elemente von einem massiven Gehäuse umgeben. Die hohen Wandstärken rund um die Infrarot-Bauelemente filtern den größten Teil der im Umgebungslicht enthaltenen IR-Strahlen. Eine weitere Funktion des Gehäuses ist die Hubbegrenzung des aktiven Sensorelements. Durch den geringen Abstand zwischen den Membranen und dem starren Gehäuse wird der Hub auf 0.5 mm begrenzt. Neben der Begrenzung des Hubs ist damit auch eine Überspannung der Membranen, welche zum Bruch führen würde, ausgeschlossen. Weiters wird durch größtmögliche Radien an den Rändern der Membranen die Kerbwirkung reduziert, siehe Abb. 3.16.

Mit der Stärke der Membran kann der Wirkungsbereich des Sensors angepasst werden. Hohe Membranstärken finden den Einsatz bei hohen auftretenden Kräften, geringe Membranstärken bei geringen auftretenden Kräften, da die Festigkeit mit zunehmender Stärke steigt. Die gewählte Membranstärke von 0.6 mm bildet Kräfte von ± 20 N auf ± 1.5 V ab. Der Aktorflansch bildet das Verbindungselement zwischen dem Aktuator und der KS. Hier werden Zug- und Druckkräfte eingeleitet. Da sich aufgrund der mechanischen Fertigung die Gewinde aller Aktuatoren unterscheiden, ist es notwendig, einen verdrehbaren Flansch zu realisieren. Mittels der konischen Aufnahme und der Verspannung durch eine Schraubverbindung ist eine stufenlos einstellbare kraftschlüssige Verbindung gegeben.

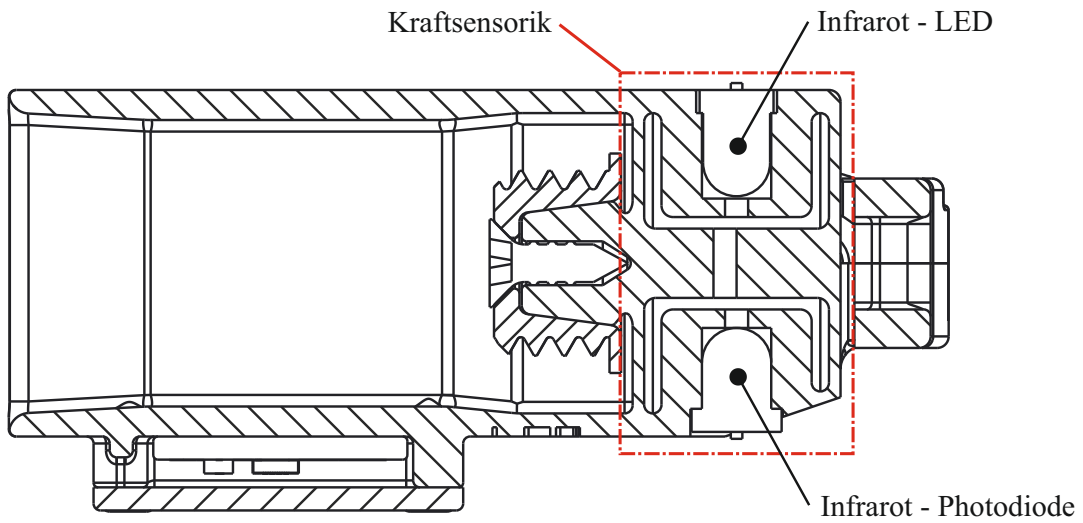


Abbildung 3.15: Schnitt der Kraftmesseinheit mit eingebetteter Kraftsensorik.

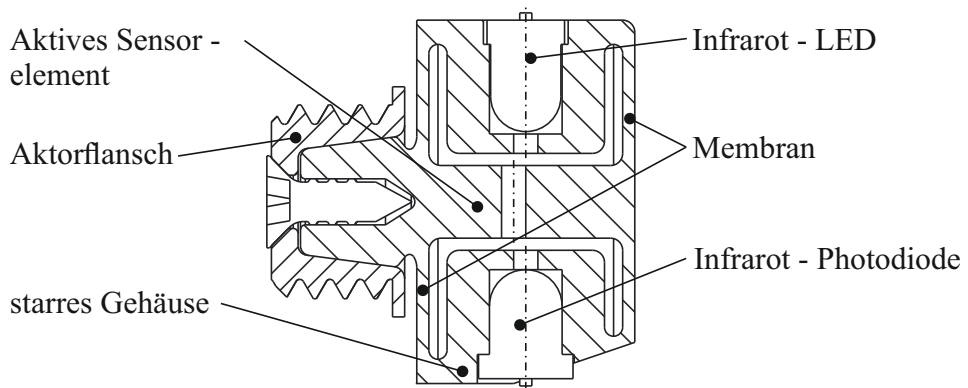


Abbildung 3.16: Schnitt der Kraftsensorik.

Der große Abstand der beiden Membranen bringt Stabilität bei Biegebeanspruchung des aktiven Sensorelements. Im eingefahrenen Zustand (L_0) des Aktuators bieten die konisch zulaufenden Führungsflächen zusätzliche Steifigkeit bei Biege- oder Torsionsbelastung. Zusätzlich wirken diese Führungsflächen bei einem einfahrenden Aktuator wie ein Trichter. Dieser korrigiert außermittige Aktuatorpositionen, siehe Abb. 3.15.

Der Flansch für die aktive Anbindung ist eine weitere Komponente der Kraftmesseinheit. Unter Berücksichtigung der Freigängigkeit von Membranen und aktivem Sensorelement ist ein Teil des Flansches am starren Gehäuse der KME angebracht. Das Gegenstück des Flansches bildet mit den Deckeln für die Wälzlager einen Bauteil.

Der letzte Teil der Konstruktion enthält die Unterbringung der integrierten Elektronik, siehe Abb. 3.17. Die Photo- sowie Leuchtdiode werden über einen Presssitz im Kraftsensor gehalten. Vier von den Dioden kommende Litzen werden an den Eingängen der Sensor-Platine verlötet. Diese Platine wird von einem Gehäuse geschützt, welches der Platine eine definierte Position vorgibt und das Kabel am Ausgang der Platine klemmt. Mit dieser Klemmung werden die Lötstellen geschützt und Bewegungen vom flexiblen Teil des Kabels aufgenommen. Beschriftungen an der KME vereinfachen den korrekten Einbau der Elektronik-Komponenten.

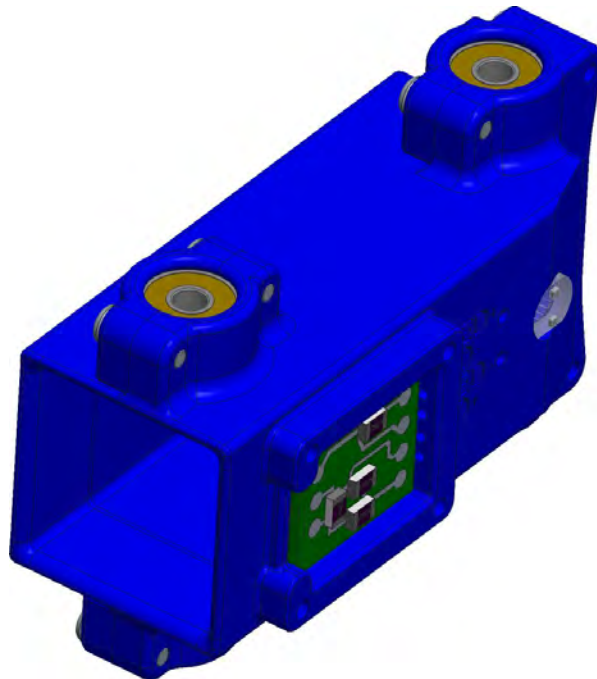


Abbildung 3.17: 3D Ansicht der assemblierten Kraftmesseinheit.

3.3 Aktive Anbindung

Die in Kapitel 2 erwähnten vacuumbasierten Mechanismen sowie eine Lötverbindung stellen aufgrund ihrer Komplexität keine Lösung für ARDS dar, wogegen eine mechanische oder elektromagnetische Anbindung einfacher zu realisieren und in weiterer Folge auch fehlerunanfälliger ist. Die Lösung an ARDS kombiniert die Vorteile einer mechanischen Anbindung mit denen eines Elektromagneten. Während der mechanische Teil eine hohe Stabilität und viel konstruktiven Spielraum bietet, funktioniert die Aktivierung des Mechanismus über einen federvorgespannten Hub–Elektromagneten schnell und präzise. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der Elektromagnet nur zum Öffnen der Verbindung benötigt wird, was den Energiebedarf senkt.

Durch einen solchen Mechanismus kann sich ARDS selbst rekonfigurieren und benötigt somit keine manuelle Assemblierung. Die aktive Anbindung bildet den Verbindungspunkt mehrerer ADEs. Über einen Microcontroller gesteuert, ist es möglich, einzelne ADEs zu verbinden oder zu trennen. Zur Realisierung von ARDS wird jede Seitenkante eines ADE mit dieser Anbindung bestückt. Im Wesentlichen besteht diese aus zwei Komponenten; einem Schnappmechanismus, der aktiv durch einen Elektromagneten geöffnet werden kann, und einem gekerbten Bolzen als Gegenstück, siehe Abb. 3.18.

3.3.1 Konstruktion

An jedem Aktuator befindet sich ein Anbindungs–Paar. Am äußeren Rand des Aktuatorgehäuses ist die aktive Buchse angeflanscht. Das Gegenstück, der gekerbte Bolzen, sitzt am Rand der KME. Eine Verbindung zweier ADEs besteht deshalb aus zwei Anbindungs–Paaren. Durch den großen Abstand der Anbindungspunkte werden Kräfte gut aufgenommen und an KMEs anderer ADEs weitergeleitet.

Die runde konische Ausführung der Buchse und des Bolzens haben den Vorteil, dass

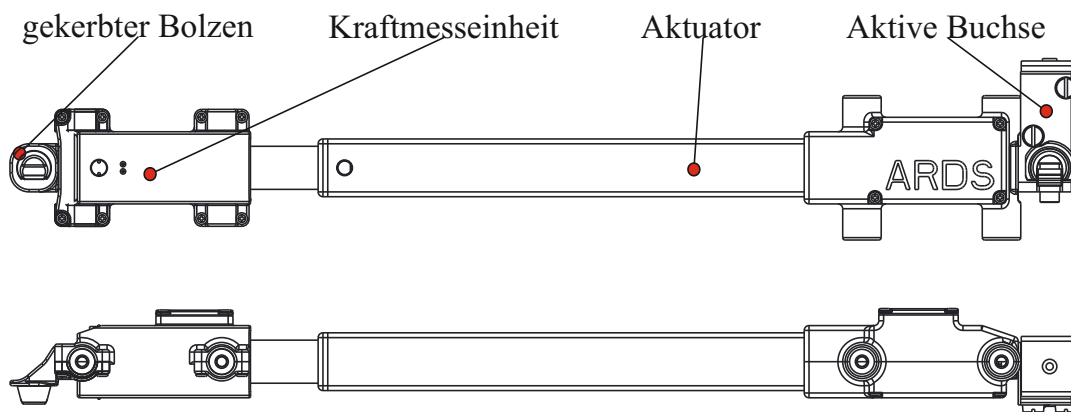


Abbildung 3.18: Positionierung der aktiven Anbindung am Aktuator und der Kraftmess-einheit.

Ungenauigkeiten in der Positionierung ausgeglichen werden. Ein leicht versetztes Gegenstück wird durch die Konizität beim Zusammenführen zentriert.

3.3.2 Verbindungs - Modi

Verbinden

Beim Einführen des konischen gekerbten Bolzens wird durch die Rundung an der Stirnseite des Bolzens die Klaue des drehbaren Schließmechanismus nach unten bewegt. Durch unterschiedliche Hebellängen des Schließmechanismus und einer daraus resultierenden Übersetzung wird wenig Kraftaufwand benötigt, um den federvorgespannten Bolzen in den Elektromagneten zu drücken, siehe Abb. 3.19. Nach vollständigem Verbinden der beiden Elemente, Buchse und Bolzen, schnappt der Schließmechanismus samt federvorgespanntem Bolzen zurück in seine Ausgangsposition, vgl. Abb. 3.20. Es herrscht nun eine formschlüssigen Verbindung, welche nur durch Anziehen des Elektromagneten getrennt werden kann.

Trennen

Durch den federvorgespannten Bolzen und den dadurch vorgespannten drehbar gelagerten Schließmechanismus rastet der gekerbte Bolzen in der Buchse ein. Beim Trennen der Verbindung wird der Elektromagnet unter Spannung gesetzt. Das führt dazu, dass der vorgespannte Bolzen entgegen der wirkenden Federkraft angezogen wird. Dadurch wird

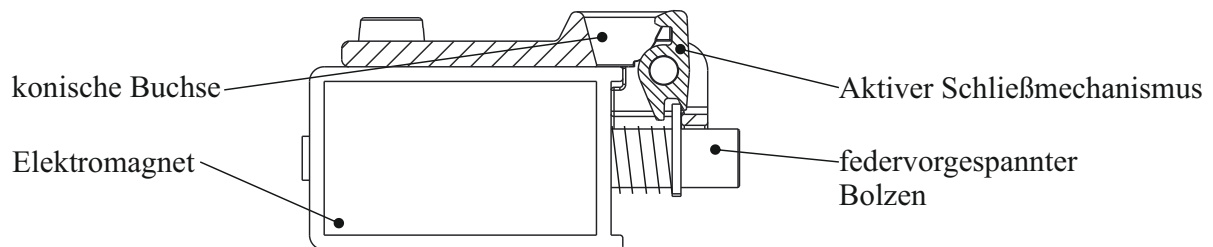


Abbildung 3.19: Teilschnitt des aktiven Schnappmechanismus mit federvorgespanntem Bolzen und Elektromagnet.

