



BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN
University of Applied Sciences

Fachbereich VII
Elektrotechnik - Mechatronik - Optometrie
Forschungslabor Neurorobotik
Studiengang Mechatronik

Masterarbeit

Entwicklung eines adaptiven Regelungsmechanismus für die Bewegungsoptimierung modularer Aktuatoren

Benjamin Panreck

Matrikelnummer: 813650

spanreck@beuth-hochschule.de

Betreuer: Prof. Dr. Hild

Gutachter: Prof. Dr. Lewkowicz

Berlin, 12. Oktober 2015

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Regelungsmechanismus entwickelt, der sich adaptiv an Konfigurationsänderungen eines Viergelenkgetriebes anpassen kann, um dessen Bewegung zu optimieren. Dazu war ein modularer und universeller Teststand zu entwickeln, der als Basis für diese und weitere Forschungsarbeiten am Forschungslabor Neurorobotik dienen wird. Das Verfahren basiert auf Messungen der rückwirkenden elektromotorischen Kraft von Elektromotoren und erfolgt ohne zusätzliche Sensorik. Aufgrund spezieller Anforderungen an den fremderregten Gleichstrommotor ist der am besten geeignete Motor aus einer Auswahl von acht Motoren ermittelt worden. Die Implementierung des Regelungsmechanismus erfolgte auf einem FPGA mit der Hardwarebeschreibungssprache VHDL. Grundsätzlich erfüllt der Mechanismus drei Aufgaben: Die Richtungsumkehr bei mechanischen Anschlägen, die Erkennung der Konfiguration eines Viergelenkgetriebes mit zwei Motoren und die Detektion von Singularitäten in der Bewegung eines Viergelenkgetriebes. Je nach Konfiguration des Viergelenkgetriebes wird die Motoransteuerung angepasst, um den Energiebedarf des Systems zu minimieren. Insofern die Bewegung Singularitäten aufweist, kann der Anwender wählen, in welcher Bewegungsform das System fortgeführt werden soll. Abschließend wurde der Regelungsmechanismus anhand von vier Testfällen untersucht.

Abstract

In this work, a control mechanism was developed which can adapt to changes in configuration of a fourbar linkage, in order to optimize the movement. For this purpose, a modular and universal test stand was to develop, which will serve as the basis for this and further research at the neurorobotics research laboratory. The method is based on measurements of the back electromotive force of electric motors and is done without additional sensors. Due to special requirements of the separately excited DC motor, the most appropriate motor from a choice of eight motors has been determined. The implementation of the control mechanism occurred at an FPGA with the hardware description language VHDL. Basically, the mechanism performs three tasks: The direction reversal in mechanical stops, the recognition of the configuration of a fourbar linkage with two motors and the detection of singularities in the movement of a fourbar linkage. Depending on the configuration of the fourbar linkage, the motor control is adjusted to minimize the energy requirements of the system. If the movement has singularities, the user can choose which form of motion the system should be continued. Finally, the control mechanism has been studied based on four testcases.

Inhalt

1	Motivation	1
2	Stand der Forschung	2
3	Aufbau der Arbeit	4
4	Grundlagen	5
4.1	Physikalische Grundlagen	5
4.2	Elektromotoren	7
4.2.1	Elektrisches Ersatzschaltbild	8
4.2.2	Kennlinien	9
4.2.3	Rückwirkende elektromotorische Kraft	12
4.3	Freiheitsgrade mechanischer Systeme	19
4.4	Viergelenkgetriebe	21
4.5	Regelungsmechanismen	25
4.5.1	Regelung oder Steuerung	25
4.5.2	PID-Regler	26
4.6	Dynamische Systeme	27
4.7	Sensomotorische Schleife	29
5	Testaufbau	33
5.1	Motorauswahl	33
5.1.1	Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung	35
5.1.2	Fazit zur Motorauswahl	39
5.1.3	Messung der Drehzahlkonstanten des LEGO 71427	40
5.2	Teststand	42
5.2.1	Hardware	43
5.2.2	Elektronik	47
6	Regelungsmechanismus	52
6.1	Messungen	52
6.1.1	Aufrichten eines Pendels über einen Spannungsimpuls	54
6.1.2	Messungen am dissipativen Pendel	55
6.2	Anforderungen an den Regelungsmechanismus	60
6.2.1	Richtungsumkehr bei mechanischen Anschlägen	60
6.2.2	Erkennung der Konfiguration	62
6.2.3	Erkennung von Singularitäten	63
6.2.4	Implementierung auf dem FPGA	66
6.3	Testfälle für den Regelungsmechanismus	69
6.4	Evaluation der Messergebnisse	82
6.4.1	Aufrichten eines Pendels über einen Spannungsimpuls	82
6.4.2	Richtungsumkehr bei mechanischen Anschlägen	86
6.4.3	Erkennung der Konfiguration	89
6.4.4	Erkennung der Singularitäten	90

7 Zusammenfassung	92
8 Ausblick	94
Literatur	96
Anhang	99

1 Motivation

Adaptivität, Energieeinsparung, Effizienzsteigerung, Minderung der Geräuschemissionen und Universalität - Dies ist nur eine Auswahl der Begriffe, die im Rahmen der fortschreitenden Industrialisierung, der aktuell sogenannten „Industrie 4.0“ auftreten. Fortschreitende Technologien erfordern entsprechend innovative Fertigungsanlagen. Die Entwicklung, hin zu immer besseren Produkten, mit gleichzeitig sinkenden Produktionskosten, erfordert ein hohes Maß an Anpassung der Fertigungsprozesse an variierende Material- und Umweltparameter. Die Adaptivität von Prozessen gewinnt besonders an Priorität.

Auch in der Robotik ist dieser Trend klar zu erkennen. Durch den Drang zu mehr Freiheitsgraden, nimmt die Anzahl der Aktuatoren stetig zu und erfordert innovative Regelungsmechanismen, die sich den Umgebungsbedingungen des Roboters anpassen können. Nicht zuletzt für den steigenden Bedarf an Mensch-Maschine-Interaktionen. Insbesondere bei mobilen Plattformen ist der Energieverbrauch des Systems von entscheidender Bedeutung, denn dieser bestimmt maßgeblich die Betriebsdauer. Energieeinsparungen bei der Aktorik ermöglichen eine signifikante Steigerung der Betriebsdauer. Die Kapazität der Energiespeicher ist in der Regel durch die Proportionalität zwischen Kapazität und Masse minimal zu halten.

Unabhängig vom Einsatzgebiet führt die zunehmend geforderte Flexibilität zu einer stetigen Anpassung an die Umwelt. Diese Anpassungen können von Temperaturänderungen der Fertigungsstrecke bis zur räumlichen Umstrukturierung des Aktionsraumes eines humanoiden Roboters sehr weitreichend sein. Vorgefertigte Modelle der Umwelt führen in diesen Fall nicht zum Ziel. Das System muss sich adaptiv an die Umwelt anpassen und diese regelmäßig auf Änderungen überprüfen.

2 Stand der Forschung

Projekte zur Adaptivität oder Energieeinsparung von Prozessen sind hochaktuelle Forschungsthemen.

Im Forschungslabor Neurorobotik (NRL¹) der Beuth Hochschule für Technik Berlin werden solche Verfahren bereits seit Jahren erforscht. In diesem Zusammenhang ist der Roboter „SEMNI“ zu nennen. SEMNI² ist ein 30 cm großer Roboter mit zwei Gelenken. Sein Aufbau ermöglicht es, Versuche zunächst im zweidimensionalen Raum durchzuführen und die Mechanismen ohne große Umwege zu implementieren und zu erforschen.



Abbildung 1: Der Roboter SEMNI. Dieser Roboter wurde am Forschungslabor Neurorobotik entwickelt und vereinfacht die Entwicklung von Algorithmen, indem der Bewegungsraum auf eine Ebene reduziert ist.

Eine am NRL entwickelte sensomotorische Schleife ist die „Cognitive Sensorimotor Loop“ (CSL) [11] [12] [18]. Sie weist trotz ihrer recht simplen Struktur bereits kognitive Fähigkeiten auf. Auf Basis der CSL wurde das ABC-Learning [3] [13] [17] entwickelt. „ABC“ steht für „Attractor-Based Behavior Control“ und basiert auf dem Ansatz, einen Roboter mit den sensomotorischen Schleifen als ein dynamisches System zu betrachten. Dies ermöglicht den Einsatz der mathematischen Mittel von dynamischen Systemen zur Beschreibung und Analyse der Roboter.

Die an SEMNI gewonnenen Erkenntnisse können dann auf den humanoiden Roboter Myon portiert und im dreidimensionalen Raum getestet werden.

¹NRL: Neurorobotics Research Laboratory

²SEMNI: Self-Exploring Multi-Neural Individual



Abbildung 2: Der humanoide Roboter Myon. Dieser Roboter ist modular aufgebaut und kann aufgrund der verteilten Rechenleistung und Energieversorgung während seiner Laufzeit montiert und demontiert werden [34].

Myon ist im Rahmen des EU-Projekts ALEAR³ entstanden und eine etablierte Forschungsplattform im Forschungslabor Neurorobotik. Dieser humanoide Roboter ist modular aufgebaut und kann aufgrund der verteilten Rechenleistung und Energieversorgung während seiner Laufzeit montiert und demontiert werden. Aufgrund der verteilten Rechnerarchitektur sind auch isolierte Versuche an nur einem Körperteil möglich. Myon hat über 200 Sensorwerte, 48 Aktuatoren und 32 Freiheitsgrade [34].

In Weiterentwicklung der CSL sind die Abschlussarbeiten von Benjamin Werner [36], Pablo de Miguel Morales [22] und Pablo Gabriel Lezcano Giménez [19] zu nennen. Ein aktuelles Forschungsprojekt ist das von der EU geförderte Projekt AREUS⁴. Der Schwerpunkt des Kooperationsprojekts zwischen Forschung und Industrie liegt in der Toolentwicklung zur Energieeinsparung von Industrierobotern. Insbesondere das „energy harvesting“ und die Bewegungsoptimierung für Pick-and-Place-Systeme stehen im Mittelpunkt der aktuellen Projektphase [21] [25] [28].

³ALEAR: Artificial Language Evolution on Autonomous Robots

⁴AREUS: Automation and Robotics for EUROpean Sustainable manufacturing

3 Aufbau der Arbeit

Einleitend in die Entwicklung des Regelungsmechanismus werden die Grundlagen die im Rahmen dieser Arbeit benötigt werden reflektiert.

Da diese Arbeit auf Messungen der rückwirkenden elektromotorischen Kraft basiert, wurden ausführliche Versuche durchgeführt und die Ergebnisse interpretiert.

Anschließend folgt ein Kapitel zur Testplattform, indem der Entstehungsprozess von der Konstruktion über die Motorauswahl bis hin zur Elektronik erläutert wird. Aufgrund von besonderen Anforderungen an den Elektromotor wurden Messreihen an Testmotoren durchgeführt und die geeignetsten Motoren ausgewählt.

Das Kapitel zum Regelungsmechanismus beginnt mit orientierenden Messungen als Grundlage für den Algorithmus. Daraus werden die Anforderungen an die adaptive Regelung hergeleitet und die Implementierung auf dem FPGA beschrieben. Die Praxistauglichkeit wird anhand von vier Testfällen untersucht. Jeder Testfall wird ausführlich bis zum Phasen- oder Aktuationsraum erläutert. Die Testergebnisse zum Regelungsmechanismus werden aus funktioneller und energetischer Sicht evaluiert. Den Abschluss findet diese Arbeit in einer Zusammenfassung und einem Ausblick, der weitere Forschungsmöglichkeiten vorstellt.

4 Grundlagen

Mechatronische Systeme werden durch eine Vielzahl von Parametern beschrieben und basieren auf unterschiedlichen physikalischen Effekten. Dieses Kapitel reflektiert eine Auswahl von Grundlagen, die im Rahmen dieser Arbeit benötigt werden.

4.1 Physikalische Grundlagen

Für die folgende Anwendung von Gleichstrommaschinen wiederholt dieses Kapitel eine Auswahl an physikalischen Grundgrößen in Kurzform.

Kraft

Sobald eine Masse m beschleunigt wird, wirkt auf diese Masse m eine Kraft F .

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

Die Einheit der Kraft ist Newton $[F] = N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$.

Bei Betrachtung der Gewichtskraft einer Masse, ist für die Beschleunigung a die Erdbeschleunigung $g \approx 9,81 \frac{m}{s^2}$ einzusetzen [23].

Drehmoment

Wird ein Hebelarm der Länge r durch eine Kraft F bewegt, so entsteht ein Drehmoment M um den Drehpunkt.

$$M = F \cdot r \quad (2)$$

Die Einheit des Drehmomentes lautet: $[M] = N \cdot m = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$.

Arbeit

Wirkt auf einen Körper eine Kraft F , die zu einer Bewegung über eine Strecke s führt, wird Arbeit W verrichtet.

$$W = F \cdot s \quad (3)$$

Die Einheit der Arbeit ist Wattsekunden (Ws).

Sie lautet in SI-Einheiten: $[W] = Ws = J = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$.

Bezogen auf rotatorische Systeme gilt das Produkt aus Drehmoment M und

Drehwinkel φ :

$$W = M \cdot \varphi \quad (4)$$

Bei elektrischen Systemen gilt das Produkt aus Spannung U , Strom I und der Zeitpanne Δt :

$$W = U \cdot I \cdot \Delta t \quad (5)$$

Insofern sich Spannung und/oder Strom im Laufe des Zeitfensters verändern, muss die elektrische Arbeit über eine Integration ermittelt werden. Für das Zeitfenster Δt gilt $\Delta t = t_1 - t_0$.

$$W = \int_{t_0}^{t_1} (u(t) \cdot i(t)) dt \quad (6)$$

Energie

Die Energie E beschreibt die Fähigkeit eines Systems, Arbeit W zu verrichten. Wird Arbeit verrichtet, wird Energie von einer Form in eine andere Energieform umgewandelt. Die Einheit der Energie ist identisch zu der Einheit der Arbeit, wird jedoch üblicherweise in Joule (J) angegeben. $[E] = \text{J} = \text{Nm} = \text{Ws} = \text{VA s} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$

Leistung

Die Leistung P ist die verrichtete Arbeit ΔW eines Systems, bezogen auf das Zeitfenster Δt in der die Arbeit W verrichtet wird.

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (7)$$

Die Einheit der Leistung wird in Watt (W) angegeben: $[P] = \text{W} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$

In der Mechanik gilt bei der Geschwindigkeit v oder der Winkelgeschwindigkeit ω auch:

$$P = F \cdot v = M \cdot \omega \quad (8)$$

Impuls

Der Impuls \vec{p} beschreibt den Zustand eines physikalischen Objekts, welches sich in Bewegung befindet. Er ist eine vektorielle Größe und hat die gleiche

Richtung wie die Geschwindigkeit \vec{v} , mit der sich das Objekt bewegt. In der klassischen Mechanik berechnet sich der Impuls nach der Formel 9 durch das Produkt aus Geschwindigkeit \vec{v} und der Objektmasse m . Auf die höheren Betrachtungsweisen, wie der speziellen Relativitätstheorie, kann in diesem Zusammenhang verzichtet werden.

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \quad (9)$$

Der Impulserhaltungssatz basiert auf dem Energieerhaltungssatz und besagt, dass die Summe der Impulse in einem abgeschlossenen physikalischen System konstant bleibt. Dies gilt sowohl beim elastischen, als auch beim unelastischen Stoß, wobei insbesondere beim realen unelastischen Stoß ein Teil der kinetischen Energie des Objekts in plastische Verformung und Reibung gewandelt wird.

Die Einheit des Impulses wird in Ns angegeben: $[p] = \text{N} \cdot \text{s} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$

4.2 Elektromotoren

Elektromotoren sind die am meisten eingesetzten Aktoren, unabhängig von der Branche. Selbst in PKWs sind neben dem Antriebsmotor, der zum aktuellen Stand meist ein Verbrennungsmotor ist, etliche Elektromotoren verbaut. Sie dienen vor allem den Komfortfunktionen wie der Klimatisierung, Sitzverstellung, Spiegeleinstellung und vielen mehr. Auch für die Experimente im Rahmen dieser Arbeit werden Elektromotoren eingesetzt.

Elektrische Maschinen sind grundlegend Energiewandler. Wenn man von der Verlustenergie absieht, wird die elektrische Eingangsenergie in eine mechanische Ausgangsenergie gewandelt. Im Folgenden werden die Grundlagen von bürstenbehafteten Gleichstrommotoren erläutert. Für tiefergehende Informationen sind die Quellen [8] [29] [16] zu empfehlen.

4.2.1 Elektrisches Ersatzschaltbild

Der bürstenbehaftete Elektromotor wird durch das in Abbildung 3 gezeigte Ersatzschaltbild beschrieben.

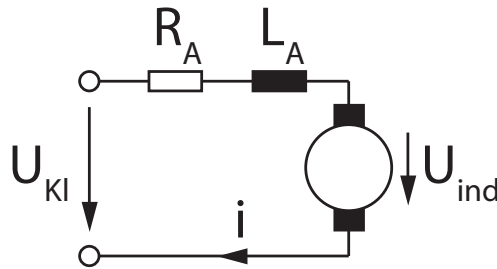


Abbildung 3: Elektrisches Ersatzschaltbild einer bürstenbehafteten Gleichstrommaschine.

Anhand des Ersatzschaltbildes wird der Motor als Reihenschaltung eines Ankerwiderstandes R_A , einer Ankerinduktivität L_A und einer Spannungsquelle U_{ind} repräsentiert. Nach dem Maschensatz ergibt sich folgende Spannungsgleichung:

$$U_{Kl} = L_A \cdot \frac{di}{dt} + R_A \cdot i + U_{\text{ind}} \quad (10)$$

Bei einem langsam veränderlichen Motorstrom I , zum Beispiel im statischen Betrieb, kann die Induktivität L_A vernachlässigt werden.

$$U_{Kl} \approx R_A \cdot I + U_{\text{ind}} \quad (11)$$

Die induzierte Spannung U_{ind} ist proportional zur Rotordrehzahl n . Der Proportionalitätsfaktor ist die Motorkonstante k_m .

$$U_{\text{ind}} = k_m \cdot n \quad (12)$$

Die Motorkonstante k_m dient ebenso als Faktor für die Proportionalität zwischen Motorstrom I und Drehmoment M .

$$M = k_m \cdot I \quad (13)$$

In Herstellerangaben ist die Motorkonstante k_m auch oft als Generator-Spannungskonstante k_E bezeichnet.

Die Inverse ist als Drehzahlkonstante k_n bekannt:

$$k_n = \frac{1}{k_E} = \frac{1}{k_m} \quad (14)$$

Leistung

Basierend auf den zuvor vorgestellten Grundlagen folgt die Betrachtung des Elektromotors aus Leistungssicht.

Die mechanische Leistung P_{mech} entsteht durch die Differenz der zugeführten elektrischen Leistung P_{el} und der Verlustleistung P_V .

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{el}} - P_V \quad (15)$$

Die elektrische Leistung P_{el} resultiert aus dem Produkt der Klemmenspannung U_{Kl} und des Motorstroms I .

$$P_{\text{el}} = U_{\text{Kl}} \cdot I \quad (16)$$

Die Verlustleistung P_V besteht überwiegend aus Reibungsverlusten P_R an den Lagern und dem Getriebe sowie aus Wärmeverlusten P_T am ohmschen Widerstand der Ankerwicklung R_A .

$$P_V = P_R + P_T = P_R + R_A \cdot I^2 \quad (17)$$

4.2.2 Kennlinien

Wie aus der Formel 8 bekannt ist, ergibt das Produkt aus Drehmoment M und Winkelgeschwindigkeit ω die mechanische Leistung P_{mech} . Durch Einsetzen der Formeln aus diesem Abschnitt, lässt sich die Beziehung zwischen Drehzahl n und Drehmoment M bestimmen. Die Reibungsverluste P_R werden für diese Betrachtung vernachlässigt.

$$P_{\text{mech}} = \omega \cdot M = 2\pi n \cdot M = P_{\text{el}} - P_V \quad (18)$$

$$2\pi n \cdot M = U \cdot I - R_A \cdot I^2 \quad (19)$$

$$2\pi n \cdot M = U \cdot \frac{M}{k_m} - R_A \cdot \left(\frac{M}{k_m}\right)^2 \quad (20)$$

$$n = \frac{U}{2\pi \cdot k_m} - \frac{R_A}{2\pi \cdot k_m^2} \cdot M \quad (21)$$

Wie Formel 21 zeigt, besteht zwischen der Drehzahl n und dem Drehmoment M ein linearer Zusammenhang. Kann der Motor frei drehen, ist das anliegende Moment $M = 0 \text{ Nm}$ und die Drehzahl n ist maximal. Diese Drehzahl wird als Leerlaufdrehzahl n_0 bezeichnet.

$$n_0 = \frac{U}{2\pi \cdot k_m} \quad (22)$$

Die Leerlaufdrehzahl aus Formel 22 wird in der Praxis nicht ganz erreicht, da aufgrund der Reibung im System ein geringes Drehmoment auf den Motor wirkt. Das Umstellen der Formel 21 nach dem Drehmoment M ergibt:

$$M = \frac{k_m \cdot U}{R_A} - \frac{2\pi \cdot k_m^2}{R_A} \cdot n \quad (23)$$

Im Moment des Anlaufens ist die Motordrehzahl $n = 0 \frac{1}{s}$ und das Drehmoment M maximal.

$$M = \frac{k_m \cdot U}{R_A} = k_m \cdot I \quad (24)$$

Aus Formel 24 wird der bereits aus Formel 13 bekannte Zusammenhang zwischen Strom I und Drehmoment M deutlich. Da im Anlaufmoment das Drehmoment M maximal ist, muss auch der Motorstrom I maximal sein. Qualitativ kann dies auch aus dem Ersatzschaltbild in Abbildung 3 auf Seite 8 interpretiert werden. Im Anlaufmoment ist die induzierte Spannung in der Ankerwicklung $U = 0 \text{ V}$ und die volle Klemmenspannung U_{Kl} liegt am Ankerwiderstand R_A an.

Die Abbildung 4 bietet einen umfassenden Überblick über die Zusammenhänge der physikalischen Größen von bürstenbehafteten Gleichstrommaschinen. Besondere Beachtung gilt den hier nicht hergeleiteten Kennlinien von der Abgabeleistung P und dem Wirkungsgrad η des Motors.

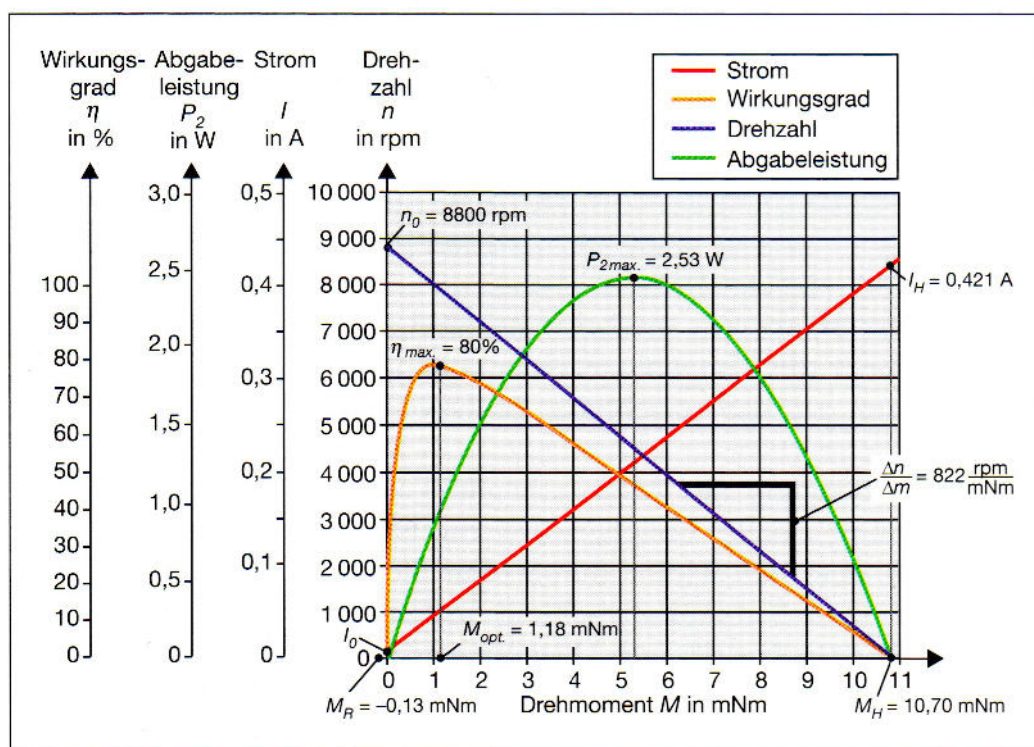


Abbildung 4: Motorkennlinien eines fremderregten Gleichstrommotors an einem Beispieldiagramm des Motorherstellers Faulhaber [8].

4.2.3 Rückwirkende elektromotorische Kraft

Die rückwirkende elektromotorische Kraft wird üblicherweise mit BEMF⁵ abgekürzt. Mit dieser Kraft ist keine mechanische Kraft in Newton, sondern eine elektrische Kraft in Volt gemeint. Sie entsteht, sobald ein Elektromotor im Generatorbetrieb eingesetzt wird.

Die BEMF wird insbesondere dann eingesetzt, wenn die Messung über zusätzliche Sensoren nicht möglich oder nicht erwünscht ist. Gründe gegen zusätzliche Sensorik können unter anderem raue Umgebungsbedingungen, geringer Platz oder die Reduzierung von Fehlerquellen sein.

Da sich die gemessene Motorklemmenspannung proportional zur Drehgeschwindigkeit verhält, ist mit der BEMF ausschließlich eine Drehzahlmessung möglich. Der von der Motorwelle zurückgelegte Winkel kann durch Integration der Geschwindigkeit über die Zeit berechnet werden. Je nach Anwendung ist dabei der resultierende Fehler nicht zu vernachlässigen. Dies gilt besonders, wenn der Motor parallel als Aktor betrieben werden soll.

Da diese Arbeit auf Messungen der BEMF basiert, zeigt dieses Kapitel anhand von Messungen, welche Möglichkeiten die BEMF in Kombination mit den eingesetzten Motoren (siehe Kapitel 5.1) bietet.

Die Abbildung 5a zeigt ein Spannungs-Zeit-Diagramm, bei dem die Motorklemmenspannung des Gleichstrommotors 71427 des Herstellers LEGO über die Zeit aufgezeichnet wurde. Dazu wurde ein physikalisches Pendel mit einer Masse m händisch auf $178^\circ \leq \varphi < 180^\circ$ ausgelenkt und anschließend losgelassen. Das Pendel schwingt gedämpft hin und her, bis es schließlich in der vertikal hängenden Position zum Stillstand kommt. Der Motor wurde in diesem Fall ausschließlich als Generator eingesetzt.

⁵BEMF: Back-ElectroMotive Force

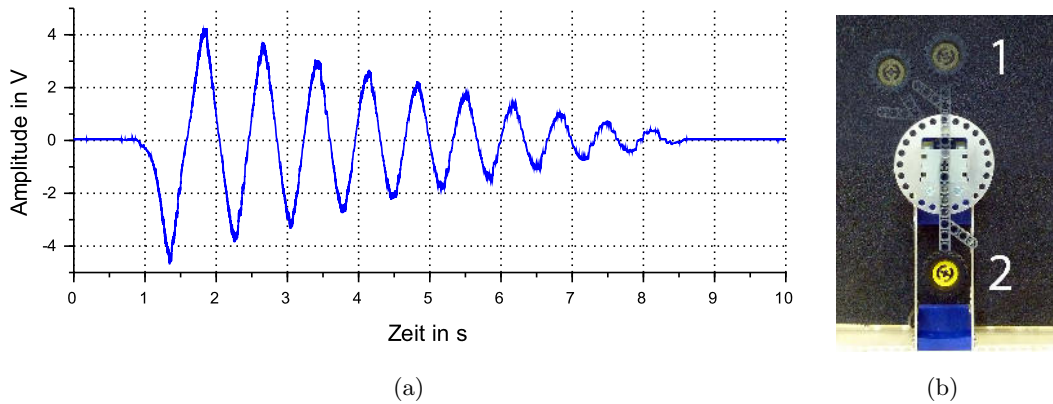


Abbildung 5: BEMF des LEGO 71427 ohne Ansteuerung. Zu sehen ist die gedämpfte Schwingung eines Pendels. a: u-t-Diagramm, b: Versuchsaufbau: 1: Ausgangsposition, 2: Stationäre Endposition

Bei paralleler Nutzung als Aktor und als Sensor muss die Motorsteuerung regelmäßig zwischen dem Mess- und Antriebsbetrieb umgeschaltet werden. Abbildung 6 zeigt den Spannungsverlauf des LEGO Motors 71427 bei einer PWM⁶-Ansteuerung mit einer Spannung von 5 V und einem Duty Cycle von $DC = 10\%$ bei einer Frequenz von 10 Hz. Der schwarze Verlauf zeigt die Ansteuerung, wobei der Motor während der Low-Time der Ansteuerung nicht kurzgeschlossen wird (Motorbremse), sondern mit offenen Anschlüssen im Leerlauf drehen kann. Der blaue Verlauf zeigt die Spannung an den Motorklemmen. Während der Zeiten im Leerlauf ist die vom Motor generierte Spannung zu erkennen, die geringfügig unter der Spannung der Ansteuerung liegt.

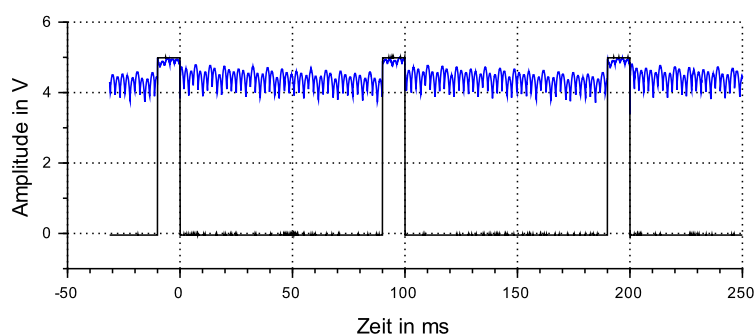


Abbildung 6: Messung der Motorspannung des lastfreien Motors LEGO 71427 beim Umschalten von 5 VDC auf offene Motorklemmen bei einer Frequenz des Rechtecksignals von 10 Hz und einem Duty Cycle von $DC = 10\%$ über einen Betrachtungszeitraum von ca. 300 ms - schwarz: ansteuerndes Rechtecksignal (0 V entspricht offenen Motorklemmen), blau: Spannung an den Motorklemmen

⁶PWM: Pulsweitenmodulation

Die Abbildung 7 zeigt eine zeitlich detailliertere Darstellung des Übergangs von „an“ zu „aus“ der Spannungsimpulse der PWM. Auffällig ist die gedämpfte Schwingungsform der Motorklemmenspannung, sobald die Versorgungsspannung getrennt wird und die Motorklemmen „in der Luft hängen“. Diese wird durch die Induktivität der Rotorwicklungen hervorgerufen. Aus den Grundlagen der Elektrotechnik ist bekannt, dass eine Spule das Bestreben hat, den von sich durchflossenen Strom beizubehalten. Sobald die Versorgungsspannung getrennt wird, fällt die extern angelegte Spannung sprunghaft ab und die Spule erzeugt eine Gegeninduktion in Form des negativen Spannungsimpulses, um den Motorstrom möglichst lange aufrecht zu erhalten.

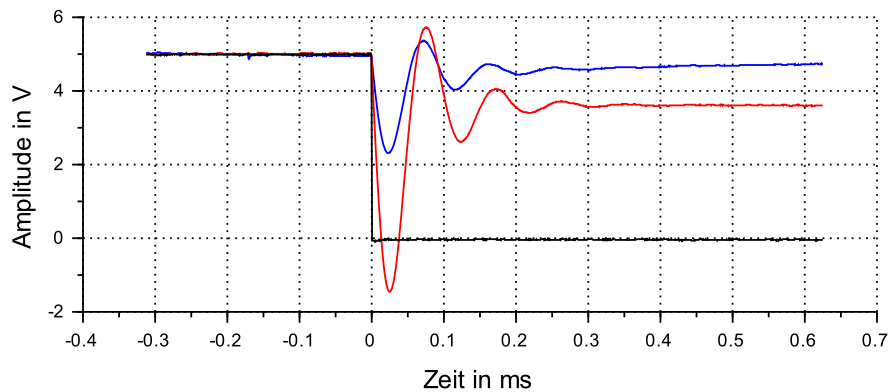


Abbildung 7: Messung der Motorspannung des Motors LEGO 71427 beim Umschalten von 5 VDC auf offene Motorklemmen bei einer Frequenz des Rechtecksignals von 10 Hz und einem Duty Cycle von $DC = 10\%$ über einen Betrachtungszeitraum von ca. 1 ms - schwarz: ansteuerndes Rechtecksignal (0 V entspricht offenen Motorklemmen), blau: Motorklemmenspannung lastfrei, rot: Motorklemmenspannung mit aufgebrachter Last

Bei belasteten Motoren steigt durch die Proportionalität zwischen Drehmoment und Motorstrom der Strom in den Rotorwicklungen und entsprechend stärker fällt die Gegeninduktion bei sprunghaft entfallender Klemmenspannung aus. Der Unterschied ist in Abbildung 7 exemplarisch dargestellt. Der blaue Verlauf entspricht dem lastfreien Zustand, der rote Verlauf zeigt die Klemmenspannung bei einer aufgebrachten Last. Die Last wurde händisch aufgebracht und kann aufgrund der kurzen Betrachtungsdauer von ca. 1 ms als konstant angenommen werden.

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Klemmenspannung einer Periodendauer der beiden Motoren von LEGO und Faulhaber bei lastfreiem Betrieb. Auffällig ist, dass die BEMF des Faulhaber-Motors bei identischer Ansteuerung niedriger ist. Dies liegt an konstruktiven Unterschieden der beiden Motoren. Der LEGO-Motor dreht bei glei-

cher Spannung zum einen schneller als der Faulhaber-Motor, zum Anderen ist auch die Reibung beim Faulhaber-Motor höher und reduziert damit die Ankerdrehzahl und die BEMF.

