

Entwicklung eines verteilten Steuerungssystems für eine myoelektrisch gesteuerte Armprothese

DIPLOMARBEIT

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades

DIPLOMINGENIEUR

in der Studienrichtung

EMBEDDED SYSTEMS

Angefertigt am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Beurteilung:

Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Markus Vincze

Eingereicht von:

Wolfgang Sauberer

Matrikelnummer e0928710

Wien, am 13.04.2018

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines verteilten Steuerungssystems für den DynamicArm, einer myoelektrisch gesteuerten Armprothese der Firma Ottobock. Damit soll geklärt werden, ob die Steuerung des Prothesenarmes mittels verteiltem System, basierend auf dem AXON-Bus[®], realisiert werden kann. Auf dieser Grundlage kann die Kompatibilität mit weiteren AXON-Bus[®] basierten Produkten der Firma Ottobock sichergestellt werden. Weiters wird die Möglichkeit überprüft, ob der auf einer Messung des Motorstromes beruhende automatische Getriebeverstellalgorithmus für das stufenlos verstellbare Reibgetriebe des original DynamicArm, durch ein alternatives Konzept ersetzt werden kann. Damit sollen die Schwachstellen des original Algorithmus umgangen werden. Um Antworten auf diese Fragen zu finden, entsteht im Laufe dieser Arbeit ein Prototyp der solch ein verteiltes System beinhaltet. Dazu gehört der Aufbau des Prototypen basierend auf den mechanischen Komponenten des original DynamicArm, das Ersetzen der original Elektronik durch AXON-Bus[®] fähige Elektronikkomponenten und die Entwicklung der Software zur Steuerung der Armfunktionen. Weiters wird ein Getriebeverstellalgorithmus basierend auf der Messung des Übersetzungswertes des Reibgetriebes entworfen und implementiert. Um den so entstandenen Prototypen zu testen, wird eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Das Verhalten des neu entwickelten Verstellalgorithmus wird anhand von Hubversuchen bei unterschiedlichen Lasten untersucht. Zusätzlich werden Vergleichsmessungen in Bezug auf den Energieaufwand pro durchgeführten Hub, zwischen dem Prototypen und einem original DynamicArm, durchgeführt. So wird gezeigt, dass die Steuerung mittels verteiltem System realisierbar ist und dass der neu entwickelte Verstellalgorithmus die gewünschten Eigenschaften aufweist.

Abstract

This thesis presents the development of a distributed control system for the DynamicArm, a myoelectrically controlled arm prosthesis by Ottobock. This is to clarify whether the control of the prosthetic arm can be realized by means of a distributed system based on the AXON-Bus[®]. On this basis, the compatibility with other AXON-Bus[®] based products of Ottobock can be ensured. Furthermore, the possibility is checked whether the automatic transmission adjustment algorithm, based on a measurement of the motor current, for the infinitely variable frictiongear of the original DynamicArm, can be replaced by an alternative concept. This should bypass the weak points of the original algorithm. In order to find answers to these questions, a prototype, containing such a distributed system, arises in the course of this work. This includes building the prototype based on the mechanical components of the original DynamicArm, replacing the original electronics with AXON-Bus[®] compatible electronics, and developing the software to control the arm functions. Furthermore, a transmission adjustment algorithm is designed and implemented based on the measurement of the transmission value of the friction gear. To test the resulting prototype, a series of experiments is carried out. The behavior of the newly developed adjustment algorithm is examined by means of lifting tests at different loads. In addition, comparative measurements are made, in terms of energy consumption per stroke performed, between the prototype and an original DynamicArm. Thus, it is shown that the control is feasible by means of a distributed system and that the newly developed adjustment algorithm has the desired properties.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Lösungsansatz	3
1.3	Struktur der Arbeit	4
2	Theoretischer Hintergrund der eingesetzten Technologien	5
2.1	Verteiltes System	5
2.2	Echtzeit System	5
2.3	Das ISO/OSI-Referenzmodell	7
2.4	Bus-Struktur	8
2.5	Deterministischer endlicher Automat	9
2.6	Digitale Signalverarbeitung	10
2.6.1	FIR Filter	12
2.6.2	IIR Filter	13
3	Stand der Technik	15
3.1	Original DynamicArm	15
3.2	Der Adaptive eXchange Of Neuroplacement - Bus	16
3.2.1	Time Triggered Protocol/A	16
3.2.2	Local Interconnect Network (LIN)	19
3.3	Brushless DC Motor	20
3.3.1	Permanenterregte Synchronmaschine	22
3.3.2	Stromrichter	23
4	Aufbau und Funktion der Prothese	27
4.1	Gelenksgugel mit Sperre	28
4.1.1	Sensoren	28
4.1.2	Aktoren	28
4.2	Lifereinheit	29
4.2.1	Sensoren	31
4.2.2	Aktoren	32
4.2.3	Das Variogetriebe	32
4.3	Das AXON-Bus [®] -System	34
4.4	Zu implementierende Funktionen der Prothese	35

5	Entwicklung der Steuerungssoftware	38
5.1	Kommunikation und Rundenplanung	38
5.2	Verarbeitung der Sensorsignale	40
5.2.1	Tiefpass Filterung	40
5.2.2	Messung der Abtriebsdrehzahl	42
5.2.3	Messung der Getriebeübersetzung	44
5.3	Ablaufsteuerung	46
5.3.1	Beschreibung der möglichen Events	48
5.3.2	Beschreibung der möglichen Zustände	49
6	Getriebe-Verstellung	55
6.1	Charakteristisches Verhalten des Variogetriebes	55
6.1.1	Vorhandene Messungen	55
6.1.2	Messungen an der Prothese	59
6.1.3	Messung der Leerlauf-Übersetzungskennlinie	61
6.1.4	Messung Getriebekennfeld	64
6.2	Verstellalgorithmus	68
6.2.1	Auswahl der Schaltschwelle	70
7	Abschließende Messungen	72
7.1	Verhalten der Servoverstellung	72
7.1.1	Durchführung	72
7.1.2	Diskussion	76
7.2	Messung Energieverbrauch und Hubzeit	78
7.2.1	Durchführung	79
7.2.2	Diskussion	83
8	Conclusio und Ausblick	84
8.1	Vorschläge zur Verbesserung der Übersetzungsmessung	84
8.1.1	Änderung der bestehenden Sensorik	84
8.1.2	Verbesserte Synchronisierung zwischen den Signalen der Antriebs- und Abtriebsdrehzahl	85
8.1.3	Automatische Messbereichsumschaltung bei der Bestimmung der Abtriebsdrehzahl	86
8.2	Vorschlag zur Verbesserung der Motorstrom basierten Getriebeverstellung	86
8.3	Vorschlag Prüfstand zur genaueren Charakterisierung des Variogetriebes und der Getriebeverstellung	87
9	Anhang	88
9.1	Hubtests	88

Inhaltsverzeichnis

9.2 Strommessung	99
Literaturverzeichnis	110

Abbildungsverzeichnis

1.1	DynamicArm	1
1.2	verteiltes System	2
1.3	komplett aufgebaute Liftereinheit	3
1.4	Aufbau zur Durchführung der Versuche.	4
2.1	ISO/OSI Referenzmodell	7
2.2	Bus Topologie	8
2.3	graphische Darstellung Zustandsautomat	10
2.4	Abtastsystem	11
2.5	Netzwerkdarstellung FIR Filterstruktur in Direkt-Form [21]	12
2.6	Netzwerkdarstellung IIR Filterstruktur in transponierter Direkt-Form 2 [21]	13
3.1	Rundenbasierte Kommunikation	18
3.2	Kommunikationsknoten mit Interface File System	18
3.3	Wired-And-Schaltung	19
3.4	Blockschaltbild Brushless DC Motor	21
3.5	Vereinfachter Aufbau einer 3 Phasigen PSM	22
3.6	Leistungsteil für 3 Phasigen Wechselrichter aufgebaut aus n-Kanal MOS-Fet	23
3.7	Räumlicher Ablauf der Block-Kommutierung	24
3.8	Phasenströme Blockkommutierung	25
3.9	Phasenströme Sinuskommutierung	26
4.1	Aufbau der Prothese	27
4.2	Gelenkskugel mit Sperre (Gehäuse geöffnet)	28
4.3	Liftereinheit	29
4.4	Übertragung des Motormoment M_M zu Hubmoment M_H , M_M -Abtriebsmoment des Hubmotors, $M_V = f(M_V, \text{Getriebebestellung})$ - Abtriebsmoment des Variogetriebes, M_G - Abtriebsmoment der kompletten Getriebestufe, $M_{AFB} = f(\phi_{Arm})$ - Erzeugtes Moment AFB, ϕ_{Arm} - Winkel des Armes	30
4.5	Funktionsweise der Bandmechanik	30
4.6	DMS Sensor (arm gesperrt)	31
4.7	Variogetriebe: Grün-Getriebeverstellung, Rot-Getriebedeckel	32

Abbildungsverzeichnis

4.8	Nullgetriebe (planetroll-Getriebe) [12, Kapitel 6.6.3 Seite 587 Abbildung 6.99.]	33
4.9	Busteilnehmer	34
5.1	Datenaustausch zwischen den AXON Knoten des Systemes	39
5.2	Zeitliche Abfolge der Datenübertragung während eines Bus-Zyklus	40
5.3	Netzwerkdarstellung des verwendeten Tiefpass Filteralgorithmus	41
5.4	Betragsfrequenzgang bei verschiedenen Filterparameter k mit einer Abtastfrequenz von $f_s = 1kHz$	42
5.5	Netzwerkdarstellung des zur Ermittlung der Abtriebsdrehzahl verwendeten Algorithmus	43
5.6	Netzwerkdarstellung des zur Ermittlung der Abtriebsdrehzahl verwendeten Algorithmus	44
5.7	Flussdiagramm zur Übersetzungsbestimmung	45
5.8	Programmablauf Hauptschleife	46
5.9	Abstrahiertes Zustandsdiagramm der Prothesenfunktionen	47
6.1	Messung Getriebeübersetzungsfaktor für 17 – 32% Getriebeeinstellung	57
6.2	Messung Getriebeübersetzungsfaktor für 39 – 67% Getriebeeinstellung	57
6.3	Messung Getriebeübersetzungsfaktor für 47 – 100% Getriebeeinstellung	57
6.4	Berechneter Getriebewirkungsgrad für 47 – 100% Getriebeeinstellung	58
6.5	Berechneter Getriebewirkungsgrad für 47 – 100% Getriebeeinstellung	58
6.6	Berechneter Getriebewirkungsgrad für 47 – 100% Getriebeeinstellung	59
6.7	Maximaler Getriebewirkungsgrad und Kennlinie der Leerlaufübersetzung	59
6.8	Testaufbau zur Geriebecharakterisierung	60
6.9	Messkurven des zurückgelegten Weges des Getriebe-Antriebes (Motorzähler) und des Getriebe-Abtriebes (Abtriebssensor) bei verschiedenen Getriebeeinstellungen, während der Aufwärtsbewegung.	62
6.10	Messkurve des zurückgelegten Weges des Getriebe-Antriebes (Motorzähler) und des Getriebe-Abtriebes (Abtriebssensor) bei Getriebebestellung 1 und lineare Näherung zur Übersetzungsberechnung	63
6.11	berechnete Übersetzungsverhältnisse zwischen Antriebsweg zu Abtriebsweg	63
6.12	Einzelne Messreihe bei Getriebebestellung 91. Arm mit 2kg belastet.	65
6.13	Zusammengefügte Messreihe bei Getriebebestellung 91.	66
6.14	Anstieg $\frac{\Delta \text{Übersetzungswert}}{\Delta \text{Motorstrom}}$ in Abhängigkeit des Motorstromes.	66
6.15	möglicher Betriebsbereich	67
6.16	Getriebekennfeld	68
6.17	Blockschaltbild Getriebeverstellung	69
6.18	Berechnung Schaltschwelle	70
6.19	Getriebekennfeld mit Schaltschwelle	71

Abbildungsverzeichnis

7.1	Hubtest AFB eingestellt, Belastung adapter bei 100% Maximalgeschwindigkeit	73
7.2	Hubtest AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit	74
7.3	Hubtest AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit	74
7.4	Hubtest AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit	75
7.5	Hubtest AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit	76
7.6	Auswirkung des Zeitversatzes zwischen Antriebs- und Abtriebsdrehzahl .	77
7.7	Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung adapter, bei 100% der Maximalgeschwindigkeit	79
7.8	Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung adapter, bei 100% der Maximalgeschwindigkeit	80
7.9	Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit	80
7.10	Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit	81
7.11	Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 6kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit	81
7.12	Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung 6kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit	82
7.13	Vergleich Energieverbrauch und Hubzeit	82

Abkürzungsverzeichnis

AAF Anti Aliasing Filter

AC Alternating Current

ADC Analog to Digital Converter

AFB Automatic Forearm Balance

AXON-Bus[®] Adaptive eXchange Of Neuroplacement - Bus

BLDC Brushless Direct Current

CAN Controller Area Network

CPU Central Processing Unit

DAC Digital to Analog Converter

DC Direct Current

DEA Deterministischer Endlicher Automat

DMS Dehnungs-Mess-Streifen

DSP Digital Signal Processor

EC Electronically Commutated

EMG ElektroMyoGramm

FET FeldEffektTransistor

FIFO First In First Out

FIR Finite Impulse Response

FSM Finite State Machine

I²C Inter-Integrated Circuit

IFS Interface File System

IGBT Insulated-Gate Bipolar Transistor

IIR Infinite Impulse Response

IRG Inter Round Gap

ISO International Organization for Standardization

Abbildungsverzeichnis

- LIN** Local Interconnect Network
- LTI** Linear Time-Invariant
- MOS** Metal Oxide Semiconductor
- OSI** Open Systems Interconnection Model
- PF** Post Filter
- PSM** Permanenterregte Synchron Maschine
- RODL** Round Descriptor List
- RTS** Real-Time System
- S/H** Sample Hold
- TDMA** Time-Division Multiple Access
- SAE** Society of Automotive Engineers
- SPI** Serial Peripheral Interface
- TTP** Time Triggered Protocol
- UART** Universal Asynchronous Receiver Transmitter
- ZA** Zustandsautomat

1 Einleitung

Für Personen mit Amputationen ist es wichtig, dass der künstliche Ersatz für die verlorene Gliedmaße eine weitgehend, an die natürliche Gliedmaße angenäherte Form und Funktionalität hat. Der DynamicArm der Firma Ottobock, siehe Abbildung 1.1, erfüllt diese funktionalen Anforderungen durch die myoelektrische¹ Steuerung der Prothese. Die Baugröße und Form dieses künstlichen Armes kommt dabei dem natürlichen Vorbild täuschend nahe. Die Prothese ist in der Lage, Lasten bis zu fünf Kilogramm aktiv zu heben und zu halten. Um ein natürlich wirkendes Verhalten des Armes zu erreichen, kann der Hubmotor ausgekoppelt werden, was ein freies Schwingen des Unterarmes ermöglicht. Der Unterarmenschaft kann mit verschiedenen, ebenfalls myoelektrisch gesteuerten, Greifgeräten und einem Rotator ausgestattet werden. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer experimentellen Steuerung für den DynamicArm. Dabei sollen die, zum Entstehungszeitpunkt dieser Arbeit, aktuellen Technologien in Form von bestehender Hardware aus Ottobock Produkten eingesetzt werden. Die Elektronik des ursprünglichen Armes wird durch ein verteiltes System aus Adaptive eXchange Of Neuroplacement - Bus (AXON-Bus[®])²-Knoten ersetzt. Für dieses System soll die Steuerungssoftware entwickelt werden. Mit dem AXON-Bus[®] als Basis, wird das neue Konzept kompatibel zu weiteren AXON-Bus[®] fähigen Produkten. Die mechanische Plattform bildet der original DynamicArm. In den anschließenden Abschnitten wird die Aufgabenstellung, der Lösungsansatz sowie die Struktur dieser Arbeit beschrieben.



Abbildung 1.1: DynamicArm

¹ ElektroMyoGramm (EMG) bezeichnet die Messung der elektrischen Muskelaktivität [19]

² Der AXON-Bus[®], ist ein proprietärer Datenbus der von der Firma Ottobock entwickelt wurde. Dieser Bus ist auf die speziellen Anforderungen im Bereich der Prothetik abgestimmt.

1.1 Aufgabenstellung

In erster Linie soll mit dieser Arbeit gezeigt werden, dass die Funktionen des aktuellen Produktes DynamicArm mit einem verteilten System aus AXON-Bus[®]-Knoten, siehe Abbildung 1.2, realisiert werden können. Die Umstellung auf den AXON-Bus[®] hätte den Vorteil, dass das neue System kompatibel zu weiteren AXON-Bus[®]-Produkten der Firma Ottobock wäre.

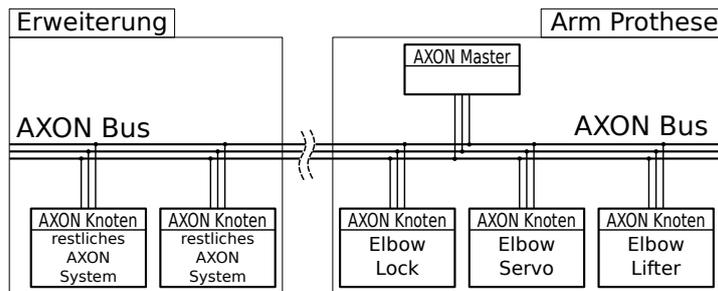


Abbildung 1.2: verteiltes System

Das System soll in einem Prototypen implementiert werden, dessen elektronischen Komponenten zur Steuerung aus bestehenden Ottobock Produkten übernommen werden. Die Kommunikation zwischen den Knoten soll über den firmeneigenen AXON-Bus[®] stattfinden. Der Prototyp soll in der Lage sein die Funktionalität des original DynamicArm abzubilden. Die zu realisierenden Funktionen sind das Heben des Armes mit automatischer Getriebeverstellung, Absenken des Armes, Sperren des Ellenbogengelenks während einer Haltephase und der Freischwungmodus. Im Laufe der Arbeit soll zusätzlich ein neuer Algorithmus zur Steuerung des stufenlos verstellbaren Variogetriebes³ entwickelt, implementiert und getestet werden. Dieser neue Algorithmus soll, im Gegensatz zu dem auf einer Motorstrommessung basierenden Verstellalgorithmus des originalen DynamicArm, basierend auf einer Messung des Übersetzungsfaktors der Getriebestufe entwickelt werden. Damit soll die Realisierbarkeit eines solchen Algorithmus gezeigt werden. Der erhoffte Vorteil des neuen Algorithmus ist eine verbesserte Erkennung von Überlastungszuständen innerhalb des Variogetriebes. Mit dieser Information soll es möglich sein, rechtzeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten. Beim Testen des Algorithmus ist zu überprüfen, ob die für den DynamicArm vorgegebenen Hubzeiten bei verschiedenen Hublasten auch mit dem Prototypen eingehalten werden können.

³Mit dem Variogetriebe ist eine stufenlose Einstellung des Übersetzungsfaktors des Getriebes möglich. Siehe Abschnitt 4.2.3

1.2 Lösungsansatz

Der erste Schritt besteht darin, einen funktionsfähigen Prototypen aufzubauen. Dazu muss die neue Elektronik in der Prothese untergebracht und korrekt verbunden werden. Abbildung 1.3 zeigt die bereits fertig aufgebaute Liftereinheit die von zwei AXON-Bus[®]-Knoten gesteuert wird.



Abbildung 1.3: komplett aufgebaute Liftereinheit

Das elektronische System wird aus Komponenten bereits vorhandener Ottobock Produkte aufgebaut. Durch die Wiederverwendung von bestehenden Baugruppen wird zwar die Flexibilität in der Zusammenstellung eingeschränkt, jedoch verkürzt sich die Entwicklungsdauer für die Testplattform deutlich. Dieser Prototyp stellt das Basissystem für die Softwareentwicklung dar. Im nächsten Schritt muss die Kommunikation zwischen den Knoten konfiguriert werden um den Echtzeitdatenaustausch zwischen den Knoten zu gewährleisten. Um die Konfiguration durchzuführen, wird ein firmeneigenes Softwaretool verwendet. Damit wird der, dem Kommunikationsprotokoll vorgegebene, Zeitplan für die Datenübertragung aufgestellt. Danach kann mit der Entwicklung der Steuerungssoftware begonnen werden. Am Beginn der Entwicklung steht die Verarbeitung der Sensordaten, der im Arm verbauten Sensorik. Um Messprogramme und Sicherheitsvorkehrungen, zum Schutz des Prototypen vor Beschädigungen, einfacher implementieren zu können, wird im nächsten Schritt ein Grundgerüst für die Ablaufsteuerung der Armfunktionen implementiert. Schließlich kann der alternative Algorithmus zur automatischen Getriebeverstellung entwickelt werden. Da kein Prüfstand für das Getriebe vorhanden ist, müssen alle Messungen innerhalb der Embedded Software des Armes, unter Verwendung der verbauten Sensorik, durchgeführt werden. Abbildung 1.4 zeigt den bereits aufgebauten Prototypen im verwendeten Messaufbau. Die nächsten Schritte sind iterativ. Mit den, durch die Messungen, gewonnenen Daten wird der Verstellalgorithmus für das Variogetriebe entworfen. Danach wird der erdachte Algorithmus getestet. Falls sich der Algorithmus nicht wie gewünscht verhält, wird er angepasst. Abschließend werden verschiedene Messungen durchgeführt. Dabei werden die Hubzeiten bei unterschiedlichen Lasten gemessen

1 Einleitung

und Vergleichsmessungen des Energieverbrauches eines originalen DynamicArm und des hier entwickelten Prototypen durchgeführt.

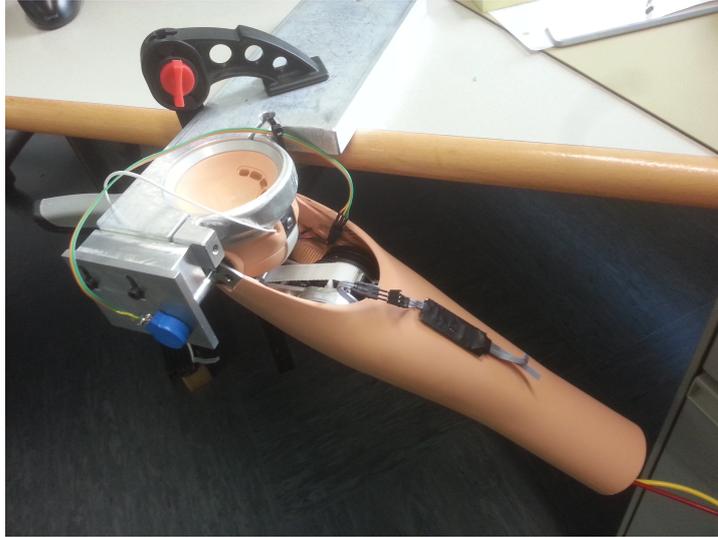


Abbildung 1.4: Aufbau zur Durchführung der Versuche.

1.3 Struktur der Arbeit

Diese Arbeit setzt sich aus acht Kapiteln zusammen. Im Anschluss an das aktuelle Kapitel 1, folgt in Kapitel 2 eine Beschreibung der Grundlagen und Begriffe der in dieser Arbeit eingesetzten Techniken. Im darauf folgenden Kapitel 3, wird der Stand der Technik erhoben, was eine Beschreibung des originalen DynamicArm, sowie die Beschreibung der verwendeten Technologien einschließt. Kapitel 4 befasst sich mit dem Aufbau des Prototypen und dessen Komponenten. Außerdem werden die zu implementierenden Funktionen und das verteilte System aus AXON-Bus[®]-Knoten, welches diese Funktionen ausführt, genauer beschrieben. Im Hauptteil der Arbeit, beginnend mit Kapitel 5, wird die Entwicklung der Steuerungssoftware behandelt. Es werden alle Schritte, wie die Planung der Kommunikation zwischen den Knoten, die Verarbeitung der Sensordaten und die Entwicklung der Ablaufsteuerung beschrieben. In weiterer Folge wird in Kapitel 6 die Entwicklung des alternativen Getriebeverstellalgorithmus, inklusive der zur Charakterisierung des Variogetriebes durchgeführten Messungen dargestellt. Um die erzielten Ergebnisse zu evaluieren, wird in Kapitel 7 das Verhalten des Getriebeverstellalgorithmus untersucht. Zusätzlich werden Vergleichsmessungen zwischen einem originalen DynamicArm und dem im Laufe dieser Arbeit entstanden Prototypen durchgeführt. Abschließend gibt Kapitel 8 eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit wieder. Weiters werden Vorschläge für mögliche Folgearbeiten zur Verbesserung von etwaigen Unzulänglichkeiten des Prototypen unterbreitet.

2 Theoretischer Hintergrund der eingesetzten Technologien

2.1 Verteiltes System

Definition nach Tanenbaum und Van Steen [30]: „Ein verteiltes System ist eine Menge von unabhängigen Computern die ihrem Benutzer als einziges, zusammenhängendes System erscheinen.“

In dieser Arbeit wird ein solches verteiltes System verwendet, um die Funktionen einer aktiven Ellenbogen Prothese zu realisieren. Die für den Anwender sichtbare Funktionalität der Prothese wird durch das Zusammenspiel verschiedener Mikrocontroller erreicht. Jeder dieser Rechenknoten hat eigenständige Funktionen, die in ihrer Summe neue Funktionen ermöglichen. Diese Rechenknoten, im Weiteren als Knoten bezeichnet, kommunizieren über ein Bus System miteinander. Jeder Knoten steuert die ihm zugeordneten Aktuatoren und verarbeitet die Signale der zugewiesenen Sensoren.

2.2 Echtzeit System

Definition eines Echtzeit Computer Systems bzw. Real-Time System (RTS) nach Kopetz [15]: „A real-time computer system is a computer system, where the correctness of the system behavior depends not only on the logical results of the computations, but also on the physical time when these results are produced. By system behavior we mean the sequence of outputs in time of a system.“

Echtzeitsysteme sind oft Teil eines Embedded oder Cyber-Physical System. Das Computersystem hat dabei eine spezifizierte Aufgabe wie z.B. die Regelung eines physikalischen Prozesses. Bei der Interaktion von Computersystemen mit ihrer physikalischen Umwelt durch Sensoren und Aktoren ist das Echtzeitverhalten des Systems häufig ein wichtiger Aspekt. Echtzeitsysteme werden oft mit schneller Berechnung der Ausgangsantwort assoziiert, dies trifft aber nicht zwingend zu. Echtzeitsysteme werden unter Berücksichtigung der Dynamik eines Physikalischen Prozesses entworfen. Diese Prozesse können Zeitkonstanten in verschiedenen Größenordnungen aufweisen. Durch die Dynamik des

Systems wird der späteste Zeitpunkt (Deadline) bestimmt, zu dem das RTS ein spezifisches Resultat produziert haben muss. Die Anforderungen an Echtzeitsysteme werden in drei Klassen unterteilt. (vgl.[15])

- harte RTS: Verpassen einer Deadline kann katastrophale Auswirkungen haben z.B. Flugzeugabsturz
- feste RTS: ein verspätetes Ergebnis hat keine Bedeutung mehr und wird verworfen
- weiche RTS: ein verspätetes Ergebnis kann auch nach Ablauf der Deadline verwendet werden

Im Kontext eines verteilten Systems, ist die Echtzeitfähigkeit des Kommunikationssystems eine Voraussetzung für die Echtzeitfähigkeit des gesamten Systems.

Echtzeit Kommunikation Anforderungen

Im Folgenden werden die für diese Arbeit benötigten Anforderungen, die Kopetz [15] an ein Echtzeit-Kommunikationssystem stellt, zusammengefasst. Dabei liegt der Fokus auf zeitlich gesteuerter Kommunikation.

- Kleine Latenz der Nachrichtenübermittlung: Die längste Zeit die benötigt wird, um eine Nachricht zu übermitteln, muss so klein wie möglich sein. Das ist beispielsweise notwendig, um die Totzeit in etwaigen Regelungen deren Feedback Pfad über das Kommunikationsmedium verläuft, möglichst gering zu halten.
- Minimaler Jitter: Jitter ist die Differenz zwischen der längsten und der kürzesten Zeit, die die Nachrichtenübermittlung benötigt. Großer Jitter hat negative Auswirkungen auf die Synchronisation der globalen Zeitbasis.
- Aufbau einer globalen Zeitbasis: Für ein zeitlich gesteuertes Protokoll ist es sehr wichtig, dass alle Kommunikationsteilnehmer mit der selben Zeitbasis arbeiten. Diese Zeitbasis muss laufend synchronisiert werden, um ein Auseinanderdriften der Zeitbasis der einzelnen Teilnehmer zu verhindern.
- Schnelle Fehlererkennung und Fehlerkorrektur am Empfänger: Der Empfänger einer Nachricht muss möglichst schnell erkennen, ob die Daten der Nachricht richtig übertragen wurden. Da bei der Echtzeit-Datenübertragung kein erneutes Senden der Nachricht möglich ist, müssen die Daten in der Art codiert werden, dass aufgetretene Fehler korrigiert werden können.

2.3 Das ISO/OSI-Referenzmodell

Die Kommunikation zwischen Computersystemen kann, je nach Anwendung und System sehr komplex werden. Darum wurde von der International Organization for Standardization (ISO) ein Schichtenmodell zur Strukturierung entwickelt, um für bessere Übersichtlichkeit zu sorgen. Das ISO/OSI-Referenzmodell unterteilt die Kommunikation zwischen Computersystemen in sieben Schichten. Es ist jedoch nicht vorgeschrieben, dass alle Schichten implementiert werden müssen.

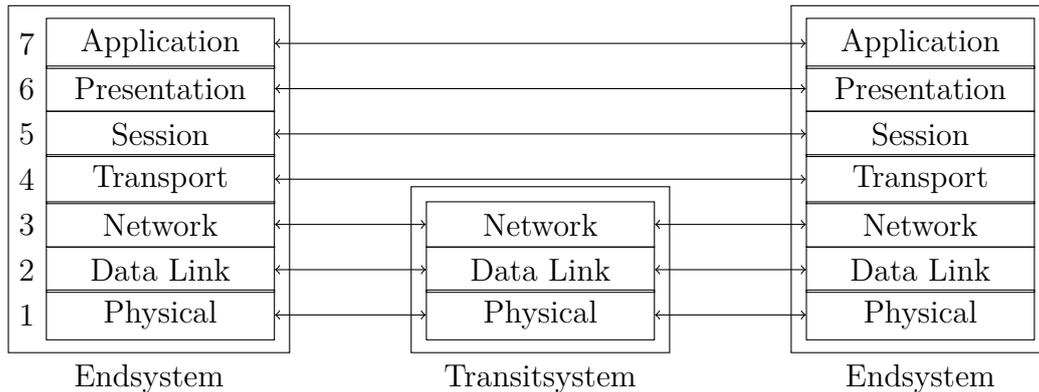


Abbildung 2.1: ISO/OSI Referenzmodell

Abbildung 2.1 zeigt eine Darstellung des Modells. Dabei kommunizieren die Schichten der Endsysteme untereinander horizontal über Protokolle. Die einzelnen Schichten innerhalb der Endsysteme kommunizieren nur mit ihren Nachbarschichten und benötigen keine Informationen über die genaue Implementierung der anderen Schichten. Dabei stellt jede Schicht der nächst höheren Schicht vertikal Dienste zur Verfügung. (vgl. [18] [14])

- Schicht 1: Physical Layer (Bitübertragungsschicht) ist die unterste Schicht. Sie spezifiziert die elektrischen und mechanischen Parameter der physikalischen Verbindung.
- Schicht 2: Data Link Layer (Sicherheitsschicht) kann Fehlererkennung und Korrektur beinhalten.
- Schicht 3: Network Layer (Netzwerk- oder Vermittlungsschicht) stellt Verbindungen zwischen Knoten her (Routing).
- Schicht 4: Transport Layer (Transportschicht) regelt Kommunikation zwischen Prozessen und stellt einen Transportdienst für höhere Schichten bereit.

- Schicht 5: Session Layer (Sitzungsschicht) stellt Sitzungen (Sessions) zwischen Prozessen her.
- Schicht 6: Presentation Layer (Darstellungsschicht) stellt eine einheitliche Transfersyntax bereit.
- Schicht 7: Application Layer (Verarbeitungs- oder Anwendungsschicht) stellt der Anwendung Protokolle für gewisse Anwendungsfunktionalitäten bereit z.B.: Filetransfer, E-Mail.

2.4 Bus-Struktur

Die Bus-Struktur bezeichnet eine mögliche Topologie eines Kommunikationsnetzwerkes. Die Struktur ist physikalisch festgelegt und kann deshalb in Schicht 1 des ISO/OSI-Modells eingeordnet werden. Abbildung 2.2 stellt diese Struktur dar. Dabei teilen sich alle Teilnehmer das selbe Übertragungsmedium, die Bus-Leitung. Die Kommunikationsteilnehmer werden hier als Knoten bezeichnet. Sie sind mit der Bus-Leitung verbunden. Durch die geteilte Nutzung des Übertragungsmediums darf nur ein Teilnehmer zu einem bestimmten Zeitpunkt senden. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, kommt es zu Kollisionen bei der Datenübertragung, der Inhalt der Nachricht wird zerstört. Um solche Kollisionen zu vermeiden, stehen verschiedene Techniken zur Verfügung. Es wird grundsätzlich zwischen deterministischen und nicht deterministischen Buszugriffsverfahren unterschieden. Bei deterministischen Buszugriffsverfahren steht der Knoten, der über die Erlaubnis zu Senden verfügt, bereits vor Beginn der Datenübertragung fest. Im Gegensatz dazu, ein nicht deterministisches Verfahren, bei dem ein Knoten A mit der Absicht zu senden das Übertragungsmedium überwacht ob bereits ein anderer Knoten B Daten sendet. Ist dies der Fall, verschiebt Knoten A den Buszugriff auf einen späteren Zeitpunkt. Eine weitere Einschränkung durch die geteilte Nutzung des Übertragungsmediums besteht in der Beschränkung der Übertragungsrate des Mediums. Diese Beschränkung gilt für das gesamte System und hat zur Folge, dass die Übertragungsrate pro Knoten sinkt, je mehr Knoten an der Kommunikation teilnehmen. Der größte Vorteil der Bus-Struktur ist der

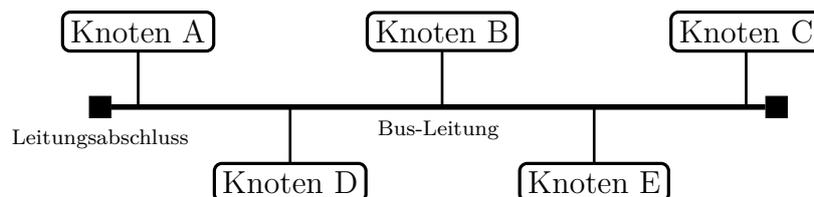


Abbildung 2.2: Bus Topologie

verringerte Hardware-Aufwand, verglichen zu anderen Netzwerktopologien wie z.B. dem vermaschten Netz. (vgl. [26])

2.5 Deterministischer endlicher Automat

Definition des endlichen Automaten nach Böckenhauer und Hromkovic [5]:

„Ein endlicher Automat ist ein Quintupel $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$, wobei

- Q eine endliche Menge von Zuständen ist,
- Σ ein Alphabet, genannt Eingabealphabet ist,
- $q_0 \in Q$ der Anfangszustand ist,
- $F \subseteq Q$ die Menge der akzeptierenden Zustände ist und
- δ eine Funktion von $Q \times \Sigma$ nach Q ist, die Übertragungsfunktion genannt wird.“

Der Name endlicher Automat oder Finite State Machine (FSM) kommt von der Endlichen Anzahl an möglichen Zuständen. Die Unterscheidung zwischen deterministischem und nichtdeterministischen Automaten liegt in der Übertragungsfunktion. Dabei handelt es sich um einen Deterministischer Endlicher Automat (DEA), wenn man von einem Zustand aus, mit ein und demselben Eingabesymbol genau einen Folgezustand erreichen kann, falls man mit diesem Symbol auch einen weiteren Zustand erreichen kann, dann spricht man von einem nichtdeterministischen Automaten.

Als Beispiel für einen DEA, wird im Folgenden das Heben des Prothesenarmes in vereinfachter Form beschrieben. Der Automat besteht aus drei Zuständen, dem Initialen Zustand q_0 , dem Zustand in dem der Hubmotor aktiv ist und den Arm anhebt q_1 und einem Fehlerzustand q_2 . Die möglichen Eingaben Σ sind der Befehl „heben“ bei dem der Hubmotor aktiviert werden soll, der Fehlerfall „fehler“ und die Eingabe „stop“, die signalisiert, dass der Arm den Hebevorgang abbrechen soll. Die Transitionen zwischen den Zuständen werden durch die Übertragungsfunktion δ bestimmt. Durch Erreichen von einem der beiden Endzustände q_0 oder q_2 , kann der Fehlerfall von der erfolgreichen Durchführung unterschieden werden.

$$\begin{aligned}
 Q &= \{q_0, q_1, q_2\}, \\
 \Sigma &= \{\text{heben}, \text{stop}, \text{fehler}\}, \\
 \delta(q_0, \text{heben}) &= q_1, \\
 \delta(q_1, \text{fehler}) &= q_0, \\
 \delta(q_1, \text{stop}) &= q_2, \\
 &\text{mit dem Anfangszustand } q_0 \text{ und} \\
 F &= \{q_0, q_2\}
 \end{aligned}$$

Neben der mathematischen Beschreibung kann der Zustandsautomat auch in graphischer Form dargestellt werden. Abbildung 2.3 zeigt den Zustandsautomaten des Beispiels als gerichteten Graph. Die Knoten des Graphen entsprechen den Zuständen des Automaten, die Kanten zwischen den Knoten entsprechen mit ihren Übertrittsbedingungen den Transitionen zwischen den einzelnen Zuständen. Die Darstellung der Knoten unterscheidet sich dadurch, ob ein Zustand einen Startzustand, einen Endzustand, keines von Beiden oder Beides symbolisiert.

