

**Entwicklung eines Konzeptes für die nachgiebige
Kopplung zweier Segmente eines aquatischen
Roboters**



Ilmenau, 03.01.2011

Diplomarbeit vorgelegt von:

Michael Frock

Matrikel: MTR 2004

Matrikelnummer: 38265

Verantwortlicher Hochschullehrer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte

Verantwortlicher Betreuer:

Dipl.-Ing. Maximilian Fremerey

Technische Universität Ilmenau

Fakultät für Maschinenbau

Fachgebiet Biomechatronik

Thesen

Durch die entworfene Gelenkvariante ist die manuell einstellbare Steifigkeit zwischen den Effektormodulen in einem größeren Bereich variierbar als mit dem bisherigen Gelenkdesign.

Die entworfene Gelenkvariante ermöglicht dem aquatischen Roboter eine anguilliforme Fortbewegungsform.

Eine später angedachte Regelung benötigt eine Messung der Leistungsparameter wie Strom und Spannung.

Der Stromverbrauch ist an den Umkehrpunkten des Motors am größten.

Der neu entwickelte modulare Verbinder stellt eine Alternative zum aktuellen Design dar.

Abstract

This diploma thesis presents the development, construction and testing of a new variant of a passively adjustable compliant joint. This joint is located between the modules of a modular swimming robot. The locomotion of this robot is biologically inspired. At the moment, there are two possible movement patterns: an eel-like (anguilliform) locomotion and a tuna-like (thunniform) locomotion. The robot consists of a two module base structure. A variable number of effector modules can be connected with these base modules. The base structure carries the power supply, the receiver for the remote control, the motor controller and the single drive. The number of the effector modules defines the movement patterns (anguilliform or thunniform). The coupling of the effector modules is mechanically executed. The utilised compliant joint is the focal point of this thesis.

The new design is based on the plane bending of linear spring steel sheets in contrast to the current pattern with linear spiral springs. Two variants are constructed, one with two parallel spring steel sheets and one with a single centered spring steel sheet. Especially the single centered spring steel sheet variant enables the tail structure with three modules to perform anguilliform motions.

Furthermore, the first steps for a sensory recording of current and voltage of the single drive actuated swimming robot are undertaken. A measuring circuit is designed, produced and programmed. This circuit delivers exact results of the current that is consumed by the motor. The results are sent to a PC via USB cable and connector.

In addition to that, a variant for a modular connector that can carry the compliant joint and connects the joint with the robot's body is constructed and a first sample is built and tested. The sample build of the modular connector is waterproof and presents an alternative to the current design.

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit stellt die Entwicklung, die Konstruktion und den Test einer neuen Variante eines Gelenks mit passiv einstellbarer Elastizität vor. Das Gelenk befindet sich zwischen den Modulen eines modularen aquatischen Roboters. Die Lokomotion dieses Roboters ist biologisch inspiriert, derzeit ist eine aal-ähnliche (anguilliforme) und eine thunfisch-ähnliche (thunniforme) Fortbewegung möglich. Hierfür besteht der Roboter

aus einer Basisstruktur an welche eine variable Anzahl an Effektormodulen anschließbar ist. Die Basisstruktur beinhaltet die Energieversorgung, den Empfänger für die Fernsteuerung, den Motorregler und den Antrieb selbst. Die Anzahl der Effektormodule definiert dabei die Fortbewegungsart (anguilliform bzw. thunniform), die Kopplung der Effektormodule untereinander erfolgt mechanisch. Das hierbei verwendete nachgiebige Gelenk ist Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit.

Das entworfene Design basiert dabei - im Gegensatz zur derzeitigen Gestaltung mit linearen Schraubenfedern - auf der geraden Biegung von linearen Federblechen. Es werden zwei verschiedene Varianten gebaut, eine mit zwei parallelen Federblechen und eine mit einem zentralen Federblech. Dabei ermöglicht insbesondere die Variante mit dem zentralen Federblech eine anguilliforme Bewegung der Effektormodule.

Des Weiteren erfolgt eine erste sensorische Erfassung von Strom und Spannung des aquatischen Roboters. Eine elektrische Schaltung wird entworfen, aufgebaut und programmiert. Die Messschaltung liefert exakte Ergebnisse bei der Strommessung. Mittels USB-Schnittstelle sendet die Schaltung die Messwerte an den PC.

Zusätzlich finden die Konstruktion und der Test einer Variante eines modularen Verbinders zwischen Effektormodul und nachgiebiger Kopplung statt. Der Testaufbau der modularen Verbindung erweist sich als wasserdicht und stellt eine Alternative zum aktuellen Design dar.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Werken wörtlich oder sinngemäß übernommenen Gedanken sind unter Angabe der Quellen gekennzeichnet. Ich versichere, dass ich bisher keine Prüfungsarbeit mit gleichem oder ähnlichem Thema bei einer Prüfungsbehörde oder einer anderen Hochschule vorgelegt habe.

Ort, Datum

Michael Frock

Danksagung

Ich möchte mich zu aller erst bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte bedanken, der diese Arbeit erst ermöglicht hat. Ein großer Dank gilt meinem Diplombetreuer Herrn Dipl.-Ing. Max Fremerey für die ausgezeichnete Anleitung und Unterstützung bei dieser Diplomarbeit. Ferner bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Lars Fischheiter für dessen Hilfe und Tipps bei der Herstellung der Messschaltung, sowie bei allen anderen Mitarbeitern des Fachgebiets Biomechatronik für deren Unterstützung während meiner Arbeit. Ein weiterer großer Dank geht an die Mitarbeiter des Fachgebiets Fertigungstechnik der TU Ilmenau, die verschiedene Bauteile für meine Diplomarbeit angefertigt haben. Ich möchte vor allem Frau Iris Franzke, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Eberhard Hamatschek und Herrn Dipl.-Ing. Michael Bastick hervorheben. Des Weiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Fachgebiets Maschinenelemente für die Bereitstellung der Federblechelemente bedanken. Außerdem danke ich Herrn Dipl.-Ing. Richard Fütterer und Herrn Hannes Walz für die vielen beratenden Gespräche und das Korrekturlesen dieser Arbeit. Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Familie, die mich während meiner Studienzeit aber auch darüber hinaus schon mein ganzes Leben in all meinen Bestrebungen und Unternehmungen unterstützt hat. Speziell in dem Erstehungszeitraum dieser Diplomarbeit konnte ich mich immer auf sie verlassen, sie war für mich eine wichtige Stütze um die Herausforderung zu meistern, die diese Arbeit darstellt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Liste der Formelzeichen	VI
1. Einleitung	1
1.1 Motivation der Arbeit	1
1.2 Definition des Begriffs „Nachgiebigkeit“	2
1.3 Stand der Technik	2
1.3.1 Einsatzmöglichkeiten von elastischen Elementen	2
1.3.2 Beispiele für den Einsatz von elastischen Elementen	5
1.4 Vorstellung der „Seeschlange“	10
1.4.1 Aufbau und Funktionsweise der „Seeschlange“	10
1.4.2 Eigenschaften und Restriktionen der vorhandenen nachgiebigen Kopplung	13
2. Konzeption einer Variante einer nachgiebigen Kopplung zweier Effektormodule der Seeschlange	15
2.1 Mathematische Modellbildung	15
2.1.1 Vorbetrachtungen	15
2.1.2 Gerade Biegung	16
2.2 Forderungsliste	18
2.3 Funktionsstruktur	19
2.4 Kombinationstabelle	19
2.5 Bewertung	20
2.6 Technisches Prinzip	21
2.6.1 Bewertung	23
2.7 Technischer Entwurf	25
2.8 Fertigung	26
2.9 Abschätzung einer Federkonstanten bei diversen Federblechen	27
2.10 Konzeption eines modularen Verbindungsstückes zur Verbindung der Effektormodule mit der nachgiebigen Kopplung	30
2.10.1 Forderungsliste	31
2.10.2 Funktionsstruktur	31
2.10.3 Kombinationstabelle	32
2.10.4 Bewertung	33
2.10.5 Technisches Prinzip	34
2.10.6 Bewertung	35
2.10.7 Fertigung	37
2.10.8 Versuchsvorbereitung zur Überprüfung der Dichtheit der gewählten Ausführung des modularen Verbindungsstücks	37
2.10.9 Versuchsdurchführung	37
2.10.10 Versuchsauswertung	38

3. Entwicklung einer Messschaltung zur kontinuierlichen Aufnahme von Strom- und Spannungswerten in der Seeschlange	41
3.1 Forderungsliste.....	41
3.2 Funktionsstruktur.....	41
3.3 Auswahl der Bauform	42
3.4 Auswahl der Bauteile	43
3.5 Schaltplan.....	44
3.5.1 Funktionsprinzip.....	44
3.6 Routing der Platine.....	46
3.7 Fertigung der Platine	46
3.8 Bestückung der Platine	47
3.9 Programmierung des ATmega8	47
3.9.1 Programmablaufplan	47
3.10 Ausgabe der Messwerte am PC	49
4. Test der neuen Variante der nachgiebigen Kopplung und Vergleich mit der vorhandenen Variante	51
4.1 Konstruktion des Versuchsstands.....	51
4.2 Versuchsvorbereitung	52
4.3 Versuchsdurchführung	54
4.4 Versuchsauswertung.....	56
4.4.1 Strommessung.....	56
4.4.2 Spannungsmessung	64
5. Ausblick	66
6. Zusammenfassung	67
7. Quellen- und Literaturverzeichnis.....	69
7.1 Literaturquellen	69
7.2 Elektronische Quellen	70
8. Anhang	A
8.1 Zeichnungen und Entwürfe	A
8.2 Elektrischer Schaltplan der Messplatine	F
8.3 Programmcode des Messprogramms.....	G

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Derzeit im Fachgebiet Biomechatronik vorhandene Variante	1
Abbildung 2: Links: Ein zweibeiniger Laufroboter mit pneumatischen McKibben Aktuatoren, Rechts: Verlauf der Vorwärtslaufgeschwindigkeit am Fersenabsatz	6
Abbildung 3: Links und Mitte: Ansicht der pneumatischen Aktuatoren von Baps	7
Abbildung 4: ARL „Monopod II“ am Versuchsstand (Buehler [8])	8
Abbildung 5: Der Laufroboter „Scout II“ als Zeichnung (Buehler [8])	8
Abbildung 6: Der „RHex“ Laufroboter, Links: Beim Laufen in unwegsamem Gelände, rechts: Beim Steigen von Treppen (Buehler [8])	9
Abbildung 7: Das linke Bild zeigt das Funktionsprinzip des „Maccepa 2.0“	10
Abbildung 8: Oben: Grundlegende Funktionsstruktur der "Seeschlange", mit der beide derzeit möglichen Aufbauvarianten grob umschrieben werden.	11
Abbildung 9: Konfiguration „Thunniform“: A - starre Kopplung, B – Flosse	12
Abbildung 10: Detailliertere Funktionsstruktur der "anguilliformen" Konfiguration des Schwanzes der Seeschlange.....	12
Abbildung 11: Teil der Konfiguration "Anguilliform“: A – Gelenk mit einstellbarer passiver Elastizität, B - normalgroßes Effortmodul, C – Flosse	12
Abbildung 12: Skizze der Funktionsstruktur der nachgiebigen Kopplung	13
Abbildung 13: Darstellung des Gelenks mit passiv einstellbarer Elastizität der anguilliformen Konfiguration.....	14
Abbildung 14: Skizze eines Teils des Bewegungsablaufes bei anguilliner Effortmodul- Konfiguration.....	16
Abbildung 15: Skizze eines fest eingespannten Stabs bei gerader Biegung	17
Abbildung 16: Funktionsstruktur der nachgiebigen Kopplung	19
Abbildung 17: Technisches Prinzip der Variante 1 der nachgiebigen Kopplung	22
Abbildung 18: Technisches Prinzip der Variante 2 der nachgiebigen Kopplung	23
Abbildung 19: Technisches Prinzip der Variante 3 der nachgiebigen Kopplung	23
Abbildung 20: 3d-Zeichnungsansicht der Halterung für die Federelemente	25
Abbildung 21: 3d-Zeichnungsansicht der nachgiebigen Kopplung nach Variante 1	25
Abbildung 22: 3d-Zeichnungsansicht (von oben) der nachgiebigen Kopplung nach Variante 1.	26
Abbildung 23: Draufsicht der zwischen zwei Effortmodulen eingebauten Variante 3.	26
Abbildung 24: Skizze des Versuchsaufbaus. Oben: Ohne Auslenkung; unten: Mit Auslenkung und Messgröße v.....	28
Abbildung 25: Aufbau zum Messen der Auslenkung v für Federbleche	29
Abbildung 26: Funktionsstruktur des modularen Verbindungsstückes	32
Abbildung 27: Drei verschiedene Varianten möglicher technischer Prinzipie für das Verbindungsstück.....	35
Abbildung 28: Ansichten des technischen Entwurfs für das modulare Verbindungsstück	36
Abbildung 29: Verbindungsstück mit Löschpapier	38

Abbildung 30: Zugeklebte Durchgangsöffnungen des Verbindungsstückes.....	38
Abbildung 31: Löschpapierstreifen nach 30 (links), 60 (Mitte) und 90 (rechts) Minuten. Der blaue Kreis markiert einen Fettfleck, die roten Pfeile Wasserflecken.	40
Abbildung 32: Löschpapierstreifen nach 150 (links), 180 (Mitte) und 210 (rechts) Minuten. Der blaue Kreis markiert einen Fettfleck, die roten Pfeile Wasserflecken.	40
Abbildung 33: Funktionsstruktur der Strom- und Spannungsmessung.....	43
Abbildung 34: Vereinfachter Schaltplan der Messplatine mit allen relevanten Bauteilen	44
Abbildung 35: Die unbestückte Platine von beiden Seiten.....	46
Abbildung 36: Links: Oberseite der bestückten Platine; rechts: Unterseite	47
Abbildung 37: Programmablaufplan des Programms zur Messung von Strom und Spannung.....	48
Abbildung 38: Screenshot der Benutzeroberfläche von Docklight v.1.9.21	50
Abbildung 39: Der Versuchsstand mit eingespanntem Basismodul.....	52
Abbildung 40: Draufsicht des Versuchsstands mit eingespannter "Seeschlange" in thunniformer Konfiguration im Wasserbecken. In dieser Position werden sämtliche Versuche durchgeführt.	52
Abbildung 41: Verschiedene Ansichten des Stahlbleches	53
Abbildung 42: Eins der drei Bewuchselemente, die einen künstlichen Pflanzenbewuchs simulieren sollen.....	54
Abbildung 43: Schaltbild-Skizze der "Seeschlange".	55
Abbildung 44: Ausschnitt aus dem Zeit-Strom-Diagramm für den Aufbau der "Seeschlange" mit dem kurzen Effektormodul (für thunniforme Bewegung).....	58
Abbildung 45: Einzelaufnahmen eines Videos, das während des Versuchsdurchlaufs aufgenommen wurde. Die Nummerierung der Bilder korrespondiert mit den Zahlen in Abbildung 44.	58
Abbildung 46: Verlauf der Stromwerte bei Konfiguration 5, die Zuordnung der Ziffern gilt den Abbildungen 47 und 48.....	59
Abbildung 47: Erster Teil der zu Abbildung 46 gehörenden Bilder.	60
Abbildung 48: Zweiter Teil der zu Abbildung 46 gehörenden Bilder.	61
Abbildung 49: Diagramm einer Messreihe in der Konfiguration 5b.....	62
Abbildung 50: Zwei Stromkennlinienverläufe bei Konfiguration 6. Der "stick-slip" Effekt ist beim oberen Diagramm noch stärker ausgeprägt als beim unteren.	63
Abbildung 51: Diagramm der Spannungsmessung der "Seeschlange"	65
Abbildung 52: Diagramm des Spannungsverlaufs beim Senken der Spannung mit Hilfe des Spannungsreglers.....	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen für nachgiebige Mechanismen und Aktoren	3
Tabelle 2: Einsatzgebiete für Systeme mit nachgiebigen Mechanismen und Aktoren mit den entsprechenden Anforderungen	3
Tabelle 3: Anforderungsliste der nachgiebigen Kopplung	18
Tabelle 4: Eingeschränkte Kombinationstabelle des nachgiebigen Gelenksegments	19
Tabelle 5: Bewertungstabelle für die unterschiedlichen Federvarianten	21
Tabelle 6: Vor- und Nachteile der drei Varianten für eine nachgiebige Kopplung	24
Tabelle 7: Maße der Federbleche	29
Tabelle 8: Auslenkungen der unterschiedlichen Federbleche bei den angegebenen angehangenen Gewichten	29
Tabelle 9: Die berechneten Flächenträgheitsmomente, die Mittelwerte der berechneten Elastizitätsmodule und die daraus resultierenden Federsteifigkeiten c.	30
Tabelle 10: Anforderungsliste für das modulare Verbindungsstück	31
Tabelle 11: Kombinationstabelle zur Konzeption des Verbindungsstücks	32
Tabelle 12: Bewertungstabelle für verschiedene mögliche Varianten des modularen Verbindungsstückes	34
Tabelle 13: Vor- und Nachteile der drei Ausführungen für das modulare Verbindungsstück	36
Tabelle 14: Zusammenfassung der Ergebnisse der Dichtheitsüberprüfung	39
Tabelle 15: Anforderungsliste für die Platine zur Strom- und Spannungsmessung	42
Tabelle 16: Mögliche Häufigkeit der Messung mit der Messschaltung mit Angabe der dafür notwendigen zu versendenden Zahlensequenz	50
Tabelle 17: Parameter für die Versuchsdurchführung.	54
Tabelle 18: Ort des Versuchs und Aufbau der "Seeschlange" in den unterschiedlichen Versuchsdurchgängen	55
Tabelle 19: Übersicht der vorgenommenen Versuche mit kurzem Kommentar	56
Tabelle 20: Aufschlüsselung der Bildnummern in Abb. 47 u. 48 nach Effektor modul-Position	59
Tabelle 21: Angabe der Mittelwerte aus mindestens zehn Werten der Periodendauer der Effektor modul-Schwingung	62
Tabelle 22: Übersicht der Strommittelwerte der jeweiligen Konfigurationen	64

Liste der Formelzeichen

I	–	Stromstärke in Ampere
U	–	Spannung in Volt
R	–	Widerstand in Ohm
A_x	–	Lagerkräfte in x-Richtung
A_y	–	Lagerkräfte in y-Richtung
M	–	Moment in Newtonmeter
v	–	Auslenkung eines Stabs bei gerader Biegung in Millimeter
E	–	Elastizitätsmodul in N/mm^2
F	–	Kraft in Newton
I_z	–	Flächenträgheitsmoment in mm^4
l	–	Länge eines Stabs in Millimeter
b	–	Breite eines Stabs in Millimeter
h	–	Höhe eines Stabs in Millimeter
c	–	Federsteifigkeit in N/mm

1. Einleitung

1.1 Motivation der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Konstruktion einer weiteren Variante eines Gelenks mit passiv einstellbarer Elastizität für einen modularen aquatischen Schwimmroboter. Das Lokomotionsprinzip dieses Roboters ist biologisch inspiriert, derzeit ist ein aal-ähnliches oder anguilliformes, bzw. ein thunfisch-ähnliches thunniformes Schwimmverhalten möglich. Im Unterschied zum derzeitigen Stand der Technik (Crespi et al. [1], Mclsaac et al. [2], Yamada et al. [3]) wird für den Vortrieb ein Aktor verwendet. Die Umwandlung des durch diesen Aktor erzeugten Drehmomentes in eine Vorschubkraft erfolgt durch die in Abbildung 1 erkennbaren sogenannten Effektormodule. Diese werden oszillierend ausgelenkt und sind über Gelenke mit passiv einstellbarer Elastizität mechanisch miteinander verknüpft.

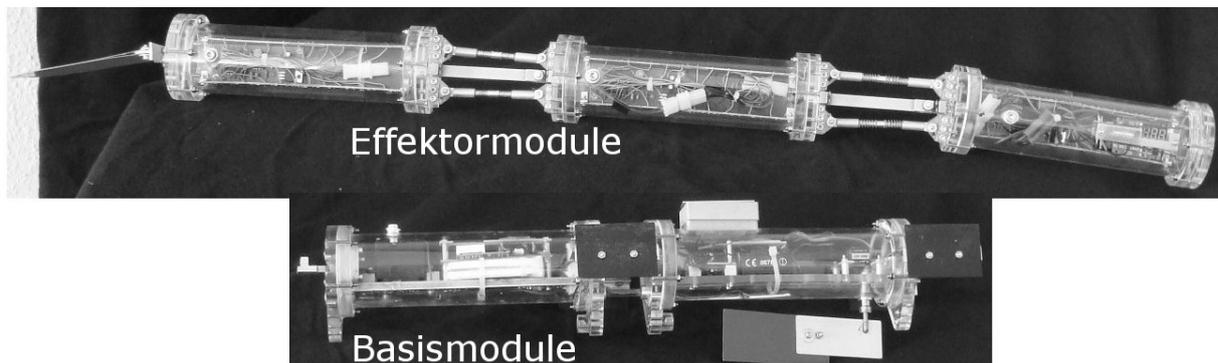


Abbildung 1: Derzeit im Fachgebiet Biomechatronik vorhandene Variante des aquatischen Roboters. Dieser ist in Basismodule und Effektormodule aufgeteilt.

Durch den Einsatz einer weiteren Variante eines Gelenks mit passiv einstellbarer Elastizität soll die derzeitig manuelle Einstellbarkeit der Nachgiebigkeit vereinfacht werden. Zudem wird der Bereich an einstellbaren Steifigkeitswerten erweitert. Dieses bildet die Vorarbeit für ein Gelenk mit aktiv einstellbarer Elastizität. Das ermöglicht in Folge der im laufenden Betrieb veränderlichen Steifigkeit eine Änderung des Gesamtverhaltens der Roboterstruktur. Hierdurch sind beispielsweise Richtungswechsel realisierbar. Außerdem kann eine Lokomotion des Roboters in verschiedenen viskosen Medien erreicht werden.

Darüber hinaus erfolgt eine erste sensorische Erfassung der Bewegung des Roboters. Dadurch lassen sich die verschiedenen konstruierten Varianten des Gelenks mit passiv elastischer Elastizität miteinander vergleichen. Dieses stellt einen weiteren Schritt hinsichtlich der aktiven Einstellung der Elastizität des Gelenks dar. Um diese neuen Varianten unter gleichbleibenden Bedingungen untersuchen zu können, ist ein Versuchsstand entworfen, konstruiert und gefertigt worden. Durchgeführte Experimente zeigen hierbei charakteristische Eigenschaften der verschiedenen Varianten eines passiv elastischen Gelenks.

1.2 Definition des Begriffs „Nachgiebigkeit“

Der in dieser Arbeit verwendete Begriff der „Nachgiebigkeit“ bezieht sich nur auf die elastische Verformung. Funktionselemente oder Werkstoffe, die die Eigenschaft besitzen, bei einer Krafteinwirkung ihre Form zu verändern und nach dem Ende dieser Krafteinwirkung wieder ihre ursprüngliche Form annehmen, heißen „elastisch“ (Uni Hamburg [17]). Zusätzlich gehört die Dämpfung, die durch die Flüssigkeit in der sich der Roboter befindet entsteht, zu der „Nachgiebigkeit“ des Gelenks. Plastische Verformungen, also irreversible Formänderungen von Funktionselementen oder Werkstoffen, werden mit dem Begriff der „Nachgiebigkeit“ in dieser Arbeit nicht abgedeckt.

1.3 Stand der Technik

1.3.1 Einsatzmöglichkeiten von elastischen Elementen

In den letzten Jahren ist die Entwicklung von nachgiebigen Mechanismen in Aktoren und Gelenken in den Bereichen der Industrierobotik, Prothetik und Laufrobotik immer weiter vorangeschritten. Grund hierfür ist der zunehmende Einsatz solcher Systeme in Umgebungen mit Lebewesen. Daraus ergeben sich neuartige und erweiterte Anforderungen, welche über die klassischen industriellen Anwendungen wie z.B. Lage-geregelte Bestückungsautomaten hinausgehen. Diese Anforderungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst, Tabelle 2 zeigt die Anforderungen im Zusammenhang

mit dem Einsatzgebiet eines Robotersystems. Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen möglichen Einsatzgebiete für nachgiebige Mechanismen und Aktoren untersucht.

Tabelle 1: Anforderungen für nachgiebige Mechanismen und Aktoren

<i>Nummer</i>	<i>Anforderung</i>
1	Verringerung von Spannungs- und Kraftspitzen bei Zusammenstößen
2	Sicherere Mensch-Maschine-Interaktion
3	Ausnutzen von Rekuperationseffekten
4	Natürlichere Bewegungsmuster

Tabelle 2: Einsatzgebiete für Systeme mit nachgiebigen Mechanismen und Aktoren mit den entsprechenden Anforderungen

<i>Einsatzgebiet</i>	<i>Anforderung</i>
Industrie	1,2,3
Medizin	2,4
Privatgebrauch	1,4
Forschung	1,3,4

Industrieroboter sind steife Systeme, die aufgrund ihres momentanen Aufbaus bei einem Zusammenstoß ohne Dämpfung kollidieren und großen Schaden am Roboter selbst oder anderen Systemen in unmittelbarer Umgebung anrichten. Dabei sind diese Roboter in Bereichen aufgestellt, in denen während des laufenden Produktionsbetriebes der Mensch keinen Zugang hat (van Ham et al. [4]); die Verletzungsgefahr wird minimiert. Allerdings ist aufgrund von Reparatur- sowie im laufenden Betrieb durchzuführende Kalibrierungsarbeiten eine räumlich enge Zusammenarbeit von Mensch und Maschine oftmals unerlässlich. Hierfür werden zur Vermeidung von Kollisionen bislang beispielsweise kapazitive oder optische (Laser, Kameras) Annäherungssensoren eingesetzt (Schiavi et al. [5]). Detektieren sie ein Objekt oder eine Person, stellt der Roboter die Arbeit ein. Die Computerrechenleistung, die diese Systeme bei einer Anpassung an eine sich verändernde Umgebung benötigen, ist hoch und kann nicht immer bereitgestellt werden. Eine weitere Möglichkeit, die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine hinsichtlich der Verletzungsgefahr sicherer zu gestalten, ist die Ausstattung solcher Roboter mit nachgiebigen Gelenken. Insbesondere die Kombination aus aktiver Annäherungssensorik und der Nachgiebigkeit der Roboterelenke erhöht den

Schutz vor Verletzungen für den Menschen (Schiavi et al. [5]). Hierdurch ergeben sich jedoch erhöhte Anforderungen an die Steuerung und Regelung hinsichtlich der Positionierungsgenauigkeit. Eine Lösung ist der Einsatz einer aktiven, steuerbaren Nachgiebigkeit, die dafür sorgt, dass die Elastizität bei der präzisen Positionierung möglichst steif bzw. unnachgiebig ist und damit die Genauigkeit hoch. Bei der Verfolgung von längeren Trajektorien, z.B. bei Positionsveränderungen eines Greifarms, wird die Nachgiebigkeit möglichst hoch gewählt, um so die Sicherheit bei Kollisionen zu erhöhen (van Ham et al. [4]).

Ferner wird die Verwendung in der Rehabilitationsmedizin weiter voran getrieben. Dabei bietet ein Roboter in Ergänzung zu einem Physiotherapeuten verschiedene Vorteile, insbesondere bei sich wiederholenden Gehübungen mit Patienten: 1.) Ein Robotersystem kann die tägliche Behandlungszeit verlängern, da die Zeit, die ein Therapeut für einen Patienten aufwenden kann, in der Regel begrenzt ist. 2.) Ein Roboter kann kraftintensive Behandlungen unterstützen und so den Therapeuten entlasten und Verletzungen vorbeugen (Veneman et al. [6]). Um dabei den Patienten nicht zu verletzen, sind zur Nachbildung der erforderlichen Bewegungsabläufe ebenfalls elastische Elemente in Gelenken und Antrieben des Roboters nötig (van Ham et al. [4]).

Weiterhin ist es in der Prothetik möglich, durch die Verwendung von Gelenken mit aktiv einstellbarer Nachgiebigkeit eine Adaptivität für unterschiedliche Bodenverhältnisse und Laufgeschwindigkeiten zu erreichen, wodurch sich der Tragekomfort erhöht. Zusätzlich senkt sich so das Verletzungsrisiko, das durch inkorrekte Gangmuster entsteht (van Ham et al. [4]).

Bei Spielzeug-Robotern für den Privatgebrauch erlaubt der Einsatz von nachgiebigen Gelenken und Antrieben natürlichere Bewegungsabläufe. Zusätzlich werden Schäden durch unsachgemäße Behandlung durch die Kinder verhindert oder zumindest verringert (van Ham et al. [4]).

In der Forschung werden nachgiebige Gelenke und Antriebe z.B. in der Lokomotionsrobotik genutzt. Die Nutzung der Rekuperationseffekte von elastischen Elementen bedeutet vor allem bei autonomen Systemen eine längere Betriebsdauer, da der Energieverbrauch gesenkt und somit die Einsatzdauer verlängert werden

kann. Im Gegenzug kann durch das Aufbringen der gleichen Energie eine höhere Leistung als in einem vergleichbaren starren System erzielt werden, seien es eine erhöhte Laufgeschwindigkeit, höheres Springen oder stabilere Bewegungen. Die Verringerung von Kraft- und Spannungsspitzen z.B. während der Fortbewegung oder der Aufgabenerfüllung schützt die Mechanik der Roboter vor funktionsbeeinträchtigenden Beschädigungen (Wolf et al. [7]). Außerdem wird durch die Nutzung natürlicherer Bewegungsabläufe die Stabilität des Systems erhöht (van Ham et al. [4]).

1.3.2 Beispiele für den Einsatz von elastischen Elementen

Im folgenden Abschnitt sollen einige Beispiele von Forschungen und Entwicklungen bei nachgiebigen Gelenken und Aktoren aufgezeigt werden.

Die Nachgiebigkeit im Hüftgelenk des „PDW“ (Passive Dynamic Walker), ein zweibeiniger Laufroboter, wird durch die Nutzung von agonistischen und antagonistischen pneumatischen „McKibben“ Aktuatoren erreicht. Durch Druckänderung der pneumatischen Aktuatoren kann die Steifigkeit des Gelenks variiert werden. Hierdurch wird die Vorwärtslaufgeschwindigkeit des PDW beeinflusst. In Abbildung 2 ist der Roboter zu sehen, das angefügte Diagramm zeigt die Ergebnisse der Veränderung des Drucks in den Aktuatoren gegenüber der Vorwärtslaufgeschwindigkeit. Je größer der Druck in den antagonistischen Aktuatoren ist, desto höher ist die Vorwärtslaufgeschwindigkeit des Roboters (Takuma et al. [8]).