Das im Freilauf sichtbare Spannungsrippel resultiert aus der winkelabhängigen Umpolung der Rotorwicklungen durch den Kommutator des Elektromotors. Am höchsten Punkt der „Hügel“ wird die höchste Spannung induziert und die Leiterschleife der Rotorwicklungen steht optimal im Magnetfeld der Permanentmagneten. Eine maximale Induktion wird dann erzeugt, wenn die Leiterschleife im rechten Winkel zu den Magnetfeldlinien steht und der Geschwindigkeitsvektor des Leiters ebenfalls im rechten Winkel zu den Magnetfeldlinien und zur Leiterrichtung steht. Es gilt I_{max} bei $\vec{B} \perp \vec{l} \perp \vec{v}$.

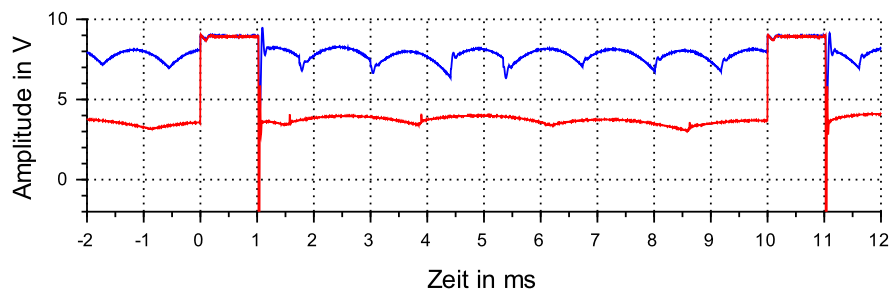


Abbildung 8: Verlauf der Klemmenspannung von zwei unterschiedlichen Elektromotoren im lastfreien Betrieb. Die Ansteuerung erfolgte mit einer PWM mit der Spannung 9 V, einer Frequenz von 100 Hz und einem Duty Cycle von $DC = 10\%$ (blau: LEGO 71427, rot: Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16)

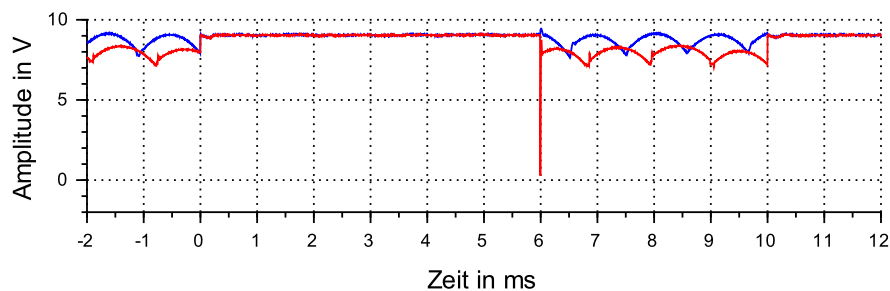


Abbildung 9: Verlauf der Klemmenspannung von zwei unterschiedlichen Elektromotoren im lastfreien Betrieb. Die Ansteuerung erfolgte mit einer PWM mit der Spannung 9 V, einer Frequenz von 100 Hz und einem Duty Cycle von $DC = 60\%$ (blau: LEGO 71427, rot: Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16)

Der Verlauf in Abbildung 10 zeigt in blau den Klemmenspannungsverlauf am LEGO-Motor und in rot den Spannungsverlauf am Faulhaber-Motor. Die Versorgungsspan-

nung der H-Brücke betrug 7 V und die Pulsweite war bei beiden Motoren identisch mit einem Duty Cycle von $DC = 10\%$ bei 100 Hz. Die Messungen wurden nicht lastfrei, sondern in der Pendelkonfiguration mit einer kleinen Masse von 5 g am Pendelende durchgeführt. Auf den ersten Blick scheinen die Spannungen einen sinusförmigen Verlauf zu haben. Bei genauer Betrachtung sind die Berge jedoch schmaler als die Täler. Zudem unterscheiden sich die beiden Signale in der Frequenz. Der LEGO-Motor mit dem blauen Verlauf dreht sich bei identischer Konfiguration schneller als der Faulhaber-Motor mit dem roten Verlauf. Analog dazu ist dies auch bei den vorherigen Abbildungen 8 und 9 sichtbar, da die BEMF des Faulhaber-Motors in der Off-Time unter der des LEGO-Motors liegt.

In den Tälern von Abbildung 10 ist die vom Motor generierte Spannung minimal und die Motorwelle dreht langsam. In diesen Momenten steht das Pendel aufrecht (entsprechend Abbildung 10b (1)). Zu den Zeitpunkten der Maxima bewegt sich das Pendel mit maximaler Geschwindigkeit in der vertikal hängenden Position (entsprechend Abbildung 10b (2)).

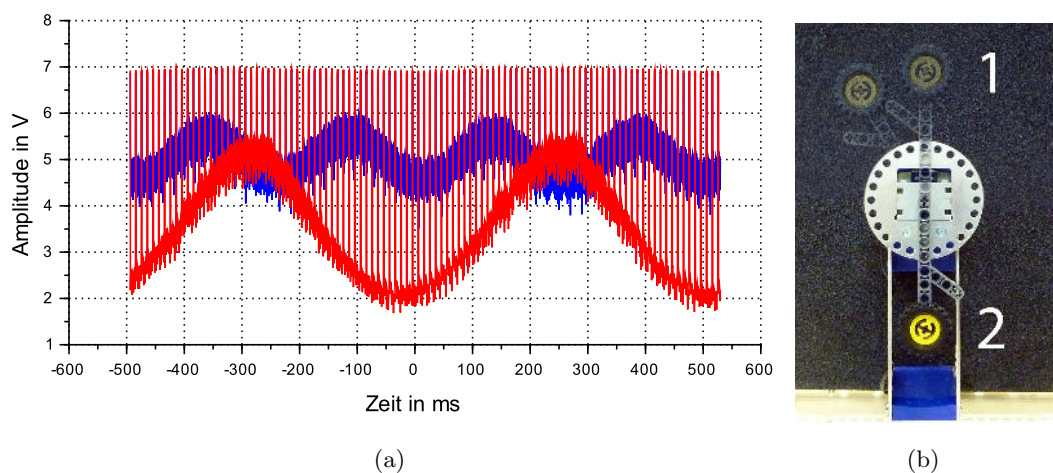


Abbildung 10: Spannungsverlauf an den Motorklemmen bei konstanter Ansteuerung eines physikalischen Pendels mittels PWM (7 V, 100 Hz, 10%) (blau: LEGO 71427, rot: Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16)

Da im Rahmen dieser Arbeit kleine Drehzahlen und Positionen bestimmt werden müssen, wurden folgend Versuche mit blockierter Motorwelle und extern induzierten Drehmomenten mit und entgegen der angesteuerten Drehrichtung durchgeführt. Die extern aufgebrachte Bewegung ist deutlich kleiner als die Drehgeschwindigkeit durch die Ansteuerung im lastfreien Betrieb. Die Ergebnisse sind der Abbildung 11 zu entnehmen.

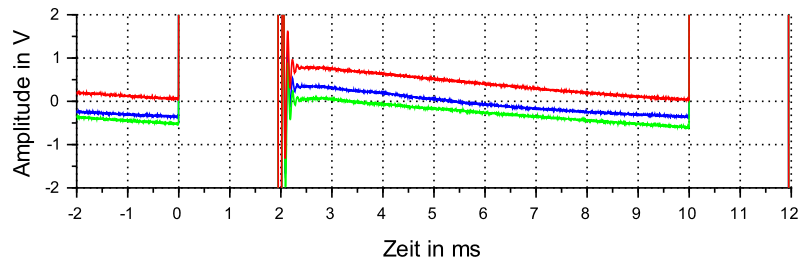
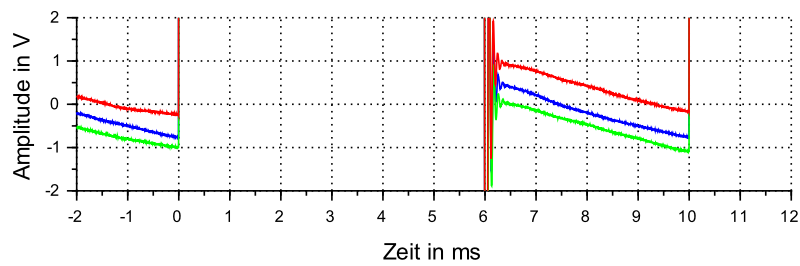
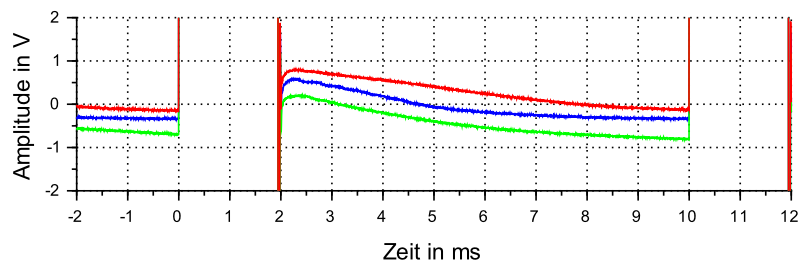
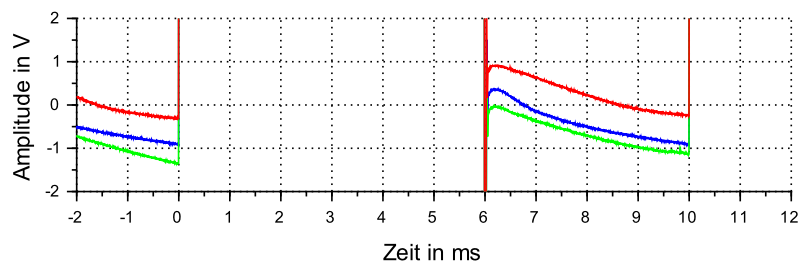
(a) LEGO 71427, angesteuert mittels PWM mit einem Duty Cycle von $DC = 20\%$ (b) LEGO 71427, angesteuert mittels PWM mit einem Duty Cycle von $DC = 60\%$ (c) Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16, angesteuert mittels PWM mit einem Duty Cycle von $DC = 20\%$ (d) Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16, angesteuert mittels PWM mit einem Duty Cycle von $DC = 60\%$

Abbildung 11: Messung der Klemmenspannung der Motoren LEGO 71427 und Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16, angesteuert mittels PWM bei 7 V und 100 Hz (blau: Blockierte Motorwelle, rot: Bewegung der Motorwelle mit dem Motordrehmoment, grün: Bewegung der Motorwelle gegen das Motordrehmoment)

Am Beispiel des LEGO-Motors zeigt der blaue Spannungsverlauf in Abbildung 11a die Motorklemmenspannung bei blockierter Motorwelle. Die induzierte Spannung geht vom positiven Bereich ($2 \text{ ms} \leq t \leq 5 \text{ ms}$) in den negativen Bereich ($5 \text{ ms} < t \leq 10 \text{ ms}$) über.

Bei einer langsamen Bewegung mit dem Motordrehmoment ist die Kurve ins Positive verschoben (rot), bei einer Bewegung gegen das Motormoment ist sie ins Negative verschoben (grün). Die Verschiebung resultiert aus dem blauen Verlauf der BEMF bei blockierter Motorwelle und der überlagerten BEMF durch die extern aufgebrachte Rotation.

Eine langsame Bewegung bedeutet in diesem Fall eine händisch aufgebrachte Drehzahl von ca. $0,1 \frac{1}{\text{s}} = 6 \frac{1}{\text{min}}$.

4.3 Freiheitsgrade mechanischer Systeme

Mechanische Systeme werden unter anderem durch den Freiheitsgrad F beschrieben. Üblich ist die Abkürzung DOF^7 oder auch der Begriff der Mobilität M . Der Freiheitsgrad ist äquivalent zu der Anzahl an unabhängigen Parametern, die notwendig sind, um die Konfiguration des mechanischen Systems eindeutig beschreiben zu können. Ist der Freiheitsgrad $F = 1$, so wird das Getriebe als *zwangsläufig* bezeichnet, da bei einer Bewegung eines Gliedes die anderen Glieder zwangsläufig folgen müssen [10]. Ein Körper, den man beliebig in einem Raum hält, hat sechs Freiheitsgrade und somit sechs Parameter, die zur eindeutigen Positionsdefinition notwendig sind. Genauer gesagt sind es drei translatorische Parameter, die die Position im Raum beschreiben und drei rotatorische Parameter, die den genauen Winkel im Bezug zu den drei translatorischen Achsen im Raum beschreiben.

Einfacher ist die Bestimmung der Freiheitsgrade von ebenen Systemen. Dort existieren maximal drei Freiheitsgrade. Zwei translatorische Achsen und die Rotation um die Hochachse. Ein Beispiel eines ebenen Systems zeigt Abbildung 12. Zur Bestimmung der Freiheitsgrade gilt für dieses Beispiel die Annahme, dass der rote Körper nicht von der grauen Grundfläche abgehoben bzw. getrennt werden kann. In Getrieben kann die Bewegung aufgrund von Gelenken eingeschränkt werden und der Freiheitsgrad des Systems mit einem oder mehreren Gelenken muss gesamtheitlich bestimmt werden.

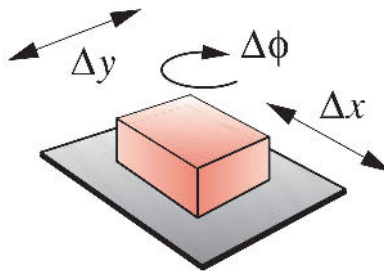


Abbildung 12: Ein Körper, der frei auf einer Ebene bewegt werden kann, hat 3 DOF. Abbildung entnommen aus [24].

Sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Analyse von Mechanismen sind die Freiheitsgrade ein fundamentaler Parameter der Systembeschreibung. Die Gleichung nach Grübler ermöglicht die systematische Bestimmung des Freiheitsgrades eines mechanischen Systems.

⁷DOF: degrees of freedom

Grübler's Gleichung⁸ lautet [37] [20]:

$$F = T(n - 1 - g) + \sum_{i=1}^g b_i \quad (25)$$

Dabei gilt:

F : Freiheitsgrad ($F \in \mathbb{Z}$)

T : Typ des Getriebes

($T = 6$ für ein räumliches Getriebe,

$T = 3$ für ein sphärisches oder ebenes Getriebe)

n : Anzahl der Getriebeglieder

g : Anzahl der Gelenke

b_i : Beweglichkeit eines einzelnen Gelenks i ($1 \leq b_i \leq 6$)

Am Beispiel des Viergelenkgetriebes als ebenes Getriebe ($T = 3$) mit $n = 4$ Getriebegliedern, $g = 4$ Gelenken und der rein ebenen rotatorischen Beweglichkeit eines jeden Gelenkes $b_{1-4} = 1$ ergibt sich anhand der Formel 25 ein Gesamtfreiheitsgrad des Systems von $F = 1$. Das Koppelgetriebe ist somit zwangsgeführt.

$$F = 3 \cdot (4 - 1 - 4) + 4 \cdot 1 = 1 \quad (26)$$

Ist $F > 0$ handelt es sich um einen Mechanismus, bei dem die Glieder relative Bewegungen durchführen können (Abbildung 13a). Ist $F = 0$ beschreibt es eine Struktur, die keine Bewegung ermöglicht (Abbildung 13b). Bei $F < 0$ ist die Struktur vorgespannt (Abbildung 13c). Vorspannt bedeutet, dass ein Glied zum Zeitpunkt der Montage unter mechanische Spannung gesetzt wurde.

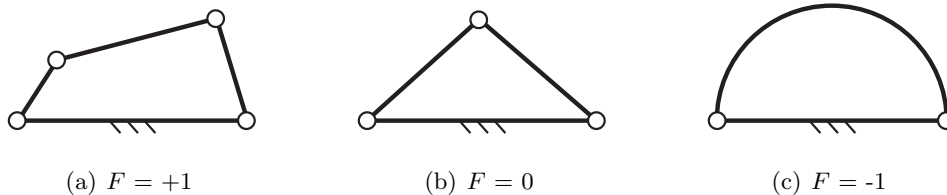


Abbildung 13: Exemplarische Koppelgetriebe mit unterschiedlichen Freiheitsgraden.

Da die Grübler-Gleichung Gliederlängen und -formen nicht berücksichtigt, kann es zu fehlerhaften Berechnungen der DOF kommen. In diesen Fällen sind Sonderbe-

⁸auch Grübler-Kutzbach Kriterium genannt

dingungen zu beachten. Für den interessierten Leser sei auf weitere Literatur, wie zum Beispiel [24], verwiesen.

4.4 Viergelenkgetriebe

Das einfachste Koppelgetriebe mit einem Freiheitsgrad (1 DOF) ist das Viergelenkgetriebe, welches folgend mit 4BL⁹ abgekürzt wird [24]. Ohne dessen Namen zu nennen, wurde es bereits in Abbildung 13a eingesetzt.

Koppelgetriebe in Form der 4BL sind universell einsetzbar und somit die am meisten eingesetzten Getriebe in Maschinen [24]. Oft sind sie in Variationen verbaut, die erst auf den zweiten Blick als solche zu erkennen sind. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 14. Es handelt sich dabei um eine Nockenscheibe und einem Arm, welcher der Nockenkontur folgt. Unter der Annahme, dass Element 1 und 2 nicht getrennt werden (zum Beispiel durch die Schwerkraft), zeigt der rechte Teil mit den schematisch eingezeichneten Gliedern, dass es sich auch in diesem Fall um ein viergliedriges Koppelgetriebe mit variabler Koppellänge handelt.

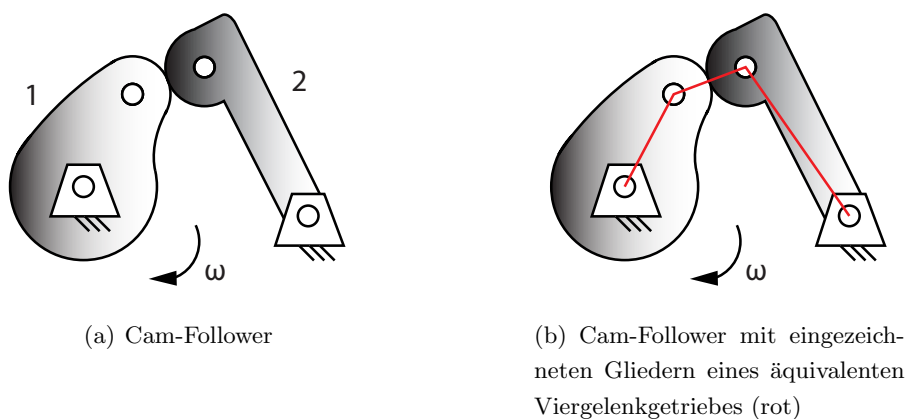


Abbildung 14: Der Cam-Follower ist eigentlich ein Kurvengetriebe, bildet jedoch auch ein Äquivalent zum Viergelenkgetriebe.

Eine 4BL besteht aus vier Gliedern (engl.: links) und vier Gelenken (engl.: joints). In der Regel sind diese das Gestell, zwei Schenkel und eine Koppel, die die Schenkel miteinander verbindet (Vgl. Abbildung 13a).

⁹4BL: four-bar linkage

Grashof-Bedingung

Die Grashof-Bedingung beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Rotationsverhalten und den Gliedlängen einer 4BL.

Ist die Grashof-Bedingung erfüllt, kann sich mindestens ein Glied umlaufend drehen.

Die Grashof-Bedingung ist nach [9] wie folgt definiert:

$$S + L \leq P + Q \quad (27)$$

Dabei gilt:

- S : Länge des kürzesten Gliedes
- L : Länge des längsten Gliedes
- P, Q : Länge der übrigen Glieder

In Worten gilt, dass die Grashof-Bedingung erfüllt ist, wenn die Summe der Längen des kürzesten und längsten Gliedes kleiner oder gleich der Summe der Längen der übrigen beiden Glieder ist.

Barker [2] hat die Möglichkeiten der Konfiguration einer 4BL in drei Klassen eingeteilt. Sie werden in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Barkers Einteilung der 4BL-Konfigurationen in drei Klassen. Die Einteilung erfolgt anhand der Gliedlängen.

Klasse I	$S + L < P + Q$	Grashof-Bedingung erfüllt
Klasse II	$S + L > P + Q$	Grashof-Bedingung nicht erfüllt
Klasse III	$S + L = P + Q$	Grashof-Bedingung erfüllt - Spezialfälle

Als Kurzbeschreibung der Konfigurationen hat Barker [2] folgende Kürzel eingeführt:

- G (grashof): Dieser Präfix zeigt, dass die Konfiguration die Grashof-Bedingung erfüllt.
- R (rocker): Glied, welches keine volle Umdrehung durchführen kann (Schwinge).
- C (crank): Glied, welches eine volle Umdrehung durchführen kann (Kurbel).
- S (special-case): Sonderfall mit mindestens einem Umkehrpunkt (Singularität).

Folgend werden die drei Klassen an einem einfachen Beispiel illustriert.

Viergelenkgetriebe der Klasse I

Die Längen der Glieder erfüllen die Grashof Bedingung und mindestens ein Glied kann vollständig rotieren.

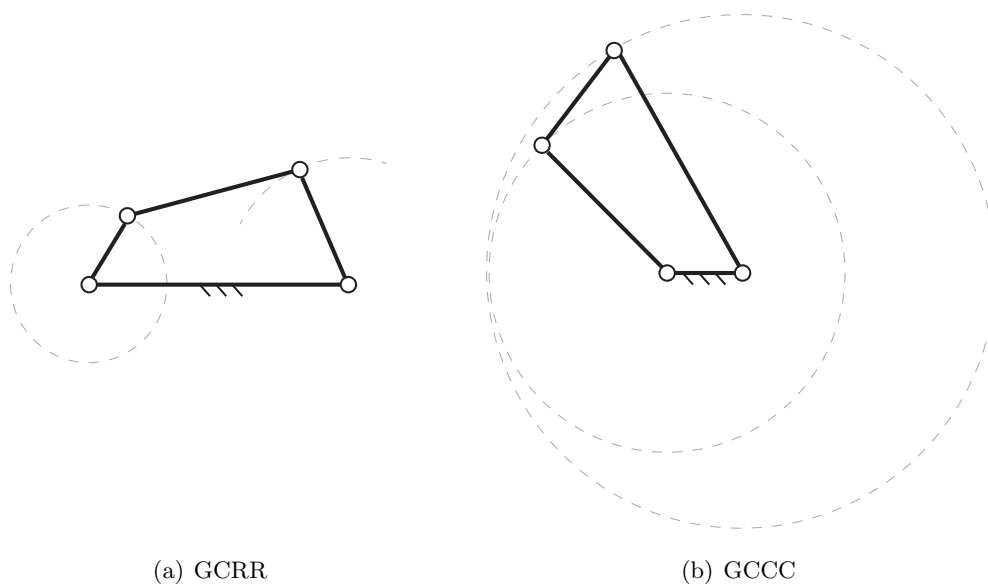


Abbildung 15: Exemplarische Darstellung zweier Viergelenkgetriebe der Klasse I mit der Notation nach Barker.

Viergelenkgetriebe der Klasse II

Bei einer Konfiguration nach Klasse II kann keines der Glieder umlaufen.

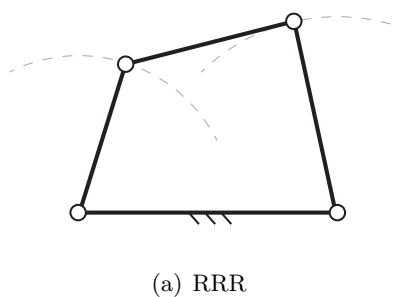


Abbildung 16: Exemplarische Darstellung eines Viergelenkgetriebes der Klasse II mit der Notation nach Barker.

Viergelenkgetriebe der Klasse III

Die Klasse III beinhaltet die nach Barker [2] sogenannten Spezialfälle, denn bei ihnen treten Singularitäten in der Bewegung auf. Singularitäten sind bestimmte Positionen, in denen die Bewegungsform zum Beispiel von der Parallelkurbel in die Antiparallelkurbel umschlägt. Nach Grübler handelt es sich in diesem Fall um ein „durchschlagendes Gelenkviereck“ ([10], S.71).

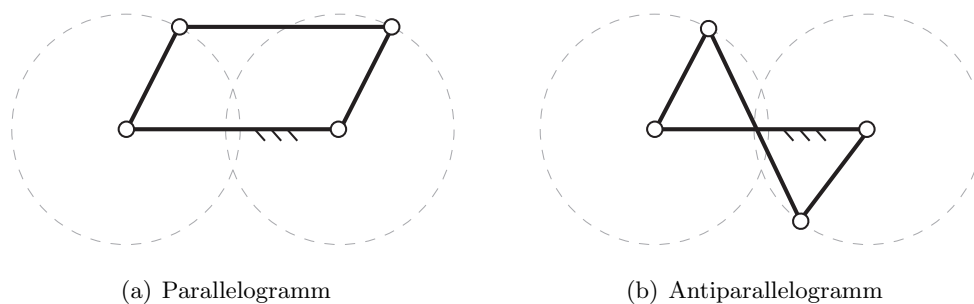


Abbildung 17: Exemplarische Darstellung zweier Viergelenkgetriebe der Klasse III.

Tabelle 2 zeigt alle 14 Konfigurationsmöglichkeiten eines ebenen Viergelenkgetriebes.

Tabelle 2: Barkers vollständige Klassifikation eines ebenen Viergelenkgetriebes. Entnommen aus [24], entspricht dem Original aus [2].

Type	$s + l$ vs. $p + q$	Inversion	Class	Barker's Designation	Code	Also Known As
1	<	$L_1 = s = \text{ground}$	I-1	Grashof crank-crank-crank	GCCC	double-crank
2	<	$L_2 = s = \text{input}$	I-2	Grashof crank-rocker-rocker	GCRR	crank-rocker
3	<	$L_3 = s = \text{coupler}$	I-3	Grashof rocker-crank-rocker	GRCR	double-rocker
4	<	$L_4 = s = \text{output}$	I-4	Grashof rocker-rocker-crank	GRRC	rocker-crank
5	>	$L_1 = l = \text{ground}$	II-1	Class 1 rocker-rocker-rocker	RRR1	triple-rocker
6	>	$L_2 = l = \text{input}$	II-2	Class 2 rocker-rocker-rocker	RRR2	triple-rocker
7	>	$L_3 = l = \text{coupler}$	II-3	Class 3 rocker-rocker-rocker	RRR3	triple-rocker
8	>	$L_4 = l = \text{output}$	II-4	Class 4 rocker-rocker-rocker	RRR4	triple-rocker
9	=	$L_1 = s = \text{ground}$	III-1	change point crank-crank-crank	SCCC	SC [*] double-crank
10	=	$L_2 = s = \text{input}$	III-2	change point crank-rocker-rocker	SCRr	SC crank-rocker
11	=	$L_3 = s = \text{coupler}$	III-3	change point rocker-crank-rocker	SRcR	SC double-rocker
12	=	$L_4 = s = \text{output}$	III-4	change point rocker-rocker-crank	SRrC	SC rocker-crank
13	=	two equal pairs	III-5	double change point	S2X	parallelogram or deltoid
14	=	$L_1 = L_2 = L_3 = L_4$	III-6	triple change point	S3X	square

* SC = special case.

4.5 Regelungsmechanismen

Regelungsmechanismen dienen der kontrollierten Steuerung von Systemen. Der wohl einfachste Regler ist der Zweipunktregler, auch bang-bang controller oder hysteresis controller genannt. Dieser wird typischerweise zur Temperaturregelung eingesetzt, indem die Heizung bei der Temperatur T_1 eingeschaltet und bei der Temperatur T_2 wieder ausgeschaltet wird. Dabei gilt $T_1 < T_2$ mit einer Hysterese $\Delta T = T_2 - T_1$. Bei komplexeren Systemen, die sich nicht wie das vorherige Beispiel auf die binären Zustände „An“ und „Aus“ beschränken lassen, sind anspruchsvollere Regelungsmechanismen notwendig. Die Anwendungen sind vielfältig. Als Beispiele sind hier die Regelung von Drehzahlen, Geschwindigkeiten, Positionen, Temperaturen, Spannungen, Strömen und viele mehr zu nennen. Hinzu kommt, dass jedes System seine spezifischen Verhaltensweisen wie Massen, Trägheiten, schwingungsfähige Komponenten, Verluste und Leistungen trägt, die vom Regelungsmechanismus berücksichtigt oder kompensiert werden müssen.

4.5.1 Regelung oder Steuerung

Generell gilt es, zwischen steuernden und regelnden Verfahren zu unterscheiden. Eine Steuerung ist eine Möglichkeit, einem System eine Führungsgröße $u(t)$ zu geben, ohne diese zu kontrollieren. Anwendung für eine Steuerung ist zum Beispiel ein einfacher Lichtschalter oder der temperaturabhängige Schwellenschalter eines Wasserkochers.

Die folgende Abbildung zeigt ein universelles Blockdiagramm einer Steuerung. Die Ausgangsgröße $y(t)$ wird der Steuereinheit nicht zurückgeführt.

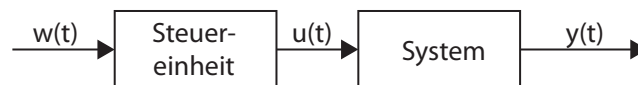


Abbildung 18: Allgemeines Blockdiagramm einer Steuerung. Eine Störgröße $z(t)$ ist nicht eingezeichnet. Die Bezeichnungen an den Pfeilen sind die Variablennamen der jeweiligen Größe. Die Pfeile zeigen die Signalflossrichtung.

Dies unterscheidet die Steuerung von der Regelung. Eine Regelung erhält durch eine Rückkopplung ein Feedback von der zu regelnden Größe. Dieser Istwert $r(t)$ wird vom Sollwert $w(t)$ subtrahiert und das Ergebnis $e(t)$ bildet die Regeldifferenz.

$$\text{Regeldifferenz } e(t) = \text{Sollwert } w(t) - \text{Istwert } r(t) \quad (28)$$

Ein klassischer Regler ist bestrebt diese Regeldifferenz gegen Null zu regeln. Die

folgende Abbildung zeigt ein universelles Blockdiagramm eines Reglers.

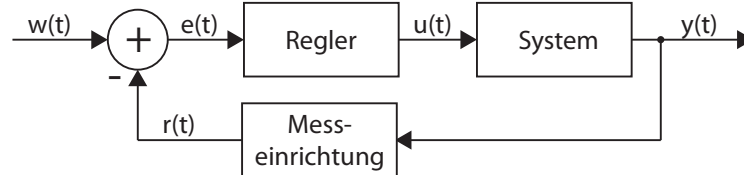


Abbildung 19: Allgemeines Blockdiagramm einer Regelung. Eine Störgröße $z(t)$ ist nicht eingezeichnet. Die Bezeichnungen an den Pfeilen sind die Variablennamen der jeweiligen Größe. Die Pfeile zeigen die Signalfussrichtung.

Eine Schwachstelle vieler Regler ist die Wahl der Regelparameter. Häufig können Parameter nur auf einen festen Arbeitspunkt optimiert werden und benötigen für gute Ergebnisse außerhalb des einen Arbeitspunktes andere Regelparameter. Eine adaptive Regelung berücksichtigt genau diesen Fall, indem sie die Regelparameter adaptiv an die veränderlichen Bedingungen anpasst.

Begriffsdefinitionen

Die Bezeichnungen der einzelnen Größen sind nicht eindeutig definiert. Jedoch werden in dieser Arbeit die folgenden, in der Literatur gängigen Bezeichnungen verwendet.

- $w(t)$ Führungsgröße / Eingangsgröße
- $e(t)$ Regeldifferenz
- $u(t)$ Reglerausgangsgröße / Stellgröße
- $z(t)$ Störgröße
- $y(t)$ Regelgröße / Ausgangsgröße
- $r(t)$ Rückführungsgröße

4.5.2 PID-Regler

Ein PID-Regler ist eine von vielen Varianten einen Regler aufzubauen. Der PID-Regler besteht aus drei Anteilen: einem proportionalen (P), einem integrierenden (I) und einem differentiellen (D) Anteil. Neben einem PID-Regler sind auch Kombinationen aus P-, PI- oder PD-Regler möglich. Je nach Aufgabe ist die optimale Struktur auszuwählen. Das Konstrukt des PID-Reglers, bzw. seiner Teilstrukturen, ist eine der bekanntesten Reglerstrukturen und liefert für viele Regelungsaufgaben sehr gute Resultate.

4.6 Dynamische Systeme

Ein dynamisches System ist eine Funktionseinheit, die durch ihre Signalein- und -ausgänge in einer Wechselwirkung mit der Umwelt steht. Es ist eine Möglichkeit, Verhaltensweisen von Robotern beziehungsweise mechatronischen Systemen zu beschreiben und zu analysieren. Dazu wird das System mithilfe von mathematischen Modellen beschrieben. Anhand des dynamischen Systems lässt sich für gegebene Eingangssignale der Verlauf der Ausgangssignale von einem bestimmten Zeitpunkt $t = t_0 = 0$ an für $t > t_0$ bestimmen. Ein technisches dynamisches System hat zudem einen oder mehrere Energiespeicher, die Anfangswerte enthalten können. Bei mehreren verteilten Energiespeichern werden diese häufig zur Vereinfachung zu einem konzentrierten Energiespeicher zusammengefasst. Das zeitliche Verhalten wird im Wesentlichen durch die Energiespeicher bestimmt und kann sich somit nicht sprunghaft ändern. Im Vergleich zu dynamischen Systemen haben statische Systeme keine oder verschwindend kleine Energiespeicher und damit auch kein Zeitverhalten.

Allgemein können dynamische Systeme kontinuierlich oder zeitdiskret betrachtet werden. Die in dieser Arbeit eingesetzte Hardware ist, wie jedes reale System, ein kontinuierliches dynamisches System. Der Regler wird auf einem FPGA implementiert und ist somit zeitdiskret.

Die weitere mathematische Beschreibung erfolgt für ein zeitdiskretes dynamisches System.