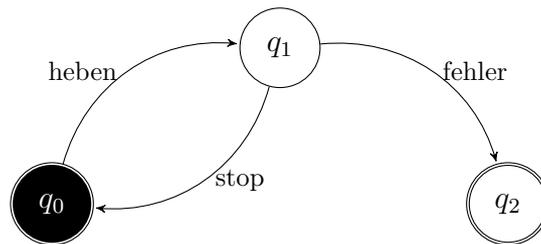


Abbildung 2.3: graphische Darstellung Zustandsautomat

2.6 Digitale Signalverarbeitung

Unter digitaler Signalverarbeitung versteht man die Verarbeitung von Signalen unter Zuhilfenahme digitaler Rechner. Diese Form der Signalverarbeitung ist, durch die Verfügbarkeit von integrierten Prozessoren und programmierbarer Logik, weit verbreitet. Die hauptsächlichen Vorteile der digitalen Verarbeitung liegen nach Doblinger [8] bei:

- „exakte Reproduzierbarkeit,
- meist vernachlässigbare Bauteiltoleranzen, Temperatureinflüsse und Alterungseffekte,
- verlustfreie Speicherung und Übertragung von Signalen,

2 Theoretischer Hintergrund der eingesetzten Technologien

- komprimierte Speicherung und Übertragung von Signalen,
- verschlüsselte Speicherung und Übertragung von Signalen,
- effektive Reduktion von Störungen bzw. Korrektur von Übertragungsfehlern,
- hochempfindliche und präzise Messmöglichkeiten mit verschiedenartigen Sensoren,
- präzise Regelung und Steuerung von Maschinen und Anlagen.“

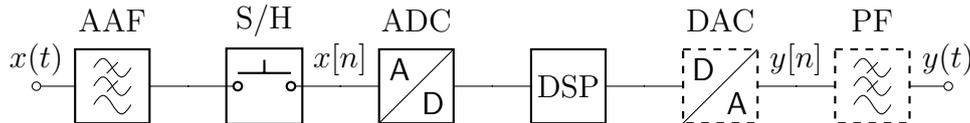


Abbildung 2.4: Abtastsystem

Abbildung 2.4 zeigt eine mögliche Struktur eines Systems zur digitalen Signalverarbeitung. Die Voraussetzung um ein analoges zeitkontinuierliches Eingangssignal $x(t)$ digital verarbeiten zu können, ist die Transformation in eine zeitdiskrete Wertefolge $x[n] = x(nT_s)$ mit der Abtastperiode T_s . Dazu wird das analoge Signal, mittels Sample Hold (S/H) Glied in äquidistanten Zeitschritten dem Shannon-Nyquist-Theorem folgend, abgetastet. Um eine Verletzung des Abtasttheorems zu verhindern, wird das analoge Signal zuerst mittels Anti Aliasing Filter (AAF)¹, auf eine von der Abtastrate abhängige, maximale Frequenz begrenzt. Diese Frequenz ergibt sich durch das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem.

Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem besagt, dass ein auf eine Frequenz $f_{max} = B$ bandbeschränktes analoges Signal, aus einer Folge von äquidistanten Abtastwerten, mittels der Interpolationsfunktion

$$g(t) = \frac{\sin(2\pi Bt)}{2\pi Bt} \quad (2.1)$$

exakt rekonstruiert werden kann, wenn es mit einer Frequenz von $f > 2f_{max} = 2B$ abgetastet wurde.

Da die Auflösung von digitalen Rechnern begrenzt ist, wird das abgetastete Signal mittels Analog to Digital Converter (ADC) quantisiert. Dabei entsteht, je nach Auflösung, ein gewisser Quantisierungsfehler, der durch die Einteilung der Analogwerte in eine endliche Anzahl von Werteintervallen entsteht. Die so entstandene Wertefolge kann im Digital

¹Aliasing ist ein Fehler der bei der Rekonstruktion eines abgetasteten Signales auftritt, wenn das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem verletzt wird.

Signal Processor (DSP) weiter verarbeitet werden. Beispiele dafür sind digitale Filteralgorithmen. Beispiele für Strukturen solcher Algorithmen werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. In vielen Fällen wird das verarbeitete, noch immer digitale Signal, wieder in ein analoges Ausgangssignal $y(t)$ umgewandelt. Dazu, wird im Ersten Schritt, ein sogenannter Digital to Analog Converter (DAC) eingesetzt. Er wandelt die binäre Ausgangsfolge in entsprechende Analog Spannungspegel $y[n]$ um. Zur Rekonstruktion des Ausgangssignales wird eine erneute Tiefpassfilterung mit dem Post Filter (PF) durchgeführt.

2.6.1 FIR Filter

Finite Impulse Response (FIR)-Filter sind Filterstrukturen der Systemklasse der Linear Time-Invariant (LTI)-Systeme für zeitdiskrete Signale. Diese Art von Filter weist eine endliche Impulsantwort² auf. Damit ist diese Filterklasse für alle möglichen Filterparameter stabil und weist keine Rückkopplungen des Ausgangssignales $y[n]$ auf. (vgl. [8])

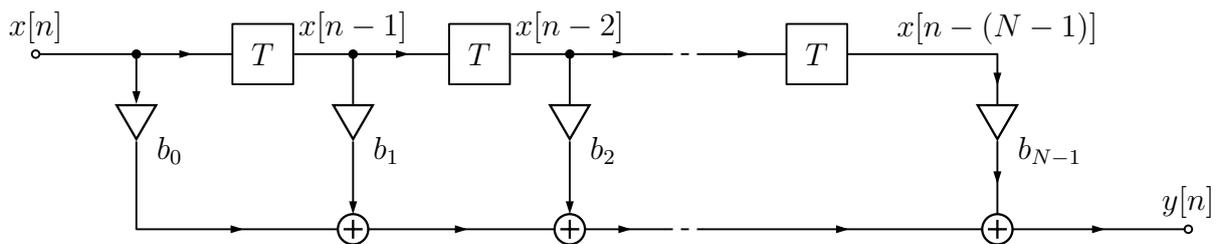


Abbildung 2.5: Netzwerkdarstellung FIR Filterstruktur in Direkt-Form [21]

Abbildung 2.5 stellt die Struktur eines FIR-Filters dar. Das Filter der Länge N benötigt $N-1$ Speicherstellen um die $N-1$ vergangenen Werte $x[n-1]$ bis $x[n-N+1]$ zu speichern. Jeder verzögerte Eingangswert wird mit dem entsprechenden Filterkoeffizienten b_0 bis b_{N-1} multipliziert und anschließend summiert. Die Ausgangsfolge $y[n]$ lässt sich analog zur Filterstruktur durch eine Differenzgleichung, siehe Gleichung 2.2, beschreiben und entspricht einer gewichteten Summe der verzögerten Eingangswerte.

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} b_k x[n-k] \quad (2.2)$$

²LTI-Systeme werden allgemein durch die Angabe deren Reaktion auf eine Testfolge beschrieben. Die Impulsantwort ist die Reaktion eines vorher in Ruhe befindlichen Systems, auf eine impulsförmige Anregung des Systems.[25]

Durch Transformation der Differenzgleichung, unter Zuhilfenahme der Z-Transformation, lässt sich auch die Übertragungsfunktion siehe Gleichung 2.3 in äquivalenter Form darstellen.

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} b_k z^{-k} \quad (2.3)$$

2.6.2 IIR Filter

IIR-Filter gehören ebenfalls der Klasse der LTI-Systeme an. Im Unterschied zu FIR-Filtern weist diese Filterklasse eine unendliche Impulsantwort auf. Unendliche Impulsantwort bedeutet, dass die Impulsantwort eine unendliche Anzahl von Samples ungleich Null enthält. (vgl. [8])

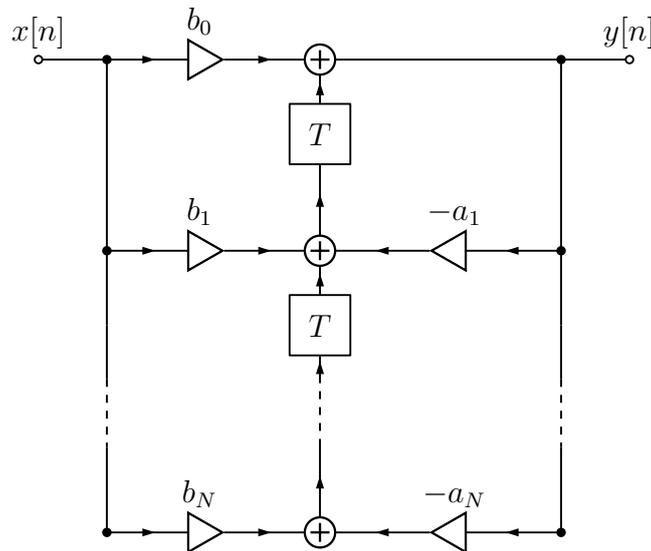


Abbildung 2.6: Netzwerkdarstellung IIR Filterstruktur in transponierter Direkt-Form 2 [21]

Abbildung 2.6 stellt die Struktur eines IIR-Filters dar. Im Gegensatz zur FIR-Filterstruktur weist die FIR-Struktur Rückkopplungen des Ausgangssignales $y[n]$ mit den Filterkoeffizienten $-a_1$ bis $-a_N$ auf. Die Ausgangsfolge $y[n]$ des IIR-Filters kann ebenfalls, analog zur Filterstruktur, als Differenzgleichung mit $a_0 = 1$ im Zeitbereich dargestellt werden.

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b_k x[n-k] - \sum_{l=1}^N a_l y[n-l] \quad (2.4)$$

2 Theoretischer Hintergrund der eingesetzten Technologien

Auch diese Differenzgleichung lässt sich mittels Z-Transformation als Übertragungsfunktion, siehe Gleichung 2.5, darstellen.

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^N b_k z^{-k}}{\sum_{l=0}^N a_l z^{-l}} \quad (2.5)$$

3 Stand der Technik

3.1 Original DynamicArm

Wie in der Einleitung beschrieben, ist der DynamicArm eine myoelektrisch gesteuerte Ellenbogen- und Unterarmprothese. Dabei werden die elektrischen Signale die Muskeln bei ihrer Aktivierung erzeugen durch auf der Haut liegende Sensoren erfasst. Diese Signale werden verwendet um die Prothese zu steuern. Der DynamicArm kann mit verschiedenen Greifgeräten ausgestattet werden, die ebenfalls über die Myosignale gesteuert werden. Zur flexiblen Kombination von Prothesenteilen bei einem erhöhten Maß an Störfestigkeit wurde des AXON-Bus[®]-System entwickelt. Diese Entwicklung fand nach dem Erscheinen des DynamicArm statt, damit ist der DynamicArm noch nicht kompatibel zu dieser Weiterentwicklung. Der AXON-Bus[®] ermöglicht es den individuellen Komponenten des Prothesensystems miteinander zu kommunizieren. Durch dieses System wird eine sehr stabile Datenverbindung aufgebaut. AXON-Bus[®] kompatible Produkte, wie Greifgeräte oder Handgelenksrotatoren können dadurch flexibel kombiniert werden. Die Inkompatibilität des DynamicArm verhindert die Kombination mit diesen Produkten. Darum soll mit dieser Arbeit ein völlig neues Steuerungssystem entwickelt werden, welches kompatibel zum AXON-Bus[®] ist. Für den Antrieb des Armes wird ein verschleißarmer BLDC-Motor eingesetzt. Der DynamicArm verfügt über ein stufenlos verstellbares Getriebe, welches dynamisch während eines Hubvorganges eingestellt wird. Der Algorithmus zur Getriebeverstellung der derzeitigen Version des DynamicArm basiert auf einer Messung des Motorstromes. Das vom Motor abgegebene Moment ist proportional zum Motorstrom. Somit arbeitet die Getriebeverstellung indirekt mit dem Eingangsmoment der gesamten Getriebestufe. Da es bei der Produktion des Variogetriebes zu Streuungen kommt, wird bei einer initialen Kalibrierung des Armes eine fixe Kennlinie, die sogenannte Rutschkurve, aufgenommen. Dabei wird festgehalten bei welchem Motorstrom das Variogetriebe überlastet wird und durchrutscht. Die Verschaltung des Getriebes funktioniert so, dass bei Erreichen des Strom-Schwellwertes, bei der aktuellen Getriebeeinstellung, das Getriebe in Richtung höherer Übersetzung geschaltet wird. Der Verstellbereich des Variogetriebes ist dabei in fixe Stufen unterteilt. Wie bei vielen mechanischen Bauteilen können auch bei diesem Getriebe Alterungserscheinungen auftreten. Der alterungsbedingte Verschleiß kann unter Umständen ein Problem für den Verstellalgorithmus darstellen. Es kann folgendes Problem auftreten. Die Rutschgrenze

des Getriebes verschiebt sich im Laufe der Zeit. Falls diese Grenze so weit verschoben ist, dass der Strom-Schwellwert nicht mehr erreicht werden kann weil das Getriebe schon davor durchrutscht, so würde die Verstellung nicht mehr funktionieren und das Getriebe würde weiter überlastet werden und altert dadurch noch schneller. Um diesen Effekt abzuschwächen, und somit die Lebensdauer des Getriebes zu verlängern, wird in einem späteren Kapitel auch die Realisierung eines alternativen Verstellalgorithmus beschrieben.

3.2 Der Adaptive eXchange Of Neuroplacement - Bus

Der AXON-Bus[®] ist ein proprietärer Datenbus und wurde von der Firma Ottobock entwickelt. Dieser spezielle Bus wurde eigens für die Anforderungen in der Prothetik entworfen. Er stellt die Datenverbindung zwischen verschiedenen Komponenten eines Prothesensystems her. Der AXON-Bus[®] ist ein Echtzeit-Kommunikationssystem und besteht aus nur drei Leitungen. Zwei Leitungen dienen der Versorgung der Knoten. Eine Leitung dient der seriellen Kommunikation zwischen den Knoten. Da nur eine Datenleitung zur Verfügung steht, werden die Daten im Halb Duplex Betrieb übertragen. Im Kontext des ISO/OSI-Modells implementiert der AXON-Bus[®] Schicht 1 den Physical Layer, Schicht 2 den Data Link Layer und Schicht 7 den Application Layer. Der AXON-Bus[®] vereint Technologien verschiedener Bus-Standards wie dem Time Triggered Protocol oder dem Local Interconnect Network Bus. In den folgenden Abschnitten werden diese Standards kurz umrissen und die dem AXON-Bus[®] vererbten Konzepte erläutert.

3.2.1 Time Triggered Protocol/A

Die Society of Automotive Engineers (SAE) unterteilt die unterschiedlichen Anforderungen an Kommunikationssysteme in Kraftfahrzeugen in SAE-Klassen. Klasse „A“ unterstützt Sensor und Aktor-Applikationen mit relativ geringen Datenraten. Klasse „B“ beinhaltet Karosserie- und Fahrzeugelektronik mit mittleren Datenraten und Klasse „C“ beinhaltet sicherheitskritische Anwendungen im Bereich des Antriebes und des Fahrwerkes zu denen z.B. Motor, Getriebe, Bremsen und Lenkung gehören. Das Time Triggered Protocol (TTP) teilt sich auch nach diesen Anforderungen in zwei Klassen auf. Das TTP/C Protokoll ist für die Verwendung in hoch verlässlichen Echtzeitsystemen gedacht. Es kann für sicherheitskritische Anwendungen wie X-by-wire¹ System eingesetzt werden. Das TTP/A Protokoll, auf dem der Fokus in diesem Abschnitt liegt, ist für

¹Bei X-by-wire Systemen wird die Steuerung von Fahrzeugen wie z.B. Flugzeug oder Auto nicht mehr mechanisch durchgeführt. Die Eingaben des Fahrers bzw. Piloten werden durch Sensoren erfasst und elektrisch an Aktoren weiter geleitet.

eine einfache Integration von Sensoren und Aktoren in ein Netzwerk gedacht. Es kann in low-cost Mikrocontrollern implementiert werden. Das TTP/A-Protokoll ist ein zeitlich gesteuertes Feldbus-Protokoll. Es dient dazu, low-cost „Smart Transducer²“ Knoten als Netzwerk zu verbinden. Die Knoten können dabei eigenständige Aufgaben erfüllen und mit den restlichen Knoten kommunizieren. Das TTP/A-Protokoll folgt dem Time-Division Multiple Access (TDMA) Schema. Dadurch wird ein deterministisches zeitliches Verhalten erreicht. Die Datenübertragung wird dabei durch einen statischen Ablaufplan gesteuert. Jeder Knoten darf nur in dem ihm zugeordneten Zeitslot senden. Somit sind Kollisionen am Übertragungsmedium von vornherein ausgeschlossen. Der Entwickler ist für die konsistente zeitliche Planung der Kommunikation zuständig. (vgl. [10] [9])

Die erstmalige Adaptierung des TTP/A Protokolls für den AXON-Bus[®] wurde von Obermaisser und Kanitsar [20] durchgeführt.

Rundenbasierte Kommunikation

Das TTP/A Protokoll verwendet ein zyklisches Zeitmodell. Die Datenübertragung ist zeitlich in Runden organisiert. Jede Runde besteht aus einer gewissen Anzahl an Zeitschlitzen bzw. Slots. Die Zuteilung der Kommunikationsknoten zu Runden und Slots geschieht a priori, jeder Teilnehmer verfügt über die Information wann er, innerhalb einer Runde, senden bzw. empfangen darf. Die Definition der Runden wird in der so genannten Round Descriptor List (RODL) durchgeführt. Runden werden vom Bus-Master ausgelöst, der erste Slot einer Runde identifiziert die Runde eindeutig, in den darauffolgenden Slots wird die Runde laut RODL abgearbeitet. Zwischen den einzelnen Runden ist ein Inter Round Gap (IRG) vorgesehen, während dieser Zeitspanne ist der Bus inaktiv. Durch die a priori Zuteilung von Slots, fällt der Overhead zur Adressierung der einzelnen Knoten weg und die Protokoll-Effizienz steigt. Abbildung 3.1 veranschaulicht die zeitliche Abfolge der rundenbasierten Kommunikation. (vgl. [11])

Der AXON-Bus[®] verwendet unter Anderen dieses Konzept zur Medium Access Control um den Buszugriff zu koordinieren. Dieses Konzept kann der Schicht zwei, dem Data Link Layer im ISO/OSI-Modell zugeordnet werden. Zusätzlich verfügen die Knoten des AXON-Bus[®] über Adressen, über die ein Knoten auch außerhalb einer Runde angesprochen werden kann. In diesem Modus fällt, im Gegensatz zur Rundenübertragung, ein erhöhter Overhead an. Anwendung findet der Modus bei der Konfiguration der Knoten.

²Ein Smart Transducer vereint analoge bzw. digitale Sensorik oder Aktorik mit einem Mikrocontroller zu einer Einheit.

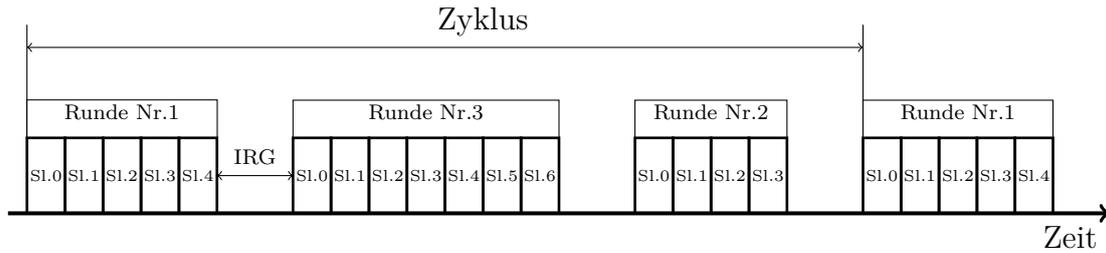


Abbildung 3.1: Rundenbasierte Kommunikation

Interface File System

Der Datenaustausch zwischen den Knoten erfolgt über ein Interface File System (IFS), welches in jedem Knoten implementiert ist. Das IFS der jeweiligen Knoten dient dabei als Quelle und Senke für jegliche Kommunikation. Die Daten im IFS werden periodisch über den Bus aktualisiert. Die RODL definiert nicht nur die Zeiten zu denen ein Knoten Daten senden oder empfangen darf, sie definiert auch die Files die übertragen werden sollen. Die Applikation greift lesend und schreibend auf das IFS zu, jedoch nicht auf die Kommunikation auf dem Datenbus. (vgl. [11])

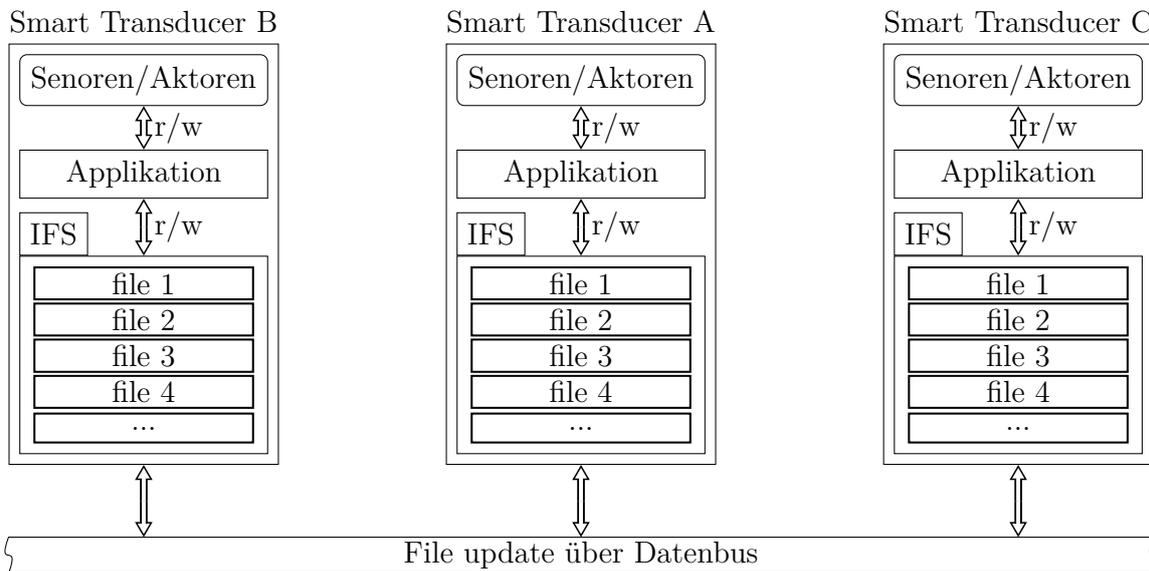


Abbildung 3.2: Kommunikationsknoten mit Interface File System

Auch der AXON-Bus[®] verwendet ein IFS welches der Schicht sieben, dem Application Layer im ISO/OSI-Modell, zugeordnet werden kann.

3.2.2 LIN

Die Entwicklung des Local Interconnect Network-Bus entstand aus der Bemühung eine kostengünstige Alternative zum Low-Speed-CAN-Bussystem zu bieten. Den Anwendungsbereich bilden einfache Sensor-Aktor Anwendungen in der Kraftfahrzeugindustrie. Die LIN-Spezifikation wurde anfänglich durch das LIN-Konsortium, eine Kooperation verschiedener Kfz-Hersteller, voran getrieben. Positioniert wurde das LIN-System als Sub-Bus für Controller Area Network (CAN)-Netze. Ein Local Interconnect Network besteht aus einem Master und einem bzw. mehreren Slaves. Dabei bestimmt der Master die zeitliche Reihenfolge von Nachrichten welche a priori bestimmt wird. Der Master initiiert die Übertragung, indem er den Header der Nachricht aussendet. Jeder Slave verfügt über die Information, auf welchen Header er welche Daten übermitteln soll. (vgl. [32])

LIN-Bus Physical Layer

Der LIN-Bus verfügt über nur eine Datenleitung die bidirektional verwendet wird. Die Daten werden im sogenannten Half-Duplex Modus übertragen. Daten können abwechselnd, aber nicht gleichzeitig übertragen werden. Innerhalb der einzelnen Bus-Knoten sind Empfänger und Sender miteinander verbunden. Beim Senden einer Nachricht wird jedes Bit vom sendenden Knoten zurückgelesen. So können Übertragungsfehler detektiert werden. Zur korrekten Übertragung eines Bits muss sichergestellt werden, dass das Datensignal, zum Samplingzeitpunkt des Empfängers, am Bus mit dem korrekten Spannungspegel anliegt.

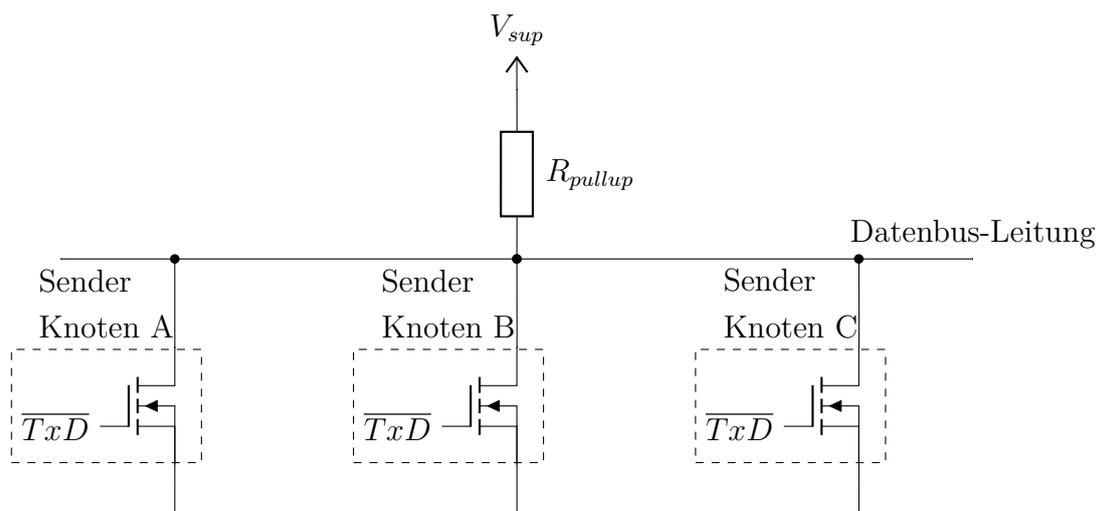


Abbildung 3.3: Wired-And-Schaltung

Die elektrische Signalform der übertragenen Daten ist mittels Bus-Timing Parametern und Spannungs-Schwellwerten für rezessive und dominante Bitzustände spezifiziert. Die maximale Bitrate beträgt 20 kBit/s. Elektrisch entspricht der Bus einer Wired-And-Schaltung (siehe Abbildung 3.3). Der Spannungspegel der Bus-Leitung wird im Leerlauf auf das Potential der Versorgungsspannung gezogen. Dies entspricht dem High Pegel (logisch 1) und stellt den rezessiven Zustand dar. Um Nachrichten zu senden, verfügen die Treiber der Knoten über Open Collector bzw. Open Drain Ausgänge. Durch Ansteuerung des Transistors des Treibers schaltet dieser, und zieht das Potential der Bus-Leitung auf Groud. Dieser Zustand ist dominant und entspricht dem low Pegel (logisch 0). Die Schaltung ermöglicht es, dass zwei oder mehr Knoten gleichzeitig senden könnten, ohne dass Beschädigungen der Treiber auftreten. Es ist im regulären Betrieb nicht vorgesehen, dass zwei Knoten gleichzeitig senden. Durch etwaige Fehler könnte dieser Zustand dennoch auftreten. Die Bus-Transceiver des LIN werden mittels Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) angesteuert. Diese sind in den meisten Mikrocontrollern, als Kommunikationsbaustein, integriert. Durch die Verwendung eines UART kann die Taktleitung zur Synchronisation der Datenübertragung eingespart werden. Um den Zeitpunkt des Sendens eines Bit mit dem Zeitpunkt, zu dem der Empfänger das Bit liest zu synchronisieren, wird beim UART die Länge des UART-Rahmens und die der Kenntnis der eingestellten Baudrate verwendet. Der Rahmen besteht aus einem Start und einem Stop Bit. Die Datenübertragung kann zu jedem Zeitpunkt gestartet werden und ist somit asynchron. (vgl. [1])

Der Physical Layer des AXON-Bus[®] basiert weitgehend auf dem des LIN-Bus. Der größte Unterschied besteht in der spezifizierten maximalen Bitrate, die beim AXON-Bus[®] deutlich höher angesetzt ist.

3.3 Brushless DC Motor

Im Gegensatz zu einem herkömmlichen Direct Current (DC) bzw. Gleichstrommotor besitzt der bürstenlose Gleichstrommotor Brushless Direct Current (BLDC)-Motor keine Motorbürsten. Die Kommutierung³ des Gleichstrommotors geschieht mechanisch im Kontrast zur elektronisch gesteuerten Kommutierung des BLDC-Motors. Daher wird der BLDC-Motor auch häufig als Electronically Commutated (EC)-Motor bezeichnet. BLDC-Motoren haben viele Vorteile gegenüber bürstenbehafteten DC Motoren. Nach Yedamale [31] ergeben sich die Vorteile des BLDC-Motors Einige zu:

- geringeres Betriebsgeräusch

³Kommutieren bezeichnet den Umschaltvorgang eines eingepprägten Stromes eines Zweiges zu einem Anderen [2]

- höhere Lebensdauer durch geringeren Verschleiß
- höhere Maximaldrehzahl
- geringeres Trägheitsmoment des Rotors

Darüber hinaus ist das Verhältnis von Bauvolumen zu erzeugtem Drehmoment kleiner. Das prädestiniert diesen Antrieb für Anwendungen, bei denen Platz und Gewicht kritische Faktoren sind, wie zum Beispiel in der Prothetik. Abbildung 3.4 zeigt ein vereinfachtes Blockschaltbild eines BLDC-Motors mit 3 phasiger Permanentterregte Synchron Maschine (PSM). Der Motor wird mittels Gleichspannung versorgt.

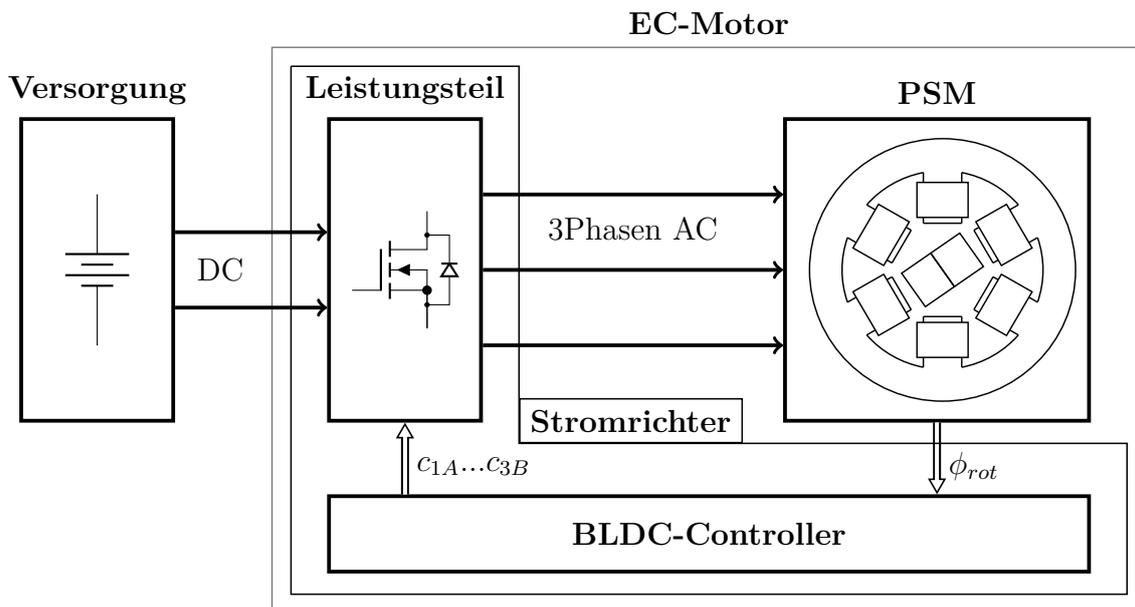


Abbildung 3.4: Blockschaltbild Brushless DC Motor

Aus Sicht der Quelle verhält sich der BLDC-Motor wie ein Gleichstrommotor. Um den Motor hoch dynamisch betreiben zu können, ist zur zeitgerechten Kommutierung des Motors die Lageinformation ϕ_{Rot} des Rotors notwendig. Zur Ermittlung des Rotorwinkels können verschiedene Techniken eingesetzt werden. Diese lassen sich in sensorbasierte und Sensorlose Verfahren unterteilen. Zur Ermittlung der Rotorlage mittels Sensoren werden häufig Hall-Sensoren eingesetzt, um eine grobe Bestimmung des Rotorwinkels durchzuführen. Für eine genauere Bestimmung können auch Drehgeber eingesetzt werden. Zur sensorlosen Kommutierung kann die Rotorlage aus den, im Motor induzierten, Gegenspannungen ⁴ bestimmt werden. Der BLDC-Controller verarbeitet die Rotorlage zu den Ansteuersignalen c_{1A} bis c_{2B} für den Leistungsteil der Stromrichterschaltung. Diese führt die Kommutierung durch und stellt die Phasenströme, zur Erzeugung des magnetischen

⁴Durch die Bewegung des Rotors bzw. dessen Magnetfeldes wird in den Motorwicklungen Spannung induziert. Diese Spannung wirkt entgegen der Klemmenspannung.[27]

Drehfeldes innerhalb des Motors, bereit. Dieses Feld erzeugt durch Wechselwirkung mit dem permanenten Magnetfeld des Rotors ein Moment, welches den Motor in Bewegung versetzt.

3.3.1 Permanenterregte Synchronmaschine

Bei der permanent erregten Synchronmaschine handelt es sich um einen Drehstrommotor. Der Aufbau besteht aus einem Stator und einem permanent magnetischen Rotor. Der Stator beherbergt räumlich versetzte Spulen, die so genannten Ständerwicklungen. Durch eine geeignete Anordnung der räumlich versetzten Spulen wird, bei geeigneter Bestromung ein rotierendes Magnetfeld erzeugt. Daher der Ausdruck Drehstrommaschine bzw. Drehfeldmaschine. Das Feld entsteht durch die Überlagerung der einzelnen Magnetfelder der Wicklungen. In diesem Drehfeld befindet sich ein permanent magnetisierter bzw. erregter Rotor. Der Permanent-Magnet bewegt sich bei unbelasteter Maschine Synchron, mit dem durch die Ständerwicklungen hervorgerufenen rotierenden Magnetfeld. Das bedeutet, dass der Rotor der Drehzahl, des vom Stator erzeugten Drehfeldes, folgt. Ist die Frequenz des Drehspannungssystems, welches zur Ansteuerung des Statorwicklungen verwendet wird variabel, so ist auch die Motordrehzahl variabel. (vgl.[27])

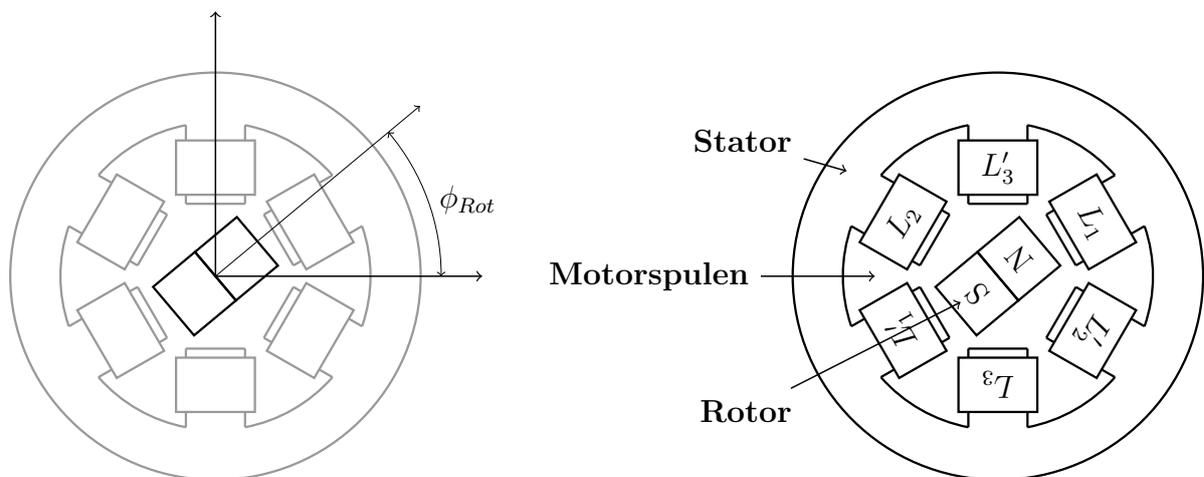


Abbildung 3.5: Vereinfachter Aufbau einer 3 Phasigen PSM

Abbildung 3.5 zeigt den vereinfachten Aufbau einer permanent erregten Synchronmaschine, mit drei um 120° versetzten Motorspulen, im Querschnitt. Der Stator ist raumfest, er besteht aus einem magnetisch leitfähigen Material und beherbergt die felderzeugenden Spulen L_1 bis L_3 . Die Spulen L_n und L'_n mit $n = \{1, 2, 3\}$ sind elektrisch verbunden und werden jeweils mit den selben Strömen i_n durchflossen. Der aktuelle Rotorwinkel wird mit ϕ_{Rot} bezeichnet.

3.3.2 Stromrichter

Stromrichter werden allgemein in drei Klassen unterteilt. Als Hauptklassen werden DC-DC-Wandler, Alternating Current (AC)-DC-Wandler und AC-AC-Wandler unterschieden [6]. Der für BLDC Motoren verwendete Stromrichter entspricht der Klasse der DC-AC-Wandler. Dabei wird eine Gleichspannung in eine Wechselspannung umgewandelt. Der hier beschriebene Stromrichter besteht aus einem Leistungsteil und einem Steuerungsteil. Dieser entspricht dem BLDC-Controller in Abbildung 3.4.

Leistungsteil

Der Leistungsteil besteht aus gesteuerten Schaltern, die vom Steuerungsteil, je nach Bedarf, aktiviert werden. Im Fall des Brushless Motors ist der Leistungsteil, je nach Phasenzahl des Motors, aus einer gewissen Anzahl an Halbbrücken aufgebaut. Er ist für die Bestromung der Spulen zuständig, der Verlauf des Stromes in den einzelnen Statorspulen kann, je nach Art der Kommutierung, unterschiedlich ausfallen.