„Baps“ (Biped with Adjustable Pneumatic Springs, Abbildung 3), ein weiterer zweibeiniger Laufroboter, nutzt ebenfalls das Prinzip der agonistischen und antagonistischen pneumatischen „McKibben“ Aktuatoren. Durch die regulierbare Nachgiebigkeit kann „Baps“ stabil laufen und hat einen äußerst geringen Energieverbrauch von 1 W/kg (Braure et al. [9], Uni Delft [18]).

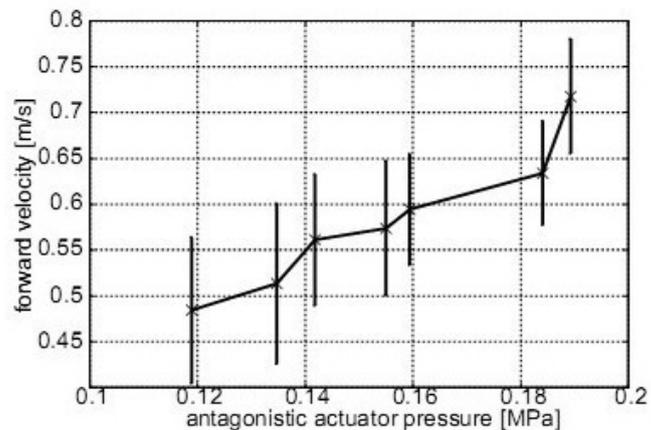


Abbildung 2: Links: Ein zweibeiniger Laufroboter mit pneumatischen McKibben Aktuatoren, Rechts: Verlauf der Vorwärtslaufgeschwindigkeit am Fersenabsatz des Roboters aufgetragen über den Druck im antagonistischen Aktuator (Takuma et al. [8])

Der ARL „Monopod II“ (siehe Abbildung 4) ist ein einbeiniger Hüpfroboter. Im Gegensatz zu seinem Vorgänger dem ARL „Monopod I“ verfügt diese Variante über nachgiebige Elemente, im speziellen Federn, im Hüftgelenk. Durch die Eigenschaft von Federn potentielle Energie speichern und wieder freisetzen zu können, konnte der Leistungsbedarf entschieden verringert werden. Dieses zeigt ein Vergleich der Leistungsaufnahme: Der „Monopod II“ benötigt gegenüber seinem Vorgänger bei gleicher Laufgeschwindigkeit (1,2 m/s) statt 125W nur noch 48W. Dies bedeutet eine Verringerung der Leistungsaufnahme von über 60% (Buehler [10]).

Der vierbeinige Laufroboter „Scout II“ (siehe Abbildung 5) bewegt sich stabil mit hüpfenden Bewegungen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1,2 m/s fort. Dieses Springen wird durch eine Feder im Schubgelenk zwischen oberem und unterem Teil des Beins ermöglicht. Der Regelungsaufwand ist gering, da z.B. keine Kommunikation zwischen den beiden Vorder- und Hinterbeinen besteht. Die Bewegung wird allein durch die Interaktion der Regler über die Dynamik des Systems erreicht (Buehler [10]).

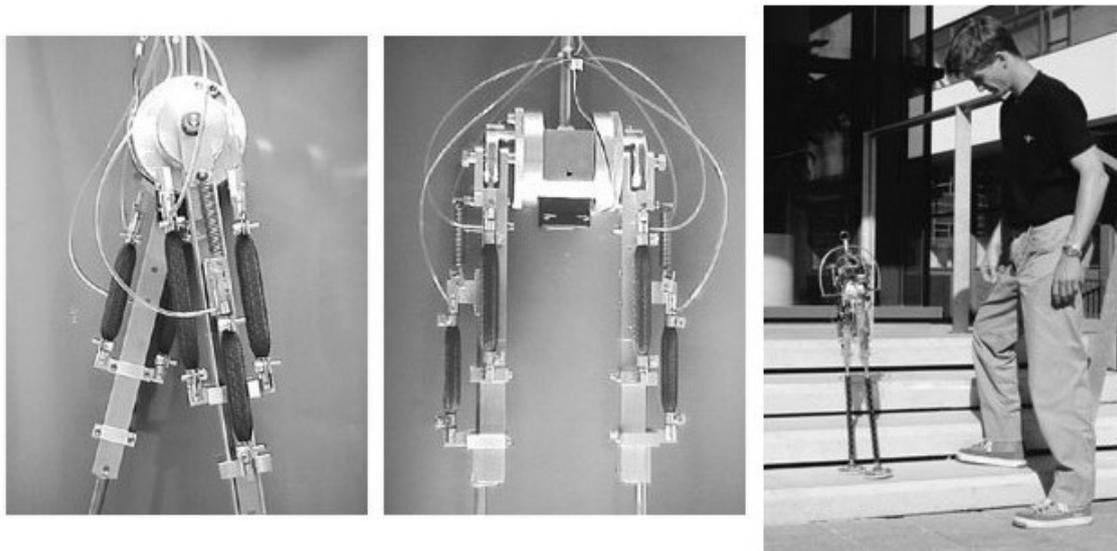


Abbildung 3: Links und Mitte: Ansicht der pneumatischen Aktuatoren von Baps, rechts: Größenvergleich mit einem Menschen (Braure et al. [9], Uni Delft [18]).

Eine weitere Variante eines Laufroboters stellt der in Abbildung 6 gezeigte sechsbeinige „RHex“ dar. Das Lokomotionsprinzip ist hierbei entfernt an die Fortbewegung von Kakerlaken angelehnt. Dabei werden sogenannte Speichenräder („Whlegs“) verwendet. Die Länge der Speichen entspricht der überwindbaren Hindernishöhe. Der Vorteil des einfachen Antreibens durch einen rotatorischen Antrieb bleibt zudem erhalten. Obwohl der „RHex“ kein elastisches Hüftgelenk besitzt, ist das gesamte Bein des Roboters durch seine Form und Struktur nachgiebig. Es besteht aus ein Zentimeter dicken, zu einem „C“ geformten Delrin Stäben, wodurch vor allem eine radiale Nachgiebigkeit erzeugt wird. Delrin ist ein Homopolymer aus Polyoxymethylen mit hoher Steifigkeit und Dimensionsstabilität (Moos [11]). Das Whleg wirkt wie ein großes radiales nachgiebiges Gelenk (Buehler [10] und Saranli et al. [12]).

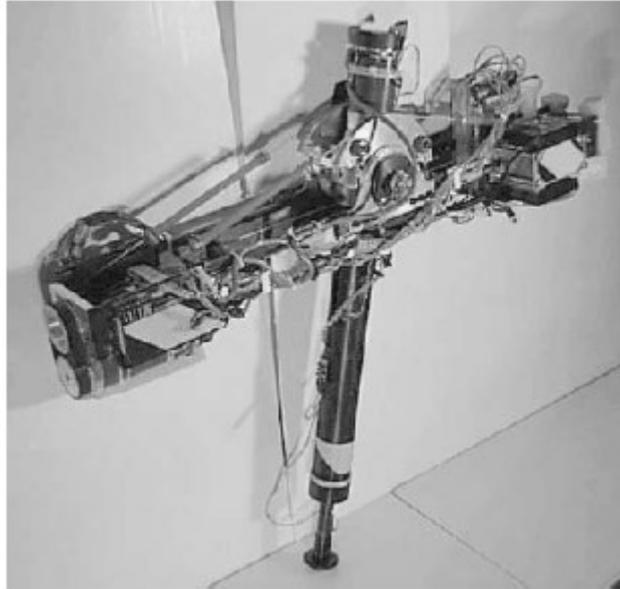


Abbildung 4: ARL „Monopod II“ am Versuchsstand (Buehler [10])

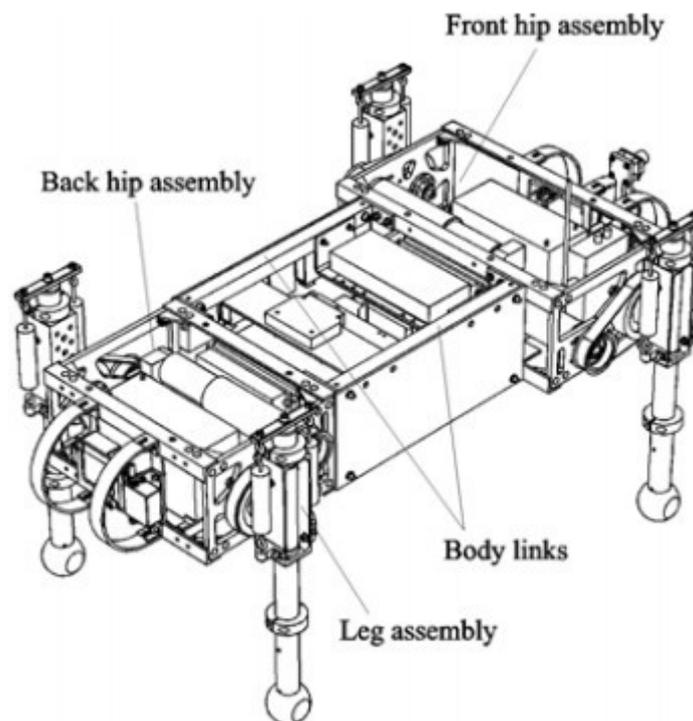


Abbildung 5: Der Laufroboter „Scout II“ als Zeichnung (Buehler [10])

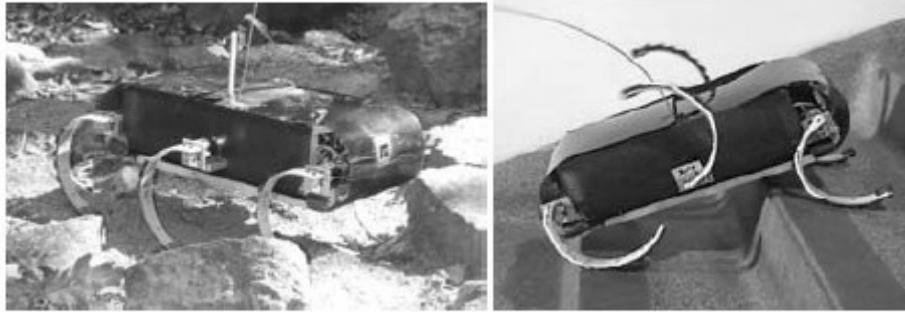


Abbildung 6: Der „RHex“ Laufroboter, Links: Beim Laufen in unwegsamem Gelände, rechts: Beim Steigen von Treppen (Buehler [10])

“Maccepa 2” (Mechanically Adjustable Compliance and Controllable Equilibrium Position Actuator) ist ein elektrischer Aktuator mit versteifender Charakteristik: Über einen Seilzug wird die Auslenkung des elastischen Federelements und damit die Vorspannung beeinflusst. Das Drahtseil wird dabei über eine Profilscheibe gezogen. Je nach Form der Scheibe ändert sich das erzeugte Drehmoment. Es findet eine Beeinflussung der Drehmomenten-Drehwinkel-Kurve statt, dies ändert auch die Steifigkeit des Gesamtsystems. Bisherige geplante Anwendungen sind Robotersysteme für sichere Mensch-Maschine-Interaktion und energieeffiziente Laufroboter. Als Test soll der „Maccepa 2“ Aktuator (siehe Abbildung 7) in einen einbeinigen Lauf- bzw. Hüpfroboter Chobino1D (ebenfalls Abbildung 7) eingebaut werden (Vanderborcht et al. [13]).

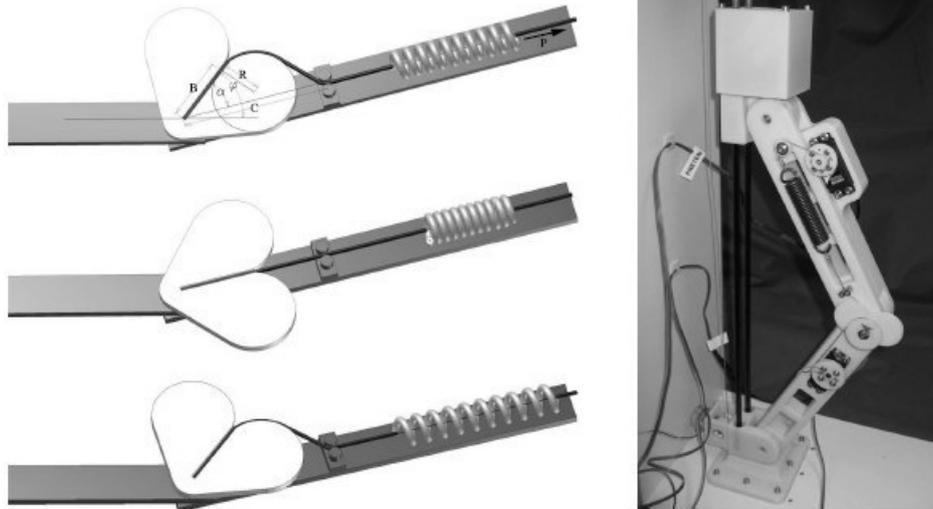


Abbildung 7: Das linke Bild zeigt das Funktionsprinzip des „Maccepa 2.0“: Oben: Nicht in Gleichgewichtslage, erzeugt ein Drehmoment; Mitte: Gleichgewichtslage; unten: Veränderte Vorspannung. Rechts ist der Hüpfroboter Chobino1D abgebildet (Vanderborght et al. [13]).

1.4 Vorstellung der „Seeschlange“

1.4.1 Aufbau und Funktionsweise der „Seeschlange“

Das im Fachgebiet Biomechatronik vorhandene modulare aquatische Robotersystem (im Folgenden „Seeschlange“ genannt) bildet die Ausgangslage für die vorliegende Arbeit. Die Seeschlange besteht aus mehreren einzelnen Segmenten, nachfolgend Module genannt. Dabei bestehen die Module aus transparentem Plexiglas. Die Vorteile dieses Materials liegen darin, dass aufgrund der Transparenz eintretendes Wasser und Fehlfunktionen bei der Mechanik schnell erkannt werden können. Ferner ist das Material salzwasserresistent. Abbildung 8 zeigt die Struktur der „Seeschlange“. Mögliche Applikation solch eines Systems ist einerseits ein Inspektionsroboter, welcher in Gewässern mit starkem Bewuchs eingesetzt werden kann und der durch seinen biologisch inspirierten Antrieb weniger Lärmemission als ein herkömmlicher Schraubenantrieb erzeugt (Fremerey et al. [14]).

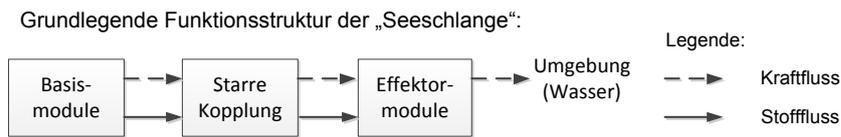


Abbildung 8: Oben: Grundlegende Funktionsstruktur der "Seeschlange", mit der beide derzeit möglichen Aufbauvarianten grob umschrieben werden.

Ein weiteres, bisher noch zu erforschendes Gebiet ist der Einsatz dieses Roboters in Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Viskositäten (z.B. Schlamm, Öl und Wasser). Die Basisstruktur der „Seeschlange“ beinhaltet die Energieversorgung (Lithium-Polymer Akkumulator), den Antriebsmotor (Servomotor), ein Steuerungselement (Ruder) und die Elektronik für die Fernsteuerung sowie die Motorsteuerung. Die kontinuierlich rotatorische Bewegung des Servomotors wird mittels Getriebe in eine wechselsinnige rotatorische Bewegung übersetzt.

Aufgrund des modularen Aufbaus des Roboters sind unterschiedlich viele Effektormodule mit der Basisstruktur verknüpfbar. Dadurch sind derzeit eine thunniforme und eine anguilliforme Lokomotion möglich, die hierfür benötigten verschiedenen Effektormodulkonfigurationen zeigen Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11. Die Effektormodule wandeln das innerhalb der Basisstruktur erzeugte Moment in eine Vorschubkraft. Dabei besteht die thunniforme Konfiguration (siehe Abbildung 9) aus einem einzelnen Effektormodul, die anguilliforme Konfiguration (siehe Abbildung 11) hingegen aus drei Effektormodulen. Untereinander sind die Effektormodule mittels Gelenken mit passiv einstellbarer Elastizität verkoppelt. Diese Elastizität ist manuell über ein Verschieben der Lager der jeweiligen Federelemente einstellbar (Fremerey et al. [14]). In beiden Fällen kann zur Erhöhung der Schwimmgeschwindigkeit optional eine Flosse an beiden Module befestigt werden. Die Kopplung zwischen dem ersten Effektormodul und dem Basismodul ist bei beiden Varianten als starre Kopplung ausgeführt. Die Schwimmrichtung des Roboters wird durch ein das Steuerruder am Basismodul beeinflusst. Die eingeschränkte Funktionalität des Ruders macht das kontrollierte Navigieren der „Seeschlange“ insbesondere in der anguilliformen Konfiguration derzeit unmöglich.

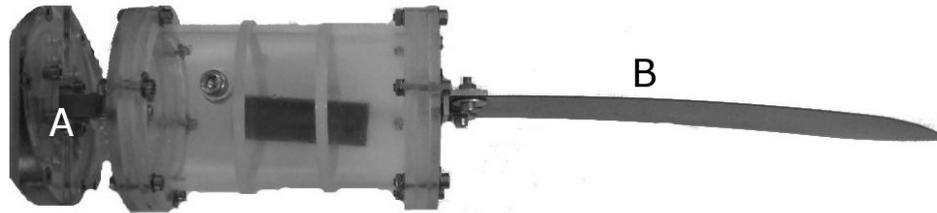


Abbildung 9: Konfiguration „Thunniform“: A - starre Kopplung, B – Flosse

Darstellung der Funktionsstruktur des Effektormoduls, das eine anguilliforme Bewegungsform ermöglicht:

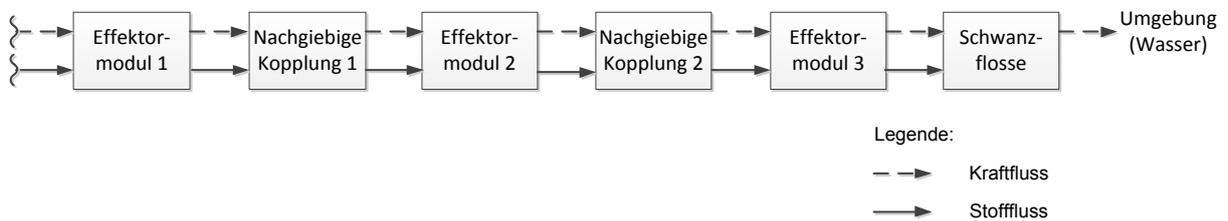


Abbildung 10: Detailliertere Funktionsstruktur der "anguilliformen" Konfiguration des Schwanzes der Seeschlange.

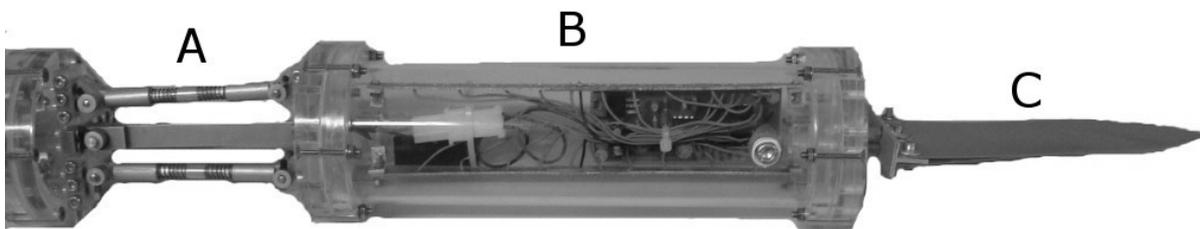


Abbildung 11: Teil der Konfiguration "Anguilliform": A – Gelenk mit einstellbarer passiver Elastizität, B - normalgroßes Effektormodul, C – Flosse

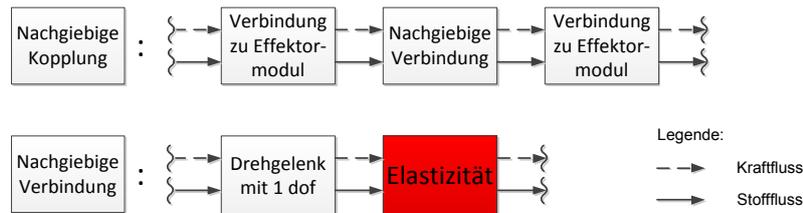


Abbildung 12: Skizze der Funktionsstruktur der nachgiebigen Kopplung und der darin enthaltenen nachgiebigen Verbindung. Die Modifikation und Verbesserung der rot markierten Elastizität ist ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit.

Die in Abbildung 12 skizzierten Funktionsstrukturen untersetzen die innerhalb dieser Arbeit zu modifizierenden Teile der „Seeschlange“. Es handelt sich um die rot markierten nachgiebigen Elemente bzw. die nachgiebigen Bestandteile des Gelenks mit passiv einstellbarer Elastizität.

1.4.2 Eigenschaften und Restriktionen der vorhandenen nachgiebigen Kopplung

Die nachgiebige Kopplung zwischen den Effektormodulen (siehe Abbildung 13), die durch Federelemente realisiert wird, ist bisher nur in geringem Maße modifizierbar. Es können lediglich Federn mit geringen Abweichungen bei Durchmesser und Länge eingesetzt werden. Dadurch ist die Auswahl an verschiedenen Steifigkeiten begrenzt. Außerdem ist die Nachgiebigkeit bei Betrieb des Roboters konstant, sie kann während des laufenden Betriebs nicht verändert werden, da dazu ein Austausch der Federelemente notwendig ist.

Durch die Überarbeitung des passiv einstellbaren elastischen Gelenks soll auf eine, im laufenden Betrieb des Roboters durchführbare, Einstellung der Elastizität hingearbeitet werden. Dies bildet die Voraussetzung dafür, dass das aquatische Robotersystem in unterschiedlich viskosen Umgebungen bzw. Gewässern eingesetzt werden kann. Mit der bisherigen diskreten Einstellung der Federsteifigkeit kann keine optimale Anpassung an die Viskosität des Mediums erfolgen, in welchem sich die „Seeschlange“ befindet. Nur durch die Einstellung der Steifigkeit während des Betriebs des Roboters ist die benötigte Adaptivität zu erreichen.

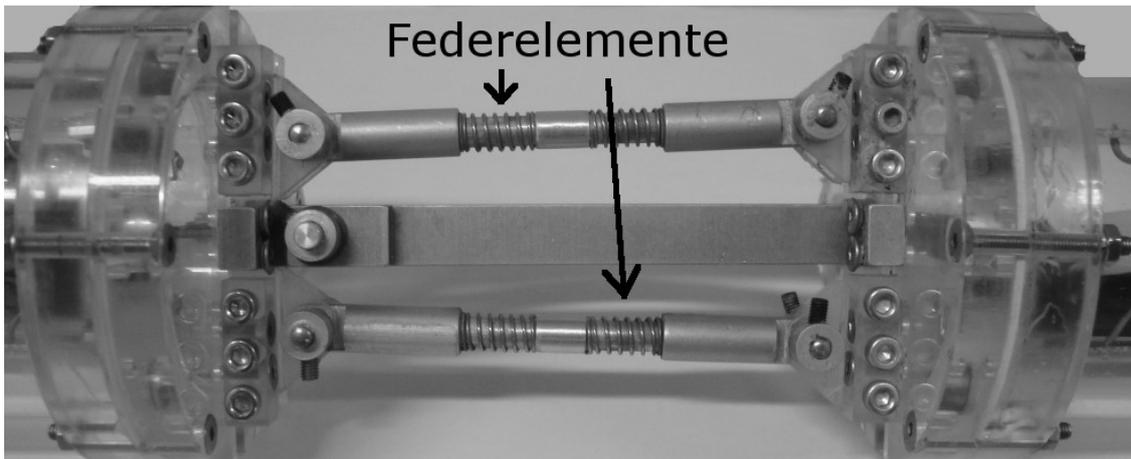


Abbildung 13: Darstellung des Gelenks mit passiv einstellbarer Elastizität der anguilliformen Konfiguration. Rechts und links sind die einzelnen Segmente zu sehen, die über eine Drehgelenk mit einem Freiheitsgrad von eins miteinander verbunden sind. Die gewünschte Nachgiebigkeit wird durch die Federelemente realisiert.

Ebenso erfolgte bislang noch keine sensorische Erfassung der Bewegung im Allgemeinen und der nachgiebigen Kopplungen im Speziellen. Dies ist aber für die langfristige Zielsetzung, die Nachgiebigkeit der Gelenke aktiv steuern zu können, unbedingt erforderlich. Auf diese Weise wird die Voraussetzung dafür geschaffen, die Richtungsänderung der „Seeschlange“ über eine Änderung der Nachgiebigkeit der Gelenke zu erreichen ohne auf ein Steuerruder angewiesen zu sein.

2. Konzeption einer Variante einer nachgiebigen Kopplung zweier Effektormodule der Seeschlange

2.1 Mathematische Modellbildung

2.1.1 Vorbetrachtungen

Für die Bildung eines hinsichtlich der Anforderungen aussagekräftigen mathematischen Modells ist es notwendig, den Bewegungsablauf zwischen zwei mit dem nachgiebigen Gelenksegment verbundenen Effektormodulen der „Seeschlange“ zu vereinfachen. Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt eines Bewegungszyklus bei anguilliformer Effektor-Modul-Konfiguration. Dieser Teil des Bewegungszyklus ist in drei Schritte unterteilt. Dabei basiert das Modell auf der Annahme, dass Effektor-Modul 1 gestellfest ist. Hier wird ein Drehmoment eingeleitet, das dafür sorgt, dass sich Effektor-Modul 2 über die nachgiebige Gelenkverbindung bewegt.

Unabhängig von der Ausführung des nachgiebigen Gelenks (Dreh-, Schrauben, Biegefeder, etc.), entsteht die gleiche schwingende Bewegung in einer Ebene. Für die Modellbildung bedeutet dies, dass ein Modell eine Vielzahl von Varianten abdeckt. Für diese Arbeit wird das Modell der geraden Biegung verwendet.

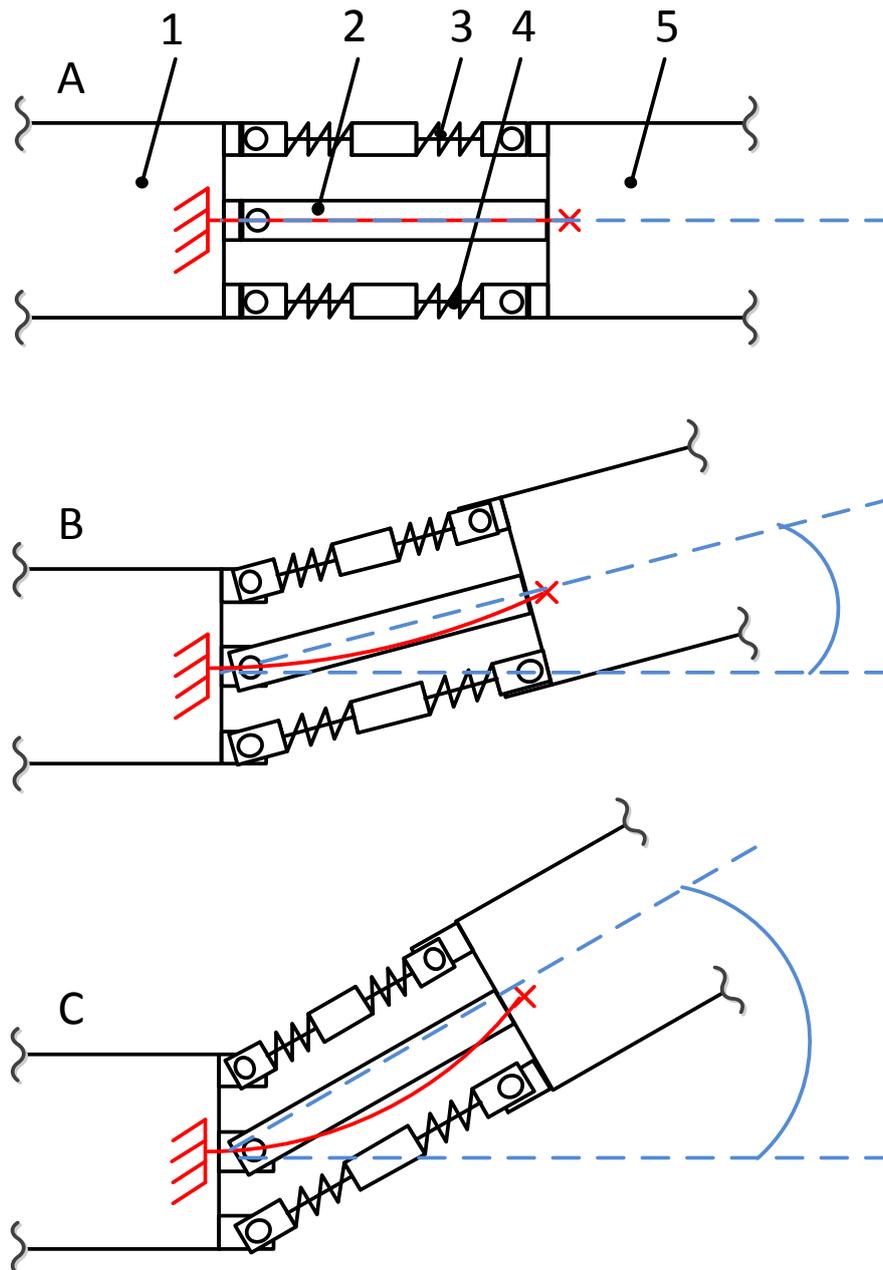


Abbildung 14: Skizze eines Teils des Bewegungsablaufes bei anguilliner Effektormodul-Konfiguration. 1 – Effektormodul 1, 2 – Drehgelenk mit 1 dof, 3 & 4 – Federelemente, 5 – Effektormodul 2. Rot: Auslenkung eines imaginären Biegebalkens. A – Ruhelage, B – Auslenkung von 1 nach unten, C – Umkehrpunkt

2.1.2 Gerade Biegung

Abbildung 15 zeigt das Modell des Biegebalkens bei gerader Biegung mit fester Einspannung. Alle relevanten Größen sind eingezeichnet.