Die zeitliche Entwicklung wird durch die Zustandsgröße x in einem Zustandsraum (auch Phasenraum genannt) $M \subseteq \mathbb{R}^n$ beschrieben. Es gilt $x \in M$.

$$x_{n+1} = f(x_n) \quad (n \in \mathbb{Z}) \quad (29)$$

Im Folgenden werden die wichtigsten Begriffe im Zusammenhang mit dynamischen Systemen in Form eines Glossars erläutert. Für tiefergehende Informationen sei auf [35] und [31] verwiesen.

Phasenraum

Der Phasenraum M beschreibt die Menge aller möglichen Zustände eines physikalischen Systems. Der Zustand wird in jedem Punkt des Phasenraums eindeutig beschrieben und ermöglicht Aussagen über das zukünftige Verhalten des Systems.

Trajektorie

Eine Trajektorie ist eine Raumkurve, entlang der sich ein Punkt im Laufe der Zeit bewegt. Die Ansammlung aller Trajektorien eines dynamischen Systems ergibt dessen

Phasenportrait. Die Menge aller Punkte, die von einem bestimmten Anfangspunkt aus die zeitliche Entwicklung des Systems bestimmen, heißt Trajektorie.

Attraktor

Attraktoren sind Bereiche, auf die sich dynamische Systeme im Laufe der Zeit zubewegen. Generell ist jeder Attraktor im Phasenraum umgeben von einem Bassin (Becken), in dem das System zum Attraktor gelangt. Jede Störbewegung des Systems führt innerhalb des Bassins wieder zurück zum Attraktor.

Es gibt Punkt-Attraktoren (auch stabile Fixpunkte genannt), stabile periodische bzw. quasiperiodische Orbits und chaotische Attraktoren. Ein Beispiel für einen stabilen Fixpunkt ist die Ruhelage eines hängenden Pendels.

Repellor

Ein Repellor entspricht dem Gegenteil des Attraktors und wird daher auch als negativer Attraktor beziehungsweise instabiler Fixpunkt bezeichnet. Wird ein System im Repellor gestört, verlässt es diesen und führt nicht dahin zurück. Dies gilt zum Beispiel für ein reibungsfreies aufrecht stehendes Pendel.

Bassin

Ein Bassin B_A ist eine Menge von Punkten, die einen Attraktor A umgeben und das System für $t \rightarrow \infty$ zu diesem Attraktor A führen.

Separatrix

Separatrizen sind die Grenzen zwischen Bassins.

Bifurkation

Eine Bifurkation ist eine qualitative Änderung der Attraktoren des Systems, infolge der Änderung eines Systemparameters. Insofern die Attraktoren verschwinden, sich verknüpfen oder neue Attraktoren auftauchen, wird diese Änderung Bifurkation genannt. Der Parameterwert, bei dem die Änderung auftritt, wird als Bifurkationspunkt bezeichnet.

4.7 Sensomotorische Schleife

Im Allgemeinen ist die Sensomotorik ein Begriff für das Zusammenspiel aus sensorischen und motorischen Aktionen. Dabei steht das motorische Verhalten von Lebewesen im direkten Zusammenhang mit der Wahrnehmung der Sinnesorgane.

Eine sensomotorische Schleife (engl.: sensorimotor loop) beschreibt das Zusammenwirken von sensorischen Größen und einer Aktorik, wobei die Verknüpfung durch eine Regelung erfolgen kann. Technisch ausgedrückt bezeichnet sie eine Rückkopplung von Sensorwerten auf die Motoransteuerung.

Folgend ein Beispiel eines einfachen fahrenden Roboters mit zwei Rädern und einem Distanzsensor (nach [5]). Es gilt der Sensorvektor

$$x = (v_l, v_r, s_1, \dots, s_k)^T \quad (30)$$

wobei v_l die Drehzahl des linken Rads, v_r die Drehzahl des rechten Rades und s_i die Werte der Distanzsensoren beschreibt. Die Drehzahlsensoren sind ein Beispiel für propriozeptive Sensoren, die Lage und Bewegung im Raum durch die eigene Körperwahrnehmung beschreiben. Die Distanzmessung hingegen ergibt exterozeptive Werte, die Größen und Reize von außen beschreiben [5].

Aufgrund der Morphologie des Roboters wirkt sich die Aktion der Aktoren auf die Umwelt aus und die Sensordaten erfahren eine Änderung. Im Beispiel des fahrenden Roboters führt beispielsweise eine Verringerung der Distanzwerte dazu, dass die Regelung die Raddrehzahlen reduziert. Dies wirkt sich auf die Bewegung des Roboters aus und führt zu veränderten Sensorwerten. Diese Rückkopplung wird sich in der Regel unendlich weiterführen.

Cognitive Sensorimotor Loop (CSL)

Die Cognitive Sensorimotor Loop (CSL) ist eine am Forschungslabor Neurorobotik entwickelte sensomotorische Schleife, die trotz ihrer sehr schlichten Struktur bereits Verhaltensweisen aufweist, die als kognitive Fähigkeiten gelten.

Abbildung 20 zeigt schematisch den Aufbau der CSL.

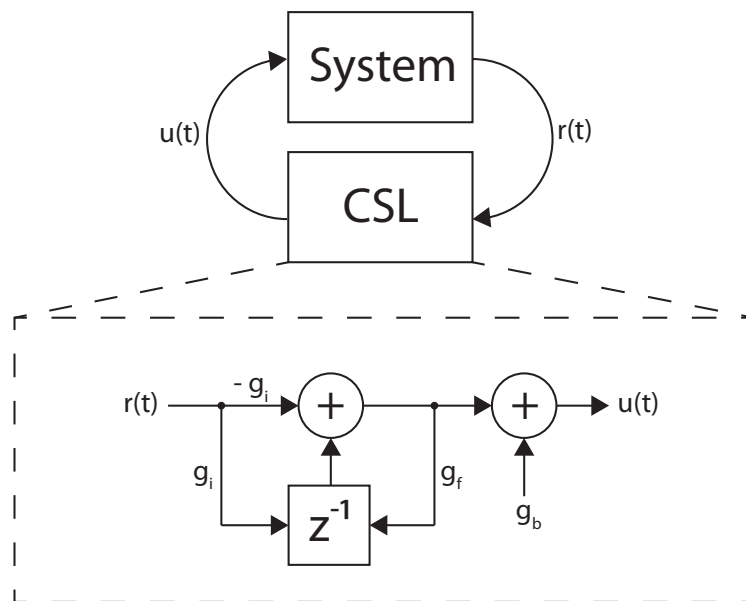


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Cognitive Sensorimotor Loop (CSL) des Forschungslabors Neurorobotik. Die Größen an den Pfeilenden sind Eingangs- bzw. Ausgangswerte. Die Größen g_i und g_f neben den Pfeilen sind Faktoren.

Der Aufbau ist grob in drei Elemente aufgeteilt. Einem eingangsseitigen Differentiator, einem Integrator und einem Bias auf dem Ausgangswert des Integrators. Auf den ersten Blick lassen sich Parallelen zu dem aus Kapitel 4.5.2 bekannten PID-Regler mit dem Differential-, Integral- und Proportional-Anteil vermuten. Diese bestätigen sich bei genauer Betrachtung jedoch nicht. Der entscheidende Unterschied liegt darin, dass der PID-Regler anhand der Führungsgröße $w(t)$ eine Regeldifferenz $e(t)$ zwischen Führungsgröße und Rückführgröße $r(t)$ berechnet, mit dem Ziel, diese zu eliminieren.

Eine Führungsgröße $w(t)$ existiert bei der CSL nicht. Das System hat einen Eingang, den Winkel als Sensorqualität $r(t)$ und einen Ausgang als Stellgröße $u(t)$. Das Verhalten wird maßgeblich von den drei Parametern g_i , g_f und g_b bestimmt.

Vier grundlegende Paradigmen sind der Release-, Contraction-, Hold- und der Support-Modus.

Tabelle 3: Übersicht der vier CSL-Paradigmen Release-, Contraction-, Hold- und der Support-Modus, bezogen auf die Parameter g_i und g_f

Release	Contraction	Hold	Support
$g_i > 0$	$g_i > 0$	$g_i > 0$	$g_i < 0$
$0 \leq g_f < 1$	$g_f > 1$	$g_f = 1$	$g_f = 0$

Tabelle 4: Beschreibung der vier CSL-Paradigmen Release-, Contraction-, Hold- und Support-Modus

CSL-Modus	Beschreibung
Release	Der Release-Modus erlaubt beliebige Bewegungen, bremst jedoch schnelle extern induzierte Bewegungen aus.
Contraction	In diesem Modus treibt das CSL den Aktor solange entgegen der vorherrschenden Winkelgeschwindigkeit an, bis diese Null wird.
Hold	Der Hold-Modus hält den Aktor an seiner aktuellen Position.
Support	Der Support-Modus unterstützt eine extern induzierte Bewegung durch zusätzliche Energiezufuhr.

Welches Paradigma die CSL ausführt, wird durch die Wahl der Parameter g_i und g_f bestimmt. Der Bias g_b dient dazu, den Algorithmus vorzuspannen. Am Beispiel eines physikalischen Pendels ist beim Umschalten vom Release- in den Contraction-Modus unklar, in welche der beiden möglichen Richtungen sich das Pendel aufrichtet. Wird das Pendel im Release-Modus durch einen Bias g_b vorgespannt, ist die Richtung des Contraction-Modus eindeutig.

Je nach Sensorqualität kann der Aufbau des Algorithmus variieren. Ist die Sensorgröße kein Winkel, sondern eine Winkelgeschwindigkeit, muss der Differentiator entfallen.

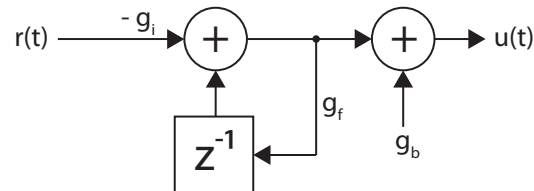


Abbildung 21: Schematische Darstellung der reduzierten Cognitive Sensorimotor Loop des Forschungslabors Neurorobotik. Ist die Messgröße eine Winkelgeschwindigkeit, entfällt der Differentiator. Die Größen an den Pfeilenden sind Eingangs- bzw. Ausgangswerte. Die Größen g_i und g_f neben den Pfeilen sind Faktoren.

Dies gilt zum Beispiel bei Messungen über die BEMF des Motors. Die induzierte Spannung ist proportional zur Motordrehzahl und macht somit den Einsatz des Differentiators überflüssig.

Neben den vier erläuterten CSL-Paradigmen wurden noch weitere im Forschungslabor Neurorobotik der Beuth Hochschule für Technik Berlin entwickelt. Zu nennen sind die Verfahren „kick-fly-catch“ [36], „ramp-catch“ [36] sowie die Verfahren aus [19] und [22].

5 Testaufbau

Zur Entwicklung des Regelungsmechanismus wurde ein Teststand entwickelt, der es ermöglicht, durch flexible Aufbauvarianten unterschiedliche Versuche durchzuführen. Die Elektronik basiert auf dem „ZYBO“, einem Entwicklungsboard des Herstellers Digilent, welches unter anderem einen Artix-7-FPGA zur Verfügung stellt. Dieses wird durch eigene Peripheriemodule ergänzt. Die Auswahl eines Elektromotors erfolgte anhand von Messreihen aus acht verschiedenen DC-Getriebemotoren.

5.1 Motorauswahl

Der Markt bietet unzählige viele Elektromotoren mit den unterschiedlichsten Ansteuerungsarten und Charakteristiken. Für diesen Teststand war ein DC-Getriebemotor gefordert, da sich dieser mit lediglich zwei Anschlussleitungen und ohne aufwendige Elektronik ansteuern lässt.

Im Rahmen der Motorauswahl war es nötig, zusätzlich zu den Herstellerangaben weitere Werte durch Messungen zu ermitteln. Insbesondere für langsame Bewegungen ist es wichtig, einen Motor auszuwählen, dessen Übergang von der Haft- zur Gleitreibung im Anlaufmoment minimal ist, um ein sanftes Anlaufen zu ermöglichen und den Stick-Slip-Effekt zu minimieren.

Für diese Messungen wurden nach einer Internetrecherche zu DC-Getriebekleinstmotoren acht verschiedene DC-Getriebemotoren bestellt und getestet. Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht der Motoren.

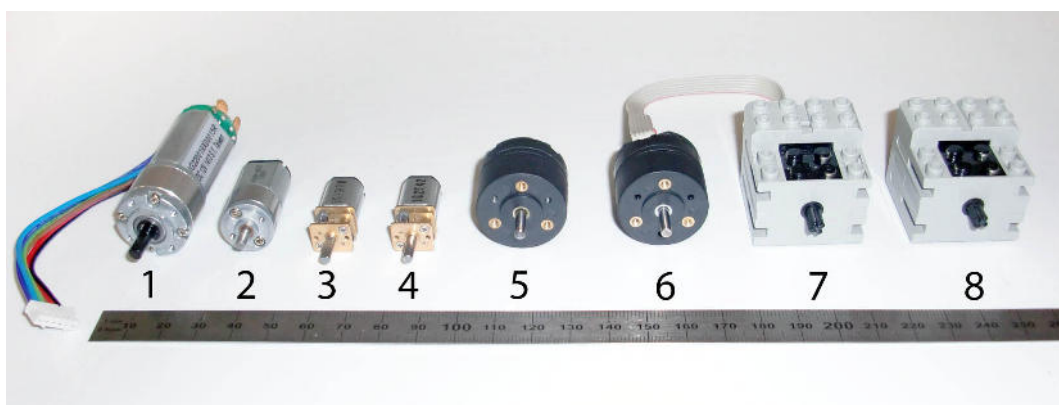


Abbildung 22: Übersicht über die acht getesteten Motoren für den Teststand. Als Größenreferenz ist ein metrisches Stahlmaß abgebildet; 1: Digilent 290-006P, 2: Sparkfun ROB-12007, 3: Pololu 1098, 4: Pololu 993, 5: Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16, 6: Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16 (mit Encodereinheit), 7: LEGO 43362, 8: LEGO 71427

Die Tabelle 5 führt die technischen Parameter der acht getesteten Motoren auf. Als Bezeichnung ist der Motorhersteller genannt. Ist dieser unbekannt, wird der Lieferant aufgeführt.

Tabelle 5: Technische Angaben der acht getesteten Motoren für den Teststand. Die mit * gekennzeichneten Werte sind selbst ermittelt worden.

Nr.	Bezeichnung	Getriebe- übersetzung	Leerlaufdrehzahl (Abtriebswelle)	Leerlauf- strom
1	Digilent 290-006P [6]	19:1	421 rpm bei 12 V	70 mA bei 12 V
2	Sparkfun ROB-12007 [30]	25:1	438 rpm bei 6 V	44 mA bei 6 V
3	Pololu 1098 [26]	51,45:1	250 rpm bei 6 V	360 mA bei 6 V
4	Pololu 993 [27]	29,86:1	440 rpm bei 6 V	360 mA bei 6 V
5	Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16 [7]	22:1	314 rpm bei 12 V	8 mA * bei 12 V
6	Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16 (mit Encodereinheit) [7]	22:1	314 rpm bei 12 V	20 mA * bei 12 V
7	LEGO 43362 [14]	14:1 [15]	340 rpm bei 9 V	9 mA * bei 9 V
8	LEGO 71427 [14]	13,2583:1 [1]	360 rpm bei 9 V	3,5 mA * bei 9 V

Bei den hier getesteten Motoren handelt es sich um Kleinmotoren mit Gleichstromspeisung, bei denen das Erregerfeld von Permanentmagneten erzeugt wird. Insbesondere die Motoren 1 bis 4 mit sogenannten T-Ankern sind günstig herzustellen, haben jedoch einige Nachteile im Vergleich zu den Motoren 5 bis 8.

Vorwiegend sind hier die beschränkte Dynamik aufgrund der verhältnismäßig hohen Rotormasse und die magnetisch induzierten Vorzugsstellungen des Rotors zu nennen. Die Vorzugsstellungen der T-förmigen Schenkelpole des Ankers führen zu sogenannten Rastungen des Ankers, die sich nachteilig auf das Anlaufverhalten des Motors auswirken. Gerade bei niedrigen Drehzahlen rastet der Rotor von einem Rastpunkt zum nächsten. Man spricht von einer *Drehmomentenwelligkeit*.

Anders ist es zum Beispiel bei den zwei Motoren des Herstellers Faulhaber (Motoren 5 und 6), da diese eine freitragende Wicklung ohne Blechpakete haben: die

sogenannte *Glockenankerwicklung* (engl.: coreless design)[8]. Die beiden zuvor genannten Nachteile entfallen hier.

5.1.1 Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung

Die Reibung wird allgemein in innere und äußere Reibung unterteilt.

Die innere Reibung bezieht sich auf die Teilchenbewegung in einem Stoff und bestimmt die Zähigkeit eines Materials. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit zu vernachlässigen. Entscheidend ist die äußere Reibung. Diese tritt zwischen den Kontaktflächen von zwei Festkörpern auf und wird daher auch als Festkörperreibung bezeichnet.

Die äußere Reibung wird zudem in Haftreibung und Gleitreibung unterteilt. Haftreibung existiert dann, wenn sich die Kontaktflächen von zwei Festkörpern nicht relativ zueinander bewegen. Wird die Haftkraft F_{Haft} , resultierend aus der Haftreibung, überschritten, entsteht eine relative Bewegung zwischen den Kontaktflächen und die Haftreibung geht in eine Gleitreibung über. Generell gilt:

$$F_{Haft} > F_{Gleit} \quad (31)$$

Ein periodischer Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung heißt *Stick-Slip-Effekt*. Dieser Effekt tritt zum Beispiel auf, wenn man einen Stuhl über den Boden zieht und die Reibung zwischen Stuhlfuß und Untergrund periodisch zwischen Haft- und Gleitreibung wechselt. Die resultierende Schwingung in den Stuhlbeinen wird als laute Vibration hörbar.

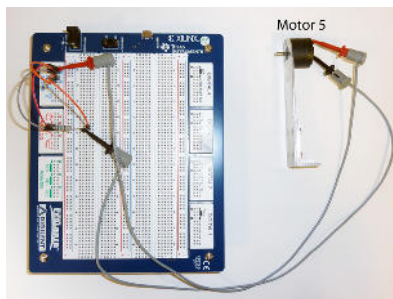
Der Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung im Anlaufmoment ist ein wichtiges Kriterium für das Design von Regelungsmechanismen, da dieser Drehmomentsprung nach jedem Stillstand überwunden und durch die Regelung kompensiert werden muss. Wie groß dieser Drehmomentsprung ausfällt, hängt von mehreren Faktoren ab. Entscheidend ist vor allem die Wahl der Gleit-, Wälz- und Schmierwerkstoffe durch den Motorhersteller. Auch Umwelteinflüsse wie Verschmutzung, Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Temperaturdynamik sind nicht immer zu vernachlässigende Faktoren, die unabhängig von der Motorwahl durch das Design des Anwendungsfalls berücksichtigt werden müssen.

Für die Analyse der Testmotoren wurde das Drehmoment anhand des proportionalen Motorstroms betrachtet. Dazu wurde der Motor mit einer Dreiecksspannung angesteuert und über einen Shunt-Widerstand der Motorstrom gemessen. Je nach Motor zeigt sich nach dem Überwinden der Haftreibung ein mehr oder weniger deut-

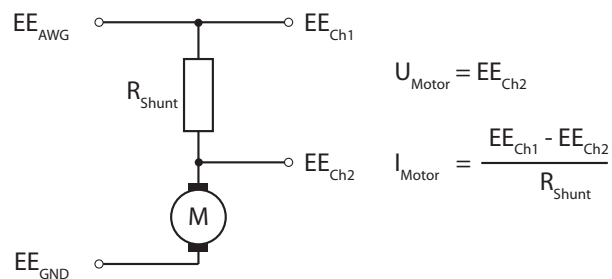
licher Stromsprung.

Die Motorkonstante c_m ermöglicht über die Proportionalität $M = c_m \cdot I$ eine Umrechnung des Motorstroms in ein Drehmoment. Da die Motorkonstante c_m nur für die Motoren des Herstellers Faulhaber bekannt war, erfolgte der Vergleich direkt mit den Stromwerten.

Die elektrischen Messungen erfolgten mit dem Electronic Explorer Board von Digi-
lent. Der Anschluss erfolgte gemäß Abbildung 23b. Der Messaufbau ist in Abbildung 23a abgebildet und zeigt exemplarisch die Messung am Motor 5.



(a) Foto vom Messaufbau mit Motor 5.



(b) Elektrischer Anschluss der Testmotoren an das Electronic Explorer Board. Die Spannungsversorgung erfolgt über den Funktionsgenerator. Die Messungen über zwei Oszilloskopkanäle. Alle Potentiale beziehen sich auf EE_{GND}

Abbildung 23: Messaufbau zur Messung des Übergangs zwischen Haft- und Gleitreibung.

Zu jedem Motor wurden 9 Messungen durchgeführt. Anschließend wurde für jeden Motor die Messung mit der kleinsten Fehlerquadratsumme der Mediane von jedem Messwert als repräsentatives Ergebnis ausgewählt. Die Diagramme auf den Seiten 37 und 38 stellen den Stromsprung über die Klemmenspannung dar. Schwach sichtbar sind die restlichen 8 Messungen und zeigen damit die Streuung der Messergebnisse. Der Unterschied zwischen den Motoren ist deutlich sichtbar. Es ist zu beachten, dass die Achsenskalierungen zwischen Abbildung 24 und Abbildung 25 nicht vergleichbar sind.

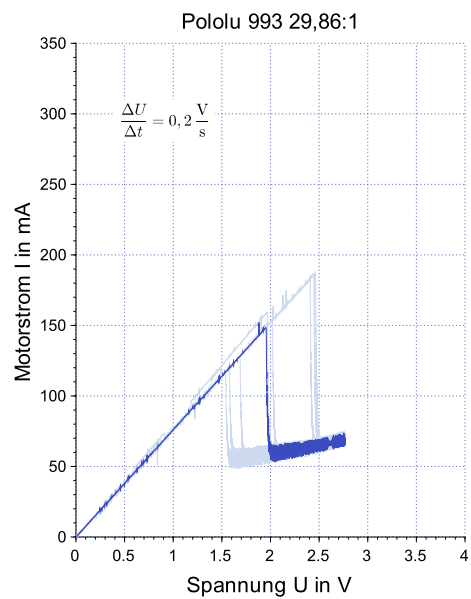
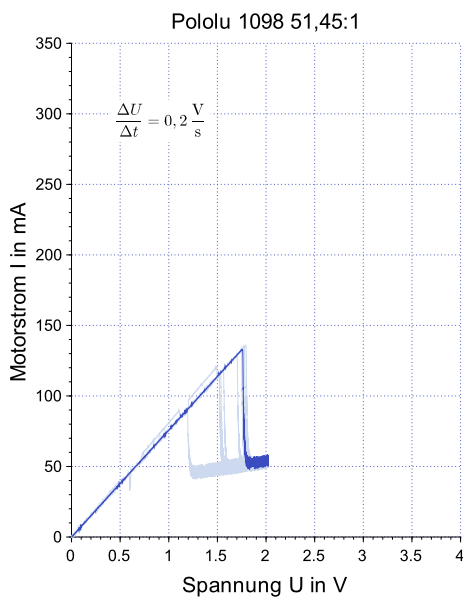
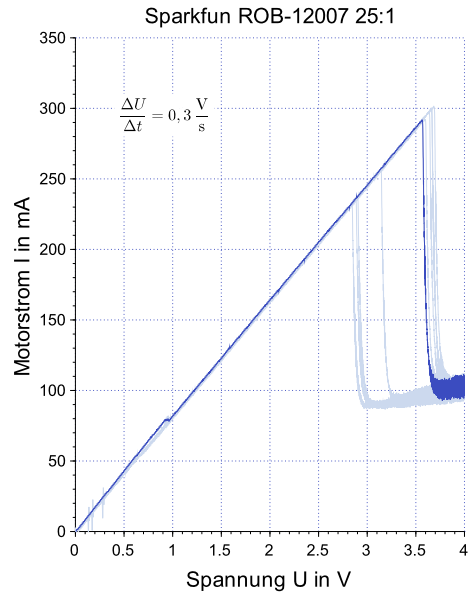
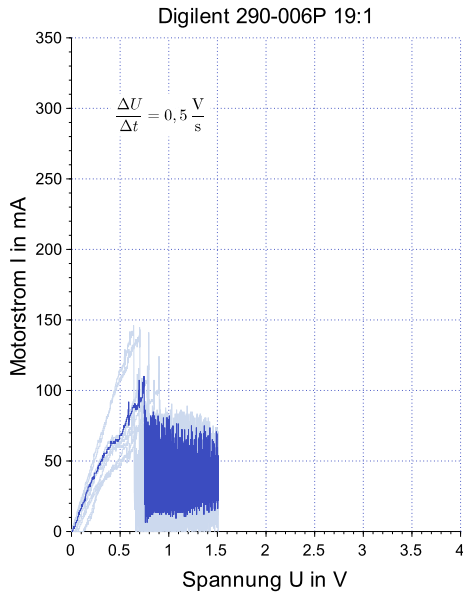


Abbildung 24: Messergebnisse der Motorstrommessung beim Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung der getesteten Motoren 1 bis 4. Je Motor erfolgten 9 Messungen (hellblau dargestellt). Die Messung, welche anhand der kleinsten Fehlerquadratsumme dem Median der 9 Messungen am nächsten ist, wurde dunkelblau dargestellt.

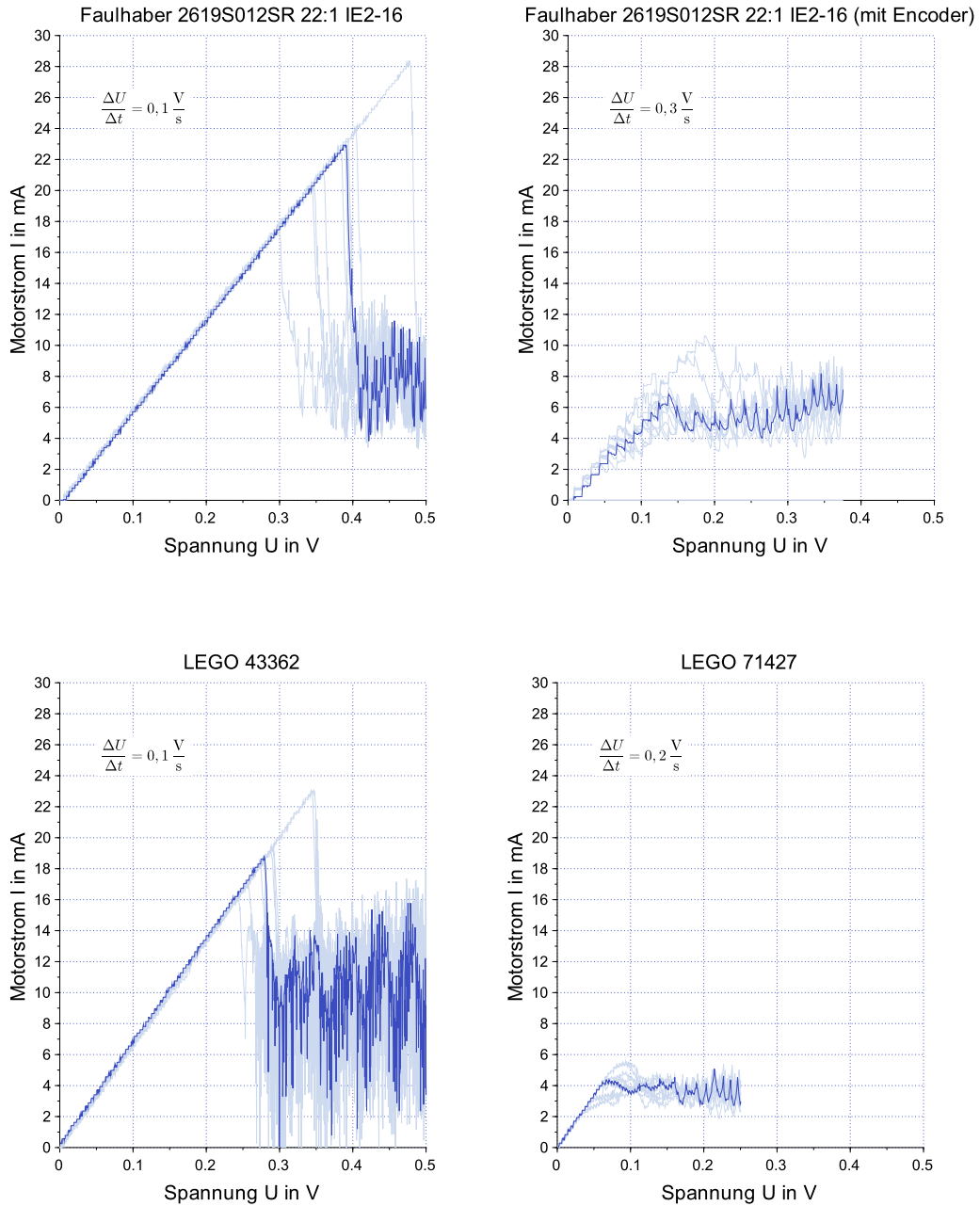


Abbildung 25: Messergebnisse der Motorstrommessung beim Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung der getesteten Motoren 5 bis 8. Je Motor erfolgten 9 Messungen (hellblau dargestellt). Die Messung, welche anhand der kleinsten Fehlerquadratsumme dem Median der 9 Messungen am nächsten ist, wurde dunkelblau dargestellt.

Anhand der Diagramme wurden die Stromsprünge ermittelt und für einen besseren Vergleich in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Ermittelte Stromsprünge der acht Testmotoren im Anlaufmoment.

Nr.	Bezeichnung	Stromsprung (ΔI)	Stromvormsprung	Spannungvormsprung	Leistungvormsprung
1	Digilent 290-006P [6]	60 mA	100 mA	0,75 V	75 mW
2	Sparkfun ROB-12007 [30]	190 mA	290 mA	3,60 V	1044 mW
3	Pololu 1098 [26]	75 mA	130 mA	1,75 V	228 mW
4	Pololu 993 [27]	88 mA	148 mA	1,95 V	289 mW
5	Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16 [7]	16 mA	23 mA	0,39 V	9 mW
6	Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16 (mit Encodereinheit)[7]	1 mA	6,5 mA	0,14 V	0,9 mW
7	LEGO 43362 [14]	8,5 mA	18,5 mA	0,26 V	4,7 mW
8	LEGO 71427 [14]	0,8 mA	4,3 mA	0,07 V	0,3 mW

5.1.2 Fazit zur Motorauswahl

Anhand der durchgeführten Messungen wurden zwei der getesteten Motoren für den Teststand ausgewählt.

- Der Motor 8 (LEGO 71427), da er sowohl in der Haftreibung als auch in der Differenz zwischen Haft- und Gleitreibung unter den getesteten Motoren ungeschlagen ist. Anhand der bei LEGO-Komponenten typischen Kreuzwelle ist eine lösbare Verbindung mit Drehmomentübertragung zwischen Mechanik und Motorwelle problemlos möglich. Dies entspricht exakt den Anforderungen an den zu entwickelnden Teststand und ermöglicht den Aufbau eines Getriebes mit LEGO-Komponenten.
- Der Motor 6 (Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16 mit Encodereinheit), da er nah an den Werten des Motors 8 liegt und aufgrund der industriellen Fertigung besser verfügbar ist und der Hersteller im Rahmen der angegebenen Toleranzen reproduzierbare Eigenschaften gewährleistet. Die Motoren des Herstellers

Faulhaber haben unter den acht getesteten Motoren die mit Abstand umfangreichsten Motordatenblätter. Dies ermöglicht gerade Einsteigern, zum Beispiel beim Einsatz in der Lehre, einen sicheren Einstieg in die Thematik.

Der aktuelle Teststand ist sowohl für den Motor 6, als auch für den Motor 8 konstruiert. Aufgrund der gleichen Bauart der Motoren 5 und 6 und der Motoren 7 und 8 besteht die Möglichkeit, die Motoren 6 bis 8 einzusetzen. Die folgenden Experimente wurden ausschließlich mit dem Motor 8 durchgeführt.

Eine Tatsache, die im Rahmen der vorangegangenen Messung nicht zu erwarten war, ist der Unterschied zwischen Motor 5 und Motor 6, denn die beiden Motoren sind, abgesehen von einer aufgesetzten Encodereinheit am Motor 6, laut Herstellerangaben gleich. Der Unterschied liegt auf den ersten Blick lediglich im Baujahr. Der Motor 6 wurde Mitte 2015 für die Arbeit angeschafft, hingegen ist der Motor 5 gut drei Jahre älter.

Eine mögliche Erklärung für den Unterschied ist, dass der Hersteller Faulhaber die Lagereigenschaften verändert hat. Möglich ist zum Beispiel der Einsatz von Polytetrafluorethylen (PTFE)¹⁰ als Lagerwerkstoff, oder PTFE als Additiv im Schmiermittel und den Lagerwerkstoffen. PTFE wird gerne als Lagerwerkstoff genutzt, da der Haftreibungskoeffizient nahezu dem Gleitreibungskoeffizienten entspricht und somit die Festkörperreibung, bekannt aus der Stribeck-Kurve, auf ein Minimum reduziert wird. Der bekannte Stick-Slip-Effekt tritt bei PTFE-Reibung nicht auf. Weitere beliebte Additive für Schmier- und Lagerwerkstoffe sind Molybdän(IV)-sulfid (MoS_2)¹¹ und Wolfram(IV)-sulfid (WS_2), da diese eine hervorragende Notlaufeigenschaft haben. Dies verhindert ein Festfressen der Lager.

Aufgrund der starken Variation der Messergebnisse bei gleichbleibenden Randbedingungen kann auf eine Toleranzbetrachtung der Messmittel verzichtet werden.

Da zum Zeitpunkt der Motortests jeweils nur ein Exemplar vorlag, bezieht sich das Testergebnis ausschließlich auf die explizit getesteten Motorexemplare.