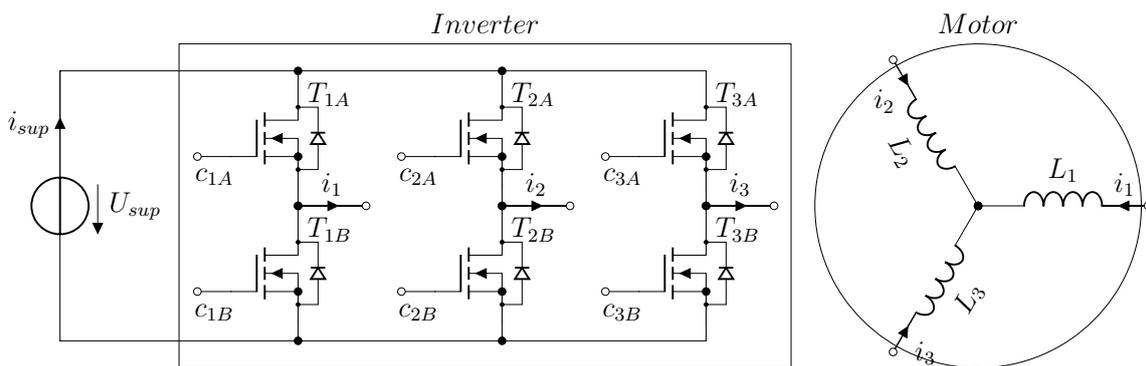


Abbildung 3.6: Leistungsteil für 3 Phasigen Wechselrichter aufgebaut aus n-Kanal MOS-Fet

Abbildung 3.6 stellt den grundlegenden Aufbau eines Leistungsteiles für drei Phasen dar. Die Schaltung besteht aus drei Halbbrücken. Die Schalter sind in diesem Fall als N-Kanal Metal Oxide Semiconductor (MOS)-FeldEffektTransistor (FET) ausgeführt. Je nach Anforderungen an den Stromrichter können die Schalter auch als bipolare Transistoren oder Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT) ausgeführt sein.

Kommutierung

Die Kommutierung, also das Umschalten der Ströme zwischen den Motorwicklungen wird durch die Kommutierungslogik innerhalb des BLDC-Controllers bestimmt. Wie bereits

3 Stand der Technik

erwähnt, verfügt der Controller über die Lageinformation ϕ_{Rot} des Rotors. Die Ansteuersignale für den Leistungsteil des Stromrichters, werden abhängig davon erzeugt. Die Ausgangsspannungen der Leistungsstufe erzeugen Ströme in den Motorwicklungen, welche die entsprechenden Magnetfelder innerhalb des Motors hervorrufen. Je nach Kommutierungsart können verschiedene Stromverläufe in den Motorspulen eingestellt werden.

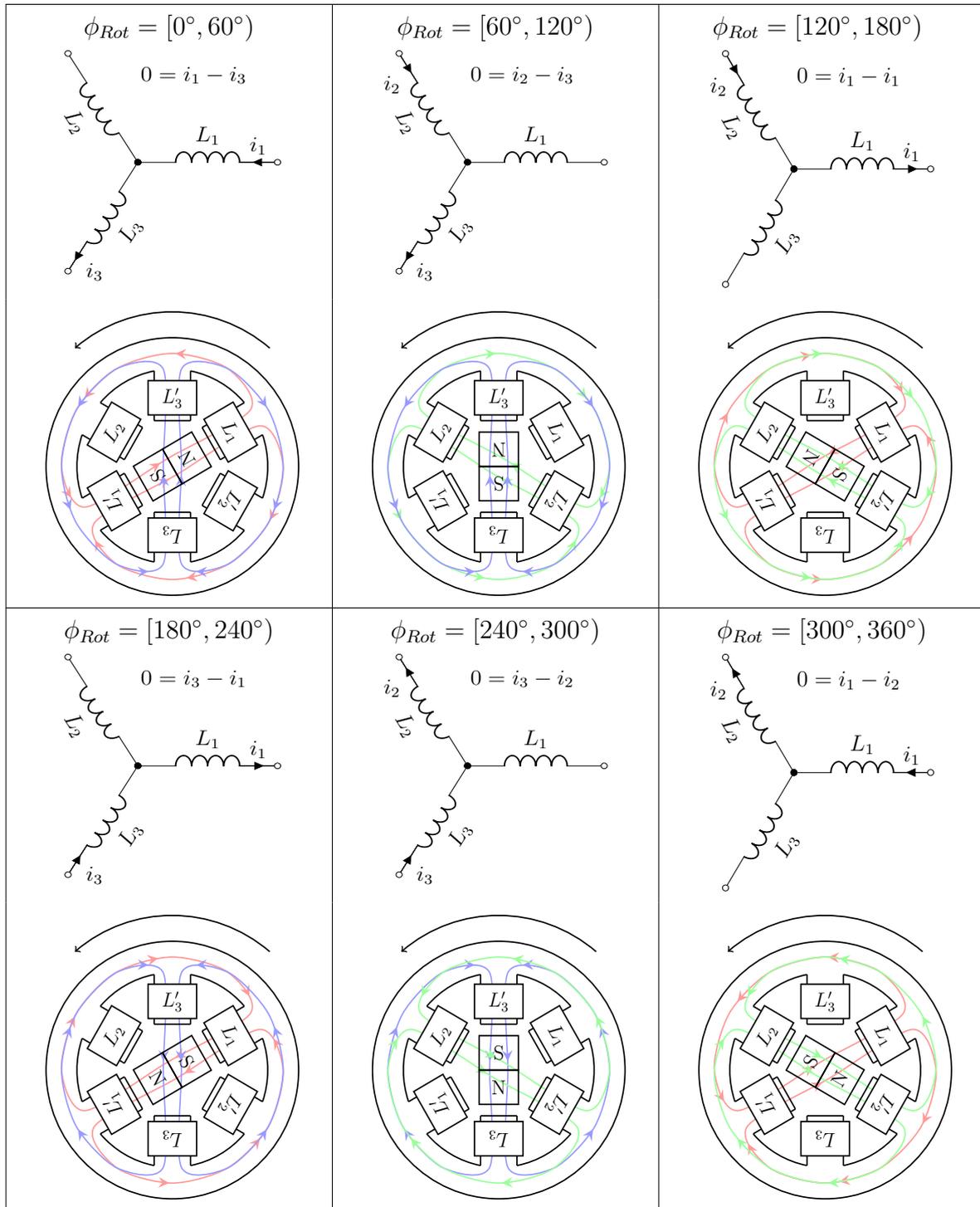


Abbildung 3.7: Räumlicher Ablauf der Block-Kommutierung

Im Weiteren wird der Ablauf der Kommutierung für den Fall der Block-Kommutierung anhand Abbildung 3.8 näher erläutert. Im Betrieb fließt ein annähernd konstanter Strom durch zwei verschiedene Motorklemmen. Dieser Strom wird nach jeweils 60° Rotordrehung auf das nächste Spulenpaar umgeleitet. Abbildung 3.7 zeigt diesen Ablauf über eine 360 Grad Drehung des Rotors. Die farblich gekennzeichneten Linien innerhalb des Motors stellen schemenhaft den Verlauf, der von den Spulenströmen i_1 bis i_3 hervorgerufenen, magnetischen Feldlinien dar. Die Überlagerung dieser Felder ergibt das Statorfeld. Es wirkt auf das Rotor Magnetfeld, wodurch ein Moment entsteht, welches den Rotor weiter bewegt. Dieses Moment ist, abhängig von der Ausrichtung des Rotorfeldes, relativ zur Ausrichtung des Statorfeldes. Sobald der Rotor so weit gedreht hat, bis das erzeugte Moment zu klein wird, muss der Strom in den Motorspulen weiter geschaltet werden. So richtet sich das Statorfeld neu aus und das Drehmoment steigt wieder an. Abbildung 3.8 stellt den Stromverlauf der einzelnen Motorspulen über dem Rotorwinkel dar. Unter Vernachlässigung der Spuleninduktivitäten stellen sich blockförmige Stromverläufe ein, daher der Name Blockkommutierung.

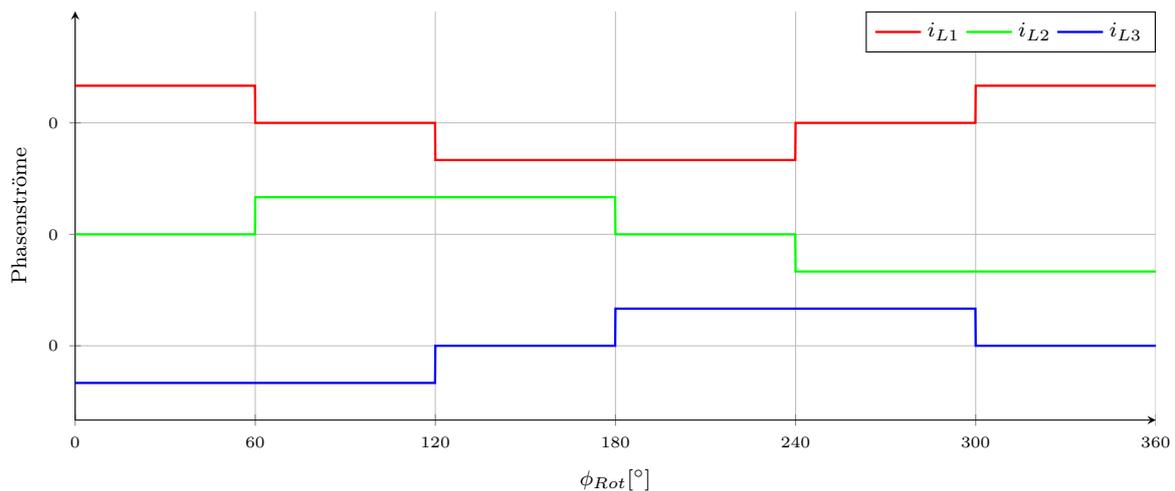


Abbildung 3.8: Phasenströme Blockkommutierung

Alternativ zur Blockkommutierung können auch andere Stromverläufe in den Motorspulen eingepreßt werden. Als Beispiel werden in Abbildung 3.9 die Stromverläufe bei Sinuskommutierung dargestellt. Dabei werden, entsprechend dem Versatzwinkel der Motorspulen, um 120° phasenverschobene sinusförmige Verläufe durch gepulstes Schalten verschiedener Schalterkombinationen der Leistungsstufe eingestellt. Diese Art der Kommutierung weist gegenüber der Blockkommutierung verschiedene Vorteile auf [13]:

- Halten des Rotors bei vollem Drehmoment in jeder Position, auch volles Drehmoment bei sehr langsamen Drehzahlen (besonders relevant bei Positionierantrieben).
- Drehrichtung und Drehmoment können ruckfrei umgekehrt werden.

3 Stand der Technik

- Gleichmäßigerer Motorlauf in Bezug auf Drehmoment und Drehzahl.
- Geringere Geräusentwicklung in allen Betriebsbedingungen.

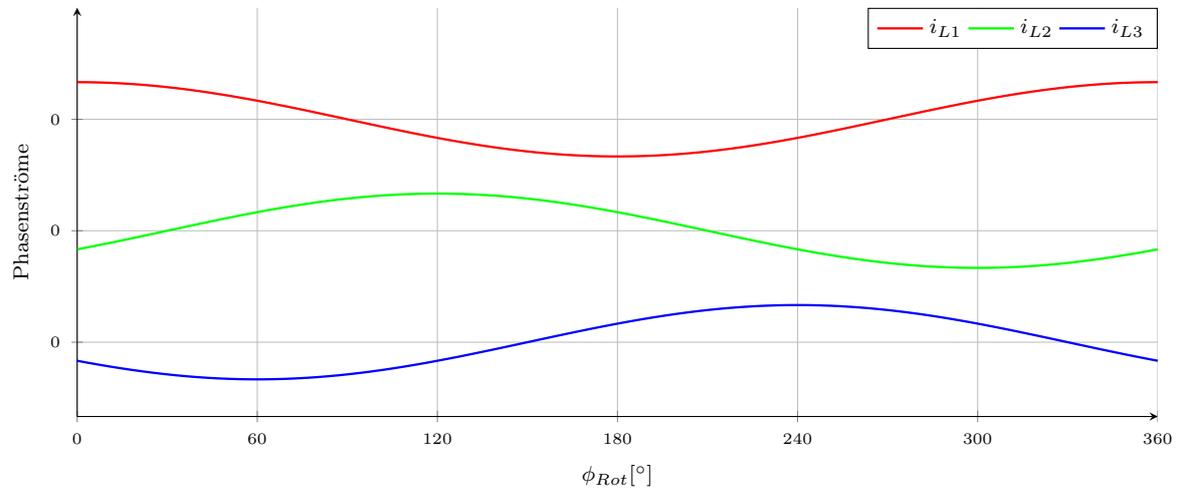


Abbildung 3.9: Phasenströme Sinuskommutierung

4 Aufbau und Funktion der Prothese

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Aufbau der Prothese und dem Zusammenspiel der einzelnen Funktionsgruppen. Der Arm besteht, wie in Abbildung 4.1 gezeigt, prinzipiell aus zwei Teilen. Zum Einen der Gelenkskugel und zum Anderen dem Unterarmschaft. Die Gelenkskugel stellt die Verbindung mit dem individuellen Oberarm-Prothesenschaft des Patienten her. Sie ist über eine drehbare, stufenlos sperrbare Gelenksachse und dem Antriebsband, mit dem Unterarmschaft verbunden. Der Unterarmschaft der Prothese beinhaltet die Liftereinheit. Hier sind der Hubmotor, das Automatic Forearm Balance (AFB)-System, die Getriebestufe und der Servomotor zur Getriebeverstellung untergebracht. Für die Arbeit an der Prothesensteuerung wurde vorerst auf den Akkumulator verzichtet. In einem endgültigen Produkt würde der Schaft auch den Akkumulator für die Energieversorgung der Prothese beinhalten. Der Prototyp wird bei der Entwicklung des Steuerungssystems durch ein Labornetzteil mit Energie versorgt. Je nach prothetischer Versorgung des Patienten kann der Unterarmschaft mit einem Greifgerät und einem Dreheinsatz ausgestattet werden. In den folgenden Abschnitten werden die Einzelkomponenten der Prothese und deren Funktionen beschrieben.

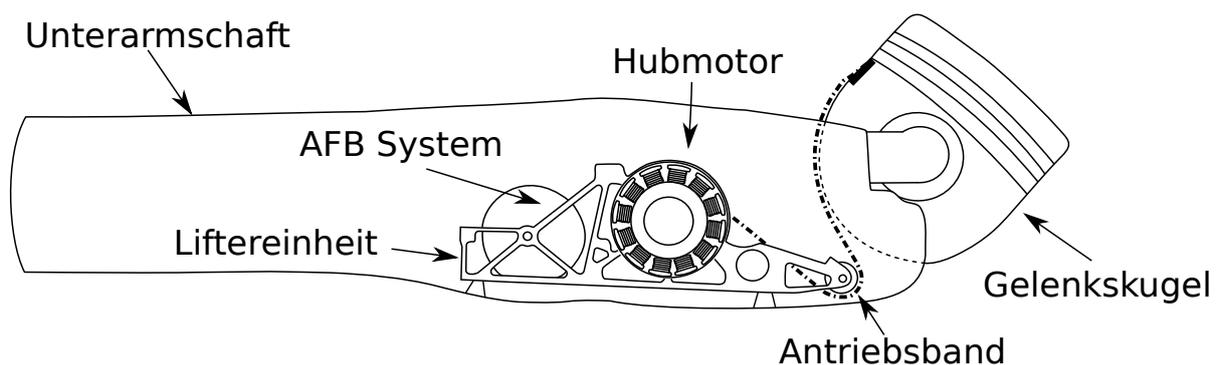


Abbildung 4.1: Aufbau der Prothese

4.1 Gelenkskugel mit Sperre



Abbildung 4.2: Gelenkskugel mit Sperre (Gehäuse geöffnet)

Die Gelenkskugel mit integrierter Gelenkssperre befindet sich, wie in Abbildung 4.1 ersichtlich, an der Oberarmseite der Prothese. Die Sperre stellt einen eigenständigen AXON-Bus[®] Knoten dar und dient als zentrale Einheit für alle Eingangssignale. Die dazu benötigte Elektronik ist in der Gelenkskugel integriert. Die Sperre kann direkt an den AXON-Bus[®] angeschlossen werden. Die Elektronik, Sensorik und Aktorik der Baugruppe wird über den AXON-Bus[®] versorgt. Die verbauten mechanischen Komponenten sind die Achse des Ellenbogengelenkes und ein Sperrmechanismus. Das Gelenk kann in jeder Stellung blockiert werden. Die Sperre wird während einer Haltephase aktiviert, um den Hubmotor komplett zu entlasten. Zusätzlich kann die Sperre manuell über ein Zugseil aktiviert oder deaktiviert werden. Am Oberen Teil der Gelenkskugel befindet sich ein Gewindeansatz für den Eingussring, der im Oberarmschaft des Patienten vergossen wird. Die Gelenkskugel ermöglicht zusätzlich eine passive Humeralrotation¹. Das in Abbildung 4.1 eingezeichnete Band zwischen Liftereinheit und Gelenkskugel wird hier über eine Klemme befestigt.

4.1.1 Sensoren

Über die integrierte Sensorik kann der Zustand (gesperrt/entsperrt) der Sperre ermittelt werden. Der Zustand der Sperre wird über den AXON-Bus[®] übertragen.

4.1.2 Aktoren

Ein Servomotor sperrt und entsperrt das Gelenk. Die Sperre ist aus zwei entgegengesetzt gewickelten Schlingfedern aufgebaut. Die Federn sind um die Gelenksachse gewickelt. Durch die Reibung zwischen den Federn und der Achse wird die Achse gesperrt. Durch

¹„humerus“- Oberarmknochen

diesen Aufbau ist es möglich, das Gelenk in jeder Position stufenlos zu sperren. Um das Gelenk freizugeben, werden die Federn mittels eines Servomotors gespannt. Dadurch erhöht sich der Durchmesser der Federn und die Achse kann wieder frei bewegt werden.

4.2 Liftereinheit



Abbildung 4.3: Liftereinheit

Abbildung 4.3 zeigt die bereits vollständig aufgebaute Liftereinheit. Die Einheit befindet sich im Unterarmschaft der Prothese. Die Funktionen werden in zwei separaten AXON-Bus[®] Knoten realisiert. Ein Knoten ist für die Ansteuerung des Servomotors zur Getriebeverstellung zuständig. Der andere Knoten dient der Ansteuerung des Hubmotors. Die Liftereinheit hat die Aufgabe den Arm aktiv zu heben und dabei automatisch das Getriebe zu verstellen. Das Senken des Armes geschieht mit Hilfe der Schwerkraft. Die Liftereinheit besteht aus einem Brushless Direct Current-Motor, der sein Drehmoment über ein stufenlos verstellbares Variogetriebe, zwei Planetengetriebestufen und eine Bandmechanik mit variabler Übersetzung abgibt. Zur Verstellung des Variogetriebes ist ein Servomotor verbaut. Um den Motor und das Getriebe bei Hubvorgängen zu entlasten und um im Freischwungmodus eine Annäherung an das natürliche Verhalten eines Armes zu erreichen, ist ein zusätzlicher Energiespeicher in Form einer Feder verbaut. Diese Feder wird beim Absenken des Armes gespannt und speichert so einen Teil der Hubenergie. Beim Anheben des Armes wird diese Energie in Form eines zusätzlichen Drehmomentes abgegeben. Dieses System wird Automatic Forearm Balance-System genannt. Abbildung 4.4 veranschaulicht den Momentenfluss. Die Übersetzungsfaktoren der Getriebestufen sind dabei symbolisch als Verstärkungen ausgedrückt. Die Übersetzung des Variogetriebes ist einerseits von der Getriebeeinstellung und andererseits vom geforderten Abtriebsmoment M_V abhängig. Eine genauere Beschreibung dieses Getriebes findet sich in Abschnitt 4.2.3. Untersuchungen zum Verhalten des Variogetriebes werden in Kapitel 6 ausgeführt. Die beiden Planetenstufen haben einen fixen Übersetzungsfaktor. Der Momentenverlauf des AFB-Systems ist abhängig von der Armstellung. Der Verlauf ist so eingestellt, dass bei gestrecktem Arm nur wenig Hilfsmoment M_{AFB} abgegeben

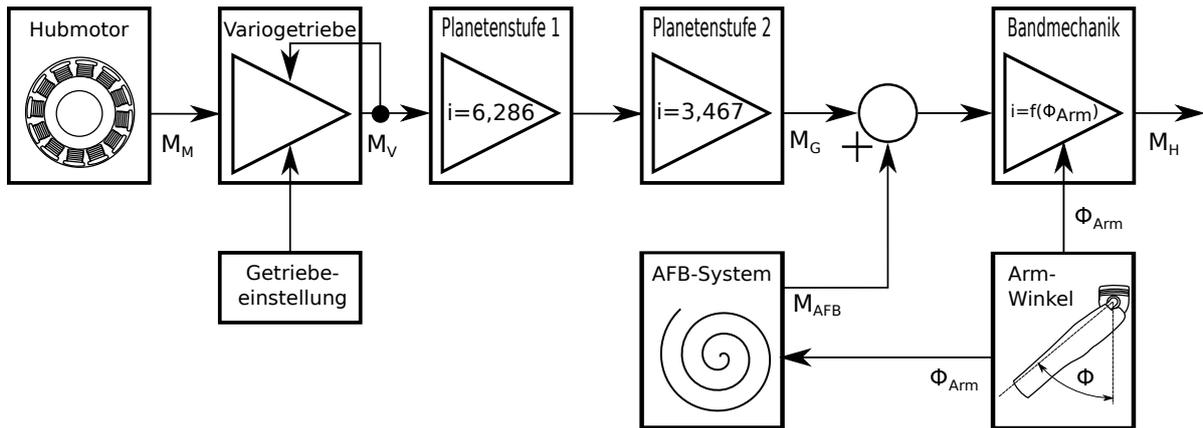


Abbildung 4.4: Übertragung des Motormoment M_M zu Hubmoment M_H , M_M -Abtriebsmoment des Hubmotors, $M_V = f(M_V, \text{Getriebeinstellung})$ - Abtriebsmoment des Variogetriebes, M_G - Abtriebsmoment der kompletten Getriebestufe, $M_{AFB} = f(\phi_{Arm})$ - Erzeugtes Moment AFB, ϕ_{Arm} - Winkel des Armes

wird. Bei gebeugtem Arm $\phi_{Arm} = 90^\circ$ wird das maximale Hilfsmoment abgegeben. Der Übersetzungsfaktor der Bandmechanik ist ebenfalls abhängig von der Armstellung. Zwischen der Gelenkskugel und der Abtriebsrolle der Liftereinheit ist ein Band befestigt, welches den Arm nach oben zieht. Dazu wird das Band auf der Abtriebsrolle aufgewickelt. Die Abhängigkeit von der Armposition entsteht dadurch, dass diese Rolle nicht rund ist, sondern je nach Stellung einen anderen Radius aufweist.

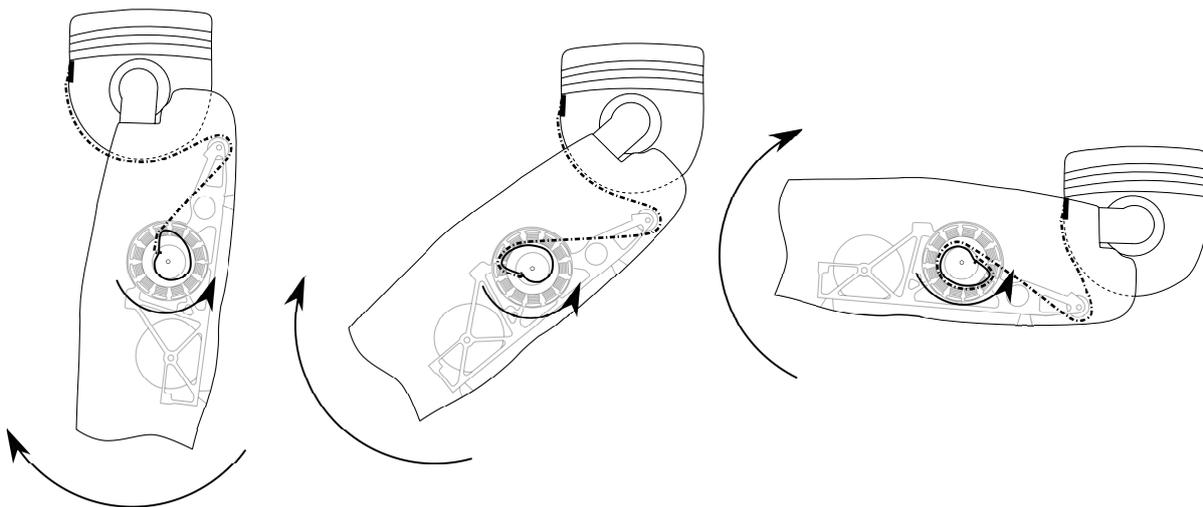


Abbildung 4.5: Funktionsweise der Bandmechanik

Der Verlauf des Übersetzungsfaktors der Bandrolle weist eine ähnliche Charakteristik

wie die des Verlaufes des Hilfsmomentes auf. Bei gestrecktem Arm ist der Übersetzungsfaktor der Bandmechanik am niedrigsten eingestellt. Wird der Arm angehoben, steigt dieser Übersetzungsfaktor durch die Verringerung des Abrollradius an. Abbildung 4.5 veranschaulicht diesen Sachverhalt.

4.2.1 Sensoren

Die Liftereinheit verfügt über einen Winkelsensor, der den Winkel der Abtriebswelle misst. Dieser Sensor befindet sich zwischen der Getriebestufe und der Bandmechanik. Durch den Einbauort des Sensors kann der Arm Winkel nicht direkt gemessen werden. Es kann lediglich die Stellung der Abtriebswelle bestimmt werden. Die tatsächliche Armstellung kann nur mit einem schwer kalkulierbaren Fehler bestimmt werden und wird daher in der weiteren Arbeit nicht verwendet. Der Grund für diesen Fehler ist die Anbindung des Abtriebes an der Gelenkskugel. Diese wird durch ein elastisches Gewebepband erreicht. Die Dehnung des Bandes ist von verschiedenen Faktoren wie der Armlast, der Umgebungstemperatur oder Abweichungen bei der Produktion abhängig.

Im Gehäuse des Unterarmschafts ist ein Dehnungs-Mess-Streifen (DMS) eingebaut. Damit kann die auf den Arm wirkende Last gemessen werden. Damit könnte auch das geforderte Abtriebsmoment an der Getriebestufe berechnet werden. Jedoch wäre auch hier die Banddehnung ein schwer einzuschätzender Faktor, darum wird das Signal des DMS nur zum ruckarmen Entsperren des Gelenkes verwendet. Dabei muss zwischen dem gesperrten Zustand des Armes und dem aktiven Zustand unterschieden werden. Abbildung 4.6 zeigt den belasteten Arm im gesperrten Zustand. Hier liegt der Arm bei entspanntem Antriebsband komplett auf der Sperre auf.

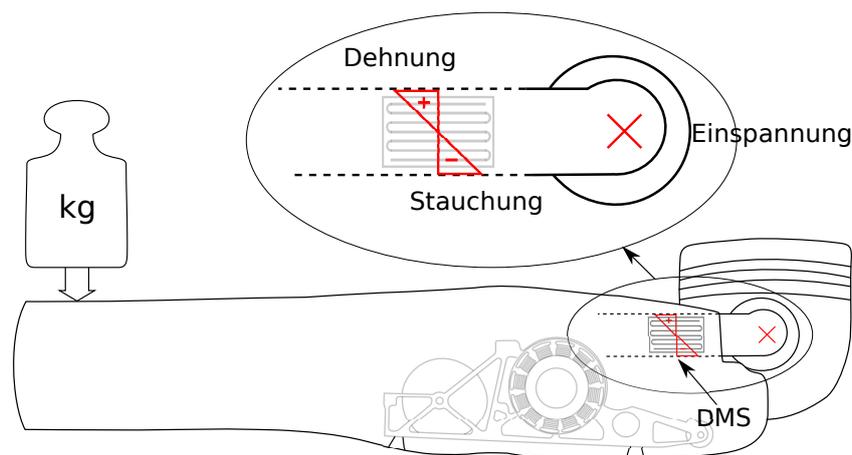


Abbildung 4.6: DMS Sensor (arm gesperrt)

Im entsperreten Zustand ist die Gelenksachse frei drehbar. Ein zusätzlicher Auflagepunkt entsteht verschoben zur Gelenksachse. Die Biegung im Bereich des DMS nimmt ab. Dadurch liefert der Sensor im gesperrten Zustand höhere Werte bei gleicher Armlast, als im entsperreten Zustand.

Um die Getriebeeinstellung zu detektieren, verfügt die Liftereinheit über einen magnetischen Getriebepositionssensors. Dieser wird von der Mechanik der Getriebeverstellung bewegt.

4.2.2 Aktoren

Die Liftereinheit beherbergt den BLDC Hubmotor, der den Arm hebt. Der Motor verfügt über eine eigene Elektronik mit Mikrocontroller und stellt einen eigenständigen AXON-Bus[®] Knoten dar. Der BLDC Motor wird mittels Sinuskommutierung, siehe Abschnitt 3.3, angesteuert. Der Knoten übernimmt die Kommutierung und Drehzahlregelung des Motors. Ein funktionsfähiger Regler stand bei der Entwicklung bereits zur Verfügung und musste nicht entwickelt werden.

Auch der Servomotor zur Getriebeverstellung und dessen Elektronik sind ebenfalls in der Liftereinheit untergebracht und stellen einen eigenen AXON-Bus[®]-Knoten dar. Der Servo-Knoten verarbeitet das Signal des Getriebepositionssensors. Der Positionsregler der Getriebeverstellung ist als Dreipunktregler ausgeführt.

4.2.3 Das Variogetriebe

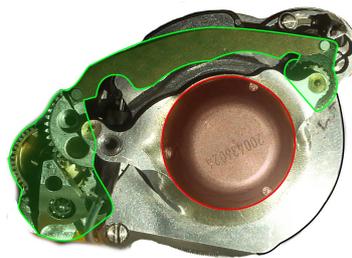


Abbildung 4.7: Variogetriebe: Grün-Getriebeverstellung, Rot-Getriebedeckel

Um den Bereich der Hubgeschwindigkeit der Prothese zu vergrößern, wird ein stufenlos verstellbares Getriebe eingesetzt. Damit ist es sowohl möglich sehr langsame und präzise, als auch schnelle Bewegungen durchzuführen. Das verwendete Getriebe ist als Reibradgetriebe mit stufenlos verstellbarer Übersetzung ausgeführt. Bei einem Reibradgetriebe

werden an den Berührungstellen, in diesem Fall kugelförmige Reibkörper, durch normalgerichtete Anpresskräfte tangentielle Reibungskräfte (Umfangskräfte) erzeugt. Die maximal übertragbaren Umfangskräfte sind von den Anpresskräften und den Reibzahlen der verwendeten Materialien abhängig [12]. Der Aufbau des Ottobock Variogetriebes ähnelt dem, des in [12] beschriebenen Nullgetriebes. Die Änderung des Übersetzungsverhältnisses wird, im Fall des in dieser Arbeit verwendeten Getriebes, durch den Abtriebslauftring eingestellt. Bei der Verwendung des Variogetriebes ist auf verschiedene Dinge zu ach-

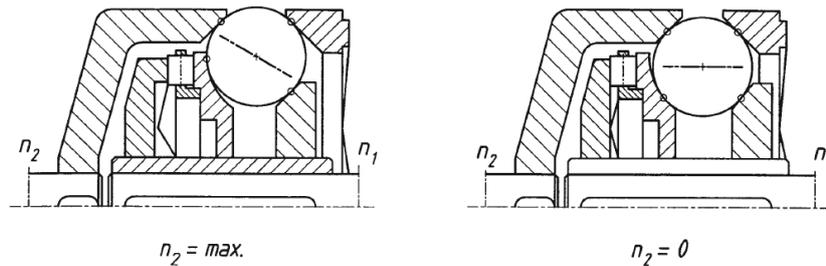


Abbildung 4.8: Nullgetriebe (planetroll-Getriebe) [12, Kapitel 6.6.3 Seite 587 Abbildung 6.99.]

ten. Durch die Art der Momentenübertragung besteht die Gefahr des Durchrutschens des Getriebes. Dabei geht der Kontakt zwischen den Reibflächen von Haftreibung zu Gleitreibung über. Das bedeutet, falls das Getriebe überlastet wird, kann es nicht mehr das benötigte Abtriebsmoment bereitstellen. Dadurch besteht die Gefahr, dass der belastete Arm bei rutschendem Getriebe herunterfällt. Außerdem führt ein Durchrutschen dazu, dass das komplette Moment, welches in das Getriebe geleitet wird, innerhalb des Getriebes in Reibungsenergie und somit in Wärme umgewandelt wird. Das kann, je nach umgesetzter Energie, zu hohem Verschleiß innerhalb des Getriebes führen. Die Kugelaufflächen werden dadurch dauerhaft beschädigt. Das Übersetzungsverhältnis des Variogetriebes

$$i = \frac{\omega_{Antrieb}}{\omega_{Abtrieb}} \quad (4.1)$$

ist in erster Linie von der Einstellung des Abtriebslauftringes abhängig. Dieser wird von einem Verstellmechanismus aus Zahnrädern und einem Hebel, siehe Abbildung 4.7 (grün eingezeichnet), verstellt. Der Mechanismus wird von dem bereits erwähnten Servomotor angetrieben. Zusätzlich ist das Übersetzungsverhältnis des Variogetriebes abhängig von dessen Abtriebsdrehmoment (siehe Kapitel 6). Diese Abhängigkeit äußert sich dadurch, dass die Drehzahlübersetzung bei steigendem Abtriebsmoment ansteigt. Bei einem bestimmten Abtriebsmoment geht die Drehzahlübersetzung schlagartig gegen Unendlich. Das bedeutet, dass die Abtriebsdrehzahl zu Null wird und das Getriebe durchrutscht. Dieses maximale Abtriebsmoment ändert sich, je nach Getriebeeinstellung.

4.3 Das AXON-Bus[®]-System

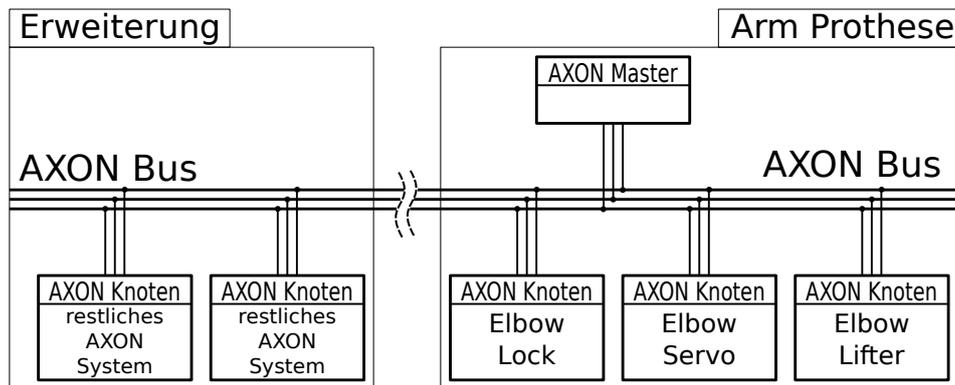


Abbildung 4.9: Busteilnehmer

Eine Aufgabe dieser Arbeit ist es, die Funktionen des Prothesenarms mittels einem verteilten System aus AXON-Bus[®]-Knoten zu realisieren. Abbildung 4.9 zeigt die Struktur des Systems. Das zu implementierende System Armprothese besteht aus drei Knoten, die über den Bus miteinander kommunizieren. Der AXON-Bus[®] ist so ausgelegt, dass verschiedene Systeme miteinander kombiniert und erweitert werden können. Diese Arbeit beschränkt sich jedoch auf das Armprothesen-System. Jedem Knoten sind bestimmte Aufgaben zugeordnet, die hier kurz zusammengefasst werden.

- **Master:**

Der Master Knoten initialisiert die Rundenübertragung und koordiniert die Kommunikation auf dem Bus. Dieser Knoten beinhaltet eine Bluetooth-Schnittstelle. Damit kann die Embedded Software der einzelnen Knoten eingespielt werden, außerdem kann der Inhalt des IFS der Knoten beobachtet werden. Dazu muss der Master Kenntnis über alle Files der Busteilnehmer haben. Für ein Endprodukt wäre der Master auch für das Einlesen der Myosensordaten zuständig. Aus diesen Daten erzeugt der Master Steuersignale für das gesamte Prothesen-System. Im Fall der Armprothese wäre es der Wert der Hubgeschwindigkeitsvorgabe.

- **Elbow Servo:**

Der Knoten Elbow Servo dient als zentrale Steuerung der Abläufe der Armfunktionen. Diese Entscheidung wurde getroffen weil die Elektronik des Knoten über die benötigten Eingänge verfügt, um die im Arm verbauten Sensoren auszulesen. Darum werden die Sensorsignale des DMS-Sensors, des Abtriebswinkelsensors und des Servo Positionssensors mit diesem Knoten eingelesen und verarbeitet. Neben der Ablaufsteuerung zählen auch die Getriebeverstellung, die Bestimmung der Getriebeübersetzung, die Positionregelung des Servos zur Getriebeverstellung und die

Bereitstellung von Vorgabewerten mittels IFS für andere Knoten zu seinen Aufgaben.

- **Elbow Lifter:**

Dieser Knoten ist für die Ansteuerung des BLDC-Hubmotors zuständig. Er bietet die Möglichkeit den Motor drehzahl geregelt zu betreiben. Dazu wird dessen Drehzahl mittels der verbauten Hall-Sensoren bestimmt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit die Impulse der Hall-Sensoren zu zählen, um so den zurückgelegten Weg des Motors zu ermitteln. Auch die Messung des Motorstromes zählt zu den Aufgaben des Knotens. Damit ergibt sich die Möglichkeit den Motorstrom, und somit das erzeugte Moment zu begrenzen. Weiters verfügt der Knoten über Sicherheitsmechanismen, um dessen Elektronik und den Hubmotor vor Beschädigungen durch Überlastung zu schützen. Dazu zählt die Temperaturüberwachung des Motors. Alle hier angeführten Messdaten sind über das IFS verfügbar (read only). Die Vorgabewerte für Drehzahl und Strombegrenzung werden ebenfalls aus dem IFS übernommen (write only).

- **Elbow Lock:**

Der Knoten Elbow Lock ist für die Aktivierung und Deaktivierung der Sperre zuständig und steuert somit den Motor zur Aktivierung des Sperrmechanismus. Weiters wird ein Vibrationsmotor und ein Beeper für akustisches Feedback angesteuert. Das IFS des Knoten liefert Informationen über den aktuellen Zustand der Sperre und über die Aktivierung des Feedback (read only). Die Aktivierung selbst wird ebenfalls mittels IFS durchgeführt (write only).