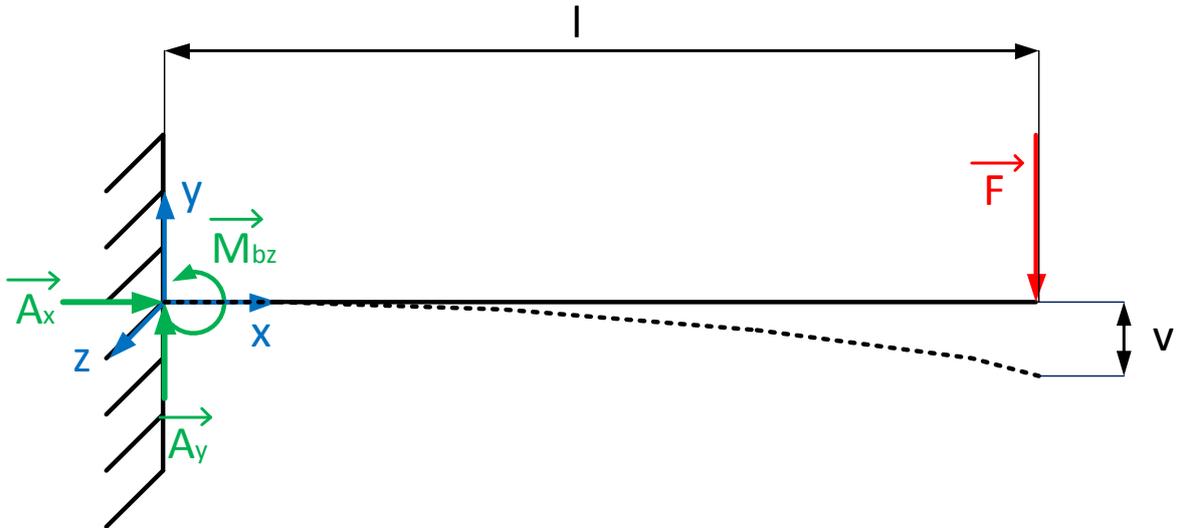


Abbildung 15: Skizze eines fest eingespannten Stabs bei gerader Biegung; v ist die Auslenkung des Stabs wenn eine Kraft F auf dessen Ende wirkt.

Die Summe aller Kräfte und Momente ergibt null. Daraus lassen sich die Lagerreaktionen für die gerade Biegung aufstellen:

$$A_x = 0 , \quad (1)$$

$$A_y = F , \quad (2)$$

$$M_{bz} = F * l . \quad (3)$$

Für die Auslenkung v des Stabs gilt:

$$v''(x) = \frac{M_{bz}(x)}{E * I_z} . \quad (4)$$

Mit den in diesem Fall gültigen Randbedingungen $v'(0) = 0$ und $v(0) = 0$, die daraus resultieren, dass durch die feste Einspannung am Koordinatenursprung keine Bewegungen des Balkens stattfinden (TU Berlin [25]), ergibt sich aus (3) und (4) die Formel

$$v(l) = \frac{F * l^3}{3 * E * I_z} . \quad (5)$$

2.2 Forderungsliste

In Tabelle 3 sind die Anforderungen für eine nachgiebige Kopplung zwischen zwei Effektormodulen der „Seeschlange“ dargestellt. Entsprechend dieser Anforderungen an die Kopplung erfolgt deren Konstruktion und Fertigung.

Tabelle 3: Anforderungsliste der nachgiebigen Kopplung

<i>Ifd. Nr.</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Forderung</i>	<i>Bemerkung</i>
1	Korrosionsbeständigkeit	F	Alle Materialien, die für die Kopplung verwendet werden
2	Modularität	F	Die Aufnahme für die elastischen Elemente des Gelenks muss an die vorhandenen Effektormodule passen.
3	Länge des Gelenks: 105 mm	W	Abstand zweier Effektormodule in der jetzigen Konfiguration
4	einfache Demontage	W	Möglichst wenige Schraubverbindungen
5	einfache Montage	W	Siehe Nr. 4
6	Kabeldurchführung nicht behindern	F	Steuerungssignale und elektrische Energie müssen zwischen den Modulen ausgetauscht werden können.
7	Kraftübertragung	F	Das Moment des Motors muss auf das folgende Effektormodul übertragen werden können.
8	Austauschbarkeit der Elastizitäten	F	Passive Einstellung der Nachgiebigkeit muss möglich sein.
9	dof = 1	F	

2.3 Funktionsstruktur

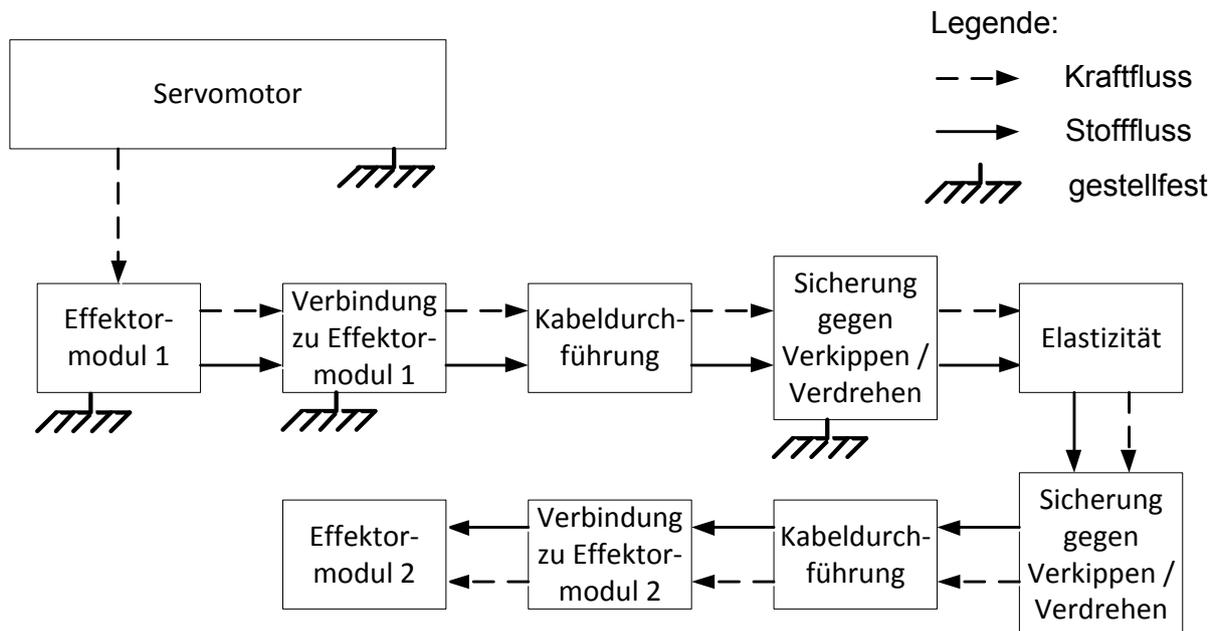


Abbildung 16: Funktionsstruktur der nachgiebigen Kopplung. Die Kraft wird über die starre Kopplung mit dem Basismodul auf Effektor-modul 1 übertragen.

Die obige Abbildung 16 zeigt die Funktionsstruktur der nachgiebigen Kopplung. Vor allem eine neue Variante die Elastizität in das Gelenk einzubringen und deren Sicherung gegen das Verkippen bzw. das Verdrehen wird während des weiteren Konstruktionsprozesses thematisiert.

2.4 Kombinationstabelle

Tabelle 4: Eingeschränkte Kombinationstabelle des nachgiebigen Gelenksegments

Oberbegriff 1	Oberbegriff 2	Oberbegriff 3	(lfd. Nr.) Variante
nachgiebiges Gelenksegment	mechanisch	Feder	(1) Druckfeder (2) Zugfeder (3) Schenkelfeder (4) Blattfeder (5) Elastomerefeder

Die Kombinationstabelle (Tabelle 4) ist auf mechanische Federvarianten eingeschränkt, da diese direkt auf der Wirkungsweise der derzeitigen Konfiguration

aufbauen können. Vorerst sollen auch keine Modifikationen an der „Seeschlange“ durchgeführt werden, die den Einbau von weiteren Motoren oder gar eines pneumatischen Systems nach sich ziehen. Ein weiterer Grund für die Beschränkung auf die genannten Federelemente ist, dass sie meistens kostengünstig erwerbbar sind, da es sich um Massenware handelt.

2.5 Bewertung

Die Bewertung der Federvarianten wird in Tabelle 5 durchgeführt. Für fünf ausgewählte Kategorien erfolgt eine Punktevergabe von 1 (sehr schlecht), 2 (schlecht), über 3 (mittelmäßig), zu 4 (gut) bis hin zu 5 (sehr gut). Die Kriterien sind je nach Relevanz mit einer Gewichtung G von 1 (gering), 2 (mittel) und 3 (hoch) versehen, mit der die vorher vergebene Punkteanzahl multipliziert wird. Daraus ergeben sich Punktwerte für die entsprechenden Kategorien, deren Summe die Endpunktzahl (maximal 50) ergibt. Dabei ist die Variante mit der höchsten Punktzahl am besten geeignet.

Kategorien

Die Federkennlinie beeinflusst das Schwingungsverhalten der Kopplung. Eine lineare Kennlinie entspricht dem mathematischen Modell und wird daher bevorzugt. Bei der Korrosionsbeständigkeit handelt es sich um eine sehr wichtige Eigenschaft für Bauelemente eines aquatischen Roboters. Unter Befestigungsmöglichkeit wird der Aufwand und die Art und Weise der Befestigung verstanden, die notwendig sind, um das Federelement in der nachgiebigen Kopplung sicher zu fixieren. Die allgemeine Geometrie der Feder spielt hierbei eine wichtige Rolle. Die einfache Austauschbarkeit der Federn ist bezüglich der Anforderung von passiv einstellbarer Nachgiebigkeit der Kopplung ebenfalls von großer Bedeutung. Der Fertigungsaufwand hat zwar keinen direkten Bezug zur Funktion der Kopplung, beeinflusst aber die Kosten der Fertigung und die Dauer der Herstellung.

Tabelle 5: Bewertungstabelle für die unterschiedlichen Federvarianten mit Gewichtung und Punktzahl

<i>Kategorie</i>	<i>G</i>	<i>Zug- feder</i>	Σ	<i>Schenkel- feder</i>	Σ	<i>Blatt- feder</i>	Σ	<i>Elasto- merfeder</i>	Σ
<i>Federkennlinie</i>	2	5	10	5	10	5	10	1	2
<i>Korrosionsbeständigkeit</i>	3	3	9	3	9	3	9	5	15
<i>Befestigungsmöglichkeit</i>	2	3	6	3	6	5	10	4	8
<i>einfach austauschbare bzw. einstellbare Nachgiebigkeit</i>	2	2	4	2	4	5	10	2	4
<i>Fertigungsaufwand</i>	1	3	3	2	2	4	4	3	3
<i>Gesamtsumme</i>			32/50		31/50		43/50		32/50

Ergebnis der Bewertung

Tabelle 5 veranschaulicht die zugeteilten Punktzahlen für die einzelnen Kategorien und Federvarianten. Die Blattfeder erhält die höchste Punktzahl. Die lineare Federkennlinie bei den gewöhnlichen Federblechen, die einfache Befestigungsmöglichkeit von Blechen (z.B. Klemmung) sowie die einfache Austauschbarkeit von Federblechen mit verschiedenen Federkennlinien haben den Ausschlag für die hohe erreichte Punktzahl gegeben.

2.6 Technisches Prinzip

In diesem Kapitel werden drei unterschiedliche Varianten und deren technische Prinzipien für die nachgiebige Kopplung vorgestellt. Sie sind an das aktuelle Design der Effektormodule angepasst. Variante 1 (siehe Abbildung 17) besteht aus einer ähnlichen Konfiguration wie die bereits vorhandene Variante. Mittig ist ein Drehgelenk mit einem Freiheitsgrad von eins platziert. Rechts und links davon befinden sich Halterungen für die Federbleche. Die Halterungen können in die Nut des Effektormoduls eingesetzt werden, die auch die vorhandene Ausführung der Kopplung dafür nutzt. Eine Klemmverbindung befestigt die Halterungen am Effektormodul. Die Bleche sind mittels einer Schraube über einen Anpressklotz in den Halterungen fixiert. Der Abstand zwischen den Effektormodulen beträgt 105mm.

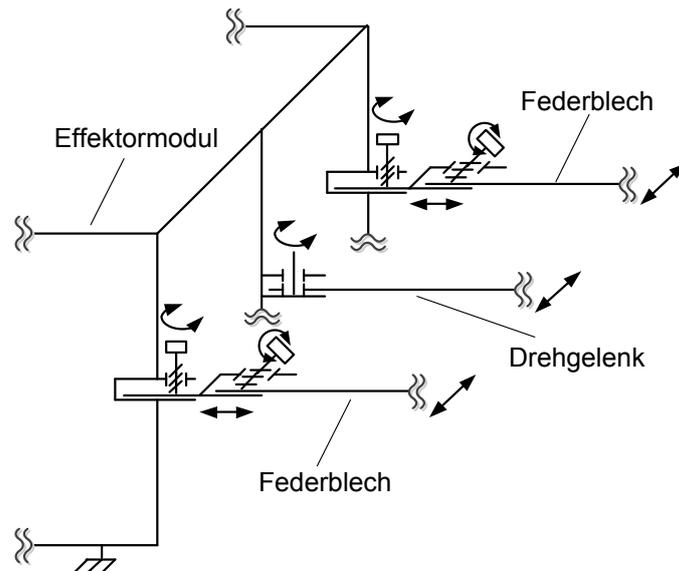


Abbildung 17: Technisches Prinzip der Variante 1 der nachgiebigen Kopplung

Abbildung 18 zeigt das technische Prinzip der zweiten Variante. Auch hier existiert ein mittig angebrachtes Drehgelenk. Die einzige Halterung für die Federbleche befindet sich im Gegensatz zu Variante 1 über dem Drehgelenk. Dadurch wird der Schwerpunkt der Kopplung weiter nach oben verschoben als bei Variante 1. Der Vorteil der einzelnen nachgiebigen Verbindung zum nächsten Effektormodul liegt darin, dass sie weitestgehend der mathematischen Modellvorstellung entspricht und deren Verhalten während der Bewegung besser abgeschätzt werden kann. Ein größerer Fertigungsaufwand entsteht durch die notwendige Brückenkonstruktion, um die Halterung für die Federbleche über dem Drehgelenk zu fixieren.

Abbildung 19 stellt hinsichtlich des Konstruktionsaufwandes die einfachste Variante dar. Auf das Drehgelenk wird im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Varianten verzichtet. Die Halterungen für die Federbleche werden mittig an den Effektormodulen angebracht. Die gesamte Kraft- und Momentenübertragung läuft über die eingesetzten Federbleche. Die Drehachse der nachgiebigen Kopplung liegt bei dieser Variante nicht beim Drehpunkt des Drehgelenks sondern in der Mitte der Verbindung.

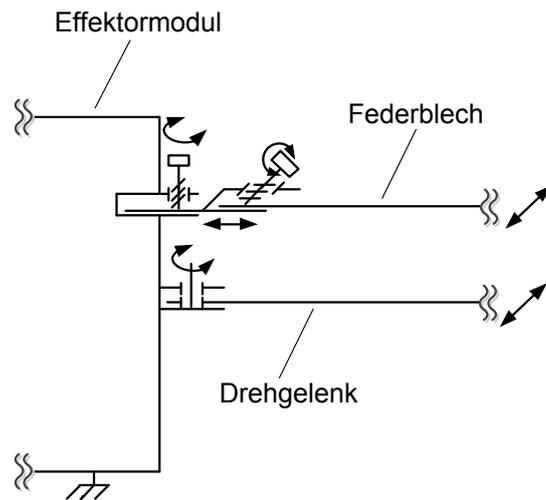


Abbildung 18: Technisches Prinzip der Variante 2 der nachgiebigen Kopplung

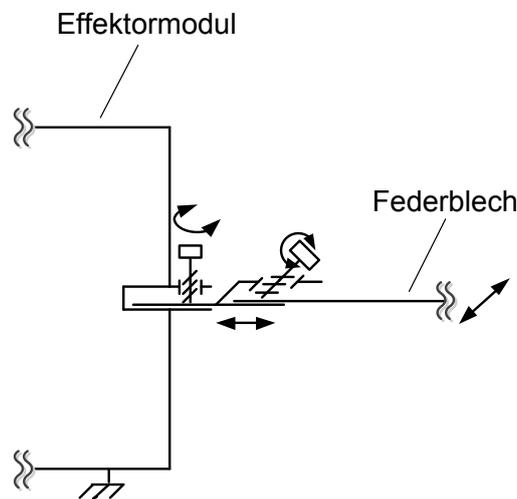


Abbildung 19: Technisches Prinzip der Variante 3 der nachgiebigen Kopplung

2.6.1 Bewertung

Die Vor- und Nachteile der drei Varianten für eine nachgiebige Kopplung mit Hilfe einer geraden Torsionsfeder zeigt Tabelle 6. Die Bauelemente, die für Variante 1 benötigt werden, können mit sehr einfachen Modifikationen auch für Variante 3 genutzt werden. Durch das Lösen einiger Schrauben wird das Drehgelenk entfernt und es ist möglich, an dessen Stelle die Halterung für die Federbleche zu montieren. Variante 2 benötigt zusätzliche Bauelemente, die bei den anderen beiden Varianten wegfallen. Aus diesem Grund wird Variante 2 nicht aufgebaut.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile der drei Varianten für eine nachgiebige Kopplung

	<i>Variante 1</i>	<i>Variante 2</i>	<i>Variante 3</i>
<i>Vorteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Konfiguration wie in bereits vorhandener Variante - Kraft- und Momentenübertragung durch drei Funktionselemente - mit den Bauelementen für diese Variante kann auch Variante 3 aufgebaut werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Kraft- und Momentenübertragung durch zwei Funktionselemente - Aufbau entspricht mathematischem Modell 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Anzahl von Funktionselementen - wenige Bauteile - Aufbau entspricht mathematischem Modell - Drehachse mittig zwischen den Effektormodulen
<i>Nachteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> - viele Bauteile und Funktionselemente - Drehachse nicht mittig zwischen den Effektormodulen - Vorspannung bei Federblechen für gewünschte Funktion notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> - höherer Schwerpunkt da nachgiebige Verbindung noch über dem Drehgelenk liegt - Drehachse nicht mittig zwischen den Effektormodulen 	<ul style="list-style-type: none"> - gesamte Kräfte und Momente müssen von Klemmverbindung gehalten und übertragen werden

2.7 Technischer Entwurf

Der technische Entwurf für die nachgiebige Kopplung wird mit der Konstruktionssoftware SolidWorks 2009 der Fa. Dassault Systèmes erstellt. In Abbildung 20 ist eine dreidimensionale Zeichnungsansicht der Halterungskonstruktion für die Federelemente zu sehen. In Abbildung 21 wird die gesamte nachgiebige Kopplung nach Variante 1 und deren Anschluss an die Effektormodule dargestellt. Die Draufsicht in Abbildung 22 dient zur Verdeutlichung des Aufbaus der Konstruktion und nennt die einzelnen Bestandteile der Kopplung. Abbildung 23 zeigt die zwischen den Effektormodulen eingebaute Variante 3.

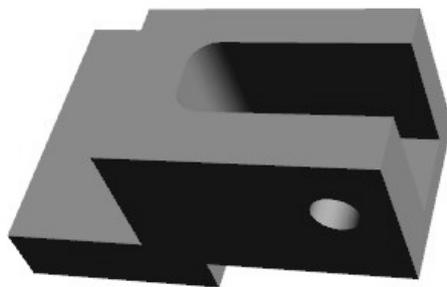


Abbildung 20: 3d-Zeichnungsansicht der Halterung für die Federelemente

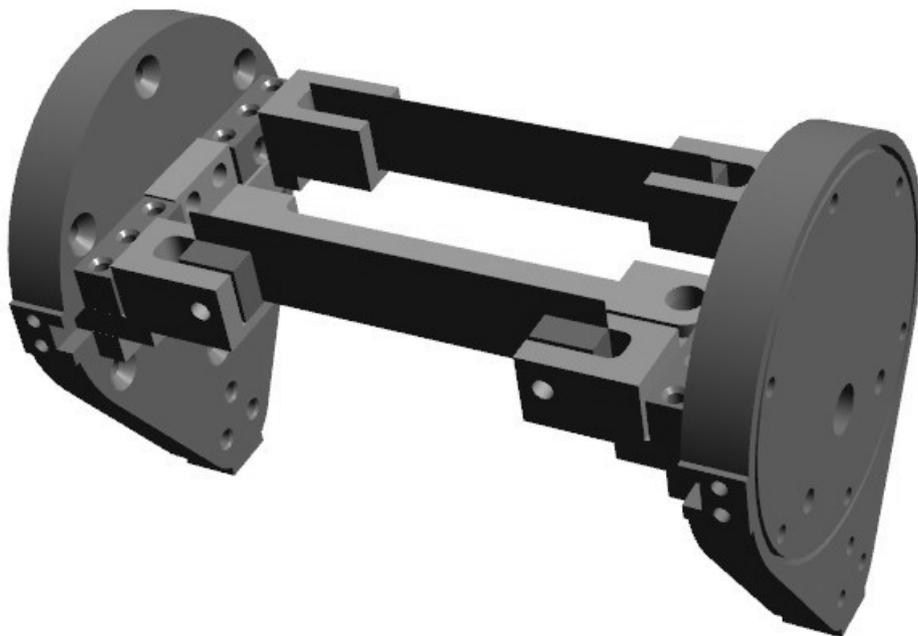


Abbildung 21: 3d-Zeichnungsansicht der nachgiebigen Kopplung nach Variante 1

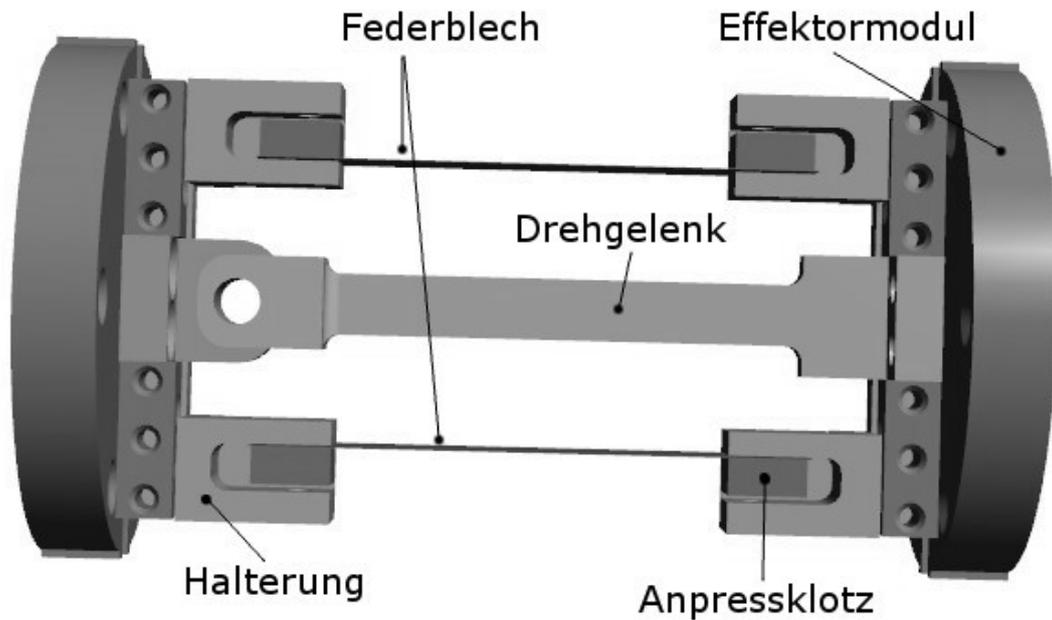


Abbildung 22: 3d-Zeichnungsansicht (von oben) der nachgiebigen Kopplung nach Variante 1.

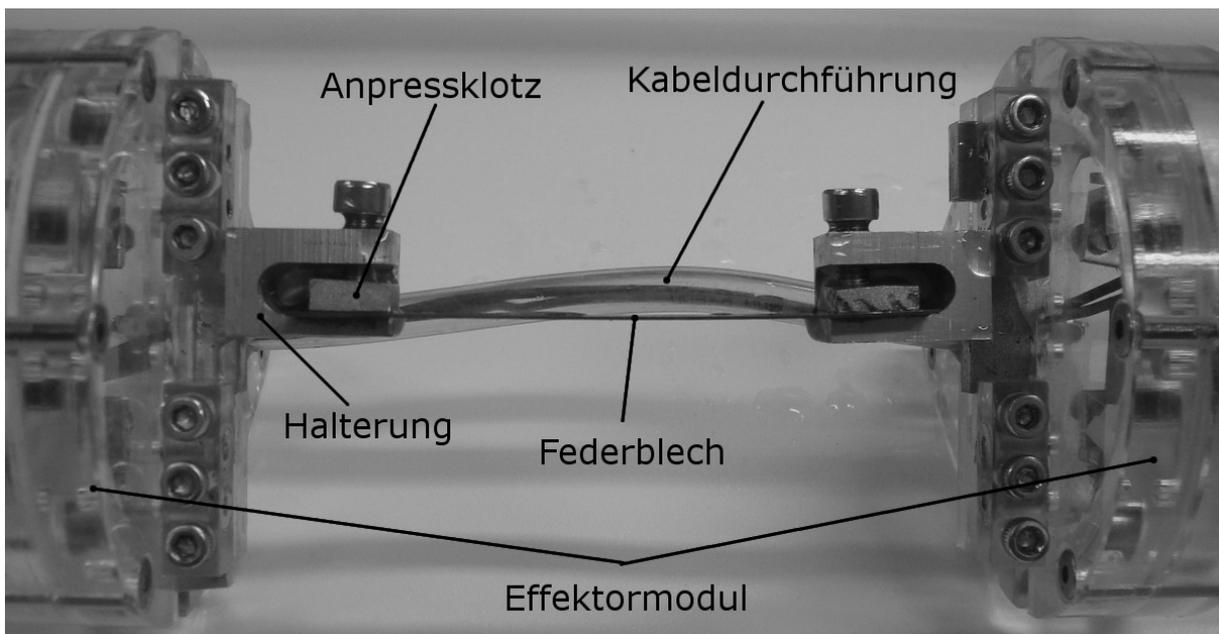


Abbildung 23: Draufsicht der zwischen zwei Effektormodulen eingebauten Variante 3.

2.8 Fertigung

Die Herstellung der benötigten Aufsatzstücke aus Aluminium findet im Fachgebiet Fertigungstechnik der TU Ilmenau statt. Als Fertigungsverfahren wird das Erodieren gewählt. Die nicht durchgängigen Aussparungen und die Bohrlöcher werden mittels

konventionellen Spanverfahren im Robotik-Labor des Fachgebietes Mechatronik der TU Ilmenau gefertigt.

2.9 Abschätzung einer Federkonstanten bei diversen Federblechen

Um bei verschiedenen Federblechen die Federkonstante c abzuschätzen, wird folgender Versuch aufgebaut. Das Federblech wird fest zwischen zwei Platten mit einer frei beweglichen definierten Länge l gespannt. Anschließend werden verschiedene Massen m mit Hilfe eines Klebestreifens an das freie Ende befestigt und die Auslenkung v des Federblechs anhand einer Skala eines Lineals gemessen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 24 skizziert, Abbildung 25 zeigt ein Foto des tatsächlichen Aufbaus. Ist aufgrund der Auslenkung durch ein Gewicht kein Wert mehr ablesbar, wird die Messung für das Federblech beendet. Aus der Auslenkung wird das Elastizitätsmodul E und daraus die Federkonstante der Blattfeder unter Nutzung der Software Microsoft Excel 2007 bestimmt. Der Mittelwert der berechneten Elastizitätsmodule dient zur Berechnung der Federsteifigkeit.

Für die Berechnung des Elastizitätsmodul E wird das mathematische Modell der geraden Biegung genutzt. Für die Auslenkung v gilt wie im vorherigen Abschnitt hergeleitet

$$v = \frac{F * l^3}{3 * E * I_z} \quad (5)$$

mit dem Flächenträgheitsmoment für einen rechteckigen Querschnitt

$$I_z = \frac{b * h^3}{12} \quad (6)$$

Gleichung (5) nach E umgestellt ergibt die Formel für die Berechnung des Elastizitätsmoduls

$$E = \frac{F * l^3}{3 * v * I_z} \quad (7)$$

Außerdem gilt

$$F = c * s \quad . \quad (8)$$

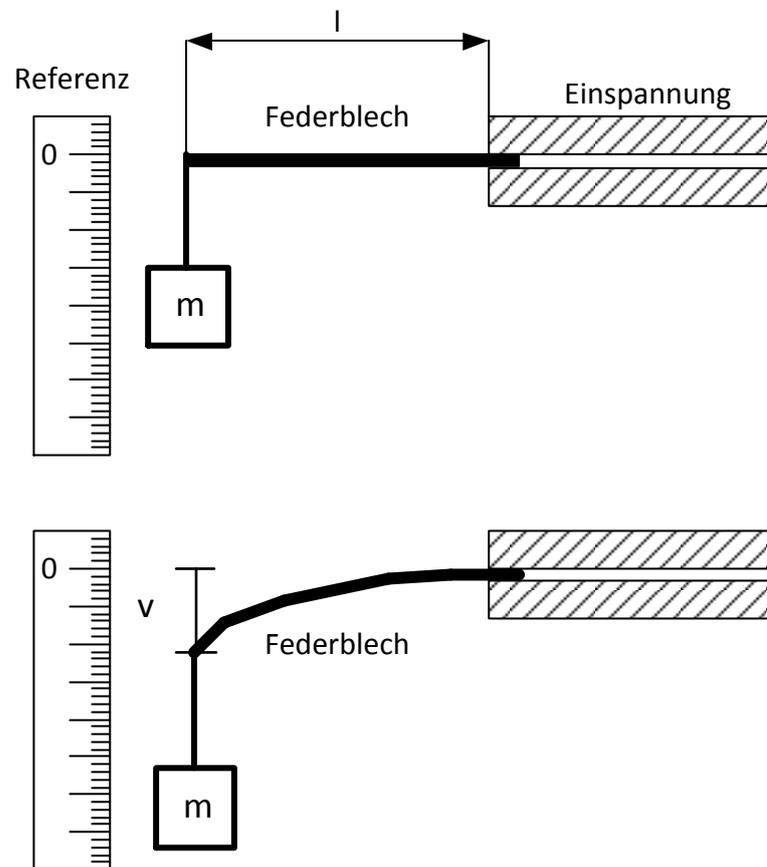


Abbildung 24: Skizze des Versuchsaufbaus. Oben: Ohne Auslenkung; unten: Mit Auslenkung und Messgröße v

Gleichung (8) wird in (7) eingesetzt und (7) dann nach c umgestellt. Die Federsteifigkeit der Federbleche ergibt sich zu:

$$c = \frac{3 * E * I z}{l^3} \quad . \quad (9), (TU Berlin [25])$$

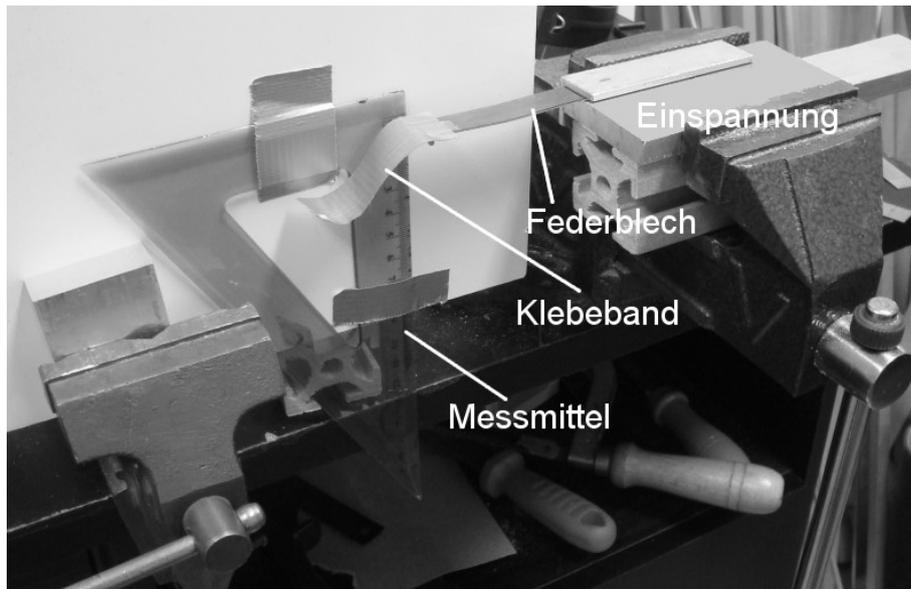


Abbildung 25: Aufbau zum Messen der Auslenkung v für Federbleche, die an der freien Stirnseite mit verschiedenen Massen beschwert werden.