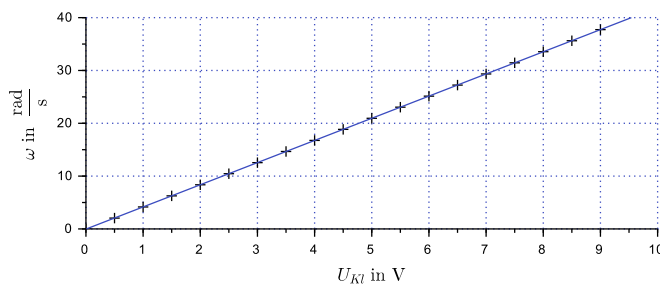
5.1.3 Messung der Drehzahlkonstanten des LEGO 71427

Da für den Motor Nr. 8 (LEGO 71427) kein Herstellerdatenblatt zur Verfügung stand, musste die Drehzahlkonstante k_n experimentell bestimmt werden. Diese ist notwendig, wenn die Klemmenspannung der BEMF in eine Drehzahl umgerechnet werden soll.

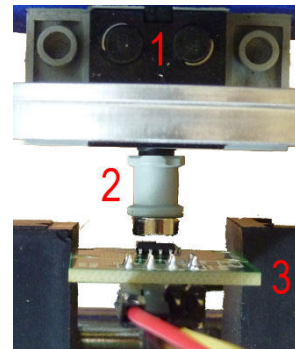
¹⁰Bekannt unter dem Handelsnamen *Teflon* der Firma *DuPont*

¹¹Bekannt unter dem Handelsnamen *Molykote* der Firma *Dow Corning*

Dazu wurde die Motorklemmenspannung in 0,5 V-Schritten von 0 V auf 9 V erhöht und die Drehzahl im lastfreien stationären Zustand gemessen. Die Messung erfolgte berührungslos über den Magnetencoder AS5601 des Herstellers AMS. Dazu wurde auf die Stirnseite der Motorwelle ein diametral magnetisierter Permanentmagnet befestigt. Der Aufbau ist in Abbildung 26b zu sehen.



(a) Kennlinie zwischen Motorspannung und Winkelgeschwindigkeit als lineare Regression der eingezeichneten Messpunkte.



(b) Messaufbau in der Draufsicht.

- 1: Motor
- 2: Permanentmagnet
- 3: Magnetencoder

Abbildung 26: Messung zur experimentellen Bestimmung der Drehzahlkonstanten k_n des Motors LEGO 71427 mit dem Magnetencoder AS5601 des Herstellers AMS.

Die Spannungs-Drehzahl-Kennlinie des Motors verläuft laut des elektrischen Ersatzschaltbildes linear. Die 19 Messwerte (siehe Abbildung 26a) decken sich sehr gut mit der Linearen.

Die resultierende Drehzahlkonstante lautet:

$$k_n = \frac{\Delta\omega}{\Delta U} = 4,1958 \frac{\text{rad}}{\text{s} \cdot \text{V}} = 40,067 \frac{\text{rpm}}{\text{V}} \quad (32)$$

Mit dem Kehrwert der Drehzahlkonstanten berechnet sich die Generator-Spannungs-Konstante:

$$k_E = \frac{1}{k_n} = 0,2383 \frac{\text{s} \cdot \text{V}}{\text{rad}} = 24,958 \frac{\text{mV}}{\text{rpm}} \quad (33)$$

Die Konstanten des Motors Nr. 6 (Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16 mit Encoder-einheit) können mit den Daten aus dem Herstellerdatenblatt [7] berechnet werden. In

dem Datenblatt werden die Konstanten ohne Berücksichtigung des Getriebes angegeben. Das Übersetzungsverhältnis i des Faulhaber-Motors lautet $i = \frac{n_{Antrieb}}{n_{Abtrieb}} = \frac{1}{22}$.

Die oben genannten Konstanten berechnen sich zu:

$$k_{nFaulhaber} = 582 \cdot i \frac{\text{rpm}}{\text{V}} = 26,45 \frac{\text{rpm}}{\text{V}} \quad (34)$$

und

$$k_{EFaulhaber} = \frac{1}{k_{nFaulhaber}} = 37,80 \frac{\text{mV}}{\text{rpm}} \quad (35)$$

Die folgende Tabelle fasst die in diesem Kapitel berechneten Motorkonstanten zusammen.

Tabelle 7: Zusammenfassung der berechneten Motorkonstanten der Motoren 6 und 8.

Bezeichnung	Drehzahlkonstante k_n	Generator-Spannungs-Konstante k_E
Faulhaber 2619S012SR 22:1 IE2-16 (mit Encodereinheit)	$26,45 \frac{\text{rpm}}{\text{V}}$	$37,80 \frac{\text{mV}}{\text{rpm}}$
LEGO 71427	$40,07 \frac{\text{rpm}}{\text{V}}$	$24,96 \frac{\text{mV}}{\text{rpm}}$

5.2 Teststand

Oft möchte man, losgelöst von Simulationen und theoretischen Ansätzen, seine Prinzipien an einer Hardware testen oder die Simulationsergebnisse validieren. In manchen Fällen ist es auch nicht möglich alle physikalischen Effekte zu simulieren. In solchen Situationen ist ein realer Teststand unverzichtbar. Teststände werden oft mit dem Ziel entwickelt, durch kleine Umbaumaßnahmen möglichst viele Konfigurationen, Freiheitsgrade und Belastungen realisieren zu können.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Teststand besteht aus einer Plattform, die individuell mit Motortürmen bestückt werden kann. Diese Türme mit je einem Aktor können gestuft positioniert werden und ermöglichen eine Vielzahl an Konfi-

gurationen. Eine Auswahl wird in den folgenden Kapiteln vorgestellt. Der Teststand dient dem universellen Einsatz in der Forschung, der Lehre und für weitere Abschlussarbeiten im Forschungslabor Neurorobotik bzw. an der Beuth Hochschule für Technik Berlin.

5.2.1 Hardware

Die Konstruktion des Teststands erfolgte mit der CAD-Software Solid Works und wurde mit Unterstützung des Forschungslabors Neurorobotik durchgeführt und anschließend durch Fräsen und FDM-Druck¹² gefertigt. Die Konstruktion wurde modular aufgebaut und kann bei Bedarf durch individuell gestaltete Aufbauten ergänzt werden. Die aktuelle Version unterstützt die getesteten Motoren der Hersteller LEGO und Faulhaber. Die technischen Zeichnungen aller Frästeile sind dem Anhang entnehmbar.

Hauptanforderungen an die Grundplatte waren die Aufnahme der Elektronik und eine gestufte Positionierung der Motortürme. Auf eine stufenlose Verstellung ist zu Gunsten der Reproduzierbarkeit einer Konfigurationen verzichtet worden. Die Hauptplatine und die steckbaren Peripheriemodule können direkt mit der Grundplatte des Teststandes verschraubt werden. Dadurch ist ein sicherer Betrieb und Transport des Aufbaus gewährleistet.

Abbildung 27 zeigt exemplarisch einen Aufbau mit zwei Motortürmen. Der rechte Turm kann die Motoren des Herstellers Faulhaber aufnehmen. Passend dazu wurde ein Adapter von der Motorwelle mit dem Durchmesser $D = 3$ mm auf das LEGO Rastermaß konstruiert. Der linke Turm ist für die LEGO-Motoren konstruiert. Der umlaufende Lochkranz hat 24 Löcher und ermöglicht die Aufnahme von LEGO-Stiften in 15° -Schritten. Die Schrittweite der Motorturmpositionen auf der Grundplatte entspricht ebenfalls dem Rastermaß der LEGO-Komponenten. Ein Vorteil der Anpassung an die LEGO-Maße ist die kostengünstige und fasst unbegrenzte Erweiterungsmöglichkeit der mechanischen Aufbauten von Koppelgetrieben bis zu Zahnradgetrieben. Als nachteilig hat sich das Spiel in den Steckverbindungen erwiesen. Dass die Schenkel, die direkt am LEGO-Motor befestigt werden, immer über ein abgewinkeltes Ende verfügen (siehe Abbildung 27 links), liegt daran, dass LEGO Bauelemente mit einer drehmomentübertragenden Motoraufnahme nur in solcher Form im Sortiment hat.

¹²FDM: Fused Deposition Modeling

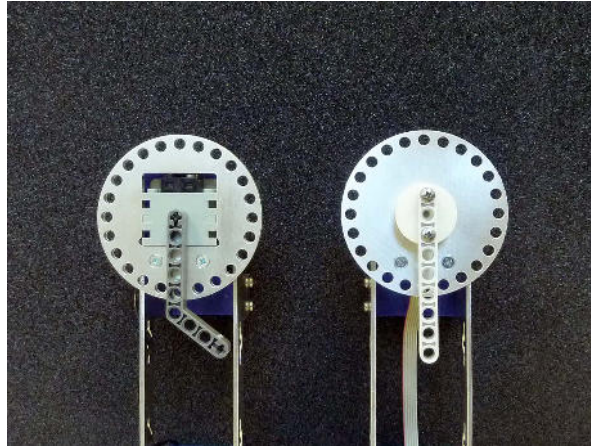


Abbildung 27: Aufgebauter Teststand mit zwei Motortürmen - Links für die getesteten Motoren des Herstellers LEGO und rechts für die getesteten Motoren des Herstellers Faulhaber.

Folgend wird eine Auswahl an Konfigurationen mit dieser Plattform dargestellt.

Pendel

Der einfachste Aufbau ist ein Pendel mit einem motorisch angetriebenen Gelenk. So trivial dieser Aufbau im ersten Moment auch wirkt, kann man damit an diversen Mechanismen mit unzähligen Randbedingungen forschen. Insbesondere die Stellung der Motorachse parallel oder orthogonal zur Erdbeschleunigung oder das Einfügen von mechanischen Anschlägen beeinflussen das Systemverhalten massiv.

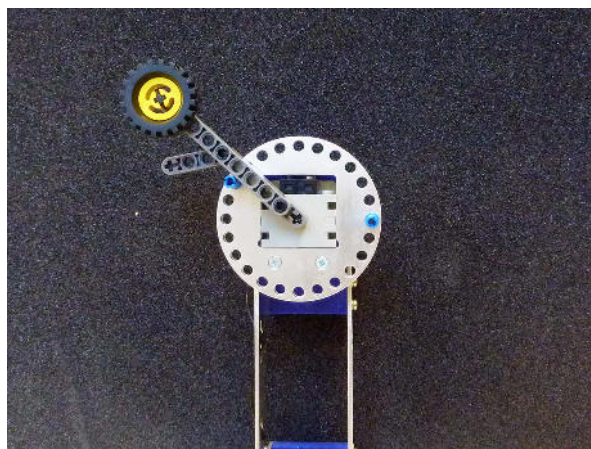
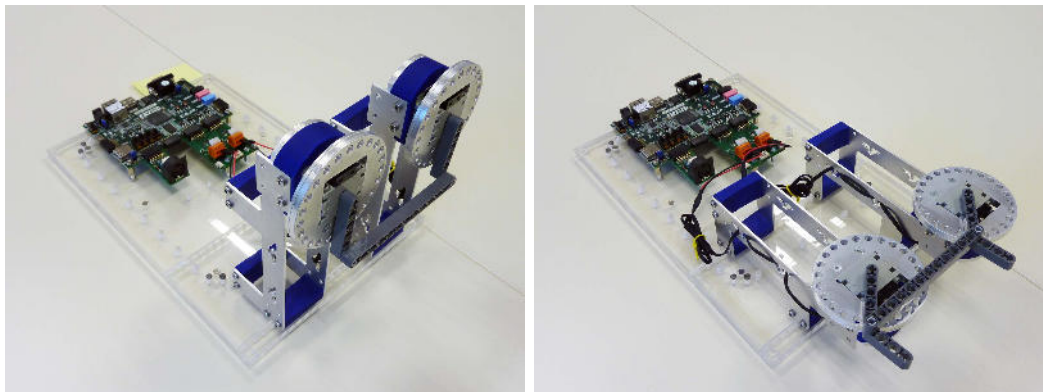


Abbildung 28: Darstellung des Teststandes als Einzelpendel mit zwei mechanischen Anschlägen.

Viergelenkgetriebe

Eine weitere Konfiguration ist die 4BL. Die vier Glieder bestehen aus einem festen Gestell, zwei Schenkeln und einer Koppel, die die beiden Schenkel mechanisch verbindet. Das Gestell wird durch die Grundplatte mit zwei Motortürmen gebildet. Die Gelenke ermöglichen eine endlose Rotation in beide Drehrichtungen.

Die unterschiedlichen Möglichkeiten mit einer 4BL wurden im Kapitel 4.4 bereits ausführlich beschrieben. Die Abbildung 29a zeigt den Aufbau einer Parallelkurbelkonfiguration. Durch die vertikale Ausrichtung der Bewegungsebene wird die Bewegung durch die Gravitationskraft beeinflusst.



(a) Vertikale Bewegungsebene

(b) Horizontale Bewegungsebene

Abbildung 29: Aufbau des Teststandes als Viergelenkgetriebe in Parallelkurbelkonfiguration mit vertikaler und horizontaler orientierter Bewegungsebene.

Der Aufbau in Abbildung 29b ist ebenfalls eine Parallelkurbelkonfiguration. Durch die horizontale Ausrichtung der Bewegungsebene hat die Gravitationskraft keinen Einfluss auf die Bewegung.

Für einige Konfigurationen ist die stirnseitige Positionierung der Motoren notwendig, damit die beiden Schenkel nicht aneinanderstoßen. Dies gilt zum Beispiel für das Viergelenkgetriebe, wenn die Schenkel länger sind als der Motorachsenabstand. Dieser Aufbau ist entsprechend der Abbildung 30 ebenfalls möglich.

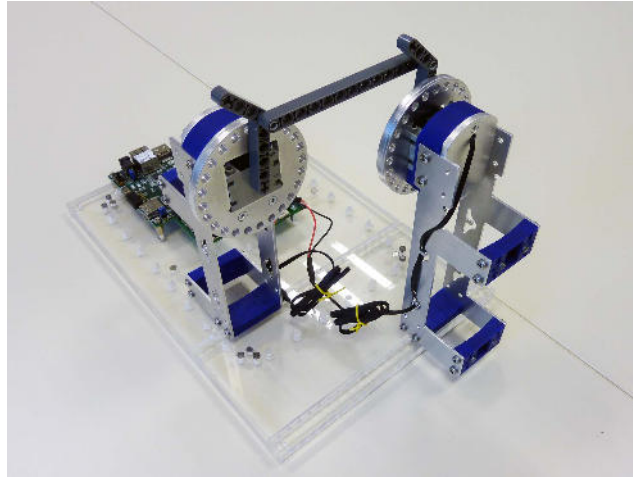


Abbildung 30: Aufbau des Teststandes als Viergelenkgetriebe. Die Motoren stehen stirnseitig zueinander.

Weitere Varianten

Weitere Varianten sind beispielsweise eine Art Baggerarm, ein Labyrinth oder ein Zeichenaufbau. Durch die Option, die Motoren mit einem Winkel von 0° oder 90° zur Grundplatte zu montieren, können Aufbauten mit oder unter Ausschluss der Gravitationskraft auf die Bewegung durchgeführt werden. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den Aufbau als Zeichengerät mit zwei Motoren. Wird das Zeichenpapier durch eine Platte mit Nuten ausgetauscht, kann der Aufbau für die Erkundung eines Labyrinths genutzt werden. Aufgrund des modularen Aufbaus sind unzählige Varianten möglich.

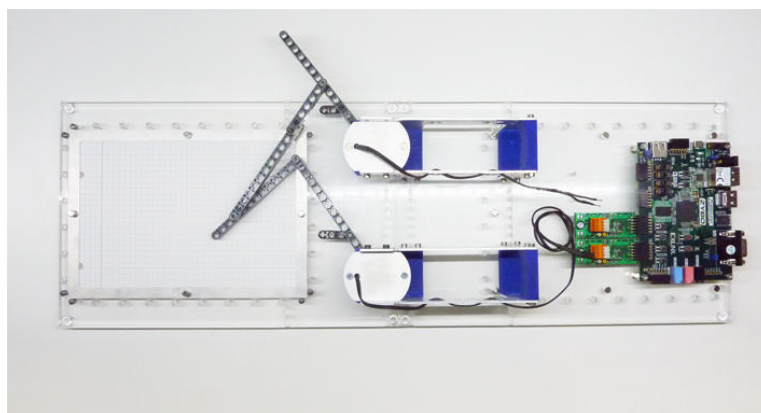


Abbildung 31: Darstellung des Teststandes als Zeichenaufbau. Das steckbare Koppelgetriebe kann über die beiden Aktoren, als auch durch äußere Einflüsse verändert werden.

5.2.2 Elektronik

Die Elektronik basiert auf dem ZYBO Development Board von Digilent und wird durch Peripheriemodule erweitert.

ZYBO

Das ZYBO¹³ ist ein Development Board der Herstellers Digilent. Dieses Board enthält neben diverser Peripherie ein Bauelement der Zynq7000-Reihe von Xilinx. Dabei handelt es sich um einen Dual-Core Cortex-A9-ARM-Mikrocontroller und einem Artix-7-FPGA in einem Bauelement. Der Regelungsmechanismus wurde so designt, dass er ohne die Mikrocontroller auskommt. Das ZYBO bietet über sogenannte PMod-Schnittstellen¹⁴ die Möglichkeit, externe Module anzuschließen.

PMod Motor

Das PMod Motor wurde speziell für die Regelung eines Gleichstrommotors über die BEMF entwickelt. Dieses Modul ermöglicht neben der Motoransteuerung über eine H-Brücke parallel die Messung der Motorklemmenspannung über einen Analog-Digital-Konverter (ADC). Die extern anzuschließende Eingangsspannung an das PMod Motor dient neben der Versorgung des Motors auch als Versorgungsspannung eines Linearreglers, der stabile 5 VDC als Versorgungsspannung für den ADC bereitstellt.

Die Motoransteuerung erfolgt über die H-Brücke DRV8837 [33] von Texas Instruments, die den Betrieb mit Tri-State-Ausgängen ermöglicht. Die Ausgänge können neben den definierten Pegeln VCC und GND auch in einen hochohmigen Zustand (HiZ¹⁵) geschaltet werden. Dies ermöglicht die folgenden vier Betriebsmodi: Drehrichtung links, Drehrichtung rechts, Bremsen (Motorklemmen kurzgeschlossen) und Freilauf (Motorklemmen offen).

Die Motorklemmen-Spannungsmessung erfolgt mit dem differentiellen Analog-Digital-Wandler ADS1203 [32] von Texas Instruments. Da dieser ADC nach dem Δ - Σ -Wandler-Prinzip arbeitet, wird die Spannungsmessung intern bereits integriert. Dieses Verfahren ist, besonders für die Messung von verrauschten Signalen wie einer BEMF, besser geeignet, als die alternative sample-and-hold-Methode. Von den vier möglichen Betriebsmodi des ADS1203 sind Modus 0 und Modus 3 für diese Arbeit von besonderem Interesse. Im Modus 0 erzeugt der ADC ein eigenes Taktsignal von 10 MHz, welches der Auswertung des Datenstroms dient. Dies ist insbesondere für

¹³ZYBO: ZYnq BOard

¹⁴PMod: peripheral module

¹⁵HiZ: high impedance

einen Stand-Alone-Betrieb sinnvoll. Im Modus 3 kann der ADC über ein externes Taktsignal zwischen 1 MHz und 32 MHz betrieben werden, wobei das Datensignal in diesem Fall mit der halben Eingangsfrequenz getaktet wird. In diesem Modus können mehrere PMods am ZYBO angeschlossen werden und synchrone Datenströme generieren.

Diese Schaltung orientiert sich an der in [11] veröffentlichten Ausführung. Abbildung 32 zeigt den Signalfussplan des PMods mit den Ein- und Ausgangsgrößen der H-Brücke und des AD-Wandlers. Der elektrische Schaltplan und das Leiterplattenlayout sind dem Anhang zu entnehmen.

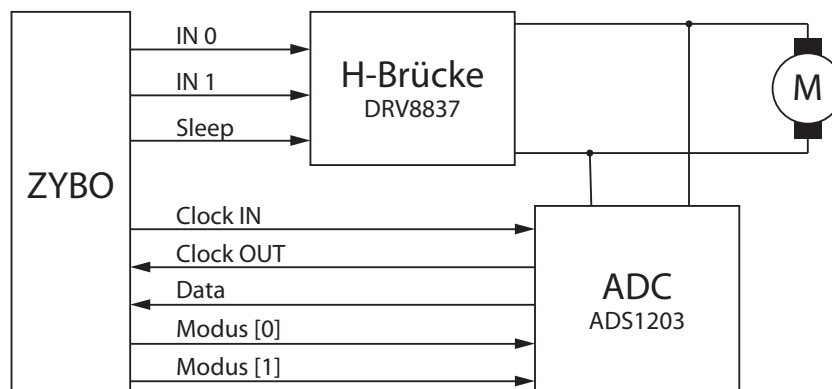


Abbildung 32: Signalfussplan des PMod Motor.

Die PWM, mit der die Motoren angesteuert werden, wurde auf eine Frequenz von $f_{\text{PWM}} = 100$ Hz festgelegt. Bei der Frequenzwahl mussten mehrere Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Generell gilt: Ist die PWM-Frequenz zu niedrig, wird die Bewegung ungleichförmig und zeigt eine Drehmomentwelligkeit. In Folge sinkt der Wirkungsgrad. Ist die PWM-Frequenz zu hoch, sinkt der Wirkungsgrad der Ansteuerung ebenfalls, denn die Ummagnetisierungsverluste in den Gleichstrommotoren steigen drastisch an.

Entscheidend für die Frequenzwahl war in diesem Fall die benötigte Messdauer des AD-Wandlers. Bei einer Frequenz von $f_{\text{PWM}} = 100$ Hz beträgt die Periodendauer $T_{\text{PWM}} = 10$ ms. Unter der Bedingung, dass der erlaubte DutyCycle-Bereich bei $0\% \leq \text{DC} \leq 90\%$ liegt, ist eine Messung in der Coast-Time t_{coast} der maximalen Dauer $t_{\text{meas}} = 1$ ms möglich. Damit die Messergebnisse untereinander vergleichbar bleiben, wurde die Messzeit auf den Bereich $9 \text{ ms} \leq t_{\text{meas}} < 10 \text{ ms}$, bezogen auf die Periodendauer T_{PWM} , festgelegt. Diese Parameter haben in Tests die zuverlässigsten Ergebnisse erzielt.

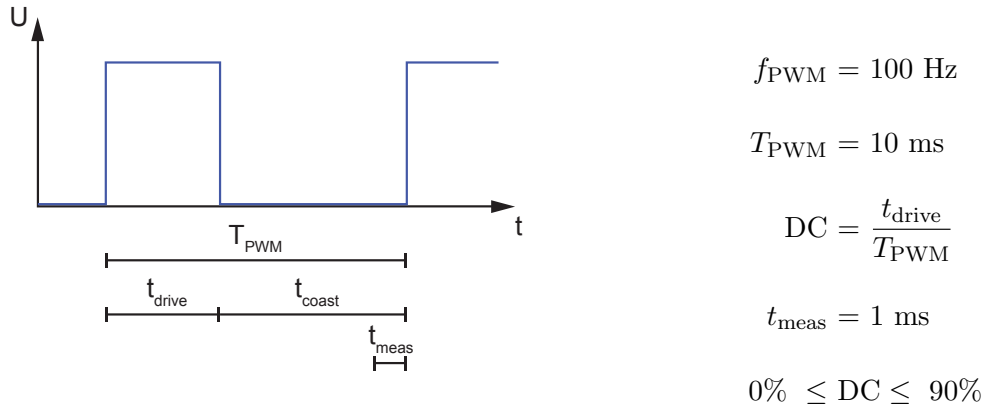


Abbildung 33: U-t-Diagramm zur Darstellung der PWM mit den entsprechenden Bezeichnungen.

Um absolute Spannungen messen zu können, müssen die Messwerte des PMod Motor zuvor kalibriert werden. Abbildung 34 zeigt die Kalibrierung im Spannungsbereich $-10 \text{ V} \leq U_{\text{PMod}} \leq +10 \text{ V}$.

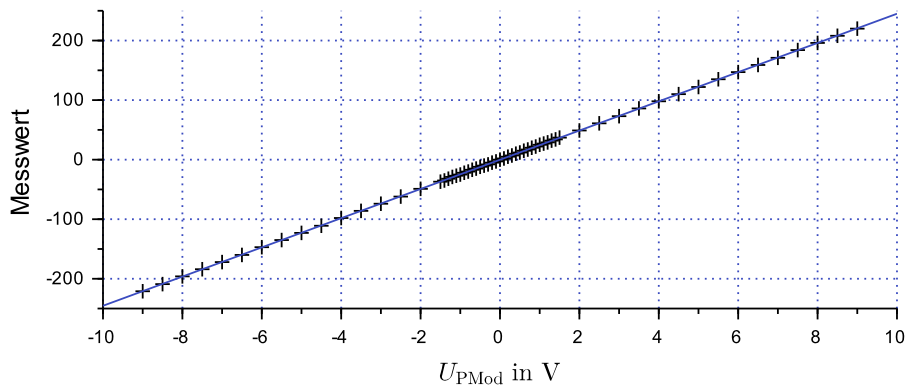


Abbildung 34: Kalibrierung der Spannungsmessung mit dem PMod Motor.

Zusammengefasst kann mit diesem PMod ein zweipoliger Gleichstrommotor über eine Pulsweitenmodulation in beide Drehrichtungen angesteuert und parallel die Klemmenspannung des Motors gemessen werden. Eine Strommessung ist mit dem PMod Motor nicht möglich.

PMod Midi

Der PMod Midi ermöglicht den Anschluss einer Midi-Signalquelle. Das Midi-Signal wird, mittels Optokoppler galvanisch getrennt, über einen PMod-Anschluss an das FPGA weitergeleitet. Der Midi-Eingang ermöglicht es, den Versuch im laufenden Betrieb zu triggern oder Parameter zu variieren. Als Eingabegerät dient ein Midi-Pult mit Tastern und Drehgebern. Die Elektronik wurde vom Forschungslabor Neurorobotik entwickelt.

PMod UART USB

Das PMod UART USB von Digilent stellt eine Kommunikationsschnittstelle zwischen einem Computer mittels USB-Anschluss und dem Teststand in Form einer UART-Schnittstelle zur Verfügung. Dazu wurde ein IC des Herstellers FTDI verbaut.

Überblick über die elektronischen Komponenten

Die folgende Abbildung bietet einen Überblick über die am Teststand verbauten elektronischen Komponenten.

- | | |
|--------------------|-------------------------------|
| [1] Motor 1 | [7] ZYBO |
| [2] Motor 2 | [8] VGA-Anschluss |
| [3] PMod MIDI | [9] Electronic Explorer Board |
| [4] PMod UART-USB | [10] Shunt für Motorstrom |
| [5] PMod Motor | [11] MIDI-Eingabegerät |
| [6] JTAG-Anschluss | |

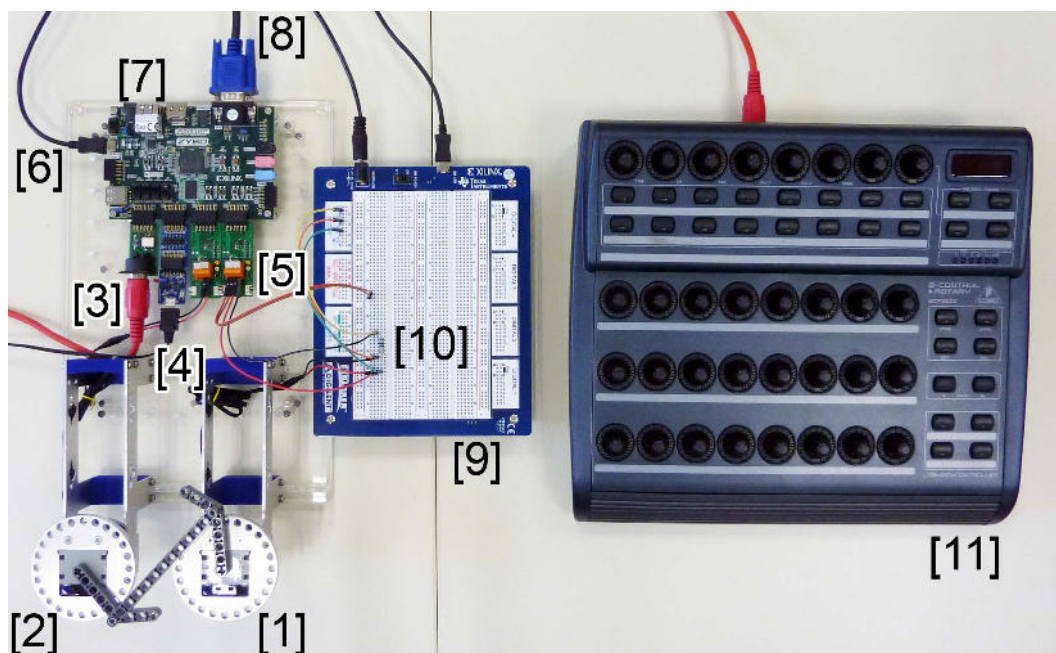


Abbildung 35: Elektronische Komponenten des Teststandes in der Draufsicht - [1] Motor 1, [2] Motor 2, [3] PMod MIDI, [4] PMod UART-USB, [5] PMod Motor, [6] JTAG-Anschluss, [7] ZYBO, [8] VGA-Anschluss, [9] Electronic Explorer Board, [10] Shunt für Motorstrom, [11] MIDI-Eingabegerät.

6 Regelungsmechanismus

Zur Entwicklung eines adaptiven Regelungsmechanismus wurden zunächst Messungen durchgeführt, um das Verhalten der BEMF bei unterschiedlichen Randbedingungen zu analysieren. Anhand der Messergebnisse konnten Regeln entwickelt werden, die dem Mechanismus zugrunde liegen.

Das Spektrum an Möglichkeiten mit diesem Teststand kann in dieser Arbeit nicht abgedeckt werden und wird Bestandteil weiterer Abschluss- und Forschungsarbeiten im Forschungslabor Neurorobotik.

Der resultierende Regelungsmechanismus wurde an vier Testfällen untersucht. Die Messergebnisse werden im Kapitel 6.4 evaluiert.

6.1 Messungen

Die Messwertaufnahme erfolgte über zwei Wege. Der erste Weg ist die Messung direkt über die Hardware des Teststands, indem die BEMF während der Off-Time der Ansteuerung über den PMod Motor gemessen wird. Die Signalverarbeitung erfolgt im FPGA, das die Messwerte filtert, integriert und für die Übertragung in ASCII-Zeichen wandelt. Die Visualisierung erfolgt über die VGA-Ausgabe als y-t-Diagramm und numerisch über vorzeichenbehaftete sechsstellige Dezimalanzeigen. Zu Dokumentationszwecken und der weiteren Verarbeitung mittels Scilab wurden die gemessenen Rohwerte beider PMods alle 10 ms über die serielle Schnittstelle an einen Laptop übertragen und aufgezeichnet.

Der zweite Weg erfolgte über eine externe Messhardware, dem Electronic Explorer Board von Digilent. Dieses Board ist bereits für die Motorauswahl in Kapitel 5.1 eingesetzt worden. Über die Oszilloskopkanäle kann sowohl die Klemmenspannung eines Motors als auch der zugehörige Motorstrom berechnet werden. Die Messung des Motorstroms erfolgt über einen Shunt mit $R_{\text{Shunt}} = 6,3 \Omega$ und $P_{\text{max}} = 10 \text{ W}$. Der Anschluss erfolgt gemäß der Abbildung 36.

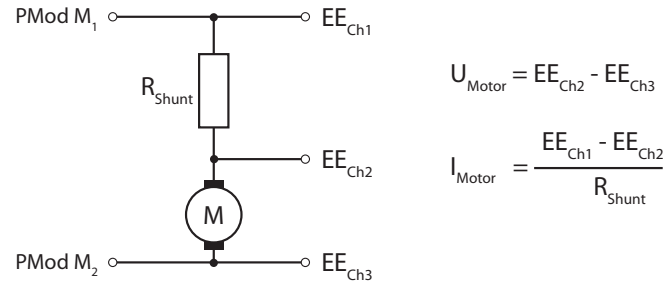


Abbildung 36: Anschlussplan für die Messung von Motorspannung und Motorstrom mit dem Electronic Explorer Board (EE) von Digilent. Für die vollständige Messung an einem Motor werden drei Oszilloskopkanäle benötigt. Der Widerstandswert beträgt $R_{\text{Shunt}} = 6,3 \Omega$ bei $P_{\text{max}} = 10 \text{ W}$. Alle Potentiale beziehen sich auf die Masse des Electronic Explorer Boards EE_{GND} .

Der Grund für die zwei parallelen Messvarianten liegt darin, dass der zu entwickelnde Regelungsmechanismus ausschließlich mit den Messwerten der PMods arbeiten kann, die mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz aufgenommen werden. Alle schnelleren Informationen in der Motorklemmenspannung gehen dabei verloren, obwohl sie wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung ergeben könnten. Die Messung mit dem Electronic Explorer Board ermöglicht Abtastfrequenzen bis zu 70 MHz. Da die PMods keine Ströme messen können, ist die Berechnung der Energien mit dem Teststand selbst nicht möglich. Damit der Energieverbrauch dennoch bestimmt werden kann, erfolgt die Strommessung über das Electronic Explorer Board. Die externe Versorgungsspannung der PMods von 9 VDC wird ebenfalls über das Electronic Explorer Board bereitgestellt und ist mit einem maximalen Strom von 1,5 A ausreichend dimensioniert.

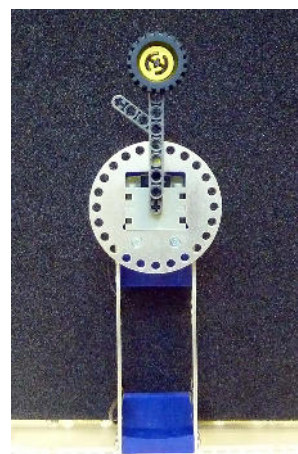
6.1.1 Aufrichten eines Pendels über einen Spannungsimpuls

Das Ziel der ersten Versuchsreihe bestand darin, ein physikalisches Pendel mit einer definierten Länge l und Masse m mit einem Spannungsimpuls einer definierten Länge Δt von der vertikal hängenden Position (siehe Abbildung 37a) in die vertikal aufrechte Position (siehe Abbildung 37b) zu überführen.