4.4 Zu implementierende Funktionen der Prothese

Die Vorgabe der Hubgeschwindigkeit wird im Fall des Prototypen mit Hilfe eines PC-User Interface durchgeführt. Bei diesem Userinterface handelt es sich um eine firmeneigene Software, namens Dumpmonitor. Die Software stellt eine Bluetooth Datenverbindung zum AXON-Bus[®]-Master Knoten her. Die Software erlaubt das Auslesen und Setzen von Werten in der Embedded Software des Systems. In einen eventuell entstehenden Produkt würde die Geschwindigkeitsvorgabe durch die myoelektrischen Signale des Patienten vorgegeben werden. Diese würden im AXON-Bus[®]-Master eingelesen und verarbeitet werden. Basierend auf den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Komponenten, sollen die nachfolgenden Funktionen im Prototyp der Prothese realisiert werden.

- **Arm heben:**

Der Arm soll gehoben werden, wenn der Wert der Hubgeschwindigkeitsvorgabe größer Null ist. Das maximale Hubgewicht des Armes soll 5 kg betragen. Dieses

wird zum Einen von der mechanischen Festigkeit der einzelnen Komponenten und zum Anderen vom maximalen Abtriebsmoment des Variogetriebes begrenzt. Die Festigkeit der mechanischen Komponenten würde auch höhere Hubgewichte zulassen. Darum ist hier das Getriebe der eigentlich begrenzende Faktor. Während des Hubvorganges soll das Variogetriebe automatisch und abhängig von der darauf wirkenden Abtriebslast eingestellt werden. Dabei muss ein Durchrutschen des Getriebes verhindert werden. Bei quasi unbelastetem Arm soll das Getriebe in der Stellung mit dem geringsten Übersetzungsfaktor verharren. Das Getriebe wurde so entworfen, dass es möglich ist, den quasi unbelasteten Arm in der Stellung mit dem geringsten Übersetzungsfaktor anzuheben. Der Hubvorgang wird entweder durch eine Hubgeschwindigkeitsvorgabe gleich Null oder vom Auftreten gewisser Ereignisse gestoppt. Die Ereignisse die zum Beenden des Hubvorganges führen sind das Erreichen der oberen Endposition oder das Erreichen der Betriebsgrenzen des Variogetriebes. Vor Erreichen der oberen Endposition wird der Arm über den Hubmotor abgebremst um die Mechanik des Endanschlages nicht zu belasten.

- **Arm senken:**

Das Absenken des Armes wird durch die Vorgabe eines negativen Wertes für die Hubgeschwindigkeit eingeleitet. Das Absenken kann bedingt durch den mechanischen Aufbau der Prothese nicht aktiv erfolgen. Das Gewicht des Armes wird nur durch die Erdanziehungskraft beschleunigt. Der Hubmotor kann dadurch die Bewegung nur bremsen, jedoch nicht beschleunigen. Die Senkgeschwindigkeit kann so durch den Hubmotor eingestellt werden. Der Absenkvorgang wird entweder durch eine Geschwindigkeitsvorgabe mit dem Wert Null, oder durch Erreichen der unteren Endposition gestoppt. Auch beim Absenken des Armes wird der Arm vor Erreichen des unteren Endanschlages zusätzlich abgebremst.

- **Gelenk sperren/entsperren:**

Sobald ein Hubvorgang oder Absenkvorgang gestoppt wird, soll der Arm ebenfalls abbremsen und anschließend die Gelenkssperre aktivieren, um den Arm in Position zu halten. Das Sperren des Gelenkes entlastet den Hubmotor, welcher im gesperrten Zustand deaktiviert sein soll. Der Sperrvorgang besteht aus zwei Teilen. Sobald der Arm abgebremst wurde, wird die Sperre aktiviert. Anschließend wird das Antriebsband entlastet. Sobald ein erneutes Signal für die Einleitung einer Armbewegung auftritt, muss zuerst das Antriebsband korrekt gespannt werden, um ein ruckfreies Lösen der Sperre zu ermöglichen. Das Spannen des Bandes ist problematisch, da sich die Last am Arm während der gesperrten Phase ändern kann. Das wäre der Fall, wenn der Patient eine Last hebt und sie anschließend an einer erhöhten Position wieder abstellt. Ein entgegengesetzter Fall wäre, dass ein Patient eine Last in einer erhöhten Position greift und sie an einer niedrigeren

Position wieder abstellt. Sobald das Band gespannt ist, wird die Sperre gelöst und die Bewegung durchgeführt.

- **Freischwung:**

Befindet sich der Arm in der unteren Endposition und wird eine Hubgeschwindigkeit mit dem Wert Null vorgegeben, so wird das Variogetriebe ausgekoppelt. Das bedeutet, dass sich der Arm frei bewegen kann. Dieses Verhalten soll einen natürlichen Bewegungsablauf imitieren. Der Arm kann beim Gehen mitschwingen. In diesem Fall ist das Getriebe in die ausgekoppelte Position zu fahren. Der Hubmotor und der Servomotor sind während dieser Phase außer Betrieb.

5 Entwicklung der Steuerungssoftware

In diesem Kapitel folgt eine Beschreibung der einzelnen Schritte die abgearbeitet werden, um die Steuerungssoftware zu realisieren. Die Abschnitte des Kapitels sind nach der zeitlichen Abfolge des Entwicklungsprozesses geordnet. Den Beginn stellt die Rundenplanung der Kommunikation zwischen den AXON-Bus[®]-Knoten dar. Es ist grundlegend für die weitere Entwicklung, dass die Kommunikation stabil funktioniert. Der nächste Schritt ist die Verarbeitung der Signale, der im Arm verbauten Sensorik. Die Signale müssen für die weitere Verarbeitung aufbereitet werden. Anschließend wird die Ablaufsteuerung für die Funktionen des Armes entwickelt. Nach diesem Schritt ist man in der Lage den Arm kontrolliert zu bewegen. Basierend auf diesem Rahmenwerk werden, im anschließenden Kapitel 6, die nötigen Schritte durchgeführt, um die automatische Getriebeverstellung zu entwickeln.

5.1 Kommunikation und Rundenplanung

Der erste Schritt zur Entwicklung der Steuerungssoftware war es, die Kommunikation zwischen den AXON-Bus[®]-Knoten zu planen. Dazu muss entschieden werden, welche Daten unter den Bus-Knoten ausgetauscht werden sollen. Abbildung 5.1 veranschaulicht den Datenaustausch zwischen den Knoten des verteilten Systems. Die Knoten kommunizieren untereinander über Files, die im IFS der Knoten vorhanden sind. Der Master Knoten initiiert die Rundenübertragung. Die jeweiligen Files werden periodisch übertragen. Die Vorgabe der Hubgeschwindigkeit des Armes wird vom Knoten „Master“ an den Knoten „Elbow Servo“ gesendet. Dieser tritt dabei als zentraler Steuerungsknoten in Aktion. Der Knoten „Elbow Servo“ stellt die Werte für die Drehzahlvorgabe des Hubmotors und den Wert für die Strombegrenzung bereit. Der Knoten „Elbow Lifter“ verwendet diese Werte zur Ansteuerung des BLDC-Hubmotors und stellt seinerseits die Werte für den aktuellen Motorstrom und die aktuelle Drehzahl zur Verfügung. Der Knoten „Elbow Servo“ initiiert auch das Sperren und Entsperren des Ellenbogengelenkes. Dazu wird das entsprechende Signal an den Knoten „Elbow Lock“ gesendet. Zusätzlich können über dieses Signal auch die Feedback Signale (Tonausgabe, Vibration) für den Anwender aktiviert werden. Der Status der Sperre und der Feedbacksignale wird an den Knoten „Elbow Servo“ zurückgeliefert.

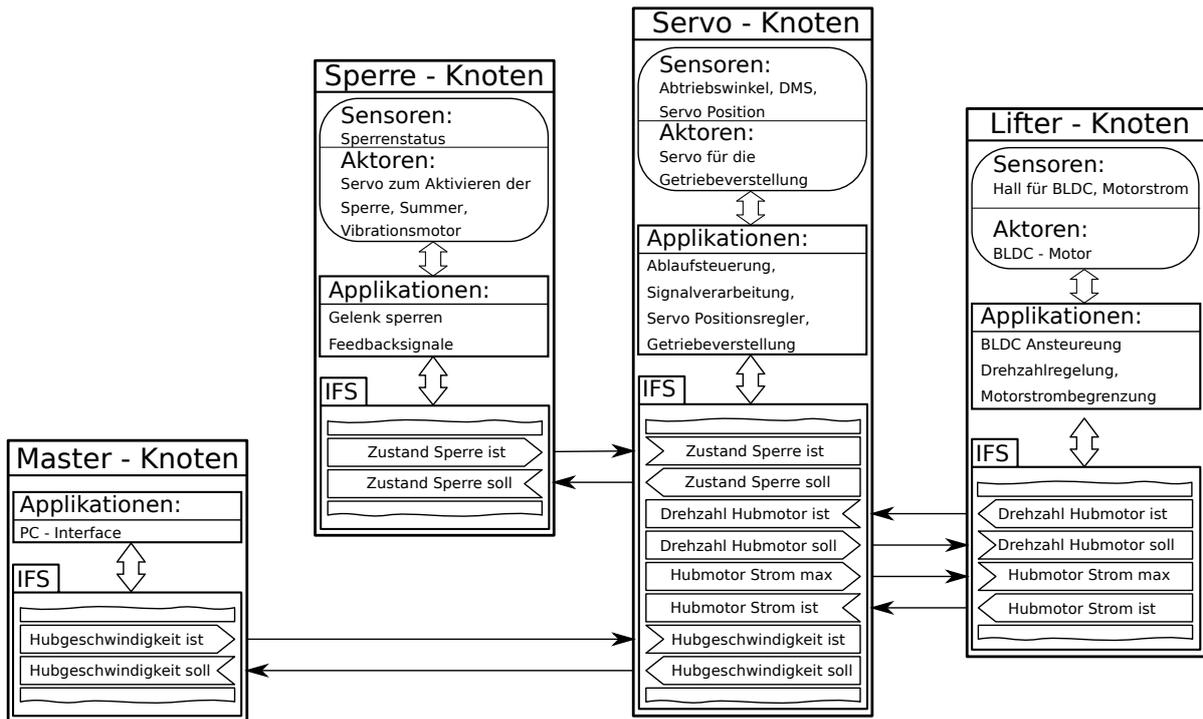


Abbildung 5.1: Datenaustausch zwischen den AXON Knoten des Systemes

Zum Erstellen des Zeitplans zur rundenbasierten Datenübertragung zwischen den Knoten wird ein firmeneigenes Softwaretool, der sogenannte Rundengenerator, verwendet. Damit lassen sich die zu übertragenden Files der einzelnen Knoten bestimmen, die Quelle und die Senke der Daten und der zeitliche Ablauf. Mit Hilfe dieses Tools wird der in 5.1 abgebildete Datenaustausch konfiguriert. Der Rundengenerator gibt die Round Descriptor List als C source code file aus. Dieses File wird zusammen mit dem Code des Bus-Masters compiliert. Wenn das System aktiviert wird, verteilt der Master die RODL an die Slaves.

Für die Implementierung des Prototypen wurde nur eine Teilmenge der in den Knoten verfügbaren Files verwendet. Bei einer eventuellen Produktentwicklung müssten mehr Files, die beispielsweise Serviceinformationen enthalten, übertragen werden. Abbildung 5.2 zeigt den zeitlichen Ablauf der Datenübertragung während eines Bus-Zyklus. Auf der X-Achse ist die Zeit in System-Ticks eingeteilt. Ein Tick entspricht einer Zeitdauer von 5 ms. Die Abfolge besteht aus zwei Runden, denen verschiedene Files zugeordnet sind. Files, die in kürzeren Abständen benötigt werden, sind in jeder Runde vorhanden und werden somit alle 5 ms übertragen. Ein Beispiel dafür ist die Drehzahl des Hubmotors (gelb). Diese wird in kürzest möglichen Abständen übertragen, da sie zur Berechnung des Getriebeübersetzungswertes im Servo-Knoten benötigt wird (siehe Abschnitt 5.2.3). Files, bei denen längere Abstände toleriert werden können, wie zum Beispiel der Status der Sperre (violett), werden nur in einer Runde übertragen. Dies entspricht einer Periode

von 10 ms. Die Häufigkeit, wie oft Files übertragen werden sollen, bestimmt die Anzahl der Runden. Für Files, die beispielsweise nur alle 15 ms übertragen werden sollen, würde man eine dritte Runde benötigen.

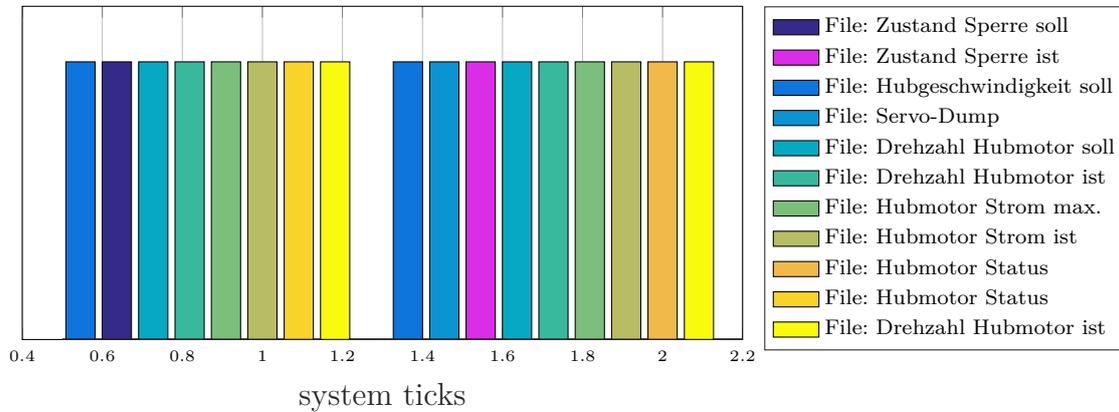


Abbildung 5.2: Zeitliche Abfolge der Datenübertragung während eines Bus-Zyklus

5.2 Verarbeitung der Sensorsignale

Die Sensorsignale wie Abtriebswinkel, DMS-Signal und Servoposition werden ausschließlich im Knoten Elbow-Servo eingelesen. Diese Werte müssen zuerst bearbeitet werden, bevor sie für weitere Funktionen verwendet werden können. Die Messung des Abtriebswinkels ist kritisch für den Getriebeverstellalgorithmus und sollte daher möglichst rauscharm und hochauflösend sein. Darauf wird in Abschnitt 5.2.2 genauer eingegangen. Die Messung der Servoposition der Getriebeverstellung ist weniger kritisch. Der Verstellbereich des Servos wurde auf einen Wertebereich von 0 bis 255 skaliert, welcher mit einem 8 Bit Binärwert dargestellt werden kann. Die Auflösung des Positionssignales beträgt 10 Bit. Das überlagerte Rauschen tritt hauptsächlich in den unteren zwei Bit des Signales auf. Durch die Skalierung werden diese abgeschnitten, wodurch auch das Rauschen wegfällt. Das DMS-Signal wird hauptsächlich für das Entsperren des Gelenkes benötigt. Der Sensor soll nur quasi statische Werte messen, die sich langsam ändern. Das Signal des Sensors wird Tiefpass gefiltert. In den anschließenden Abschnitten werden die zur Signalverarbeitung verwendeten Algorithmen beschrieben.

5.2.1 Tiefpass Filterung

Da es bei dieser Arbeit oft notwendig ist Signale zu filtern, wird hier kurz der verwendete Tiefpass Filteralgorithmus beschrieben. Die Rechenleistung des verwendeten Mikrocontrollers ist begrenzt, deshalb wurde ein effizienter Tiefpassalgorithmus eingesetzt. Abbil-

Abbildung 5.3 zeigt eine Netzwerkdarstellung des verwendeten Algorithmus. Dabei handelt es sich um ein Infinite Impulse Response-Filter erster Ordnung. Die notwendigen Multiplikationen für die Berechnung des Ausgangswertes werden dabei durch Shift-Operationen ersetzt. Die Central Processing Unit (CPU) des Mikrocontrollers kann diese Operation schneller ausführen als eine Multiplikation. Eine Shift-Operation entspricht einer Multiplikation mit 2^k , k gibt dabei die Anzahl der Binärstellen, an um die Stellen des Binärwertes verschoben werden. Ein positives Vorzeichen für k entspricht einem links Shift, ein negatives einem rechts Shift. Durch das Verwenden dieser Shift-Operationen ist die Wahl der Filterkoeffizienten beschränkt.

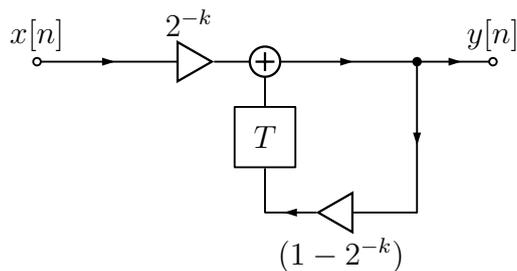


Abbildung 5.3: Netzwerkdarstellung des verwendeten Tiefpass Filteralgorithmus

Das Ausgangssignal $y[n]$ des Filters ergibt sich zu

$$y[n] = 2^{-k}x[n] + (1 - 2^{-k})y[n - 1] \quad (5.1)$$

daraus ergibt sich unter Anwendung des Verschiebungssatzes der Z-Transformation die Übertragungsfunktion

$$H(z) = \frac{2^{-k}}{1 - (1 - 2^{-k})z^{-1}} \quad (5.2)$$

Abbildung 5.4 zeigt den Betragsfrequenzgang des Filteralgorithmus bei einer Abtastfrequenz von 1 kHz und verschiedenen Filterparametern k . Es ist ersichtlich, dass die Filterkoeffizienten der Übertragungsfunktion 5.2 nicht unabhängig einstellbar sind. Die Grenzfrequenz des Filters kann so durch nur einen Parameter variiert werden, sie ist jedoch nur schrittweise einstellbar. Durch Erhöhung von k , verschiebt sich die Grenzfrequenz des Filters auf der Frequenzachse nach links.

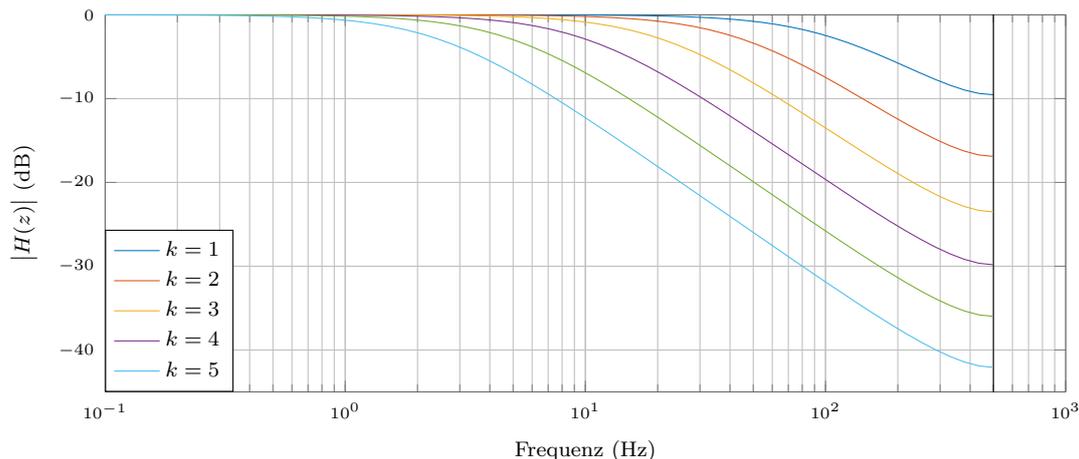


Abbildung 5.4: Betragsfrequenzgang bei verschiedenen Filterparameter k mit einer Abtastfrequenz von $f_s = 1kHz$

5.2.2 Messung der Abtriebsdrehzahl

Die Liftereinheit verfügt über einen Winkelsensor der den relativen Winkel zwischen der Abtriebswelle und dem Liftergehäuse misst. Die Messung des Winkels wird mittels einer magnetoresistiven Messbrücke durchgeführt. Das Signal der Messbrücke wird verstärkt und mittels SPI-ADC zu dem Controller des Servoknotens übertragen. Dieser Wert wird alle $200\mu s$ abgetastet. Die Funktion zur Initialisierung der ADC Wandlung wird innerhalb einer Timer Interruptroutine mit hoher Priorität aufgerufen. Diese Funktion startet die Konversion, indem der ADC Baustein mit der Chip Select Leitung aktiviert wird. Nach einer kurzen, vom ADC benötigten Verzögerung, wird der abgetastete Wert seriell in zwei 8 Bit Blöcken übertragen. Der empfangene 16 Bit Wert enthält in den unteren 12 Bit den Wert der Konversion. Sobald ein vollständiger Wert empfangen wird, wird dieser noch innerhalb der Interrupt Routine der SPI Schnittstelle verarbeitet. Zur Verbesserung des gemessenen Signales wird es zuerst Tiefpass gefiltert um dessen Rauschpegel zu verringern. Der eingesetzte Tiefpassalgorithmus entspricht dem in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Algorithmus. Der Winkel des Abtriebes wird in Abständen von 5ms benötigt. Um das Rauschen noch weiter zu unterdrücken, wird der Sensor mit einer Rate von $200\mu s$ abgetastet. Damit stehen innerhalb des 5ms Intervalles 25 Messwerte zur Verfügung. Über diese Werte wird der Mittelwert gebildet. Aus dem so erhaltenen Wert des Winkels wird anschließend die Winkelgeschwindigkeit des Abtriebs abgeleitet.

Das so aufbereitete Signal verfügt überspannt einen Wertebereich von 670 für die obere bis 3378 für die untere Endposition. Es stehen also 2708 verschiedene Werte zwischen oberen und unterem Endanschlag zur Verfügung. Die Abtriebsdrehzahl wird im 5ms

Intervall ermittelt. Die Winkelgeschwindigkeit ist definiert als $\omega = \frac{d\phi}{dt}$. Bildet man die Näherung $\omega \approx \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ mit $\Delta t = 5ms$, würde der Wertebereich der berechneten Differenz, bei einer angenommenen maximalen Hubzeit von zwanzig Sekunden und einer minimalen Hubzeit von einer Sekunde, im Bereich von 0,67 bis 13,54 liegen. Dieser schmale Wertebereich ist für die weitere Verarbeitung nicht geeignet. Darum muss die Differenz verstärkt werden. Der erste Ansatz war es, das Ausgangssignal durch Aufsummieren des Wertes für $\Delta\phi = x'[n] = x[n] - x[n - 1]$ (siehe 5.5) über ein bestimmtes Zeitintervall, zu vergrößern. Dazu werden die Werte in einem First In First Out (FIFO)-Buffer, der 16 mal 1 Byte tief ist, zwischengespeichert. Die Summe der gespeicherten Werte und des aktuellen Wertes ergibt das Ausgangssignal. Diese Vorgehensweise ähnelt einem gleitenden Mittelwertfilter. Im Unterschied dazu, wird aber in diesem Fall keine Division durch die Anzahl der verwendeten Werte durchgeführt. Dadurch wird der Wertebereich des Geschwindigkeitssignales vergrößert. Abbildung 5.5 zeigt eine Netzwerkdarstellung der durchgeführten Berechnung.

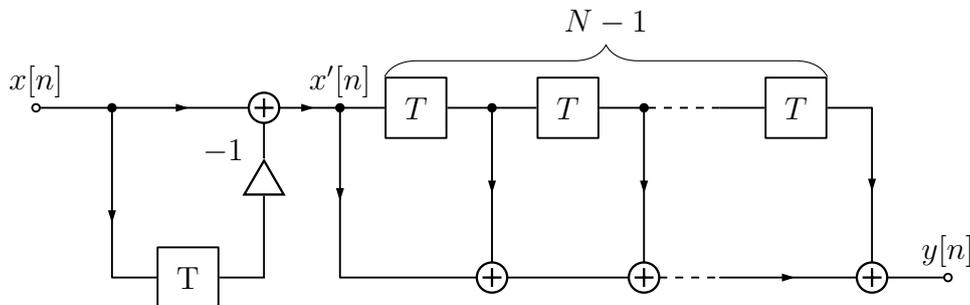


Abbildung 5.5: Netzwerkdarstellung des zur Ermittlung der Abtriebsdrehzahl verwendeten Algorithmus

Die Ausgangsfunktion des Drehzahlsignales ergibt sich über die Summe von N Werten mit einer Anzahl der Verzögerungselemente von $N - 1$ zu

$$y[n] = \sum_{i=0}^{N-1} x'[n] = \sum_{i=0}^{N-1} (x[n - i] - x[n - 1 - i]) \quad (5.3)$$

durch das Umschreiben der Summenformel 5.3 erhält man

$$y[n] = \sum_{i=0}^{N-1} (x[n-i] - x[n-1-i]) \quad (5.4)$$

$$= \sum_{i=0}^{N-1} x[n-i] - \sum_{i=0}^{N-1} x[n-1-i] \quad (5.5)$$

$$= \sum_{i=0}^{N-1} x[n-i] - \left(\sum_{i=0}^{N-1} x[n-i] - x[n] + x[n-1-(N-1)] \right) \quad (5.6)$$

es ist ersichtlich, dass sich der Ausdruck 5.3 in äquivalenter Weise durch

$$y[n] = x[n] - x[n-N] \quad (5.7)$$

darstellen lässt. Damit können unnötige Rechenschritte eingespart werden. Abbildung 5.6 zeigt das vereinfachte Netzwerk mit der Ausgangsfunktion 5.7. Die Struktur entspricht einem FIR-Filter mit den Filterkoeffizienten $b_0 = 1$, $b_{1\dots N-2} = 0$ und $b_{N-1} = -1$.

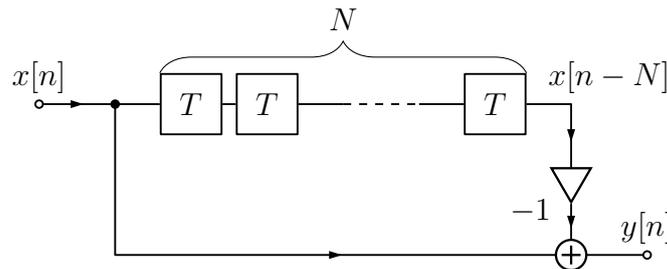


Abbildung 5.6: Netzwerkdarstellung des zur Ermittlung der Abtriebsdrehzahl verwendeten Algorithmus

5.2.3 Messung der Getriebeübersetzung

Zur Berechnung des Übersetzungsverhältnis $i = \frac{\omega_{Antrieb}}{\omega_{Abtrieb}}$ wird das im vorhergehenden Abschnitt 5.2.2 erzeugte Signal für die Abtriebswinkelgeschwindigkeit verwendet. Der zweite benötigte Wert wird über den AXON-Bus[®] übertragen. Der Lifter Knoten des Systems stellt das Drehzahlsignal des Hubmotors zur Verfügung. Die Berechnung des Übersetzungsverhältnisses zwischen Antriebsdrehzal und Abtriebsdrehzahl ist prinzipiell eine Division. Dennoch sind bei der Bestimmung innerhalb der Embedded Software verschiedene Fälle zu unterscheiden. Eine einfache Division reicht nicht aus um alle Betriebsbereiche abzudecken. Abbildung 5.7 zeigt ein Flussdiagramm, das den Ablauf der Bestimmung des Übersetzungswertes darstellt.

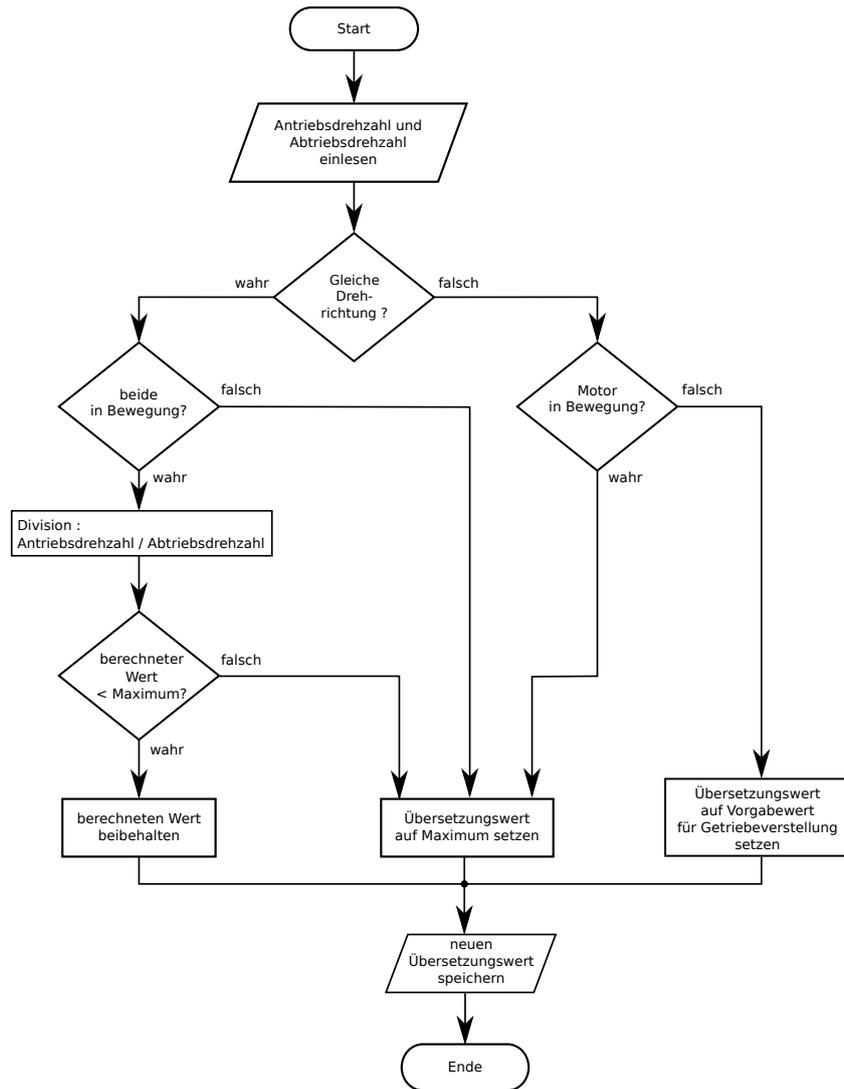


Abbildung 5.7: Flussdiagramm zur Übersetzungsbestimmung

Zu allererst wird überprüft, ob sich der Antrieb und der Abtrieb in die selbe Richtung bewegen und der Hubmotor aktiv ist. Wäre das nicht der Fall, muss das Getriebe durchrutschen. Der Übersetzungswert wird auf einen Maximalwert gesetzt. Als nächster Schritt wird geprüft, ob die Antriebsdrehzahl und die Abtriebsdrehzahl ungleich Null sind. Wenn dies der Fall ist, dann kann eine Division durchgeführt werden und damit der für die Getriebeverstellung benötigte Übersetzungswert bestimmt werden. Falls die Abtriebsdrehzahl gleich Null ist, kann keine Division durchgeführt werden und es wird direkt der maximale Übersetzungswert gesetzt. Sollte der Arm im Stillstand sein, sprich die Antriebs- und Abtriebsdrehzahl ist gleich Null, dann wird die Leerlaufübersetzung als Übersetzungswert verwendet. Dieser Wert dient zur Initialisierung der nachfolgenden Filterung.

5.3 Ablaufsteuerung

Die Ablaufsteuerung zur Koordination der Armfunktionen wird als DEA (siehe 2.5) realisiert. Die Implementierung des Zustandsautomat (ZA) erfolgt in Modulen. Das ausführende Modul (siehe Abbildung 5.8 grün hinterlegt) wird in der Hauptschleife des Servo Knoten aufgerufen. Innerhalb des ausführenden Teiles wird zuallererst die Eventcodierung aufgerufen um die aktuell angefallenen Events zu übernehmen. Die Eventcodierung überprüft die Sensordaten und wandelt diese in die dementsprechenden Events wie etwa das Erreichen von Bremspunkten oder das Erreichen von Endpunkten um. Im nächsten Schritt wird der jeweilige ZA ausgeführt. Der ausführenden Funktion wird die Speicheradresse einer Datenstruktur übergeben, welche die Beschreibung des auszuführenden ZA enthält. Anschließend wird die Funktion des aktuellen Zustandes, des eingestellten ZA, aufgerufen. Dieser Funktion werden die aktuellen Events übergeben. Sie führt die Funktionalität des Zustandes aus und liefert den Folgezustand zurück, der für die nächste Ausführung gespeichert wird.

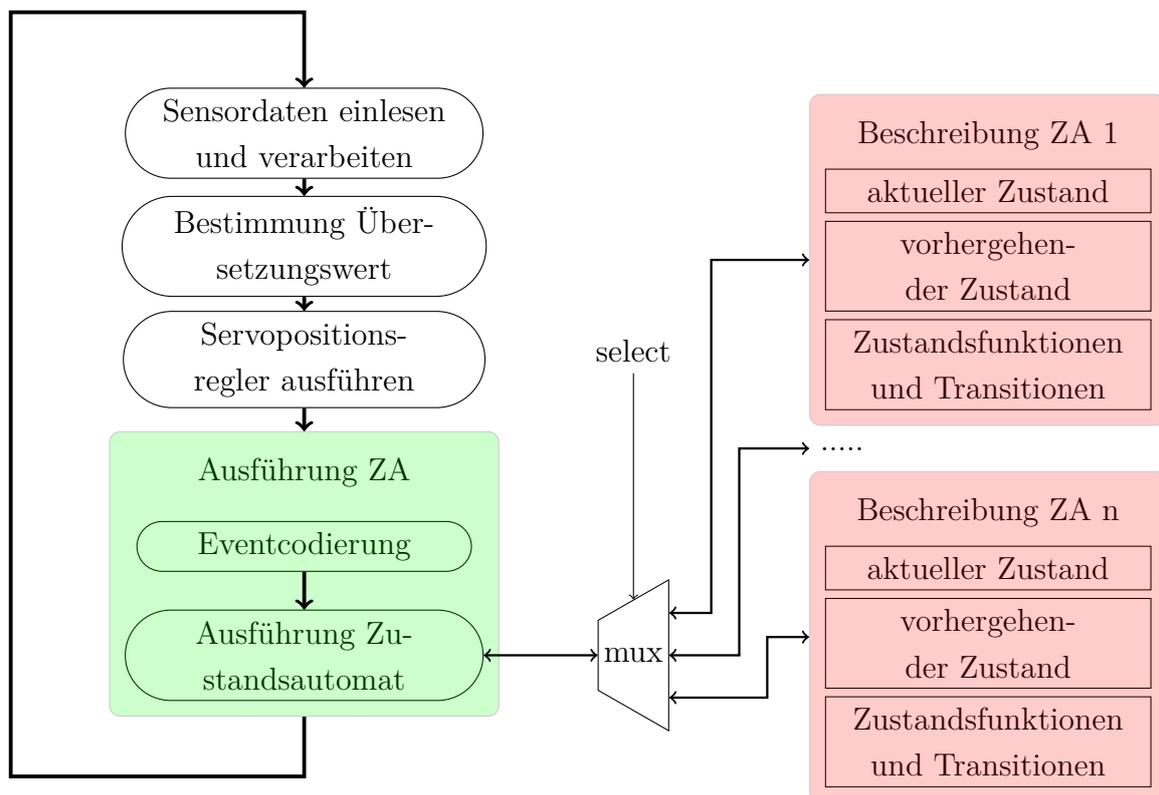


Abbildung 5.8: Programmablauf Hauptschleife

Die Beschreibung eines ZA wird in einem eigenen Softwaremodul durchgeführt. Dabei enthält dieses Modul eine Datenstruktur in der ein Array aus Funktionszeigern zu den

jeweiligen Zustandsfunktionen abgelegt ist. Außerdem enthält die Datenstruktur die Informationen welcher Zustand gerade aktiv ist, welcher Zustand als letztes aktiv war und die Anzahl der Zustände. In den einzelnen Zustandsfunktionen des ZA werden die Transitionen zwischen den einzelnen Zuständen definiert. Auch die Aktionen die während des Zustandes ausgeführt werden sollen werden innerhalb der Zustandsfunktionen implementiert. Verschiedene Zustandsautomaten werden in getrennten Modulen (siehe Abbildung 5.8 rot hinterlegt) implementiert. Die Trennung ermöglicht die unabhängige Entwicklung der Ablaufsteuerung der Prothese für den Normalbetrieb und der Ablaufsteuerungen für Messprogramme. Der auszuführende ZA wird je nach Bedarf eingestellt. Theoretisch könnten so, verschiedene Abläufe quasi parallel laufen.