Tabelle 7: Maße der Federbleche. Die Länge l beschreibt hierbei nicht die tatsächliche Länge des Federstücks, sondern die frei bewegliche Weglänge.

Federblechnr.	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	9.1
l [mm]	50	50	65	65	65	65	65	65	65
b [mm]	20	20	15,4	15	10,2	17	13,8	14,3	15
h [mm]	0,15	0,1	0,2	0,2	0,65	0,65	0,4	0,15	0,45

Tabelle 8: Auslenkungen der unterschiedlichen Federbleche bei den angegebenen angehängenen Gewichten

Federblechnr.	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	9.1
m [kg]	F [N]	v [mm]							
0,01	0,0981	6	19	12	6			25	
0,02	0,1962	10	30	19	11	1	3	50	1
0,03	0,2943	15	45	28	15				
0,04	0,3924	18		37	20				
0,05	0,4905	22			24	2	2	6	1,5
0,07	0,6867				29			9	
0,1	0,981					6	4	13	4
0,2	1,962					12	7	23	8
0,5	4,905					26	14		17

Die mit (7) berechneten Elastizitätsmodule werden in einer Tabelle im Kapitel im Anhang aufgeführt. Tabelle 9 zeigt die mit (6) berechneten Flächenträgheitsmomente neben den Mittelwerten der Elastizitätsmodule. Diese Mittelwerte werden in Formel (9) eingesetzt. Daraus ergeben sich die Werte für die Federsteifigkeit, die in der gleichen Tabelle abzulesen sind.

Tabelle 9: Die berechneten Flächenträgheitsmomente, die Mittelwerte der berechneten Elastizitätsmodule und die daraus resultierenden Federsteifigkeiten c.

<i>Federblechnummer</i>	I_z [mm ⁴]	E_{mittel} [N/mm ²]	c [N/mm]
1.1	0,005	147682	0,02
2.1	0,002	152026	0,007
3.1	0,01	117748	0,013
4.1	0,01	179334	0,02
5.1	0,23	74598	0,19
6.1	0,39	61992	0,26
7.1	0,074	95575	0,08
8.1	0,004	89313	0,004
9.1	0,11	209309	0,26

Bei den später durchgeführten Versuchen werden die Federbleche in das Gelenk eingebaut und deren Eignung für die anguilliforme Fortbewegung der „Seeschlange“ überprüft.

2.10 Konzeption eines modularen Verbindungsstückes zur Verbindung der Effektormodule mit der nachgiebigen Kopplung

Das Auswechseln der nachgiebigen Kopplung zur Variation der Steifigkeit ist in der aktuellen Ausführung der Seeschlange zeitaufwändig, da viele Schraubverbindungen gelöst werden müssen. Außerdem ist es schwierig andere Gelenkvarianten einzubauen, da diese sich nach dem derzeitigen Design richten müssen, um verdreh- und verkipfungssicher befestigt werden zu können. Daher wird in diesem Kapitel ein Konzept für ein neues modulares Verbindungsstück vorgestellt, welches einen einfachen Ausbau oder Wechsel der nachgiebigen Kopplung ermöglicht.

2.10.1 Forderungsliste

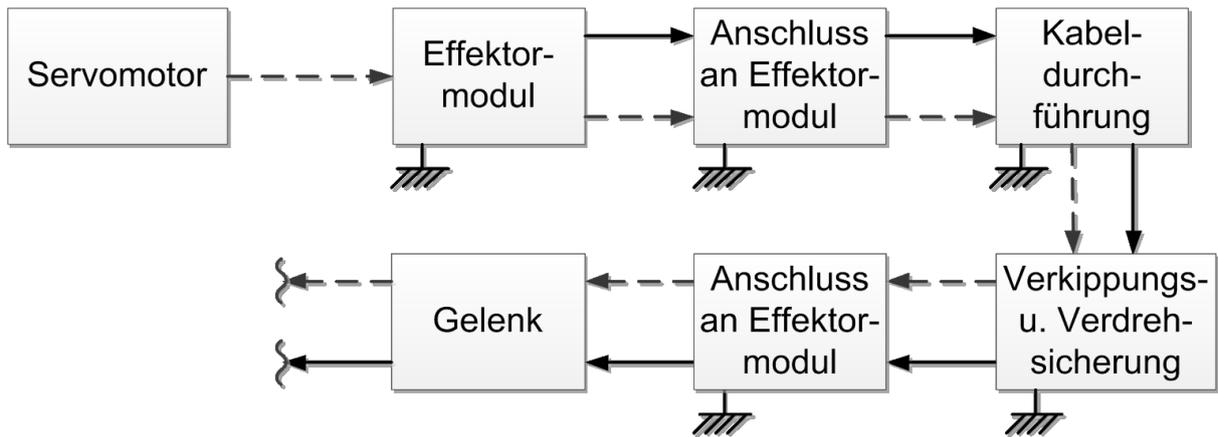
Die Liste mit Anforderungen (siehe Tabelle 10) an das zu entwickelnde Verbindungsstück beinhaltet die wichtigen Parameter für dessen Konstruktion und dient als Referenz im gesamten Konstruktionsprozess.

2.10.2 Funktionsstruktur

Die allgemeine Funktionsstruktur beschreibt die Wirkzusammenhänge des Energie-, Informations- und Stoffflusses. Auf dieser Basis können mit Hilfe einer Kombinationstabelle verschiedene Varianten für das zu konstruierende Objekt erstellt werden. Abbildung 26 zeigt die Funktionsstruktur des modularen Verbindungsstücks. Informationsübertragung findet nicht statt, da es sich um ein rein passives mechanisches Element handelt.

Tabelle 10: Anforderungsliste für das modulare Verbindungsstück

<i>lfd. Nr.</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Forderung</i>	<i>Bemerkung</i>
1	korrosionsbeständig	F	Alle Materialien, die für das Verbindungsstück verwendet werden
2	wasserdicht	F	
3	Modularität	F	Das Verbindungsstück muss an die vorhandenen Module passen sowie verschiedene Gelenkvarianten aufnehmen können.
4	tiefe Lage des Schwerpunkts	F	Schwerpunkt der Schlange soll so niedrig wie möglich bleiben, um ein Umkippen zu vermeiden
5	$\varnothing \leq 54\text{mm}$	F	Vorgegebenes Innenmaß eines Moduls der „Seeschlange“
6	einfache Demontage	F	Möglichst wenige Schraubverbindungen
7	Kabeldurchführung	F	Steuerungssignale und elektrische Energie müssen zwischen den Modulen ausgetauscht werden können
8	Kraftübertragung	F	Das Moment des Motors muss auf das Gelenk übertragen werden können



Legende:

- → = Kraftfluss
- = Stofffluss
- = gestellfest

Abbildung 26: Funktionsstruktur des modularen Verbindungsstückes

2.10.3 Kombinationstabelle

Die nachfolgende Kombinationstabelle (Tabelle 11) beschreibt mögliche Wirkprinzipien für den Anschluss des Verbindungsstückes an ein Modul beziehungsweise an das Gelenk.

Tabelle 11: Kombinationstabelle zur Konzeption des Verbindungsstückes

Oberbegriff 1	Oberbegriff 2	Oberbegriff 3	(lfd. Nr.) Variante
Lösbarer Anschluss des Verbindungsstückes	mechanisch	klemmen	(1) Schraubverbindung
		pressen	(2) Passstift und Bolzen
		einhängen	(3) Klettverschluss
	magnetisch	magnetische Anziehung	(4) Permanentmagnet
			(5) Elektromagnet
	pneumatisch	ansaugen	(6) Unterdruckerzeugung
			pressen

Für die anschließende Bewertung werden pneumatische Lösungen vernachlässigt, da es in der Seeschlange kein pneumatisches System gibt und dessen Implementierung zu aufwändig wäre. Ebenso wird auf eine weitere Untersuchung der Variante mit einem Elektromagneten verzichtet, da hier zusätzliche elektrische Energie bereitgestellt werden muss und zusätzlich mehr Kabelleitungen nötig sind. Die Einleitungen der Kabel in ein Segment der Seeschlange sind weiterhin gegen

eindringendes Wasser abzudichten, was insgesamt einen zu großen Aufwand erforderte.

2.10.4 Bewertung

Die Bewertung der übrigen Varianten wird in Tabelle 12 durchgeführt. Für fünf ausgewählte Kategorien erfolgt eine Punktevergabe von 1 (sehr schlecht), 2 (schlecht), über 3 (mittelmäßig), zu 4 (gut) bis hin zu 5 (sehr gut). Die Kriterien sind je nach Relevanz mit einer Gewichtung G von 1 (gering), 2 (mittel) und 3 (hoch) versehen, mit der die vorher vergebene Punkteanzahl multipliziert wird. Daraus ergeben sich Punktwerte für die entsprechenden Kategorien, deren Summe die Endpunktzahl (maximal 60) ist. Dabei ist die Variante mit der höchsten Punktzahl am besten. Welche Nummer zu welcher Variante gehört, ist der Kombinationstabelle (Tabelle 11) zu entnehmen.

Kategorien

Im folgenden Abschnitt werden die gewählten Kategorien kurz erläutert. Wie in der Forderungsliste (siehe Tabelle 10) festgehalten ist, spielt das Gewicht des Verbindungsstücks und dessen Verteilung eine wichtige Rolle. Ist die Masse des Verbindungsstücks zu groß, könnte es zu einem Durchhängen der „Seeschlange“ an den Verbindungsstellen kommen, was wiederum die Bewegung des Roboters beeinflussen kann. Des Weiteren wird der Fertigungsaufwand der jeweiligen Variante eingeschätzt, der zwar für die Funktion nicht direkt relevant, aber sowohl ein Zeit- als auch ein Kostenfaktor ist. Die Dichtheit und Beständigkeit gegen Fluide ist für ein System, das im und unter Wasser arbeitet, ebenfalls von großer Bedeutung. Elektrische Bauteile sind vor Kontakt mit Wasser zu schützen. Zudem würde ein Wassereintritt in die einzelnen Segmente des Roboters dessen Gewicht erhöhen und letztendlich zum Funktionsversagen führen. Weiterhin soll das neue modulare Verbindungsstück dem Benutzer den Austausch oder Ausbau eines Gelenksegments erleichtern. Daher wird der einfachen Lösbarkeit der Verbindung ein hoher Stellenwert beigemessen. Wesentlicher Bestandteil der Funktion für das Verbindungsstück ist es, das im Motor erzeugte Moment zur Fortbewegung der

Seeschlange auf das Gelenk zu übertragen. Daher ist die Kraftübertragung ebenfalls in die Bewertungstabelle mit aufgenommen.

Ergebnis der Bewertung

Auf Basis der Bewertung erfolgt die Umsetzung von Variante 2, das Zusammenpressen der Verbindungsstücke mit Hilfe von Passstiften. Zwar ist der Fertigungsaufwand am größten, jedoch wird in den wichtigen Kategorien „wasserfest / wasserdicht“, „einfache Lösbarkeit der Verbindung“ sowie „Kraftübertragung“ die maximal mögliche Punktzahl erreicht. Aus diesem Grund ist dies die am besten geeignete Variante für die Anforderungen.

Tabelle 12: Bewertungstabelle für verschiedene mögliche Varianten des modularen Verbindungsstückes

<i>Kategorie</i>	<i>G</i>	<i>Variante 1</i>	Σ	<i>Variante 2</i>	Σ	<i>Variante 3</i>	Σ	<i>Variante 4</i>	Σ
<i>Gewicht</i>	2	3	6	3	6	5	10	3	6
<i>Fertigungsaufwand</i>	1	4	4	1	1	5	5	4	4
<i>wasserfest / wasserdicht</i>	3	5	15	5	15	3	9	4	12
<i>Einfache Lösbarkeit der Verbindung</i>	3	2	6	5	15	5	15	5	15
<i>Kraftübertragung</i>	3	5	15	5	15	1	3	3	9
<i>Gesamt Σ</i>		46/60		52/60		42/60		46/60	

2.10.5 Technisches Prinzip

Abbildung 27 zeigt drei verschiedene Varianten für das Verbindungsstück mit Passstift und Bolzen. Bei Variante 1 fixiert ein zentraler Bolzen zusammen mit zwei Passstiften die beiden einzelnen Elemente miteinander. Im segmentseitigen Element (gestellfest) ist eine Bohrung für die Durchführung von Kabeln vorgesehen. Variante 2 wird ebenfalls von einem zentralen Bolzen mit zwei Passstiften zusammengehalten. Der Durchlass für Kabel ist hier durch beide Elemente geführt.

Variante 3 besitzt im Unterschied zu den ersten beiden Varianten zwei Bolzen, die mittig in einer Ebene liegen. Zwischen den Bolzen befindet sich die Durchgangsbohrung für Kabelleitungen.

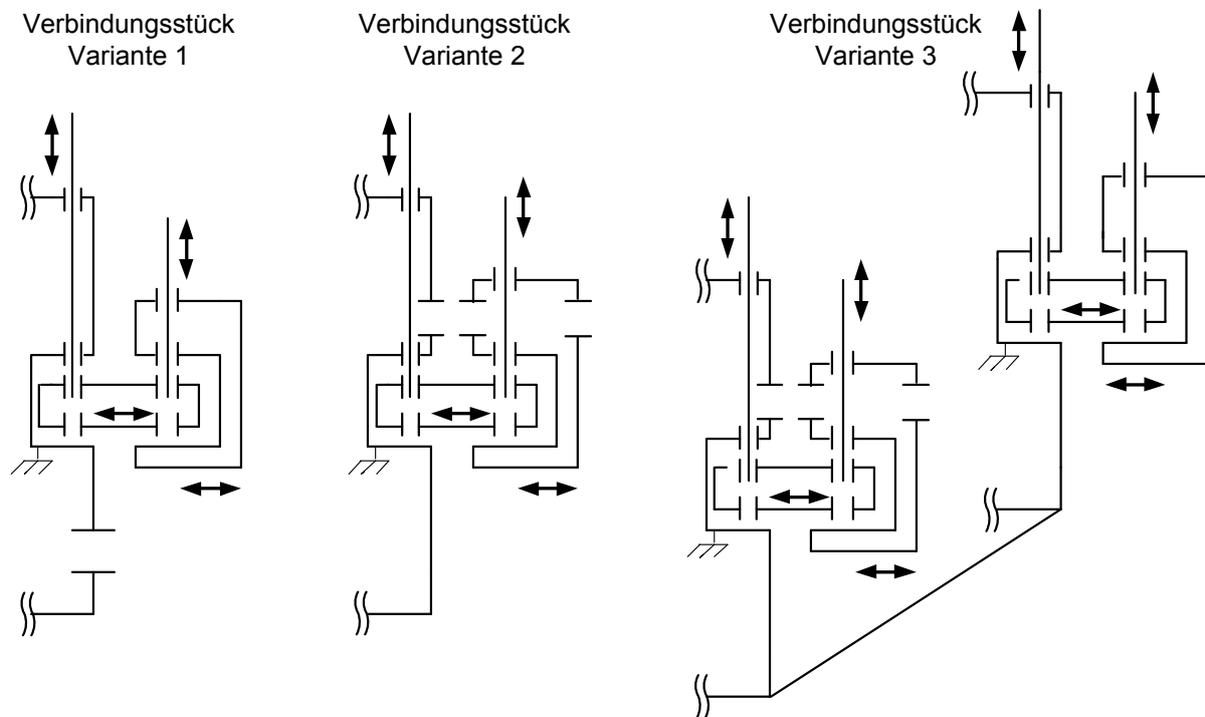


Abbildung 27: Drei verschiedene Varianten möglicher technischer Prinzipie für das Verbindungsstück

2.10.6 Bewertung

Die Vor- und Nachteile der ausgewählten Varianten werden in Tabelle 13 aufgeführt. Wegen der hohen Sicherheit gegen Verdrehung bzw. Verkippung des Anschlussstücks für das Gelenk wird trotz der statischen Überbestimmtheit Variante 3 gewählt. Ein erster technischer Entwurf zur Fertigung eines Testmusters wird mit Hilfe der Konstruktionssoftware SolidWorks 2009 erstellt. Die Zeichnungen zu den Einzelteilen befinden sich sowohl auf der der Arbeit beiliegenden CD-ROM als auch im Anhang (vgl. Kapitel 8.1 Zeichnungen und Entwürfe). Abbildung 28 zeigt eine Explosionsansicht und eine zusammengefügte Ansicht des ersten Modells des modularen Verbindungsstückes. Nicht in Abbildung 28 erkennbar ist eine in Element 2 eingefügte Nut um das Durchgangsloch. In diese wird ein Dichtungsring eingelegt,

der einen Wassereintritt in den Roboter an der Verbindungsstelle beider Elemente verhindert.

Tabelle 13: Vor- und Nachteile der drei Ausführungen für das modulare Verbindungsstück

	<i>Ausführung 1</i>	<i>Ausführung 2</i>	<i>Ausführung 3</i>
<i>Vorteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Nur ein Bolzen, weniger Bauteile insgesamt - geringerer Fertigungsaufwand - Durchgangsloch am gestellfesten Element 	<ul style="list-style-type: none"> - Nur ein Bolzen, weniger Bauteile insgesamt - geringerer Fertigungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> - gute Sicherung gegen Verkippen und Verdrehen - sichere Abdichtung des Durchgangslochs durch die parallelen Bolzen möglich
<i>Nachteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Mittiger Bolzen erschwert Anbringen des Gelenkkörpers, da die Befestigung der starren Kopplung mittig erfolgen muss 	<ul style="list-style-type: none"> - Mittiger Bolzen erschwert Anbringen des Gelenkkörpers, da die Befestigung der starren Kopplung mittig erfolgen muss - sichere Abdichtung des Durchgangslochs mit nur einer Andruckstelle durch den einzelnen Bolzen fraglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Zwei Bolzen, mehr Bauteile insgesamt - höherer Fertigungsaufwand - statisch überbestimmt, unerwünschtes Klemmen ist möglich

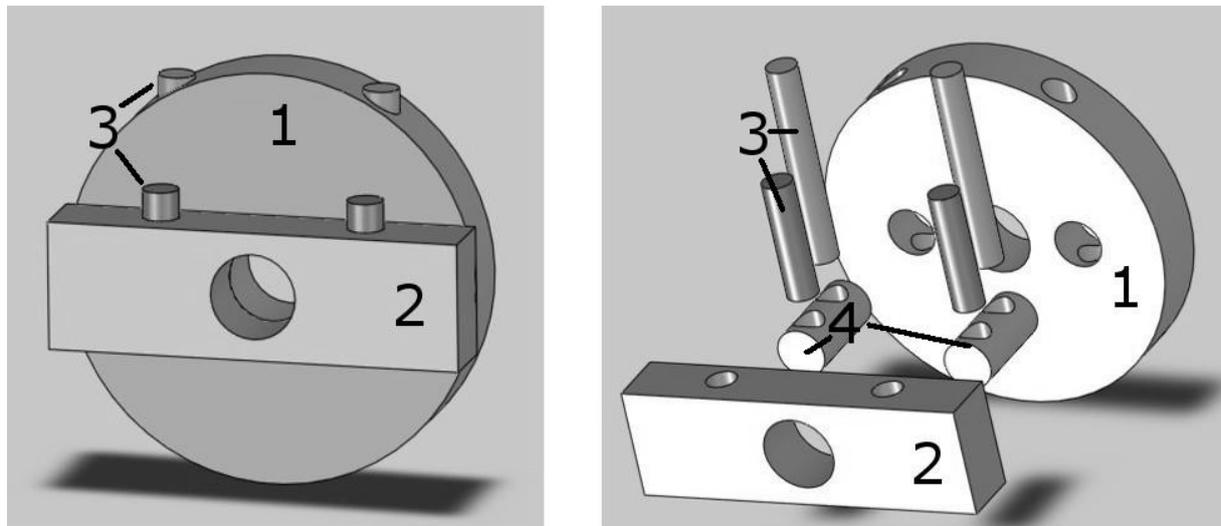


Abbildung 28: Ansichten des technischen Entwurfs für das modulare Verbindungsstück; 1 - Anschluss Segmentseite, 2 - Anschluss Gelenkseite, 3 - Passstifte, 4 - Bolzen

2.10.7 Fertigung

Ein erster Demonstrator aus Aluminium wurde im Fachgebiet Fertigungstechnik der TU Ilmenau gefertigt. Der segmentseitige Anschluss wurde mit einer Drehmaschine hergestellt, die Löcher für die Stifte wurden gebohrt. Das Anschlussstück für das Gelenk ist grob aus einem Stück Stangenmaterial ausgesägt und anschließend auf Maß gefräst worden. Das Durchgangsloch, die Bohrungen für die Stifte und die Nut sind ebenfalls mit einer Fräsmaschine gefertigt worden. Die testweise eingesetzten Passstifte sind Fertigelemente aus Stahl.

2.10.8 Versuchsvorbereitung zur Überprüfung der Dichtheit der gewählten Ausführung des modularen Verbindungsstücks

Zur Überprüfung der Wasserdichtheit der gestalteten Verbindung wird ein Dichtigkeitsversuch durchgeführt.

In die Nut von Element 2 (siehe Abbildung 29) wird ein Dichtring aus Silikon eingesetzt und mit handelsüblichem Fett (Melkfett der Fa. DM) behandelt. Die Verbindung der Einzelteile erfolgt durch Passstifte. Zur Vermeidung von Fettrückständen im Innern des Verbindungsstückes wird das Durchgangsloch gereinigt. Als Indikator für die Dichtheit dient ein Stück Löschpapier, welches in die Durchgangsöffnung des Verbindungsstückes implementiert wird (siehe Abbildung 29). Durch die gut sichtbare Verfärbung des Löschpapiers bei Kontakt mit Wasser ist es für diese einfache Dichtheitsüberprüfung geeignet. Die Durchführungen des Verbindungsstückes werden beidseitig mit Klebeband verschlossen, um einen seitlichen Wassereintritt zu verhindern (siehe Abbildung 30).

2.10.9 Versuchsdurchführung

Das Verbindungsstück wird vollständig unter Wasser getaucht und die Dichtheit in den Intervallen 30, 60, 90, 150, 180 und 210 Minuten überprüft. Dazu wird das Klebeband einseitig gelöst, das Löschpapier herausgezogen und auf Verfärbungen untersucht. Mit einer Digitalkamera werden die Ergebnisse dokumentiert (siehe

Abbildung 31 und Abbildung 32). Anschließend wird die Öffnung erneut abgedichtet und das Verbindungsstück wieder unter Wasser getaucht.

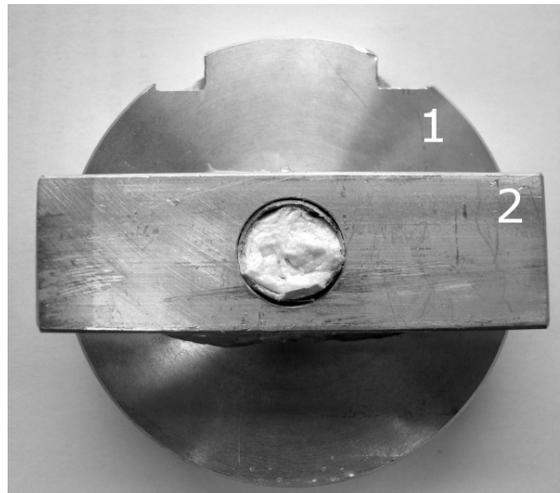


Abbildung 29: Verbindungsstück mit Löschpapier

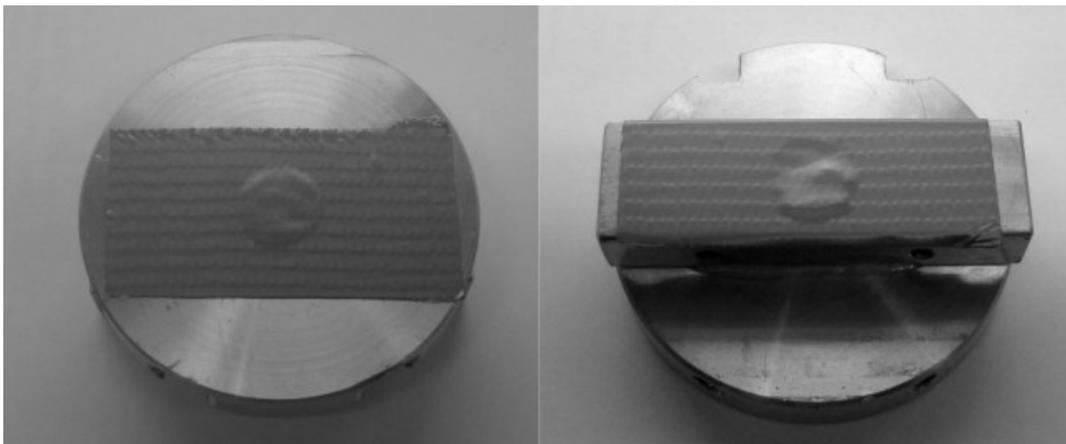


Abbildung 30: Zugelebte Durchgangsöffnungen des Verbindungsstückes

2.10.10 Versuchsauswertung

In Tabelle 14 werden die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt. Der Versuch zeigt, dass die gewählte Art der Verbindung mit Passstiften dicht ist. Mögliche Fehler, die bei diesem Versuch entstanden sein können, haben ihre Ursache vor allem in der Handhabung des Löschpapiers. Geringe Mengen von Wasser auf dem Papier trocknen an der Luft sehr schnell aus. Da es ein bis zwei Minuten dauerte, bis das Papier auf dem Tisch ausgebreitet und fotografiert werden konnte, könnten kleine Wasserflecken schon verdunstet gewesen sein. Allerdings sind die potentiell eingetretenen Wassermengen im Vergleich zur Verweildauer des

Verbindungsstückes im Wasser sehr gering. Mit einem angepassten Dichtungsring und einer hülsenartigen Einlage im Durchgangsloch kann der Wassereintritt an dieser Stelle gänzlich verhindert werden.

Tabelle 14: Zusammenfassung der Ergebnisse der Dichtheitsüberprüfung

<i>Zeit in Minuten</i>	<i>Wassereintritt?</i>	<i>Bemerkungen</i>
30	Nein	Fettfleck entstand durch Übersehen eines Melkfettrestes im Durchgangsloch
60	Nein	
90	Ja*	*Wassereintritt (wenige Tropfen) durch den Klebestreifen auf der Vorderseite, die kritische Stelle in der Mitte blieb trocken.
150	Ja*	*Wassereintritt (wenige Tropfen) durch den Klebestreifen auf der Rückseite, die kritische Stelle in der Mitte blieb trocken.
180	Ja*	Siehe oben
210	Ja*	Siehe oben

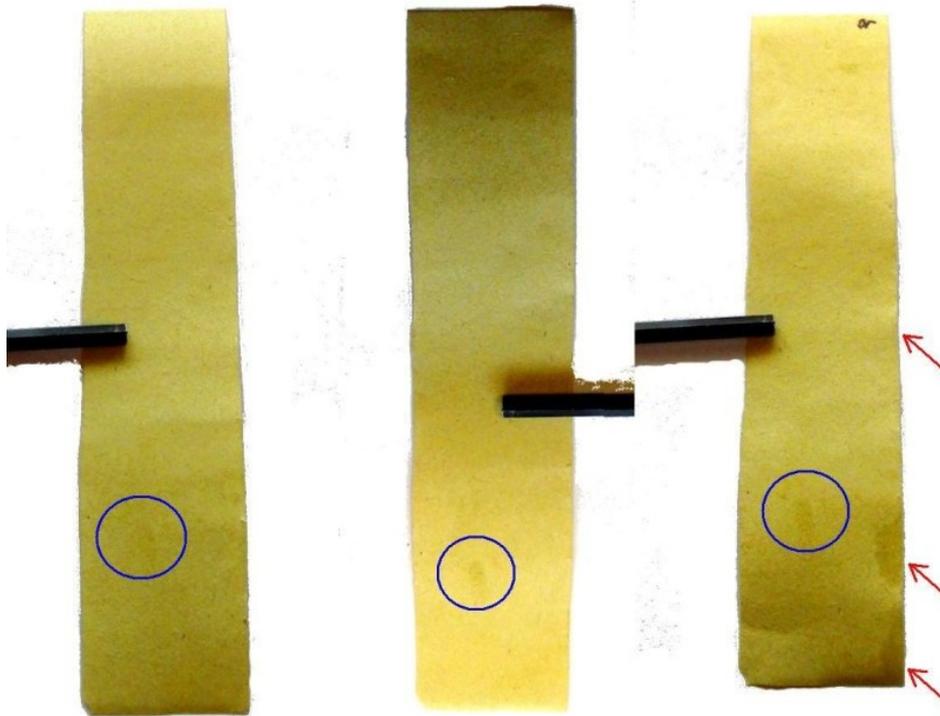


Abbildung 31: Löschpapierstreifen nach 30 (links), 60 (Mitte) und 90 (rechts) Minuten. Der blaue Kreis markiert einen Fettfleck, die roten Pfeile Wasserflecken.