Dabei wird unterschieden, ob die H-Brücke den Motor nach dem Spannungsimpuls in den Freilauf- (coast) oder Bremsbetrieb (break) schaltet.



(a) Hängendes Pendel



(b) Stehendes Pendel

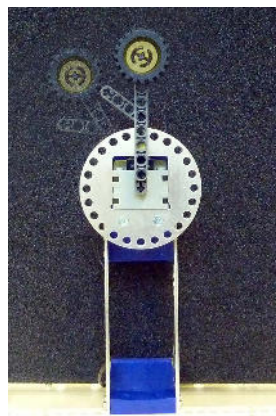
Abbildung 37: Anfangs- und Endposition des Pendels beim Aufrichten über einen Spannungsimpuls.

Für diesen Aufbau wurde das FPGA so konfiguriert, dass der Nutzer per Schiebeschalter zwischen break und coast umschalten kann. Die Impulsdauer wurde über ein Midi-Eingabegerät eingestellt. Dazu wurden zwei Potentiometer eingesetzt, um eine grobe und eine feine Einstellung zu ermöglichen. Der Impuls wurde als Monoflop auf die steigende Flanke eines Tasters getriggert. Um fehlerhafte Ergebnisse zu vermeiden, die auf das Tastenprellen zurückzuführen sind, wurde das Monoflop nicht retriggerbar implementiert.

6.1.2 Messungen am dissipativen Pendel

Der Begriff des Phasenraums ist bereits aus dem Kapitel der Grundlagen zu dynamischen Systemen bekannt (siehe Kapitel 4.6). Der Phasenraum eines dynamischen Systems ermöglicht es, anhand der Update-Funktion $\dot{x} = F(x)$ zu jedem Zeitpunkt eine Aussage über das zukünftige Verhalten der Systems treffen zu können.

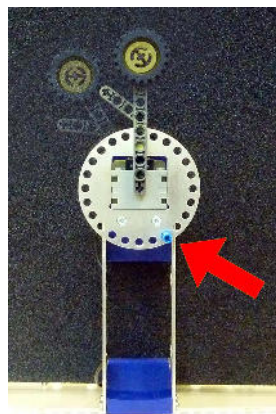
Die Zustandsgrößen eines physikalischen Pendels sind der Winkel φ und die Winkelgeschwindigkeit $\omega \equiv \dot{\varphi}$. Diese beiden Größen spannen den Phasenraum auf.



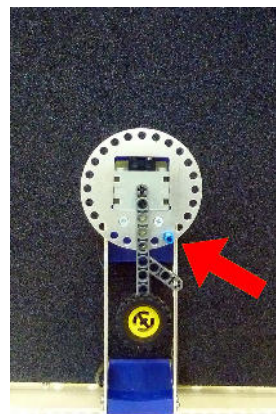
(a) $\varphi = 180^\circ$: Pendel im instabilen Fixpunkt



(b) $\varphi = 0^\circ$: Pendel im stabilen Fixpunkt



(c) $\varphi = 180^\circ$: Pendel mit Anschlag im instabilen Fixpunkt



(d) $\varphi = 0^\circ$: Pendel mit Anschlag im stabilen Fixpunkt

Abbildung 38: Anfangs- und Endposition zur Ermittlung einer Trajektorie im Phasenraum des Pendels mit und ohne Anschlag. Der rote Pfeil zeigt auf den mechanischen Anschlag. Die Anfangspose hat den Winkel $\varphi = 180^\circ$, die Endpose den Winkel $\varphi = 0^\circ$.

Abbildung 38 zeigt ein Pendel der Länge $l = 106$ mm mit einer Masse von $m = 5$ g. Das Pendel wurde ausgehend vom instabilen Fixpunkt (a und c) entgegen dem Uhrzeigersinn gestört und der Erdanziehungskraft ausgesetzt. Die Messung wurde beendet, sobald das Pendel den stationären Zustand im stabilen Fixpunkt (b und d) eingenommen hat.

Ausgehend von der BEMF wurde mit der Drehzahlkonstanten k_n des Motors die reale Motordrehzahl berechnet. Durch numerische Integration und Differentiation konnte der Winkel- und Beschleunigungsverlauf näherungsweise berechnet werden. Die Abbildung 39 auf der nächsten Seite zeigt die Messergebnisse des Pendels ohne Anschlag. Vor den Berechnungen wurde die gemessene BEMF über ein IIR-Filter geglättet. Der rote Verlauf entspricht der Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ des Pendels, welche aus der BEMF berechnet wurde. Durch numerische Integration nach dem Trapezverfahren wurde der blaue Verlauf des Pendelwinkels $\varphi(t)$ berechnet. Der in schwarz dargestellte Beschleunigungsverlauf $\alpha(t)$ dient nicht der Darstellung im Phasenraum, zeigt aber anschaulich die Änderung der Winkelgeschwindigkeit ω .

Obwohl der Verlauf der Winkelgeschwindigkeit ω an eine gedämpfte Sinusschwingung erinnert, zeigt spätestens der Beschleunigungsverlauf α bei $2,5 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$, dass dies nicht der Fall ist. Beim Vorzeichenwechsel der Winkelgeschwindigkeit ω nimmt dessen Steigung kurz vorher ab und anschließend wieder zu. Dies grenzt den Verlauf des Pendels deutlich von einer Sinusschwingung ab.

In den Nulldurchgängen der Winkelgeschwindigkeit ω befindet sich das Pendel in maximaler Auslenkung.

Der Phasenraum (ω, φ) zeigt eine spiralförmige Trajektorie. Da diese Trajektorie in dem Punkt $[0;0]$, dem einzigen Attraktor des Systems, endet, wird sie auch als *Transiente* bezeichnet. Umgeben ist dieser Attraktor von seinem Basin. Der Punkt $[180;0]$, bei dem das Pendel die aufrecht stehende Position einnimmt, ist der einzige Repellor des Systems.

Die Messung an dem Pendel mit Anschlag erfolgte analog zu der Messung an dem Pendel ohne Anschlag. Die Ergebnisse sind in Abbildung 40 auf Seite 58 zu sehen. Die Spitzen im Beschleunigungsverlauf $\alpha(t)$ bestätigen, dass es sich an diesen Stellen um einen elastischen Stoß am mechanischen Anschlag handelt. Die Trajektorie im Phasenraum entspricht qualitativ im Wesentlichen der des Pendels ohne Anschlag, mit dem entscheidenden Unterschied, dass sie bei Winkeln über $\varphi < -20^\circ$ gestaucht ist. Dass der Verlauf bei positiver Winkelgeschwindigkeit stärker schwankt als im negativen Bereich, ist eine Folge des Stoßes. Die Richtungsumkehr des Impulsvektors führt zu mechanischen Schwingungen im Pendel selbst.

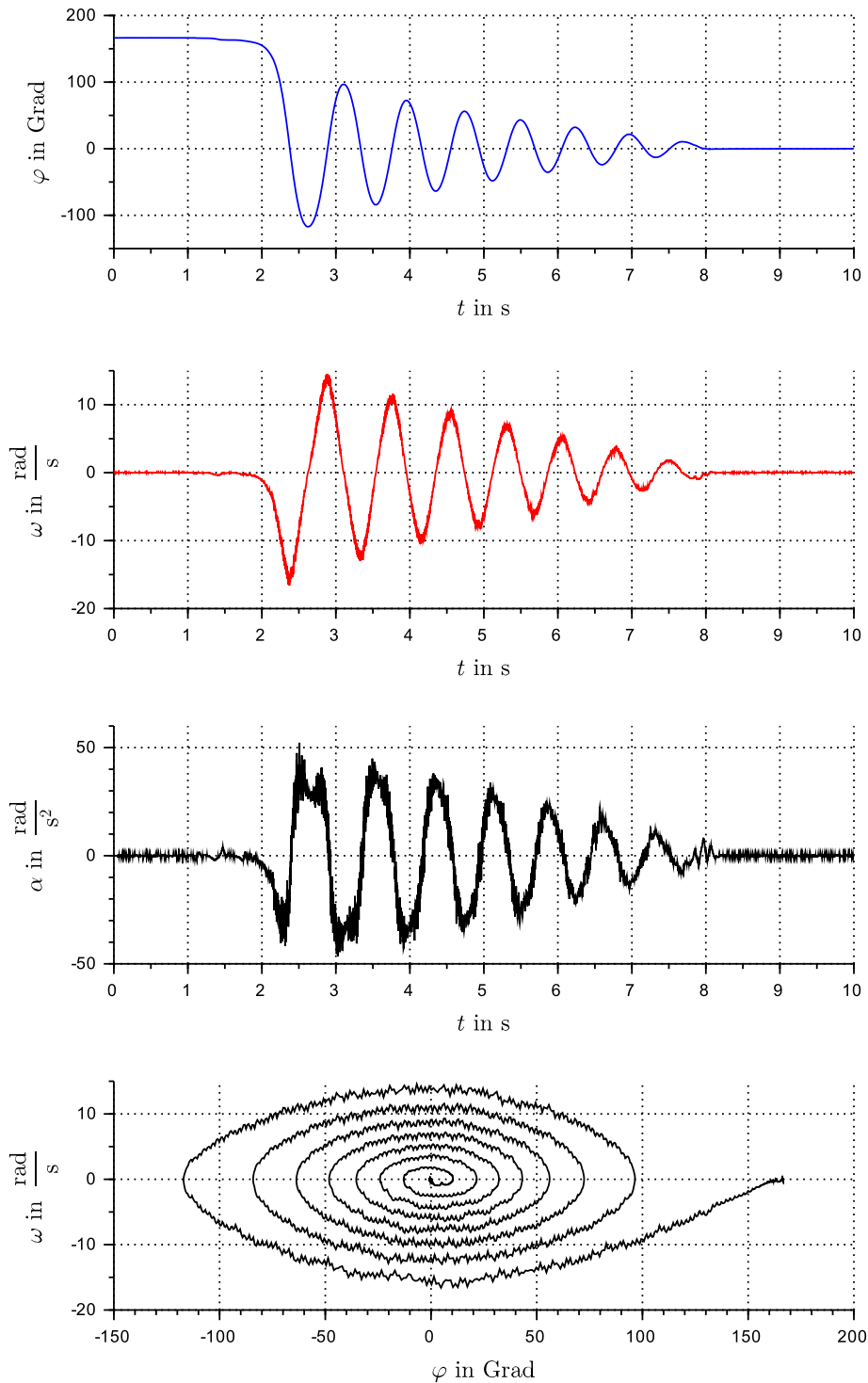


Abbildung 39: Messung der Trajektorie im Phasenraum eines gedämpften physikalischen Pendels der Länge $l = 106$ mm und der Masse $m = 5$ g. Der rote Verlauf zeigt die Winkelschwindigkeit $\omega(t)$, berechnet aus der BEMF des Motors. Daraus wurden der Winkelverlauf $\varphi(t)$ (blau) und die Winkelbeschleunigung $\alpha(t)$ berechnet. Das vierte Diagramm zeigt die Trajektorie mit dem Startpunkt $[180;0]$ im Phasenraum (ω, φ) .

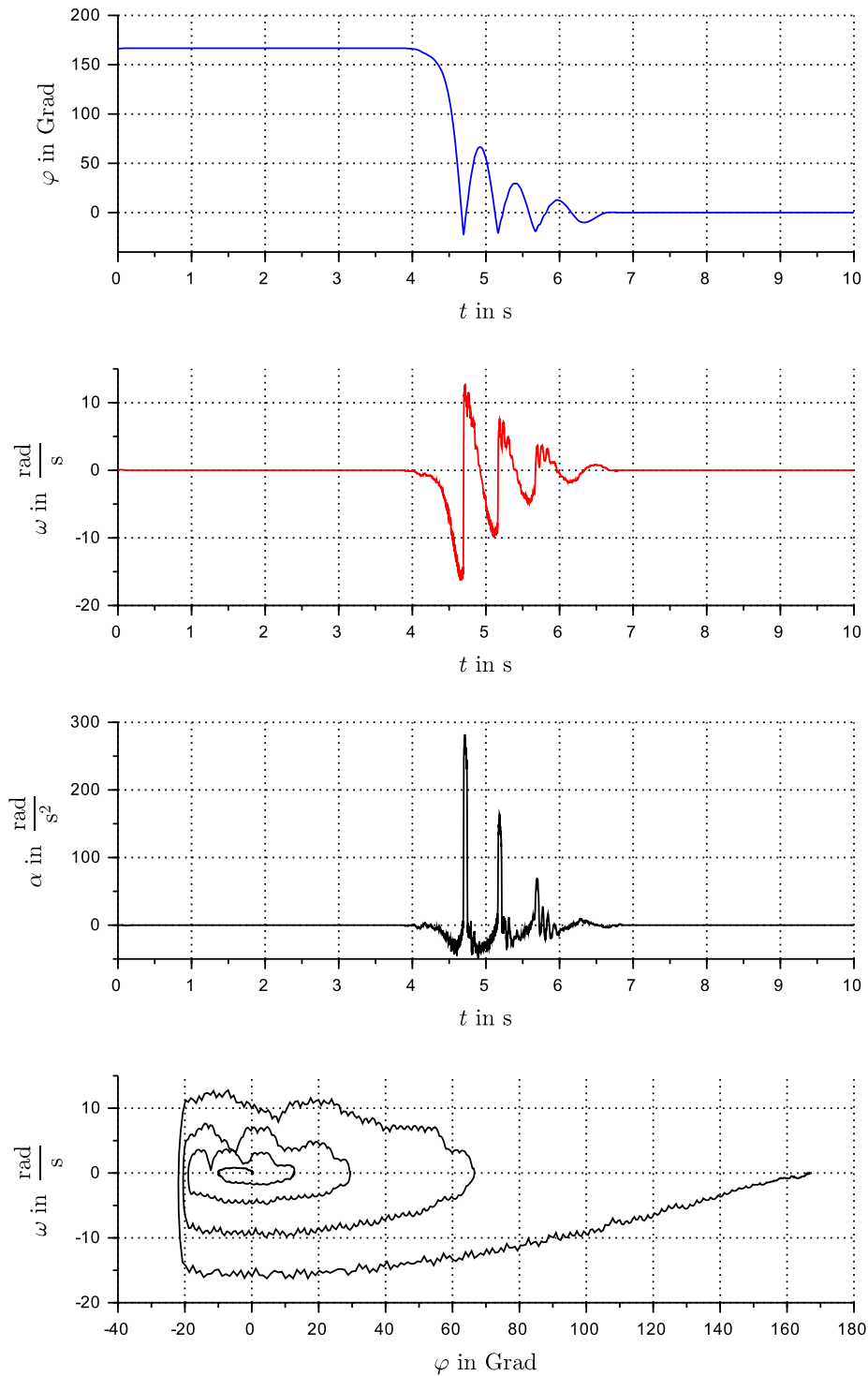


Abbildung 40: Messung der Trajektorie im Phasenraum eines gedämpften physikalischen Pendels der Länge $l = 106$ mm und der Masse $m = 5$ g mit einem mechanischen Anschlag. Der rote Verlauf zeigt die Winkelschwindigkeit $\omega(t)$, berechnet aus der BEMF des Motors. Daraus wurden der Winkelverlauf $\varphi(t)$ (blau) und die Winkelbeschleunigung $\alpha(t)$ berechnet. Das vierte Diagramm zeigt die Trajektorie mit dem Startpunkt $[180;0]$ im Phasenraum (ω, φ) .

Der in Abbildung 41 dargestellte Phasenraum eines reibungsfreien Pendels (mathematisches Pendel) dient dem Vergleich mit dem Phasenraum eines gedämpften Pendels (Abbildung 39). Die Trajektorien ohne Überschlagen verlaufen beim reibungsfreien Pendel nicht spiralförmig auf den Attraktor im Ursprung zu, sondern bilden einen periodischen Orbit. Die in rot dargestellte Trajektorie ist eine Separatrix, bei der das Pendel überschlägt und im Repellor für immer zum Stillstand kommt.

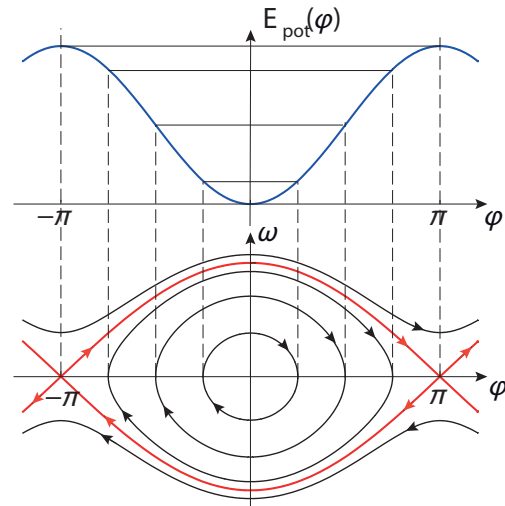


Abbildung 41: Phasenraum (unten) und Verlauf der potentiellen Energie (oben) eines konservativen Pendels. Vergleiche mit [4].

Die bislang dargestellten Phasenräume beziehen sich auf einen Motor. Bei Messungen an der 4BL mit zwei Motoren steigt die Dimensionalität des Phasenraumes von zwei Dimensionen auf vier Dimensionen (zwei Winkel und zwei Winkelgeschwindigkeiten) an. Diese vier Dimensionen sind grafisch nicht gut darstellbar.

Unter der Annahme, dass die Bewegungen mit der 4BL nur langsam ausgeführt werden, können die Winkelgeschwindigkeiten $\omega_1 = \omega_2 = 0$ gesetzt werden. Dadurch ist es möglich, die vier Dimensionen wieder auf zwei Dimensionen (φ_1 und φ_2) zu reduzieren. Dabei handelt es sich nicht mehr um den Phasenraum, sondern um den Aktuationsraum des Systems.

6.2 Anforderungen an den Regelungsmechanismus

Die Anwendungen von Regelungsmechanismen sind nahezu unbegrenzt. Der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Teststand bietet diverse Möglichkeiten zur Entwicklung von adaptiven Regelungsmechanismen. Angefangen bei Systemen mit einem Motor, wie dem physikalischen Pendel, bis hin zu Aufbauten mit vier oder mehr Aktuatoren, dessen Aktuationsräume durch individuell gestaltbare Getriebe beeinflusst werden.

Als Grundstein für weitere Forschungsprojekte wird ein adaptiver Regelungsmechanismus vorgestellt, der anhand der Aktuationsräume von zwei Motoren auf die Getriebevariante schließen kann. Dies ist eine grundlegende Form der Selbstexploration. Anhand dessen wird die Ansteuerung angepasst, um eine Bewegungsoptimierung zu erzielen.

Als Führungsgröße wird ein Geschwindigkeitsparameter an den Regler übergeben. Die Drehrichtung der Motoren wird durch die Umgebungsbedingungen des Systems bestimmt.

6.2.1 Richtungsumkehr bei mechanischen Anschlägen

Eine wichtige Funktion liegt darin, zu erkennen, warum das System zum Stillstand kommt. Dies kann im einfachsten Fall dadurch resultieren, dass der Motor nicht mehr angesteuert wird. Weitere Möglichkeiten sind aber auch, dass die aktuelle Ansteuerung ein anliegendes Drehmoment nicht überwinden kann oder der Motor gegen einen mechanischen Anschlag gefahren ist.

Der Unterschied zwischen dem mechanischen Anschlag und den anderen beiden Varianten liegt darin, dass die Geschwindigkeitsänderung nur bei einem Anschlag abrupt erfolgt.

Eine Anschlagserkennung war dadurch möglich, dass sich die BEMF in der Off-Time, abhängig vom anliegenden Drehmoment, verschiebt. Das Kapitel 4.2.3 lieferte bereits erste Erkenntnisse zu diesem Thema. Mit der Abbildung 42 wird die Abbildung 11b zugunsten der Nachvollziehbarkeit erneut abgebildet.

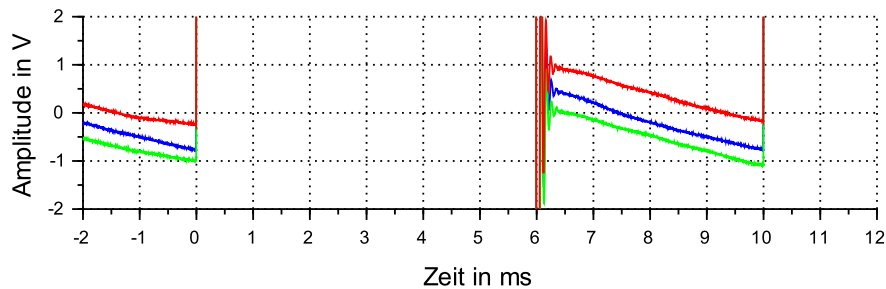


Abbildung 42: Messung der Klemmenspannung des Motors LEGO 71427, angesteuert mittels PWM bei 7 V, 100 Hz und einem Duty Cycle von 60% (blau: Blockierte Motorwelle, rot: Bewegung der Motorwelle mit dem Motordrehmoment, grün: Bewegung der Motorwelle gegen das Motordrehmoment)

Die drei Spannungsverläufe sind wie folgt zu interpretieren: Solange der Motor genügend Drehmoment erzeugen kann, um die Masse zu bewegen, gilt der rote Spannungsverlauf. Sobald das vom Motor aufgebraachte Drehmoment niedriger ist als das Lastmoment, erfolgt eine Rotation entgegen der Wunschrundrichtung und es gilt der grüne Spannungsverlauf. Ist das Motormoment gleich dem Lastmoment oder die Motorwelle durch einen Anschlag blockiert, so gilt der blaue Verlauf.

Bewegt sich eine Masse m mit der Geschwindigkeit \vec{v} , so hat dieses Objekt einen Impuls \vec{p} . Durch einen elastischen Stoß, wenn zum Beispiel ein Hebelarm gegen einen Anschlag stößt, wird die Richtung des Impulsvektors invertiert und der Betrag des Impulses bleibt unter Vernachlässigung der Verformungsenergie und Reibung gleich. Am Beispiel der Spannungsverläufe der BEMF in Abbildung 42 bedeutet der elastische Stoß durch einen mechanischen Anschlag einen schlagartigen Übergang vom roten in den grünen Verlauf. Desto stärker der elastische Stoß, desto größer ist der Sprung in der BEMF. Erfolgt ein Übergang vom roten in den blauen Verlauf, ist das vom Motor erzeugte Drehmoment nicht mehr groß genug, um die Masse zu bewegen oder der Stoß wurde stark gedämpft (*unelastischer Stoß*). Dies ermöglicht die Parametrisierung, wie stark der elastische Stoß erfolgen muss, damit er vom System detektiert wird. Dieses Verfahren wird folgend als „ChangeImpact“ bezeichnet.

Zur Bewegungsoptimierung wurde vergleichend ein Mechanismus untersucht, der die detektierten Anschläge nur bei jedem fünften Zyklus anfährt. In vier der fünf Durchgänge wird die Drehrichtung kurz vor dem erwarteten Anschlag umgekehrt. Das Antasten der Anschläge bei jedem fünften Zyklus dient der Erkennung, ob sich die Systemkonfiguration verändert hat. Dieser Mechanismus wird folgend als „ChangeBeforeImpact“ bezeichnet.

6.2.2 Erkennung der Konfiguration

Die Erkennung der Konfiguration wird bei viergliedrigen Koppelgetrieben (4BL) eingesetzt. Dabei wird für jeden Schenkel zwischen Kurbel (C) und Schwinge (R) unterschieden.

Als Basis wird auf den im vorherigen Kapitel erläuterten Algorithmus zur Anschlagserkennung zurückgegriffen. Die Unterscheidung zwischen Kurbel und Schwinge erfolgt anhand von einfachen Regeln. Sobald der letzte Anschlag um $\Delta\varphi > 360^\circ$ entfernt ist, handelt es sich zwangsläufig um eine Kurbel (C) und der zuvor detektierte Anschlag ist zu verwerfen. Immer wenn die Positionen der beiden Endlagen aktualisiert werden, handelt es sich um eine Schwinge (R).

Je nach Konfiguration werden die Motoren unterschiedlich angesteuert. Dies optimiert die Bewegung hinsichtlich einer gleichmäßigeren Bewegung, einer geringeren Geräuschemission sowie einem geringeren Energiebedarf.

Die Motoransteuerung erfolgt gemäß den Regeln in Tabelle 8.

Tabelle 8: Motoransteuerung des Regelungsmechanismus je nach Konfiguration des Viergelenkgetriebes.

Klassifikation	Konfiguration	Motoransteuerung
Klasse I	Kurbel/ Schwinge	Nur der Motor mit der Kurbel wird angesteuert. Bei einem Anschlag ändert er seine Drehrichtung. Der andere Motor wird in den Freilauf geschaltet.
Klasse II	Schwinge/ Schwinge	Beide Motoren werden angesteuert. Bei einem Anschlag ändert der betroffene Motor die Drehrichtung.
Klasse III	Kurbel/ Kurbel	Beide Motoren werden angesteuert. Die Erkennung von Singularitäten wird ausgeführt.

Die Konfigurationserkennung und das Umschalten der Motoransteuerung erfolgt zur Laufzeit des Systems.

6.2.3 Erkennung von Singularitäten

Singularitäten sind Umschlagpunkte, bei denen sich eine Bewegung grundlegend verändert. Da sie ausschließlich bei Viergelenkgetrieben der Klasse III auftreten, werden nur Systeme mit zwei Kurbeln auf die Positionen der Singularitäten untersucht.

Die Erkennung wird nach folgendem Prinzip durchgeführt:

Initial wird der Motor 1 mit einer einstellbaren Pulsweitenmodulation PWM_1 und der Motor 2 mit $PWM_2(PWM_1, \omega_2)$ angesteuert.

$$PWM_2 = -\text{sgn}(\omega_2(t)) \cdot \frac{PWM_1}{8} \quad (36)$$

Immer wenn $\text{sgn}(\omega_2(t)) \neq \text{sgn}(\omega_2(t-1))$ gültig ist, tritt eine Singularität auf. Das System schlägt um und die aktuellen Winkel φ_1 und φ_2 werden gespeichert. Wird dieses Schema zweimal durchgeführt, sind die beiden Singularitäten lokalisiert. Abbildung 43 zeigt die zugehörige State-Machine.

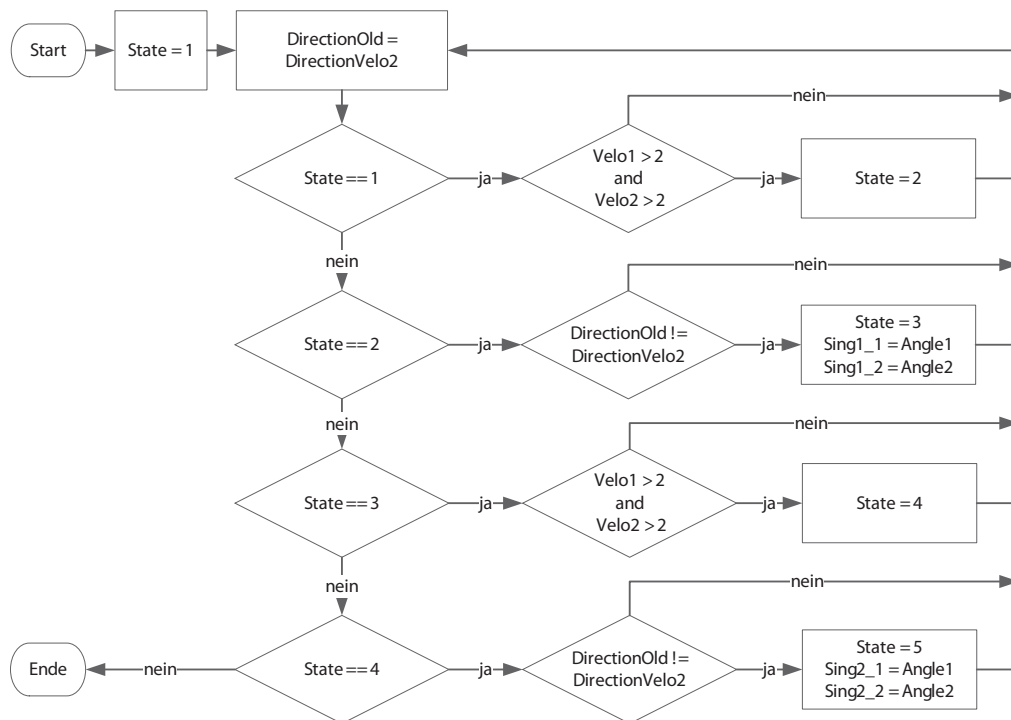


Abbildung 43: State-Machine zur Positionsbestimmung der Singularitäten eines Viergelenkgetriebes der Klasse III.

Bei der Umsetzung in die Praxis hat sich das mechanische Spiel im Koppelgetriebe als problematisch erwiesen, da sich das Getriebe in den Bereichen der Singularitäten schnell verkeilt und die Bewegung dadurch sperrt. Dieses Problem kann umgangen werden, indem die Ansteuerung der PWM modifiziert wird. Dazu wurde zwischen dem antreibenden Spannungsimpuls t_{drive} und dem Freilauf t_{coast} des Motors eine Bremsphase t_{break} eingefügt. Für die Dauer der Bremsphase t_{break} werden die Motorklemmen kurzgeschlossen. Die Ansteuerung ist in Abbildung 44 dargestellt.

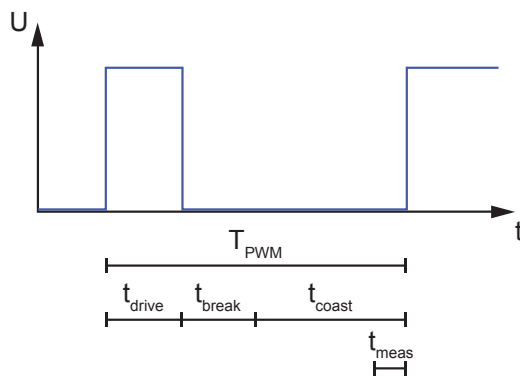


Abbildung 44: U-t-Diagramm zur Darstellung der PWM bei der Erkennung von Singularitäten mit den entsprechenden Bezeichnungen.

$$f_{\text{PWM}} = 100 \text{ Hz}$$

$$T_{\text{PWM}} = 10 \text{ ms}$$

$$\text{DC} = \frac{t_{\text{drive}}}{T_{\text{PWM}}}$$

$$t_{\text{coast}} = t_{\text{drive}} + t_{\text{break}} = \frac{T_{\text{PWM}}}{2}$$

$$t_{\text{break}} = 5 \text{ ms} - t_{\text{drive}}$$

$$t_{\text{meas}} = 1 \text{ ms}$$

$$0\% \leq \text{DC} \leq 45\%$$

Diese Ansteuerungsart wird ausschließlich bei der Erkennung der Singularitäten eingesetzt. In den anderen Fällen bleibt es bei der auf Seite 49 vorgestellten Ansteuerungsart ohne Bremsbetrieb. Dies ist notwendig, da der zuvor entwickelte Algorithmus zur Anschlagserkennung auf der Richtungsänderung des Impulsvektors basiert. Bei der Ansteuerung mit Bremsbetrieb wird bei einem Anschlag neben der Richtung auch der Betrag des Impulsvektors beeinflusst.

Um eine flüssige parallele Bewegung ohne ein Umschlagen in die antiparallele Bewegung zu realisieren, wird Motor 1 permanent und Motor 2 nur in der nahen Umgebung der Singularitäten mit der gleichen Drehrichtung wie Motor 1 angesteuert. In den anderen Bereichen dreht Motor 2 im Freilauf.

Bei Versuchen mit der antiparallelen Bewegung wurde deutlich, dass die Winkelgeschwindigkeiten von Motor 1 und Motor 2 von den Schenkelpositionen abhängig sind. In Abbildung 45 wird der linke Schenkel um 180° gedreht, wobei, bedingt durch

die Zwangsführung des Koppelgetriebes, der rechte Schenkel um 90° gedreht wird. Die Winkelgeschwindigkeit des linken Motors muss in diesem Bereich folglich höher sein. Wird immer nur der Motor mit dem höheren Betrag der Winkelgeschwindigkeit angetrieben, ist eine flüssige antiparallele Bewegung ohne ein Umschlagen in die parallele Bewegung gewährleistet.

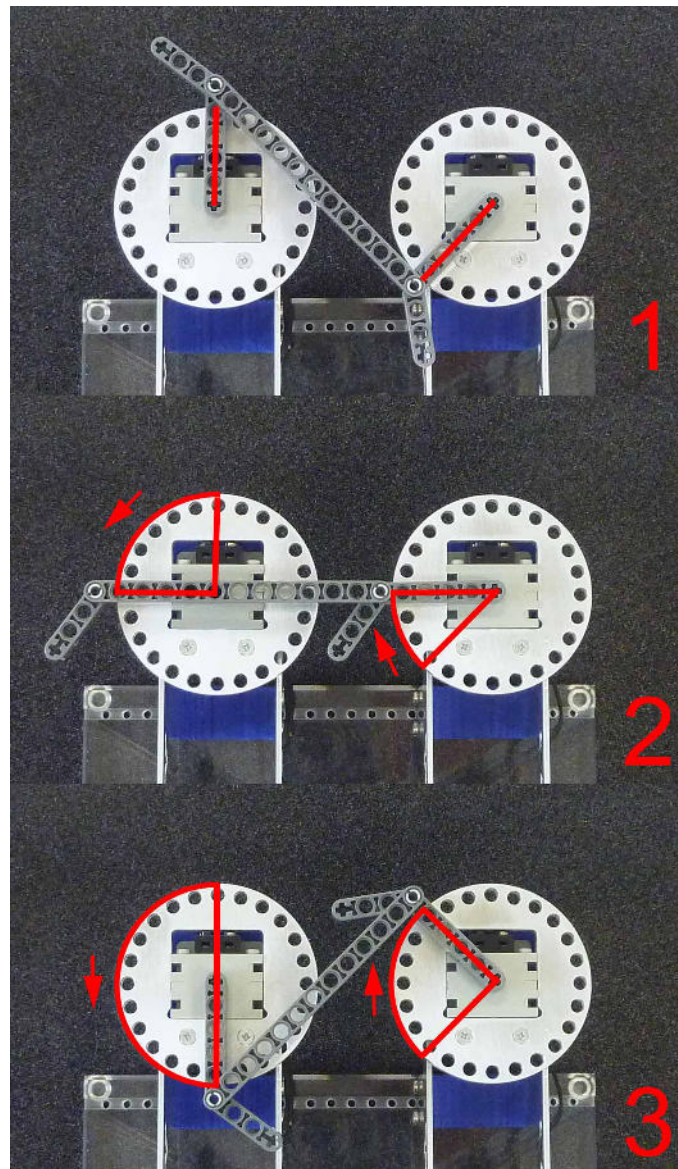


Abbildung 45: Aufbau eines Viergelenkgetriebes in Parallelkurbelkonfiguration. Bei der antiparallelen Bewegung dreht der Schenkel mit dem gestreckten Gelenk (Position 2, rechts) langsamer als der Motor mit dem geknickten Gelenk (Position 2, links). Bei einer Winkelveränderung des linken Motors von 180° dreht der rechte Motor um 90° . Die in rot überlagerte Zeichnung hebt die Bewegung der beiden Schenkel hervor.

main

Das main-Modul ist das oberste VHDL-Modul in der Hierarchieebene. Es bildet in Kombination mit dem *constraints-file* die Schnittstelle zwischen Hardware und Hardwarebeschreibung. Das *constraints-file* beschreibt, wie ein Hardwarepin mit den Bezeichnern in VHDL verknüpft wird und nach welchen elektrischen Spezifikationen dieser konfiguriert werden soll. Neben den folgend aufgeführten Modulen und dessen Verknüpfungen untereinander werden im main-Modul auch Funktionen für die Konfigurations- und Singularitätenerkennung bereitgestellt.