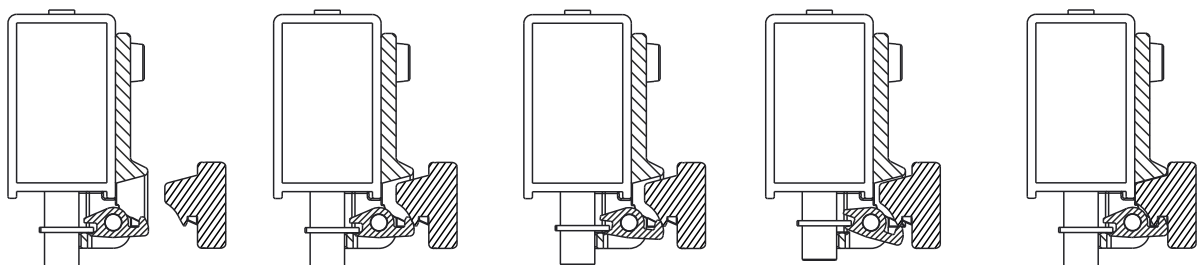


Abbildung 3.20: Erzeugen einer Anbindung.

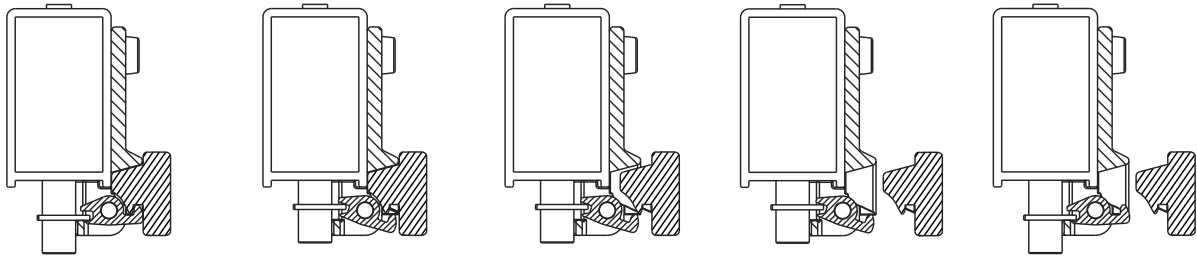


Abbildung 3.21: Trennen einer Anbindung.

der Schließmechanismus in Rotation versetzt und gibt das gekerbte Gegenstück frei; es herrscht kein Formschluss mehr, siehe Abb. 3.21.

Bei einer klemmenden Verbindung besteht weiters die Möglichkeit, diese durch schlagartige Bewegungen des federvorgespannten Bolzens zu lösen. Hierfür wird ein PWM-Signal an den Elektromagneten weitergeleitet.

3.4 Peripherie

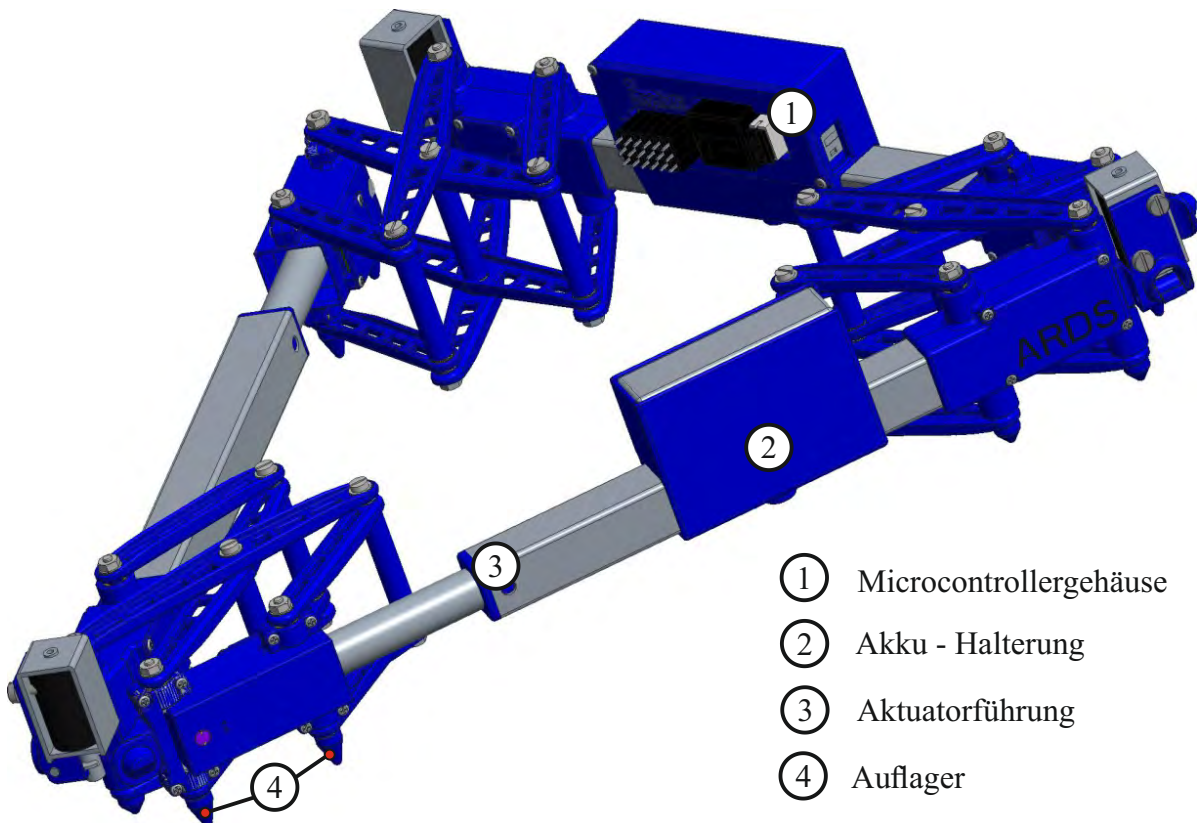


Abbildung 3.22: Periphere Komponenten von ARDS.

Dieser Abschnitt enthält kleinere Baugruppen, welche in den Hauptthemen nicht beschrieben werden. Abb. 3.22 zeigt die Anordnung dieser peripheren Elemente.

Positionierung von Microcontroller und Akku

Da aufgrund der Scherengelenke eine zentrale Positionierung des Microcontrollers samt Akku nicht mehr möglich ist, werden diese beiden Elemente getrennt voneinander auf den Seitenkanten eines ADE angebracht. Um eine ausgeglichene Gewichtsverteilung auf allen Seitenkanten zu erlangen, ist auf der dritten Seitenkante ein Ausgleichsgewicht angebracht. Gemessene Gewichte, der an den Aktuatoren angebrachten Elemente samt den eingebauten Komponenten, sind Tab. 3.4 zu entnehmen.

Bezeichnung	Microcontrollergehäuse	Akkuhalterung	Ausgleichsgewicht
Gewicht	22	23	22
Einheit	g	g	g

Tabelle 3.4: Gemessene Gewichte peripherer Elemente.

Microcontrollergehäuse

Um die KME nicht auf Torsion zu beanspruchen ist es notwendig den Schwerpunkt des Microcontrollers mittig zentriert über dem Aktuator zu halten. Dies gelingt durch ein Gehäuse, das den Aktuator umschließt und spielfrei geklemmt werden kann. Durch Schrauben wird der Microcontroller in diesem Gehäuse befestigt. Der Deckel des Gehäuses ist mit Abkürzungen versehen, um den Anschluss der Ein- und Ausgänge zu erleichtern, siehe Abb. 3.23.

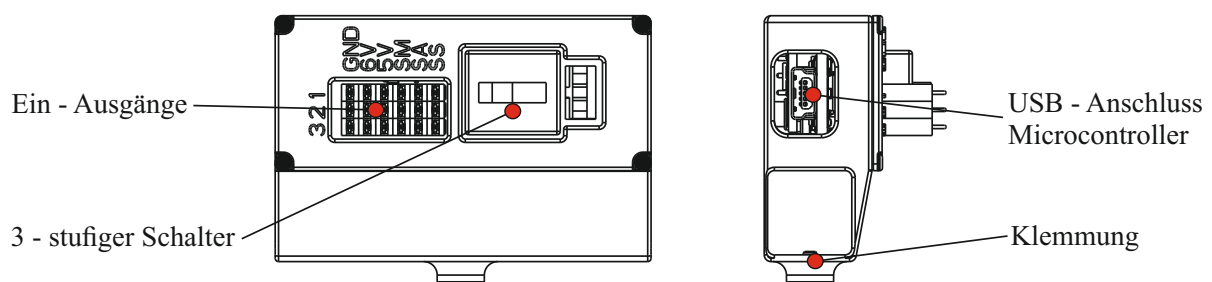


Abbildung 3.23: Microcontrollergehäuse zur Befestigung am Aktuator.

Akkuhalterung

Auf einer weiteren Seitenkante befindet sich der Akku in einer Halterung. Die Halterung positioniert den Akku zentral über dem Aktuator, um wiederum keine Torsionsbeanspruchung auszulösen. Auch dieses Gehäuse wird an der Unterseite geklemmt.

Auflager von ARDS

Um die konstruktionsbedingte Höhendifferenz der Scherengelenke auszugleichen und gleichzeitig Reibung an den Kontaktflächen zu reduzieren, werden Auflager verwendet. Die 3D-gedruckten konischen Auflager werden auf die Sechskant-Muttern aufgepresst, siehe Abb. 3.24.

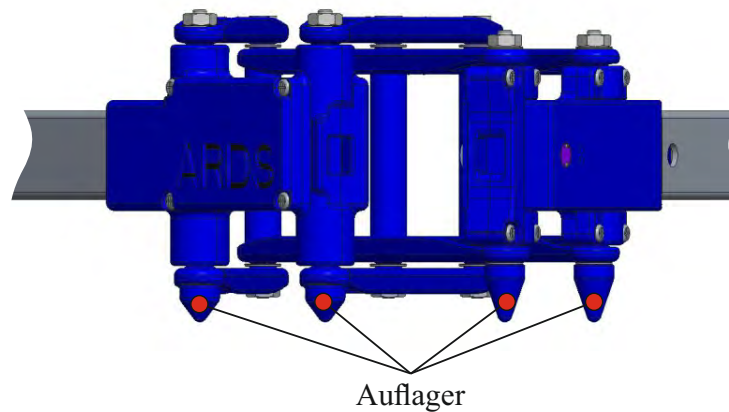


Abbildung 3.24: Hohe und niedere Auflager zum Ausgleich der Höhendifferenz der Scherengelenke.

Aktorführung

Da die serienmäßige Führung im Aktuator ein Spiel von 0.5 mm aufweist, wird eine Neukonstruktion verbaut, die ein radiales Spiel von 0.05 mm zulässt. Vor allem im ausgefahrenen Zustand wird die Stabilität des Aktuators durch diese Maßnahme verbessert, siehe Abb. 3.25.



Abbildung 3.25: Aktuatorführung mit verringertem Spiel.

4 Elektronik

Zur Realisierung eines modularen, selbst rekonfigurierbaren Roboters wie ARDS werden verschiedene elektronische Komponenten sowie ein Microcontroller benötigt. Außerdem ist es notwendig, Platinen zu entwickeln, siehe Abb. 4.2, um Platz und Gewicht zu sparen und die Fehleranfälligkeit zu reduzieren.

In den folgenden Abschnitten werden die Funktionen der einzelnen Platinen und Komponenten sowie deren Schaltungen beschrieben. Bezeichnungen und Kennwerte der verwendeten Komponenten befinden sich im Anhang. Zudem wird auf die Realisierung durch den Microcontroller eingegangen. Abb. 4.1 bietet einen Überblick über die Schnittstellen der einzelnen Komponenten. Verwendete Abkürzungen werden im Anhang beschrieben.

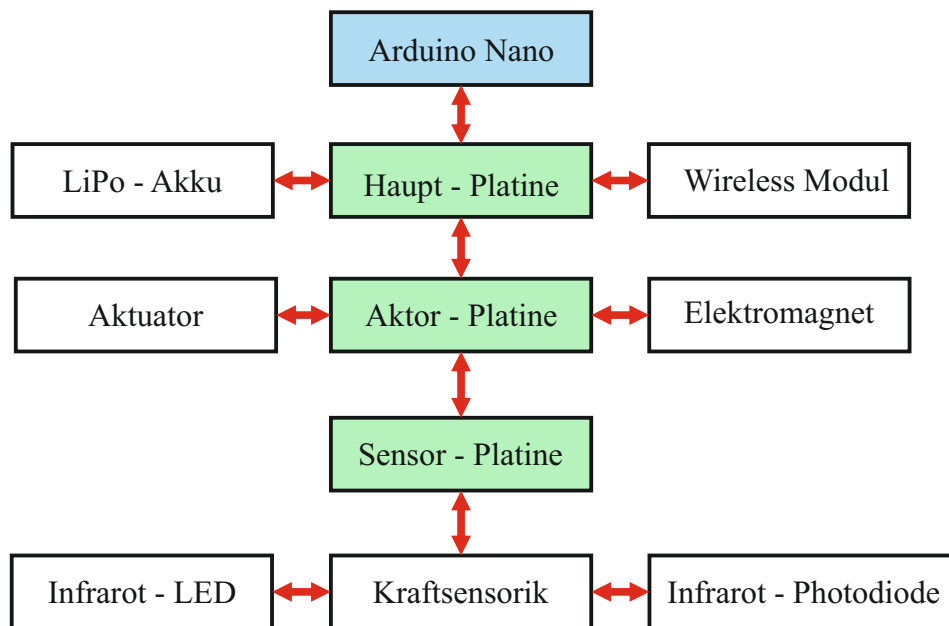


Abbildung 4.1: Übersicht über die elektronischen Komponenten und deren Schnittstellen.