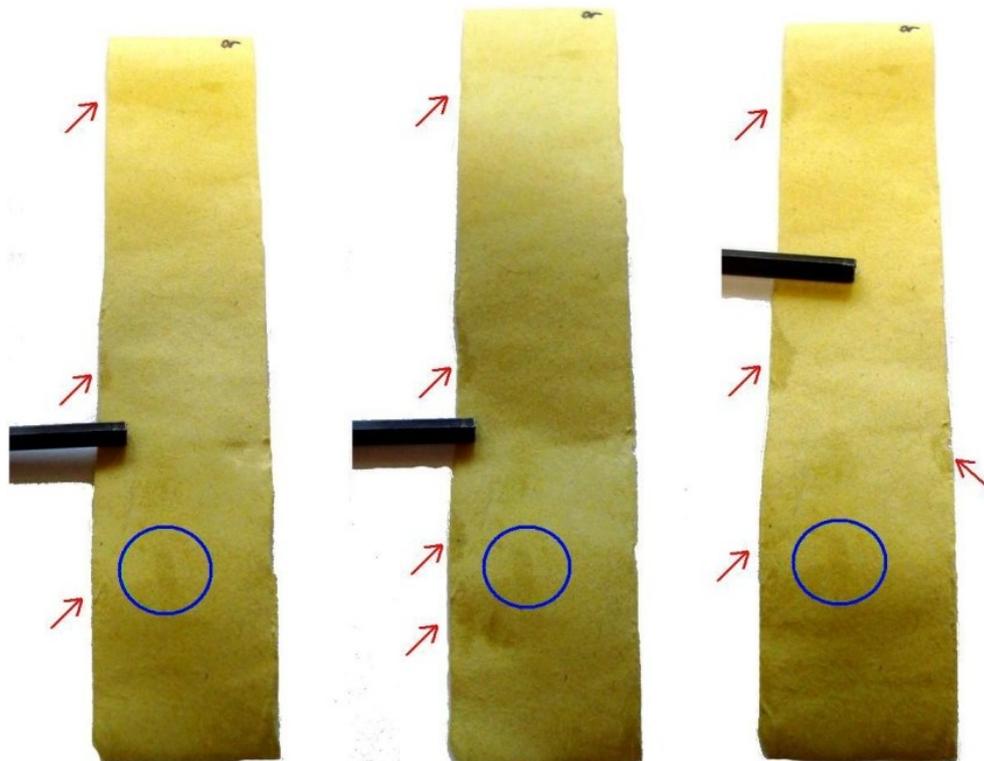


Abbildung 32: Löschpapierstreifen nach 150 (links), 180 (Mitte) und 210 (rechts) Minuten. Der blaue Kreis markiert einen Fettfleck, die roten Pfeile Wasserflecken.

3. Entwicklung einer Messschaltung zur kontinuierlichen Aufnahme von Strom- und Spannungswerten in der Seeschlange

Um die verschiedenen Effektormodul-Konfigurationen und Kopplungsvarianten vergleichen zu können, ist es notwendig Kriterien zu definieren, die auf diese unterschiedlichen Konfigurationen angewendet werden können. So sollen Vor- und Nachteile des jeweiligen Systems herausgestellt werden. Außerdem ist eine vergleichbare messtechnische Erfassung beider Systeme wünschenswert, damit es möglich ist quantitative Aussagen zur Funktion zu machen. Zum Vergleich des aktuellen Gelenkdesigns mit der in dieser Arbeit neu konzipierten Variante soll die Messung und Aufnahme des Stroms bei der Fortbewegung der Seeschlange dienen. Es muss eine Schaltung entwickelt werden, die klein genug ist, um im begrenzten Innenraum des Roboters Platz zu finden und gleichzeitig die zu erwartenden Ströme und Spannungen verarbeiten kann. Für die strukturierte Darstellung des Entwicklungsprozesses wird auf einen verkürzten Ablaufplan einer klassischen Konstruktion zurückgegriffen.

3.1 Forderungsliste

Die wichtigsten Anforderungen an die zu entwickelnde Platine werden in Tabelle 15 festgehalten. Aus den aufgeführten Forderungen können erste Bauteile ausgewählt und ein Funktionsprinzip erstellt werden.

3.2 Funktionsstruktur

In Abbildung 33 wird eine grundsätzliche Funktionsstruktur für die Strom- und Spannungsmessung gezeigt. Den Schaltplan zeigt Abbildung 34.

Tabelle 15: Anforderungsliste für die Platine zur Strom- und Spannungsmessung

<i>lfd. Nr.</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Forderung</i>	<i>Bemerkung</i>
1	Breite \leq 40mm	F	Begrenztes Raumangebot im Innern der Seeschlange
2	Länge \leq 60mm	F	s.o.
3	Bauhöhe \leq 10mm	F	s.o., Platine + Bauteile
4	Eingangsspannung \geq 8,4V	F	Maximalspannung der verbauten Lithium Polymer Zellen
5	Messstrom bis 1,5 A	F	
6	Anschluss an Peripherie mittels USB Schnittstelle	F	
7	Drahtlose Kommunikation	W	Durch USB Schnittstelle auch später realisierbar
8	Geringer Stromverbrauch	F	
9	Ausgabe von Klartext	W	Messwerte nicht in Hex- oder Binärform
10	Rückmeldung über Aktivität	F	Optische oder akustische Signale beim Einschalten, Senden oder Empfangen von Daten

3.3 Auswahl der Bauform

Um die geforderten maximalen Maße der Platine einzuhalten, wird SMD (engl. surface-mounted device, oberflächenmontierbares Bauelement) Technik verwendet. Als Baugröße wird die sogenannte 0805 (Länge und Breite des Bauteils in der Einheit Zoll/100) Bauform gewählt, da sie einen guten Kompromiss zwischen der Größe der Bauteile und der Möglichkeit der Bestückung per Hand bietet.

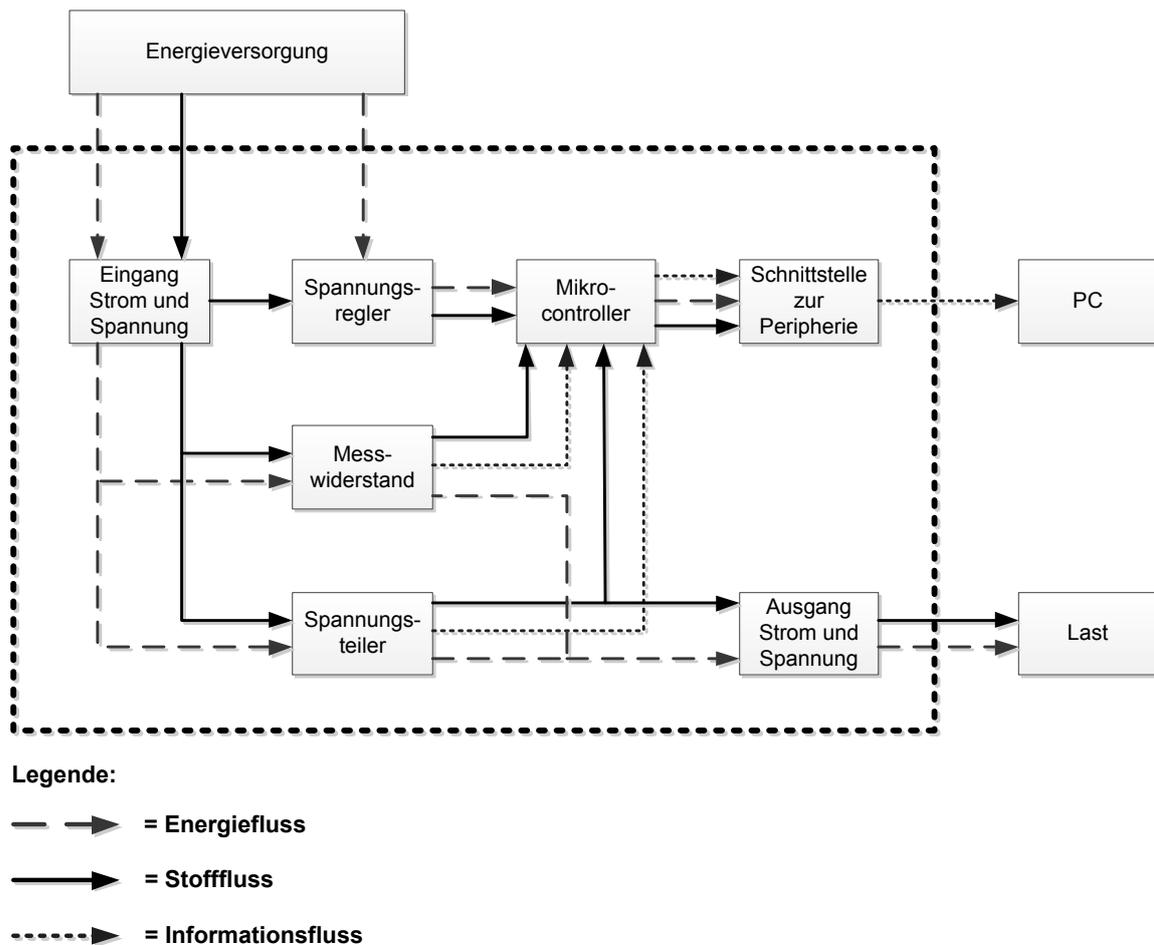


Abbildung 33: Funktionsstruktur der Strom- und Spannungsmessung

3.4 Auswahl der Bauteile

Bei der Strom- und Spannungsmessung sind zwei Werte auszulesen, in ein digitales Signal zu wandeln und an eine Schnittstelle weiterzuleiten. Hierfür geeignet ist der Mikrocontroller AVR ATmega8l (Fa. Atmel). Es handelt sich um einen kostengünstigen 8-Bit Mikrocontroller, der wahlweise mit Assembler, BASCOM oder C/C++ programmiert werden kann. Da dieser Mikrocontroller eine Betriebsspannung von 2,8 V – 5 V benötigt, wird der Festspannungswandler 78L05 SMD (Fa. National Semiconductor) zur Bereitstellung dieser Spannung eingesetzt. Für die Strommessung wird ein sogenannter „current shunt monitor“ verwendet, der INA138 Chip (Fa. Texas Instruments). Dieser verstärkt die über dem Messwiderstand abfallende Spannung. Zur Übertragung der Messwerte an den PC dient der Seriell-USB-Adapter FT232RL (Fa. FTDI), durch den man die Platine mit einem handelsüblichen Mini-USB-Kabel an einen PC anschließen kann. Für die in der

Forderungsliste verlangte Rückmeldung über die Aktivität der Platine werden verschieden farbige SMD Leuchtdioden eingesetzt. Weitere benötigte Bauteile wie Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten werden nach den Angaben in den Datenblättern des Mikrocontrollers und der anderen ICs (engl. integrated circuit, integrierter Schaltkreis) hinzugefügt.

3.5 Schaltplan

Der vollständige Schaltplan ist im Anhang in Kapitel 8.2 Elektrischer Schaltplan der Messplatine zu finden. Die in Abbildung 34 dargestellte Version stellt zur Verdeutlichung des Funktionsprinzips eine vereinfachte Fassung ohne Zusatzbauteile wie Widerstände oder Kondensatoren dar.

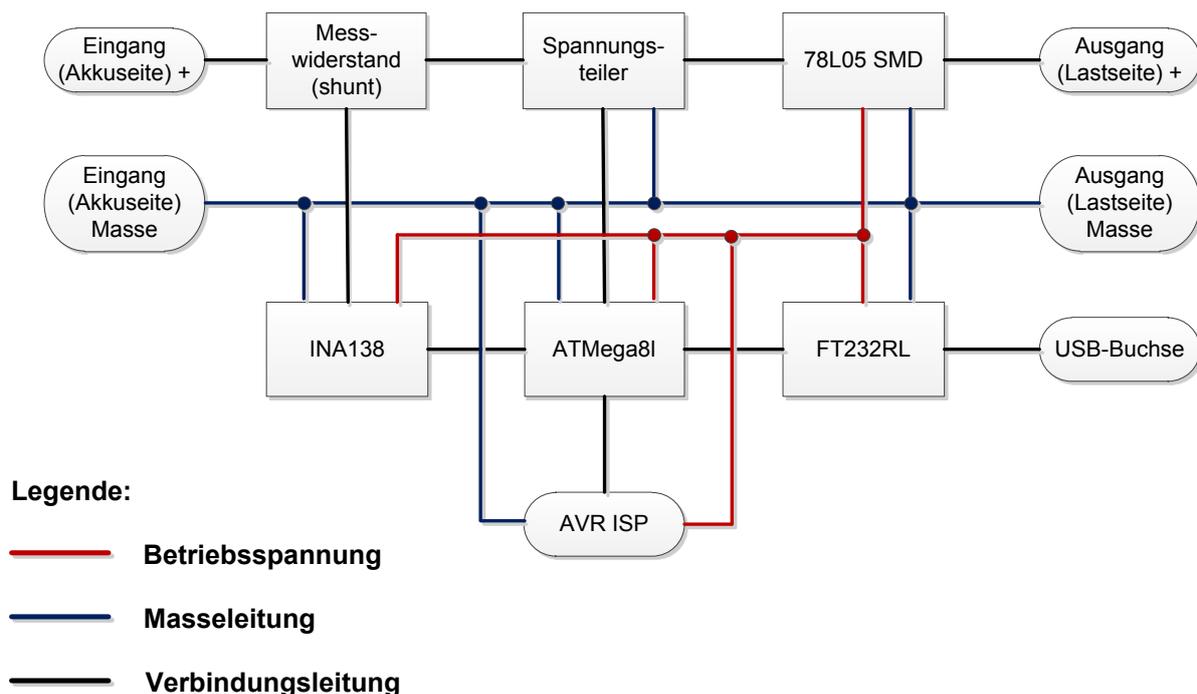


Abbildung 34: Vereinfachter Schaltplan der Messplatine mit allen relevanten Bauteilen

3.5.1 Funktionsprinzip

Die Messschaltung wird, wie in Abbildung 34 dargestellt, zwischen den Akkumulator der Seeschlange und den Antriebsmotor geschaltet. Nach dem Eingang des

positiven Pols der Speisespannung folgt der Messwiderstand. Um den Spannungsabfall an dieser Stelle so gering wie möglich zu halten, wird dessen Größe auf 0,1 Ω festgelegt. Dieser Wert wird durch Parallelschaltung von zehn 1 Ω Widerständen erreicht. Dies hat den Vorteil, dass die Verlustleistung des Widerstands um den Faktor 10 geringer ist. Der Messwiderstand ist mit dem INA138 IC verbunden, der die über dem Messwiderstand abfallende Spannung mit dem vorher über einen Widerstand eingestellten Faktor 10 verstärkt und an den ATmega8 weiterleitet. Ohne die Verstärkung wäre der Spannungswert zu klein, um eine Messung mit genügend hoher Auflösung vornehmen zu können. Im Mikrocontroller wird das analoge Signal in ein digitales umgewandelt. Unter Nutzung der Formel

$$I = \frac{U}{R} \quad (10)$$

erfolgt die Stromwertberechnung. Dieser Wert wird für die Ausgabe am PC formatiert und schließlich an den FT232RL gesendet. Dieser IC wandelt das serielle Signal in ein USB Signal um und sendet es zum PC. Die Messung der Spannung erfolgt ähnlich wie die des Stroms. Hinter dem Messwiderstand ist ein hochohmiger (10 k Ω und 3,3 k Ω) Spannungsteiler, der die anliegende Speisespannung im Verhältnis 3:1 teilt. Die Teilung der Spannung muss durchgeführt werden, da der Eingang des Mikrocontrollers nicht mit einer Spannung größer der Betriebsspannung (+5V) beschaltet werden darf und die vorliegende Speisespannung (siehe Anforderungen) bei +8V liegt. Durch die Hochohmigkeit des Spannungsteilers wird der Stromfluss an dieser Stelle minimiert. Der kleinere Anteil der Spannung liegt am Mikrocontroller an, wird dort wieder auf seine ursprüngliche Größe berechnet und entsprechend formatiert an den FT232RL gesendet. Dort wird das serielle Signal wieder in ein USB Signal umgewandelt und zum PC weitergeleitet. Ebenfalls auf der Platine integriert ist ein 10-poliger Wannenstecker, der als ISP (In-System-Programmierung) Schnittstelle für die Programmierung des Atmel AVR Mikrocontrollers dient. Über einen AVR Programmer kann man so am PC compilierte Programme und Befehlssätze direkt auf den Mikrocontroller übertragen.

3.6 Routing der Platine

Das Routing für die Platine wurde mit Hilfe des Programms EAGLE 5.10.0 der Fa. CadSoft (www.cadsoft.de [26]) durchgeführt. Um das Board möglichst klein zu halten, ist die Platine doppelseitig bestückt. Die dazu erstellten Board-Layout Dateien befinden sich auf der beigefügten CD-ROM.

3.7 Fertigung der Platine

Die Herstellung eines Testmusters der Platine erfolgt im Mechatronik-Labor der TU Ilmenau. Das im vorherigen Abschnitt erstellte Layout dient als Maske für die Belichtung. Als Platinenmaterial wird eine doppelseitige FR4 Platine der Fa. Bungard in den Abmessungen 100mm x 160mm verwendet. Um die Folien deckungsgleich auf Vorder- und Rückseite platzieren zu können, werden Zentrierbohrungen gesetzt. Anschließend folgt die Belichtung der Platine unter UV-Licht, wodurch die nicht maskierten Bereiche des Fotolacks infolge der Belichtung löslich werden. Mit einer passenden Entwicklerlösung werden diese Areale abgelöst und die darunter liegende Kupferschicht freigelegt. Mittels einer Natriumpersulfat Lösung erfolgt das Ätzen der vorstrukturierten Platine. Als letztes werden die benötigten Durchkontaktierungen gebohrt und elektrisch durchkontaktiert. In Abbildung 35 ist die Platine nach dem Ätzprozess vor der Bestückung zu sehen. Weitere Ersatzplatinen fertigte das Ingenieurbüro Richarz aus Zella-Mehlis.

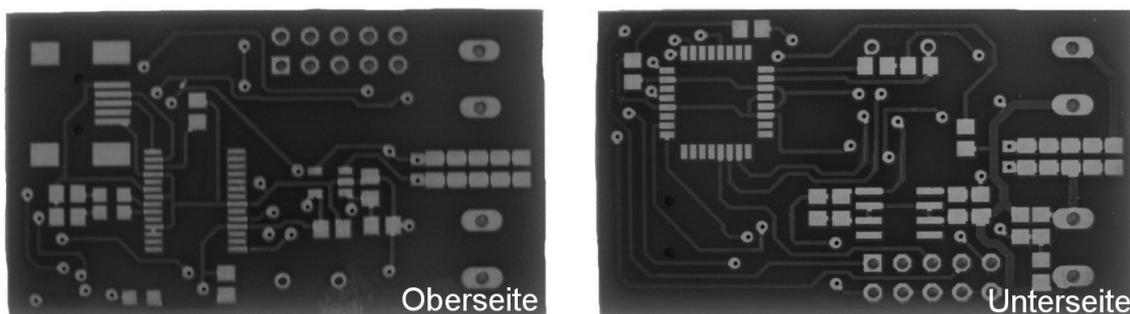


Abbildung 35: Die unbestückte Platine von beiden Seiten

3.8 Bestückung der Platine

Abbildung 36 zeigt die bestückte Platine von beiden Seiten, wichtige Bauteile sind gekennzeichnet. Aufgrund der engen Platzverhältnisse ist vor allem das Auflöten des FT232 und des ATmega8 schwierig, da nur sehr wenig Abstand zwischen den Pads für die Chips und den nächstgelegenen Leiterbahnen und Durchkontaktierungen vorhanden ist. Die Anschlüsse und Buchsen zur Peripherie werden als letztes befestigt, da sonst das Anbringen anderer Bauteile erheblich behindert wird.

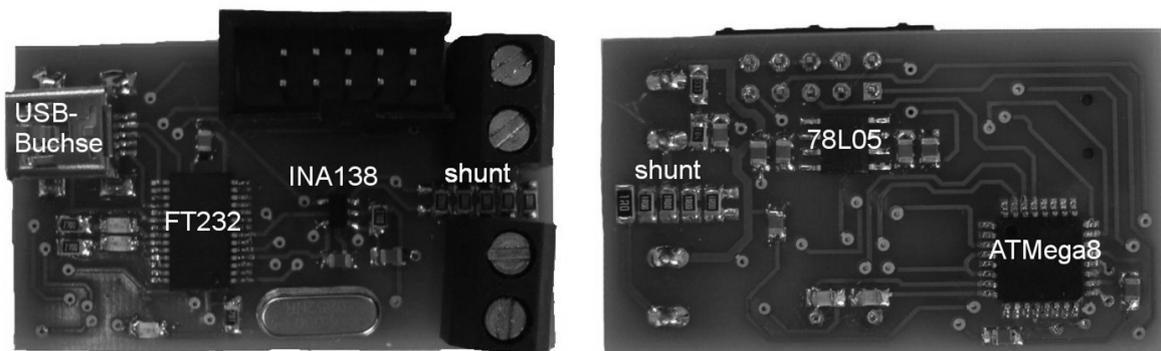


Abbildung 36: Links: Oberseite der bestückten Platine; rechts: Unterseite

3.9 Programmierung des ATmega8

Zur Programmierung des ATmega8 wird das kostenlos bereitgestellte AVR Studio 4 der Fa. Atmel verwendet. Dazu wird der WinAVR Compiler für C und C++ [21], der als Freeware erhältlich ist, genutzt.

3.9.1 Programmablaufplan

Abbildung 37 beschreibt die Funktionsweise des in C geschriebenen Programms auf dem ATmega8 Chip. Der Ablauf des Programms beginnt, sobald die Platine mit ausreichender Spannung ($\geq 5V$) versorgt wird und endet, wenn keine Spannungsversorgung mehr stattfindet.

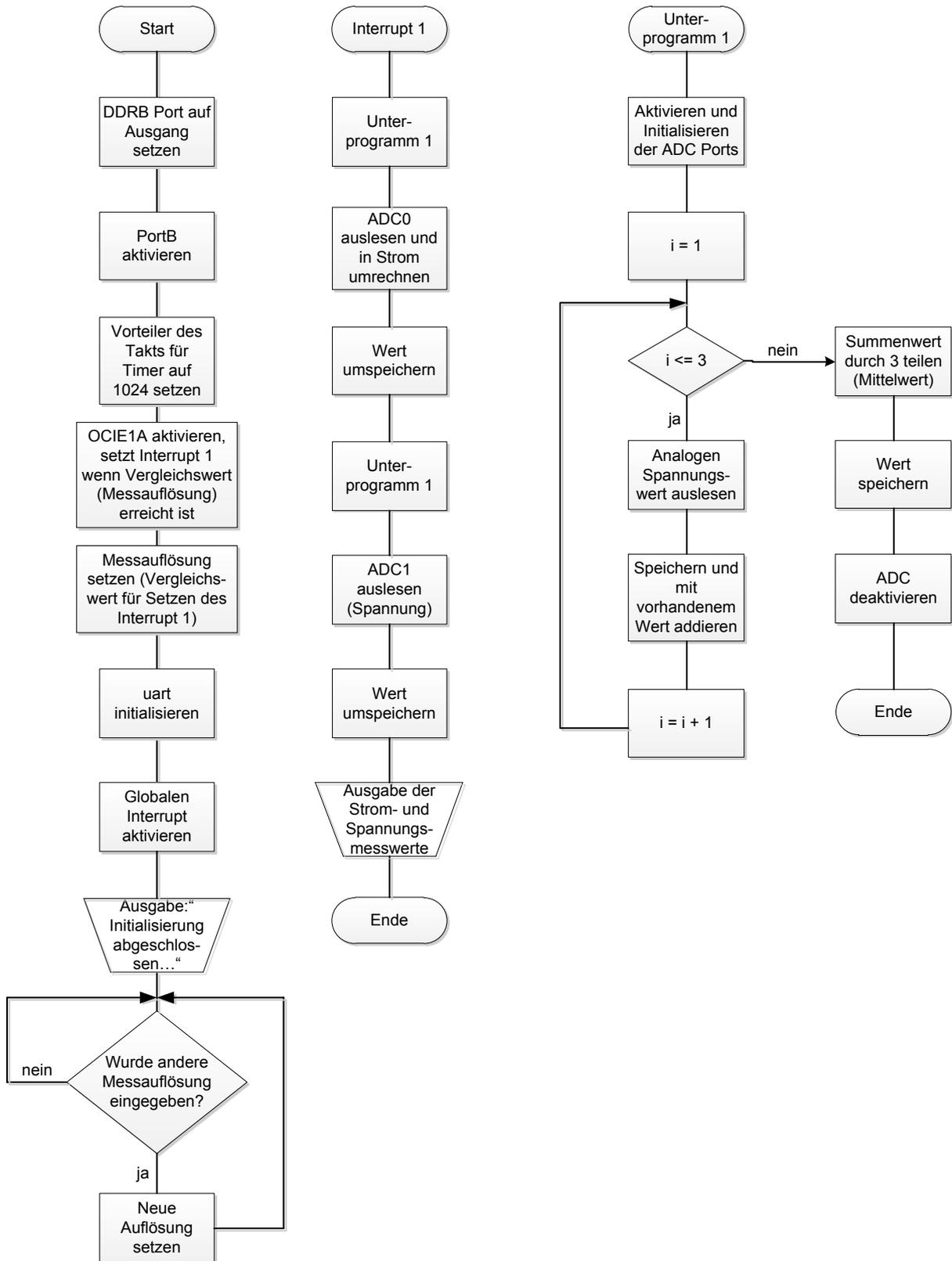


Abbildung 37: Programmablaufplan des Programms zur Messung von Strom und Spannung der Seeschlange

Nach dem Start des Programms werden die benötigten Ports aktiviert und der Vorteiler des Takts des Timers auf 1024 gesetzt. Über das Bit OCIE1A (Output Compare A Match Interrupt Enable) im Register TIMSK wird Interrupt 1 aufgerufen, wenn der globale Interrupt aktiviert ist und der interne Wert der gesetzten zeitlichen Messauflösung entspricht [19,24]. Interrupt 1 ruft zu Beginn Unterprogramm 1 auf, in welchem die ADC-Ports aktiviert werden und die dort anliegende analoge Spannung eingelesen wird. Diese Werte werden dann zu Interrupt 1 zurückgegeben, da sie die finalen Werte von Strom und Spannung bilden. Hierbei wird zunächst der Strom, dann die Spannung ausgelesen. Anschließend werden beide Werte ausgegeben. Zurück im Hauptprogramm wird durch eine while-Schleife dauerhaft die Eingabe einer anderen Messauflösung abgefragt. Wird die Auflösung geändert, verändern sich auch die Abstände, in denen die Interrupts ausgeführt werden. Je höher die Auflösung, desto öfter werden die Interrupts gesetzt, d.h. es werden mehr Messwerte pro Sekunde aufgenommen. Der komplette Programmcode ist im Anhang im Kapitel 8.3 Programmcode des Messprogramms nachzulesen.

3.10 Ausgabe der Messwerte am PC

Für die Ausgabe der Messwerte am PC und der Einstellung der Häufigkeit der Messung wird das Programm Docklight v.1.9.21 von Flachmann und Heggelbacher [22] verwendet. Es ist ein Test-, Analyse- und Simulationsprogramm für serielle Kommunikationsprotokolle (z.B. RS232, RS485/422) [20]. Auf der der Arbeit beiliegenden CD-ROM befindet sich eine kostenlose Testversion des Programms. Mit Hilfe des Programms ist es neben dem Aufzeichnen der empfangenen Daten möglich, eigene Befehlssequenzen an die Messschaltung bzw. den ATmega8 zu senden. Für diese Arbeit wurde ein Projekt erstellt, das es dem Nutzer ermöglicht, verschiedene Zahlensequenzen zu senden. Die Sequenzen bestimmen die Anzahl der Messungen pro Sekunde und sind in Tabelle 16 dargestellt. Bei den Sequenzen handelt es sich um ein Vielfaches bzw. um einen Teil des Wertes, der sich aus dem Quotienten der Taktfrequenz des ATmega8 (16MHz) und des eingestellten Vorteilers (1024) ergibt und dem Wert für eine Sekunde entspricht. Die Sequenz wird in einzelnen ASCII-Zeichen versendet. In Abbildung 38 ist ein Screenshot der Benutzeroberfläche von Docklight v.1.9.21 zu sehen.