ClockTree

Im ClockTree wird der eingehende 125-MHz-Takt in tiefere Frequenzen gewandelt. Dazu werden neben einfachen Teilern auch PLLs¹⁷ eingesetzt. Das Modul erzeugt folgende Taktfrequenzen: 75 MHz (VGA), 20 MHz (Control, Motorinterface), 7,372 MHz (SerialCom) und 500 kHz (Midi).

Midi

Im Midi-Modul wird der vom PMod Midi eingehende serielle asynchrone Datenstrom ausgewertet. Entsprechend der Konfiguration liefert dieses Modul für jeden Parameterkanal einen 7-Bit-Vektor als Eingabewert zurück.

SerialCom

Das Modul für die serielle Schnittstelle hat zwei 19 Bit breite Eingangsvektoren. Innerhalb des Moduls wird die binäre Zahl in eine sechsstellige Dezimalzahl konvertiert und beide Zahlen nacheinander als ASCII-Zeichen über einen digitalen Ausgang an den PMod mit dem UART-USB-IC des Herstellers FTDI weitergeleitet. Die Baudrate beträgt 115200 baud. Gesendet wird mit 8 Datenbits, einem Stopbit und ohne Parität. Die Daten werden immer dann gesendet, wenn das SerialCom-Modul von einem anderen Modul getriggert wird. Während die Daten konvertiert und gesendet werden, dürfen die Eingangsvektoren nicht verändert werden. Dies wird über ein vom Modul bereitgestelltes Busy-Flag gewährleistet.

VGA

Das VGA-Modul erzeugt einerseits die Timings für ein VGA-Anzeigegerät mit der Auflösung 1024×768 Pixel und einer Bildwiederholungsrate von 70 Hz, andererseits auch die darzustellenden Elemente. Standardmäßig wird ein hellgrauer Hintergrund mit einer dunkelgrauen Gitterstruktur angezeigt. Bislang implementierte Kompo-

¹⁷PLL: Phase Locked Loop

nenten sind y-t-Diagramme, Balkenanzeigen, sechsstellige vorzeichenbehaftete Dezimalanzeigen und Strings im ASCII-Format. Dieses Modul benötigt im Vergleich zu den anderen Modulen dieser Hierarchieebene mit Abstand am meisten Ressourcen des FPGAs.

Motorinterface

Das Motorinterface ist die Schnittstelle zwischen dem Regelungsmechanismus und dem PMod Motor. Die Funktionen dieses Moduls sind stichpunktartig aufgeführt:

- PWM-Timings generieren
- Alle 1 ms die Motorklemmenspannung messen
- Alle 10 ms in der coast-Time der PWM die Motorklemmenspannung messen
- Ansteuerung des Motors gemäß Duty Cycle und Modus (Drehen links, Drehen rechts, Bremsen, Freilauf)
- Filtern der Motorklemmenspannung mittels IIR-Filter
- Integration der Motorklemmenspannung
- Konfiguration des ADCs
- Erkennung von mechanischen Anschlägen
- Speichern der Position von mechanischen Anschlägen
- H-Brücke (de-)aktivieren
- Offset-Kompensation der Motorklemmenspannung

Durch die Nutzung der externen 20-MHz-Clock für die ADCs können bis zu vier Motor PMods am ZYBO angeschlossen werden, die zeitsynchron ihre Daten senden.

Control

In dem Control-Modul erfolgt die Erkennung der Konfiguration des Motors (Kurbel oder Schwinge).

Der Vorteil dieser Modularität liegt darin, dass für einen weiteren Motor die Module „Motorinterface“ und „Control“ lediglich ein weiteres Mal eingebunden werden müssen.

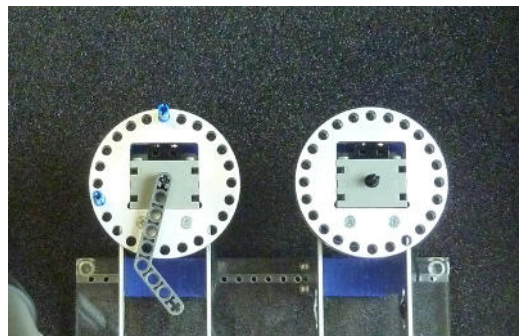
6.3 Testfälle für den Regelungsmechanismus

Um den adaptiven Regelungsmechanismus systematisch zu testen, wurden vier Testfälle ausgewählt.

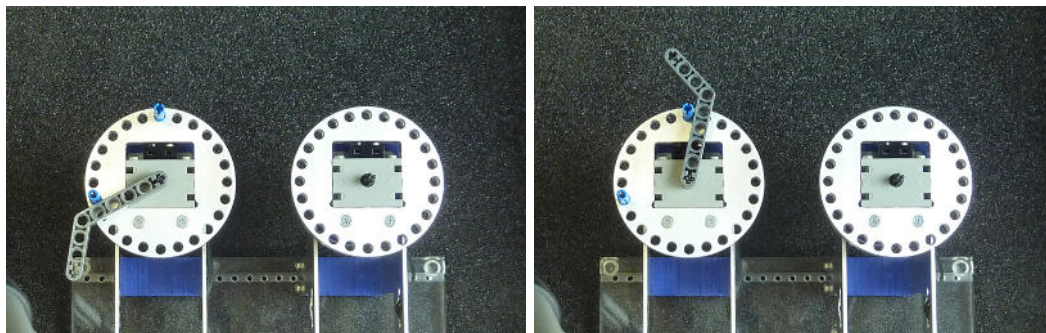
Alle vier Testfälle werden in der horizontalen Ebene aufgebaut, sodass die Erdanziehungskraft keinen Einfluss auf die Bewegung hat. Der erste Testfall wird mit einem einzelnen Motor aufgebaut. Die Testfälle 2 bis 4 sind unterschiedliche Konfigurationen der 4BL. Der Motorwellenabstand ist bei allen Testfällen identisch.

Testfall 1: Hebelarm

Der erste Testfall beschreibt einen Hebelarm, der durch zwei mechanische Anschläge in seinem Bewegungsraum eingeschränkt wird. Der Bewegungsraum beträgt 255° .



(a) Hebel zwischen den Anschlägen



(b) Hebel an Anschlag 1

(c) Hebel an Anschlag 2

Abbildung 47: Darstellung des Testfalls 1 in der Draufsicht. Die Konfiguration besteht aus einem einzelnen Hebel mit zwei Anschlägen. Die Anschläge sind durch blaue Stifte in dem linken Lochkranz ausgeführt. Der rechte Motor wird nicht eingesetzt.

Sobald ein Anschlag angefahren wird, schaltet der Regelungsmechanismus die Drehrichtung um. Die Messergebnisse sind der Abbildung 48 zu entnehmen.

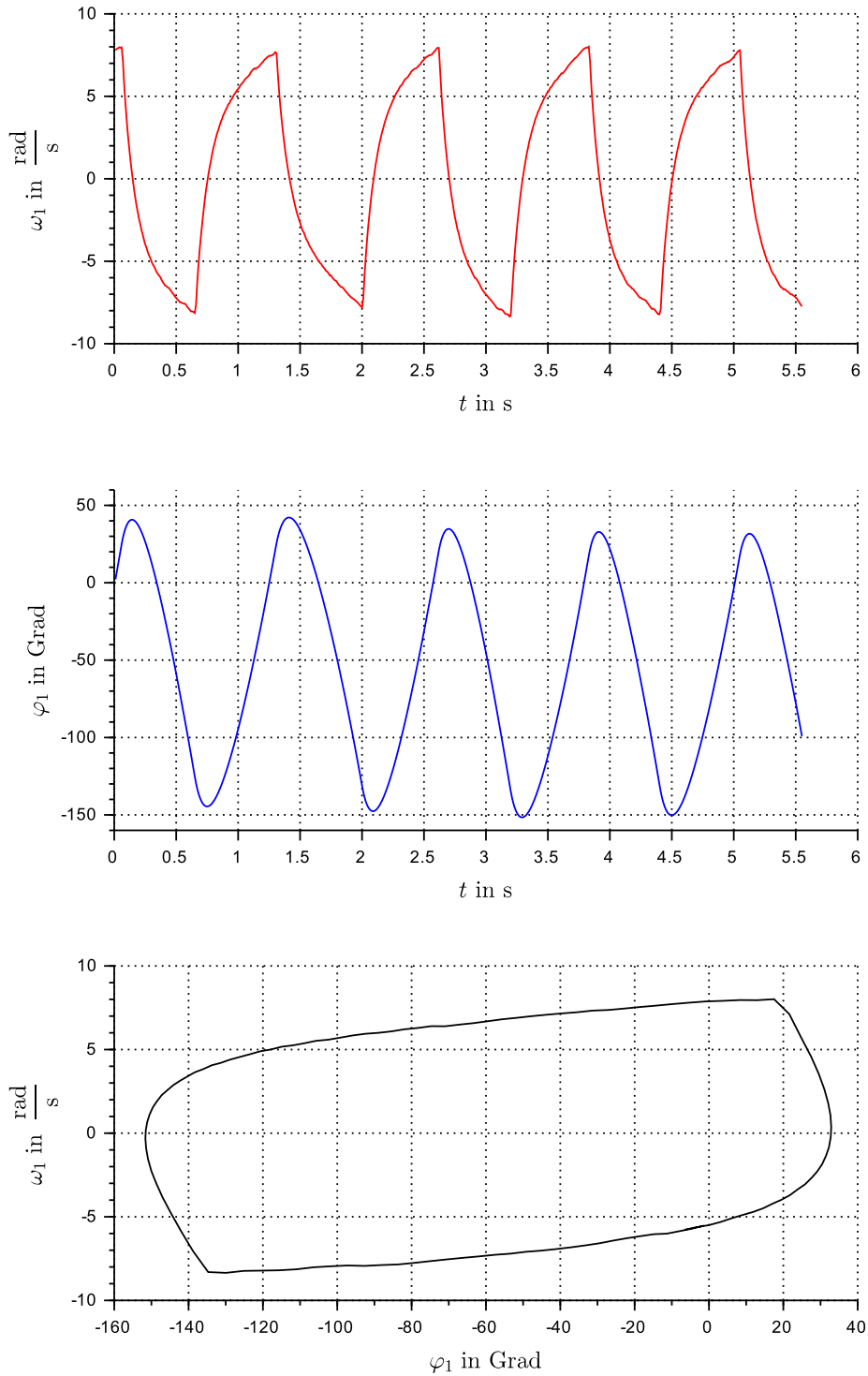
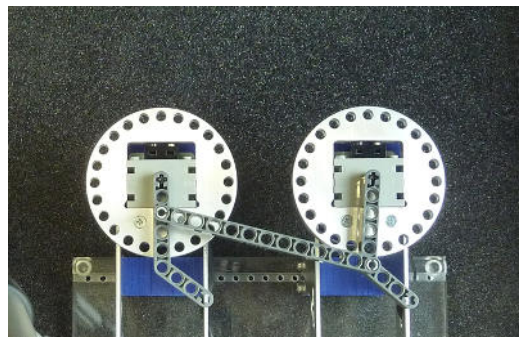


Abbildung 48: Messergebnisse zum Testfall 1. Ein Aktuator mit einem Hebelarm, dessen Aktuationsraum durch zwei Anschläge eingeschränkt wird. Der Geschwindigkeitsverlauf $\omega_1(t)$ (rot) wurde anhand der BEMF berechnet. Die Integration der Winkelgeschwindigkeit ergibt den Verlauf des Winkels $\varphi_1(t)$ (blau). Das untere Diagramm zeigt die Trajektorie im Phasenraum (ω_1, φ_1) (schwarz).

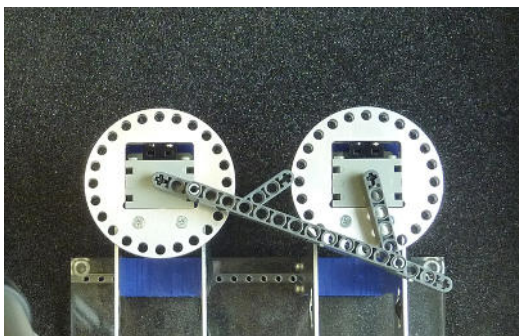
Der oszillierende Verlauf des Winkels $\varphi_1(t)$ und der Winkelgeschwindigkeit $\omega_1(t)$ führt zu einem periodischen Orbit im Phasenraum (ω_1, φ_1) .

Testfall 2: Kurbelschwinge

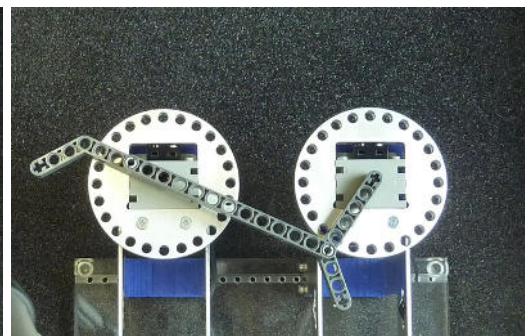
Der Testfall 2 entspricht nach der Klassifikation von Barker [2] einem Viergelenkgetriebe der Klasse I. Die Schenkel am linken und am rechten Motor sind über eine Koppel verbunden. Die beiden Gelenke der Koppel sind drehbar gelagert. Aufgrund der gewählten Gliedlängen ist der linke Schenkel eine Kurbel (C) und der rechte Schenkel eine Schwinge (R). Während die Kurbel endlos rotieren kann, ist die Bewegung der Schwinge auf einen Bereich von ca. 45° begrenzt. Die Endlagen sind in Abbildung 49 b und c dargestellt.



(a) Zwischenposition der Schwinge



(b) Endposition 1 der Schwinge



(c) Endposition 2 der Schwinge

Abbildung 49: Darstellung des Testfalls 2 in der Draufsicht. Die Konfiguration des Viergelenkgetriebes erfolgt als Kurbelschwinge (CR).

Die Messergebnisse zu Testfall 2 sind in der folgenden Abbildung 50 in zwei Spalten aufgeteilt. Die linke Spalte enthält die Messergebnisse des linken Motors (1) und die rechte Spalte die Messergebnisse des rechten Motors (2).

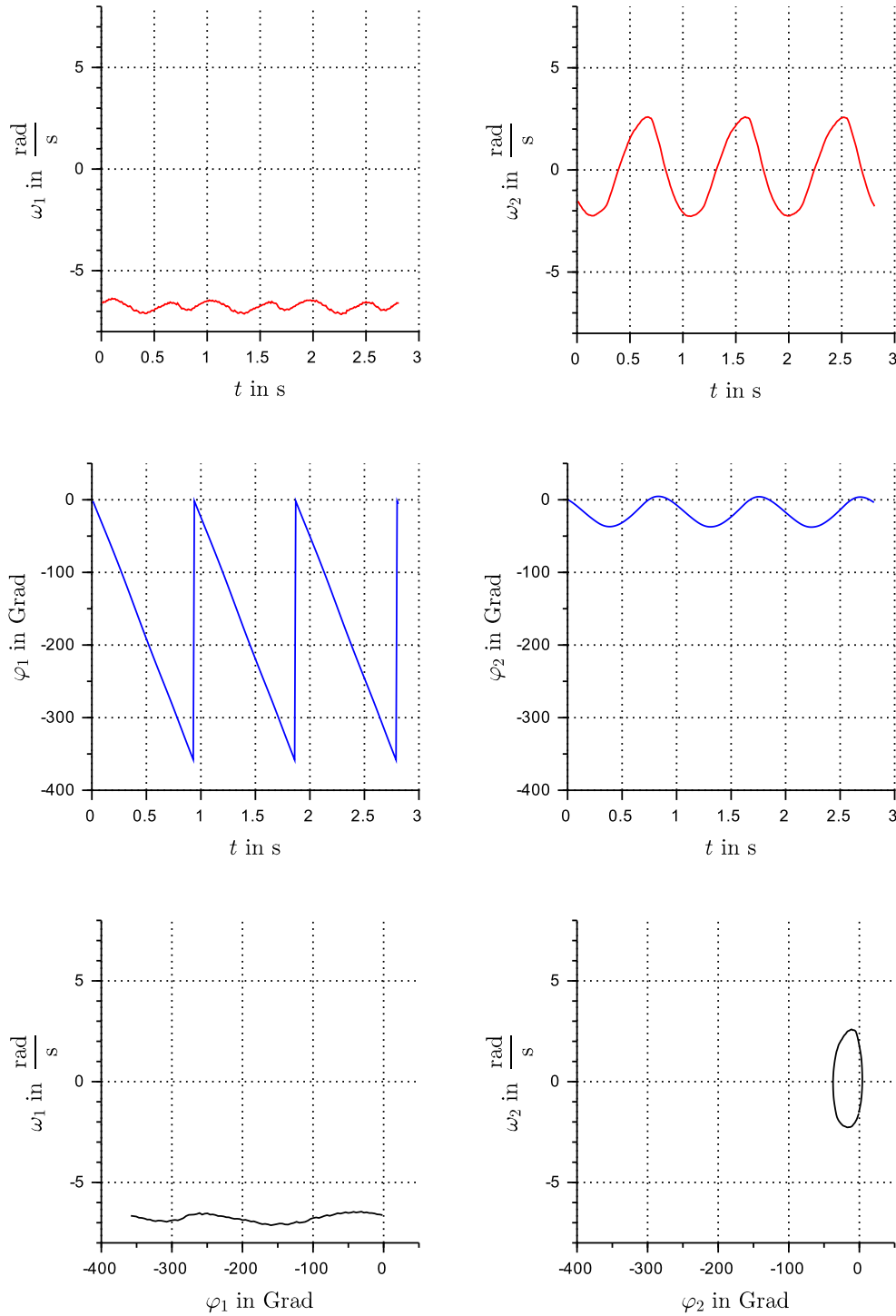


Abbildung 50: Messergebnisse zum Testfall 2 mit der Konfiguration eines Viergelenkgetriebes als Kurbelschwinge (CR). Die linke Spalte mit den Indizes 1 zeigt den linken Motor und die rechte Spalte mit den Indizes 2 den rechten Motor. Der Geschwindigkeitsverlauf $\omega(t)$ (rot) wurde anhand der BEMF berechnet. Die Integration der Winkelgeschwindigkeit ergibt den Verlauf des Winkels $\varphi(t)$ (blau). Die unteren Diagramme zeigen die Trajektorien im Phasenraum (ω, φ) (schwarz).

Im Phasenraum des rechten Motors (2) ist, ähnlich wie beim Testfall 1, der periodische Orbit der oszillierenden Bewegung zu erkennen.

Das Auftragen des Winkels φ_2 über den Winkel φ_1 ergibt den Aktionsraum (φ_2, φ_1) dieser Konfiguration.

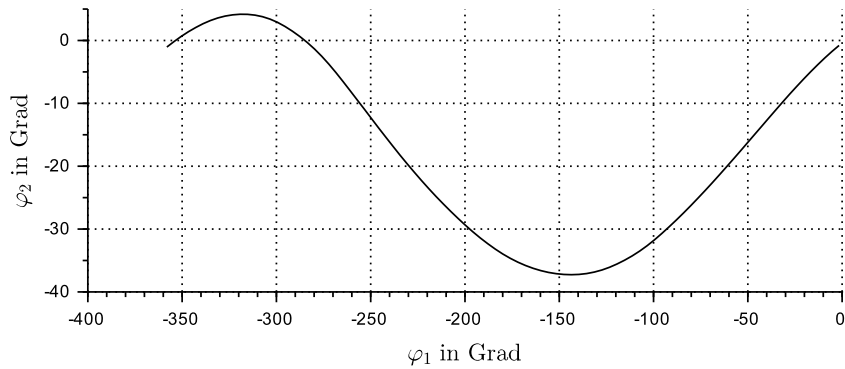


Abbildung 51: Darstellung des Aktionsraums zum Testfall 2 in der ebenen Darstellung. Der Winkel des linken Motors ist φ_1 , der des rechten Motors ist φ_2 .

Da der linke Motor endlos rotieren kann, gilt für den Winkel $\varphi_1(360^\circ) \equiv 0^\circ$. Um dies grafisch besser darzustellen, wurde der Aktionsraum folgend auf einer Zylinderoberfläche aufgespannt. Der Winkel φ_1 wird über den Winkel um die Hochachse dargestellt und der Winkel φ_2 auf der Hochachse direkt aufgetragen. Die Periodizität des Winkels φ_1 wird in dieser Darstellung besser deutlich.

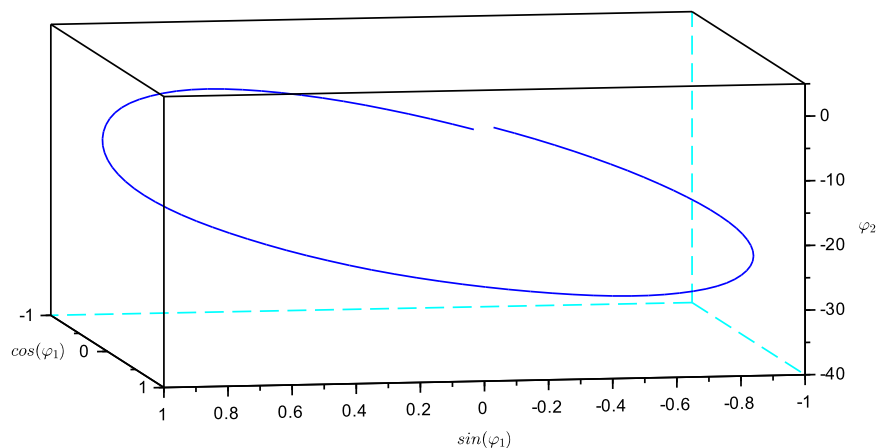
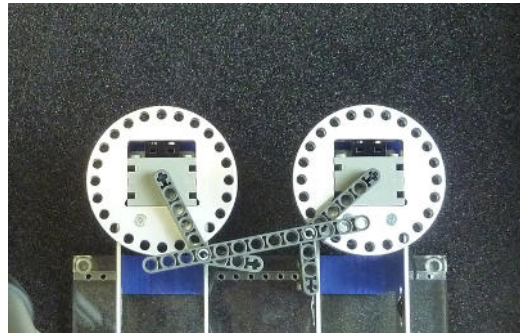


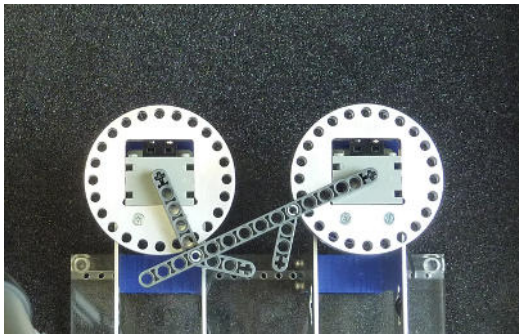
Abbildung 52: Darstellung des Aktionsraums zum Testfall 2, aufgespannt auf einer Zylinderoberfläche. Der Winkel des linken Motors φ_1 ist durch den Winkel um die Hochachse dargestellt. Der Winkel des rechten Motors φ_2 ist auf der Hochachse aufgetragen.

Testfall 3: Doppelschwinge

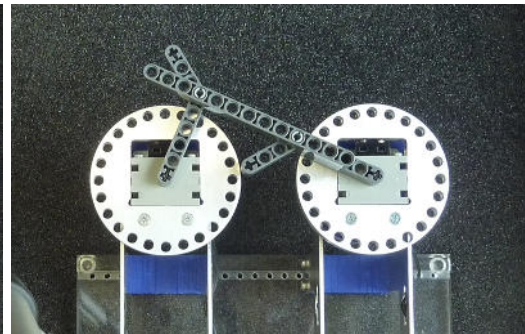
Der Testfall 3 entspricht laut Barker [2] einem Viereckengetriebe der Klasse II. Die beiden Glieder an den Motorwellen sind Schwingen mit einem Bewegungsraum von jeweils ca. 135° . Die Abbildungen 53 b und c zeigen die beiden Endlagen der linken Schwinge und die Abbildungen 53 d und e zeigen die Endlagen der rechten Schwinge.



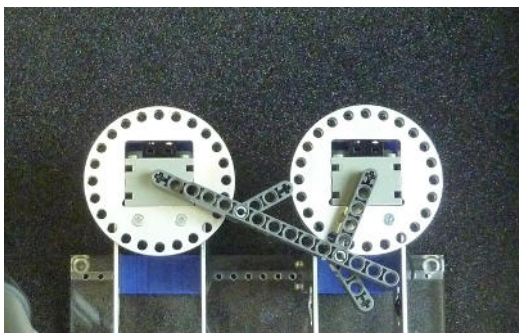
(a) Konfiguration in einer Zwischenposition



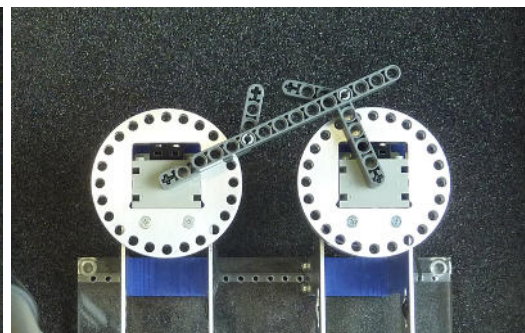
(b) Endposition 1 der linken Schwinge



(c) Endposition 2 der linken Schwinge



(d) Endposition 1 der rechten Schwinge



(e) Endposition 2 der rechten Schwinge

Abbildung 53: Darstellung des Testfalls 3 in der Draufsicht. Die Konfiguration des Viereckengetriebes erfolgt als Doppelschwinge (RR).

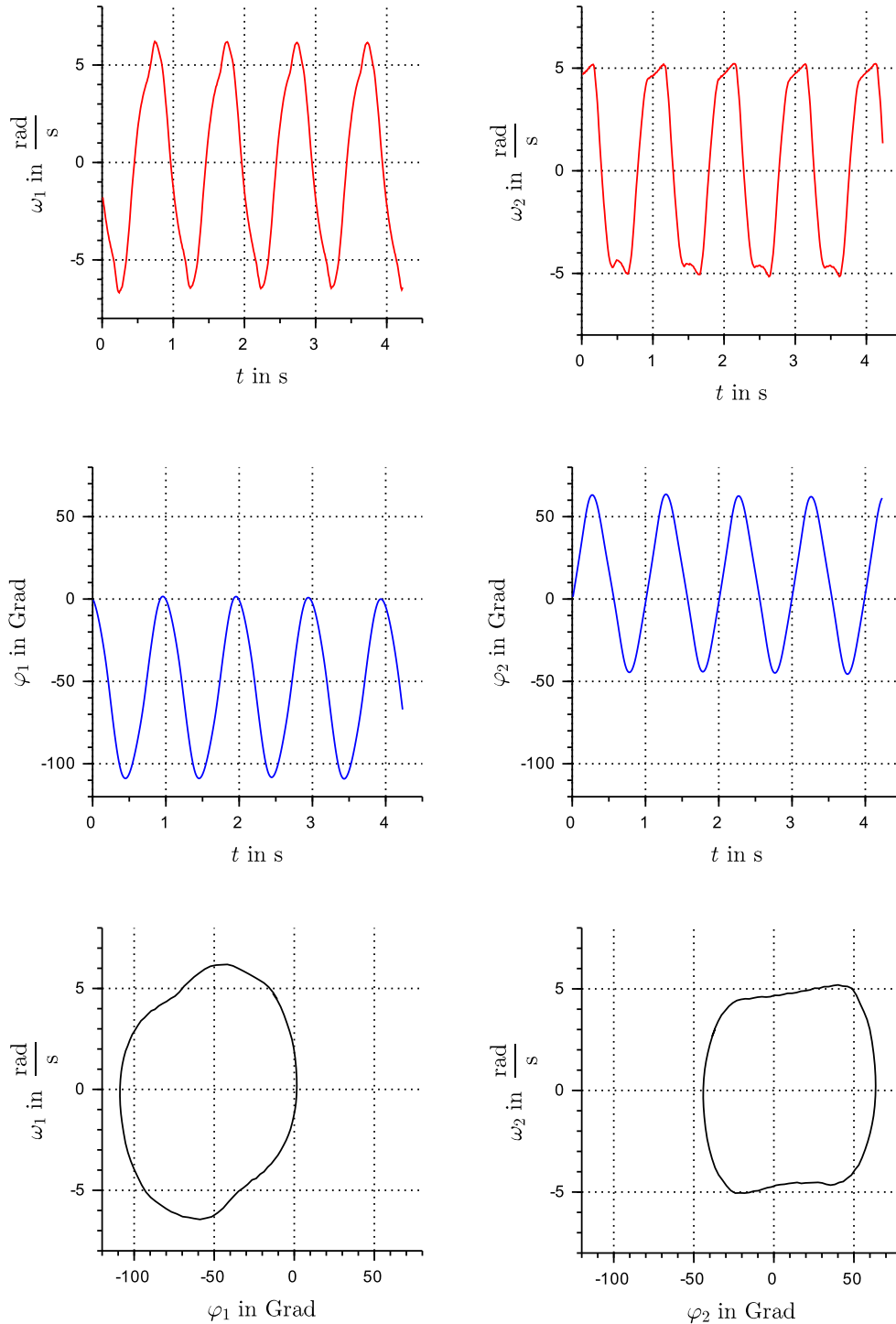


Abbildung 54: Messergebnisse zum Testfall 3 mit der Konfiguration eines Viergelenkgetriebes als Doppelschwinge (RR). Die linke Spalte mit den Indizes 1 zeigt den linken Motor und die rechte Spalte mit den Indizes 2 den rechten Motor. Der Geschwindigkeitsverlauf $\omega(t)$ (rot) wurde anhand der BEMF berechnet. Die Integration der Winkelgeschwindigkeit ergibt den Verlauf des Winkels $\varphi(t)$ (blau). Die unteren Diagramme zeigen die Trajektorien im Phasenraum (ω, φ) (schwarz).

Wie die Messergebnisse aus Abbildung 54 bestätigen, kann keiner der beiden Motoren umlaufen. Aus diesem Grund sind im Testfall 3 beide Trajektorien im zweidimensionalen Phasenraum geschlossen und bilden einen periodischen Orbit. Im Gegensatz zum Testfall 2 ist die Trajektorie bereits im zweidimensionalen Aktionsraum (φ_2, φ_1) (Abbildung 55) geschlossen dargestellt.

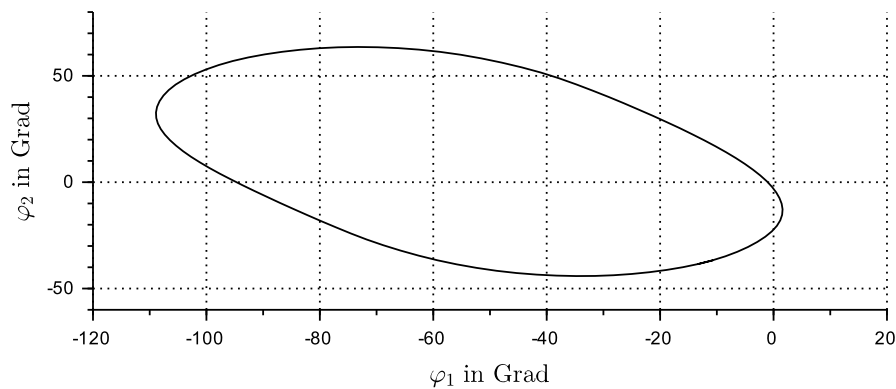


Abbildung 55: Darstellung des Aktionsraums zum Testfall 3 in der ebenen Darstellung. Der Winkel des linken Motors ist φ_1 , der des rechten Motors ist φ_2 .

Wird der Aktionsraum auf eine Zylinderoberfläche aufgespannt, ist die Trajektorie nicht umlaufend.