4.1 Sensor - Platine

Die Kraftsensorik ist jene Komponente, die Zug- und Druckkräfte misst und an einen analogen Eingang des Microcontrollers liefert. Neben der entwickelten Mechanik sind

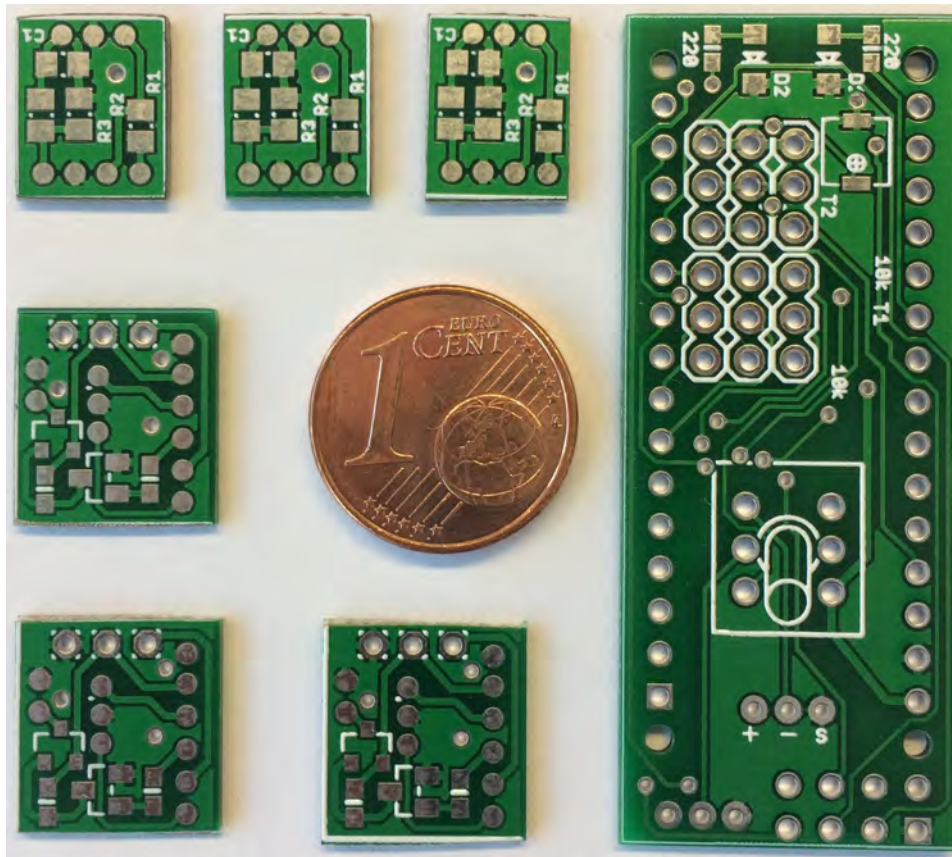


Abbildung 4.2: Verwendete Platinen im Vergleich zu einer Cent-Münze mit 16 mm Durchmesser.

es die elektronischen Bausteine, die eine Nachgiebigkeit ermöglichen. Die verwendeten Komponenten arbeiten im Infrarotbereich, wodurch der Einfluss des Umgebungslichts minimiert wird. Zum Vergleich: Ein lichtabhängiger Widerstand (LDR) reagiert auf jede Lichtänderung, bedingt durch Sonnenlicht, Schatten usw., und ist deshalb für den Einsatz an ARDS unbrauchbar.

Die eingesetzte Infrarot-Leuchtdiode [12] hat die höchste Intensität bei einer für das menschliche Auge nicht sichtbaren Wellenlänge λ von 940 nm. Um die Abmessungen der KME kompakt zu halten wird die kleine Baureihe mit einem Durchmesser d von 3 mm verbaut.

Die verwendete Photodiode [18] weist bei 940 nm die höchste Sensitivität auf. Zusätzlich reagiert sie nur auf Strahlungen in einem kegelförmigen Bereich von 60° . Das bringt den Vorteil, dass der hintere Teil der Diode, welcher nicht durch die KME geschützt ist, nicht zusätzlich abgedeckt werden muss.

Die Schnittstelle dieser beiden Komponenten ist eine in die KME integrierte Platine mit einem Querschnitt von rund 70 mm^2 , siehe Abb. 4.3. Auf ihr befinden sich neben den bei-

den Diodenschnittstellen ein Spannungsteiler, ein Tiefpass-Filter und ein Vorwiderstand der Leuchtdiode.

Die Stromversorgung sowie Signalübertragung erfolgt über ein dreiadriges Flachbandkabel, welches zur Aktuatorplatine führt und von dort aus mit den Signalleitungen für den Elektromagneten und den Aktuator zum Microcontroller verbunden wird.

4.1.1 Schaltung

Die Photodiode bei Betrieb in Sperrrichtung reagiert auf Eintritt von Infrarotstrahlen mit einer Widerstandsänderung. Da diese Widerstandsänderung vom Microcontroller nicht erfasst werden kann, wird sie über einen Spannungsteiler ausgewertet. Mit dem verwendeten Spannungsteiler für die Photodiode und dem Vorwiderstand für die LED liegen am Microcontroller u_x Volt an, siehe Abb. 4.4. u_x ist abhängig von der auf die KME wirkenden Kraft und beträgt in unbelasteter Ausgangslage der KME ca. 2.8 V. Der Wert schwankt aufgrund von Fertigungstoleranzen der einzelnen Komponenten. Bei Bedarf kann die Mittelspannung durch Anpassen des Vorwiderstands der LED korrigiert werden.

Durch nachgeschalteten Tiefpass werden Störungen ab einer Grenzfrequenz f_G von 34 Hz gefiltert, siehe Gl. (4.1).

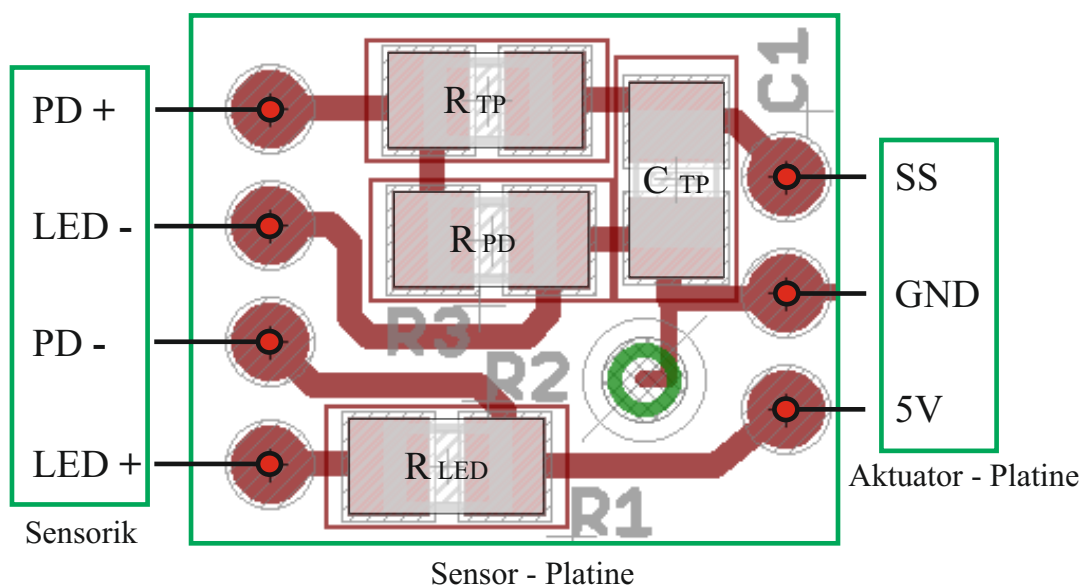


Abbildung 4.3: Darstellung der Leiterbahnen und Schnittstellen der Sensor-Platine.

Die konkreten Werte der für ARDS verwendeten Bausteine sind in Tab. 4.1 abgebildet.

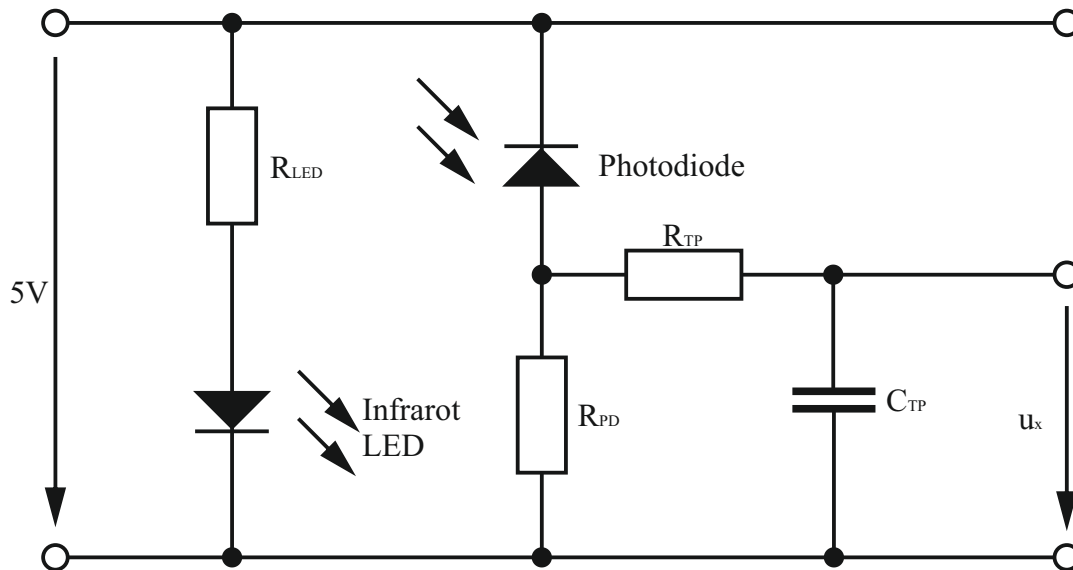


Abbildung 4.4: Schaltung der Kraftsensorik mit Tiefpass-Filter.

Parameter	R_{LED}	R_{PD}	R_{TP}	C_{TP}
Wert	1.5	3.2	47	0.1
Einheit	$k\Omega$	$k\Omega$	$k\Omega$	μF

Tabelle 4.1: Werte der Widerstände und Kondensatoren aus der Schaltung der Kraftsensorik.

Die Grenzfrequenz f_G ergibt sich mit den Werten aus Tab. 4.1 zu:

$$f_G = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{TP} \cdot C_{TP}} = 34 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

4.2 Aktuator - Platine

Die am Aktuatorgehäuse platzierte Platine bildet eine Schnittstelle für die verwendeten Komponenten. An ihr treffen sich das von der Sensor-Platine kommende Kabel, der Elektromagnet der aktiven Anbindung, sowie der Gleichstrom-Motor des Aktuators. Auch eine Transistorschaltung zur Ansteuerung des Elektromagneten findet darauf Platz.

Durch den Einsatz einer Platine als Treffpunkt der einzelnen elektronischen Komponenten werden Kabel zwischen den elektronischen Bauteilen zum Microcontroller eingespart, siehe Abb. 4.5. Hierdurch wird wiederum an Gewicht gespart, die Gesamtkonstruktion fällt kompakter aus und Fehlerquellen durch Steckverbindungen werden eliminiert.

4.2.1 Schaltung

Abb. 4.5 zeigt die Schnittstellen des Elektromagneten und der Sensor-Platine. Während an diesen beiden Knotenpunkten die kommenden Kabellitzen vorderseitig verlötet sind, werden die Litzen des Aktuators von hinten verlötet.

Die 6 V Versorgungsspannung vom Aktuator sowie des Elektromagneten werden zu einer Leitung zusammengefasst. Ebenso die Erdung (GND) der gesamten Peripherie.

An der Leitung für das Signal des Magneten (SM) befindet sich eine Transistorschaltung. Die anliegenden 6 V kommen direkt vom Akku, das anliegende „Signal Magnet“ hingegen kommt aus einem digitalen Ausgang des Arduino. Da die Leistung vom Microcontroller nicht ausreicht, um den Magneten zu versorgen, wird dieser nur zum Schalten der Akku-Spannung verwendet. Soll der Anbindungsmechanismus geöffnet werden, wird der digitale Ausgang „Signal Magnet“ auf HIGH geschaltet. Die dadurch anliegende Spannung an der Basis des Transistors führt zum Durchschalten der Akku-Spannung. Durch die beiden 10 k Ω -Widerstände stellt sich eine Verstärkung von 1 an der Transistorschaltung ein.

Die verwendeten Komponenten zu Abb. 4.5 können dem Anhang entnommen werden.

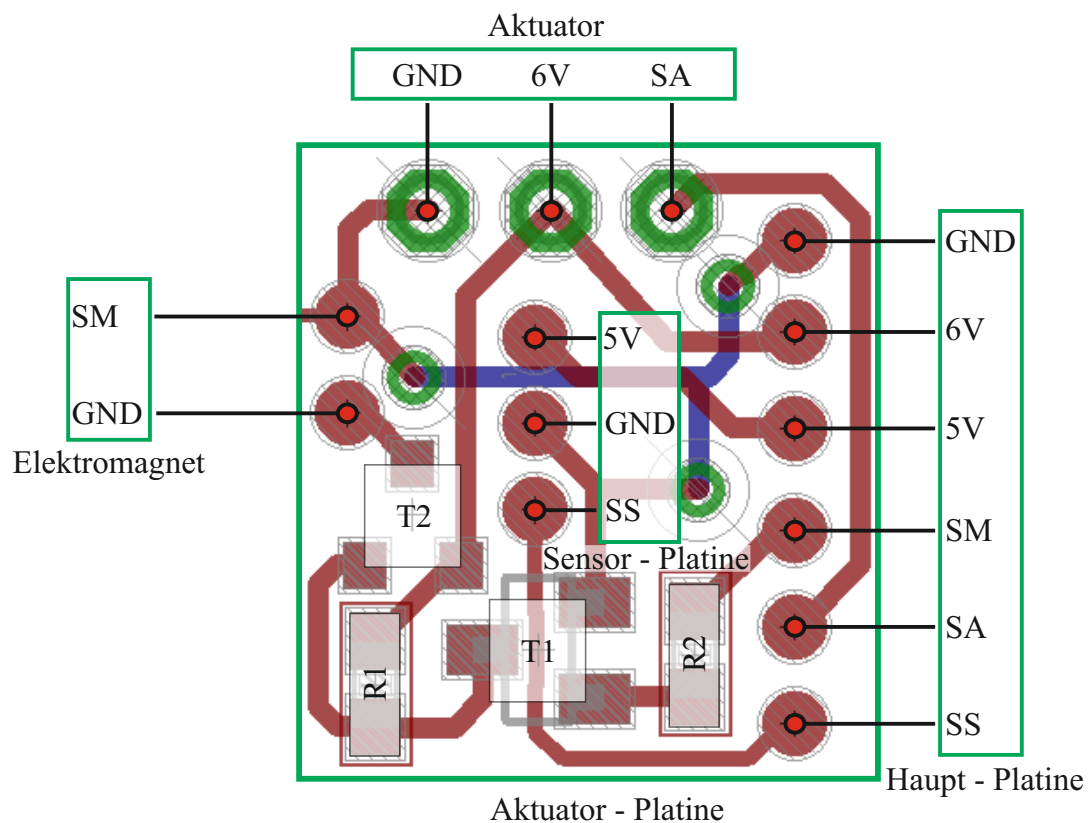


Abbildung 4.5: Schaltung der Aktuatorplatine mit Schnittstellen zu anderen Komponenten.