Tabelle 16: Mögliche Häufigkeit der Messung mit der Messschaltung mit Angabe der dafür notwendigen zu versendenden Zahlensequenz

<i>Sequenz</i>	<i>Zeit [s]</i>	<i>Frequenz [Hz]</i>
62500!	4	0,25
31250!	2	0,5
15625!	1	1
01562!	0,1	10
00781!	0,05	20
00312!	0,02	50

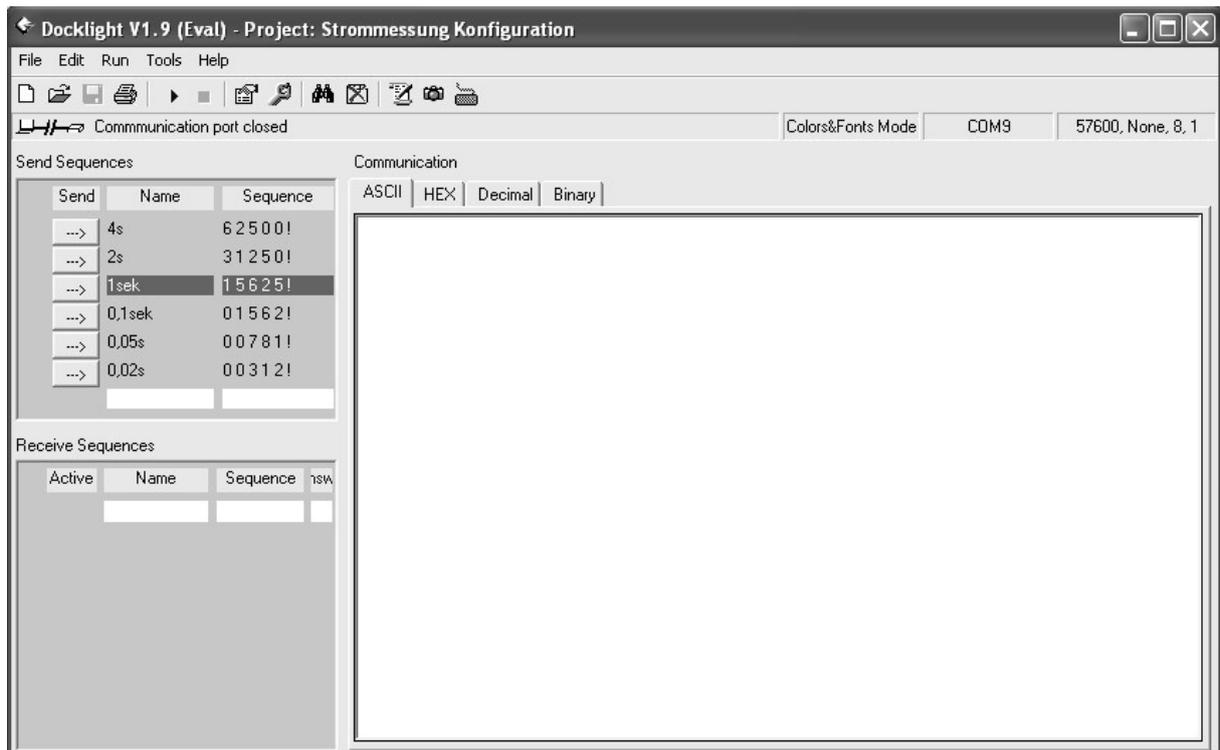


Abbildung 38: Screenshot der Benutzeroberfläche von Docklight v.1.9.21

4. Test der neuen Variante der nachgiebigen Kopplung und Vergleich mit der vorhandenen Variante

4.1 Konstruktion des Versuchsstands

Für die Aufnahme der Strommesswerte wird ein Versuchsstand (siehe Abbildung 39 und Abbildung 40) aufgebaut, in welchen die „Seeschlange“ gestellfest eingespannt werden kann. Damit der Experimentalaufbau die Grundlage für eine vergleichende Betrachtung verschiedener Effektormodul-Konfigurationen schafft, wird die Vorschubbewegung des Roboters unterbunden. Dadurch können alle Messwerte unter gleichen Bedingungen aufgenommen werden. Ein weiterer Grund für den Versuchsstand ist die begrenzte Größe des Beckens, die dazu führt, dass die „Seeschlange“ während der Messung möglicherweise gegen eine Beckenwand stößt. Daraus resultiert eine Verfälschung der Messung. Der Prüfstand besteht aus zwei Zentimeter breiten Profilen aus Aluminium. Sie werden von Winkelstücken zusammengehalten, die mit beweglichen Nutensteinen an den Profilen verschraubt sind. Die Konstruktion ist mit dem Beckenrand verbunden. Ein Verrutschen des Prüfstands durch die Schwimmbewegungen des Roboters wird somit verhindert. Teile der Konstruktion, die durch scharfe Kanten die Folie des Wasserbeckens beschädigen könnten, sind mit Klebeband abgeklebt und gepolstert. Die „Seeschlange“ wird mittels zweier Edelstahlbleche in den Versuchsstand eingespannt (siehe Abbildung 41). Die Bleche sind mit jeweils drei Rundbohrlöchern und einem Langloch versehen. Durch das Langloch kann die „Seeschlange“ in verschiedenen Höhen eingespannt werden, um z.B. eine Anpassung an einen geänderten Wasserstand zu ermöglichen.

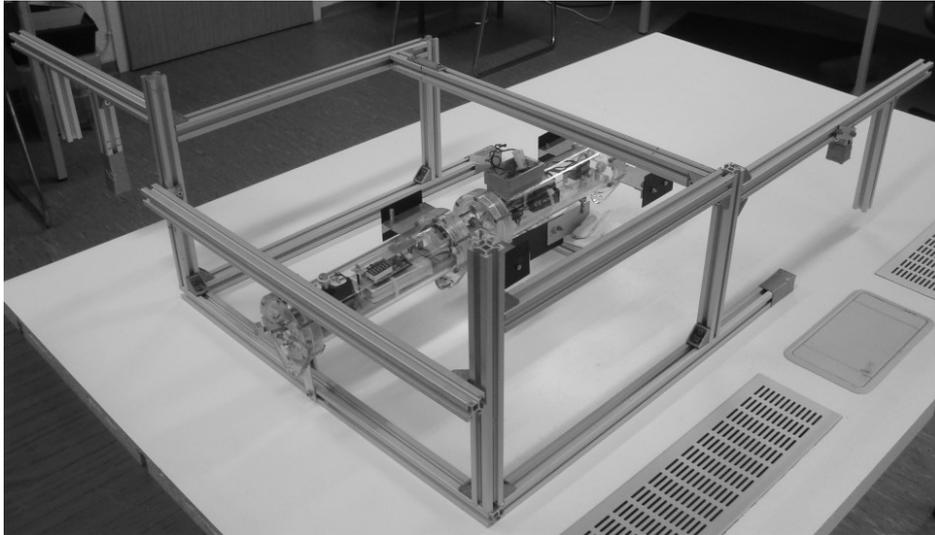


Abbildung 39: Der Versuchsstand mit eingespanntem Basismodul

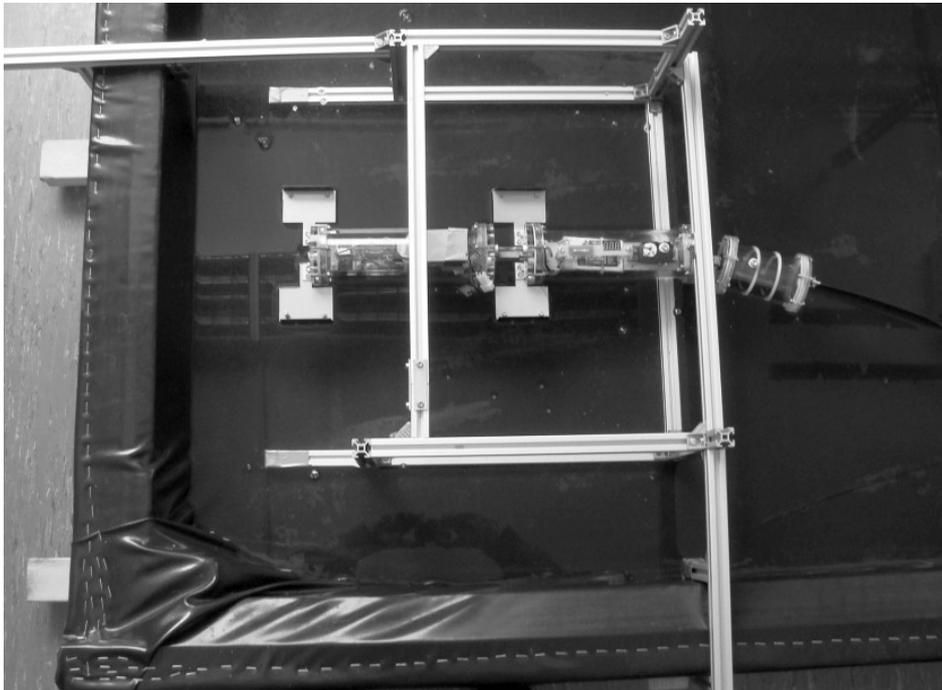


Abbildung 40: Draufsicht des Versuchsstands mit eingespannter "Seeschlange" in thunniformer Konfiguration im Wasserbecken. In dieser Position werden sämtliche Versuche durchgeführt.

4.2 Versuchsvorbereitung

Neben der Konstruktion des Prüfstands werden für den Versuch drei Elemente aufgebaut, die einen Pflanzenbewuchs simulieren sollen. Damit soll festgestellt werden, inwiefern sich der Stromverbrauch des Roboters verändert, wenn er in

Gewässer mit übermäßigem Pflanzenbewuchs operiert. Dieser künstliche Bewuchs (siehe Abbildung 42) besteht aus in zwei Zentimeter breiten und etwa 18 Zentimeter langen in Streifen geschnittene Stücken einer Plastiktüte. Die Stücke werden mit Gewichten (etwa 3,2 g) beschwert und mit sieben bis neun weiteren Stücken zu einem Streifen zusammengeklebt. Die Gewichte an den Plastikstreifen sorgen für die Erzeugung eines Widerstands gegenüber den Effektormodulen der „Seeschlange“. Die drei Streifen werden an langen Stangen befestigt und können so über dem Becken angebracht werden. Die Position des künstlichen Bewuchses ist bei der Versuchsdurchführung immer gleich. Ein Bewuchselement wird über der Flosse des letzten Effektormoduls angebracht, ein weiteres Element über den PVC Körper des Moduls selbst und das letzte Element über einer Kopplung zwischen den Elementen. Bei einigen Versuchen wird die Bewegung der Effektormodule mittels Kameraaufbau von oben gefilmt. Anschließend werden die Schwimmbewegungen des aufgenommenen Effektormoduls mit den gemessenen Stromwerten qualitativ verglichen und zugeordnet.

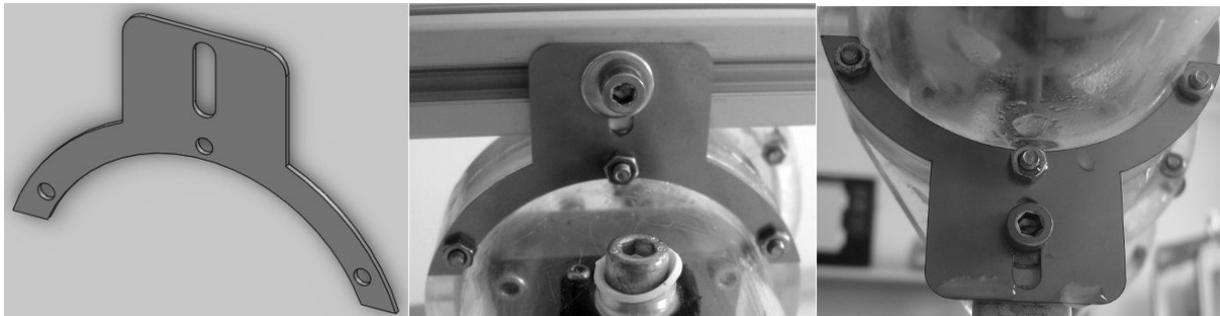


Abbildung 41: Verschiedene Ansichten des Stahlbleches, mit dem der Roboter am Prüfstand befestigt ist. Links: Teileansicht in SolidWorks, Mitte: Obere Befestigung für die "Seeschlange" am Prüfstand, rechts: Untere Befestigung für die "Seeschlange" am Prüfstand.

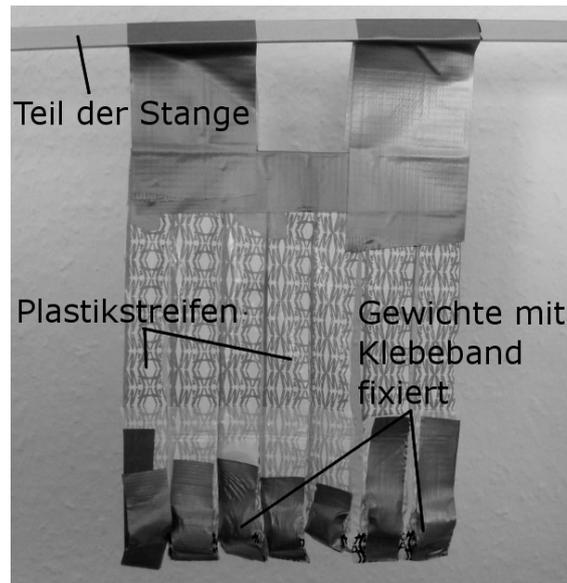


Abbildung 42: Eins der drei Bewuchselemente, die einen künstlichen Pflanzenbewuchs simulieren sollen.

4.3 Versuchsdurchführung

Vor dem Beginn der Messung werden die in Tabelle 17 aufgeführten Parameter für die Versuchsdurchführung eingestellt. Die unterschiedlichen Konfigurationen der „Seeschlange“ zur Durchführung der Versuche sind in Tabelle 18 dargestellt. Die Steuerung der Abtastrate erfolgt über das Docklight v1.9.21 Programm. Die Messwerte selbst werden mit Hilfe des in Windows XP der Fa. Microsoft integrierten Hyperterminals aufgenommen und als Textdatei auf dem PC gespeichert.

Tabelle 17: Parameter für die Versuchsdurchführung. Die Einstellung des Motors bezieht sich auf die sich in Endlage befindliche Position des Hebels für die Antriebssteuerung an der der Fernsteuerung der "Seeschlange".

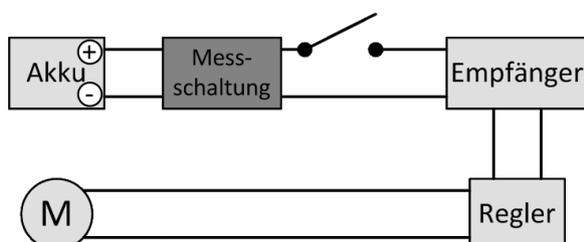
<i>Parameter</i>	<i>Einstellung</i>
Dauer der Messung	ca. 10 Sekunden
Anzahl der Messungen pro Sekunde	50
Anzahl der Versuche pro Konfiguration	3
Einstellung des Motors	Maximale Geschwindigkeit / Maximale Spannung
Ausgangsposition	Effektormodul ist nach rechts in den Umkehrpunkt ausgerichtet

Tabelle 18: Ort des Versuchs und Aufbau der "Seeschlange" in den unterschiedlichen Versuchsdurchgängen.

Ort des Versuchs	Lfd. Nr.	Konfiguration	Bemerkung
An Luft	1	ohne Effektormodul	
	2	mit kurzem Effektormodul (thunniform)	
Im Wasser	3	mit kurzem Effektormodul (thunniform)	
	4	mit langem Effektormodul (anguilliform) und Gelenkvariante 1	zwei parallele Federbleche
	5	mit langem Effektormodul (anguilliform) und Gelenkvariante 3	zentrales Federblech
	6	mit langem Effektormodul (anguilliform) und Gelenkvariante mit Schraubenfedern	
Im Wasser mit Bewuchs	7	mit kurzem Effektormodul (thunniform)	
	8	mit langem Effektormodul (anguilliform) und Gelenkvariante 1	zwei parallele Federbleche
	9	mit langem Effektormodul (anguilliform) und Gelenkvariante 3	zentrales Federblech
	10	mit langem Effektormodul (anguilliform) und Gelenkvariante mit Schraubenfedern	

Die Messschaltung für die Aufnahme der Stromwerte befindet sich während der Messung zwischen dem Akku der „Seeschlange“ und dem Empfängermodul für die Fernsteuerung. Dies ist in Abbildung 43 dargestellt. Vor der Messung mit der Schaltung wird der Strom mit einem Multimeter gemessen um zu überprüfen, ob die von der Schaltung aufgenommenen Werte im richtigen Wertebereich liegen. Für die Untersuchung, welchen Einfluss das Empfängermodul und der Regler für die Motorsteuerung auf die Messwerte haben, wird die Messschaltung zwischen Motor und Regler gesetzt (ebenfalls Abbildung 43).

Standard Konfiguration bei der Messung:



Konfiguration für Spannungsüberprüfung:

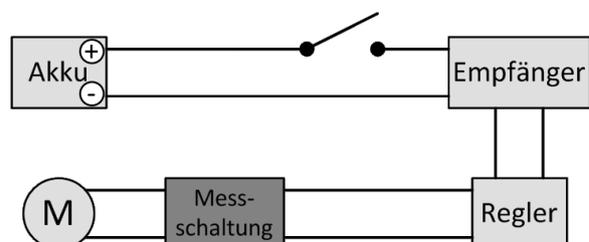


Abbildung 43: Schaltbild-Skizze der "Seeschlange". Links: Standard Konfiguration bei den durchgeführten Messungen. Rechts: Position der Messschaltung für die Spannungsüberprüfung.

4.4 Versuchsauswertung

4.4.1 Strommessung

Tabelle 19: Übersicht der vorgenommenen Versuche mit kurzem Kommentar

<i>Konfiguration</i>	<i>Verwendete Federbleche</i>	<i>Bemerkung</i>
1	-	durchgeführt
2	-	durchgeführt
3	-	durchgeführt
4a	1.1 & 1.2	durchgeführt, allerdings ist die Federkonstante zu gering, Federbleche werden bis Anschlag ausgelenkt.
4b	2.1 & 2.2	s.o.
4c	3.1 & 3.2	s.o.
4d	7.1 & 7.2	Durchführung nicht möglich, da die Federbleche zu steif für vorgespannte Befestigung sind.
5a	9.1	durchgeführt
5b	9.1 & 9.2	durchgeführt
5c	9.1, 9.2 & 6.1	durchgeführt, die Gelenkverbindung hat aber schon starren Charakter, kaum noch Nachschwingen zu beobachten
6	-	durchgeführt
7	-	durchgeführt, kein signifikanter Unterschied im Stromverbrauch zur Messung ohne Bewuchs feststellbar
8	1.1 & 1.2	durchgeführt, allerdings ist die Federkonstante zu gering, Federbleche werden bis Anschlag ausgelenkt.
9		nicht durchgeführt
10	-	durchgeführt, kein signifikanter Unterschied im Stromverbrauch zur Messung ohne Bewuchs feststellbar

Die gespeicherten Textdateien werden in das Programm Microsoft Excel 2007 importiert. Dort findet die Formatierung der Daten für die Auswertung sowie die grafische Darstellung statt. Tabelle 19 schlüsselt die durchgeführten Versuche nach deren Kategorie und den - falls nötig - verwendeten Federblechen auf. Die Aufnahmen der Kamera werden mit dem Open Source VLC Media Player Einzelbild (frame) für Einzelbild abgespielt. Da das Video mit 30 frames pro Sekunde aufgenommen wurde, haben die Einzelbilder einen Abstand von circa 33,3 ms.

Infolge des entsprechenden Setzens des Interrupts erfolgt die Messwertaufnahme alle 33 ms. Eine qualitative Zuordnung der Videobilder zur Strommesskurve ist grundsätzlich möglich, allerdings gibt es eine bleibende Ungenauigkeit bei dieser Zuordnung. Das hat folgende Gründe: Erstens können Fehler beim Abspielen des Videos entstehen und dadurch ein Überspringen einzelner frames vorkommen. Zweitens besteht immer noch ein Unterschied zwischen den Zeitwerten bei der Aufnahme der Messwerte und den Einzelbildern des Videos. Drittens erfolgt die Zuordnung, in welchem Zustand sich das Effektormodul befindet (Umkehrpunkte, Mitte), subjektiv nur durch die Betrachtung der Videobilder. Da das Effektormodul im Umkehrpunkt einige Zehntel Sekunden verharrt, ist der Umkehrzeitpunkt der Bewegungsrichtung schwer zu bestimmen. Außerdem erschwert der konstruktiv bedingte Unterschied zwischen der Auslenkung nach links und rechts die Zuordnung der Mittelstellung des Effektormoduls. Als Mitte ist bei der Auswertung diejenige Stellung gewählt, in der das ausgelenkte Effektormodul fluchtend zum eingespannten Basismodul steht. Die tatsächliche Mittelstellung befindet sich weiter rechts, ist aber aufgrund des Auslenkungsunterschieds nur sehr schwer zu bestimmen.

Eines der Ergebnisse zeigen Abbildung 44 und Abbildung 45 in denen einige charakteristische Stellungen des thunniformen Effektormoduls den entsprechenden Stromwerten zugeordnet sind. Es handelt sich um Konfiguration 3. Die 16 mA, die ständig aufgenommen werden, stellen den Grundverbrauch der Messschaltung dar. Der hohe Strompeak zu Beginn der Messung ist der Motoranlaufstrom. Dieser wird benötigt, um die Reibung und Trägheit des Systems zu überwinden und den Motor anlaufen zu lassen. Danach verläuft die Linie in einem sägezahnähnlichen Zick-Zack-Muster, dessen Maxima und Minima immer um den gleichen Wert schwanken. Die Spitzenwerte werden offenbar jeweils in den Umkehrpunkten der Schwanzbewegung erreicht. Die Spannung lag aufgrund der vorgenommenen Einstellungen immer bei 7,8 V mit kleinen Schwankungen im Bereich von ± 40 mV. Der durchschnittliche Stromverbrauch dieser Konfiguration beträgt 286 mA.

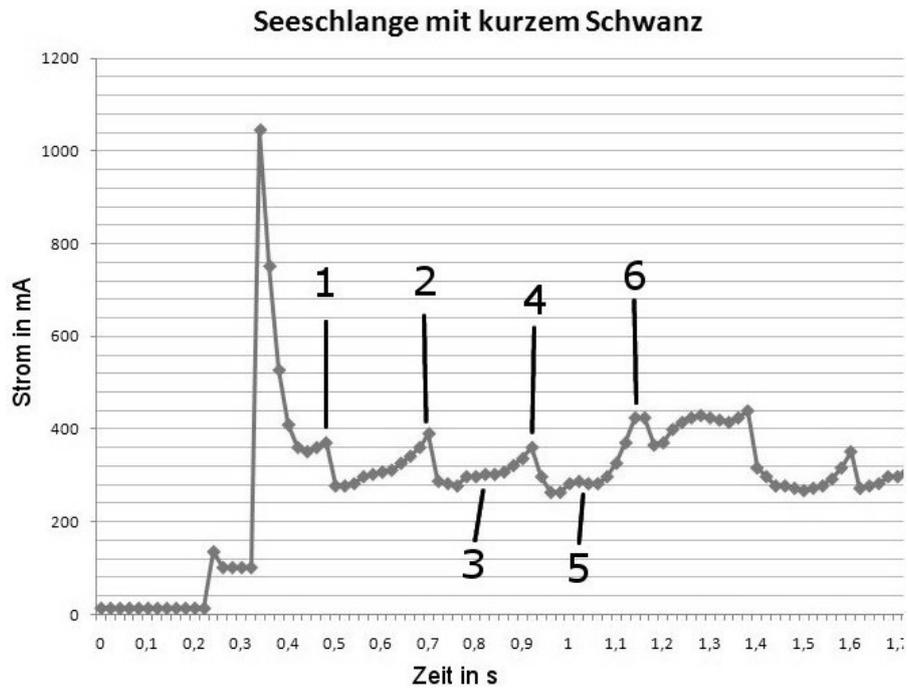


Abbildung 44: Ausschnitt aus dem Zeit-Strom-Diagramm für den Aufbau der "Seeschlange" mit dem kurzen Effektormodul (für thunniforme Bewegung). Die Ziffern sind den Bildern in Abbildung 45 zugeordnet zeigen qualitativ die Beziehung zwischen der Stromkennlinie und der Bewegung des Schwanzes.

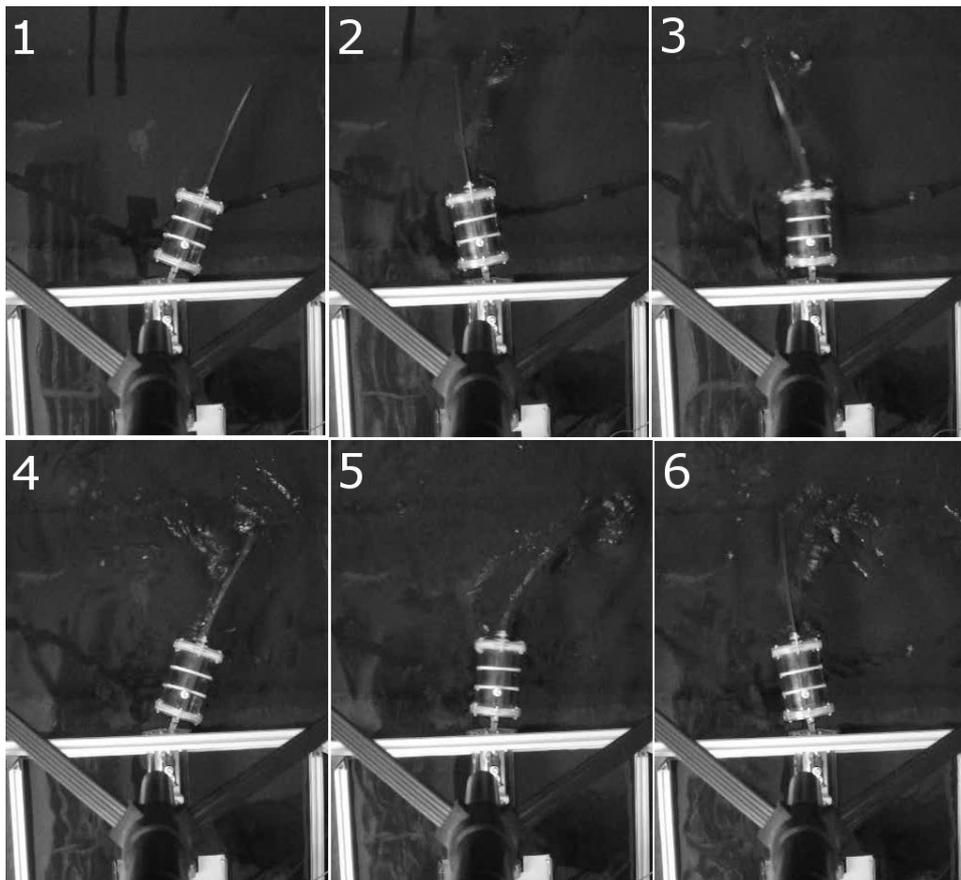


Abbildung 45: Einzelaufnahmen eines Videos, das während des Versuchsdurchlaufs aufgenommen wurde. Die Nummerierung der Bilder korrespondiert mit den Zahlen in Abbildung 44.

In Abbildung 46 ist der Stromwerteverlauf von Konfiguration 5b zu sehen. Auch hier schwanken die Maxima und Minima immer um einen ähnlichen Wert. Es besteht ein Unterschied, ob sich das Effektivmodul im linken oder im rechten Umkehrpunkt befindet. Der Strom ist im linken Umkehrpunkt geringer als im rechten Punkt. Der Grund hierfür ist, dass die Auslenkung nach rechts konstruktionsbedingt größer ist als nach links. Die Spitzenwerte liegen wieder in den Umkehrpunkten. Die Abbildungen 47 und 48 beinhalten die Bilder, die den Ziffern in Abbildung 46 zugeordnet werden. Die beiden Bereiche mit einem konstanten Stromfluss von 14 mA sind durch einen Wackelkontakt des Magnetschalters entstanden, der Stromkreis der „Seeschlange“ ist kurzzeitig geöffnet. Diese zwei Aussetzer erleichtern die Zuordnung der Videobilder zu den Messwerten und werden deshalb beibehalten. Die Reihenfolge der abgebildeten Fotos ist abgekürzt in Tabelle 20 dargestellt. Ausnahme in der Reihenfolge ist Bild 7, in dem das Effektivmodul noch in mittlerer Stellung verharrt, da kurz zuvor der Stromkreis der „Seeschlange“ unterbrochen ist.

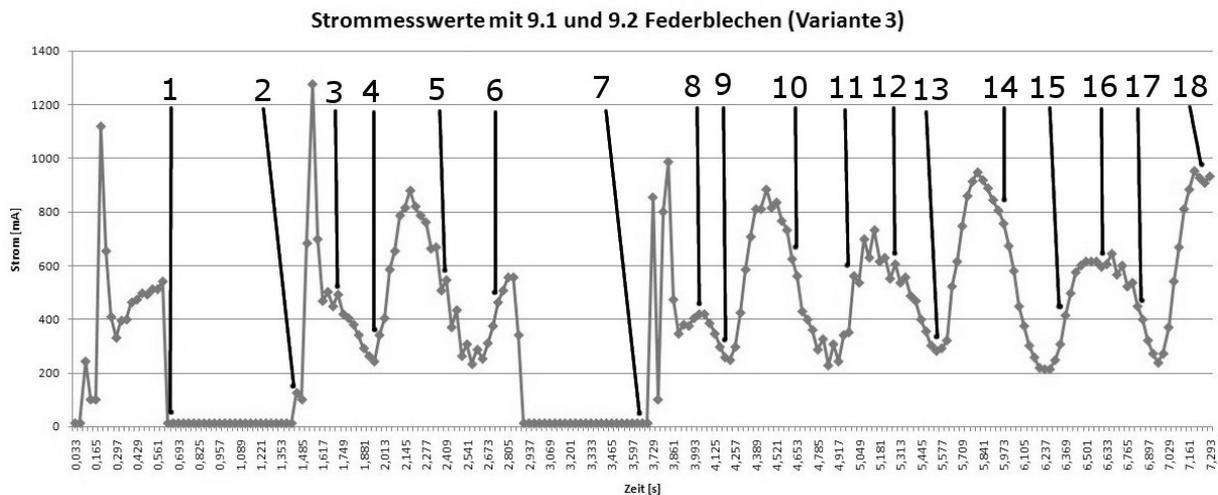


Abbildung 46: Verlauf der Stromwerte bei Konfiguration 5, die Zuordnung der Ziffern gilt den Abbildungen 47 und 48.

Tabelle 20: Aufschlüsselung der Bildnummern in Abb. 47 u. 48 nach Effektivmodul-Position

<i>Bildnummer</i>	<i>Position</i>
1+2	Mitte
3	links
4	Mitte
5	rechts
6	Mitte
...	usw.

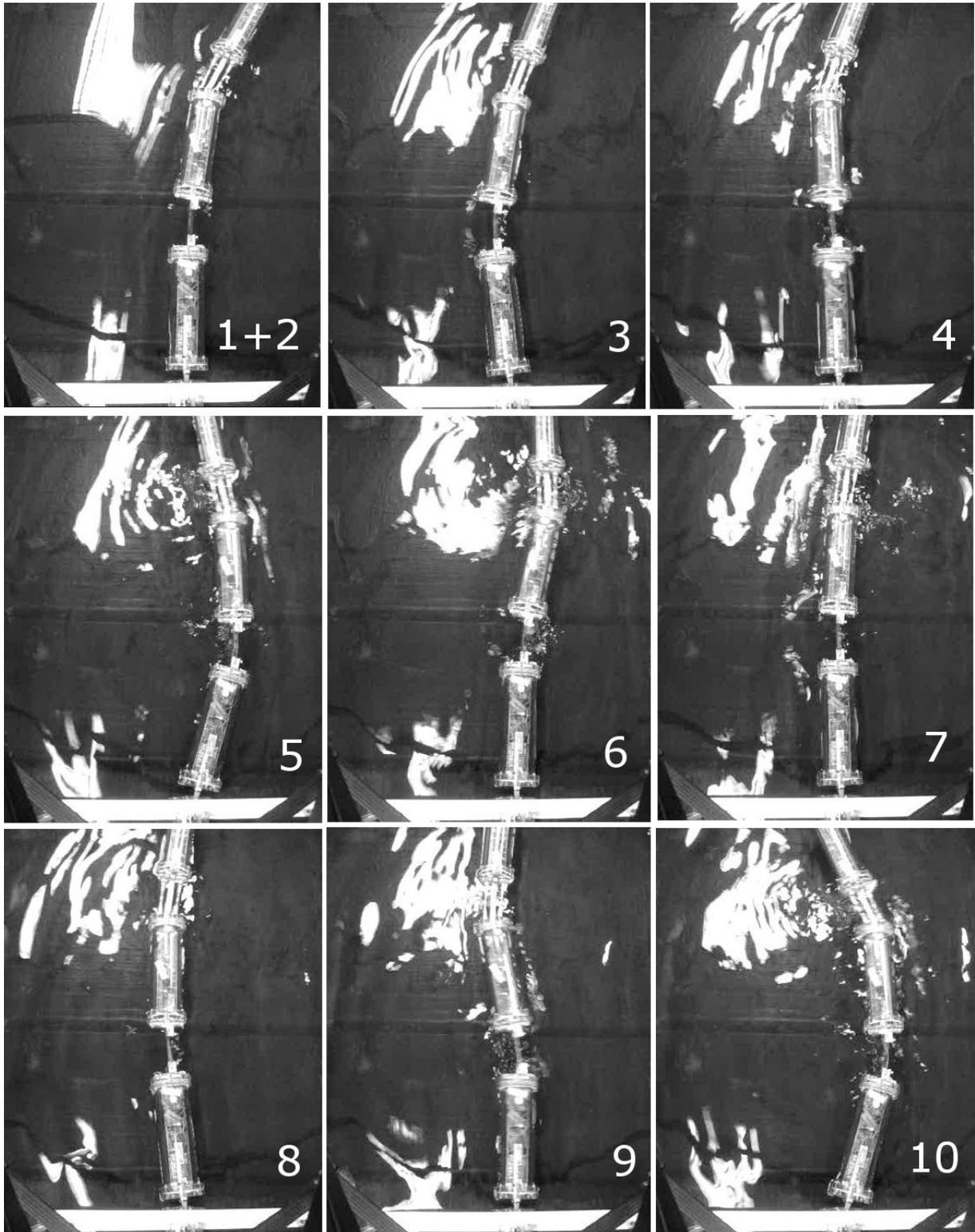


Abbildung 47: Erster Teil der zu Abbildung 46 gehörenden Bilder.