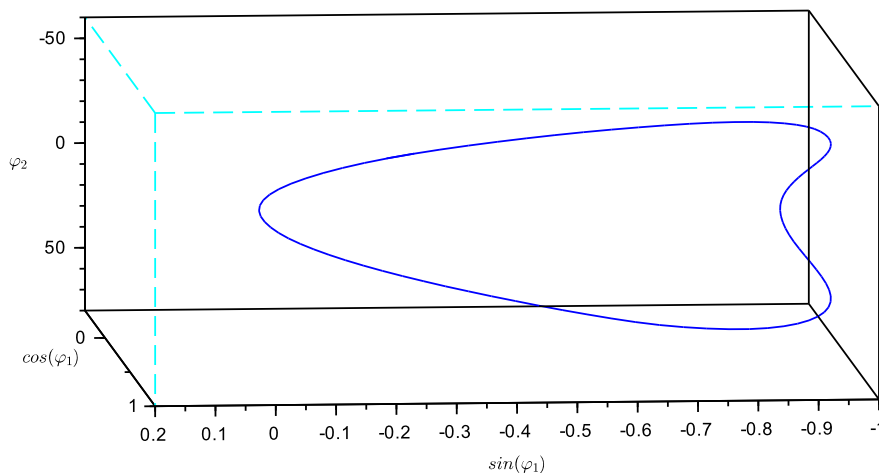
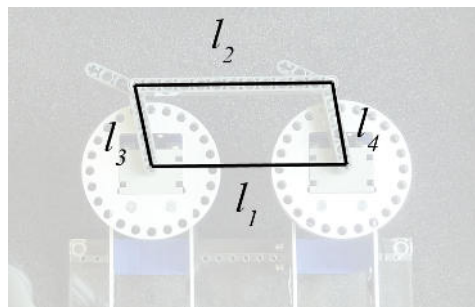


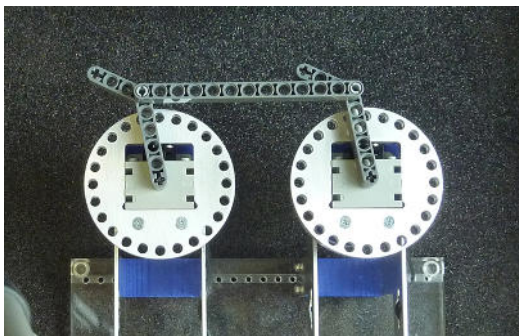
Abbildung 56: Darstellung des Aktionsraums zum Testfall 3, aufgespannt auf einer Zylinderoberfläche. Der Winkel des linken Motors φ_1 ist durch den Winkel um die Hochachse dargestellt. Der Winkel des rechten Motors φ_2 ist auf der Hochachse aufgetragen.

Testfall 4: Parallelkurbel

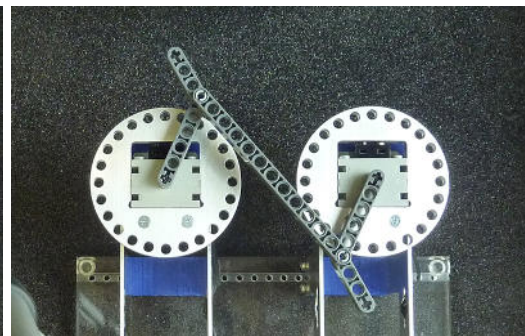
Die Viereckgetriebe der Klasse III sind nach Barkers Klassifikation [2] die sogenannten Spezialfälle, da sie Singularitäten in der Bewegung aufweisen. Die Parallelkurbel ist einer dieser Spezialfälle. Bei dieser Konfiguration hat der Motorachsenabstand l_1 die gleiche Länge wie die Koppel l_2 . Die beiden Schenkel l_3 und l_4 sind ebenfalls gleich lang, jedoch kürzer als l_1 und l_2 . Somit gilt: $l_1 = l_2 > l_3 = l_4$.



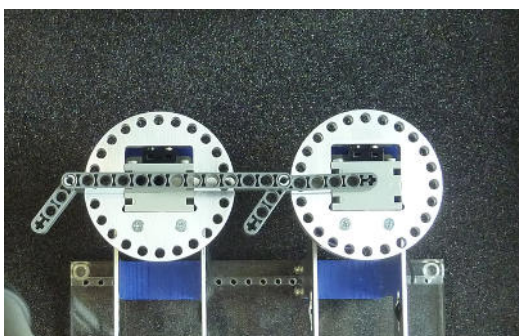
(a) Bezeichnungen der vier Glieder



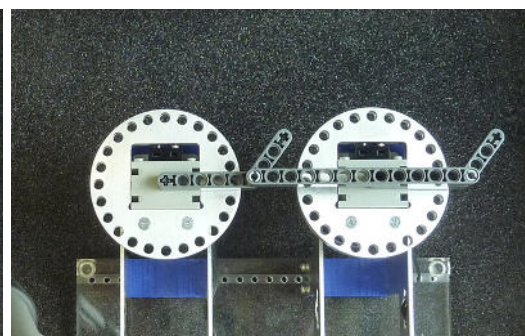
(b) Parallele Bewegung der Kurbeln



(c) Antiparallele Bewegung der Kurbeln



(d) Position der ersten Singularität



(e) Position der zweiten Singularität

Abbildung 57: Darstellung des Testfalls 4 in der Draufsicht. Das Viereckgetriebe ist als Parallelkurbel (CC) konfiguriert.

Wie Abbildung 57 b zeigt, spannen die vier Glieder initial ein Parallelogramm auf. Bei den Positionen aus Abbildung 57 d und e treten erstmals die zuvor angesprochenen Singularitäten auf. An diesen Positionen ist anhand eines Standbildes nicht zu erkennen, ob sich die Schenkel weiterhin parallel bewegen (Abbildung 57 b) oder zu einer antiparallelen Bewegung (Abbildung 57 c) umschlagen.

Zur Messung der Trajektorie im Aktuationsraum wurde der Regelungsmechanismus zur Anschlagserkennung eingesetzt und ein Ausschnitt gewählt, bei dem sich das Getriebe zufällig an einer Singularität verkeilt und von der parallelen in die antiparallele Bewegung umschlägt. Die Messergebnisse in Abbildung 59 sind wie gewohnt in zwei Spalten aufgeteilt.

Initial befindet sich das System gemäß Abbildung 57 b in der Parallelkurbelkonfiguration. Wie die Verläufe von Winkelgeschwindigkeit ω und Winkel φ zeigen, beginnt das System mit einer parallelen Bewegung der beiden Motorwellen. Bei $t \approx 4,3$ s erreicht Motor 1 eine volle Umdrehung ($|\varphi_1| = 360^\circ$) und springt zurück auf $\varphi_1 = 0^\circ$. Motor 2 hingegen dreht von da an in die entgegengesetzte Drehrichtung. Das Getriebe ist in eine antiparallele Bewegung umgeschlagen.

Anhand des Aktuationsraumes in Abbildung 58 ist zu sehen, dass die beiden Winkel φ_1 und φ_2 bei der parallelen Bewegung immer gleich sind (Verlauf von unten links nach oben rechts). Bei der antiparallelen Bewegung hingegen verläuft die Trajektorie nicht linear (Verlauf von oben links nach unten rechts). Diese Bewegung ist bereits in Abbildung 45 auf Seite 65 thematisiert worden.

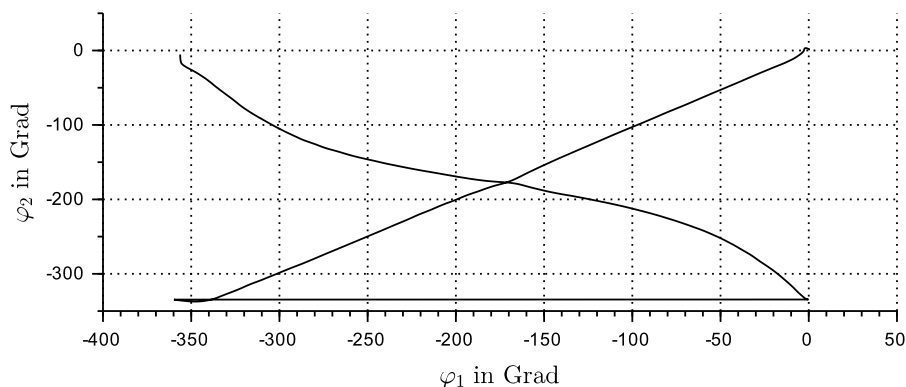


Abbildung 58: Darstellung des Aktuationsraums zum Testfall 4 in der ebenen Darstellung. Der Winkel des linken Motors ist φ_1 , der des rechten Motors ist φ_2 .

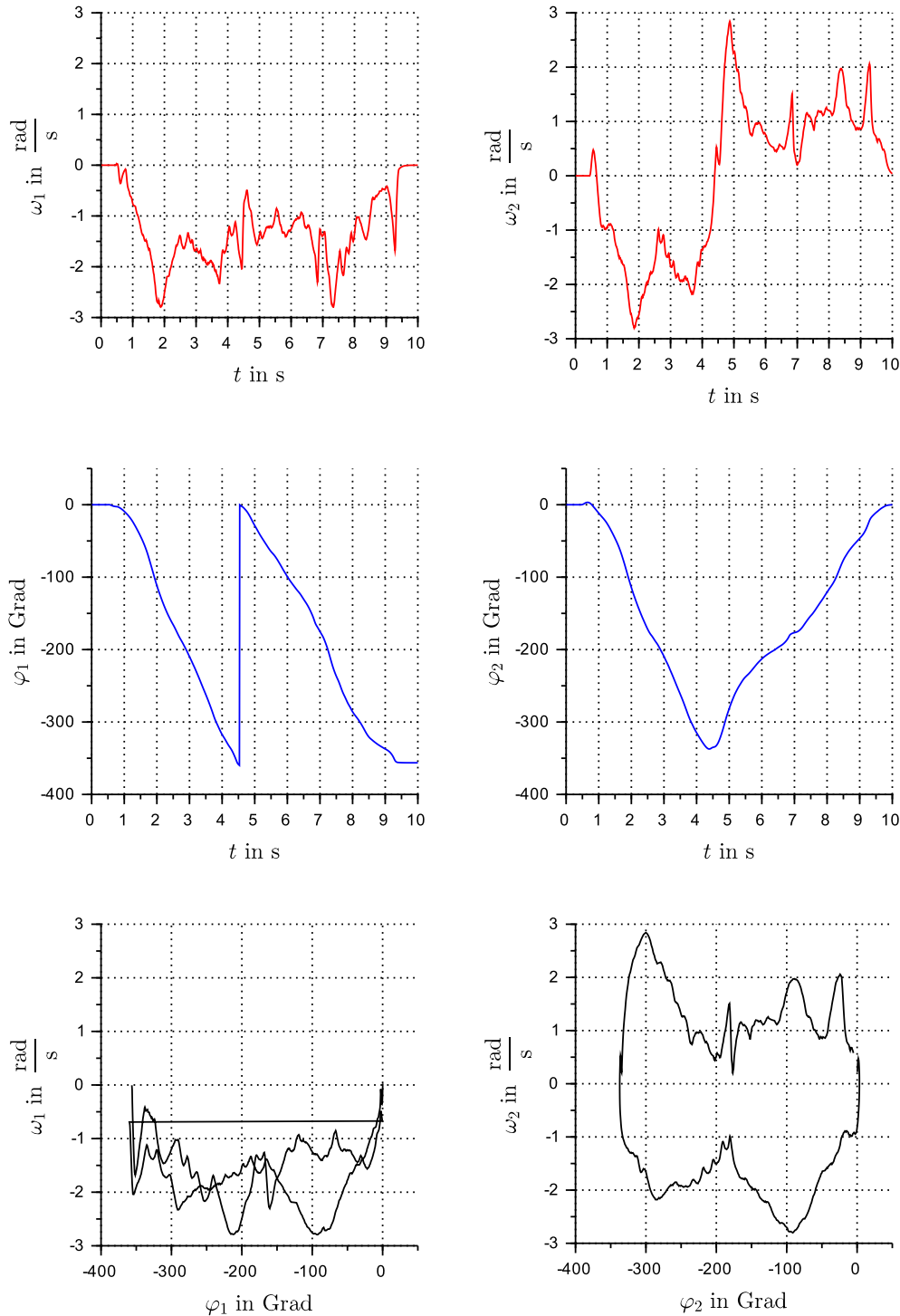


Abbildung 59: Messergebnisse zum Testfall 4 mit einem Viergelenkgetriebe in Parallelkurbelkonfiguration (CC). Die linke Spalte mit den Indizes 1 zeigt den linken Motor und die rechte Spalte mit den Indizes 2 den rechten Motor. Der Geschwindigkeitsverlauf $\omega(t)$ (rot) wurde anhand der BEMF berechnet. Die Integration der Winkelgeschwindigkeit ergibt den Verlauf des Winkels $\varphi(t)$ (blau). Die unteren Diagramme zeigen die Trajektorien im Phasenraum (ω, φ) (schwarz).

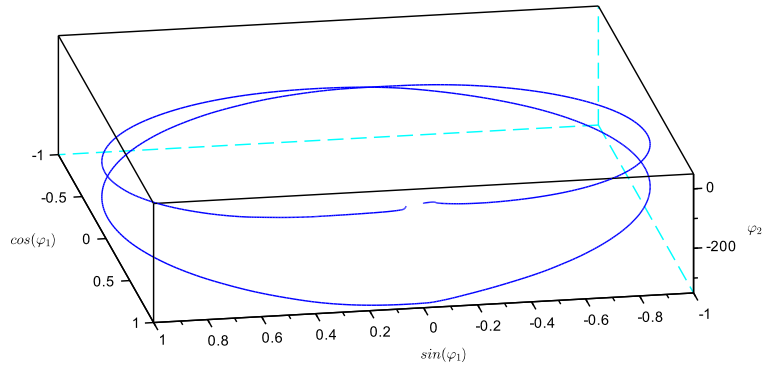


Abbildung 60: Darstellung des Aktuationsraums zum Testfall 4, aufgespannt auf einer Zylinderoberfläche. Der Winkel des linken Motors φ_1 ist durch den Winkel um die Hochachse dargestellt. Der Winkel des rechten Motors φ_2 ist auf der Hochachse aufgetragen.

Anhand der Darstellung des Aktuationsraums in der Ebene (siehe Abbildung 58) und auf der Zylinderoberfläche (siehe Abbildung 60) ist der Kreuzungspunkt der Trajektorie bei $|\varphi_1| = |\varphi_2| \approx 180^\circ$ gut zu erkennen. An diesem Punkt liegt die erste Singularität.

Die zweite Singularität ist anhand der Graphen nicht auf den ersten Blick zu erkennen. Sie liegt bei $\varphi_1 = \varphi_2 \approx 0^\circ$. In diesem Fall ist die Darstellung auf der Torusoberfläche von Vorteil, da diese an beiden Singularitäten einen Schnittpunkt ergibt. Abbildung 61 zeigt, wie die Winkel φ_1 und φ_2 im dreidimensionalen Raum eingezeichnet werden, sodass die Winkel auf der Torusoberfläche aufgespannt werden. Es gelten die Dimensionen x und y für die Grundfläche, sowie z als Hochachse.

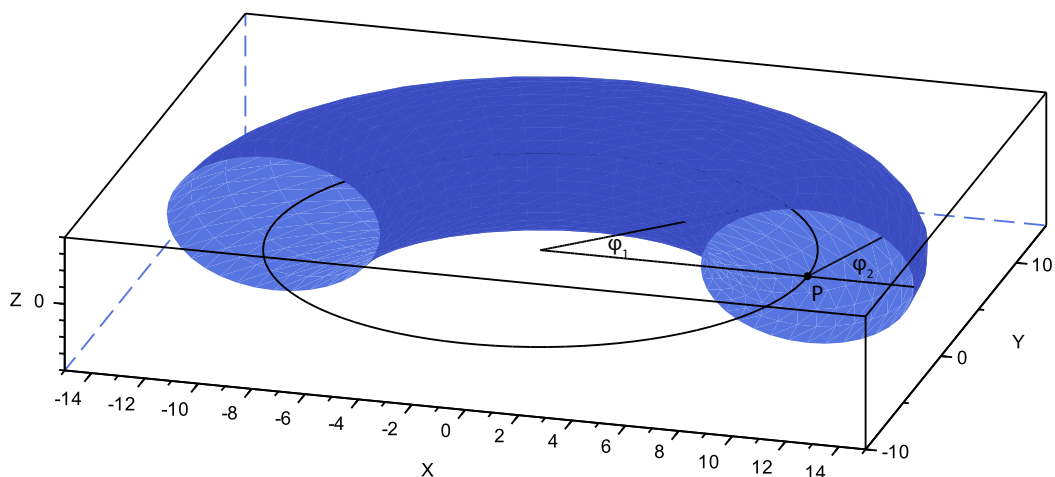
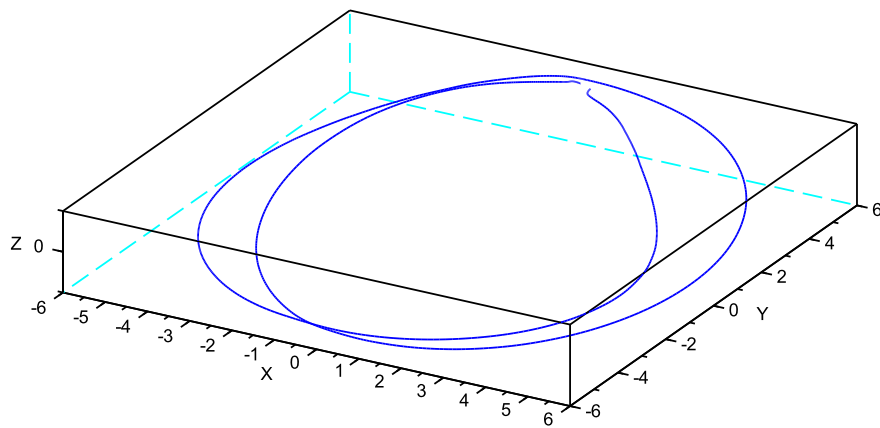
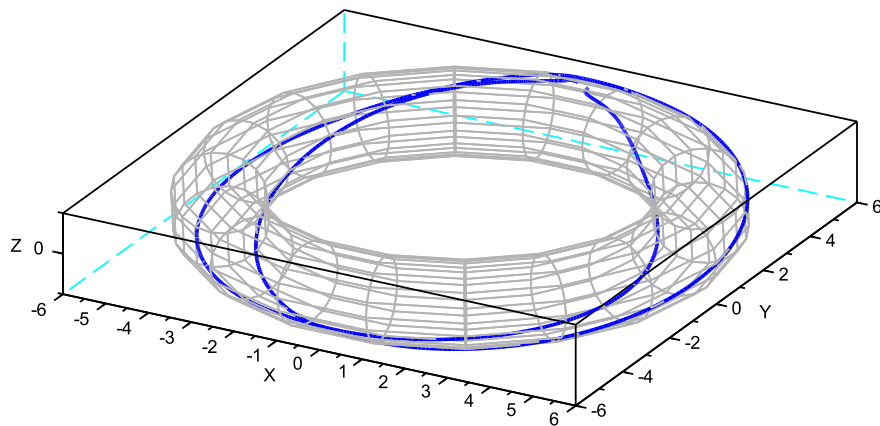


Abbildung 61: Diese Abbildung zeigt in blau die Oberfläche eines halben Torus. Die neutrale Faser des Torus ist vollständig dargestellt. Anhand der eingezeichneten Motorwinkel φ_1 und φ_2 wird deutlich, wie die Trajektorie über eine Torusoberfläche aufgespannt wird.

Die folgende Abbildung zeigt die Trajektorie im Aktuationsraum, aufgespannt auf der Torusoberfläche. Zur besseren Darstellung wird die Trajektorie sowohl isoliert (a) als auch mit der vollständigen Torusoberfläche überlagert (b) dargestellt. Die beiden Singularitäten an den Schnittpunkten der Trajektorie sind gut zu erkennen.



(a) Trajektorie auf der Torusoberfläche (blau).



(b) Trajektorie auf der Torusoberfläche (blau). Überlagerung der vollständigen Torusoberfläche als Gitterstruktur (grau).

Abbildung 62: Darstellung der aufgenommenen Trajektorie vom Testfall 4 im Aktuationsraum. Die Motorwinkel φ_1 und φ_2 werden auf einer Torusoberfläche im dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem aufgespannt.

6.4 Evaluation der Messergebnisse

Im vorherigen Kapitel wurde der Regelungsmechanismus entwickelt und anschließend anhand von vier Testfällen getestet. Die Messergebnisse werden in diesem Kapitel evaluiert.

6.4.1 Aufrichten eines Pendels über einen Spannungsimpuls

Das Ziel dieses Versuches war, ein Pendel durch einen Spannungsimpuls einer definierten Dauer Δt aufzurichten.

Die Versuchsdurchführung hat gezeigt, dass die Durchgänge mit dem brake-Modus zu 100% reproduzierbar sind. Die Versuche mit dem coast-Modus führten nur in gut 10% der Versuche zu einem dauerhaft aufgerichteten Pendel. In den anderen Fällen war die ins System eingebrachte Energie zu schwach oder zu stark, sodass das Pendel entweder zurück- oder übergeschwungen ist. Dies zeigt, dass die benötigte Energie bereits von kleinen Unterschieden in der Ausgangsposition abhängt. Diese Unterschiede entstehen dadurch, dass die Reibung das Pendel nach jedem Durchgang an leicht unterschiedlichen Positionen zur Ruhe bringt. Auch die initiale Stellung von Rotor und Stator des Elektromotors zueinander beeinflusst den Energiebedarf zum Aufrichten des Pendels. Der Unterschied zu den Versuchen mit dem brake-Modus liegt darin, dass das Pendel durch die Motorbremse in der aufrechten Position zum Stehen kommt. Aufgrund der Haftreibung ist der Bereich, indem das Pendel aufrecht stehen bleibt, größer. Selbst wenn in der aufrechten Position vom brake- in den coast-Modus gewechselt wird, ist die Haftreibung bei einer gut gewählten Impulsdauer Δt in der Lage, das Pendel aufrecht zu halten.

Tabelle 9: Messergebnisse zum Aufrichten eines Pendels über einen Spannungsimpuls. Die Pendelmasse betrug konstant 5 g.

Nr.	Modus	Pendellänge	Impulsdauer	Aufrichtdauer	Energie
1	coast	40 mm	17,86 ms	460 ms	34,31 mJ
2	coast	72 mm	31,75 ms	500 ms	58,92 mJ
3	coast	112 mm	49,76 ms	620 ms	96,10 mJ
4	break	40 mm	88,08 ms	210 ms	78,19 mJ
5	break	72 mm	96,47 ms	240 ms	109,92 mJ
6	break	112 mm	109,05 ms	280 ms	162,65 mJ

In Tabelle 9 wurden die Versuchsergebnisse zusammengefasst. Die Impulsdauer ist die Spannungsimpulsdauer, die vom PMod Motor auf dem Motor gegeben wird. Die Aufrichtdauer ist die Zeit, die das Pendel vom Beginn des Spannungsimpulses bis zum Stillstand in der aufrechten Position benötigt hat. Der Energiewert beschreibt die Energiemenge, die während des Spannungsimpulses in das System eingebracht wurde. Die Versorgungsspannung des PMod Motor betrug konstant $U_{\text{Supply}} = 9 \text{ V}$.

Die Inhalte der Tabelle 9 wurden in Abbildung 63 grafisch dargestellt.

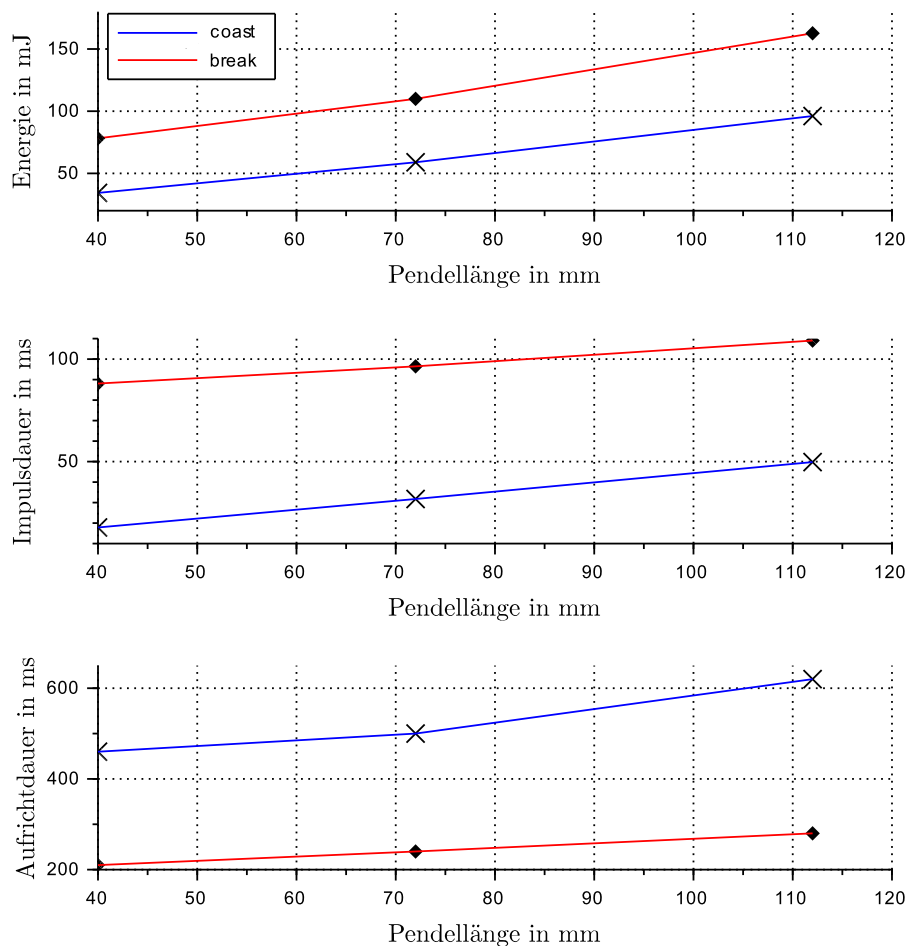
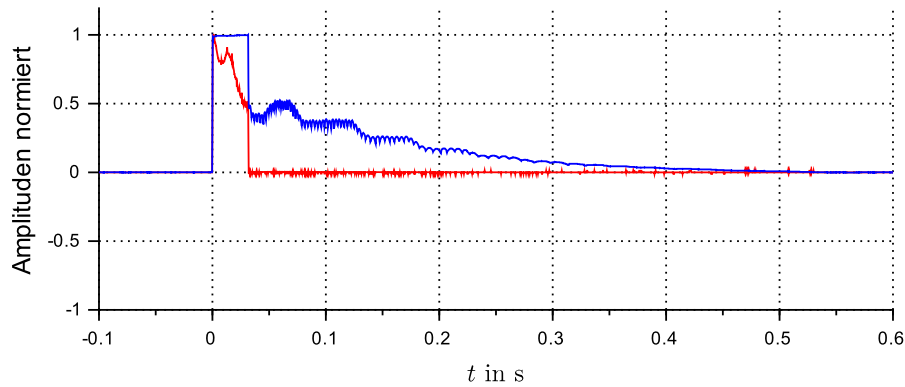
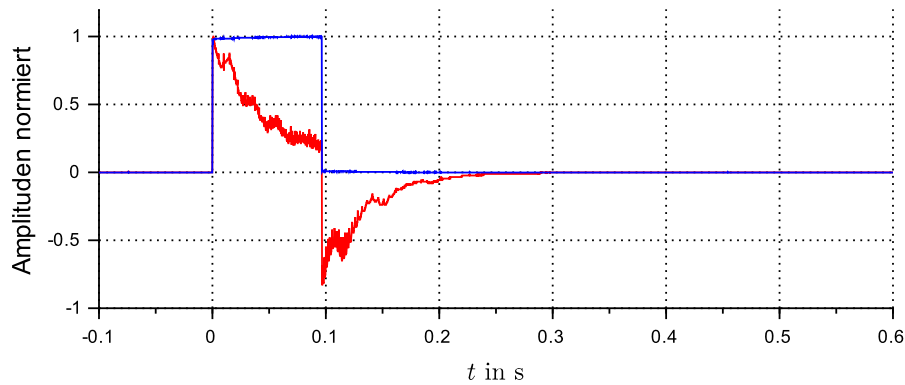


Abbildung 63: Grafische Darstellung der Messergebnisse beim Aufrichten eines Pendel durch einen Spannungsimpuls. Die rote Kurve zeigt die Messungen im break-Modus und die blaue Kurve die Messungen im coast-Modus.

In Abbildung 64 sind die Spannungs- und Stromverläufe für die Messung Nr. 2 und Nr. 5 dargestellt. Die Amplituden wurden für die Darstellung normiert.



(a) Messung Nr. 2 (coast-Modus); Spannung: blau, Strom: rot



(b) Messung Nr. 5 (break-Modus); Spannung: blau, Strom: rot

Abbildung 64: Normierte Darstellung der Spannungs- (blau) und Strommessung (rot) beim Aufrichten eines Pendels über einen Spannungsimpuls. Dargestellt sind die Messung 2 im coast-Modus und Messung 5 im break-Modus. Die Pendellänge $l_{\text{Pendel}} = 72$ mm und Masse $m = 5$ g sind bei beiden Messungen gleich.

Ein entscheidender Unterschied zwischen coast- und break-Modus liegt darin, dass im coast-Modus nach dem Impuls infolge der Pendelrotation eine BEMF induziert wird (siehe Abbildung 64a (blau)). Im break-Modus hingegen fließt nach dem Impuls ein Strom durch die kurzgeschlossene Motorwicklung, der dem Spannungsimpuls entgegengerichtet ist (siehe Abbildung 64b (rot)). Der konkrete Vergleich zwischen den dargestellten Messungen 2 und 5 zeigt, dass der Impuls im break-Modus ungefähr

dreimal so lang war wie im coast-Modus, das Pendel aber mit der doppelten Energie auch doppelt so schnell aufgerichtet wurde.

Folgend wurde der gemessene Energiebedarf E_{gem} zum Aufrichten des Pendels mit theoretischen Energiewerten E_{theo} verglichen. Diese berechnen sich unter Vernachlässigung von Verlusten aus der Differenz der potentiellen Energie, indem die Pendelmasse m um die zweifache Pendellänge l_{Pendel} angehoben wird. Die Formel lautet

$$E_{\text{theo}} = m \cdot g \cdot \Delta h \quad (37)$$

mit der Masse $m = 5 \text{ g}$, der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und der Höhendifferenz $\Delta h = 2 \cdot l_{\text{Pendel}}$.

Wie das Ergebnis des Energievergleichs in Tabelle 10 zeigt, liegt der Wirkungsgrad der drei Messungen im coast-Modus bei $\eta_{\text{coast}} \approx 11,6\%$ und bei den drei Durchgängen im break-Modus bei $\eta_{\text{break}} \approx 6,0\%$. Der Wirkungsgrad innerhalb der Modi ist bei allen Versuchen nahezu gleich.

Tabelle 10: Wirkungsgrad beim Aufrichten eines Pendels über einen Spannungsimpuls anhand des praktischen und theoretischen Energiebedarfs im Vergleich.

Nr.	Modus	Pendellänge	Energie gemessen	Energie berechnet	Wirkungsgrad
1	coast	40 mm	34,31 mJ	3,92 mJ	11,43%
2	coast	72 mm	58,92 mJ	7,06 mJ	11,99%
3	coast	112 mm	96,10 mJ	10,99 mJ	11,43%
4	break	40 mm	78,19 mJ	3,92 mJ	5,02%
5	break	72 mm	109,92 mJ	7,06 mJ	6,43%
6	break	112 mm	162,65 mJ	10,99 mJ	6,76%

Dass der Wirkungsgrad im break-Modus geringer ist als im coast-Modus war durch die längere Impulsdauer bereits abzusehen. Aufgrund des Bremsvorganges im break-Modus wird gut doppelt so viel Energie benötigt, um das Pendel aufzurichten. Neben dem höheren Energiebedarf führt dieser Modus jedoch zu schnelleren und reproduzierbaren Aufrichtvorgängen. Ein Wirkungsgrad η von 10% und weniger erscheint sehr niedrig. Dennoch ist dieser Wert bei Kleinmotoren durchaus typisch.

Ein Versuchsaufbau mit einer Energierückgewinnung (Rekuperation) im Bremsbetrieb würde weitere spannende Erkenntnisse in diesem Zusammenhang liefern.

Weitere Experimente zu einer vergleichbaren Problemstellung wurden von Benjamin Werner [36] durchgeführt.

6.4.2 Richtungsumkehr bei mechanischen Anschlägen

Für die qualitative Bewertung der Messung zur Richtungsumkehr bei mechanischen Anschlägen wurde zunächst die VGA-Ausgabe des Testaufbaus herangezogen. Die folgende Abbildung zeigt ein Bildschirmfoto während der Messungen zum Algorithmus „ChangeImpact“ im Testfall 1.

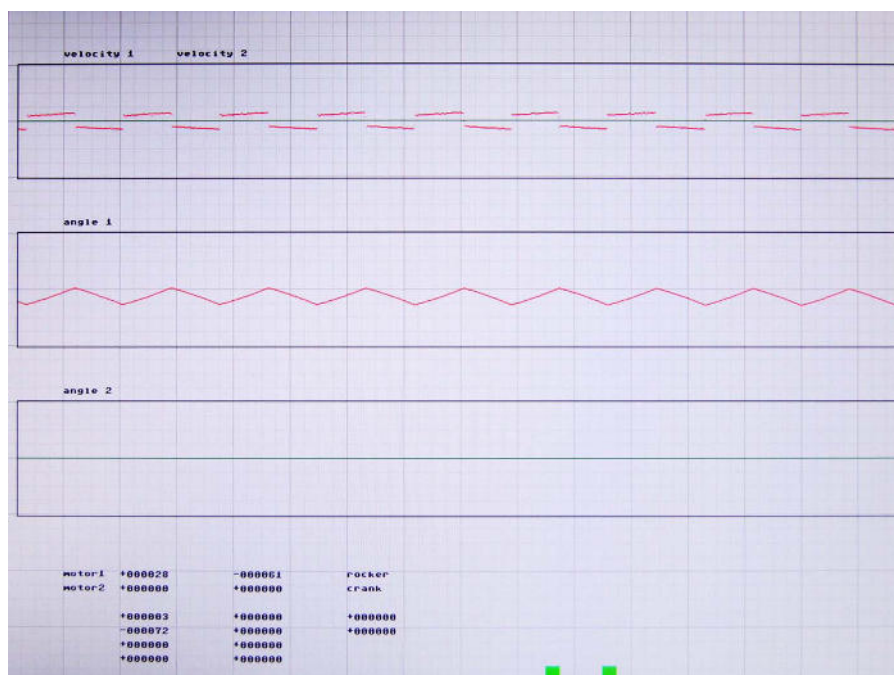


Abbildung 65: Bildschirmfoto der VGA-Ausgabe des Testaufbaus bei der Energiemessung des Algorithmus ChangeImpact im Testfall 1.