4.4 Erarbeitung eines Kraft–Spannungs–Polynoms

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Kraftsensor werden in weiterer Folge Messdaten aufgezeichnet. Dafür wird ein HBM–Messsystem [10] sowie ein Versuchsaufbau verwendet. Der konzipierte Kraftsensor liefert Spannungswerte an den Microcontroller, das Programm jedoch sollte Kräfte in N ausgeben. Deshalb wird ein Polynom erarbeitet, welches zu jedem Spannungswert einen Kraftwert liefert.

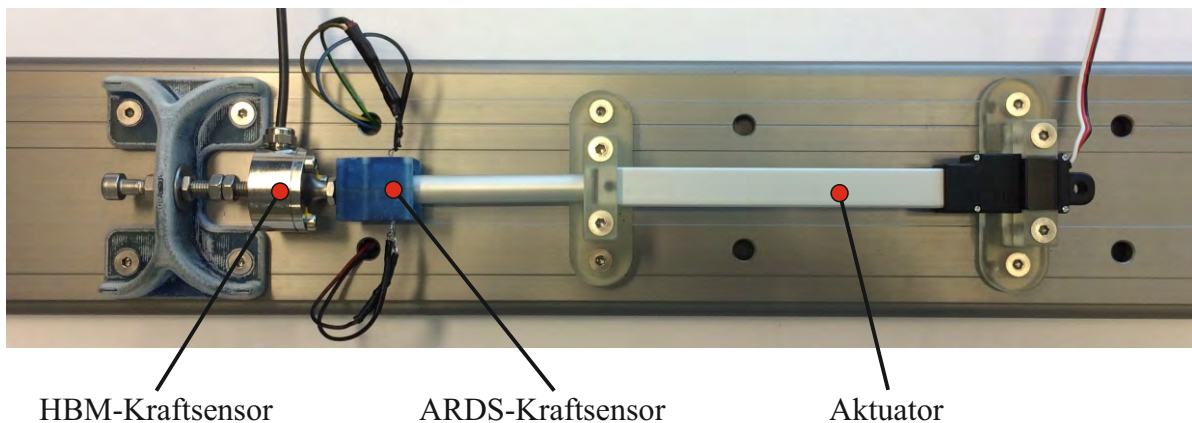


Abbildung 4.7: Versuchsaufbau zur Messung der Kraft– und Spannungs–Werte.

Messvorgang

Das HBM–Messsystem erfasst sowohl die Spannung des ARDS–Kraftsensors als auch die Kraft des HBM–Kraftsensors in Echtzeit. Um eine Kraft–Spannungs–Kurve zu erhalten, wird der ARDS–Kraftsensor mit einer über das Gehäuse eingebrachten Kraft belastet. Der Wert dieser Kraft wird mit dem HBM–Kraftsensor gemessen. Zeitgleich werden die Spannungswerte des ARDS–Kraftsensors aufgezeichnet.

Von der unbelasteten Ausgangslage aus, 0 V am ARDS–Kraftsensor und 0 N am HBM–Kraftsensor, wird das Gehäuse zunächst mit in 2 N–Schritten größer werdenden Druckkräften, bis zu einem Maximum von 20 N beaufschlagt. Danach werden von der Ausgangslage aus Zugkräfte bis -20 N aufgezeichnet.

Ergebnisse

In Abb. 4.8 sind 4 Messzyklen dargestellt. Die einzelnen Messpunkte wurden zu besseren Übersicht zu Kurven verbunden.

Aufgrund der Wiederholbarkeit der Messergebnisse wurde in einem weiteren Schritt ein quadratisches Polynom an die vorhandenen Kurven angepasst, siehe Gl. (4.2).

$$F = p_1 \cdot u_x^2 + p_2 \cdot u_x + p_3 \quad (4.2)$$

$$p_1 = -0.54271 \quad p_2 = 12.322 \quad p_3 = 0.19057$$

Mit dem in diesem Abschnitt erarbeiteten Polynom kann nun zu jeder Spannung u_x eine Kraft F bestimmt werden. Dies ermöglicht die Definition von Kraft-Schwellwerten für den Nachgiebigkeits-Modus oder auch die Aufzeichnung von auftretenden äußeren Einflüssen im passiven Modus.

Einfluss des Umgebungslichts

Wird der Spannungswert des unbelasteten ARDS-Kraftsensors bei direkter Sonneneinstrahlung mit dem Spannungswert des unbelasteten ARDS-Kraftsensors in einem geschlossenen lichtundurchlässigen Gehäuse verglichen, beträgt die gemessene Spannungsdifferenz 0.03 V. Dieser Wert stellt damit den maximalen Fehler des ARDS-Kraftsensors durch das Umgebungslicht dar.

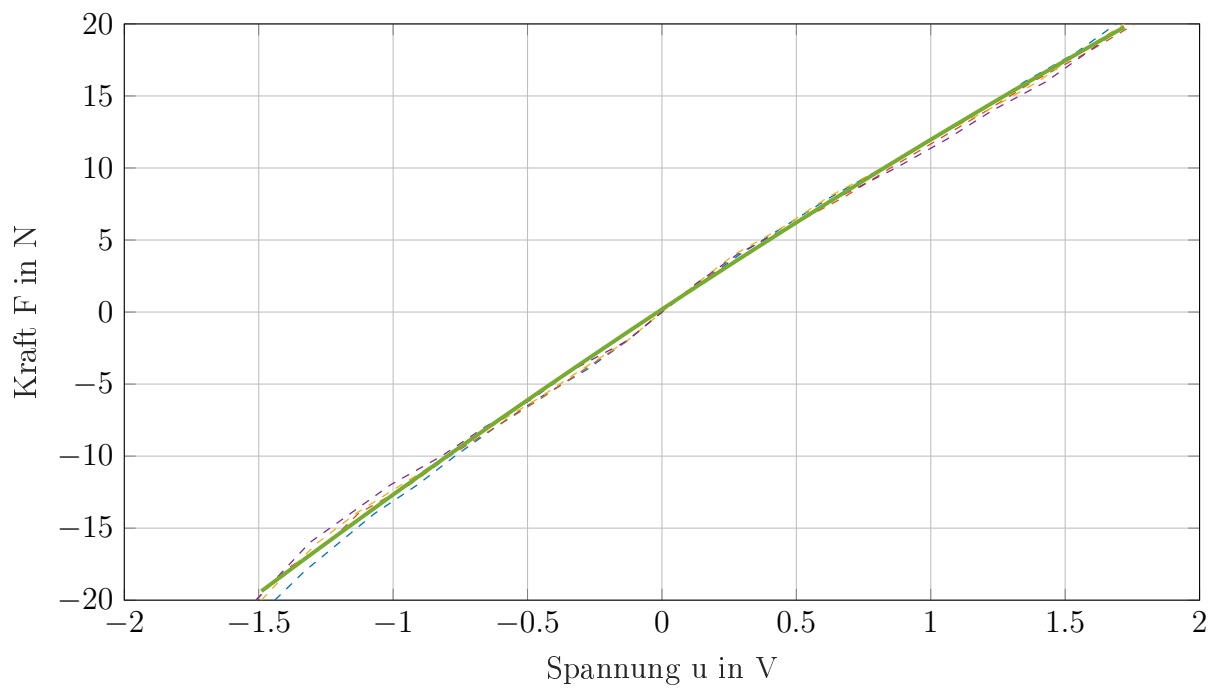
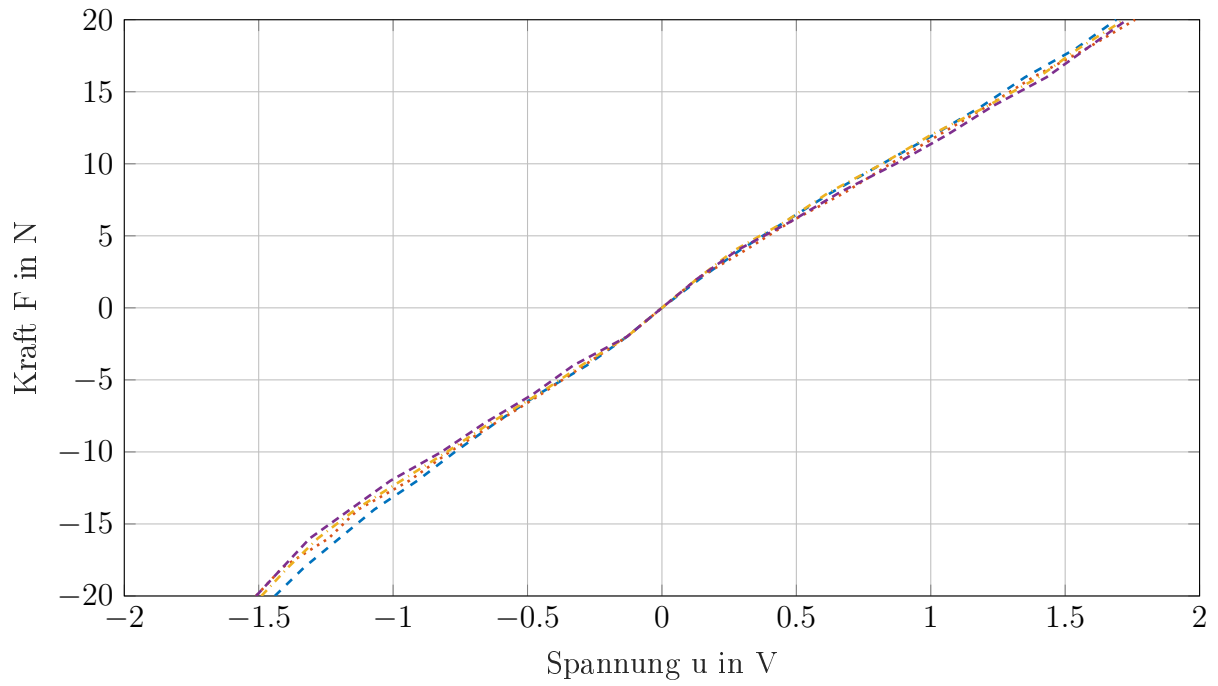


Abbildung 4.8: oben: aufgezeichnete Kraft–Spannungs–Kurven am ARDS–Kraftsensor; unten: aufgezeichnete Kraft–Spannungs–Kurven und angepasstes quadratisches Polynom.

4.5 Korrektur der Nichtlinearität der Aktuatoren

Neben den Scherengelenken, die zum Erreichen exakter Knotenpunkte ihren Einsatz finden, ist auch die Positioniergenauigkeit der Linear-Aktuatoren eine Voraussetzung, um definierte Formänderungen von ARDS durchzuführen. Deshalb wird jeder verwendete Aktuator auf einem Prüfstand, siehe Abb. 4.9, vermessen und mittels eines Korrekturpolynoms optimiert [11].

Um das ausgearbeitete Polynom dem vermessenen Aktuator zuordnen zu können, werden diese beschriftet. Eine systematische Beschriftung erleichtert zudem die Programmierung des Microcontrollers. So steht Aktuator ij für das i -te ADE und den j -ten Aktuator des i -ten ADE. Dabei bezeichnet $j = 1$ den Aktuator mit Akku, $j = 2$ den Aktuator ohne Elektronik und $j = 3$ den Aktuator mit Microcontroller.

Messvorgang

Die vom Microcontroller vorgegebenen Positionen werden vom Aktuator schrittweise angefahren. Die Schrittweite beträgt 2 mm. Diese Bewegung wird von einem Tauchankersensor aufgenommen und vom HBM-Messsystem [10] verarbeitet. Durch ein Interpolationspolynom, welches für jeden Aktuator individuell berechnet wird, erfolgt eine Korrektur des Aktuators.

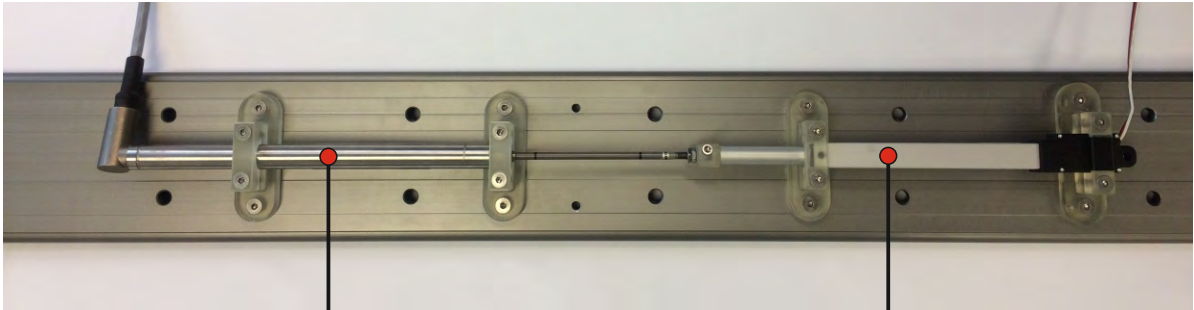
Nun wird der korrigierte Aktuator nochmals vermessen und die erhaltenen Daten wiederum aufgezeichnet.

Ergebnisse

Die aufgezeichneten Daten werden nun den Ausgangsdaten grafisch gegenübergestellt. Abb. 4.10 zeigt eine aufgezeichnete Messung des Aktuators 0013.