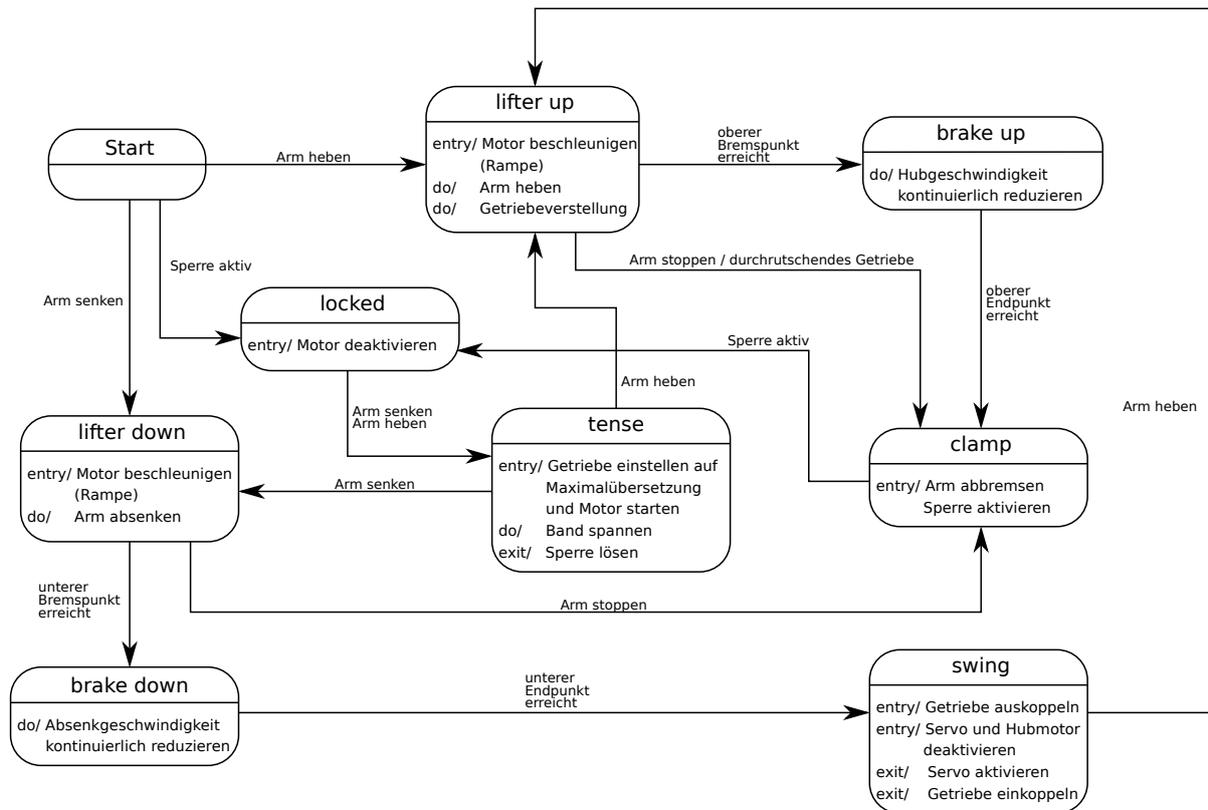


Abbildung 5.9: Abstrahiertes Zustandsdiagramm der Prothesenfunktionen

Abbildung 5.9 zeigt ein abstrahiertes Zustandsdiagramm der Ablaufsteuerung für den Normalbetrieb der Prothese. Die einzelnen Felder stellen Zustände dar, die während des Betriebes der Prothese auftreten können. Innerhalb der Felder werden kurz die Aktivitäten während des Zustandes beschrieben. Die Pfeile zwischen den Zuständen stellen die Zustandsübergänge mit den auslösenden Events dar. Um die Übersicht zu erhalten, wurden die Events, die zu einem Verweilen im aktuellen Zustand führen, nicht dargestellt. Bei allen während eines Zustandes auftretenden Events, die nicht zu einem Zustandswechsel führen, bleibt der aktuelle Zustand aktiv. Innerhalb der angeführten Hauptzustände

können zusätzlich untergeordnete Zustandsautomaten aktiv werden. Alle Zustandsfunktionen sind so implementiert, dass kein busy waiting¹ auftritt. Da die einzelnen Prozesse der Steuerungssoftware sequentiell abgearbeitet werden, würde ein wartender Prozess, die komplette Programmausführung anhalten. Die implementierten Zustandsfunktionen sind so konzipiert, dass der Prozess übersprungen wird, sobald auf ein Ereignis gewartet wird.

5.3.1 Beschreibung der möglichen Events

Im Folgenden werden die möglichen Events genauer beschrieben. Die Namen in Großbuchstaben entsprechen den Bezeichnungen in der Embedded Software.

- **Arm Stoppen / STOP:**
Signalisiert die Absicht des Benutzers, die Bewegung der Prothese zu stoppen. Der Wert der Hubgeschwindigkeitsvorgabe von Null wird in das Event Stop umgewandelt.
- **Arm heben / UP:**
Signalisiert die Absicht des Benutzers, eine Hubbewegung der Prothese durchzuführen. Der Wert der Hubgeschwindigkeitsvorgabe von größer Null wird in das Event UP umgewandelt.
- **Arm senken / DOWN:**
Signalisiert die Absicht des Benutzers, eine Abwärtsbewegung der Prothese durchzuführen. Der Wert der Hubgeschwindigkeitsvorgabe von kleiner Null wird in das Event DOWN umgewandelt.
- **oberer Bremspunkt erreicht / UP_BRAKEPOINT_REACHED:**
Der obere Bremspunkt entspricht dem Wert des Abtriebswinkelsensors bei dem der Bremsvorgang für die Aufwärtsbewegung eingeleitet wird. Der Wert für den Bremspunkt wird abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit des Armes berechnet. Dadurch soll die Beschleunigung des Abbremsvorganges immer gleich bleiben. Ein Sensorwert kleiner gleich dem berechneten Bremspunkt wird in das Event UP_BRAKEPOINT_REACHED umgewandelt. (Der Wert des Abtriebswinkelsensors sinkt beim Anheben des Armes)
- **oberer Endpunkt erreicht / UP_ENDPOINT_REACHED:**
Der Wert des Abtriebswinkelsensors am oberen Endanschlag des Armes ist in der

¹ „Der Term busy waiting, beschreibt das Verhalten eines Prozesses, der nichts anderes macht, als die Bedingung zu prüfen, die benötigt wird, um seine Ausführung fortzusetzen.“ [29]

Embedded Software hinterlegt. Ein Sensorwert kleiner gleich dem oberen Endpunkt wird in das Event `UP_ENDPOINT_REACHED` umgewandelt.

- unterer Bremspunkt erreicht / `DOWN_BRAKEPOINT_REACHED`:
Der untere Bremspunkt entspricht dem Wert des Abtriebswinkelsensors, bei dem der Bremsvorgang für die Abwärtsbewegung eingeleitet wird. So wie auch der Bremspunkt für die Aufwärtsbewegung, wird auch der Bremspunkt für die Abwärtsbewegung abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit des Armes berechnet. Das Event `DOWN_BRAKEPOINT_REACHED` wird von einem Sensorwert größer gleich dem berechneten Bremspunkt ausgelöst. (Der Wert des Abtriebswinkelsensors steigt beim Absenken des Armes)
- unterer Endpunkt erreicht / `DOWN_ENDPOINT_REACHED`:
Der Wert des Abtriebswinkelsensors am unteren Endanschlag des Armes ist ebenfalls in der Embedded Software hinterlegt. Ein Sensorwert größer gleich dem unteren Endpunkt wird in das Event `DOWN_ENDPOINT_REACHED` umgewandelt.
- Sperre aktiv / `LOCK_ACTIVE`:
Dieses Event wird aus dem, über den AXON Bus übertragenen Statussignal des Knotens Elbow Lock abgeleitet. Das Event signalisiert, dass die Sperre aktiv ist.
- durchrutschendes Getriebe / `SLIDING_GEAR`:
Die Rutscherkennung wandelt das Signal der gemessenen Getriebeübersetzung in das Event `SLIDING_GEAR` um. Das Event wird ausgelöst, wenn die gemessene Übersetzung größer als ein von der Leerlaufkennlinie der Getriebestufe (siehe Abschnitt 6.1.3) abgeleiteter, Grenzwert ist. Dieser Grenzwert ist wie die Leerlaufkennlinie abhängig von der aktuellen Getriebeeinstellung.

5.3.2 Beschreibung der möglichen Zustände

Start

Initialer Zustand

Lifter Up

Dieser Zustand führt das Anheben des Armes durch. Zum Anfahren wird die Drehzahl des Hubmotors mittels einer Rampenfunktion erhöht. Die implementierte Überlastabschaltung, die durch das `SLIDING_GEAR` Event ausgelöst wird, wird verzögert gestartet. Diese Verzögerung ist notwendig, um den Arm nicht fälschlicherweise zu stoppen. Beim

Anfahren des Armes, kommt es wie in Abschnitt 7.1.1 beschrieben, zu einem Messfehler in der Getriebeübersetzung. Dieser Messfehler resultiert in einem hohen gemessenen Übersetzungswert, welcher als Durchrutschen des Getriebes erkannt werden würde. Nach Ablauf der Verzögerung wird die Überlastabschaltung aktiviert. Der Arm wird gestoppt, wenn das SLIDING_GEAR Event über einen gewissen Zeitraum ansteht. Im Falle des störungsfreien Betriebes des Armes, wird der in Abschnitt 6.2 beschriebene Getriebeverstellalgorithmus ausgeführt. Die Drehzahl des Hubmotors wird ebenfalls abhängig von dem Vorgabewert der Hubgeschwindigkeit eingestellt. Der Wert des oberen Bremspunktes wird abhängig von der aktuellen Armgeschwindigkeit berechnet.

Aufgetretenes Event	Folgezustand
STOP	clamp
DOWN	lifter_down
UP_BRAKEPOINT_REACHED	brake_up
UP_ENDPOINT_REACHED	clamp
LOCK_ACTIVE	locked
SLIDING_GEAR	clamp
alle Anderen	lifter_up

Tabelle 5.1: Folgezustandstabelle lifter up

Brake Up

Dieser Zustand ist für das Abbremsen des Armes in Aufwärtsrichtung zuständig. Dabei wird beim erstmaligen Eintritt in den Zustand ein untergeordneter Zustandsautomat gestartet. Der erste Schritt besteht darin, die aktuelle Motordrehzahl zwischenspeichern. Dieser wird bei jedem Durchlauf der Zustandsfunktion um einen fixen Wert dekrementiert. Der so entstandene Wert dient als neue Drehzahlvorgabe für den Hubmotor. Durch die verringerte Drehzahlvorgabe bremst der Hubmotor die Armbewegung. Erreicht der Wert eine untere Schwelle, dann fährt der Arm so lange weiter, bis der obere Endanschlag erreicht wird. Tabelle 5.2 zeigt die Folgezustände ausgehend von diesem Zustand.

Aufgetretenes Event	Folgezustand
STOP	clamp
DOWN	lifter_down
UP_ENDPOINT_REACHED	clamp
LOCK_ACTIVE	locked
alle Anderen	brake_up

Tabelle 5.2: Folgezustandstabelle brake_up

Lifter down

In diesem Zustand wird der Arm abgesenkt. Die Drehzahl des Hubmotors wird mittels einer Rampenfunktion in die entgegengesetzte Hubrichtung erhöht. Das Variogetriebe wird in der aktuellen Version fix auf die maximale Übersetzung eingestellt. Für eine eventuelle Weiterentwicklung würde das Variogetriebe für die Absenkbewegung automatisch verstellt werden. Der Wert des unteren Bremspunktes wird abhängig von der aktuellen Armgeschwindigkeit berechnet.

Aufgetretenes Event	Folgezustand
STOP	clamp
UP	lifter_up
DOWN_BRAKEPOINT_REACHED	brake_down
alle Anderen	lifter_down

Tabelle 5.3: Folgezustandstabelle lifter down

Brake down

Dieser Zustand ist für das Abbremsen des Armes in Abwärtsrichtung zuständig. Dabei wird beim erstmaligen Eintritt in den Zustand ein untergeordneter Zustandsautomat gestartet. Der erste Schritt besteht darin, der Wert der aktuellen Motordrehzahl zwischenspeichern. Dieser wird bei jedem Durchlauf der Zustandsfunktion um einen fixen Wert dekrementiert. Der so entstandene Wert dient als neue Drehzahlvorgabe für den Hubmotor. Durch die verringerte Drehzahlvorgabe bremst der Hubmotor die Armbewegung. Erreicht der Wert eine untere Schwelle, dann fährt der Arm so lange weiter bis der untere Endanschlag erreicht wird. Tab. 5.4 zeigt die Folgezustände ausgehend von diesem Zustand.

Aufgetretenes Event	Folgezustand
STOP	clamp
UP	lifter_up
DOWN	brake_down
DOWN_ENDPOINT_REACHED	swing
alle Anderen	brake_down

Tabelle 5.4: Folgezustandstabelle brake down

Swing

Im Zustand swing geht der Arm in den sogenannten Freischwingmodus. Dabei wird das Getriebe ausgekoppelt, so dass der Arm schwingen kann ohne dass er von Motor und Getriebe gebremst wird. Der Zustand wird aus dem Zustand lifter down erreicht. Zu Beginn wird der Vorgabewert der Getriebestellung auf Null eingestellt. In dieser Position ist das Getriebe und der Hubmotor entkoppelt. Sobald die Getriebestellung erreicht ist, wird der Servomotor deaktiviert. Sobald die Aufforderung zum Anheben des Armes auftritt, wird der Servo wieder aktiviert und auf Getriebestellung eins gefahren. Danach wird in den Zustand lifter up umgeschaltet.

Aufgetretenes Event	Folgezustand
UP	lifter_up
LOCK_ACTIVE	locked
alle Anderen	swing

Tabelle 5.5: Folgezustandstabelle swing

Clamp

In diesem Zustand wird das Sperren des Armes vorbereitet. Beim Eintreten in den Zustand, wird der aktuelle Wert des DMS-Sensors gespeichert. Diese Information wird beim Spannen des Antriebsbandes benötigt (siehe 5.3.2). Danach wird der Arm bis zu einer Minimalgeschwindigkeit abgebremst. Sobald der Arm genügend abgebremst ist, wird das Signal zur Aktivierung der Sperre gesendet. Sobald diese aktiv ist, wird in den Zustand locked gewechselt.

Aufgetretenes Event	Folgezustand
LOCK_ACTIVE	locked
alle Anderen	clamp

Tabelle 5.6: Folgezustandstabelle clamp

Locked

Der Zustand wird erreicht, wenn das Gelenk gesperrt ist. Bei Eintritt in den Zustand wird der Hubmotor deaktiviert. Während des gesperrten Zustandes wird eine Lastwechselerkennung durchgeführt. Dies ist notwendig um das Aufnehmen oder Absetzen einer Last zu erkennen. Wird ein Lastwechsel erkannt, so wird der im Zustand clamp (siehe Abschnitt 5.3.2) gespeicherte DMS-Wert verworfen, und durch den, mit einem Faktor skalieren DMS-Wert, der neuen Last ersetzt. Der Zustand wird, durch die Aufforderung den Arm zu bewegen, verlassen.

Aufgetretenes Event	Folgezustand
$UP \wedge \sim(UP_ENDPOINT_REACHED \vee UP_BRAKEPOINT_REACHED)$	tense
DOWN	tense
$\sim LOCK_ACTIVE$	clamp
alle Anderen	locked

Tabelle 5.7: Folgezustandstabelle locked

Tense

Der Zustand tense ist für die Vorspannung des Antriebsbandes zuständig. Das Band muss vor dem Entsperren des Gelenkes gespannt sein, um ein Absacken des Armes zu verhindern. Bei Eintritt in den Zustand wird das Getriebe auf maximale Übersetzung eingestellt. Danach beginnt der Hubmotor den Arm anzuheben und somit das Antriebsband zu spannen. Sobald der aktuelle Wert des DMS-Sensors, einen zuvor bestimmten Schwellwert erreicht, wird das Signal zum Lösen der Sperre gesendet. Der Schwellwert wird im Zustand clamp bzw. locked bestimmt und zwischengespeichert. Beim Lösen der Sperre wird in den jeweiligen Folgezustand gewechselt.

5 Entwicklung der Steuerungssoftware

Aufgetretenes Event	Folgezustand
STOP	clamp
UP	clamp
DOWN	lifter_down
UP_BRAKEPOINT_REACHED	lifter_up
alle Anderen	tense

Tabelle 5.8: Folgezustandstabelle tense

6 Getriebe-Verstellung

In diesem Kapitel werden die Schritte zur Entwicklung des automatischen Verstellalgorithmus zur lastabhängigen Getriebeverstellung beschrieben. Das Ziel des Schaltalgorithmus ist es, das Getriebe bei wechselnden Lastverhältnissen so einzustellen, dass dieses in einem bestimmten Bereich betrieben wird, um einerseits die Überlastung des Getriebes zu verhindern, und andererseits einen möglichst hohen mechanischen Wirkungsgrad zu erreichen. Eine dauerhafte Überlastung des Getriebes hätte zur Folge, dass dessen Lebensdauer herabgesetzt wird. Weiterhin besteht bei zu starker Überbeanspruchung die Gefahr, dass es zu einem ungewollten Herabfallen des Armes kommt. Wohingegen ein zu progressives Verstellen der Übersetzung den Wirkungsgrad verschlechtert. All das soll vermieden werden, wobei die Überlastung des Getriebes der kritischere Fall ist. Um diese Aussagen genauer zu beleuchten, wird anschließend das charakteristische Verhalten des Getriebes, zum einen anhand bereits vorhandener Messungen an einem dafür vorgesehenen Getriebeprüfstand, und zum anderen mit den während dieser Arbeit entstandenen Messungen diskutiert. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen wird der Verstellalgorithmus entwickelt.

6.1 Charakteristisches Verhalten des Variogetriebes

Bei den durchgeführten Messungen liegt der Fokus auf dem Verhalten des Getriebes, bezüglich des Getriebeübersetzungsfaktors. Die automatische Getriebeverstellung soll im Weiteren in Abhängigkeit des Betriebszustandes des Variogetriebes entwickelt werden. Der aktuelle Übersetzungsfaktor spiegelt diesen Zustand wieder, und dient dabei als maßgebliche Größe.

6.1.1 Vorhandene Messungen

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Messungen entstanden auf einem eigens für die Vermessung des Variogetriebes konzipierten Prüfstand. Die daraus gewonnenen Daten, wurden vor dem Entstehen dieser Arbeit aufgezeichnet. Zu diesem Zeitpunkt stand ein geeigneter Prüfstand zur Verfügung, der mittlerweile nicht mehr in Betrieb ist. Dennoch

liefern die Daten wichtige Einblicke in das Verhalten des Getriebes und werden darum im Folgenden zusammengefasst.

Ablauf der Messung

Für die Messung wird die Getriebeeinstellung fixiert. Anschließend wird bei laufendem Antrieb, das Abtriebsmoment kontinuierlich erhöht, bis Überlastung auftritt. Das Getriebe wird mit einem Motor bei konstanter Eingangsdrehzahl betrieben. Die Werte für das eingehende und ausgehende Drehmoment, so wie die Werte der Eingangs- und Ausgangsdrehzahl werden durch Sensorik erfasst. Zusätzlich wird die Getriebeeinstellung aufgezeichnet.

Resultat

Die folgenden Messkurven wurden bei einer Eingangsdrehzahl von 2500 U/min aufgenommen. Der Sensorwert der Getriebebestellung wird mit *sen* bezeichnet und normiert im Bereich von 17% bis 100% dargestellt. Dies entspricht dem erlaubten Stellbereich. Niedrig eingestellte Übersetzungswerte entsprechen niedrigen Werten von *sen*.

Abbildungen 6.1 bis 6.3 zeigen die jeweiligen Verläufe der Getriebeübersetzung über dem geforderten Abtriebsmoment, bei unterschiedlichen Getriebeeinstellungen. Man erkennt, dass die Getriebeübersetzung mit ansteigender Abtriebslast ebenfalls ansteigt. Bei niedrigen Lasten steigt die Übersetzung noch annähernd linear. Bei weiter ansteigender Last, geht der Anstieg in einen augenscheinlich exponentiellen Verlauf über; bis Überlastung auftritt und der Übersetzungsfaktor gegen ∞ geht. Das heißt, das Getriebe rutscht durch, Antriebsdrehzahl $\neq 0$ bei Abtriebsdrehzahl = 0. Die mit \otimes gekennzeichneten Punkte auf den Messkurven entsprechen dem maximalen mechanischen Wirkungsgrad, bei der jeweiligen Getriebeeinstellung. Diese Punkte entsprechen den Maxima der berechneten Kurven des Wirkungsgrades aus den Abbildungen 6.4 bis 6.6. Man sieht, dass sich der Punkt mit dem maximalen Wirkungsgrad in den oberen Bereichen der Abtriebslast bzw. nahe der Rutschgrenze der jeweiligen Getriebebestellung befinden.

6 Getriebe-Verstellung

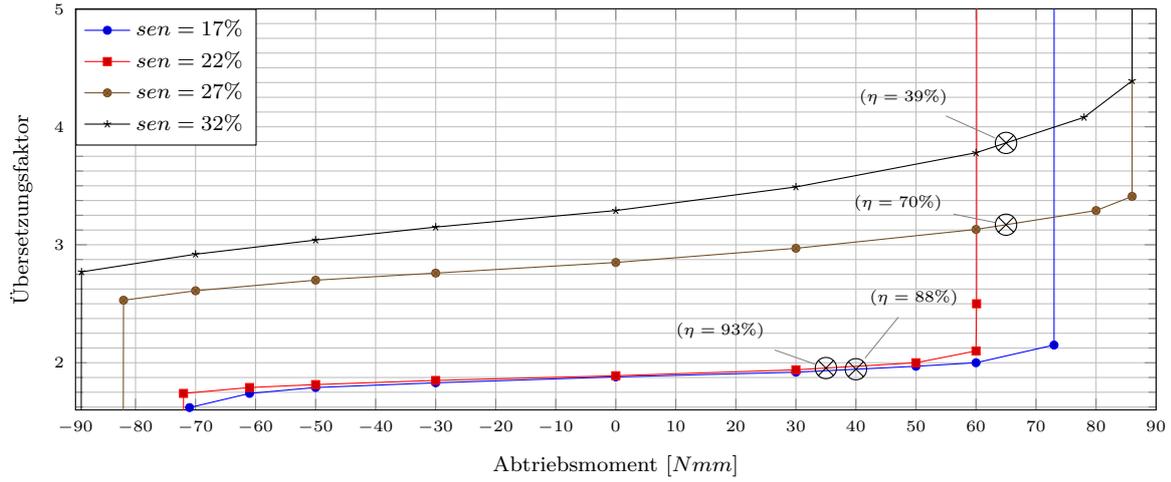


Abbildung 6.1: Messung Getriebeübersetzungsfaktor für 17 – 32% Getriebeeinstellung

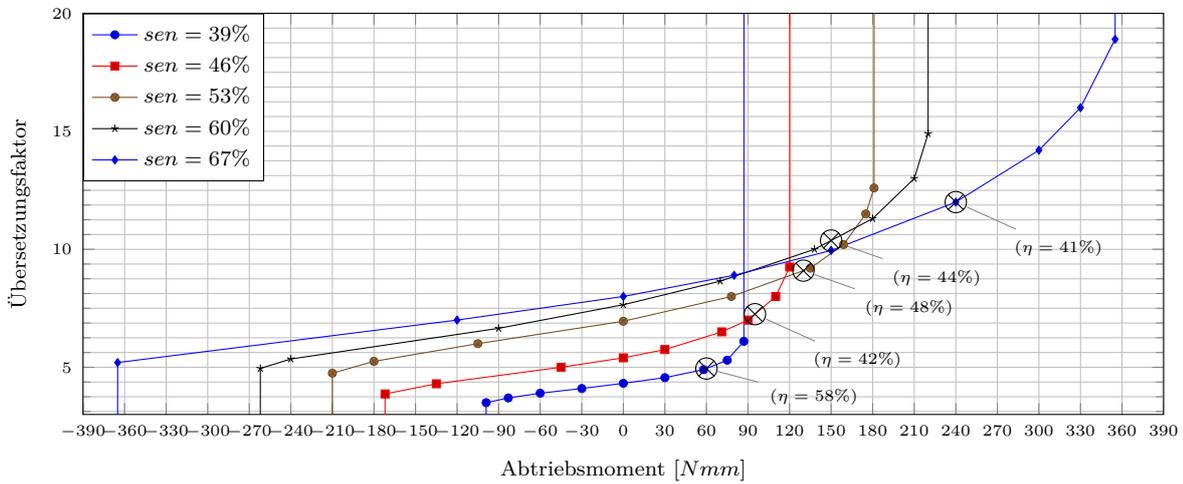


Abbildung 6.2: Messung Getriebeübersetzungsfaktor für 39 – 67% Getriebeeinstellung

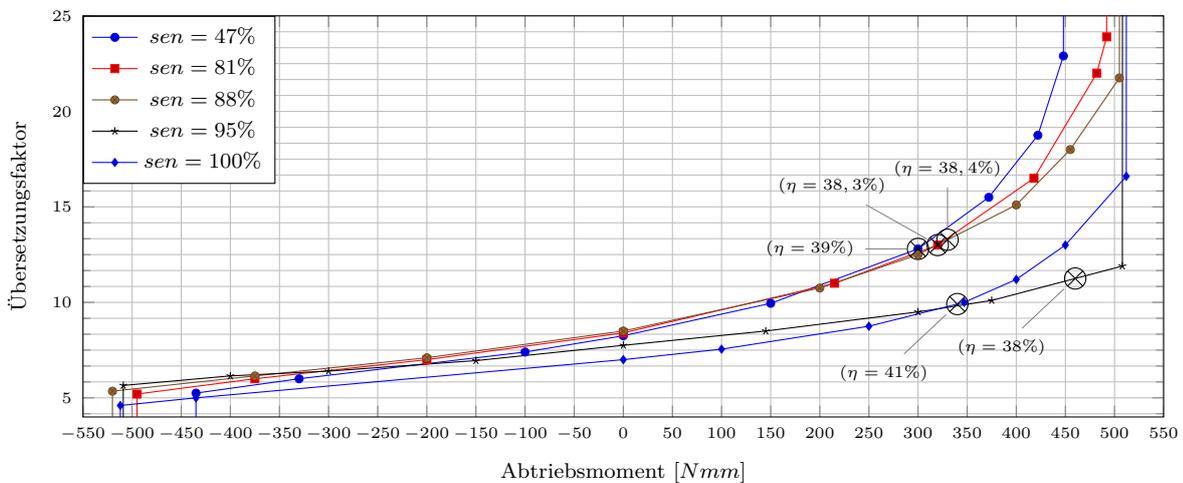


Abbildung 6.3: Messung Getriebeübersetzungsfaktor für 47 – 100% Getriebeeinstellung

6 Getriebe-Verstellung

Die Abbildungen 6.4 bis 6.6 stellen die berechneten Wirkungsgradverläufe, um den Punkt des maximalen Getriebewirkungsgrades dar. Man erkennt, dass das Getriebewirkungsgrad stark von der Einstellung des Getriebes abhängt. Bei der Einstellung mit dem niedrigsten Übersetzungswert wird der bestmögliche mechanische Wirkungsgrad von 93% erreicht. Je höher man die eingestellte Übersetzung wählt, umso geringer wird der Wirkungsgrad, bis er im schlechtesten Fall nur mehr 38% beträgt.

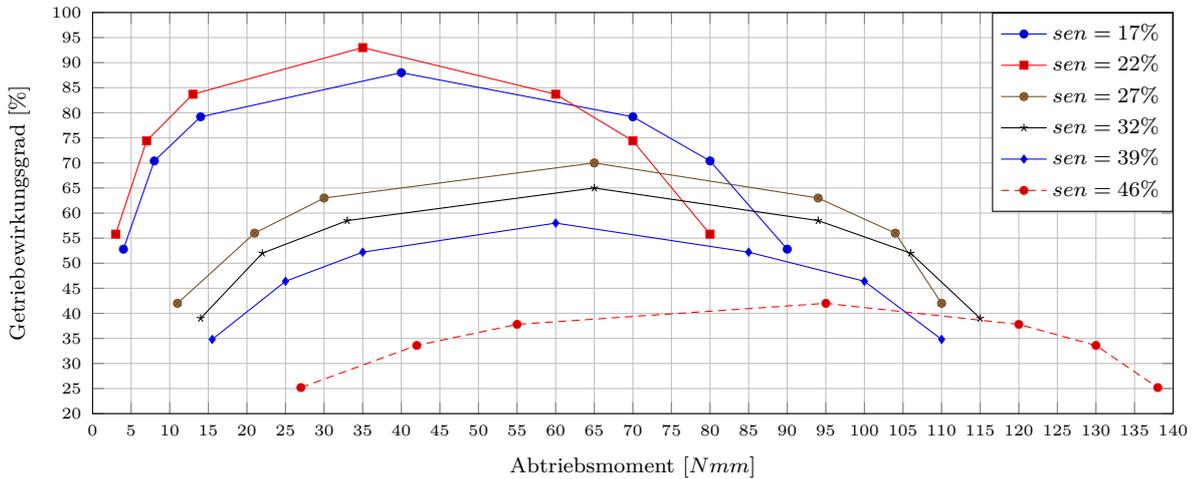


Abbildung 6.4: Berechneter Getriebewirkungsgrad für 47 – 100% Getriebeeinstellung

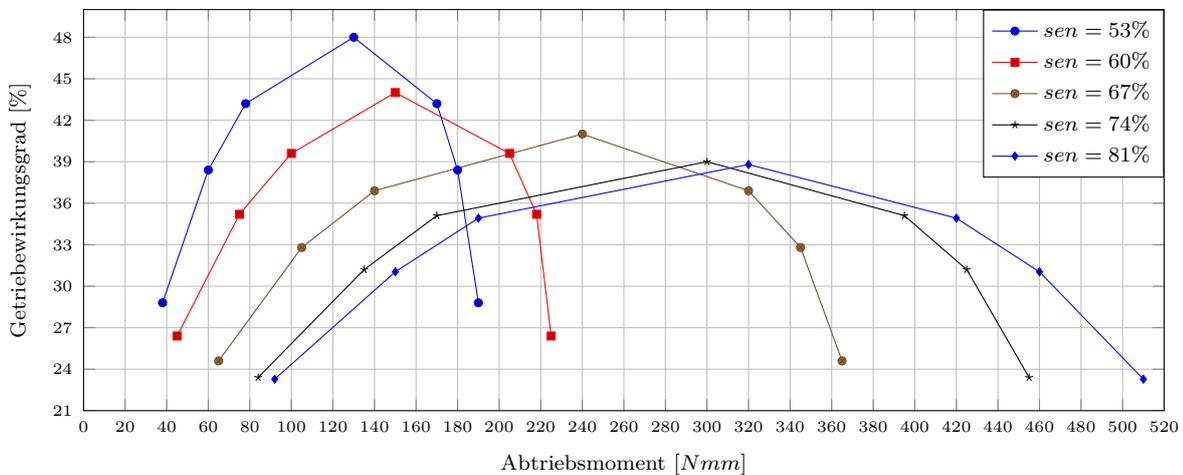


Abbildung 6.5: Berechneter Getriebewirkungsgrad für 47 – 100% Getriebeeinstellung

6 Getriebe-Verstellung

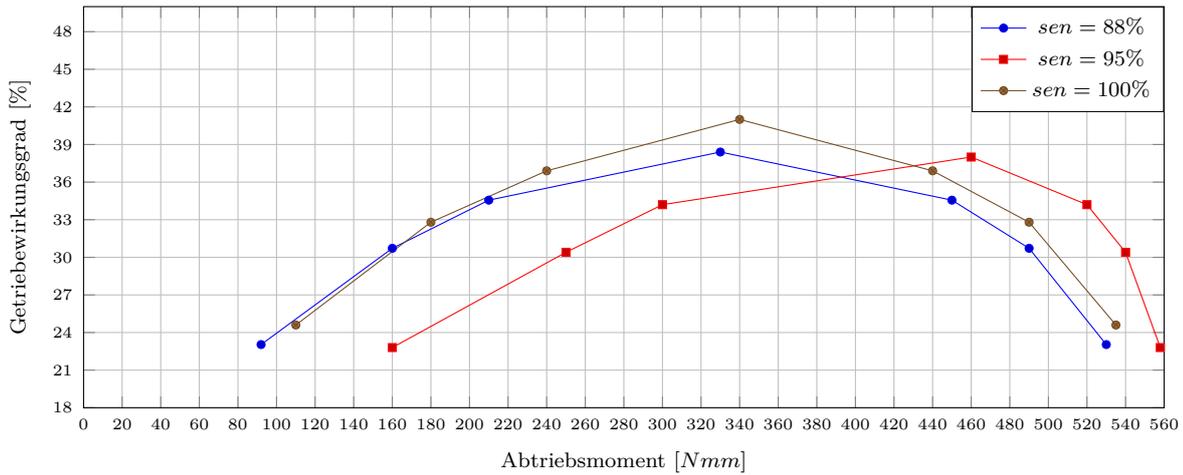


Abbildung 6.6: Berechneter Getriebewirkungsgrad für 47 – 100% Getriebeeinstellung

Abbildung 6.7 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Die blaue Kurve stellt die Leerlaufkennlinie des vermessenen Getriebes dar. Wie der Name bereits impliziert, beinhaltet dieser Verlauf die Werte des Übersetzungsfaktors, über der gewählten Getriebeeinstellung bei unbelastetem Getriebe. Die rote Kurve stellt den maximalen Wirkungsgrad, bei der jeweiligen Getriebeeinstellung dar. Man kann gut erkennen, dass der maximale Getriebewirkungsgrad mit steigender Getriebeeinstellung abnimmt.

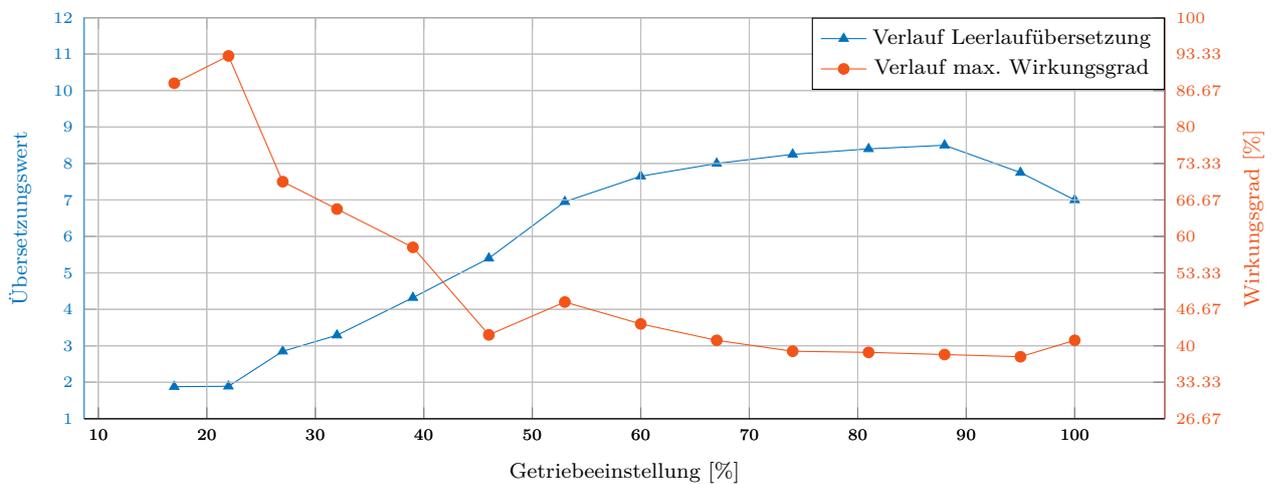


Abbildung 6.7: Maximaler Getriebewirkungsgrad und Kennlinie der Leerlaufübersetzung

6.1.2 Messungen an der Prothese

In diesem Abschnitt werden die, im Laufe dieser Arbeit entstandenen Messungen beschrieben. In Ermangelung des Prüfstandes, der dazu verwendet wurde um die in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen Daten zu erheben, mussten die Messungen direkt mit dem

Prothesenarm durchgeführt werden. Dabei entstehen einige Nachteile. Die Messungen sind nur bedingt mit den bereits erhobenen Daten vergleichbar, das Getriebe kann nicht mit einem genau definierten Abtriebsmoment belastet werden. Auch die in der Prothese zur Verfügung stehende Sensorik, unterscheidet sich von der im Prüfstand eingesetzten Sensorik. Das Getriebe, welches mit Hilfe des Prüfstandes vermessen wurde, steht nicht mehr zur Verfügung. Darum stammen die Daten in diesem Abschnitt von einem Getriebe einer neueren Charge. Durch Abweichungen in der Produktion, können sich das maximale Abtriebsmoment und die Charakteristik der verschiedenen Getriebe unterscheiden.

Messaufbau

Zur Durchführung der Messungen werden, aufbauend auf dem in Abschnitt 5.3 beschriebenen Grundgerüst der Armsteuerung, verschiedene Messabläufe programmiert. Diese Abläufe in Verbindung mit dem PC-Interface, ermöglichen die Aufnahme von Messkurven. Zur Ermittlung der verschiedenen Messdaten, wird der in Abbildung 6.8 dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Die Gelenkskugel des Armes, wird mit einer dafür vorgesehenen Halterung eingespannt. Diese Halterung wird an einem Tisch fixiert. Der Arm ist im gestreckten Zustand, entlang der Erdbeschleunigung ausgerichtet. Am Ende des Armschaftes wird ein Adapter angebracht, um verschiedene Hublasten mit dem Arm zu verbinden. Das Gewicht des Adapters entspricht dem Gewicht eines Greifgerätes. Je nach Art der Messung, wird die Hublast variiert.

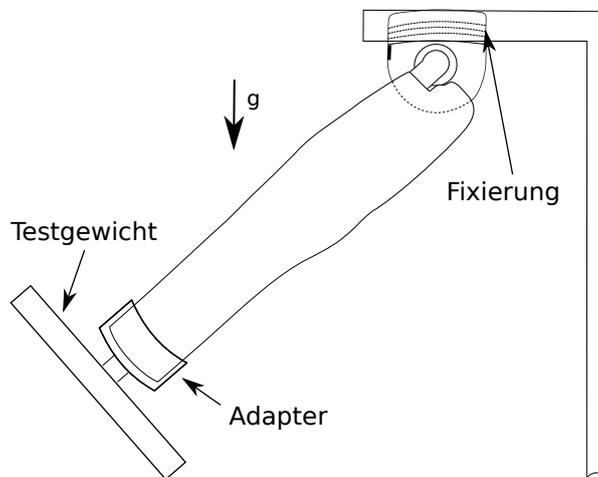


Abbildung 6.8: Testaufbau zur Geriebecharakterisierung

6.1.3 Messung der Leerlauf-Übersetzungskennlinie

Ziel der Messung ist es, eine Kennlinie des Übersetzungsverhältnisses der Getriebestufe, in Abhängigkeit der Getriebeeinstellung, bei quasi unbelastetem Getriebeausgang zu bestimmen. Der Messaufbau entspricht dem in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Aufbau. Die Messung wird zu diesem Zweck aber ohne ein Testgewicht oder den Adapter durchgeführt. Das Lastmoment, das auf den Getriebeausgang wirkt, wird dabei nur durch das Eigengewicht des Armes und das AFB System hervorgerufen. Das AFB System, das bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben wurde, ist so ausgelegt, dass es den Hubmotor beim Anheben des Armes entlastet. Dabei wirkt das vom AFB System erzeugte Drehmoment, entgegen dem durch die Masse des Armes und der Erdbeschleunigung hervorgerufenen Drehmoment. Beim Absenken des Armes wird die Feder im AFB System gespannt, und belastet somit den Getriebeausgang. Um den Fehler, der durch diese Einflüsse entsteht, gering zu halten, wird jeweils eine Messung in Hubrichtung und eine Messung beim Absenken des Armes durchgeführt. Anschließend werden die beiden Werte gemittelt. Im Gegensatz zur in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Messung innerhalb der Embedded-Software, wird in diesem Fall der mittlere Übersetzungsfaktor über den kompletten Bewegungsbereich der Prothese ermittelt. Dieser Wert kann anschließend mit einem Umrechnungsfaktor entsprechend skaliert werden. Der Grund für die Wegmessung ist, dass die Onlinemessung innerhalb der Embedded-Software ungenauer ist, außerdem fällt das Rauschen der Sensorik bei der Wegmessung weniger stark ins Gewicht.