Die Bildschirmausgabe ist in vier Elemente gegliedert. Im oberen Dreiviertel sind drei y-t-Diagramme untereinander angeordnet und am unteren Viertel des Bildschirms sind mehrere numerische Anzeigen platziert. Die Diagramme dienen ausschließlich der qualitativen Darstellung, sind jedoch aufgrund einer gleichen Skalierung untereinander vergleichbar. Das erste Diagramm (v.o.n.u.) zeigt die Winkelgeschwindig-

keiten von Motor 1 (ω_1) in rot und von Motor 2 (ω_2) in grün. Die Diagramme 2 und 3 stellen die Motorwinkel φ_1 (rot) und φ_2 (grün) dar. Da für diesen Versuch ausschließlich Motor 1 eingesetzt wurde, sind die Werte für Motor 2 null.

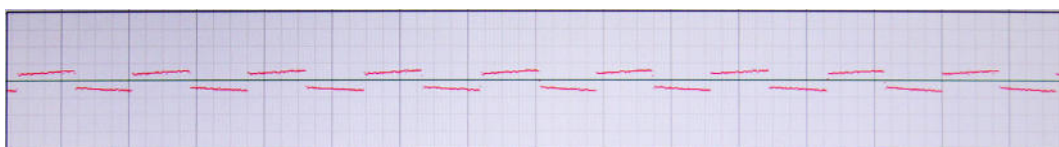
Der numerische Bereich zeigt quantitative Werte wie absolute Winkelgeschwindigkeiten, relative Winkel, die Positionen von Anschlägen oder Singularitäten sowie die aktuelle Konfiguration des Koppelgetriebes.

Der Algorithmus `ChangeImpact` ändert die Drehrichtung der Motorwelle immer dann, wenn ein Anschlag detektiert wird. Beim Algorithmus `ChangeBeforeImpact` werden die Anschläge nur alle 5 Zyklen angefahren, um zu überprüfen, ob eine Änderung des Systems erfolgt ist.

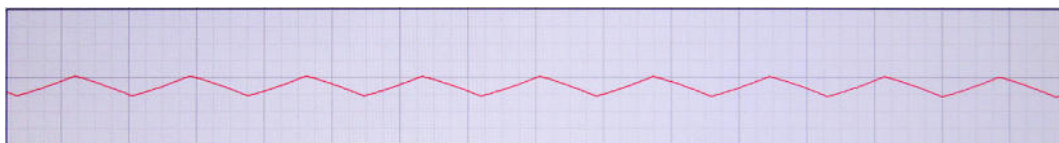
Wie weit vor dem vorausgeahnten Anschlag die Richtungsänderung erfolgen soll, ist über die Midi-Eingabe parametrisierbar. Die eingestellten Werte für diesen Versuch lauten $DC = 1,3\%$ und $BreakBefore = 20$.

Die in Abbildung 66 und 67 vergrößerten Verläufe von Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ und Winkel $\varphi(t)$ der ZYBO-VGA-Ausgaben zeigen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Algorithmen. Der unstetige Verlauf der Winkelgeschwindigkeit beim Algorithmus `ChangeImpact` ergibt einen nicht differenzierbaren Winkelverlauf.

Die Werte beim Algorithmus `ChangeBeforeImpact` verlaufen im Vergleich dynamischer. Die Sprünge im Verlauf der Winkelgeschwindigkeit sind diejenigen Zyklen, bei denen die Anschlagpositionen verifiziert werden.



(a) Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$



(b) Winkel $\varphi(t)$

Abbildung 66: Verlauf der Winkelgeschwindigkeit ω und des Winkels φ über der Zeit t . Bildschirmfoto der VGA-Ausgabe des ZYBO bei der Energiemessung des Algorithmus `ChangeImpact`.

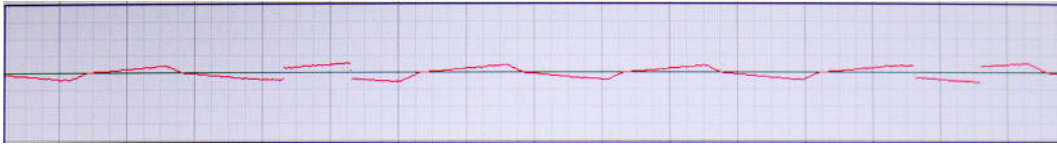
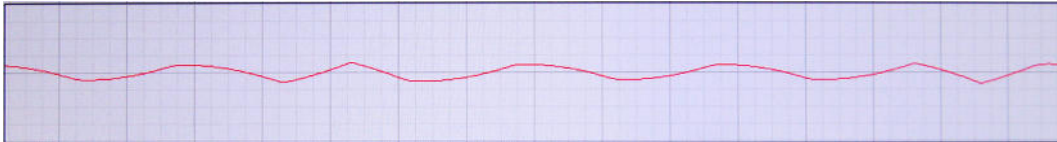
(a) Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ (b) Winkel $\varphi(t)$

Abbildung 67: Verlauf der Winkelgeschwindigkeit ω und des Winkels φ über der Zeit t . Bildschirmfoto der VGA-Ausgabe des ZYBO bei der Energiemessung des Algorithmus ChangeBeforeImpact.

Für die energetische Betrachtung war die Messung über das Electronic Explorer Board notwendig. Die Abtastrate für die Messwertaufnahme betrug für diesen Versuch $f_{\text{mess}} = 50 \text{ kHz}$ bei einer Messdauer von $t_{\text{mess}} = 10 \text{ s}$. Für beide Algorithmen sind jeweils 10 Messungen durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 11: Zusammengefasste Messergebnisse beim Energievergleich zwischen den Algorithmen ChangeImpact und ChangeBeforeImpact aus jeweils 10 Messungen über einen Messzeitraum von $t_{\text{mess}} = 10 \text{ s}$.

	ChangeImpact	ChangeBeforeImpact
Arithmetischer Mittelwert	117,79 mJ	128,93 mJ
Median	117,36 mJ	129,52 mJ
Standardabweichung	1,50 mJ	1,41 mJ

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, benötigt der Algorithmus ChangeBeforeImpact im Durchschnitt 10% mehr Energie als der Algorithmus ChangeImpact. Der Grund liegt darin, dass bei der Richtungsumkehr vor den Anschlägen Energie benötigt wird, um die träge Masse des Hebelarmes abzubremsen und in die entgegengesetzte Richtung zu beschleunigen. Dieser Energiebedarf ist beim Stoß gegen einen Anschlag aufgrund des Impulsübertrages deutlich geringer. Als Vorteil der Richtungsumkehr vor dem Anschlag ist die Geräuschminderung zu berücksichtigen. Bereits bei dieser Versuchsdurchführung ohne signifikante Massen und Komponenten aus Kunststoff war die Reduzierung der Anschläge auf ein fünftel in der subjektiven Wahrnehmung

der Geräuschemissionen sehr angenehm.

In einer Anwendung bleibt abzuwägen, ob die Energieeffizienz oder die gleichmäßigere Bewegung mit niedrigerer Geräuschemission als entscheidendes Kriterium überwiegt.

6.4.3 Erkennung der Konfiguration

Die Erkennung der Systemkonfiguration erfolgte zuverlässig. Das System ist in der Lage, die mechanischen Kopplungen der vier Testfälle zu unterscheiden und über die VGA-Ausgabe anzuzeigen.



Abbildung 68: Bildschirmfoto der VGA-Ausgabe des ZYBO bei der Erkennung der Konfiguration. Die Darstellung in Textform ist als Vergrößerung hervorgehoben.

Sobald die Konfiguration im laufenden Betrieb verändert wird, erkennt der Algorithmus diese Änderung und die Regelung passt die Motoransteuerung anhand des im Kapitel 6.2.2 aufgestellten Regelwerkes an.

Die energetische Betrachtung erfolgte über einen Messzeitraum von $t = 10$ s bei einem Duty Cycle von $DC = 2\%$. Es wurden jeweils 10 Messungen durchgeführt, in denen der reine ChangeImpact-Algorithmus mit der Bewegungsoptimierung durch die Konfigurationserkennung verglichen wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 aufgeführt. Besonders erwähnenswert ist der Unterschied beim Testfall 2. Durch die Konfigurationserkennung bei der Kurbelschwinge, benötigt das System im Vergleich zum reinen ChangeImpact-Algorithmus auf beiden Motoren nur 47% an Energie.

Tabelle 12: Energetische Betrachtung der Konfigurationserkennung über einen Zeitraum von $t = 10$ s bei $DC = 2$ %. Angegeben sind die arithmetischen Mittelwerte der 10 Messungen. Die Standardabweichung steht unter der jeweiligen Größe in Klammern.

Testfall	Energie Motor 1	Energie Motor 2	Energie Summe
Testfall 2 (crank/rocker) mit Konfigurationserkennung	205,5763 mJ (2,0863 mJ)	0 mJ (0 mJ)	205,5763 mJ (2,0863 mJ)
Testfall 2 (crank/rocker) ohne Konfigurationserkennung	183,6739 mJ (0,6779 mJ)	253,7704 mJ (0,2696 mJ)	437,4443 mJ (0,8932 mJ)
Testfall 3 (rocker/rocker)	244,3949 mJ (0,5903 mJ)	243,4757 mJ (0,6682 mJ)	487,8706 mJ (1,1480 mJ)

6.4.4 Erkennung der Singularitäten

Der zuvor beschriebene Algorithmus zur Erkennung von Singularitäten konnte erfolgreich auf dem FPGA implementiert werden. Sobald die Konfigurationserkennung zwei Kurbeln detektiert, wird die State-Machine zur Erkennung der Singularitäten ausgeführt. Je nach Anwenderwunsch wird anschließend mit einer parallelen oder antiparallelen Bewegung fortgesetzt.

Aufgrund des Spiels in den Verbindungselementen des Koppelgetriebes haben die detektierten Umschlagpunkte eine Genauigkeit von ca. 30° . Insofern diese Genauigkeit verbessert werden kann, werden auch die Bereiche kleiner, in denen der Motor 2 die parallele Bewegung über den Umschlagpunkt hinweg unterstützen muss.

Der Betrieb in einer antiparallelen Bewegung, indem nur der Motor mit der höheren absoluten Winkelgeschwindigkeit angesteuert wird, erfolgt problemlos. Die folgende Abbildung zeigt die Motorklemmenspannungen U_1 und U_2 der beiden Motoren. Die Ansteuerung per PWM ist anhand der großen Amplituden deutlich von der BEMF zu unterscheiden.

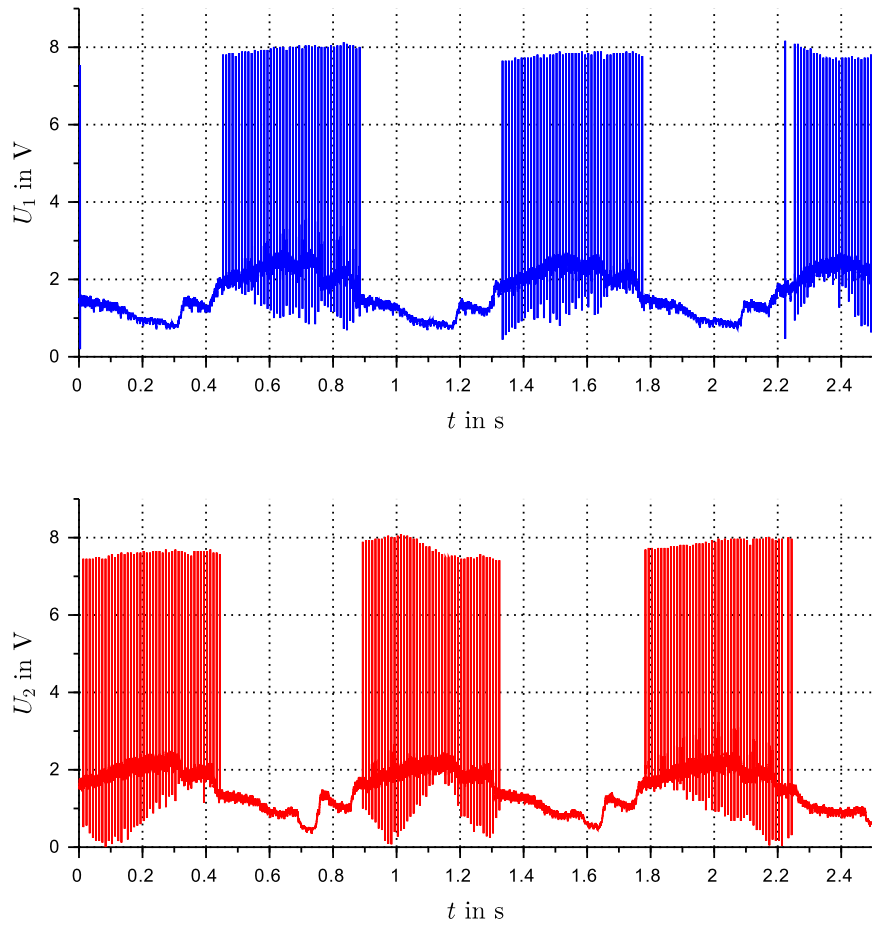


Abbildung 69: Messung der Motorklemmenspannungen bei der antiparallelen Bewegung im Testfall 4. Es wird immer der Motor mit der höheren Winkelgeschwindigkeit angesteuert.

7 Zusammenfassung

Grundlage für diese Arbeit ist die Regelung mit der rückwirkenden elektromotorischen Kraft (BEMF) eines bürstenbehafteten Gleichstrommotors als Sensorqualität. Um das Potential der BEMF einschätzen zu können, wurden verschiedene Experimente durchgeführt. Anhand der Ergebnisse entstanden die Konzepte für die späteren Mechanismen und boten einen ersten Überblick über die Möglichkeiten, einen Motor parallel als Aktor und als Sensor zu betreiben.

Für die Entwicklung und den Test an einer realen Hardware wurde ein modularer Teststand entwickelt. Mit diesem ist es möglich, durch einen geringen Umbauaufwand unterschiedliche Testaufbauten zu realisieren. Eine Auswahl an Möglichkeiten vom einfachen Pendel über das Viergelenkgetriebe bis hin zu Zeichenaufbauten sind vorgestellt worden. Da die Wahl des Elektromotors für einige Regelungsaufgaben signifikante Unterschiede ergibt, wurde aus einer Auswahl von acht Getriebekleinmotoren der mit dem geringsten Sprung zwischen Haft- und Gleitreibung im Anlaufmoment ermittelt. Der Test hat ergeben, dass der Sprung beim Motor 71427 des Herstellers LEGO am geringsten ist. Der direkte Nachfolger im Test ist der Motor 2619S012SR 22: IE2-16 (mit Encodereinheit) des Herstellers Faulhaber. Der Teststand wurde für beide Motoren konstruiert. Eine Kombination aus beiden Motorvarianten ist ebenfalls möglich.

Die Elektronik kann fest mit dem Teststand verschraubt werden. Herzstück ist das Zynq Board (ZYBO) von Digilent. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ausschließlich das FPGA eingesetzt. Zur Ansteuerung der Motoren wurde ein Peripherie Modul (PMod) entwickelt, welches an das ZYBO angesteckt werden kann und den parallelen Betrieb eines Motors als Aktor und als Sensor ermöglicht. Die Übertragung von Messwerten an einen Computer erfolgt über einen UART-USB PMod. Die Parametrisierung des Regelungsmechanismus erfolgt über ein anschließbares MIDI-Gerät.

Als Vorbereitung auf den Regelungsmechanismus waren weitere Messungen notwendig. Diese wurden direkt mit dem zuvor konstruierten Teststand und einer auf dem FPGA implementierten Entwicklungsumgebung mit VGA-Ausgabe durchgeführt.

Das erste Experiment war das Aufrichten eines physikalischen Pendels mit einem Spannungsimpuls. Dazu wurde auf dem FPGA ein nicht retriggerbares Monoflop mit einstellbarer Impulsbreite implementiert. Unterschieden wurde, ob der Motor nach dem Spannungsimpuls in den Freilauf (coast) oder in den Bremsbetrieb (break) geschaltet wurde. Beim coast-Modus lag der Wirkungsgrad im Vergleich zur theoretischen Betrachtung bei $\eta_{\text{coast}} \approx 11,6\%$. Im break-Modus war der Wirkungsgrad mit $\eta_{\text{break}} \approx 6,0\%$ niedriger, jedoch war der Aufrichtvorgang gut doppelt so schnell

und wesentlich zuverlässiger.

Das zweite Experiment erfolgte mit einem physikalischen Pendel, welches von der aufrecht stehenden Position ausschließlich durch die Schwerkraft beschleunigt wurde und aufgrund der Reibung im System nach einigen Schwingungen in seinem Punkt-Attraktor zum Stillstand kommt. Dieser Versuch wurde mit und ohne einem mechanischen Anschlag durchgeführt und die aufgenommenen Trajektorien verglichen.

Abschließend wurde der Regelungsmechanismus anhand von vier Testfällen analysiert. Die Aufbauten waren alle in der horizontalen Ebene und erfolgten daher ohne Einfluss der Schwerkraft auf die Bewegung. Testfall 1 war ein Hebelarm mit zwei mechanischen Anschlägen, die Testfälle 2 bis 4 waren Konfigurationen eines Viergelenkgetriebes. Jeder Testfall wurde anhand von Messungen im Phasen- und Aktuationsraum untersucht.

Als erste Funktion des Regelungsmechanismus wurde die Richtungsumkehr bei Anschlägen implementiert. Die Funktionsweise basiert auf den Erkenntnissen der Experimente mit der BEMF. Der Algorithmus `ChangeImpact` ändert bei jedem mechanischen Anschlag die Drehrichtung der Motorwelle. Der Algorithmus `ChangeBeforeImpact` fährt die Anschläge nur noch bei jedem fünften Zyklus an, um das System auf Veränderungen zu prüfen. In den anderen vier Zyklen ändert er die Drehrichtung bereits vor den bekannten mechanischen Anschlägen. Ergebnis der energetischen Betrachtung war, dass der Algorithmus `ChangeBeforeImpact` aufgrund der motorisch eingeleiteten Richtungsänderungen ca. 10% mehr Energie benötigt als der Algorithmus `ChangeImpact`, wo bei jedem Stoß ein Impulsübertrag erfolgt. Allerdings ist die Bewegung bei `ChangeBeforeImpact` dynamischer und die Geräuschemission deutlich geringer. Die Erkennung der Konfiguration (Doppelkurbel, Doppelschwinge oder Kurbelschwinge) erfolgte auch bei Änderungen der Konfiguration zur Laufzeit des Algorithmus zuverlässig. Je nach Konfiguration wurde die Motoransteuerung entsprechend eines Regelwerkes angepasst und der Energiebedarf des Systems um bis zu 53% gesenkt. Zur Erkennung der Singularitäten war eine Anpassung der Pulsweitenansteuerung notwendig, damit sich das Koppelgetriebe nicht verkeilt. Dazu wurde zwischen der `drive`- und der `coast`-Phase eine `break`-Phase eingefügt, in der der Motor durch Kurzschließen der Motorklemmen gebremst wird. Nach der Detektion der Umschlagpunkte kann der Anwender entscheiden, ob die Bewegung der Parallelkurbel parallel oder antiparallel erfolgen soll. Bei der parallelen Bewegung wird Motor 1 permanent und Motor zwei nur in der nahen Umgebung der Singularitäten angesteuert, um ein Umschlagen zu vermeiden. Um eine antiparallele Bewegung zu gewährleisten ist es ausreichend immer den Motor anzusteuern, dessen Betrag der Winkelgeschwindigkeit am höchsten ist.

8 Ausblick

Diese Arbeit dient mit der Entwicklung des Teststands als Grundlage für weitere Forschungsprojekte. Die Modularität ermöglicht es, den Aufbau auch in Lehrveranstaltungen und weiteren Abschlussarbeiten an der Beuth Hochschule für Technik Berlin einzusetzen, wie es zum Ende des Sommersemesters 2015 in der Laborveranstaltung zur Entwicklung digitaler Systeme und in zwei zu dieser Arbeit parallelen Bachelorarbeiten [19] [22] bereits erfolgt ist. Durch die fest montierbaren Komponenten auf einer Grundplatte bietet das System die optimale Grundlage zum Einsatz in der Lehre der Fachgebiete Elektrotechnik, Informatik oder Mechatronik. Individuelle Erweiterungen sowohl in der Elektronik als auch in der Mechanik sind leicht realisierbar.

Durch die Modularität in der Hardwarebeschreibung ist der Grundstein für eine dezentrale Regelung der Aktoren bereits gelegt. Spannend wäre ein Versuchsaufbau, bei dem die Regelung von zwei Motoren auch physikalisch voneinander getrennt wird, indem z.B. von zwei unabhängigen Aufbauten die Grundplatten miteinander verbunden werden und die Synchronisation zwischen den beiden Plattformen durch einen überlagerten Takt in der gemeinsamen Versorgungsspannung erfolgt.

Obwohl der Regelungsmechanismus ausschließlich mit der BEMF arbeitet, hat sich im Laufe der Entwicklung gezeigt, dass die Motorstrommessung auch für den Algorithmus sinnvoll wäre. Dazu bietet es sich an, den PMod Motor um eine Motorstrommessung zu ergänzen, sodass die externe Messung entfällt. Dies ermöglicht eine echtzeitfähige Energieanalyse auf dem ZYBO und die Verarbeitung des zum Drehmoment proportionalen Motorstromes für den Regelungsmechanismus.

Die Implementierung ausschließlich auf dem FPGA hat sich als nicht optimal herausgestellt. Aufgrund mehrerer State-Machines empfiehlt es sich, für weitere Arbeiten mit diesem System auch die ARM-Prozessoren des Zynq-Chips zu nutzen. Dabei können die Vorteile der sequenziellen Ausführung und der Peripherie des Prozessors sowie der nebenläufigen Ausführung des FPGAs kombiniert werden. Eine Alternative zu den ARM-Prozessoren ist die Implementierung eines Mikrocontrollers auf dem FPGA. Dazu wäre zum Beispiel der 8-Bit Mikrocontroller „PicoBlaze“ von Xilinx eine Option.

Ein weiterer Ansatz ist die Implementierung in Form eines Rekurrenten Neuronalen Netzes (RNN), dessen Wichtungen zum Beispiel durch eine künstliche Evolution ermittelt werden können.

Die detektierten Umschlagpunkte an den Singularitäten des Testfalls 4 waren mit einer Toleranz von ca. 30° sehr ungenau. Um die Genauigkeit zu erhöhen, können

Versuche durchgeführt werden, indem die Singularitäten von beiden Seiten und eventuell sogar mehrfach angefahren werden.

Die aktuelle Implementierung muss jedes Mal wenn ein Viergelenkgetriebe der Klasse III erkannt wird, die Positionen der Singularitäten neu ermitteln. Dazu wird eine fest programmierte State-Machine ausgeführt. Wünschenswert ist an dieser Stelle ein Mechanismus, der die Singularitäten auch im Live-Betrieb ohne Einschränkungen in der Anwendung ermöglicht.

Langfristig sollen die Erkenntnisse mit diesem Teststand auch für die Bewegungsoptimierung der Roboterplattformen SEMNI und Myon eingesetzt werden. Da dort allerdings die Motoren RX-28 von Dynamixel eingesetzt werden, ist die Nutzung der BEMF nicht möglich. Erste Experimente in diese Richtung wurden bereits in [36] durchgeführt.

Literatur

- [1] BAIK, K.: *BoRam: Balancing Robot using Arduino and Lego*. http://boram.wdfiles.com/local--files/start/PROJECT_REPORT_BORAM2-final.pdf, Abruf: 09.08.2015
- [2] BARKER, C.: *A Complete Classification of Planar Fourbar Linkages / Mechanism and Machine Theory*. 1985. – Forschungsbericht
- [3] BETHGE, S.: *ABC-Learning: Ein Lernverfahren zur modellfreien Selbsterkploration autonomer Roboter*. Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, Diplomarbeit, 2014
- [4] BUTIKOW, E. I.: Oscillations of a simple pendulum with extremely large amplitudes. In: *european journal of physics* 33s (2012), S. 1555–1563
- [5] DER, R. ; MARTIUS, G. ; PFEIFER, R.: *The Playful Machine: Theoretical Foundation and Practical Realization of Self-Organizing Robots*. Springer, 2012
- [6] DIGILENT INC.: *Produktseite Motor 290-006P*. <https://www.digilentinc.com/Products/Detail.cfm?NavPath=2,403,625&Prod=MT-MOTOR>, Abruf: 03.07.2015
- [7] DR. FRITZ FAULHABER GMBH & Co. KG: *Datenblatt 2619S012SR 22:1 IE2-16*. https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/DE_2619_SR_IE2-16_DFF.PDF, Abruf: 03.07.2015
- [8] DR. FRITZ FAULHABER GMBH & Co. KG: *Glockenankermotoren - Aufbau, Betriebsverhalten, Anwendungen*. verlag moderne industrie, 2006
- [9] GRASHOF, F.: *Theoretische Maschinenlehre Band 2*. Voss: Hamburg, 1883
- [10] GRASHOF, F.: *Getriebelehre*. Springer-Verlag: Berlin, 1917
- [11] HILD, M.: Defying Gravity - A Minimal Cognitive Sensorimotor Loop Which Makes Robots With Arbitrary Morphologies Stand Up. In: *11th International conference on accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology (DEMI 2013)*, 2013
- [12] HILD, M.: Roboter mit robustem Verhalten. In: *Bulletin* 10s (2013), S. 12–15
- [13] HILD, M. ; KUBISCH, M.: Self-Exploration of Autonomous Robots Using Attractor-Based Behavior Control and ABC-Learning. In: *11th Scandinavian Conference on Artificial Intelligence (SCAI 2011)*, 2011

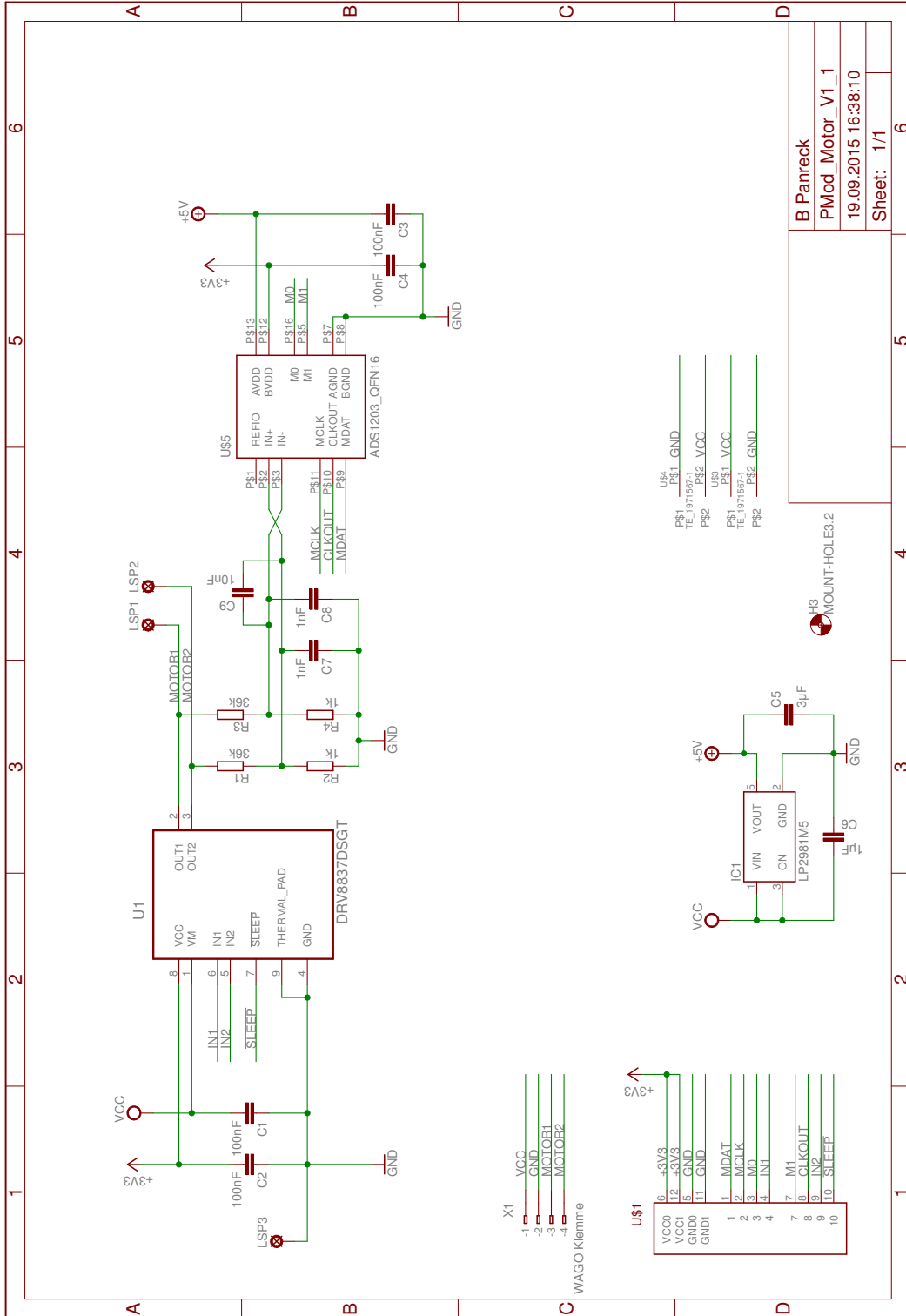
- [14] HURBAIN, P.: *LEGO 9V Technic Motors compared characteristics*. <http://www.philohome.com/motors/motorcomp.htm>, Abruf: 03.07.2015
- [15] HURBAIN, P.: *Lego Technic Motor (43362) internals*. <http://www.philohome.com/motors/motor.htm>, Abruf: 23.07.2015
- [16] ISERMANN, R.: *Mechatronische Systeme*. 2. Auflage. Springer, 2008
- [17] JANZ, M.: *Situationserkennung für autonome Roboter basierend auf Diffusionsprozessen in sensomotorischen Graphen*. Freie Universität Berlin, Institut für Informatik, Masterarbeit, 2015
- [18] KUBISCH, M. ; BENCKENDORFF, Ch. ; HILD, M.: Balance Recovery of a Humanoid Robot Using Cognitive Sensorimotor Loops (CSLs). In: *Proceedings of the 14th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2011
- [19] LEZCANO GIMENEZ, P. G.: *Development of a Sensorimotor Algorithm Able to Deal with Unforeseen Pushes and Its Implementation Based on VHDL*. Beuth-Hochschule für Technik Berlin, Bachelorarbeit, 2015
- [20] MCCARTHY, J. M. ; SOH, G. S.: *Geometric Design of Linkages*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2011
- [21] MEIKE, D. ; PELLICCIARI, M. ; BERSELLI, G.: Energy Efficient Use of Multirobot Production Lines in the Automotive Industry: Detailed System Modeling and Optimization. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* (2013)
- [22] MIGUEL MORALES, P. d.: *VHDL-Based System Design of a Cognitive Sensorimotor Loop (CSL) for Haptic Human-Machine Interaction (HMI)*. Beuth-Hochschule für Technik Berlin, Bachelorarbeit, 2015
- [23] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *Factors for units listed by kind of quantity or field of science*. <http://physics.nist.gov/Pubs/SP811/appenB9.html#ACCELERATION>, Abruf: 31.07.2015
- [24] NORTON, R.: *Kinematics and Dynamics of Machinery*. McGraw-Hill Education, 2009
- [25] PELLICCIARI, M. ; BERSELLI, G. ; LEALI, F. ; VERGNANO, A.: A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots. In: *mechatronics* 23s (2013), S. 326–334

- [26] POLOLU CORPORATION: *Produktseite Motor 1098*. <https://www.pololu.com/product/1098>, Abruf: 03.07.2015
- [27] POLOLU CORPORATION: *Produktseite Motor 993*. <https://www.pololu.com/product/993>, Abruf: 03.07.2015
- [28] RIAZI, S. ; BENGTTSSON, K. ; WIGSTRÖM, O. ; VIDARSSON, E. ; LENNARTSON, B.: Energy Optimization of Multi-robot Systems. In: *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (2015), S. 1345–1350
- [29] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*. 3. Auflage. Springer Verlag, 2009
- [30] SPARKFUN ELECTRONICS: *Produktseite Motor ROB-12007*. <https://www.sparkfun.com/products/retired/12007>, Abruf: 03.07.2015
- [31] STROGATZ, S.: *Nonlinear dynamics and chaos*. 2. Auflage. Westview Press, 2015
- [32] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED: *Datenblatt ADS1203*. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1203.pdf>. Version: Januar 2008, Abruf: 01.10.2015
- [33] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED: *Datenblatt DRV8837*. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8837.pdf>. Version: Februar 2014, Abruf: 01.10.2015
- [34] THIELE, C.: *Design der verteilten Echtzeit-Systemarchitektur DISTAL und Implementierung am Beispiel des humanoiden Roboters Myon*. Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, Diplomarbeit, 2014
- [35] THOMPSON, J. ; STEWART, H.: *Nonlinear dynamics and chaos*. 2. Auflage. John Wiley and Sons Ltd, 2002
- [36] WERNER, B.: *Entwicklung eines adaptiven sensomotorischen Algorithmus zur dynamischen Bewegungssteuerung autonomer Roboter*. Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, Diplomarbeit, 2013
- [37] YANWEN, L. ; LUMIN, W. ; JINGFANG, L. ; ZHEN, H.: Applicability and Generality of the Modified Grübler-Kutzbach Criterion. In: *chinese journal of mechanical engineering* 26s (2013), S. 257–264

Anhang

- Schaltplan des PMod Motor
- Leiterplattenlayout des PMod Motor (2:1)

Schaltplan des PMod Motor



B Panreck
 PMod_Motor_V1_1
 19.09.2015 16:38:10
 Sheet: 1/1

Leiterplattenlayout des PMod Motor (2:1)

VCC	GND	IN1	M0	MCLK	MDAT
VCC	GND	$\overline{\text{SLEEP}}$	IN2	CLKOUT	M1