Aus Abb. 4.10 ist ersichtlich, dass der Fehler der Positionierung nach der Korrektur maximal 0.5 % beträgt, während vor der Korrektur mit Fehlern von bis zu 1.0 % zu rechnen war. Auch die Differenz zwischen Hin- und Rückfahrt ist nach der Korrektur minimal.

Daraus folgt, dass die Positioniergenauigkeit einzelner ADEs bei der Umordnung von ARDS um denselben Faktor höher wird.



HBM-Tauchankersensor

Aktuator

Abbildung 4.9: Prüfstand zur Verbesserung der Positioniergenauigkeit von Aktuatoren [11].

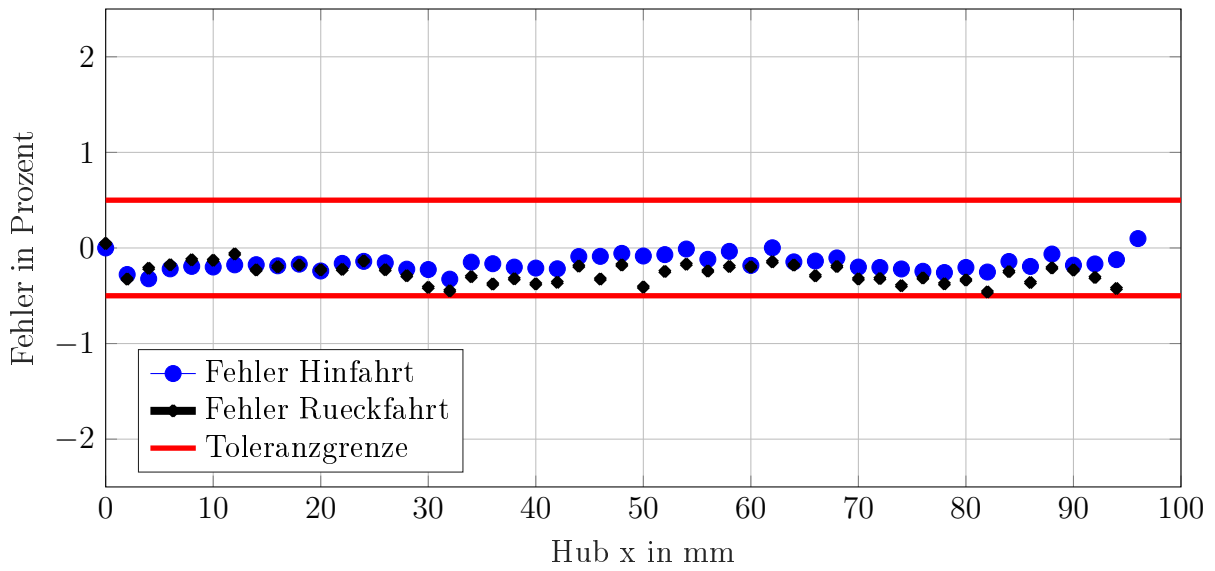
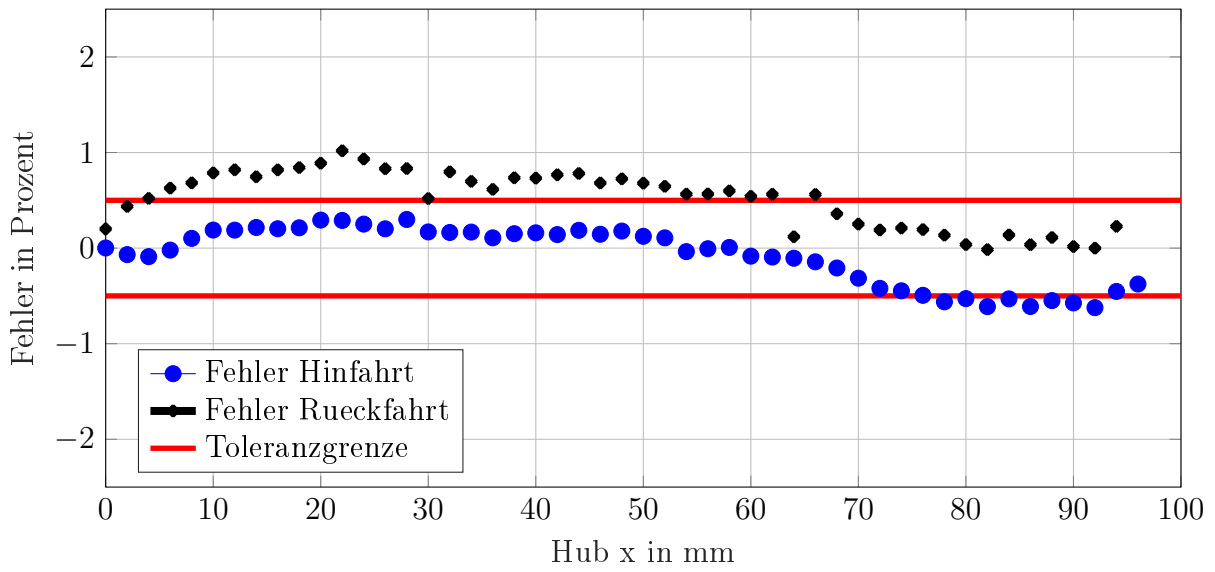


Abbildung 4.10: oben: Fehler geforderter Hub zu gemessenem Hub des unkorrigierten Aktuators; unten: Fehler geforderter Hub zu gemessenem Hub des korrigierten Aktuators.

5 Ergebnisse und Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus Versuchen mit einzelnen ADEs und ARDS beschrieben und ausgewertet. Während zunächst nur einzelne Module angesteuert werden folgt danach ein Versuch zur Nachgiebigkeit sowie ein Aufbau von mehreren Modulen, mit denen dann eine Umordnung durchgeführt wird.

5.1 Ansteuerung eines Elements

In diesem Abschnitt wird die Funktion eines einzelnen Moduls beschrieben. Durch Ansteuern der Aktuatoren variieren die Seitenlängen des dreieckigen Elements, wodurch verschiedenste Formen realisiert werden können.

Über eine Benutzeroberfläche in MATLAB können diese Befehle generiert und an ein Master-Modul weitergegeben werden. Dieses Modul kommuniziert dann mit den ADEs, siehe Abb. 5.1.

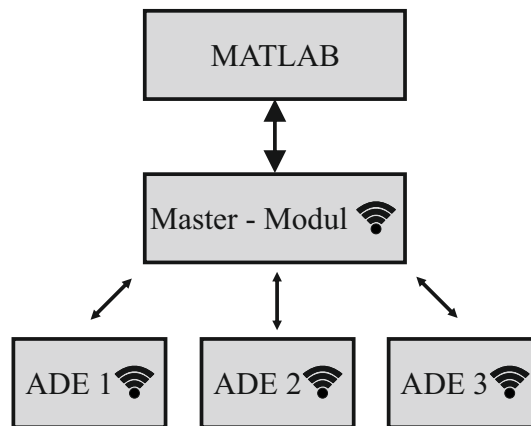
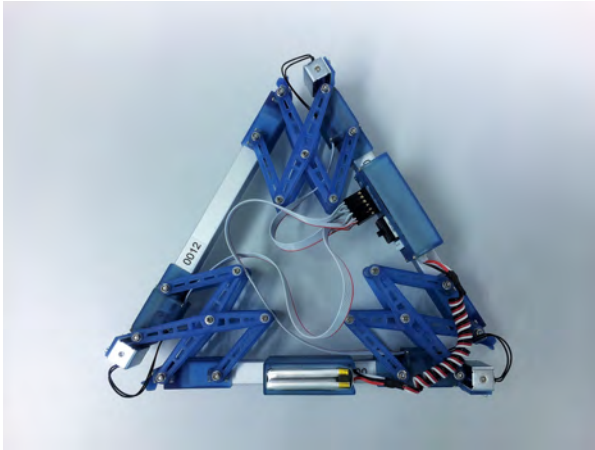


Abbildung 5.1: Kommunikation von ARDS; Datenaustausch zwischen dem Master-Modul und einzelnen ADEs.

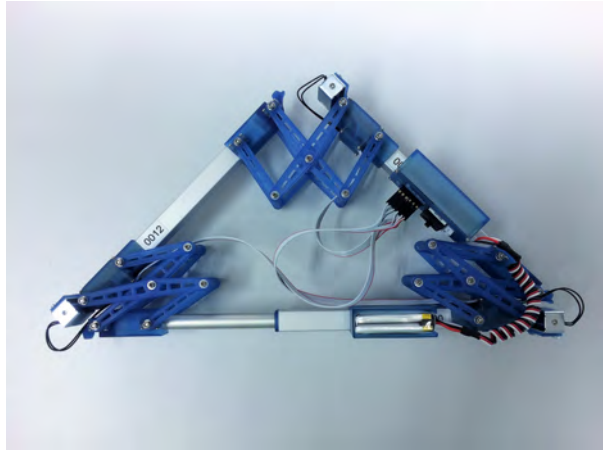
Die Übergabe der Parameter an die MATLAB-GUI geschieht nach folgendem Schema:

$$\underbrace{G}_{\text{„Go“}} \underbrace{a}_{\text{ADE}} \underbrace{x_1 \ x_2 \ x_3}_{\text{Aktuatorhöhe}} \underbrace{m_1 \ m_2 \ m_3}_{\text{Magnete}} \quad (5.1)$$

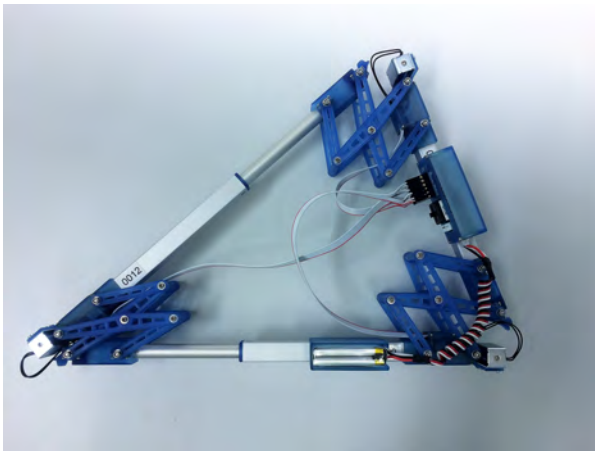
G übergibt den Befehl „Go“. Der Parameter a steht für ADE a . x_1 bis x_3 beschreiben den Hub der einzelnen Aktuatoren; sie können Werte zwischen 0 und 1000 annehmen. Die binären Variablen m_1 bis m_3 nehmen die Werte 0 oder 1, für „Magnet aus“ oder „Magnet ein“ an.



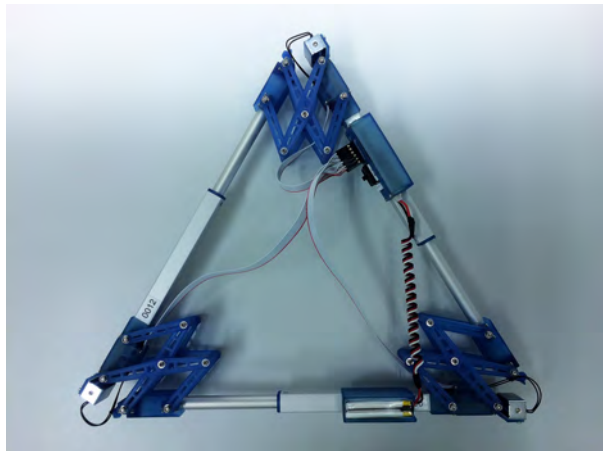
(a) 0 Aktuatoren ausgefahren, 3 eingefahren.



(b) 1 Aktuator ausgefahren, 2 eingefahren.



(c) 2 Aktuatoren ausgefahren, 1 eingefahren.



(d) 3 Aktuatoren ausgefahren, 0 eingefahren.

Abbildung 5.2: Beispiele realisierbarer Formen eines ADE.

Neben weiteren möglichen Formen eines ADE zeigt Abb. 5.2 (a) die kleinstmögliche und (d) die größtmögliche Form. (b) und (c) stellen einen maximalen sowie minimalen realisierbaren Winkel dar.

5.2 Nachgiebigkeit

Für die Versuche eines ADE im nachgiebigen Modus wurde der Microcontroller mit dem Programm „compliance.ino“ bespielt, siehe Anhang. In diesem Programm kann ein Schwellwert *limit* definiert werden, welcher jene Kraft beschreibt, ab der der Roboter aktiv nachgiebt.

Abb. 5.4 zeigt den Ablauf des Programms zur Nachgiebigkeit in einem Flussdiagramm. Beim Einschalten des Microcontrollers und Start des Programms werden die Kraftsensoren initialisiert und die drei Aktuatoren in ihre Mittelstellung gebracht. Danach startet die Regelung der Nachgiebigkeit. Die bei einer externen Last eingelesenen Spannungswerte werden mit dem Kraft–Spannungs–Polynom in Kräfte umgerechnet und können somit mit dem festgelegten Wert *limit* verglichen werden. Steigt die einwirkende äußere Druckkraft über den zuvor definierten Schwellwert, sendet der Microcontroller das Signal zum Einfahren an den entsprechenden Aktuator. Ebenso bei überschreitenden Zugkräften, bei denen der Aktuator ausfährt. Die Schrittweite kann mit *step* definiert werden. Nach überprüfen der Kräfte wird die vorgegebene Aktuatorposition x_i mit den maximal und minimal möglichen Positionen x_{\max} und x_{\min} verglichen. Diese Regelung wird bei den drei Aktuator–Sensor–Paaren ausgeführt.

Abb. 5.5 zeigt eine aufgezeichnete Messung, bei der ein ADE durch händisch eingeleitete Zug- und Druckkräfte geformt wurde. Bei diesem Versuch wurde jede Seitenkante einzeln belastet. Dies erhöht die Lesbarkeit der zusammengehörigen Diagramme. In Abb. 5.3 sind die realisierten Formen zu bestimmten Zeitpunkten der Messung dargestellt. Zudem entsprechen die Farben und Linienarten aus Abb. 5.3 denen in Abb. 5.5.