Ablauf der Messung

Um die Leerlaufkennlinie zu ermitteln, wird der Arm bei komplett entspanntem AFB System und bei niedriger Geschwindigkeit zwischen den Endanschlägen, jeweils einmal aufwärts und einmal abwärts bewegt. Dabei wird der Wert des Motorzählers, welcher dem zurückgelegten Weg des Getriebe-Antriebes entspricht, der Wert des Winkelsensors am Ausgang der Getriebestufe und der Wert der Getriebeeinstellung, sprich das Signal des Servo-Positionssensors, aufgezeichnet. Bei jeder neuen Aufzeichnung wird das Getriebe verstellt. Abbildung 6.9 zeigt die aufgenommenen Werte bei unterschiedlichen Getriebeeinstellungen. Der Wert der Getriebeeinstellung wird dabei im Bereich von 1 bis 255 in 5er Schritten variiert. Dies entspricht dem vollen Stellbereich des Getriebes. Die Kurven mit dem geringsten Anstieg, entsprechen einen niedrigen Wert der Getriebeeinstellung und einem geringen Übersetzungsfaktor.

Resultat

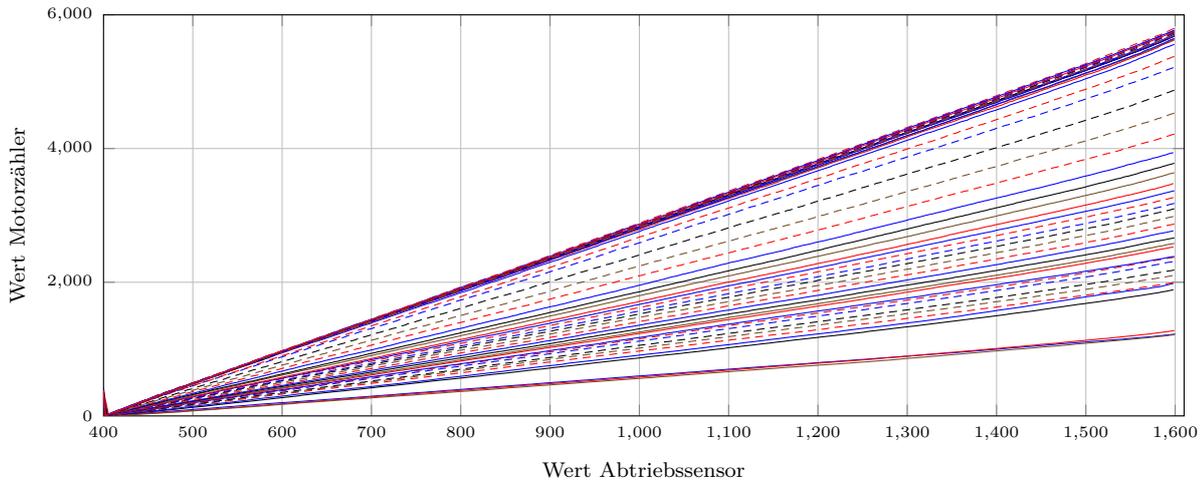


Abbildung 6.9: Messkurven des zurückgelegten Weges des Getriebe-Antriebes (Motorzähler) und des Getriebe-Abtriebes (Abtriebssensor) bei verschiedenen Getriebeeinstellungen, während der Aufwärtsbewegung.

Die blaue Kurve in Abbildung 6.10 zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen Motorzähler und Abtriebssensorsignal, für die Getriebebestellung 1. An den Enden der Kurve sind leichte Nichtlinearitäten zu erkennen, diese sind auf den Abtriebssensor zurückzuführen. Zur Ermittlung des mittleren Übersetzungswertes, wird nun eine Gerade

$$C_{mot} = kC_{ab} + d \quad (6.1)$$

mittels Least Squares Verfahren an die Messkurve angenähert. C_{mot} repräsentiert den Wert des Motorzählers und C_{ab} den Wert des Abtriebssensors. Die Steigung k der Geraden aus Gleichung 6.1 ist proportional zum mittleren Übersetzungsfaktor \bar{i} des Getriebes bei der aktuellen Einstellung.

6 Getriebe-Verstellung

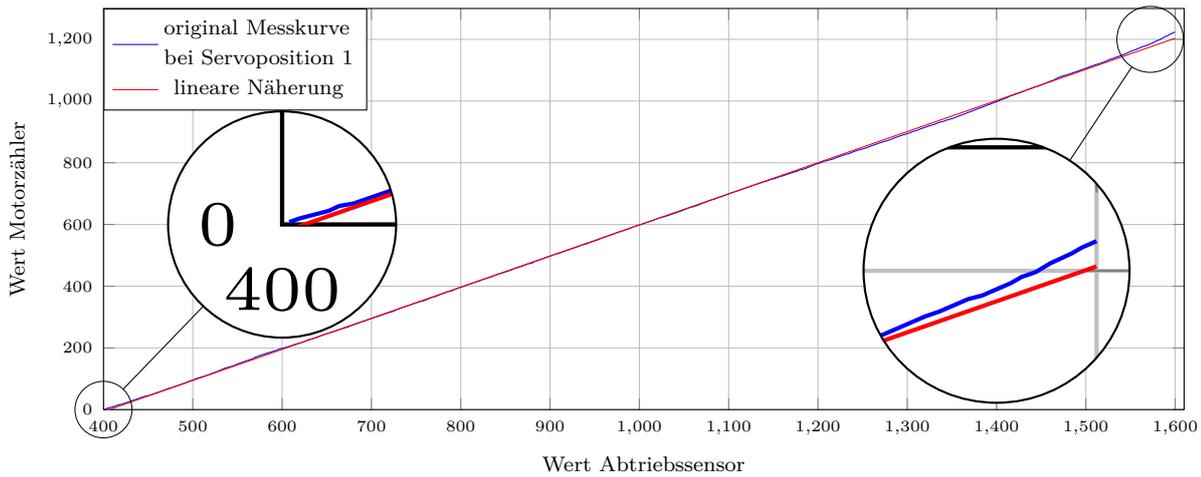


Abbildung 6.10: Messkurve des zurückgelegten Weges des Getriebe-Antriebes (Motorzähler) und des Getriebe-Abtriebes (Abtriebssensor) bei Getriebestellung 1 und lineare Näherung zur Untersetzungsberechnung

Dieser Vorgang wird mit allen aufgenommenen Kurven wiederholt. Abbildung 6.11 zeigt die berechneten Werte der Steigung k zwischen Motorzähler und Abtriebssensor. Man kann erkennen, dass sich die berechneten Werte von k bei der Abwärtsbewegung (rot) und bei einer Aufwärtsbewegung des Armes (blau) unterscheiden. Die braun eingezeichneten Punkte, entsprechen dem Mittelwert der beiden Messungen. Der Unterschied kommt, wie bereits erwähnt, von der Feder des AFB Systems. Je nach Bewegungsrichtung, wird diese Feder gespannt oder entspannt, was sich auf die Abtriebslast am Getriebe niederschlägt.

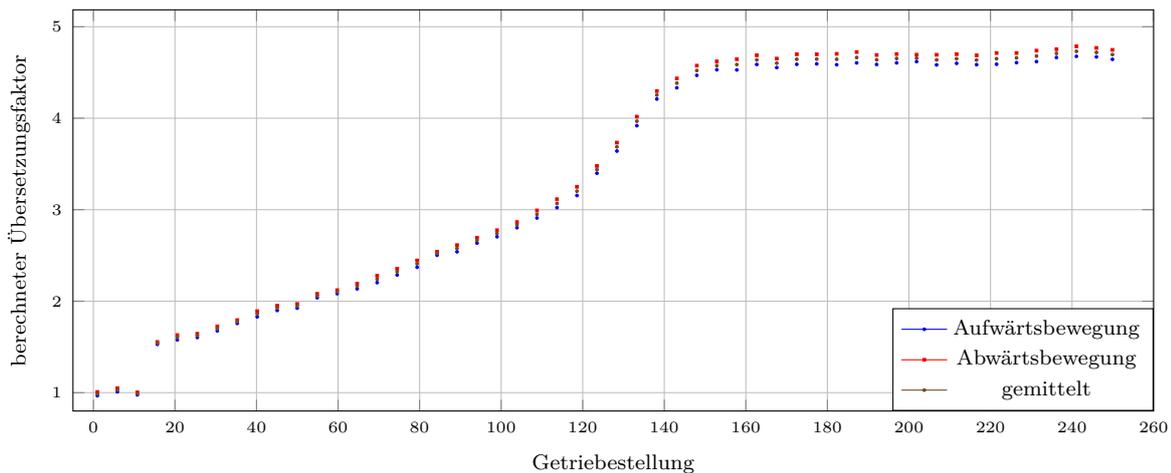


Abbildung 6.11: berechnete Übersetzungsverhältnisse zwischen Antriebsweg zu Abtriebsweg

Vergleicht man den Verlauf des proportionalen Übersetzungsfaktors k mit der in Ab-

schnitt 6.1.1 Abbildung 6.7 dargestellten Leerlaufkennlinie des Übersetzungsfaktors i des Referenzgetriebes, erkennt man eine Ähnlichkeit der beiden Verläufe. Doch bei genauerer Betrachtung gibt es Unterschiede am Ende des Verstellbereiches und auch am Übergang zwischen dem annähernd linearen Bereich und dem Plateau am Ende des Verstellbereiches. Diese Unterschiede lassen sich durch Abweichungen in der Produktion des Getriebes erklären.

6.1.4 Messung Getriebekennfeld

Ziel der Messung ist es, das charakteristische Verhalten des verwendeten Variogetriebes, bei sich verändernden Abtriebslasten zu ermitteln. Dabei soll der erlaubte Betriebsbereich des Getriebes, bezogen auf den Wert der gemessenen Getriebeübersetzung bestimmt werden. Der gesuchte Bereich entspricht dem Wertebereich des gemessenen Übersetzungsfaktors, in Abhängigkeit der Getriebeeinstellung, bei dem das Getriebe noch im Stande ist, Drehzahl zu übertragen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in Abschnitt 6.2 angewendet, um eine automatische Getriebeverstellung zu realisieren.

Ablauf der Messung

Für diese Messung wurde ein spezielles Testprogramm entwickelt.

Der Ablauf der Messung ist folgender: Der Arm wird nach jedem abgeschlossenen Durchlauf mit einem anderen definierten Prüfgewicht belastet. Das Testprogramm steuert dabei die Abläufe einer Messung. Dieses Programm hat die Aufgabe, den Arm bei fixierter Getriebeeinstellung vom unteren Endpunkt bei niedriger Geschwindigkeit anzuheben. Bei Überschreiten einer eingestellten Schwelle des Sensorwertes des Getriebeübersetzungsfaktors, die einem Vielfachen der Leerlaufübersetzung entspricht, wird die Bewegung abgebrochen, um den Arm wieder in die Ausgangsstellung zu fahren. Sobald der Arm in der senkrechten Position angekommen ist, wird die nächste Getriebeeinstellung eingestellt. Dieser Ablauf wiederholt sich so lange, bis alle gewünschten Getriebeeinstellungen geprüft sind.

Der Bereich der erlaubten Getriebeeinstellungen entspricht auch hier den Werten 1 bis 255 des Servostellbereiches. Bei der Messung wird die Getriebeeinstellung in 5er Schritten erhöht. Die Messungen werden bei 4 verschiedenen Armlasten durchgeführt. Die erste Messung wird nur mit dem Adapter durchgeführt. Das Gewicht des Adapters entspricht dem Gewicht eines Greifgerätes. Bei den weiteren Messungen werden Prüfgewichte (2kg, 3kg und 6kg) an den Adapter angeschlossen. Während des Testprogrammes werden die internen Werte für die gemessene Getriebeübersetzung und den Motorstrom aufgezeichnet. Die Daten werden im 20ms Intervall aufgezeichnet.

Resultat

Abbildung 6.12 zeigt exemplarisch den Verlauf einer Einzelmessung bei der Getriebestellung 91 mit einer Armlast von 2kg. Die rote Kurve stellt den aufgezeichneten Sensorwert der Getriebeübersetzung dar. Man erkennt, den langsamen Anstieg des Wertes im Bereich $t = [0, 1.2]s$. Der Anstieg ist bedingt durch das Anheben des Armes. Dabei steigt die Last am Getriebe an, wodurch die Übersetzung des Getriebes ebenfalls steigt. Ab dem Zeitpunkt $t = 1,2s$ beginnt der Übersetzungswert rasch anzusteigen. Das ist in etwa der Punkt, an dem das Getriebe beginnt durchzurutschen. Der Übersetzungsfaktor des rutschenden Getriebes geht sprunghaft gegen ∞ . Der Sprung des Wertes wird durch die Filterung bei der Messung verschliffen. Der Anstieg des Übersetzungswertes entspricht der Zeitkonstante des Tiefpassfilters. Die blaue Kurve zeigt den Verlauf des Motorstromes im selben Zeitintervall. Auch hier ist ein Anstieg des Wertes im Bereich $t = [0, 1.2]s$ zu erkennen. Sobald jedoch das Getriebe zu rutschen beginnt, stagniert der Wert und bleibt, bei dieser Messung, in etwa konstant. Bei weiteren Messungen war auch ein leichtes Abnehmen des Motorstromes zu beobachten. Der Effekt ist durch den Übergang von Haftreibung zu Gleitreibung der kraftübertragenden Reibflächen, innerhalb des Getriebes zu erklären.

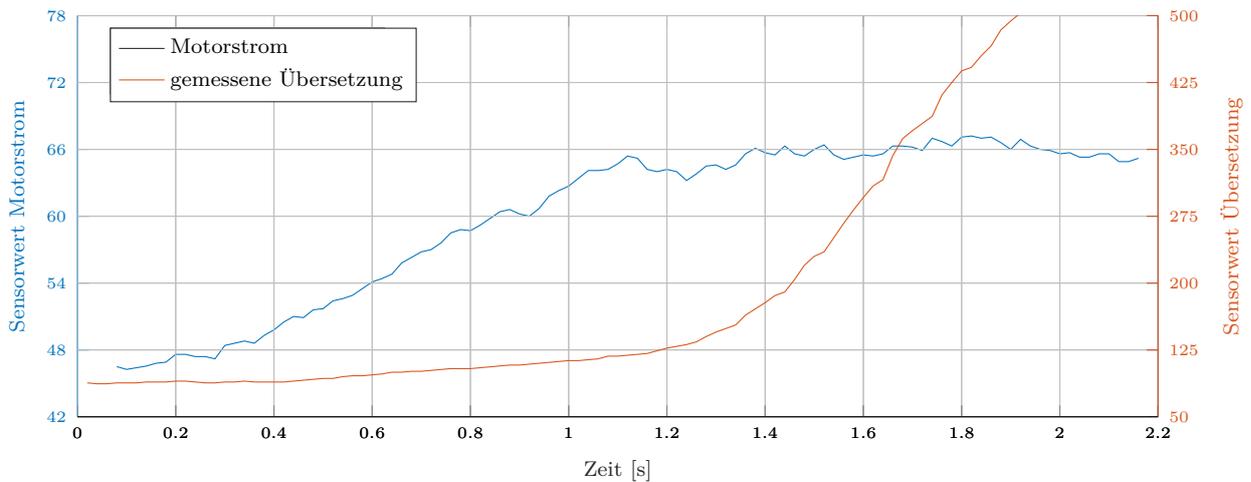


Abbildung 6.12: Einzelne Messreihe bei Getriebestellung 91. Arm mit 2kg belastet.

Die eben beschriebenen Einzelmessungen, an den jeweiligen Getriebestellungen, werden im nächsten Schritt zusammengefügt. So wird annähernd der komplette Lastbereich des Getriebes abgedeckt. Abbildung 6.13 zeigt den Zusammenschluss aus drei Einzelmessungen, unter Verwendung verschiedener Armlasten. Die Verwendeten Lasten waren der Adapter, 2kg und 3kg.

6 Getriebe-Verstellung

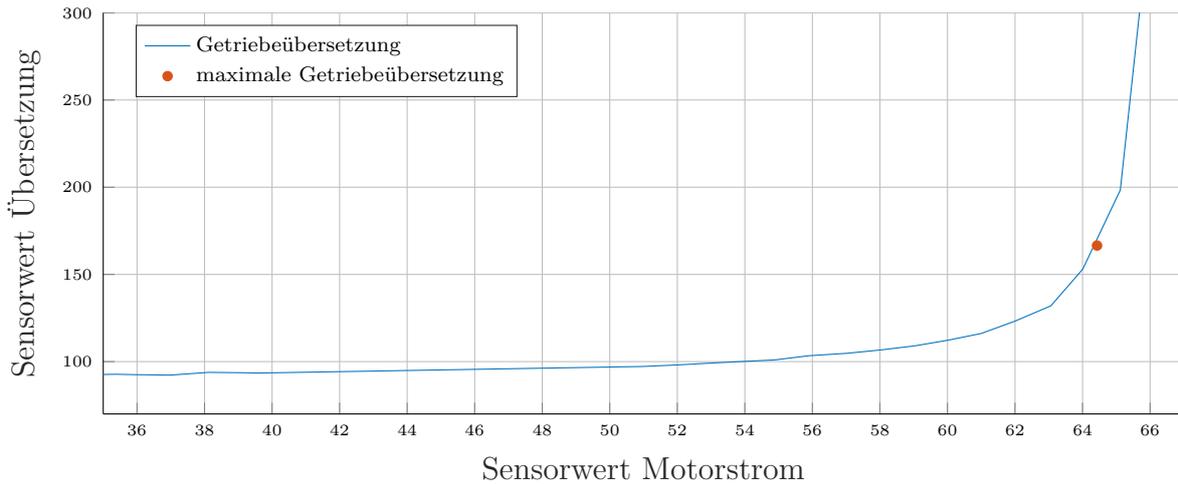


Abbildung 6.13: Zusammengeführte Messreihe bei Getriebebestellung 91.

Aus Abbildung 6.13 ist ersichtlich, dass der Differenzenquotient $\frac{\Delta \text{Übersetzungswert}}{\Delta \text{Motorstrom}}$, bei steigendem Motorstrom ansteigt und schlussendlich annähernd sprunghaft gegen ∞ geht. Durch die Filterung der Signale wird dieser sprunghafte Anstieg verschliffen, deswegen ist die Position des Sprunges bezüglich des Motorstroms nicht mehr eindeutig zuordenbar. Der im Weiteren verwendete Wert der maximalen Getriebeübersetzung wird folgendermaßen angenommen: Abbildung 6.14 zeigt den Differenzenquotienten von Abbildung 6.13. Bei Erreichen eines Schwellwerts (blau eingezeichnet), wird der Wert des Motorstromes an dieser Stelle verwendet, um den Punkt der maximalen Getriebeübersetzung in Abbildung 6.13 (rot eingezeichnet) zu bestimmen.

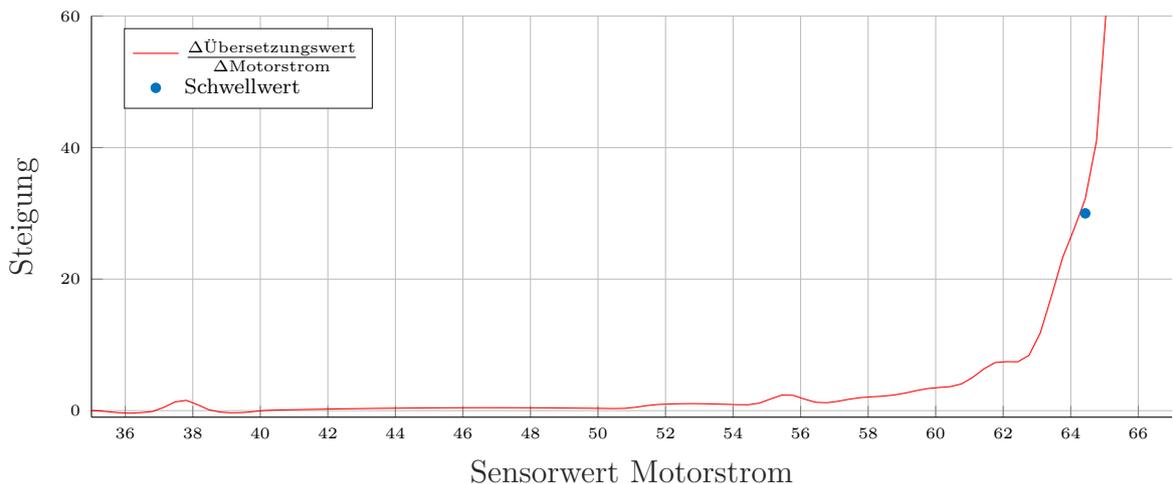


Abbildung 6.14: Anstieg $\frac{\Delta \text{Übersetzungswert}}{\Delta \text{Motorstrom}}$ in Abhängigkeit des Motorstromes.

Abbildung 6.15 zeigt den so angenommenen Betriebsbereich bei sämtlichen Getriebebestellungen. Die blaue Kurve zeigt, die aus den Messungen berechneten maximalen Über-

6 Getriebe-Verstellung

setzungswerte in Abhängigkeit der Getriebebestellung. Man kann erkennen, dass dieser Verlauf dem der Leerlaufkennlinie ähnelt. Damit wird nun eine Funktion angesetzt, die den Verlauf der maximalen Übersetzungswerte in Abhängigkeit der Leerlaufwerte approximieren soll. Die rot eingezeichnete Kurve entspricht der angenommenen Funktion

$$i = f_{ulk}(x)(a + \arctan((x - b)/c)d) \quad (6.2)$$

mit den Parametern

$$a = 1,9 \quad b = 150 \quad c = 4 \quad d = 0.1$$

und dem Koeffizienten

$f_{ulk}(x)$... Funktion der Leerlaufkennlinie
 x ... Getriebebestellung

Der grün gefärbte Bereich zwischen der Leerlaufkennlinie und der davon abgeleiteten Funktion, entspricht einer Näherung des erlaubten Betriebsbereiches in Hubrichtung.

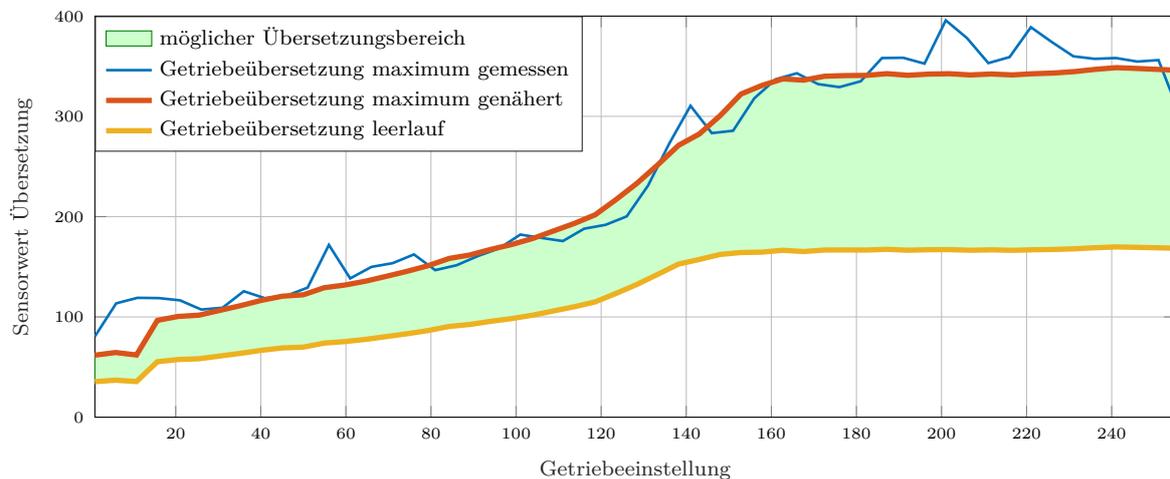


Abbildung 6.15: möglicher Betriebsbereich

Abbildung 6.16 zeigt eine dreidimensionale Ansicht des ermittelten Getriebekennfeldes.

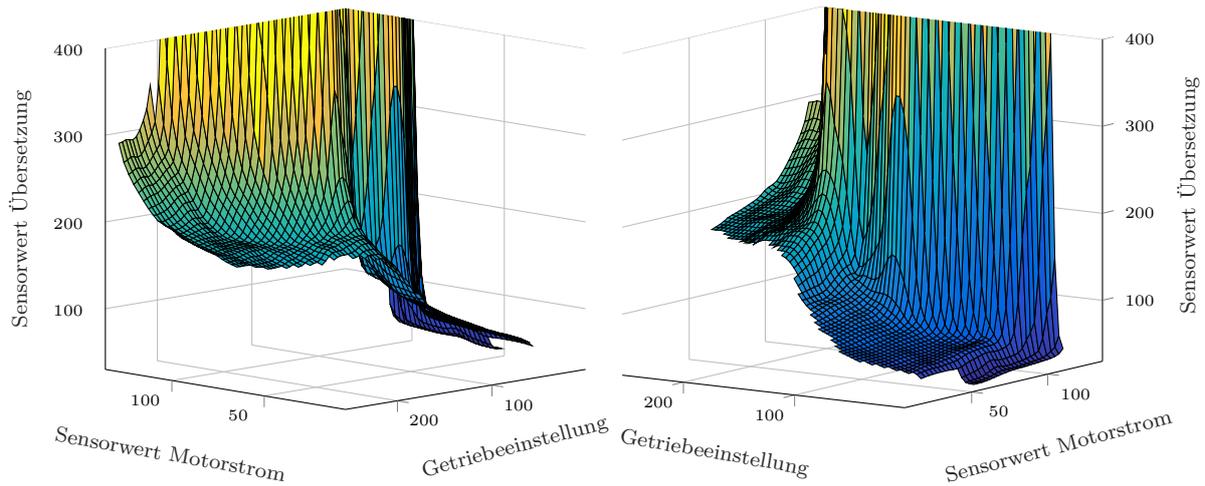


Abbildung 6.16: Getriebekennfeld

6.2 Verstellalgorithmus

Ausgehend von den Messungen aus dem vorhergehenden Abschnitt, wird nun der automatische Verstellalgorithmus entwickelt. Als maßgebliche Größe, um den Belastungszustand des Variogetriebes zu ermitteln und die Verschaltung des Getriebes auszulösen, wird der gemessene Übersetzungsfaktor der Getriebestufe herangezogen. Wie aus den Messungen in den Abschnitten 6.1.1 und 6.1.4 hervorgeht, verändert sich die Übersetzung des Variogetriebes in Abhängigkeit der Abtriebslast. Das Ziel ist es, das Getriebe automatisch, in Abhängigkeit dessen Übersetzungsfaktors und somit auch abhängig von der Abtriebslast, zu verstellen. So soll sichergestellt werden, dass das Getriebe im sicheren Bereich betrieben wird. Dieser Bereich wurde in Abschnitt 6.1.4 bestimmt. Zusätzlich besteht die Forderung, wie bereits in Abschnitt 6.1.1 dargestellt, das Getriebe bei Einstellungen mit möglichst geringen Übersetzungsfaktor zu betreiben, um so einen günstigeren Wirkungsgrad zu erreichen.

Der Ansatz für diesen Algorithmus ist die Einführung verschiedener Schaltschwellen. Jeder Getriebestellung g_s ist ein Wert i_{ss} als Schaltschwelle zugeordnet, die Werte werden in einer Tabelle gespeichert. Ein Über- oder Unterschreiten der aktuellen Schwelle wird durch das Vorzeichen des Ergebnisses aus der Differenz der aktuell gemessenen Getriebeübersetzung $i[n]$ und der aktuellen Schaltschwelle bestimmt. Mehr Details zur Bestimmung dieser Schaltschwelle finden sich in Abschnitt 6.2.1. Die Berechnung der Weite des Stellschrittes des Getriebes erfolgt weitgehend proportional zur Differenz $i[n] - i_{ss}[n]$. Der Grund dafür ist die Annahme, dass ein drohendes Durchrutschen, durch rasches Hochstellen des Getriebes verhindert werden kann. Je größer diese Differenz ist, umso

schneller wird das Getriebe in Richtung höherer Übersetzung eingestellt. Zusätzlich muss das Rauschen bei der Übersetzungsbestimmung berücksichtigt werden. Starkes Rauschen im Signal $i[n]$ führt zu ungewollten Effekten z.B. kann dadurch eine Schwingung angeregt werden, welche der Getriebeeinstellung überlagert ist. Das Getriebe würde in diesem Fall hoch und wieder zurück gestellt. Wird das Getriebe bei anhaltender Belastung zu weit zurück gestellt, dann verlässt es den erlaubten Betriebsbereich und rutscht durch. Um dieses instabile Verhalten zu vermeiden, wird im Bereich $\Delta i_{off} < \Delta i[n] \leq 0$ keine Verstellung des Getriebes durchgeführt. Zusätzlich wird das Getriebe langsamer in Richtung niedriger Übersetzung als in Richtung hoher Übersetzung eingestellt. Daraus ergibt sich die stückweise definierte Funktion zur Berechnung des Schaltschrittes $\Delta gs[n]$ zu

$$\Delta gs(\Delta i[n]) = \begin{cases} \min(\Delta gs_{min}, k_n(\Delta i[n] - i_{off})) & \Delta i[n] < \Delta i_{off} \\ 0 & \Delta i_{off} \leq \Delta i[n] < 0 \\ \max(\Delta gs_{max}, k_p \Delta i[n]) & 0 \leq \Delta i[n] \end{cases} \quad (6.3)$$

mit den Begrenzungen der Schrittweite Δgs_{min} und Δgs_{max} , den Parametern zur Einstellung der Schrittweiten $k_n < k_p$ und dem inaktiven Bereich $\Delta i_{off} \leq \Delta i < 0$. Der neue Vorgabewert der Getriebebestellung $gs[n + 1]$ ergibt sich aus der Summe der aktuellen Getriebeeinstellung $gs[n]$ und des Schaltschrittes $\Delta gs[n]$.

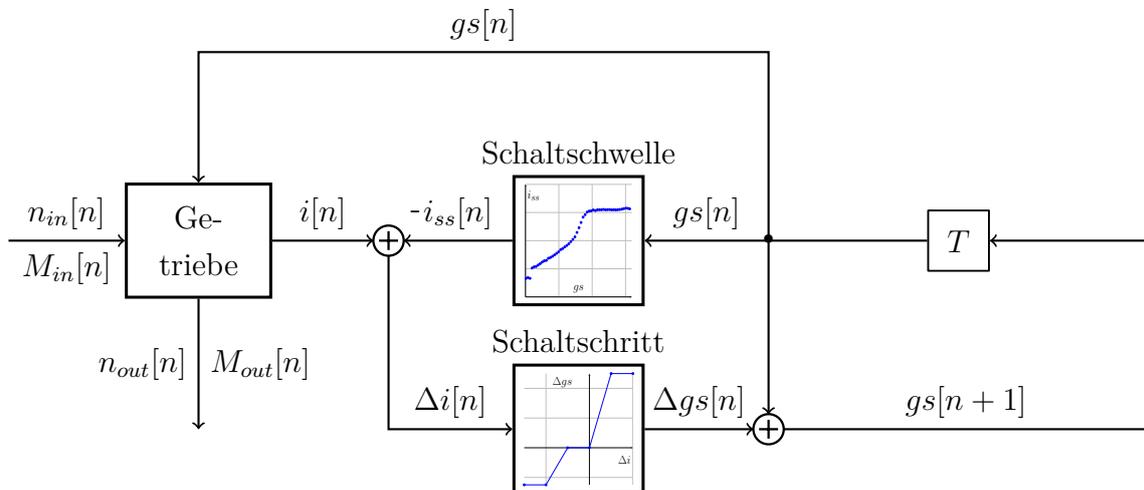


Abbildung 6.17: Blockschaltbild Getriebeverstellung

Abbildung 6.17 zeigt das Blockschaltbild des, im Laufe dieser Arbeit entstandenen Schaltalgorithmus. Die Funktion der Getriebebestellung ergibt sich zu

$$gs[n + 1] = gs[n] + \Delta gs(i(M_{out}[n], spos[n]) - i_{ss}(gs[n])) \quad (6.4)$$

6.2.1 Auswahl der Schaltschwelle

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Wahl der Schaltschwelle. Ein Ziel der Getriebeverstellung ist es, das Getriebe bei einem möglichst guten Wirkungsgrad zu betreiben. Aus den Messungen in Abbildung 6.4 bis 6.6 in Abschnitt 6.1.1 ist ersichtlich, dass der Wirkungsgrad bei fixierter Getriebeeinstellung, abhängig vom Abtriebsmoment ist. Wie aus den Abbildungen 6.1 bis 6.3 hervorgeht, befinden sich die Punkte des maximalen Wirkungsgrades des Getriebes annähernd in der Mitte bzw. in der oberen Hälfte des Übersetzungsbereiches. Aus der Analyse der Messungen in Abschnitt 6.1 konnte eine Näherung des erlaubten Übersetzungsbereich in Abbildung 6.15 erstellt werden. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Auswahl der Schaltschwelle. Wegen der Ähnlichkeit der Kurve der maximalen Übersetzungen aus Abbildung 6.15 mit der Leerlaufkennlinie des Getriebes wird angenommen, dass der Verlauf der Schaltschwelle eine Funktion der Leerlaufkennlinie ist. Die Schaltschwelle wird deshalb aus der Leerlaufkennlinie berechnet. Dazu wird diese mit einem mit der Getriebeeinstellung ansteigenden Faktor multipliziert. Als Funktion zur Berechnung der Schaltschwelle wird Formel 6.2 mit den Parametern

$$a = 1,3 \quad b = 150 \quad c = 2,5 \quad d = 0.03$$

verwendet.

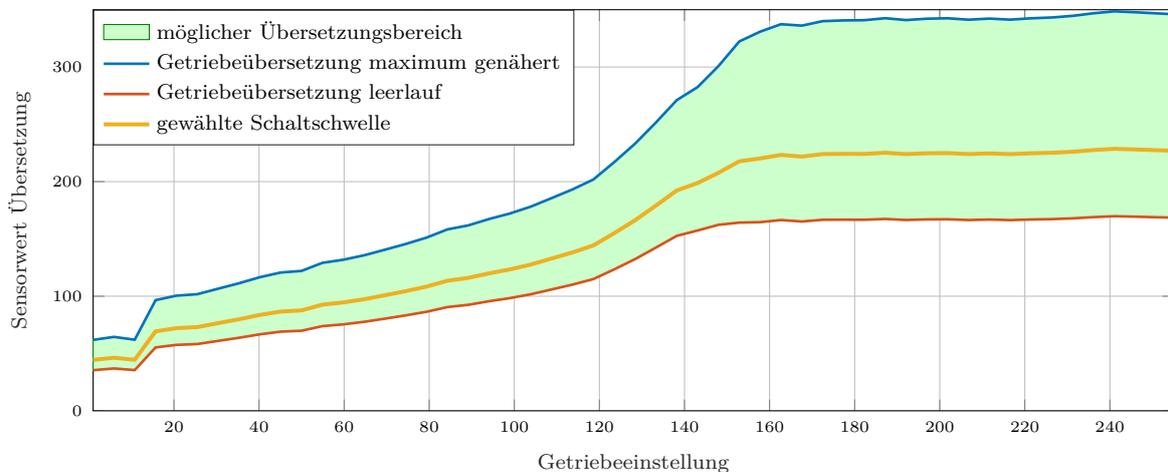


Abbildung 6.18: Berechnung Schaltschwelle

Abbildung 6.18 zeigt die gewählte Lastschwelle im erlaubten Übersetzungsbereich. Für das verwendete Getriebe erwies sich die Wahl der Schaltschwelle am oberen Ende der unteren Hälfte des Übersetzungsbereiches als gute Wahl. Höher angesetzte Schaltschwellen führten zu einem Durchrutschen des Getriebes. Als Grund dafür kann die Nähe zur Rutschgrenze und die Trägheit der Getriebeverstellung und der Übersetzungsmessung gesehen werden. Durch den zeitlichen Versatz wird das Getriebe verspätet gestellt, was

6 Getriebe-Verstellung

dazu führt, dass das Getriebe schon überlastet wird, bevor die Getriebeverstellung reagieren kann.

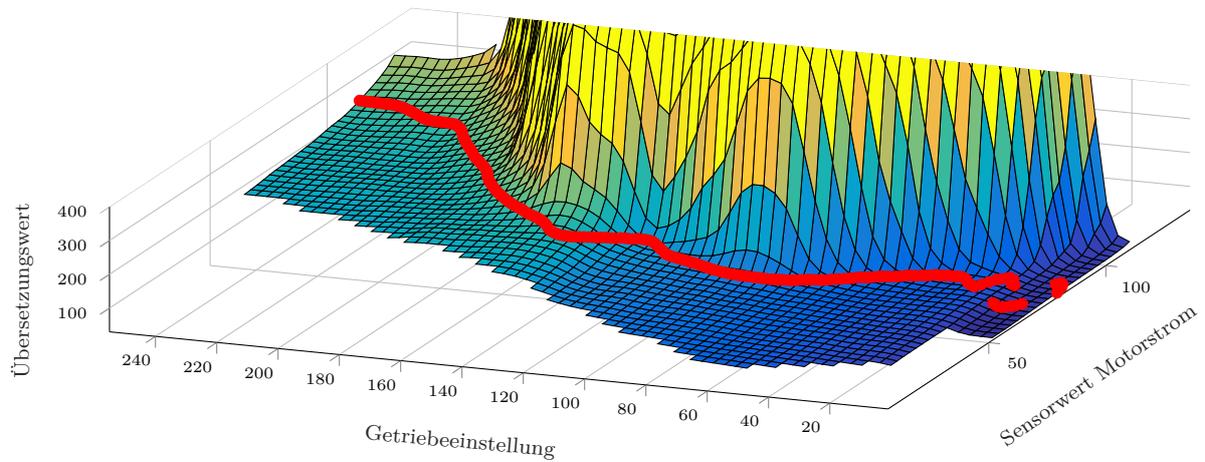


Abbildung 6.19: Getriebekennfeld mit Schaltschwelle

Abbildung 6.19 zeigt die gewählte Schaltschwelle eingezeichnet in das Getriebekennfeld. Aus dieser Ansicht wird deutlich, wie nahe die Schaltschwelle der Rutschgrenze ist, obwohl die Schwelle im unteren Übersetzungsbereich angesiedelt ist.