Die Spannung beträgt bei der Messung etwa 7,7 V mit kleinen Schwankungen von ± 40 mV. Der Mittelwert der Strommesswerte über die gesamte Messung (siehe Abbildung 49) liegt bei 523,6 mA.

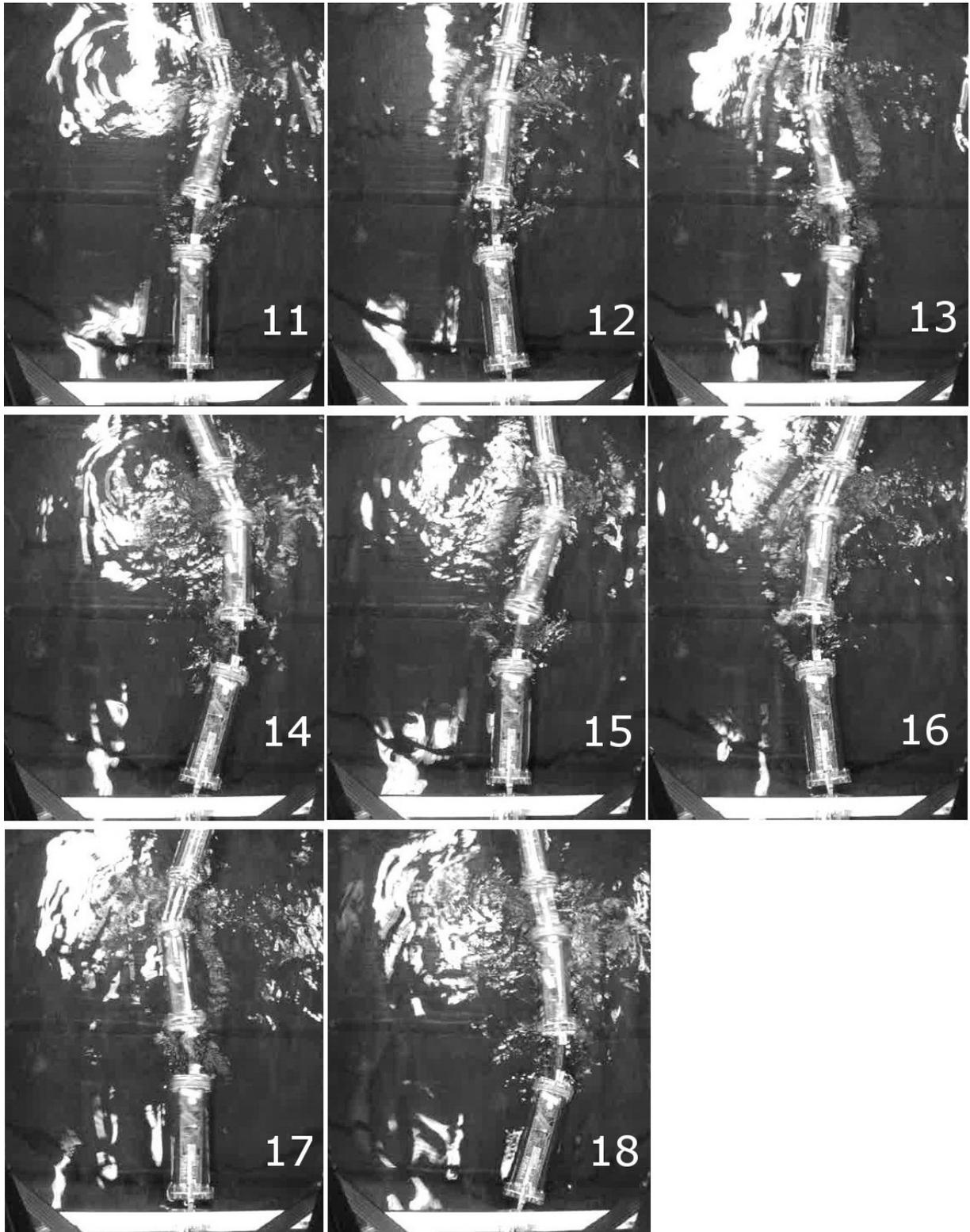


Abbildung 48: Zweiter Teil der zu Abbildung 46 gehörenden Bilder.

Strommesswerte in Konfiguration 5b

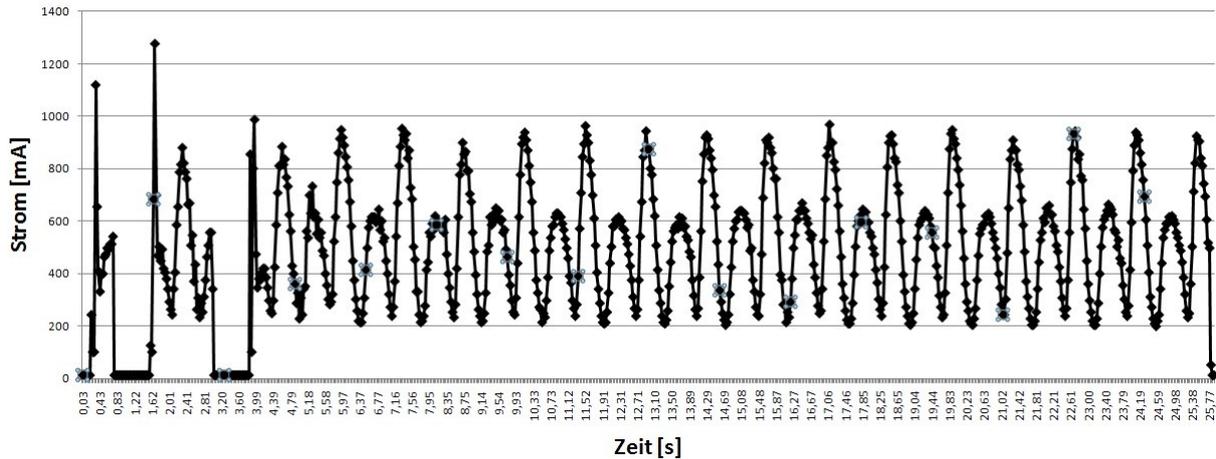


Abbildung 49: Diagramm einer Messreihe in der Konfiguration 5b.

Aus dem Diagramm der gesamten Messreihe (Abbildung 49) lässt sich die Periodendauer eines Schwanzschlages der „Seeschlange“ bestimmen. Dazu wird mit Hilfe von Excel jeweils der Abstand zweier Minima ermittelt, welcher der Periodendauer entspricht. Bei Konfiguration 5b beträgt der Mittelwert der errechneten Periodendauern 1,41 s. Für andere Konfigurationen bestimmte Periodendauern stehen in Tabelle 21. Ein deutlicher Unterschied existiert nur zwischen den Konfigurationen mit den Effektormodulen für die thunniforme und die anguilliforme Bewegungsform. Tendenziell hat Gelenkvariante 3 (Konfiguration 5) eine geringere Periodendauer als die Gelenkvariante mit Schraubenfedern (Konfiguration 6 und 10), schwingt also etwas schneller. Ob dies Einfluss auf die Fortbewegungsgeschwindigkeit hat, muss in zukünftigen Experimenten noch ermittelt werden.

Tabelle 21: Angabe der Mittelwerte aus mindestens zehn Werten der Periodendauer der Effektormodul-Schwingung.

<i>Konfiguration</i>	<i>Mittelwert der Periodendauer [s]</i>
1	1,13
2	1,13
3	1,12
4a	1,38
4b	1,48
5a	1,25
5b	1,41
5c	1,43
6	1,58
10	1,49

Ein Vergleich der Strommesskennlinie zwischen Konfiguration 6 (Schraubenfedern) und Konfiguration 5 (Gelenkvariante 3) zeigt, dass der Verlauf von Konfiguration 5 (Abbildung 49) weniger Schwankungen und Fluktuationen aufweist als der Verlauf von Konfiguration 6 (Abbildung 50). Grund hierfür sind sogenannte „stick-slip“ Effekte, die vermutlich durch unzureichende Schmierung der Lagerung für die Schraubenfedern entstehen. Kurzzeitig ist die Haftreibung zwischen den Federn und Lagerkörpern größer als die Gleitreibung, die beiden Elemente verkeilen sich. Diese Verspannung löst sich durch die von den Effortmodulen auf das Gelenk aufgebraachte Kraft und Feder und Lager gleiten wieder. Dieser Effekt verursacht einen kurzfristigen Anstieg des Stroms, da die Kraft, die der Motor aufbringen muss, ebenfalls ansteigt. Löst sich die Verspannung auf, sinkt der Kraftbedarf des Motors für einen kurzen Zeitraum.

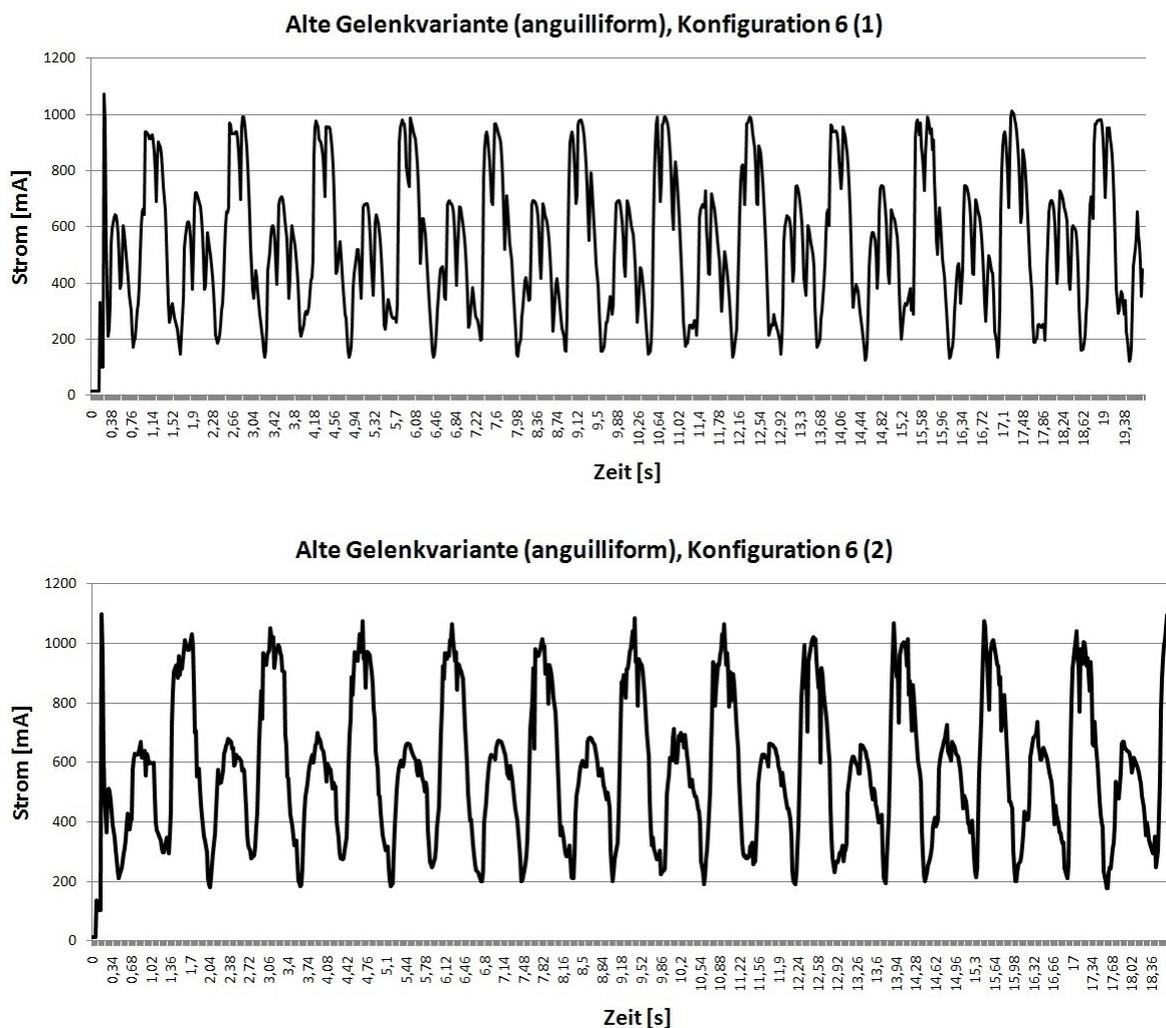


Abbildung 50: Zwei Stromkennlinienverläufe bei Konfiguration 6. Der "stick-slip" Effekt ist beim oberen Diagramm noch stärker ausgeprägt als beim unteren.

Tabelle 22: Übersicht der Strommittelwerte der jeweiligen Konfigurationen.

<i>Konfiguration</i>	<i>Mittelwert des Stroms [mA]</i>
1	277,6
2	271,1
3	284,4
4a	502,7
4b	563,9
5a	378,5
5b	518,7
5c	545
6	557,6
7	274,7
8	432
10	545,6

Tabelle 22 stellt einige Mittelwerte des Stromverbrauchs dar. Die Werte zeigen, dass bei der thunniformen Effektormodul-Konfiguration kein ausgeprägter Unterschied zwischen dem Stromverbrauch im Betrieb an der Luft oder im Wasser besteht. Außerdem liegen die Messergebnisse der Konfiguration 1 im gleichen Bereich wie die der Konfigurationen 2 und 3. Das Gewicht und der Widerstand, der durch das Effektormodul im Wasser entsteht, haben offenbar keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf den vom Motor benötigten Strom. Dies kann - im Vergleich zur anguilliformen Effektormodul-Konfiguration – an der geringen Masse und der deutlich kleineren räumlichen Ausdehnung des Moduls liegen. Der durchschnittliche Stromverbrauch der anguilliformen Effektormodul-Konfiguration ist in etwa doppelt so hoch wie der Stromverbrauch der thunniformen Effektormodul-Konfiguration. Je größer die Steifigkeit der Gelenkverbindung ist, desto größer ist auch der Stromverbrauch. Dies belegen die Messergebnisse der Konfigurationen 5a bis c.

4.4.2 Spannungsmessung

Um den Einfluss des Empfangsmoduls für die Fernsteuerung und des Reglers auf die gemessene Spannung zu bestimmen, wird die Messschaltung zwischen Motor und Regler gesetzt (siehe Abbildung 43). Die Messung der Spannung erfolgt insgesamt sechsmal abwechselnd zwischen den beiden Messpositionen. Ein Effektormodul ist nicht angeschlossen, die Messung wird außerhalb des

Wasserbeckens durchgeführt. Das Messintervall beträgt 1 s. Das Diagramm des Versuchs ist in Abbildung 51 dargestellt.

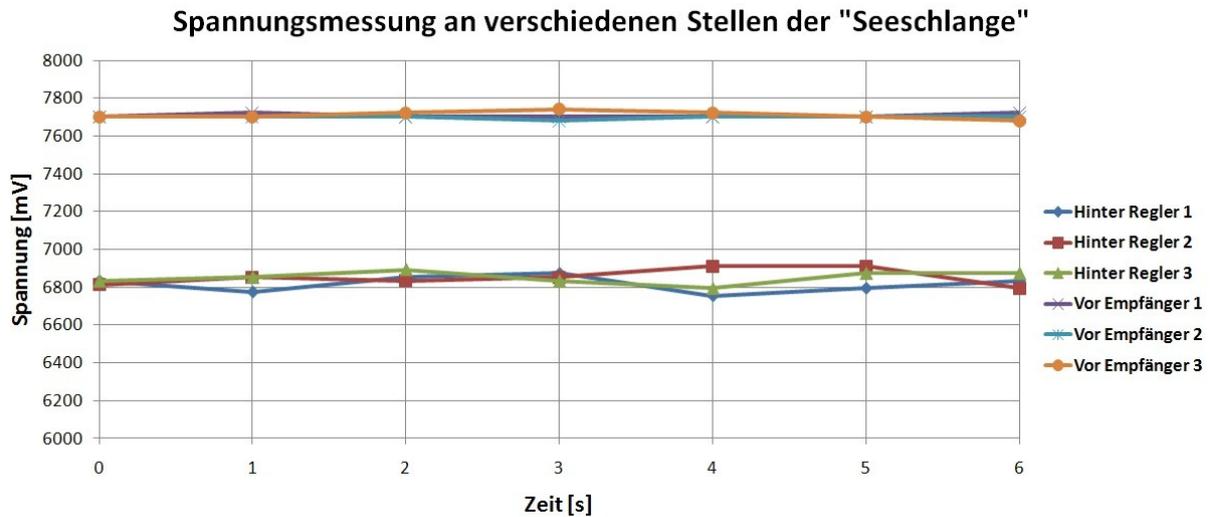


Abbildung 51: Diagramm der Spannungsmessung der "Seeschlange"

Die Spannungsdifferenz zwischen beiden Messpositionen ist nahezu konstant, der Mittelwert der Differenz beträgt $886 \text{ mV} \pm 53,8 \text{ mV}$. Die Spannung ändert sich auch bei Belastung kaum (Festhalten des Motorabtriebs mit der Hand). Dieser Wert muss von den bei den Strommessungen aufgenommenen Spannungen subtrahiert werden, um die am Motor anliegende Spannung zu erhalten.

Im weiteren Verlauf des Versuchs wird die Motorspannung über die Fernsteuerung verändert und die Messwerte aufgenommen. Das in Abbildung 52 gezeigte Diagramm weist ab etwa Sekunde 14 ein Ansteigen der Spannung auf. Ab diesem Zeitwert spricht der Regler auf die Manipulation der Fernsteuerung an. Anders als erwartet, nimmt die Messschaltung keinen Abstieg, sondern einen Anstieg des Spannungswerts auf, bis schließlich kein Messwert mehr aufgezeichnet wird (Zusammenbruch der Spannung der Messplatine). Der Verlauf der Höhe der Spannung wird daher mit einem Oszilloskop überprüft. Hier zeigt sich, dass die Spannung tatsächlich sinkt, wenn die Geschwindigkeit der Schwingung über die Fernsteuerung verringert wird. Allerdings ist die Empfindlichkeit der Steuerung auf wenige Rasterungen der Fernsteuerung beschränkt, d.h. nur die letzten vier bis fünf Rasterstellungen beeinflussen die Spannung, die am Motor anliegt.

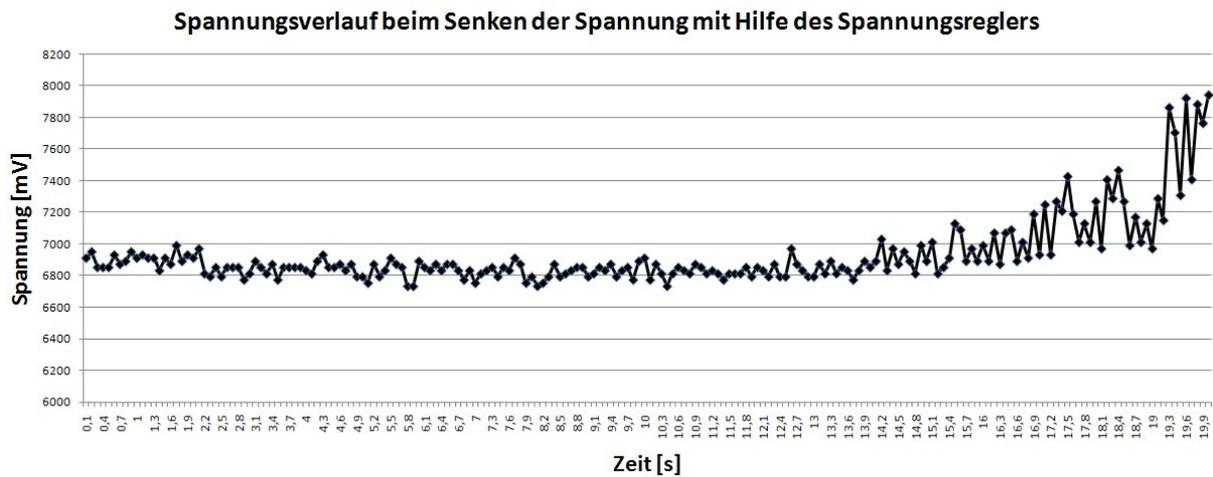


Abbildung 52: Diagramm des Spannungsverlaufs beim Senken der Spannung mit Hilfe des Spannungsreglers.

Eine mögliche Ursache für den ungewöhnlichen Spannungsverlauf liegt darin, dass die Platine ihre benötigte Betriebsspannung direkt aus dem Steuerstromkreislauf der „Seeschlange“ bezieht. Erreicht die Spannung den Grenzbereich von 5 V stellt der Spannungswandler auf der Platine keine Betriebsspannung mehr zur Verfügung und die Platine schaltet ab.

5. Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat in einigen Bereichen noch Verbesserungspotential und erweiterte Experimente zur Validierung erster Ergebnisse sind wünschenswert.

Kurzfristig ist der Umbau der Messplatine auf eine Spannungsversorgung durch den USB-Port sinnvoll, da so auch die Aufnahme der sich verändernden Spannung durch die Geschwindigkeitssteuerung des Motors der „Seeschlange“ ermöglicht wird. In Kombination mit einer drahtlosen Lösung für die Kommunikation der Messplatine mit dem PC (z.B. durch ein Zigbee-Funkmodul) ist langfristig eine eigene Spannungsversorgung für dieses Messelement notwendig. Die zusätzliche Erweiterung der Platine zur Aufnahme von Werten eines Potentiometers oder Absolutwertgebers, die die genaue Motorposition angeben, vereinfacht die Zuordnung der Strom- und Spannungswerte. Für die geplante aktive Steuerung der Elastizität des Gelenks ist dies von großer Bedeutung, weil das die Voraussetzung für ein exaktes Feedback an den Benutzer schafft.

Nicht alle verwendeten Federbleche sind korrosionsbeständig, für weitere Experimente sind mehr korrosionsbeständige Materialien wünschenswert.

Die künstlichen Bewuchselemente bedürfen einer Optimierung, da die verwendeten Materialien und Gewichte vermutlich nicht genug Widerstand gegenüber der „Seeschlange“ bieten, um die Bewegung zu beeinflussen. Der Einsatz richtiger Wasserpflanzen bei Folgeexperimenten ist vorstellbar.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Gelenkvariante 1 muss überarbeitet werden, um die gestellten Anforderungen an die Nachgiebigkeit der Gelenkverbindung noch besser zu berücksichtigen.

Da das Design der Gelenkverbindung der „Seeschlange“ großen Veränderungen unterliegt, ist eine Neuberechnung der optimalen Federsteifigkeit für die eingesetzten Federbleche sinnvoll.

Schließlich sollte eine Bewegungsanalyse des Roboters z.B. mit der Software MaxTrack in Betracht gezogen werden. Damit lassen sich die verschiedenen Varianten noch einfacher vergleichen und Daten wie die Fortbewegungsgeschwindigkeit und die Beschleunigung können ermittelt werden.

6. Zusammenfassung

Die konstruierte und aufgebaute Variante (Gelenkvariante 3) der nachgiebigen Kopplung mit passiv einstellbarer Elastizität erweist sich als funktionstüchtig. Sie ermöglicht eine anguilliforme Bewegung der Effektormodule. Außerdem lassen sich die verwendeten Federbleche mit geringem Montage und Zeitaufwand austauschen. Die konzipierte Messschaltung zur Aufnahme von Strom- und Spannungswerten liefert Ergebnisse zum Stromverbrauch der „Seeschlange“. Der Stromverbrauch der anguilliformen Effektormodul-Konfiguration (durchschnittlich 523 mA) beträgt etwa das Zweifache der thunniformen Effektormodul-Konfiguration (durchschnittlich 276 mA). Die gemessenen Stromwerte belegen, dass der Stromfluss der „Seeschlange“ im Vergleich zu Robotern mit mehreren Aktoren (Crespi et al. [1], Mclsaac et al. [2], Yamada et al. [3]) gering ist. Die damit verbundene Einsatzdauer des Roboters ist dementsprechend hoch. Je steifer die gelenkige Verbindung zwischen den Effektormodulen ist, desto höher liegt der gemessene Stromfluss (vgl. Tabelle 22,

Konfigurationen 5a, b und c). Die Messung sich verändernder Spannungswerte ist allerdings verbesserungswürdig.

Die Auswertung der Videobilder und deren Zuordnung zur Strommesskurve lässt erste Schlüsse daraus ziehen, wann die Belastung für den Motor des Roboters am größten ist. Die Auswertung hat ergeben, dass die Maxima der Strommesskurve jeweils in den Umkehrpunkten des Motors erreicht werden. Die Mittelposition weist den geringsten Stromfluss auf. Dabei gilt es zu erwähnen, dass das Maximum im linken Umkehrpunkt geringer ausfällt als das Maximum im rechten Umkehrpunkt (vgl. Abbildung 49 und Abbildung 50). Grund hierfür ist eine konstruktionsbedingte Asymmetrie der Auslenkung des Effektormoduls. Die Auslenkung nach links fällt geringer aus als die nach rechts. Die Periodendauer eines Schlagzykluses des thunniformen Effektormoduls beträgt 1,1 s, die Periodendauer des anguilliformen Effektormoduls liegt zwischen 1,25 s und 1,58 s. Tendenziell ist die Periodendauer der Variante mit zentralem Federblech etwas geringer als die Variante mit Schraubenfedern. Der Einfluss der Federsteifigkeit auf die Periodendauer muss noch genauer untersucht werden. Um die Zuordnung der Strommesskurve zu verschiedenen Stellungen der Effektormodule eindeutig zu bestimmen, bedarf es der Erweiterung der „Seeschlange“ um ein Potentiometer oder einen Absolutwertgeber mit entsprechenden Anpassungen der Messplatine.

Der simulierte künstliche Pflanzenbewuchs hat keinen signifikanten Einfluss auf die Energie, die dem Motor des aquatischen Roboters bereitgestellt werden muss. Für weitere Experimente in dieser Richtung muss die Form des künstlichen Bewuchses überarbeitet werden.

Der in dieser Arbeit konzipierte modulare Verbinder erweist sich als wasserdicht und stellt eine Alternative zum aktuellen Design dar.