Aus den Diagrammen in Abb. 5.5 ist zudem zu entnehmen, dass die einzelnen Seitenkanten des ADE bei dem definierten Schwellwert von 1.4 N nachgeben. Die dargestellten Kraft–Zeit Kurven der einzelnen Sensoren sind ungefiltert. Daher ist der Einfluss sich bewegender Aktuatoren auf die Kraftmessung an anderen Seitenkanten ersichtlich. Durch die Längenänderung eines Aktuators und der daraus resultierenden Bewegung aller Auflager kommt es zu Störungen. Dies ist unter anderem auf die Reibung zwischen Auflager und Arbeitsfläche zurückzuführen.

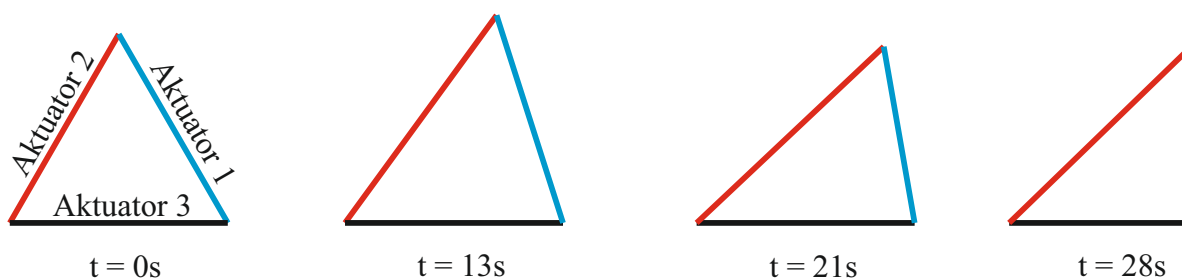


Abbildung 5.3: Angefahrene Formen der aufgezeichneten Messung zur Nachgiebigkeit eines ADE.

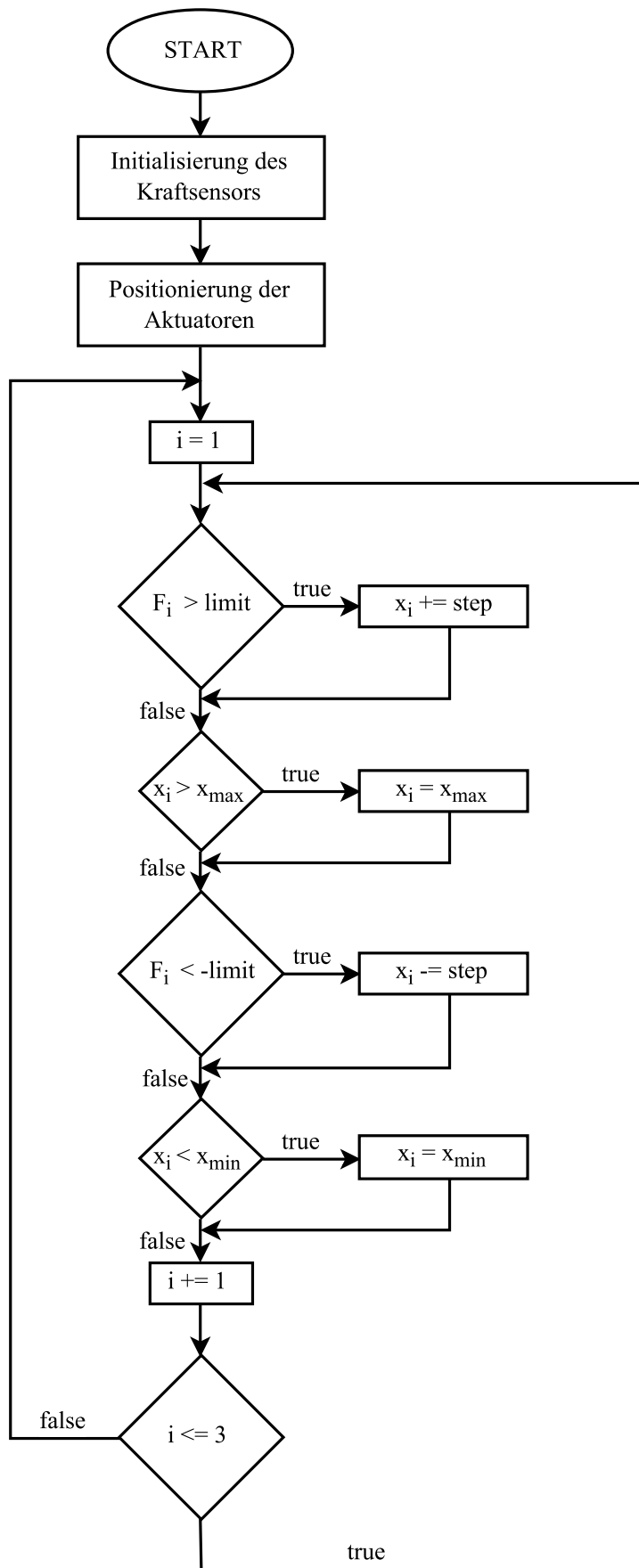


Abbildung 5.4: Flussdiagramm des Nachgiebigkeitsmodus.

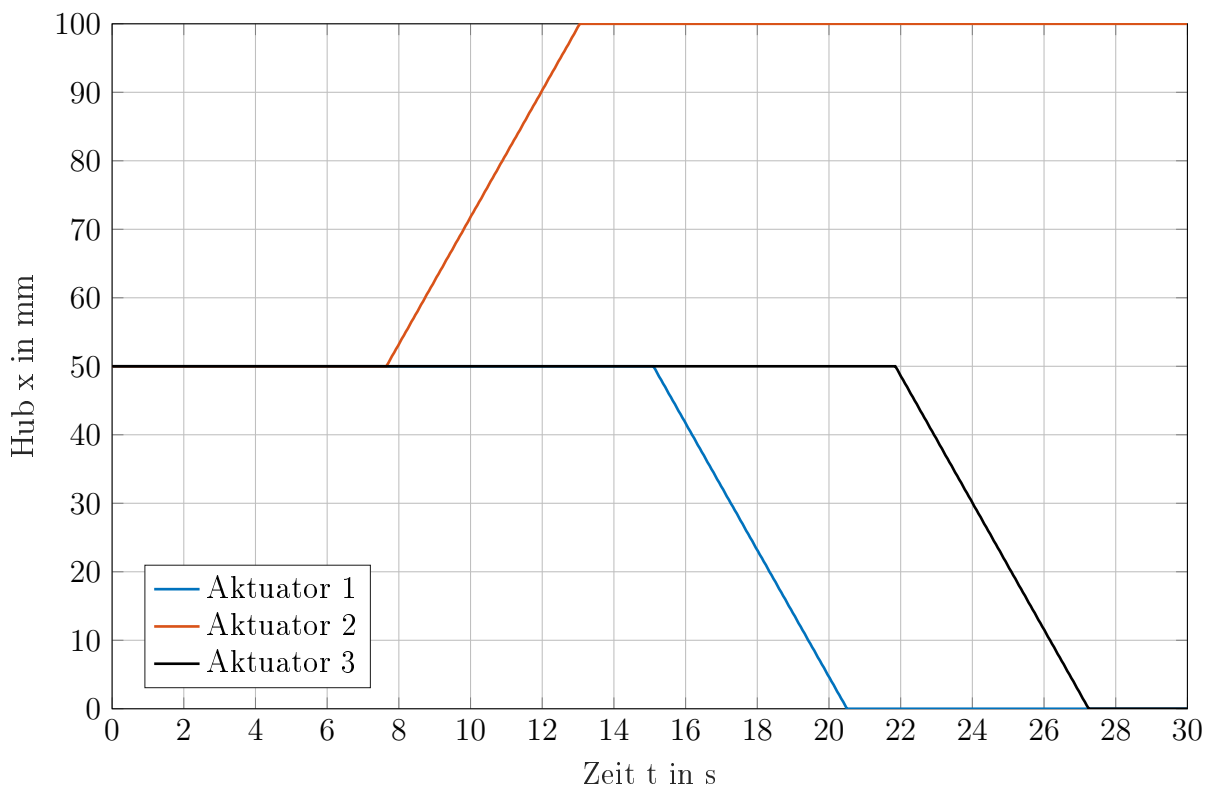
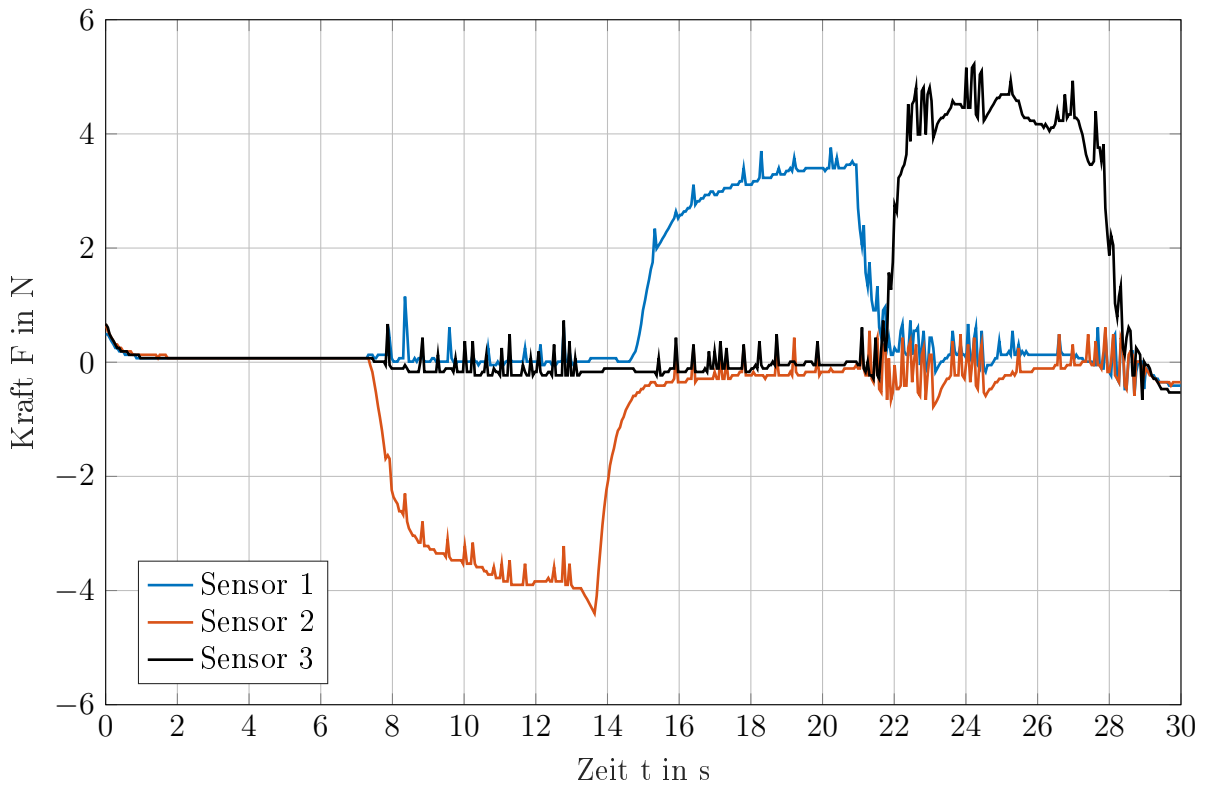


Abbildung 5.5: oben: Aufgezeichnete Kraft-Zeit-Kurven der drei Kraftsensoren im Nachgiebigkeitsmodus; unten: Aufgezeichnete Hub-Zeit-Kurven der drei Aktuatoren.

5.3 Umordnung von ARDS

Durch den Aufbau von vier ADEs, siehe Abb. 5.6, kann das geforderte Umordnen realisiert werden. Hierdurch kann ein einzelnes ADE von seiner Grundposition zu einer weiteren freien Grundposition gebracht werden.

Die erste Struktur von ARDS wird manuell assembliert. Durch den Schnappmechanismus der Anbindungen ist es möglich, die einzelnen Module formschlüssig zu verbinden. In der Ausgangslage beträgt jeder Winkel, den zwei Seitenkanten eines Moduls einschließen 60° , siehe Abb. 5.7 (a). Durch Ausfahren einzelner Aktuatoren ist es möglich, einen der drei Winkel jedes ADE auf 90° zu erhöhen, siehe Abb. 5.7 (c). Der erforderliche Hub x für diesen rechten Winkel ist zu Gl. (5.2) gegeben.

$$x = \frac{2 \cdot L_0}{\sqrt{2}} - L_0 = 94.9 \text{ mm} \quad (5.2)$$

Aufgrund von Spiel in den Kugel- und Reiblagern sowie wirkenden Reibwiderständen am Schnappmechanismus führt ein Hub von 94.9 mm nicht zum Einschnappen der Anbindung. Um eine Anbindung herstellen zu können, wurde in Versuchen ermittelt, welcher Hub benötigt wird um genügend Druck auf den Schnappmechanismus der Anbindung aufzubauen. Das Ergebnis dieser Versuche ist ein Hub von 96 mm. Mit der Hubänderung erhöht sich auch der angestrebte Winkel von 90° auf einen größeren Winkel von 90.41° . Dies kann dazu führen, dass nur die außen liegenden Anbindungen einschnappen. Deshalb wird in einem weiteren Schritt der Hub wieder auf 94.9 mm verringert. Daraus resultiert das Einschnappen der inneren Anbindungen.

Werden die Anbindungen an der gegenüberliegenden Seite, durch Aktivieren der Elektromagneten, gelöst, können die Aktuatoren einfahren, siehe Tab. 5.1. Das rot markierte ADE befindet sich nach diesem Vorgang auf einer weiteren freien Grundposition, siehe Abb. 5.7 (e). Somit wurde eine Umordnung durchgeführt.

Die vorgegebenen Parameter zu Abb. 5.7 sind Tab. 5.1 zu entnehmen.