7 Abschließende Messungen

7.1 Verhalten der Servoverstellung

Zur Überprüfung des Verhaltens der automatischen Getriebeverstellung wurden Hubtests mit verschiedenen Armlasten und verschiedenen Testgeschwindigkeiten, so wie bei eingestelltem und entspanntem AFB-System durchgeführt. Dabei wurden interne Messwerte des Prothesenarmes, wie die aktuelle Getriebeeinstellung, der gemessene Übersetzungsfaktor des Getriebes und die aktuelle Schaltschwelle aufgezeichnet. Der Messaufbau entspricht dem bereits in Abschnitt 6.1.2 erwähnten Aufbau. Der Ablauf der Versuche war wie folgt. Der Arm befindet sich zu Beginn des Versuches in der unteren Endposition. Als Eingangsgröße wird der Vorgabewert der Armgeschwindigkeit sprunghaft auf die Testgeschwindigkeit eingestellt. Von diesem Zeitpunkt an, werden die Daten aufgezeichnet. Sobald der Arm die obere Endposition erreicht, ist der Versuch beendet. Die aufgezeichneten Messwerteverläufe aller Hubtests sind im Anhang 9.1 angeführt.

7.1.1 Durchführung

Eine Zielvorgabe (siehe Abschnitt 4.4) ist, dass das Getriebe bei quasi unbelastetem Arm in der Stellung mit dem niedrigsten Übersetzungsfaktor verharrt. Dieser Fall ist gegeben, wenn der Arm nur durch das Gewicht eines Greifgerätes belastet wird. Der Adapter zur Aufnahme der Prüfgewichte ist so konzipiert, dass sein Gewicht, dem eines Greifgerätes entspricht. Zur Überprüfung des gewünschten Verhaltens wurden Hubversuche bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt. Zur Diskussion des Ergebnisses werden die Messung bei maximaler Armgeschwindigkeit mit eingestelltem AFB-System (siehe Abbildung 7.1) herangezogen.

7 Abschließende Messungen

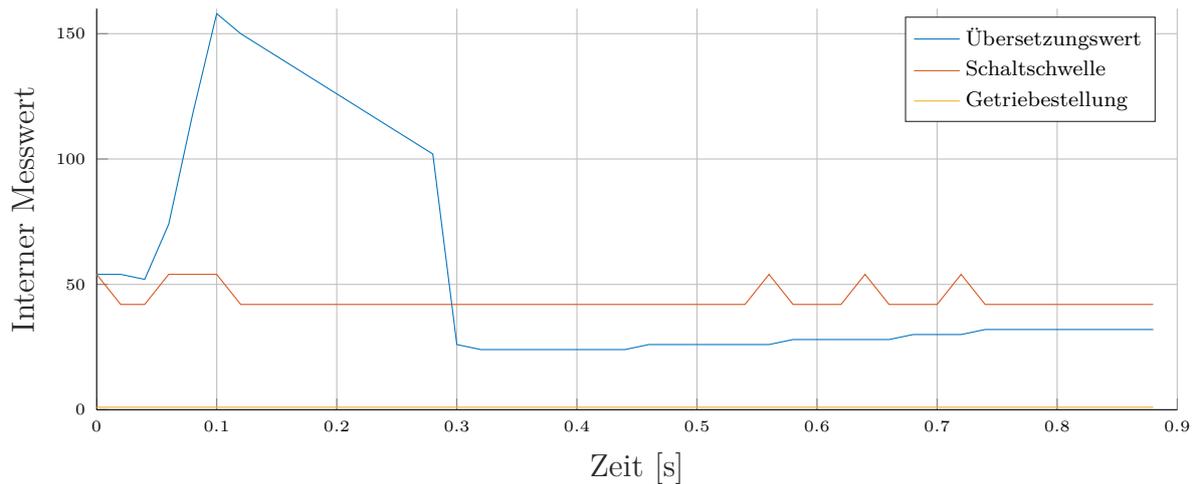


Abbildung 7.1: Hubtest AFB eingestellt, Belastung adapter bei 100% Maximalgeschwindigkeit

Im ersten Abschnitt zwischen 0 und 0,3 Sekunden, ist ein schlagartiger Anstieg der gemessenen Getriebeübersetzung zu beobachten. Dieser Effekt ist auch in den im Anhang (siehe Kapitel 9) aufgeführten Hubtests zu sehen. Diese falsche Messung ist nicht gewollt. Kurz nach dem Start der Aufzeichnung tritt bereits der in Abschnitt 5.3.2 erwähnte Fehler der Übersetzungsbestimmung, bei der ein mutmaßlich zu hoher Wert bestimmt wird, auf (blaue Kurve). Mögliche Ursachen dafür werden in Abschnitt 7.1.2 diskutiert. Durch die zeitweilige Deaktivierung der Getriebeverstellung wird die Zielvorgabe trotz Fehlmessung erreicht. Die Getriebeeinstellung bleibt konstant bei der Einstellung mit dem Wert Eins (gelbe Kurve). Der Wertebereich der Einstellbereich ist das Intervall $[1, 255]$.

Eine weitere Zielvorgabe ist die automatische Verschaltung des Getriebes, abhängig von der Belastung des Abtriebes. Um das Verhalten der Getriebeverstellung bei belastetem Arm zu untersuchen, wird der Hubversuch bei maximaler Armgeschwindigkeit mit eingestelltem AFB-System und einer Belastung von 3kg (siehe Abbildung 7.2) verwendet. Wie bereits erwähnt, befinden sich weitere Aufzeichnungen im Anhang 9.1.

7 Abschließende Messungen

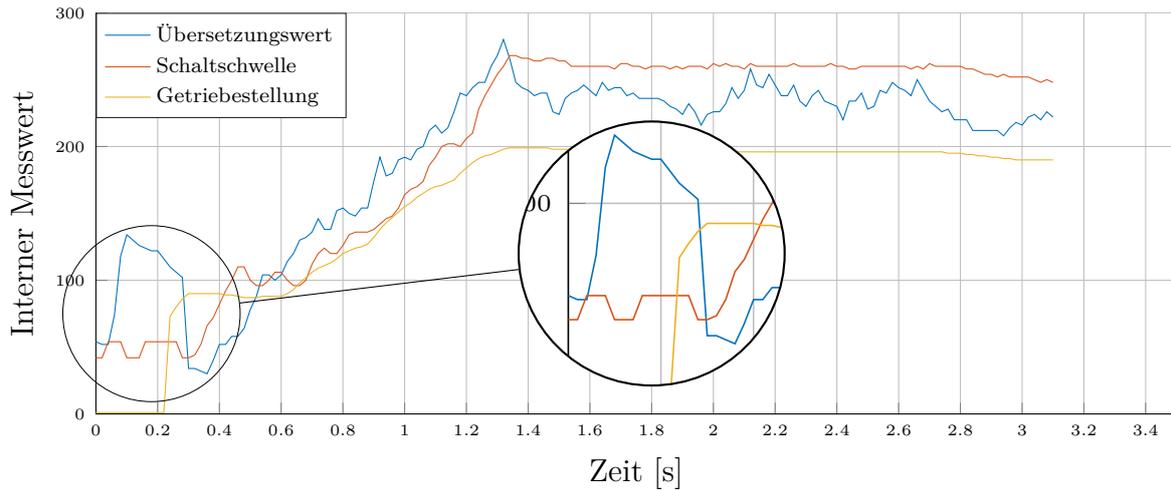


Abbildung 7.2: Hubtest AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit

Abbildung 7.2 bis 7.5 zeigen die aufgezeichneten Messkurven. Im ersten Abschnitt von Abbildung 7.2 ist der bereits erwähnte Messfehler des Übersetzungswertes (blaue Kurve) zu erkennen. In diesem Bereich ist die Getriebeverstellung inaktiv, zu erkennen an der konstanten Getriebeeinstellung (gelbe Kurve).

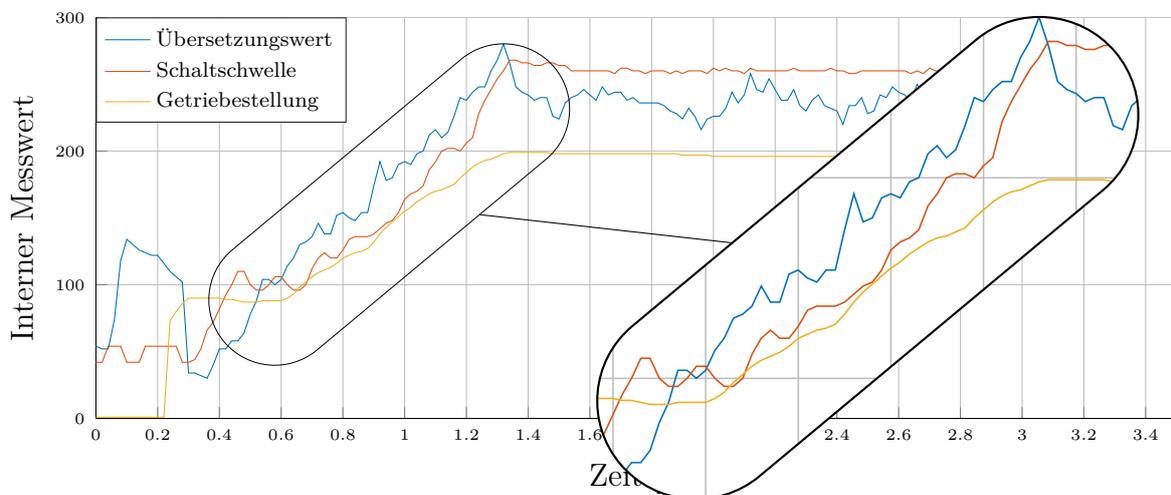


Abbildung 7.3: Hubtest AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit

Sobald die Getriebeverstellung aktiv wird, ist das eigentliche Verhalten der Getriebeverstellung zu beobachten. Bei ansteigender Abtriebslast steigt auch der Wert der gemessenen Übersetzung (blaue Kurve). Bei überschreiten der Schaltschwelle (rote Kurve), wird das Getriebe in Richtung höheren Übersetzungsfaktor gestellt (siehe markierter Bereich

7 Abschließende Messungen

in Abbildung 7.3). Die Getriebeeinstellung (gelbe Kurve) wird proportional zur Differenz aus dem gemessenen Übersetzungswert (blaue Kurve) und der aktuellen Schaltschwelle (rote Kurve) verstellt. Durch das Verstellen des Getriebes wird ein mögliches Durchrutschen verhindert.

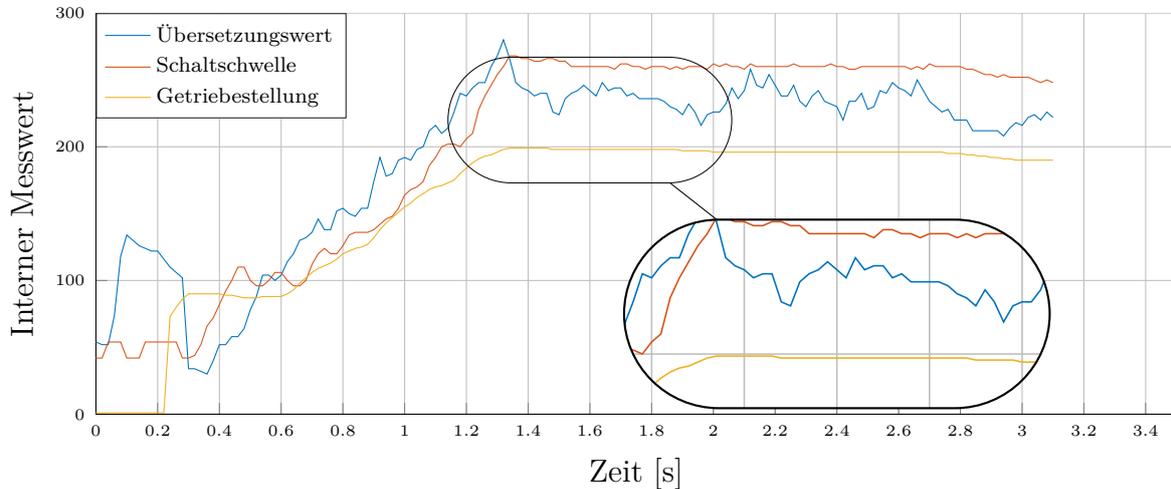


Abbildung 7.4: Hubtest AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit

Im dritten markierten Bereich (siehe Abbildung 7.4) erreicht die Getriebeeinstellung einen Maximalwert bei dem die höchste Belastung der Getriebestufe für die angegebene Armlast erreicht wird. Ab diesem Punkt sinkt die Belastung wieder. Der Grund für die nachlassende Abtriebslast ist die in Abschnitt 4.2 beschriebene Bandmechanik, deren Übersetzungsfaktor von der Armstellung abhängt. Beim Anheben des Armes steigt der Übersetzungsfaktor der Bandmechanik an und entlastet somit den Abtrieb der Getriebestufe.

7 Abschließende Messungen

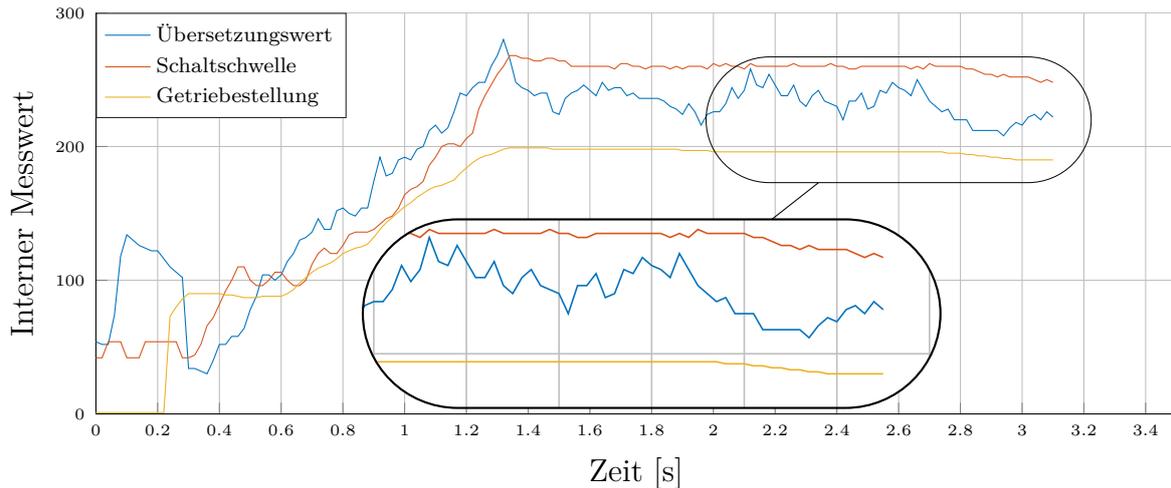


Abbildung 7.5: Hubtest AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit

Diese Art der Getriebeverschaltung bietet zusätzlich die Möglichkeit, das Getriebe in Richtung niedrigeren Übersetzungsfaktor einzustellen, falls sich die Belastung am Getriebeausgang verringert. Im letzten Abschnitt (siehe Abbildung 7.5) ist dieses Verhalten zu erkennen. Wie bereits aus den Messungen in Abschnitt 6.1.1 ersichtlich war, verbessert diese Vorgehensweise den mechanischen Wirkungsgrad des Getriebes.

7.1.2 Diskussion

Die Hubtests zeigen, dass das Prinzip funktioniert, wobei durchaus Verbesserungen möglich und notwendig sind. Auffällig ist, dass zu Beginn jedes Hubtests eine Fehlmessung des Übersetzungswertes stattfindet. Eine, meiner Meinung nach sehr wahrscheinliche Ursache dafür, ist ein zeitlicher Versatz zwischen den Signalen der Antriebsdrehzahl und der Abtriebsdrehzahl. Diese Asynchronizität würde bei konstanter Geschwindigkeit keine Auswirkung auf die Berechnung des Übersetzungswertes haben. Tritt jedoch Beschleunigen oder Abbremsen des Armes auf, so hätte der zeitliche Versatz Auswirkungen auf die Berechnung des Übersetzungswertes. Abbildung 7.6 verdeutlicht diesen Effekt.

7 Abschließende Messungen

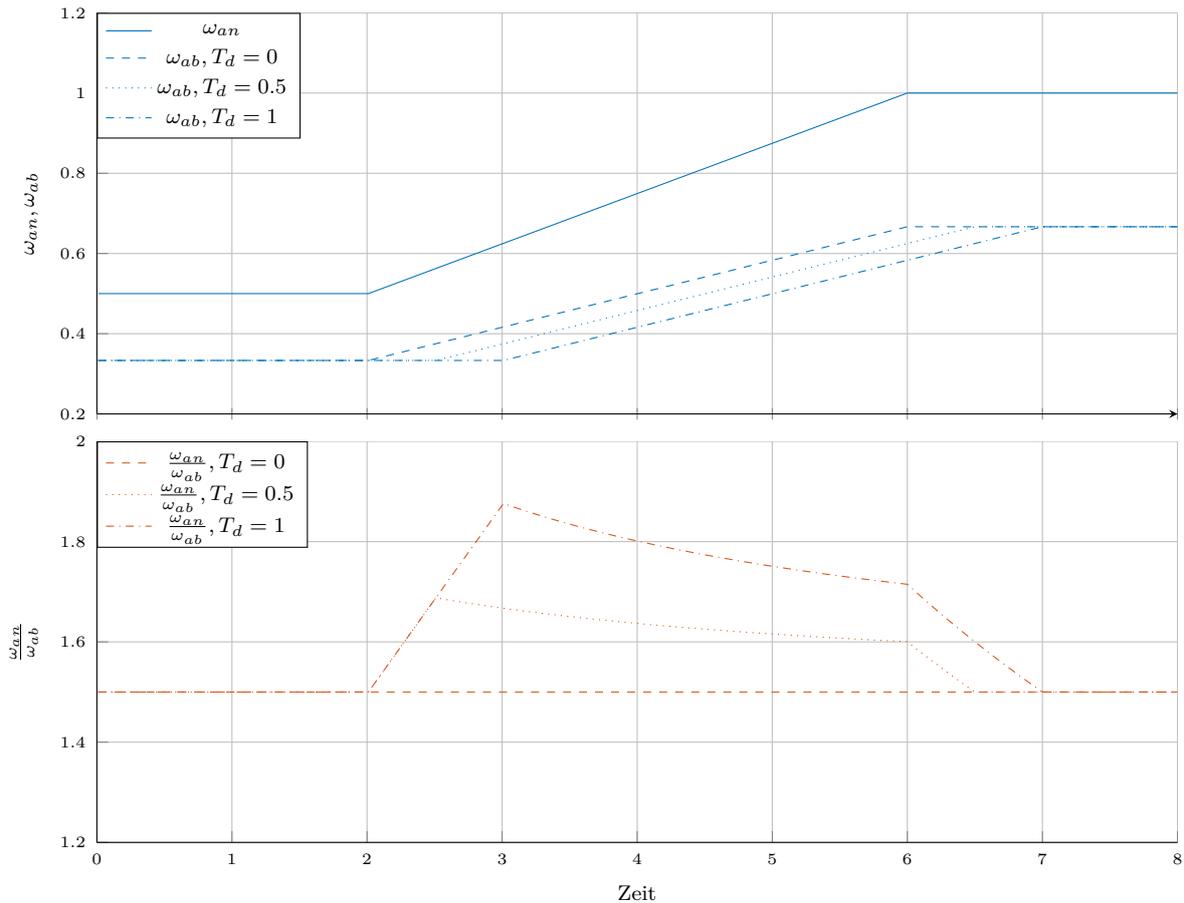


Abbildung 7.6: Auswirkung des Zeitversatzes zwischen Antriebs- und Abtriebsdrehzahl

Der obere Plot in Abbildung 7.6 zeigt symbolisch den Wert der Antriebsdrehzahl (durchgehende Linie). Im ersten Zeitabschnitt zwischen Zeiteinheit 0 und 2, bewegt sich der Antrieb mit konstanter Drehzahl. Ab Zeiteinheit 2 beschleunigt der Antrieb konstant bis zu Zeiteinheit 6, von diesem Zeitpunkt an bewegt sich der Antrieb wieder konstant. Für die Simulation wurde ein Übersetzungsfaktor $\frac{\omega_{an}}{\omega_{ab}}$ von 1,5 angenommen. Dementsprechend sind die Abtriebsdrehzahlen (geteilte Linien) mit unterschiedlichen Verzögerungen eingetragen. Im unteren Plot sind die zeitlichen Verläufe der berechneten Übersetzungswerte, zu den entsprechenden Abtriebsdrehzahlen, eingezeichnet. Man erkennt, dass der berechnete Wert ohne Verzögerung keinen Fehler aufweist. Je größer die Verzögerung der Abtriebsdrehzahl, um so größer fällt der resultierende Fehler aus. Um diesen Fehler zu vermeiden, wurde versucht dem Signal der Antriebsdrehzahl eine künstliche Verzögerung hinzuzufügen. Der Fehler wurde dadurch verringert, konnte aber nicht vollständig beseitigt werden. Ein Vorschlag um die Synchronizität zu verbessern findet sich in Abschnitt 8.

Eine weitere Fehlerquelle könnte der Abtriebssensor sein, dessen Signal die Grundlage zur Bestimmung der Abtriebsdrehzahl ist. An den Enden des Messbereiches weist

dieser leichte Nichtlinearitäten (siehe Abbildung 6.10) auf. Das äußert sich darin, dass der Arm zwar in Bewegung ist, das Signal des Sensors aber noch zu geringe Änderung aufweist. Da zu diesem Zeitpunkt der Antrieb bereits dreht, ergibt die Berechnung des Übersetzungsfaktors, bedingt durch die Fehlmessung der Armposition, einen zu hohen Wert.

Eine weitere Möglichkeit wäre, dass es sich nicht um einen Fehler, sondern tatsächlich um ein kurzes Durchrutschen des Getriebes handelt. Dies könnte durch den Ruck, also die zeitliche Ableitung der Beschleunigung, der durch die beim Anfahren verwendete Funktion entsteht, ausgelöst werden. In diesem Fall müsste diese Funktion, die in der momentanen Implementierung als Rampe ausgeführt ist, verändert werden, um ein weiches Anfahren zu ermöglichen.

7.2 Messung Energieverbrauch und Hubzeit

Um den Energieverbrauch des originalen DynamicArm mit dem, des im Laufe dieser Arbeit entstandenem Prototypen zu vergleichen, wurden ebenfalls Messungen durchgeführt. Zur Bestimmung des Energieverbrauches pro Hub, des jeweiligen Systems wurden Versuche mit verschiedenen Armlasten bei entspanntem AFB-System durchgeführt. Dabei wurde der Stromverbrauch des gesamten Systems aufgezeichnet. Der Messaufbau entspricht dem bereits in Abschnitt 6.1.2 erwähnten Aufbau. Der Ablauf der Versuche war wie folgt. Der zu vermessende Arm befindet sich zu Beginn des Versuches in der unteren Endposition. Als Eingangsgröße wird der Vorgabewert der Armgeschwindigkeit sprunghaft auf die Testgeschwindigkeit eingestellt. Von diesem Zeitpunkt an werden die Daten aufgezeichnet. Sobald der Arm die obere Endposition erreicht, ist der Versuch beendet. Die aufgezeichneten Messwerteverläufe aller Strommessungen sind im Anhang 9.2 angeführt. Eine Auflistung der, für die Versuche verwendeten, Messgeräte, befindet sich in Tabelle 7.1.

Messgerät	Type
Verstärker	Tektronix TCPA300 Amplifier, AC/DC Current Probe
Strommesszange	Tektronix TCP312 30A DC
Oszilloskop	PicoScope 4227 Pc Oscilloscope
Netzteil	TTi PL330QMD

Tabelle 7.1: Aufstellung der verwendeten Messgeräte

7.2.1 Durchführung

Beide Arme werden mit dem in Tabelle 7.1 angeführten Netzteil versorgt. Dieses wird auf 12V eingestellt, die beiden Ausgangskanäle des Netzteiles werden parallel geschaltet, so wäre ein maximaler Strom von 6A möglich. Der Messverstärker für die Strommesszange wird auf DC Kopplung und 10A/Volt eingestellt. Die Einstellung der Hubgeschwindigkeit des Prototypen erfolgt im firmeneigenen Dump Tool, dabei wird der Maximalwert der Hubgeschwindigkeit sprunghaft vorgegeben. Die Hubgeschwindigkeit des original-Armes wird durch einen sogenannten Myosimulator vorgegeben. Der Myosimulator erzeugt Signale, die im Normalfall von den Myosensoren des Armes ausgegeben werden. Die Hubgeschwindigkeit wird über ein Potentiometer am Myosimulator eingestellt. Da diese Einstellung nicht genau genug vollzogen werden kann, wird der Vergleich ausschließlich bei Maximalgeschwindigkeit durchgeführt. Der Referenzpunkt des Myosimulators ist dabei der Endanschlag des Einstellbereiches. Zum Auslösen des Hubvorganges wird der entsprechende Schalter am Myosimulator betätigt, dadurch erfolgt ebenfalls eine sprunghafte Vorgabe der Hubgeschwindigkeit.

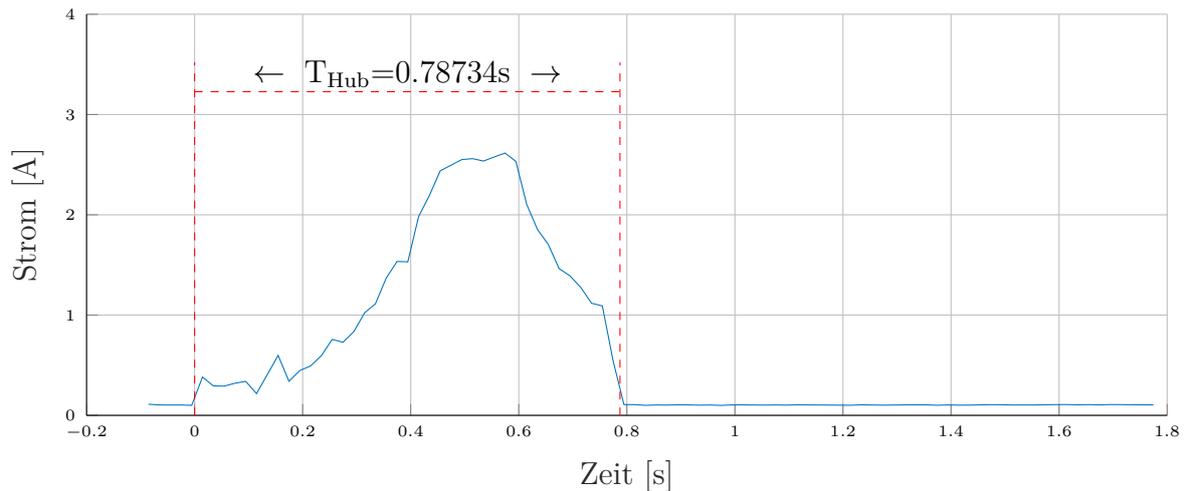


Abbildung 7.7: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung adapter, bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

7 Abschließende Messungen

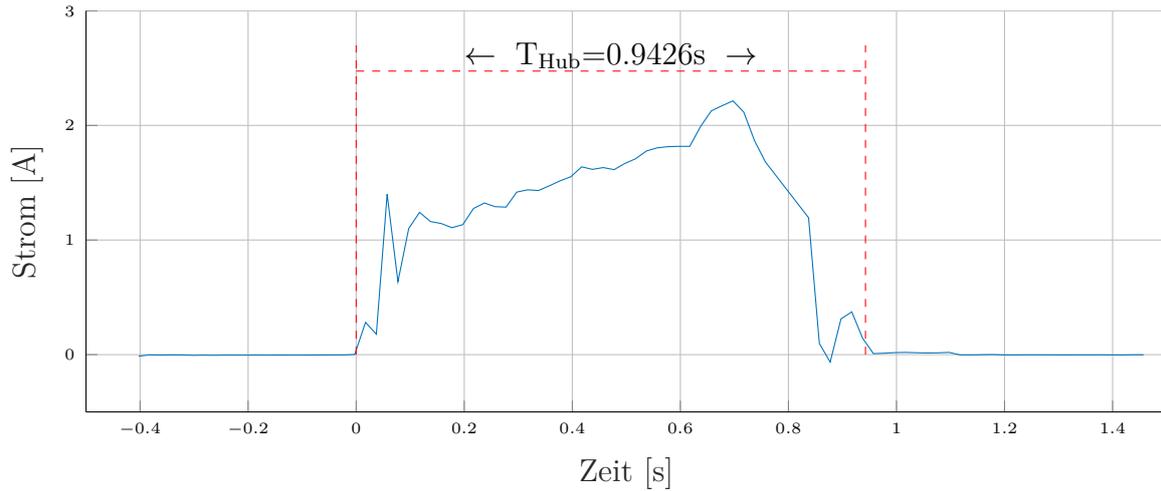


Abbildung 7.8: Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung adapter, bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

Die Abbildungen 9.38 bis 7.12 zeigen die aufgenommenen Stromverläufe beider Prothesenarme. In jedem Kurvenverlauf ist die geschätzte Hubdauer eingezeichnet. Die tatsächliche Hubdauer kann im original Arm nicht genau bestimmt werden. Darum wurde die Hubdauer für die Messungen so definiert, dass diese der Zeit entspricht, bei der der von der Prothese verbrauchte Strom über dem Wert des Leerlaufverbrauchs liegt.

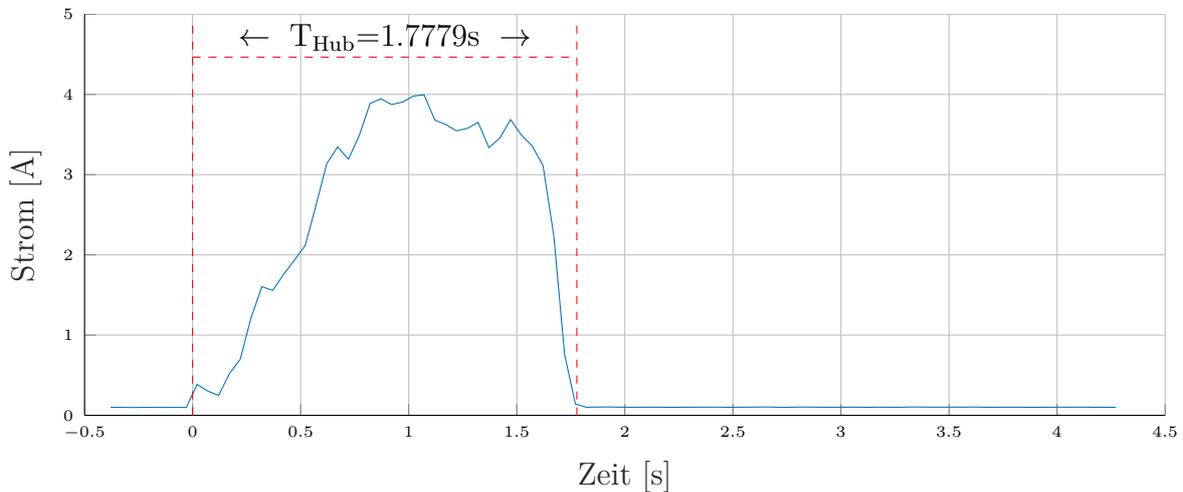


Abbildung 7.9: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

7 Abschließende Messungen

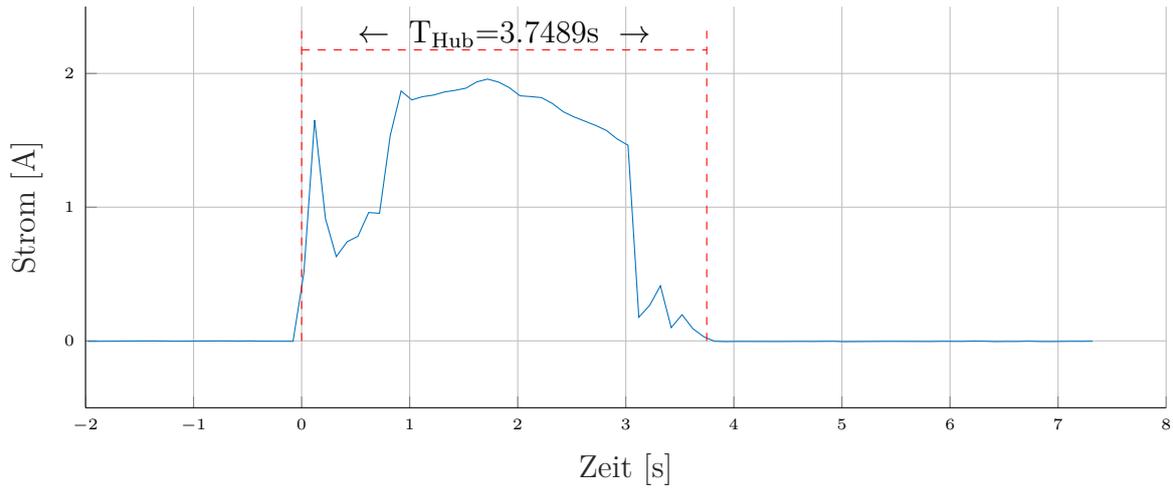


Abbildung 7.10: Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

Daraus kann, die von der Prothese aufgewendete, Energie pro Hub mittels einer Approximation (siehe Gleichung 7.1) berechnet werden. N_{Hub} entspricht der Anzahl der Abtastungen einer Messung vom Beginn des Hubvorganges bis zu dessen Ende. Δt steht für die Dauer eines Abtastintervalles. Die Spannung $u[n]$ ist konstant und beträgt 12V. Der Strom $i[n]$ entspricht den Abtastwerten des Stromes.

$$W_{Hub} = \int_0^{T_{Hub}} u(t)i(t) dx \approx \Delta t \sum_{n=0}^{N_{Hub}} u[n]i[n] \quad (7.1)$$

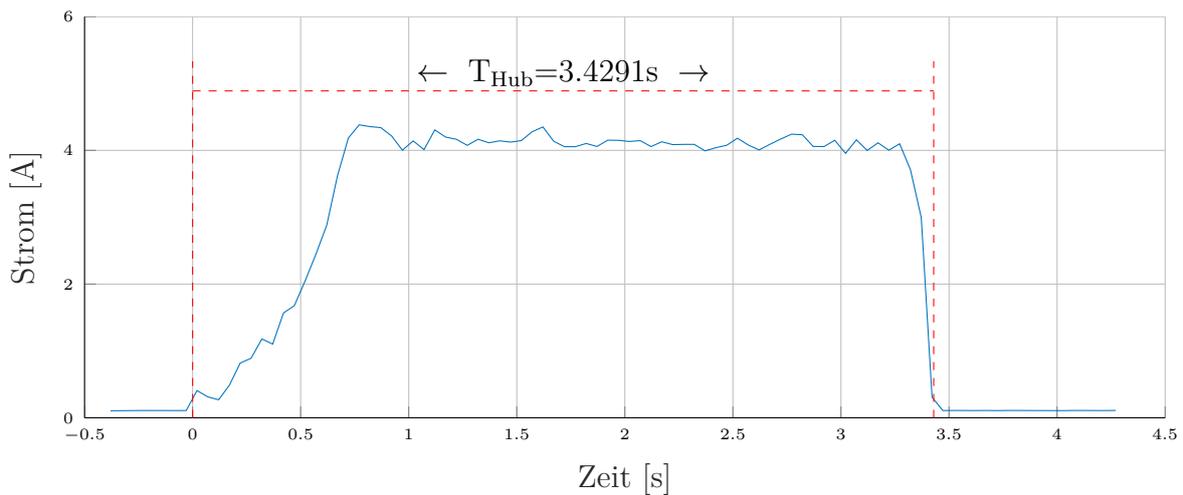


Abbildung 7.11: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 6kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

7 Abschließende Messungen

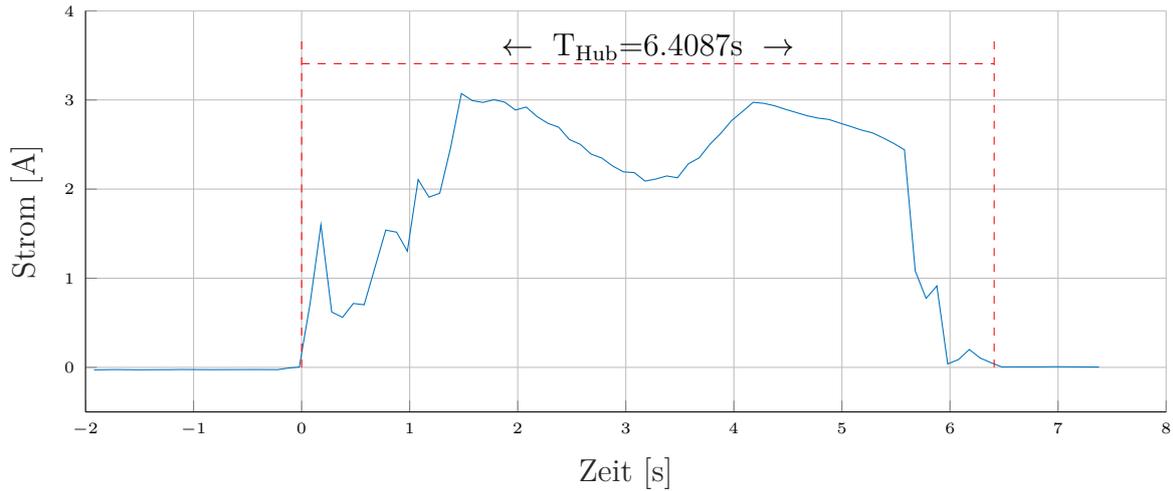


Abbildung 7.12: Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung 6kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

Abbildung 7.13 veranschaulicht die, aus den Messungen gewonnenen Daten. Die linke Seite zeigt die berechneten Werte des Energieverbrauches, in Abhängigkeit des verwendeten Hubgewichtes. Man kann erkennen, dass der Prototyp in allen Bereichen weniger Energie aufwenden muss, um die Armlast über den Hubbereich zu befördern. Die rechte Seite zeigt den Vergleich der Hubdauer. Hier sind deutlichere Unterschiede zu erkennen. Der für den Vergleich herangezogene original-Arm benötigt weitaus länger, um die Last anzuheben. Die Zahlenwerte der ermittelten Größen sind in Tabelle 7.2 angeführt. Die Hubzeitvorgabe bezieht sich dabei auf die zur Prüfung des DynamicArm vorgegebenen minimalen Hubzeiten bei maximal eingestellter Hubgeschwindigkeit.