7. Quellen- und Literaturverzeichnis

7.1 Literaturquellen

- [1] Crespi, Alessandro; Ijspeert, Auke Jan: AmphiBot II: An Amphibious Snake Robot that Crawls and Swims using a Central Pattern Generator, Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots, Brussels, Belgium - September 2006, p.19-27
- [2] Mclsaac, Kenneth A.; Ostrowski, James P.: A Geometric Approach to Anguilliform Locomotion: Modelling of an Underwater Eel Robot, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan - May 1999, p. 2843-2848
- [3] Yamada, H. et al.: Development of Amphibious Snake-like Robot ACM-R5, Proceedings of the International Symposium for Robotics 2005, p. 133-139
- [4] van Ham, Ronald; et al.: Compliant Actuator Designs, IEEE Robotics & Automation Magazine (September 2009), p. 81-92
- [5] Schiavi, Riccardo; Flacco, Fabrizio; Bicchi, Antonio: Integration of Active and Passive Compliance Control for Safe Human-Robot Coexistence, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan
- [6] Veneman, Jan F.; et al.: Design and Evaluation of the LOPES Exoskeleton Robot for Interactive Gait Rehabilitation, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 15, No. 3, September 2007, p. 379 – 386
- [7] Wolf, Sebastian; Hirzinger, Gerd: A New Variable Stiffness Design: Matching Requirements of the Next Robot Generation, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, p. 1741-1746
- [8] Takuma, Takashi; Hosoda, Koh (2007): Controlling walking behaviour of Passive Dynamic Walker utilizing passive joint compliance, Department of Adaptive Machine Systems, Graduate School of Engineering, Osaka University
- [9] Braure, Jérôme (2004): Participation of the Construction of a Salamander Robot: Exploration of the Morphological Configuration and the Locomotion Controller, Logic Systems Laboratory, Biologically Inspired Robotics Group (BIRG), Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL)
- [10] Buehler, Martin: Dynamic locomotion with one, four and six-legged robots, Ambulatory Robotics Laboratory (ARL), Centre for Intelligent Machines, McGill University, Montreal, Quebec, Canada
- [11] Moos, Josef; Wagenleiter, Hans-Werner; Wollinger, Peter: Tabellenbuch Metallbau, Konstruktionstechnik, Feinblechbau, 2. Aufl., Verlag Handwerk und Technik, S. W55

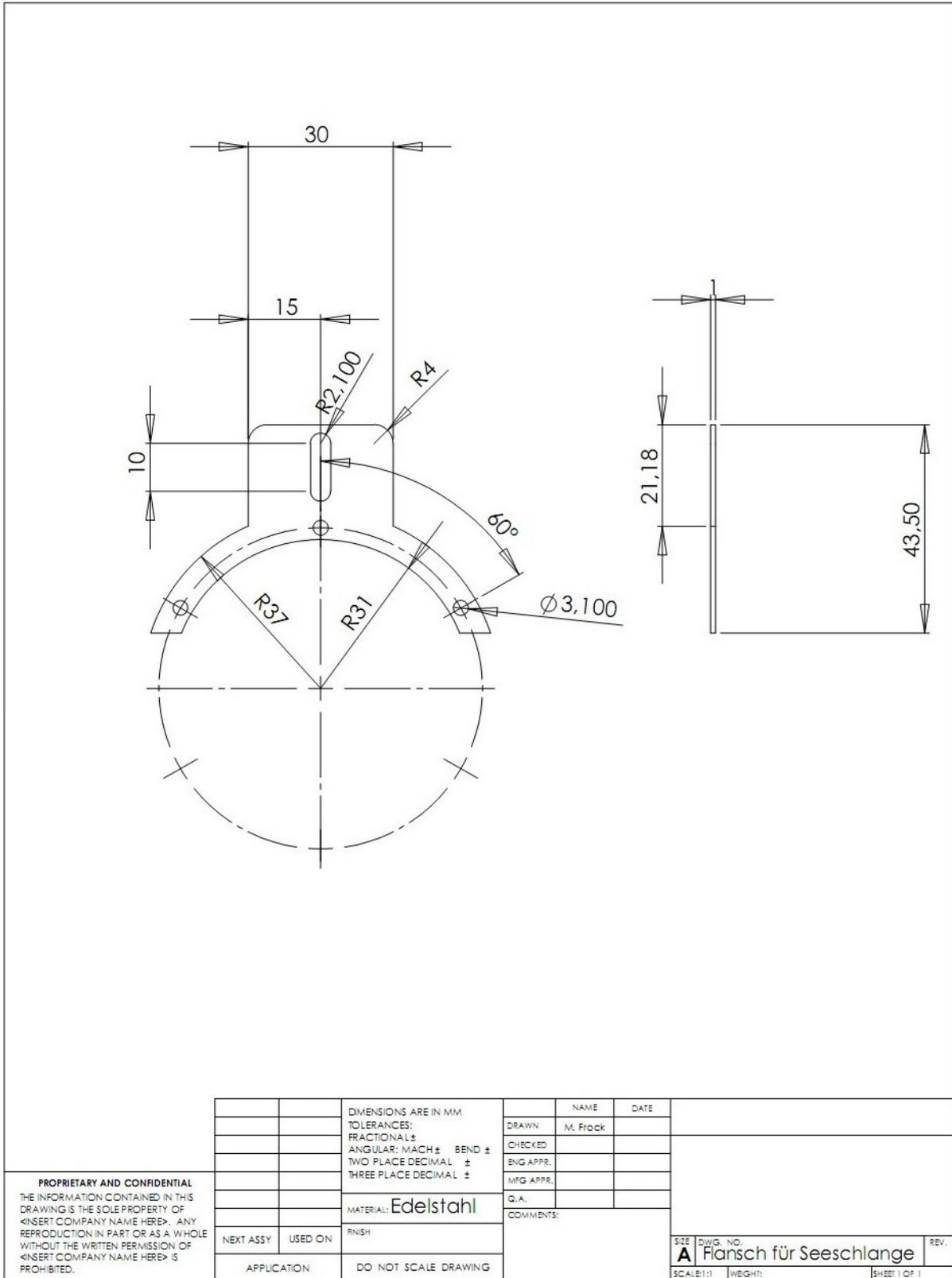
- [12] Saranli, Uluc; Buehler, Martin; Koditschek, Daniel E.: Design, Modeling and Preliminary Control of a Compliant Hexapod Robot, Department of Electrical Engineering and Computer Science, the University of Michigan, Ann Arbor, USA; Centre for Intelligent Machines, McGill University, Montreal, Quebec, Canada
- [13] Vanderborght, Bram; et al.: MACCEPA 2.0: Adjustable Compliant Actuator with Stiffening Characteristic for Energy Efficient Hopping, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan
- [14] Fremerey, Max; et al.: A single actuated, modular swimming robot performing different styles of steady swimming species, Department of Biomechatronics, Faculty of Mechanical Engineering, Ilmenau University of Technology, Germany
- [15] Fischheiter, Lars; Fremerey, Maximilian (2008): Konzeption eines sich undulatorisch bewegenden, aquatischen Roboters, Projektarbeit im Fachgebiet Biomechatronik der TU Ilmenau
- [16] Willms, André (2008): C++ Programmierung lernen: Anfahren, Anwenden, Verstehen, 1. Aufl., Addison-Wesley Verlag München

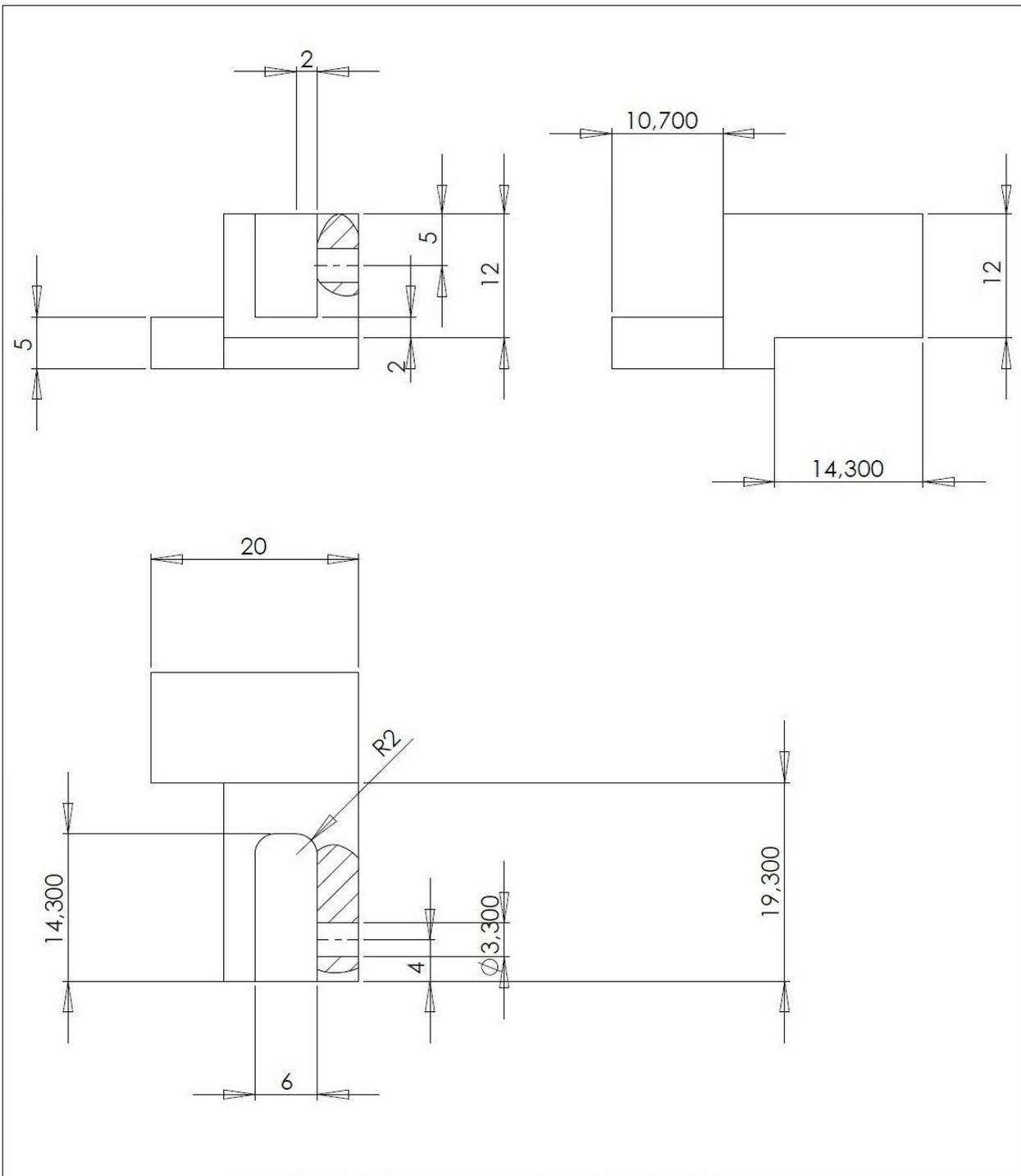
7.2 Elektronische Quellen

- [17] <http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/tlex/lemmata/1/1/159.htm> (gefunden am 22.12.2010)
- [18] <http://www.3me.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=059f5e75-fc05-490e-8c1f-fce96246b22b&lang=en> (gefunden am 27.11.2010)
- [19] Handbuch des ATmega8 der Fa. Atmel: <http://www.atmel.com/atmel/acrobat/doc2486.pdf> (gefunden am 25.09.2010)
- [20] Handbuch des Docklight v.1.9 Programms: <http://www.docklight.de/manual/index.htm> (gefunden am 30.10.2010)
- [21] <http://sourceforge.net/projects/winavr/> (Quelle für den Win AVR Compiler, gefunden am 17.10.2010)
- [22] <http://www.docklight.de/download.htm> (Quelle für das Docklight Programm, gefunden am 19.10.2010)
- [23] <http://www.fh-jena.de/~kleine/history/software/DIN66001-1966.pdf> (gefunden am 20.11.2010)
- [24] <http://www.mikrocontroller.net/articles/AVR-GCC-Tutorial> (gefunden am 17.09.2010)
- [25] http://mechanik.tu-berlin.de/popov/mechanik1_%20ss05/skript/Vorlesung%2014.pdf (gefunden am 04.10.2010)
- [26] <http://www.cadsoft.de/download.htm> (Quelle für das EAGLE Board Layout Programm, gefunden am 10.09.2010)

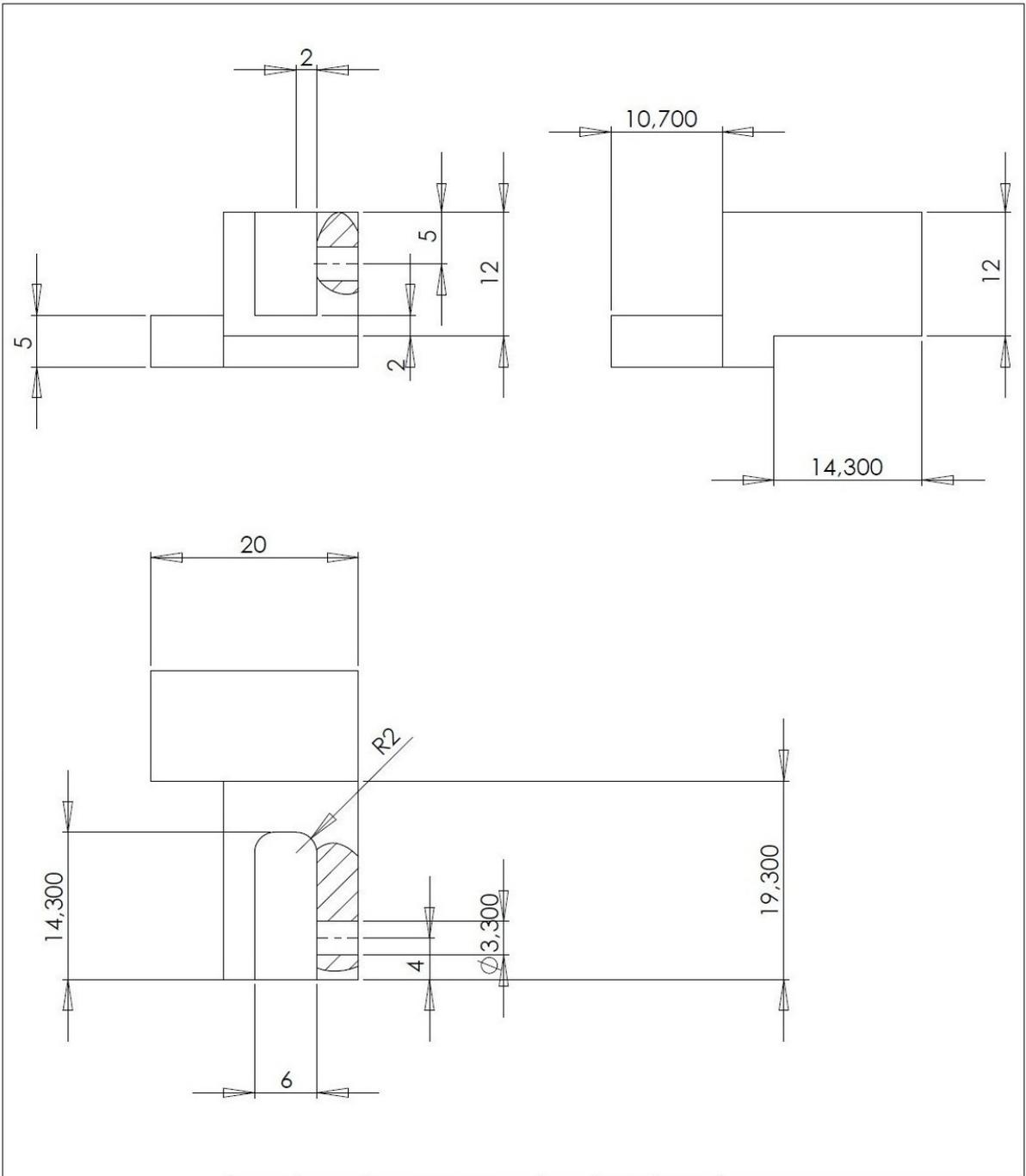
8. Anhang

8.1 Zeichnungen und Entwürfe





<p>PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.</p>			DIMENSIONS ARE IN MM TOLERANCES: FRACTIONAL ± ANGULAR: MACH ± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±	<table border="1"> <tr> <th>NAME</th> <th>DATE</th> </tr> <tr> <td>M. Frock</td> <td></td> </tr> </table>	NAME	DATE	M. Frock					
	NAME	DATE										
	M. Frock											
			MATERIAL: Aluminium	<table border="1"> <tr> <td>DRAWN</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CHECKED</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ENG APPR.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>MFG APPR.</td> <td></td> </tr> </table>	DRAWN		CHECKED		ENG APPR.		MFG APPR.	
	DRAWN											
CHECKED												
ENG APPR.												
MFG APPR.												
NEXT ASSY	USED ON	FINISH	G.A. COMMENTS: Maßstab 2:1									
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING	<table border="1"> <tr> <td>SIZE</td> <td>DWG. NO.</td> <td>REV.</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>Zeichnung Halterung rechts</td> <td></td> </tr> </table>	SIZE	DWG. NO.	REV.	A	Zeichnung Halterung rechts				
SIZE	DWG. NO.	REV.										
A	Zeichnung Halterung rechts											
			SCALE: 2:1 WEIGHT: SHEET 1 OF 1									

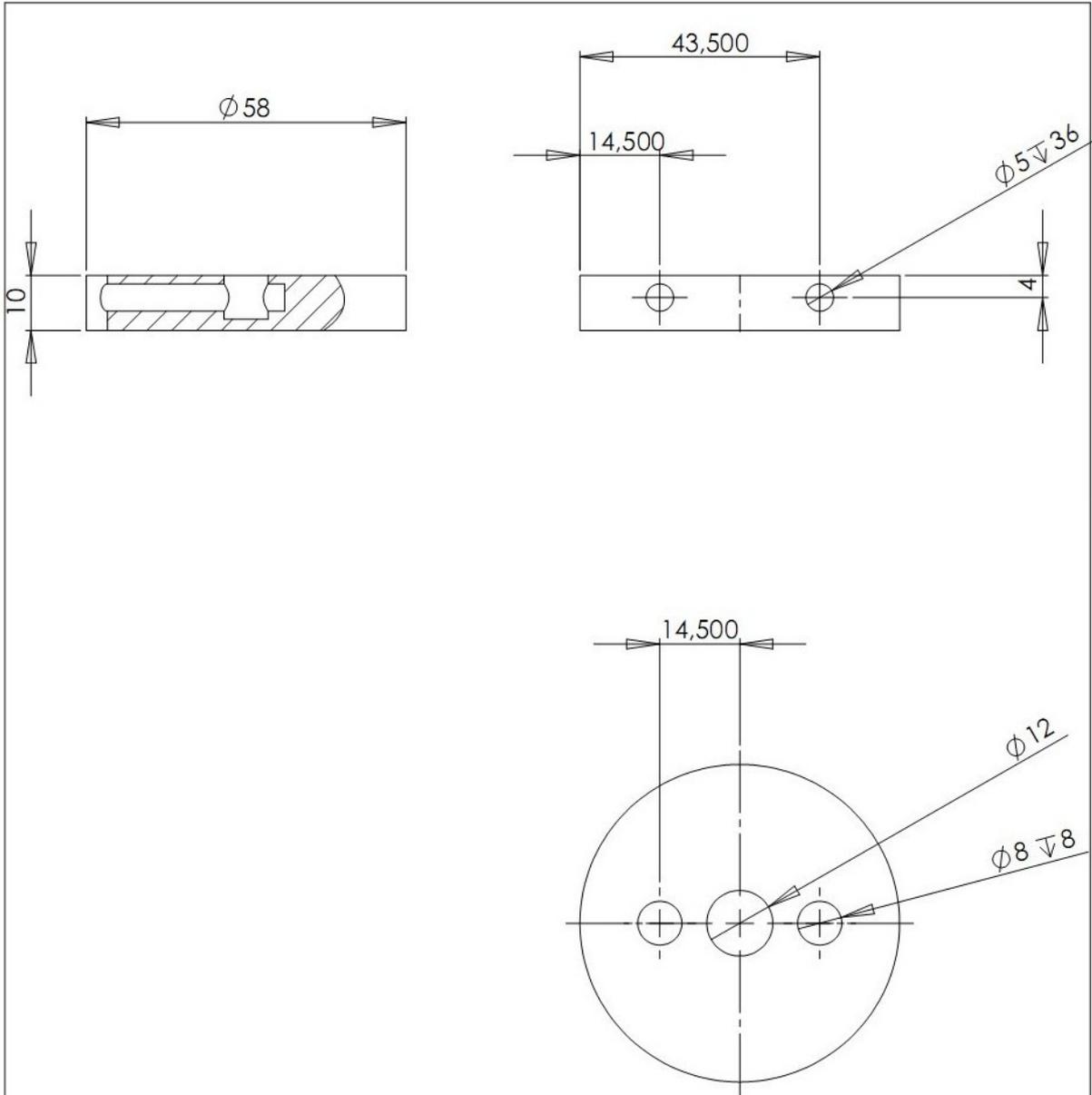


PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

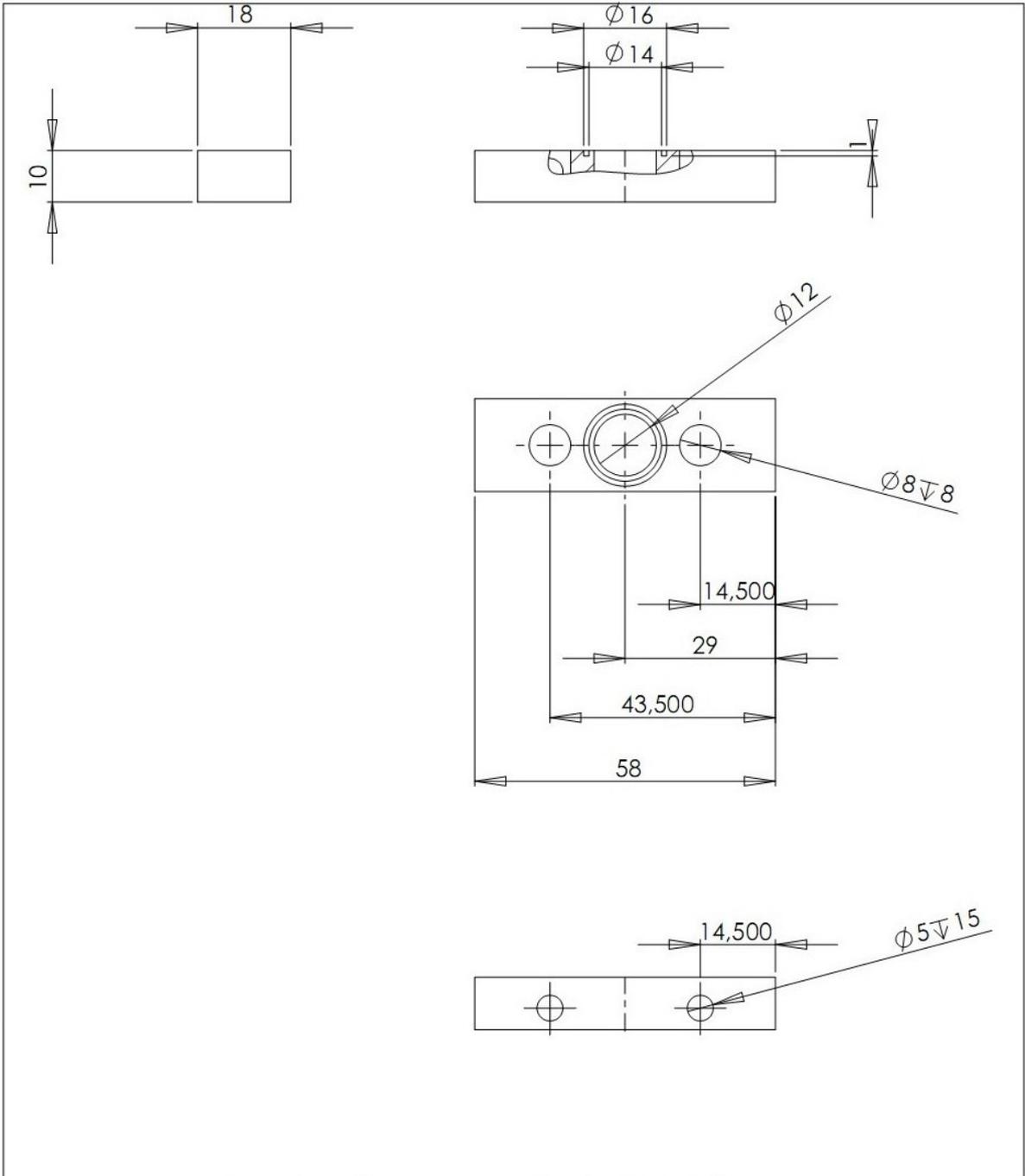
		DIMENSIONS ARE IN MM
		TOLERANCES:
		FRACTIONAL: ±
		ANGULAR: MACH ± BEND ±
		TWO PLACE DECIMAL ±
		THREE PLACE DECIMAL ±
		MATERIAL: Aluminium
NEXT ASSY	USED ON	FINISH
APPLICATION	DO NOT SCALE DRAWING	

	NAME	DATE
DRAWN	M. Frock	
CHECKED		
ENG APPR.		
MFG APPR.		
Q.A.		
COMMENTS: Maßstab 2:1		

SIZE	DWG. NO.	REV.
A	Zeichnung Halterung links	
SCALE: 2:1	WEIGHT:	SHEET 1 OF 1

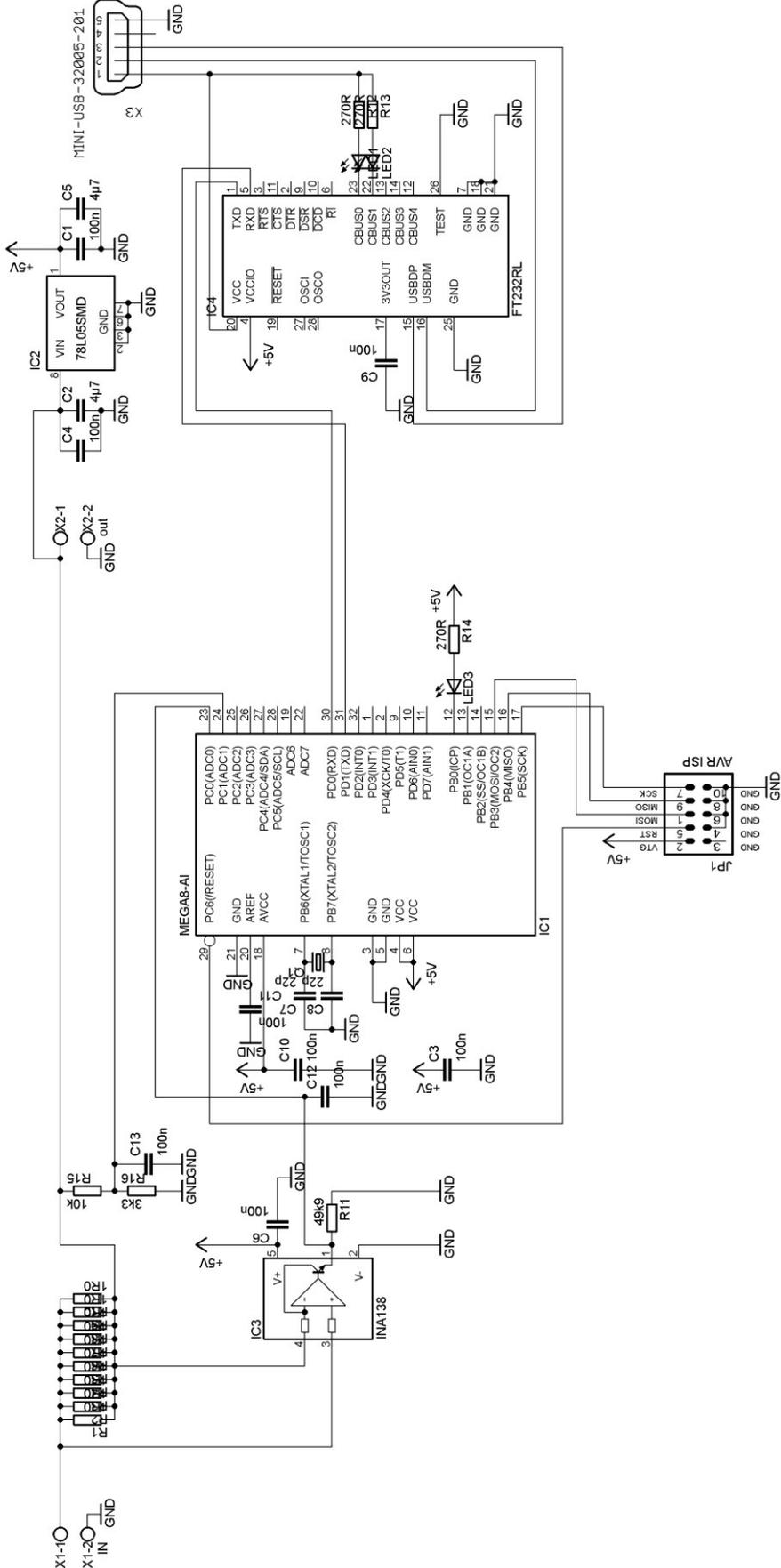


<p>PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.</p>				DIMENSIONS ARE IN MM TOLERANCES: FRACTIONAL ± ANGULAR: MACH ± BEND ± TWO PLACE DECIMAL ± THREE PLACE DECIMAL ±		NAME M. Frock	DATE
				MATERIAL: Aluminium		CHECKED	
				FINISH		ENG APPR.	
						MFG APPR.	
NEXT ASSY	USED ON			Q.A.		COMMENTS:	
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING		SCALE: 1:1 WEIGHT:		SHEET 1 OF 1	
				SITE DWG. NO. A		Modularer Verbinder T1 REV.	



<p>PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.</p>				DIMENSIONS ARE IN MM TOLERANCES: FRACTIONAL: \pm ANGULAR: MACH \pm BEND \pm TWO PLACE DECIMAL \pm THREE PLACE DECIMAL \pm		NAME DATE	
				MATERIAL: Aluminium		COMMENTS:	
NEXT ASSY	USED ON	FINISH		DRAWN		M. FROCK	
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING		CHECKED			
				ENG APPR.			
				MFG APPR.			
				Q. A.			
				SCALE: 1:1		WEIGHT:	
				SIZE		DWG. NO.	
				A		Modularer Verbinder T2	
				SHEET 1 OF 1		REV.	

8.2 Elektrischer Schaltplan der Messplatine



8.3 Programmcode des Messprogramms

```
#include "usart.h"
#include "usart.c"
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include <inttypes.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/wdt.h>
#include <stdbool.h>
//      A0          A1          A2
uint16_t messwert[40],mw,wert_u_16,wert_i_16; //Speichert die Messwerte
uint8_t i;
double wert_u,wert_i;
//XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
void delay_ms(unsigned int ms)
    {while(ms){_delay_ms(0.96);ms--;}}
//XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
uint16_t readADC(uint8_t channel) {
    uint8_t i;
    uint16_t result = 0;

    // Den ADC aktivieren und Teilungsfaktor auf 64 stellen
    ADCSRA = (1<<ADEN) | (1<<ADPS2) | (1<<ADPS1);

    // Kanal des Multiplexers waehlen
    ADMUX = channel;

    // externe Referenzspannung verwenden (also ca 5 V) //(alt interne 2,56V)
    ADMUX |= (1<<REFS0);                               //| (1<<REFS1);

    // Den ADC initialisieren und einen sog. Dummy Readout machen
    ADCSRA |= (1<<ADSC);
    while(ADCSRA & (1<<ADSC));

    // Jetzt 3x die analoge Spannung und Channel auslesen und dann den Durchschnittswert
    // ausrechnen.

    for(i=0; i<3; i++) {
        // Eine Wandlung
        ADCSRA |= (1<<ADSC);
        // Auf Ergebnis warten...
        while(ADCSRA & (1<<ADSC));

        result += ADCW;
    }

    // ADC wieder deaktivieren
    ADCSRA &= ~(1<<ADEN);
    result /= 3;

    return result;
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    mw=readADC(0);                               //ADC0 lesen == Spannung am INA --> STROM
    wert_i=mw*4.889;
    wert_i_16=wert_i;
```

```

mw=readADC(1);           //ADC1 lesen == Spannung
wert_u=mw*19.75;
wert_u_16=wert_u;
usart_write(" U= %5i [mV]  I= %5i [mA]\r\n",wert_u_16,wert_i_16);

}

```

```

int main(void) {
  DDRB|=(1<<PB0);
  PORTB|=(1<<PB0);
  TCCR1B|=(1<<CS12)|(1<<CS10)|(1<<WGM12); //Vorteiler auf 1024 einstellen
  TIMSK|=(1<<OCIE1A);
  OCR1A=15625;
  uart_init();
  sei(); //Global Interrupt Enable Bit setzen
  usart_write("\r\nInitialisierung Abgeschlossen\r\n Auflösung: Strom 5mA Spannung 20mV\r\n
Zeitabstand der Messungen einstellen mit: xxxxx!\r\n

```

Bsp: 15625! entspricht 1.000s, 01562! 0.100s");

```

  while(1){
    if(newdata) {
      newdata=0;
      OCR1A=(rx_buffer[0]-48)*10000+(rx_buffer[1]-48)*1000+(rx_buffer[2]-
48)*100+(rx_buffer[3]-48)*10+(rx_buffer[4]-48);
      usart_write("\r\n Timerwert: %5i  \r\n",OCR1A); //Einlesen des
Zahlenwerts zum Ändern der Messauflösung
    };
    delay_ms(10);
  }
}

```