Abbildung	Befehl	a	x_1	x_2	x_3	m_1	m_2	m_3
5.7 (a)	G	1	0	0	0	0	0	0
	G	2	0	0	0	0	0	0
	G	3	0	0	0	0	0	0
	G	4	0	0	0	0	0	0
5.7 (b)	G	1	0	0	800	0	0	0
	G	2	0	0	800	0	0	0
	G	3	0	0	800	0	0	0
	G	4	0	0	800	0	0	0
5.7 (c)	G	1	0	0	960	0	0	0
	G	2	0	0	960	0	0	0
	G	3	0	0	960	0	0	0
	G	4	0	0	960	0	0	0
5.7 (c)	G	1	0	0	949	0	0	0
	G	2	0	0	949	0	0	0
	G	3	0	0	949	0	0	0
	G	4	0	0	949	0	0	0
5.7 (d)	G	1	0	0	800	0	0	0
	G	2	0	0	800	0	0	0
	G	3	0	0	800	1	0	0
	G	4	0	0	800	0	1	0
5.7 (e)	G	1	0	0	0	0	0	0
	G	2	0	0	0	0	0	0
	G	3	0	0	0	0	0	0
	G	4	0	0	0	0	0	0

Tabelle 5.1: Parameter zu Abb. 5.7, vgl. Gl. (5.1).

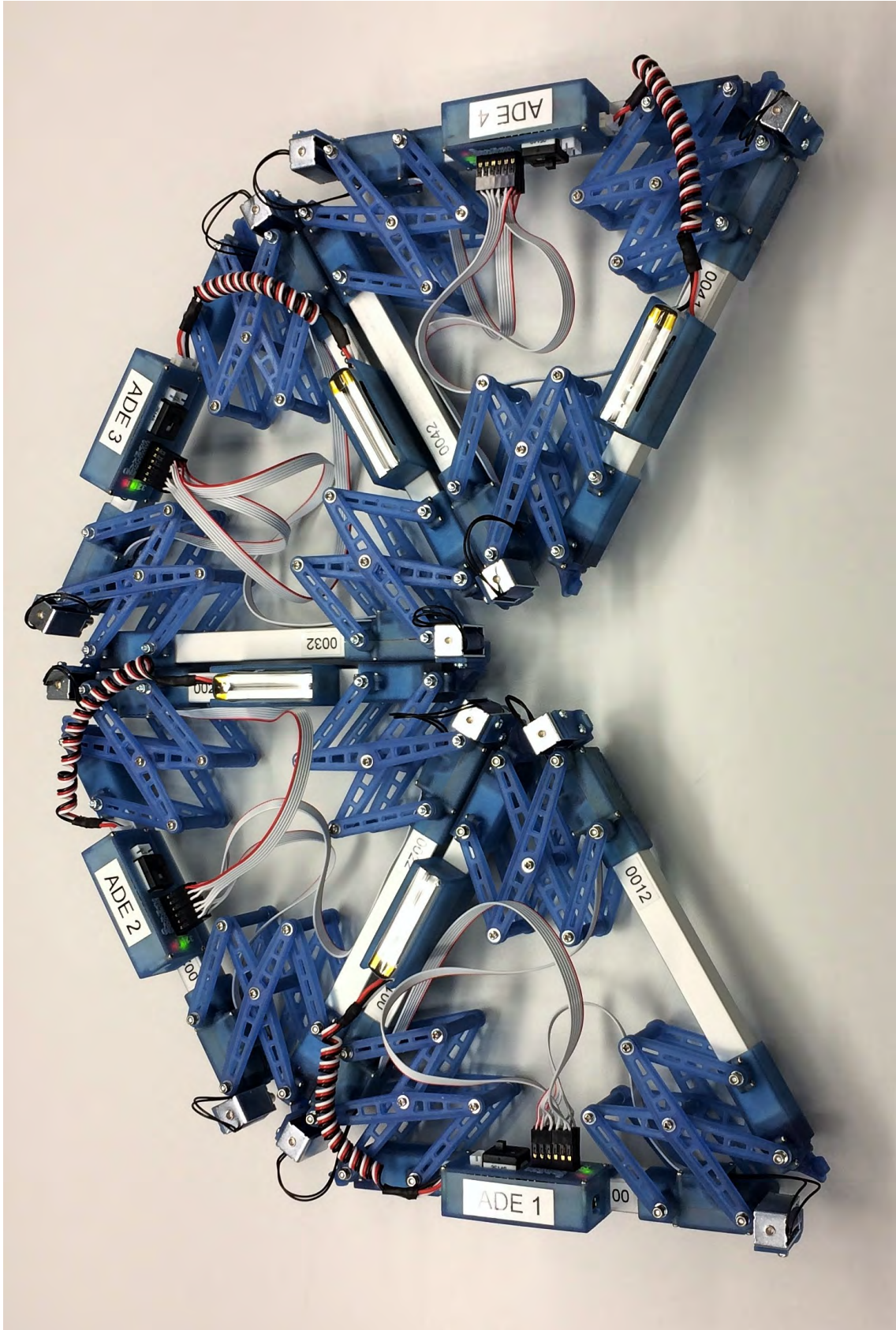


Abbildung 5.6: ARDS bestehend aus vier Elementen (ADEs).

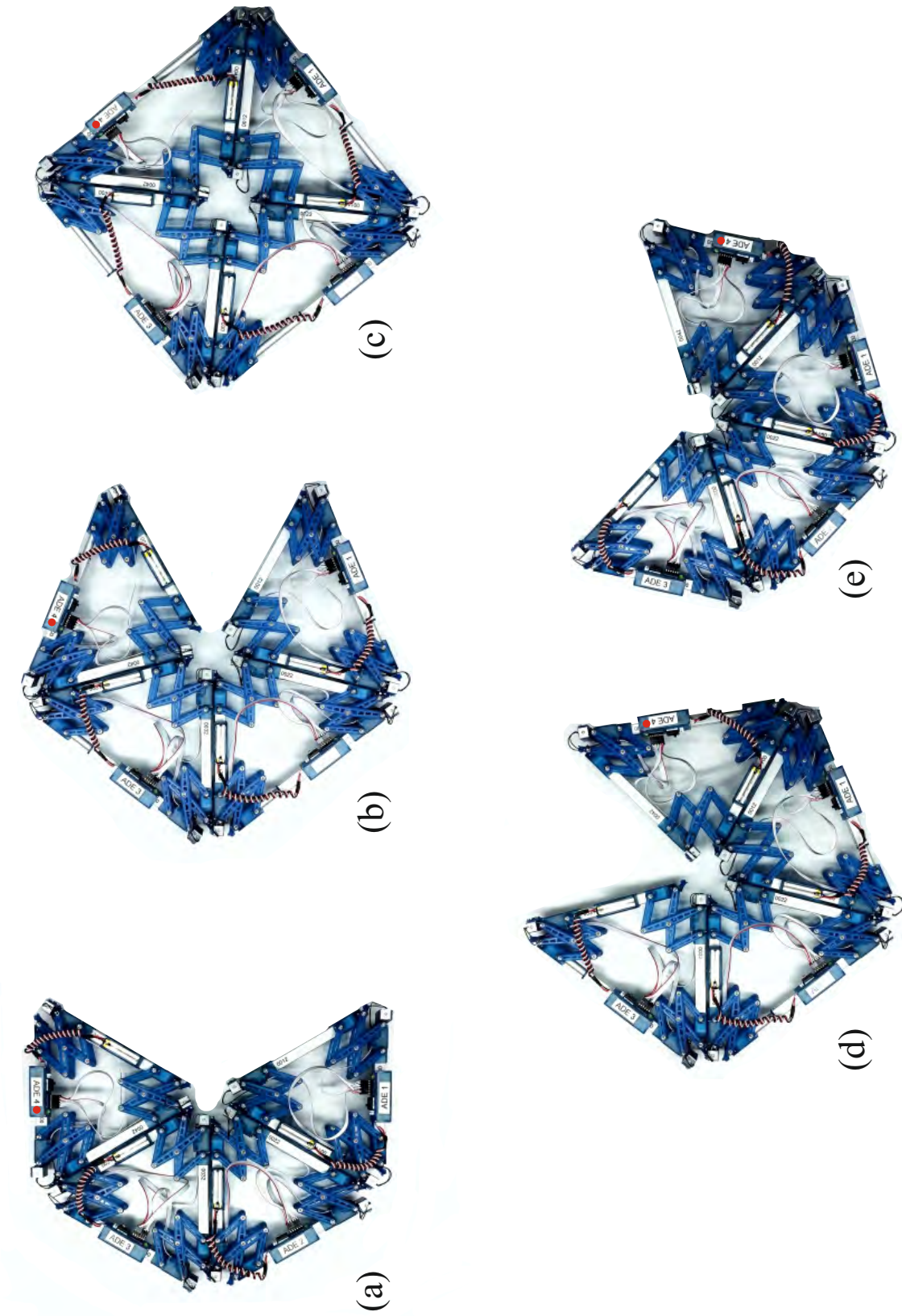


Abbildung 5.7: Praktische Durchführung der Umordnung von ARDS.

6 Zusammenfassung & Ausblick

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein adaptiver Roboter mit dreieckiger Grundstruktur entwickelt.

Durch den Einsatz eines MJP-3D-Druckers war es möglich, kompakte Konstruktionen umzusetzen. So konnte ein neuartiger Kraftsensor entwickelt und hergestellt werden, der auf dem Prinzip einer optischen Wegmessung basiert. Mit dieser Sensorik war es in weiterer Folge auch möglich, dass der entwickelte Roboter auf äußere Einflüsse, wie beispielsweise auftretende Kräfte, reagiert.

Weiters sind biegesteife Scherengelenke ausgelegt, konstruiert und implementiert. Versuche haben gezeigt, dass die auf die Scherengelenke zurückzuführenden angestrebten definierten Knotenpunkte auch in den praktischen Aufbauten eingehalten werden. Den Beweis liefert die in Abb. 5.7 festgehaltene Umordnung, die nur mit exakten Knotenpunkten verrichtet werden kann.

Um die Genauigkeit der angestrebten Geometrien weiter zu erhöhen, wurden alle Aktuatoren - sie bilden die Seitenkanten eines dreieckigen Elements - auf einem Prüfstand vermessen und mittels eines errechneten Korrekturpolynoms verbessert.

Eine aktive Anbindung konnte durch einen federvorgespannten Mechanismus in Verbindung mit einem Elektro-Hub-Magneten umgesetzt werden. Der Versuch der Umordnung hat gezeigt, dass die aktuelle Version dieser Anbindung funktioniert und auch in zukünftigen Versionen zum Einsatz kommen wird.

Mittels der entwickelten Platinen, welche teilweise direkt in die 3D-Druck-Teile integriert sind, ist die Fehleranfälligkeit auf ein Minimum reduziert. Mit dem Einsatz solcher integrierten Platinen wurden Kabel eingespart und das Gesamtsystem übersichtlicher und wartungsfreundlicher.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die anfangs gestellten Anforderungen an das System erfüllt wurden. ARDS stellt den weltweit ersten ebenen selbst-rekonfigurierbaren adaptiven modularen Roboter dar, dessen Funktion auch in Versuchen gezeigt werden konnte. Zu diesem Zeitpunkt und einem bestehenden System - ARDS - sind jedoch schon Verbesserungen geplant. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt kurz angesprochen.

Ausblick

Auf Basis des funktionierenden Systems könnten in Zukunft noch Punkte verbessert oder auf das System ARTS umgesetzt werden.

Unter anderem bildet die Kraftmesseinheit mit ihren dünnen Membranen eine Schwachstelle. Der Einfluss des UV-Lichts lässt den verwendeten Kunststoff altern und spröde werden. Abhilfe hierfür würde ein Sensor mit derselben Wirkweise, jedoch anderen Materialien schaffen. Angedacht wäre ein Aluminium Gehäuse in Kombination mit stählernen Spiral- oder Tellerfedern, welche die Membran ersetzen würden.

Ein weiterer Schritt im Bereich der adaptiven Roboter wäre die Umsetzung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse auf ARTS. Noch weiter miniaturisierte Kraftmesseinheiten sowie Anbindungen könnten in bestehende ARTS Strukturen integriert werden.

Die entwickelten Scherengelenke hingegen können in dieser Form nicht auf ARTS angewandt werden. Hier bedarf es eines neuen Lösungsansatzes zur Erzeugung definierter Drehpunkte außerhalb der Elementgeometrie.

7 Anhang

Bezeichnungen und Kennwerte der Elektronik-Komponenten

Bauteil	Schaltung	Bezeichnung	Wert	Einheit
Widerstand	R_{LED}	RND0805 1 1.5K	1.5	$k\Omega$
Widerstand	R_{PD}	CRW08053M24FKEA	3.24	$M\Omega$
Widerstand	R_{TP}	RND0805 1 47k	47	$k\Omega$
Kondensator	C_{TP}	X7R0805CE100N	100	nF

Tabelle 7.1: Werte der Widerstände und Kondensatoren aus der Schaltung der Kraftsensorik.

Bauteil	Schaltung	Bezeichnung	Wert	Einheit
Widerstand	R_1	RC0603JR-0710KL	10	$k\Omega$
Widerstand	R_2	RC0603JR-0710KL	10	$k\Omega$
npn-Transistor	T_1	BC847ALT1G	-	-
p-Kanal Mosfet	T_2	SI2323DS-T1-E3	-	-

Tabelle 7.2: Verwendete Komponenten zur Assemblierung der Aktuatorplatine.

Bauteil	Schaltung	Bezeichnung	Wert	Einheit
Widerstand	R_1	SMD-0603 220	220	Ω
Widerstand	R_2	SMD-0603 220	220	Ω
Widerstand	R_3	RC0603JR-0710KL	10	$k\Omega$
Widerstand	R_4	RC0603JR-0710KL	10	$k\Omega$
Widerstand	R_5	SMD-0603 220	220	Ω
Kondensator	C_1	GRM219R60J106KE19D	10	μF
p-Kanal Mosfet	T_1	SI2323DS-T1-E3	-	-
npn-Transistor	T_2	BC847ALT1G	-	-
Buzzer	BZ	SMT-0440-S-R	-	-
Microcontroller	-	Arduino Nano V3.0 ATMEGA328P	-	-
Leuchtdiode rot	$LED1$	SMD-LED 1206 RT	-	-
Leuchtdiode grün	$LED2$	LED EL 1206 GR1	-	-
Schiebeschalter	S	SS 25149 NH	-	-

Tabelle 7.3: Verwendete Komponenten zur Assemblierung der Hauptplatine.

Schaltung	Bezeichnung
PD+	positiver Pin der Photodiode
PD-	negativer Pin der Photodiode
LED+	positiver Pin der Leuchtdiode
LED-	negativer Pin der Leuchtdiode
6V	Versorgungsspannung durch Akku
5V	Versorgungsspannung durch Microcontroller
GND	Ground
SA	Signal Aktuator
SM	Signal Magnet
SS	Signal Sensorik

Tabelle 7.4: Abkürzungen und dazugehörige Bezeichnungen.

Prgramm für den Nachgiebigkeitsmodus

```
1 //*****
2 // Autor: NEURAUTER Rene, Dateiname: compliance.ino
3 // Programm zur Realisierung einer Nachgiebigkeit am Roboter ARDS.
4 //*****
5
6
7 #include <Servo.h>
8
9 #define DigPinServo1 3
10 #define DigPinServo2 4
11 #define DigPinServo3 5
12 #define ledpin 3, 6
13
14 // Setzen des Schwellwerts fuer einwirkende Kraefte
15 float limit = 1.2; //Schwellwert in N
16
17
18 Servo ate_servo1;
19 Servo ate_servo2;
20 Servo ate_servo3;
21
22 // Einfuehrung der Startpositionen der einzelnen Aktuatoren
23 int x1 = 1500;
24 int x2 = 1500;
25 int x3 = 1500;
26 // Initialisierung der Spannungswerte
27 long int y1 = 0;
28 long int y3 = 0;
29 long int y2 = 0;
30
31 int x_step = 5;
32
33 float voltage1 = 0.0;
34 float voltage2 = 0.0;
35 float voltage3 = 0.0;
36
37 // Koeffizienten fuer das Kraft-Spannungs-Polynom
38 float p1 = -0.54271;
39 float p2 = 12.322;
40 float p3 = 0.19057;
41
42 float time0; // Startzeitpunkt
43
44 void setup()
45 {
46   pinMode(A0, OUTPUT);
47   pinMode(A2, OUTPUT);
48   pinMode(A3, OUTPUT);
49   pinMode(A4, INPUT);
50   pinMode(6, OUTPUT);
```

```

51 //pinMode(D3, OUTPUT);
52 analogWrite(A2, 200);
53 analogWrite(A3, 0);
54 analogWrite(A0, 255);
55 digitalWrite(6, LOW);
56 // digitalWrite(D3, HIGH);
57 // Bringe Aktor in Ausgangslage:
58 ate_servo1.writeMicroseconds(1500);
59 ate_servo2.writeMicroseconds(1500);
60 ate_servo3.writeMicroseconds(1500);
61 delay(6000);
62
63 ate_servo1.attach(DigPinServo1);
64 ate_servo2.attach(DigPinServo2);
65 ate_servo3.attach(DigPinServo3);
66 Serial.begin(115200);
67
68
69
70 // Nullsetzen der Spannung an den Kraftsensoren
71 for (int i = 0 ; i < 50 ; i++)
72 {
73     y1 = y1 + analogRead(A6);
74 }
75 // Gemittelter Spannungswert fuer Sensor 1
76 y1 = y1 / 50;
77
78 for (int i = 0 ; i < 50 ; i++)
79 {
80     y2 = y2 + analogRead(A4);
81 }
82 // Gemittelter Spannungswert fuer Sensor 2
83 y2 = y2 / 50;
84
85 for (int i = 0 ; i < 50 ; i++)
86 {
87     y3 = y3 + analogRead(A5);
88 }
89 // Gemittelter Spannungswert fuer Sensor 3
90 y3 = y3 / 50;
91
92 Serial.println("%time(s) F1(N) F2(N) F3(N) x1(mm) x2(mm) x3(mm)");
93
94 delay(2000); // Aktivieren einer LED nach 2 sek zur Auswertung
95               aufgenommenener Videos
96 analogWrite(A3, 200);
97
98 time0 = millis();
99 }
100 #define detailed_output 0 //0 .. zur Kopierung von Daten in Maltab, 1 ..
    zur Daten-Visualisierung

```

```

101 #define no_output 0 //1 .. keine Ausgabe zur Optimierung der Rechendauer
102
103 // Konvertieren der Spannung am Sensor in V zu einer Kraft F in N
104 float Voltage2Force(float v)
105 {
106     return p1 * v * v + p2 * v + p3;
107 }
108
109
110 void loop()
111 {
112     voltage1 = (float) analogRead(A6) / 1023.*5. - y1 * 5. / 1023.;
113     voltage2 = (float) analogRead(A4) / 1023.*5. - y2 * 5. / 1023.;
114     voltage3 = (float) analogRead(A5) / 1023.*5. - y3 * 5. / 1023.;
115
116     float F1 = Voltage2Force(voltage1);
117     float F2 = Voltage2Force(voltage2);
118     float F3 = Voltage2Force(voltage3);
119
120     float t = (float)(millis() - time0) / 1000.;
121
122     if (!no_output && t <= 30)
123     {
124
125
126         if (detailed_output) Serial.print(" time: ");
127
128         Serial.print(t);
129
130         if (detailed_output) Serial.print(" F1: ");
131         else Serial.print(" ");
132         Serial.print(F1);
133
134         if (detailed_output) Serial.print(" F2: ");
135         else Serial.print(" ");
136         Serial.print(F2);
137
138         if (detailed_output) Serial.print(" F3: ");
139         else Serial.print(" ");
140         Serial.print(F3);
141
142         if (detailed_output) Serial.print(" x1: ");
143         else Serial.print(" ");
144         Serial.print((x1 - 1000.) / 10.);
145
146         if (detailed_output) Serial.print(" x2: ");
147         else Serial.print(" ");
148         Serial.print((x2 - 1000.) / 10.);
149
150         if (detailed_output) Serial.print(" x3: ");
151         else Serial.print(" ");
152         Serial.print((x3 - 1000.) / 10.);

```

```

153     Serial.println("");
154 }
155
156
157 if (x1 <= 2000 && x1 >= 1000)
158 {
159     if (F1 > limit)
160     {
161         x1 = x1 - x_step;
162         ate_servo1.writeMicroseconds(x1);
163     }
164
165     if (F1 < -limit)
166     {
167         x1 = x1 + x_step;
168         ate_servo1.writeMicroseconds(x1);
169     }
170     if (x1 < 1000) {
171         x1 = 1000;
172     }
173     if (x1 > 2000) {
174         x1 = 2000;
175     }
176 }
177
178 if (x2 <= 2000 && x2 >= 1000)
179 {
180     if (F2 > limit)
181     {
182         x2 = x2 - x_step;
183         ate_servo2.writeMicroseconds(x2);
184     }
185
186     if (F2 < -limit)
187     {
188         x2 = x2 + x_step;
189         ate_servo2.writeMicroseconds(x2);
190     }
191     if (x2 < 1000) {
192         x2 = 1000;
193     }
194     if (x2 > 2000) {
195         x2 = 2000;
196     }
197 }
198
199 if (x3 <= 2000 && x3 >= 1000)
200 {
201     if (F3 > limit)
202     {
203         x3 = x3 - x_step;
204         ate_servo3.writeMicroseconds(x3);

```

```
205     }
206
207     if (F3 < -limit)
208     {
209         x3 = x3 + x_step;
210         ate_servo3.writeMicroseconds(x3);
211     }
212     if (x3 < 1000) {
213         x3 = 1000;
214     }
215     if (x3 > 2000) {
216         x3 = 2000;
217     }
218 }
219 delay (50);
220
221 }
```

	Koeffizienten des Interpolationspolynoms $p_{Hinfahrt} = a_1 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x + a_4$ und $p_{Rückfahrt} = b_1 \cdot x^3 + b_2 \cdot x^2 + b_3 \cdot x + b_4$											
Aktuator	a_1	a_2	a_3	a_4	b_1	b_2	b_3	b_4				
0011	-0.000004611821366	0.0006070838	0.98726206	-0.23149607	-0.000005123606185	0.0007141891	0.98053844	-0.44169463				
0012	0.000001543827774	-0.0000016840	0.99169686	-0.33482277	0.000004263330885	-0.0003850967	1.00524837	-0.64785594				
0013	-0.000004720093829	0.0008643744	0.96512293	0.13386304	-0.000005552297247	0.0009998876	0.95811074	-0.34648738				
0021	-0.000001013733803	0.0002600800	0.99134347	-0.10014529	-0.000001837197143	0.0003397710	0.98989491	-0.45476984				
0022	-0.000011349076870	0.0016054521	0.95379649	-0.01695749	-0.000010865697866	0.0016227936	0.94568211	-0.39196808				
0023	0.000003516330433	0.0004893301	0.92591072	-0.32276163	0.000005680136508	0.0001864456	0.93482233	-0.76403899				
0031	-0.000018016930499	0.0021144340	0.96861586	0.26723140	-0.000018858522536	0.0022102096	0.96690936	-0.30455901				
0032	0.000001281702334	0.0001078625	0.98796558	-0.16594644	0.000002948763785	-0.0000136592	0.98567112	-0.62458542				
0033	-0.000003436415168	0.0011596684	0.92310540	0.06282604	-0.000000589165963	0.0007060235	0.94264563	-0.36385679				
0041	-0.000006803430415	0.0021194995	0.85482022	0.12078972	-0.000010007514356	0.0026090022	0.83248599	-0.12658718				
0042	-0.000005662077328	0.0007595182	0.98103712	-0.24473973	-0.000002818095694	0.0002807163	1.00071168	-0.67825873				
0043	-0.000003475489017	0.0005758063	0.98883127	-0.25207486	-0.000001509743869	0.0003148874	0.99402070	-0.63565264				

Tabelle 7.5: Koeffizienten der Korrekturpolynome der Aktuatoren.

Literaturverzeichnis

- [1] 3D systems, ProJet 3510 HD. *ProJet 3500 SD and HD*. Rev. 1.0.
- [2] Actuonix Motion Devices Inc, L12 Actuator. *Miniature Linear Motion Series*, Sept. 2016. Rev. E.
- [3] H. Ahmadzadeh, E. Masehian, and M. Asadpour. Modular Robotic Systems: Characteristics and Applications. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 81(3-4):317–357, 2016.
- [4] B. K. An. EM-Cube: Cube-shaped, self-reconfigurable robots sliding on structure surfaces. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3149–3155, 2008.
- [5] R. F. M. Garcia, J. D. Hiller, K. Stoy, and H. Lipson. A vacuum-based bonding mechanism for modular robotics. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(5):876–890, 2010.
- [6] J. Gerstmayr and M. Pieber. Modular, self-reconfigurable robot system. PC-T/EP2016/073703, 2016.
- [7] G. Hamlin and A. Sanderson. A novel concentric multilink spherical joint with parallel robotics applications. *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1267–1272, 1994.
- [8] G. Hamlin and A. Sanderson. TETROBOT modular robotics: prototype and experiments. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS '96*, 2:390–395, 1996.
- [9] K. V. Hornweder. A Chronological Survey of Modular Self-Reconfigurable Robots. 2011.
- [10] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, MX840B. *Quantum X Universalmeßverstärker*. Rev. 1.0.
- [11] P. Kaser. Prüfstand zur Verbesserung der Positioniergenauigkeit von Aktuatoren bei zellularen Robotern. Bachelor thesis, Leopold Franzens Universität Innsbruck, November 2016.
- [12] Kingbright, L-934F3BT. *Infra-Red Emitting Diode*, Sept. 2006. Rev. 4.0.

- [13] A. Lyder, R. F. M. Garcia, and K. Stoy. Mechanical design of Odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, pages 883–888, 2008.
- [14] J. Neubert and H. Lipson. Soldercubes: a self-soldering self-reconfiguring modular robot system. *Autonomous Robots*, 40(1):139–158, 2015.
- [15] M. Pieber and J. Gerstmayr. An Adaptive Robot with Tetrahedral Cells. *Proceedings of the 4th Joint International Conference on Multibody System Dynamics, Montreal, Canada*, 2016.
- [16] M. Pieber and J. Gerstmayr. A framework for cellular robots with tetrahedral structure. pages S. 19–20. Proceedings of the OAGM & ARW Joint Workshop. Vision, Automation and Robotics. May 10-12, 2017, Palais Eschenbach, Vienna. Graz: Technische Universität Graz, 2017.
- [17] J. W. Romanishin, K. Gilpin, and D. Rus. M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4288–4295, 2013.
- [18] Vishay Semiconductors, TEFD4300. *Silicon PIN Photodiode*, Nov. 2011. Rev. 1.1.
- [19] V. Zykov, P. Williams, N. Lassabe, and H. Lipson. Molecubes Extended : Diversifying Capabilities of Open-Source Modular Robotics. *Iros 2008*, page 12, 2008.

Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre, dass ich meine Bachelorarbeit selbstständig verfasst und alle in ihr verwendeten Unterlagen, Hilfsmittel und die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Ich nehme zur Kenntnis, dass auch bei auszugsweiser Veröffentlichung meiner Bachelorarbeit die Universität, das/die Institut/e und der/die Arbeitsbereich/e sowie die Leiterin bzw. der Leiter der Lehrveranstaltung, im Rahmen derer die Bachelorarbeit abgefasst wurde, zu nennen sind.

Ich nehme zur Kenntnis, dass meine Bachelorarbeit zur internen Dokumentation und Archivierung sowie zur Abgleichung mit der Plagiatssoftware elektronisch im Dateiformat „pdf“ ohne Kennwortschutz bei der Leiterin bzw. beim Leiter der Lehrveranstaltung einzureichen ist, wobei auf die elektronisch archivierte Bachelorarbeit nur die Leiterin bzw. der Leiter der Lehrveranstaltung, im Rahmen derer die Bachelorarbeit abgefasst wurde, und das studienrechtliche Organ Zugriff haben.

Innsbruck, am 15.11.2017

.....
Rene Neuraüter