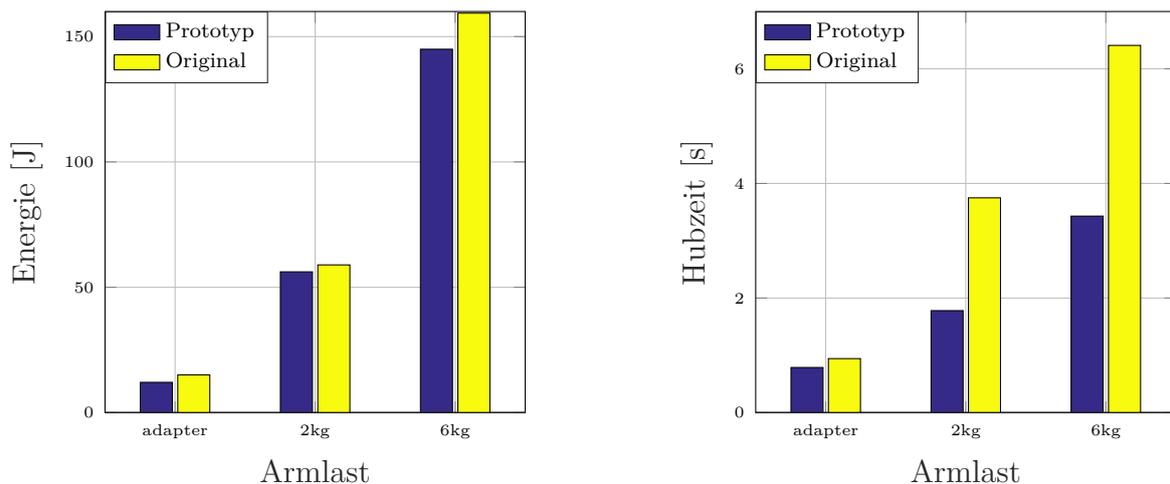


Abbildung 7.13: Vergleich Energieverbrauch und Hubzeit

Armlast	Hubzeit- vorgabe [s]	Hubzeit Prototyp [s]	Hubzeit Original [s]	Hubenergie Prototyp [J]	Hubenergie Original [J]
Adapter	0,5-1,2	0,8	0,9	12,07	15,06
2 kg	1-3,5	1,8	3,7	56,16	58,93
6 kg	2-9,5	3,4	6,4	144,96	159,35

Tabelle 7.2: Vergleichswerte (Hubzeitvorgabe stand 05.07.2016)

7.2.2 Diskussion

Wie die Werte der gemessenen Hubzeiten in Tabelle 7.2 zeigen, konnten die vorgegebenen Hubzeiten eingehalten werden. Der Vergleich der Resultate deutet darauf hin, dass der Prototyp, in der aktuellen Konfiguration, günstigere Eigenschaften als die Vergleichsprothese aufweist. Der Prototyp wendet in vergleichbaren Situationen weniger Energie auf um Lasten zu heben. Außerdem kann er die gleiche Last mit deutlich höherer Geschwindigkeit anheben. Es ist nicht klar, ob der alternative Verstellalgorithmus die positiven Eigenschaften des Prototypen hervorruft. Teilweise lässt sich der verringerte Energieaufwand des Prototypen durch die länger andauernde Aktivierung des Hubmotors des Vergleichsarmes erklären. Durch diese summieren sich die Verluste über einen längeren Zeitraum. Deshalb muss der original-Arm mehr Energie aufwenden. Die höhere Geschwindigkeit des Prototypen kann durch verschiedene andere Umstände zustande kommen. Einerseits sind unterschiedliche Motoren verbaut, andererseits handelt es sich beim Vergleichsarm, es stand kein neuer Arm zur Verfügung, um einen Versuchsarm für Dauertests. Das dort verbaute Getriebe könnte bereits stark gealtert sein. Obwohl die Resultate der Messungen vielversprechend aussehen, lassen sich aus diesem Vergleich noch keine allgemein gültigen Aussagen treffen. Es gibt verschiedene Faktoren, die das Ergebnis beeinflussen. Ein nicht zu unterschätzender Einfluss ist das Variogetriebe selbst. Abweichungen bei der Produktion des Getriebes beeinflussen dessen Charakteristik. Getriebe aus verschiedenen Chargen können unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Darum müsste, für einen statistisch relevanten Vergleich, eine Reihe von Versuchen mit unterschiedlichen Getrieben durchgeführt werden.

8 Conclusio und Ausblick

Diese Arbeit befasste sich zum Einen mit der Entwicklung eines verteilten Steuerungssystems für eine Ellenbogenprothese, basierend auf dem echtzeitfähigen AXON-Bus[®] und zum Anderen mit der Entwicklung eines alternativen, automatischen Verstellalgorithmus für ein stufenlos einstellbares Reibgetriebe. Es war möglich die Funktionalität des original DynamicArm mit einem System aus AXON-Bus[®]-Knoten zu gewährleisten. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind vielversprechend. Die zu Grunde liegende Ablaufsteuerung wurde als Deterministischer Endlicher Automat implementiert und wird zentral in einem Knoten ausgeführt, welcher über das verteilte Interface File System die Steuerung der restlichen Knoten übernimmt.

Mit diesem Rahmenwerk war es möglich, die nötigen Messabläufe zur Charakterisierung des Variogetriebes zu implementieren und durchzuführen. Auf Basis der so gewonnenen Daten konnte der alternative Verstellalgorithmus für das Getriebe entwickelt werden. Ebenso konnte mit Hilfe der durchgeführten Hubtests gezeigt werden, dass die automatische Getriebeverstellung, basierend auf der Messung des Getriebeübersetzungsfaktors, prinzipiell funktioniert und die gewünschten Eigenschaften aufweist. Dennoch wurden verschiedene Einschränkungen in der aktuellen Implementierung und durch die verwendete Hardware identifiziert. Im Anschluss werden diese Einschränkungen angeführt und Vorschläge für zukünftige Arbeiten zur Verbesserung der im Laufe dieser Arbeit entstandenen automatischen Getriebeverstellung gemacht. Zusätzlich wurde ein Vergleich zwischen dem Energieverbrauch des entstandenen Prototypen und einem originalen DynamicArm durchgeführt. Dieser Vergleich gibt Hinweise darauf, dass der Energiebedarf des Prototypen in der gegenwärtigen Konfiguration, gegenüber dem Energiebedarf des original DynamicArm reduziert ist.

8.1 Vorschläge zur Verbesserung der Übersetzungsmessung

8.1.1 Änderung der bestehenden Sensorik

Die Anbringung des Abtriebswinkelsensors am Ende der Getriebestufe führt dazu, dass bei der gegebenen Auflösung des aktuellen Sensors bei geringen Abtriebsdrehzahlen nur

kleine Änderungen des Positionssignals pro Zeiteinheit entstehen. Um trotzdem ein Drehzahlsignal zu generieren, wurde wie in Abschnitt 5.2.2 eine Verzögerungsleitung eingesetzt, um die Änderung des Winkelsignales aufzusummieren. Das Problem dabei ist die dadurch entstehende Verzögerung des Drehzahlsignals, wodurch Änderungen der gemessenen Übersetzung ebenfalls verspätet erkannt werden. Bei der Auslegung der Länge der Verzögerungsleitung entsteht ein Tradeoff zwischen der minimal detektierbaren Abtriebsdrehzahl und der Länge der Verzögerungsleitung. Um eine größere Änderung des gemessenen Abtriebswinkels pro Zeiteinheit zu erhalten und dadurch die Verzögerung so gering wie möglich zu halten, ist es daher sinnvoll, dass der Sensor für den Abtriebswinkel im besten Fall zwischen Variogetriebe und den beiden Planetengetriebestufen untergebracht wird. Der tatsächliche Abtriebswinkel am Ende der Getriebestufe könnte damit trotzdem mittels Multiplikation mit den fixen Übersetzungsfaktoren der Planetenstufen berechnet werden, um so die Position der beiden Endanschlänge zu ermitteln.

Als Alternative für den aktuell eingesetzten magnetischen Abtriebswinkelsensor wird vorgeschlagen die Möglichkeit der Verwendung eines optischen Sensors zu überprüfen. Im Laufe der Recherche wurde ein hoch integrierter optischer Encoder-Baustein der Firma Avago Technologies, mit der Bezeichnung AEDR-850X, gefunden. Dieser Sensor integriert die Lichtquelle und den optischen Photo-Detektor in einem Gehäuse mit den Abmessungen 3,95mm x 3,4mm x 0,96mm, mit einer Auflösung von bis zu 304 Linien pro Inch und auswählbaren Interpolationsfaktoren, siehe [4].

8.1.2 Verbesserte Synchronisierung zwischen den Signalen der Antriebs- und Abtriebsdrehzahl

Betreffend des in Abschnitt 7.1 beschriebenen Fehlers der Übersetzungsbestimmung ist zu vermuten, dass der Fehler größtenteils durch die Asynchronizität zwischen dem Wert der Motordrehzahl und der Abtriebsdrehzahl entsteht. Das Signal der Abtriebsdrehzahl erfährt durch die Art seiner Ermittlung eine gewisse Verzögerung. Um diesen Effekt auszugleichen, wurde im Laufe der Arbeit versucht dem Signal der Motordrehzahl ebenfalls eine gewisse fixe Verzögerungszeit hinzuzufügen. Diese Maßnahme verringerte zwar den auftretenden Fehler, dennoch konnte er nicht vollständig beseitigt werden. Die Vermutung liegt nahe, dass die Ursache in der Ermittlung der Messwerte liegt. Die Motordrehzahl wird synchron zu den Hallimpulsen des BLDC-Motors ermittelt. Die Periode der Hallimpulse wird durch die variable Drehzahl des Motors bestimmt. Wohingegen die Abtriebsdrehzahl zeitlich äquidistant bestimmt wird. Um die Aufnahme der jeweiligen Samples besser synchronisieren zu können, wird vorgeschlagen, dass beide Werte im selben Knoten eingelesen werden. Dazu müsste an der Hardware des Motorknoten

ein Eingang für den Abtriebswinkelsensor geschaffen werden. In weiterer Folge wäre es sinnvoll, die Ablaufsteuerung, falls möglich, ebenfalls im Motorknoten unterzubringen.

8.1.3 Automatische Messbereichumschaltung bei der Bestimmung der Abtriebsdrehzahl

Ein Problem der aktuellen Implementierung der Abtriebsdrehzahlmessung sind niedrige Drehzahlen, bei denen nur eine geringe Änderung des Wertes des Abtriebswinkelsensors pro Zeiteinheit auftritt. Um dieses Problem zu umgehen, wäre eine Verlängerung der in Abschnitt 5.2.2 erwähnten Verzögerungsleitung und eine Anpassung der Skalierung des Ausgangssignales notwendig. Die Maßnahme würde jedoch zu einer größeren Verzögerung des ermittelten Drehzahlsignals und dem daraus bestimmten Übersetzungswert führen, womit das Getriebe verspätet gestellt wird. Die Auswirkungen der verspäteten Getriebeeinstellung bei niedrigen Motor- und Abtriebsdrehzahlen sind geringer als bei höheren Drehzahlen, weil die Laständerung am Abtrieb des Getriebes ebenfalls langsamer stattfindet. Das bedeutet, dass die Verzögerungsleitung bei hoher Drehzahl kürzer sein müsste. Um dem Problem entgegenzuwirken, könnte eine automatische Messbereichumschaltung, abhängig von der aktuellen Motordrehzahl und der aktuellen Getriebeeinstellung, in Betracht gezogen werden. Die Länge der Verzögerungsleitung würde, je nach Messbereich, variieren. Die Synchronisierung zwischen Antriebsdrehzahl- und Abtriebsdrehzahlsignal müsste in diesem Fall ebenfalls an den Messbereich angepasst werden. Außerdem müssten die, zur Getriebeverstellung verwendeten Werte der Schaltschwelle im jeweiligen Bereich, an den Messbereich angepasst werden.

8.2 Vorschlag zur Verbesserung der Motorstrom basierten Getriebeverstellung

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, basiert die automatische Getriebeverstellung des originalen DynamicArm auf einer Messung des Motorstroms. Dabei wird einmalig eine so genannte Rutschkurve kalibriert. Diese Kurve besteht aus den Maximalwerten des Motorstroms über den verschiedenen Getriebestellungen, bei denen das Getriebe durchrutscht. Das Getriebe wird kurz vor dem Erreichen des jeweiligen Motorstroms weitergestellt. Verändert sich die Rutschkurve des Getriebes im Laufe der Zeit, so passt die kalibrierte Kurve nicht mehr zur tatsächlichen Charakteristik des Getriebes. Um dieses Problem zu umgehen, wird empfohlen die Möglichkeit zu untersuchen, die kalibrierte Rutschkurve automatisch an den Zustand des Getriebes anzupassen. Um solch eine Anpassung im Laufe des Betriebes der Prothese durchführen zu können, ist die zusätzliche Implementierung einer Rutscherkennung notwendig. Dies könnte durch eine

kombinierte Übersetzungs- und Motorstrommessung erreicht werden. Wie in Abbildung 6.12 aus Abschnitt 6.1.4 ersichtlich ist, stagniert der Motorstrom bei durchrutschen dem Getriebe, während die gemessene Übersetzung steil ansteigt. Dies verursacht einen starken Anstieg $\frac{\Delta\text{Übersetzungswert}}{\Delta\text{Motorstrom}}$, der über dem Motorstrom eingezeichneten Übersetzung, welcher meiner Meinung nach als hervorragendes Feature zur Erkennung der Getriebeüberlastung geeignet ist. Aus der Kenntnis der aktuellen Getriebeeinstellung und des, mittels Rutscherkennung bestimmten maximalen Motorstromes kann das Update der Stromrutschkurve durchgeführt werden. Der jeweilige Eintrag in der Rutschkurve wird durch den neuen Motorstrom ersetzt. Mittels der aktualisierten Rutschkurve würde eine erneute Überlastung im jeweiligen Betriebsbereich verhindert werden. Somit könnte die Lebensdauer des Getriebes erhöht werden, beziehungsweise anfallende Serviceintervalle zur Neukalibrierung der Rutschkurve verlängert werden.

8.3 Vorschlag Prüfstand zur genaueren Charakterisierung des Variogetriebes und der Getriebeverstellung

Aus den in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Messungen konnten wichtige Erkenntnisse zur Entwicklung der automatischen Getriebeverstellung gezogen werden. Dennoch sind diese Daten nicht repräsentativ für alle gebauten Variogetriebe. Um allgemeinere Aussagen treffen zu können, müsste eine größere Anzahl an Getrieben aus verschiedenen Chargen vermessen werden. Diese Messungen sind nur mit einem geeigneten Prüfstand effizient durchführbar. Der weniger stark beschränkte Bauraum eines Prüfstandes ermöglicht die Verwendung besserer Sensoren, um so die Qualität der Messdaten zu steigern. Zusätzlich könnten verschiedene Testfälle entwickelt werden, um den automatischen Verstellalgorithmus eingehender zu testen und dessen Parameter genauer abzustimmen. Auch Untersuchungen zu, durch Alterungserscheinungen hervorgerufener, Veränderungen der Getriebecharakteristik, in Kombination mit Dauertests könnten mit Hilfe solch eines Prüfstandes durchgeführt werden.

9 Anhang

9.1 Hubtests

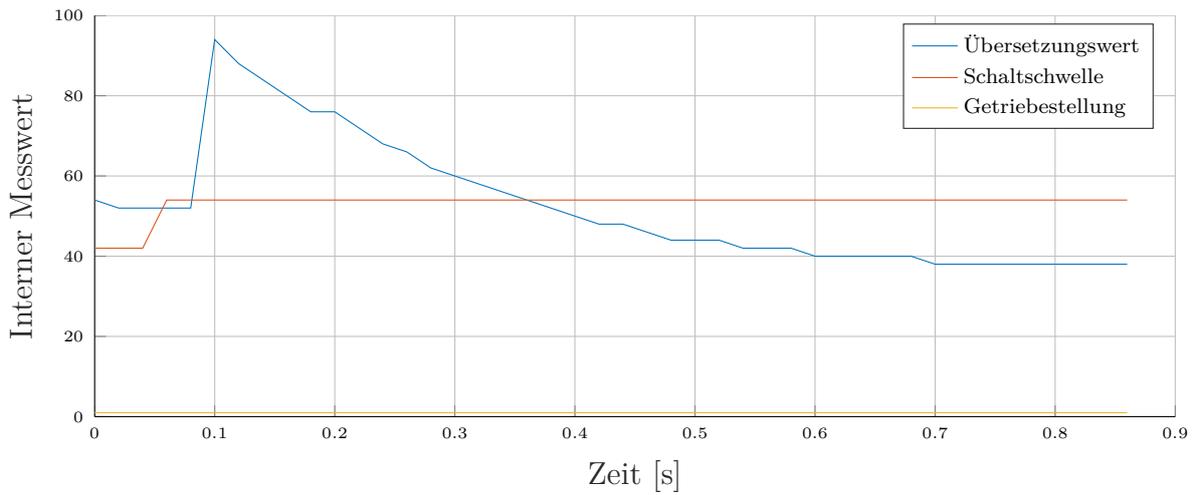


Abbildung 9.1: Hubtest: AFB eingestellt, Belastung adapter bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

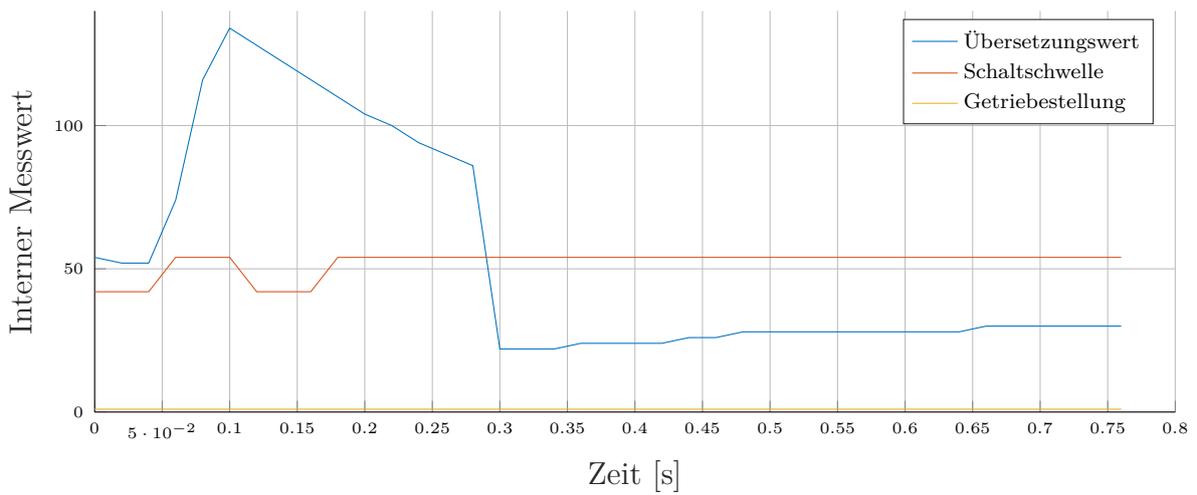


Abbildung 9.2: Hubtest AFB eingestellt, Belastung adapter bei 55% Maximalgeschwindigkeit

9 Anhang

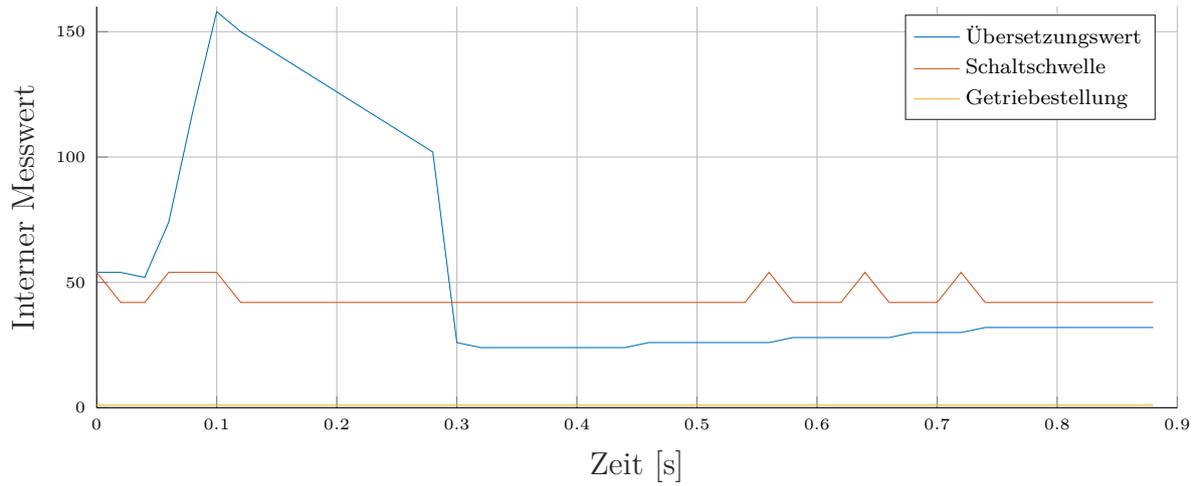


Abbildung 9.3: Hubtest AFB eingestellt, Belastung adapter bei 100% Maximalgeschwindigkeit

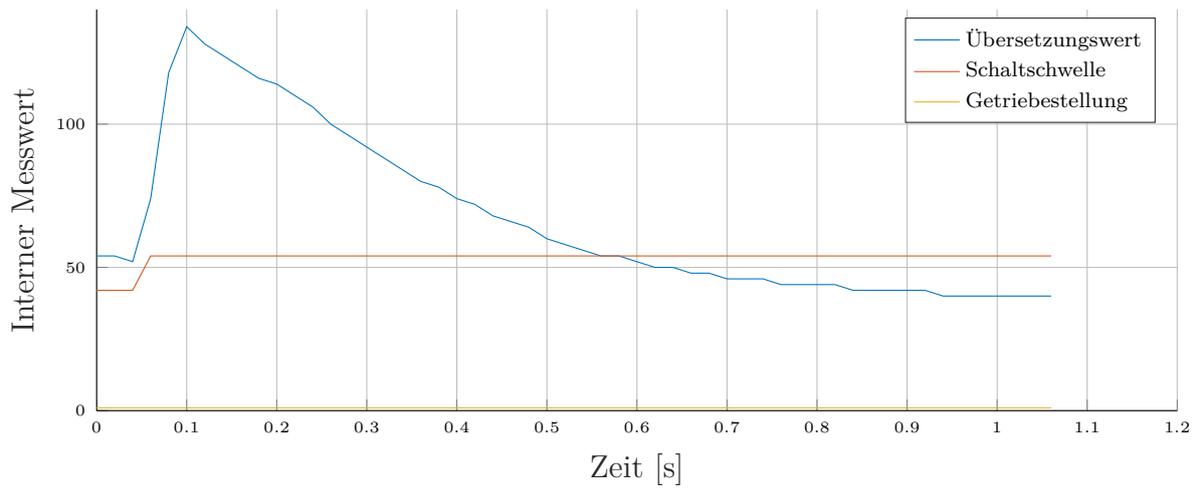


Abbildung 9.4: Hubtest AFB entspannt, Belastung adapter bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

9 Anhang

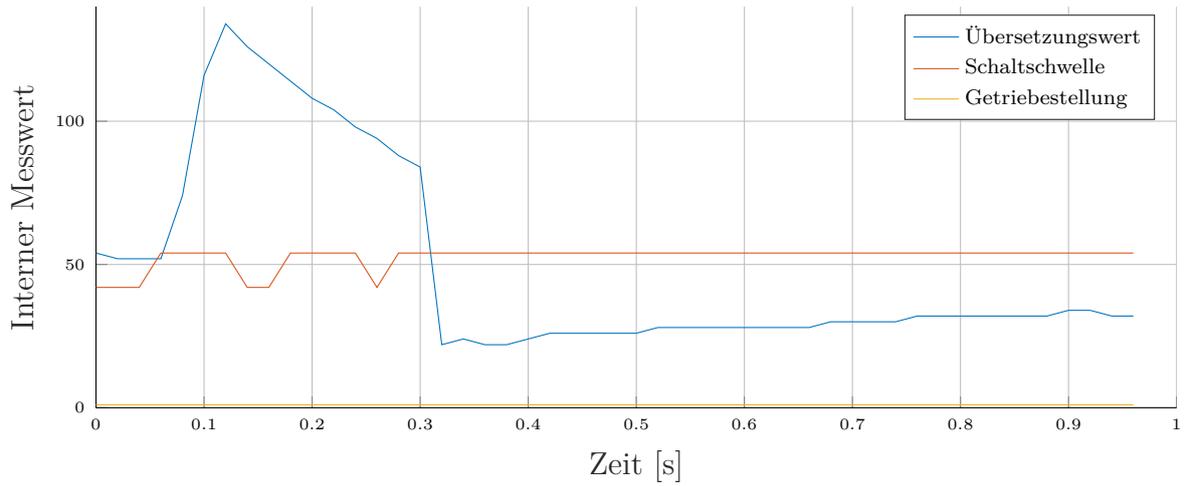


Abbildung 9.5: Hubtest AFB entspannt, Belastung adapter bei 55% der Maximalgeschwindigkeit

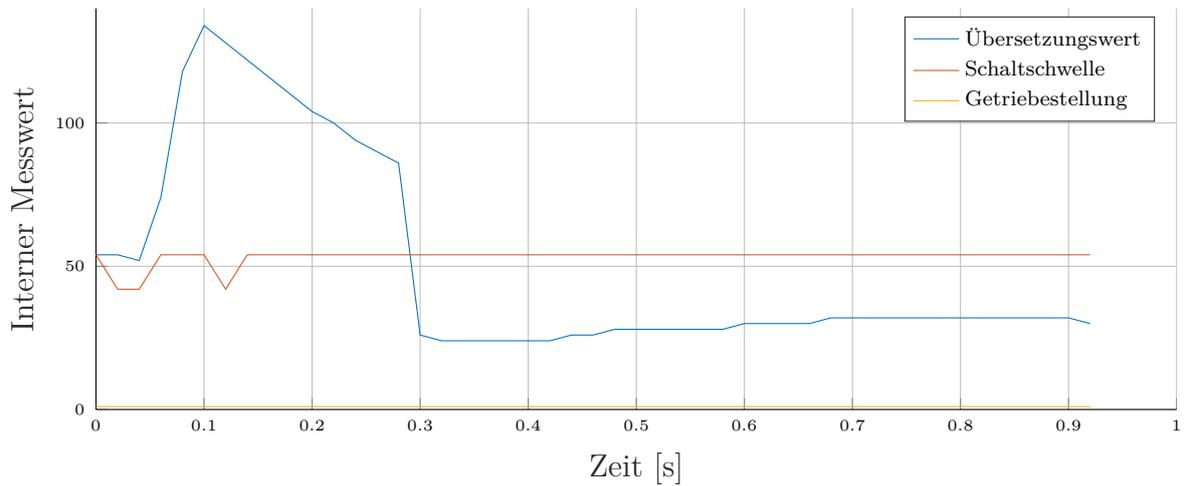


Abbildung 9.6: Hubtest AFB entspannt, Belastung adapter bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

9 Anhang

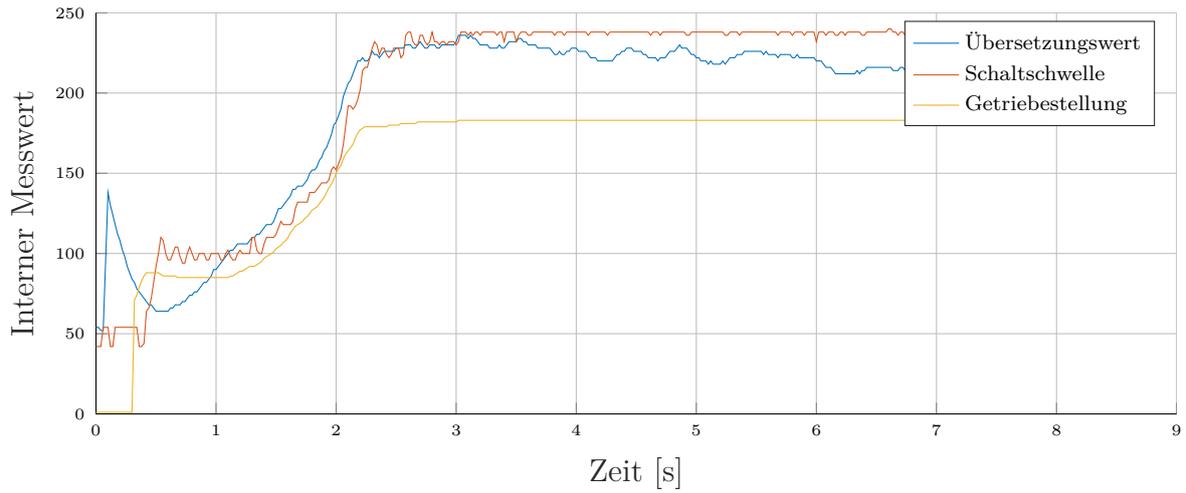


Abbildung 9.7: Hubtest: AFB eingestellt, Belastung 2kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

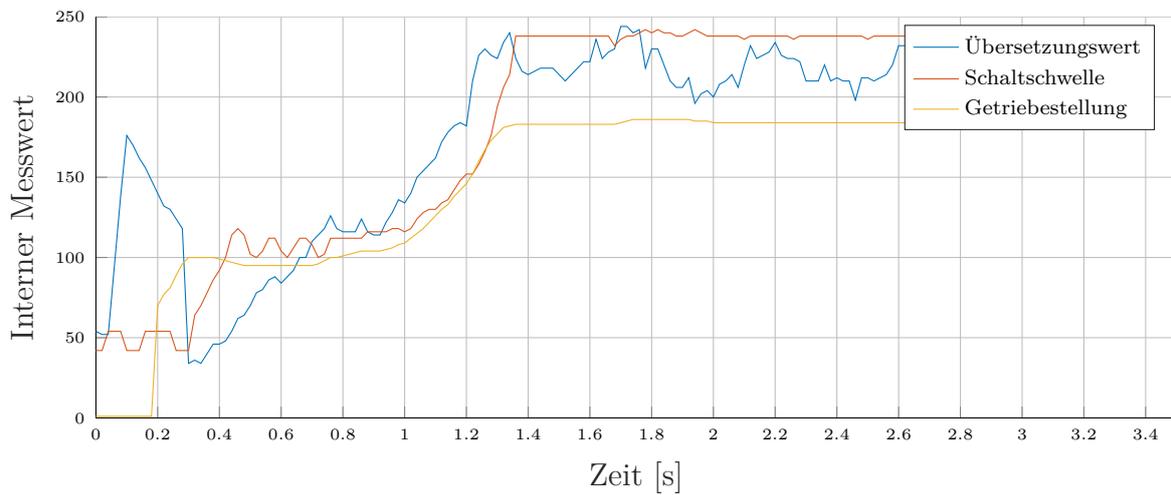


Abbildung 9.8: Hubtest AFB eingestellt, Belastung 2kg bei 55% Maximalgeschwindigkeit

9 Anhang

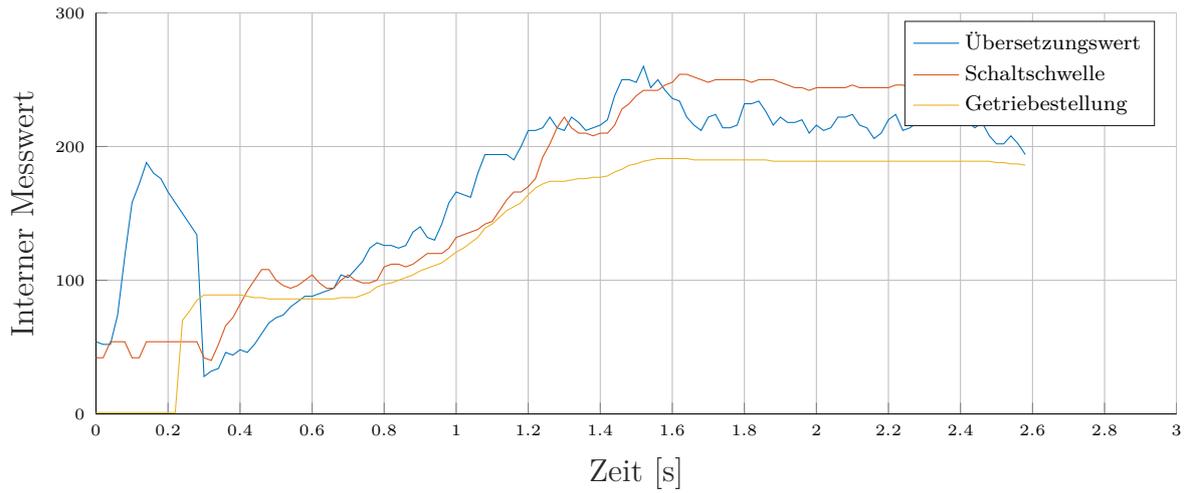


Abbildung 9.9: Hubtest AFB eingestellt, Belastung 2kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit

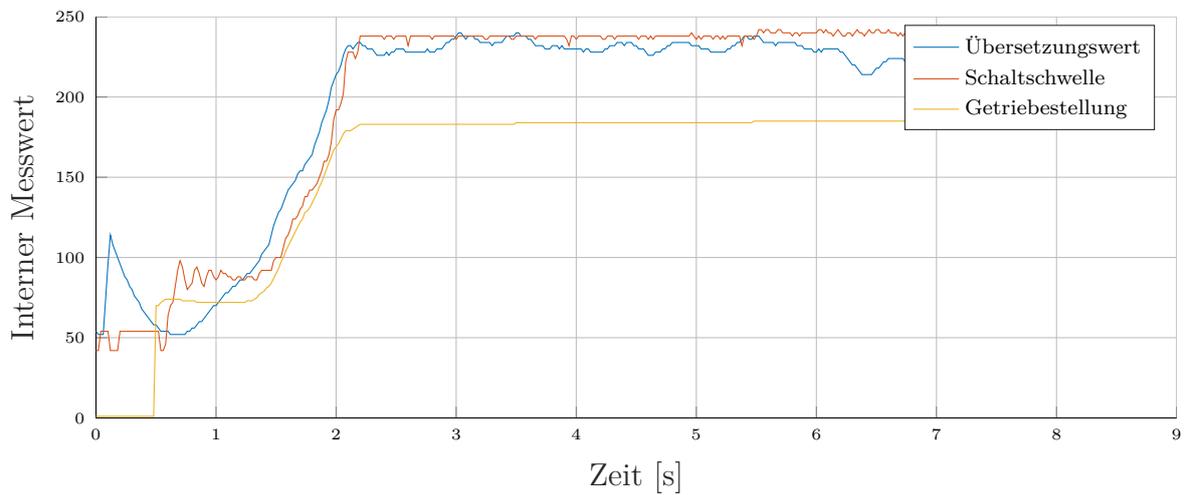


Abbildung 9.10: Hubtest AFB entspannt, Belastung 2kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

9 Anhang

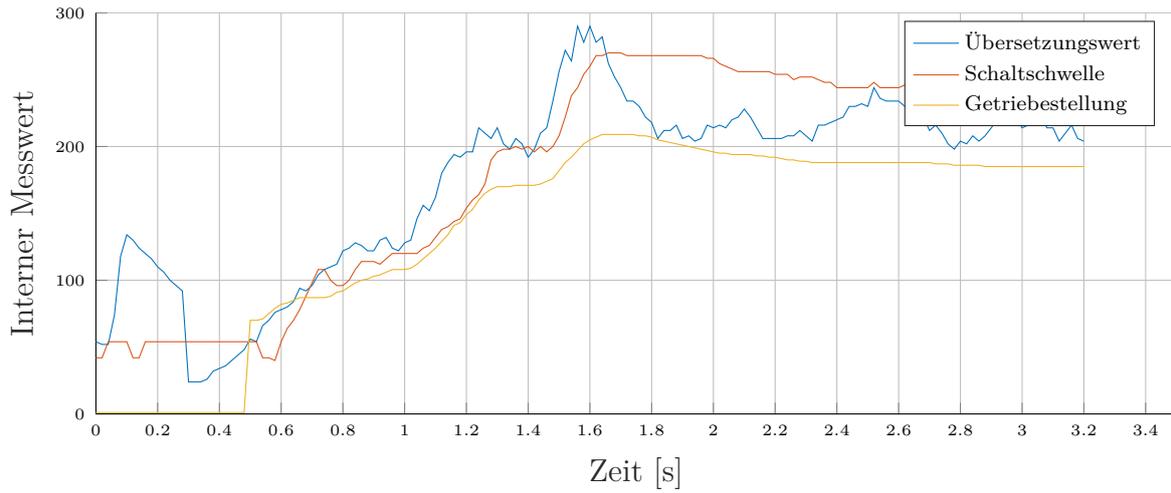


Abbildung 9.11: Hubtest AFB entspannt, Belastung 2kg bei 55% der Maximalgeschwindigkeit

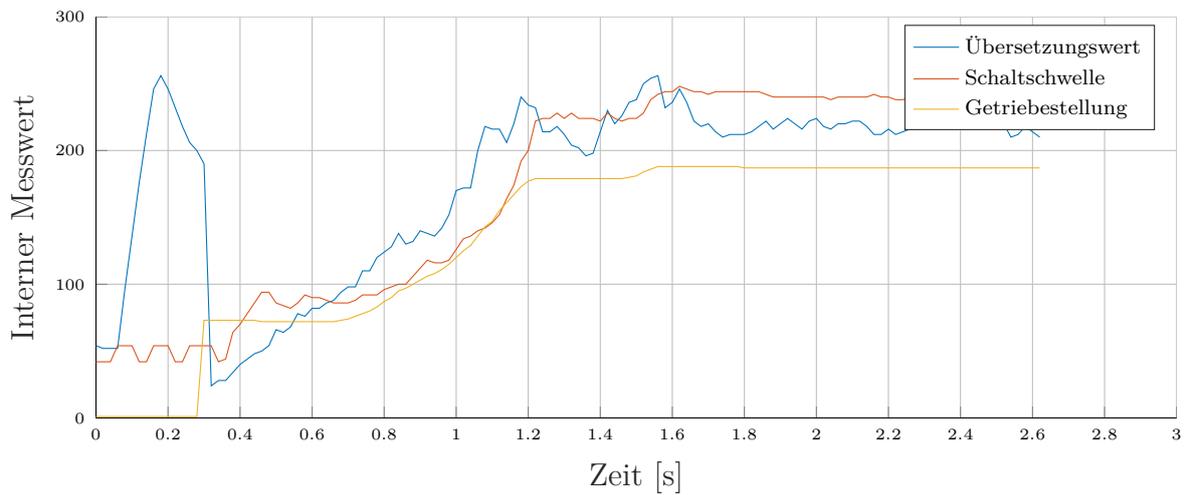


Abbildung 9.12: Hubtest AFB entspannt, Belastung 2kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

9 Anhang

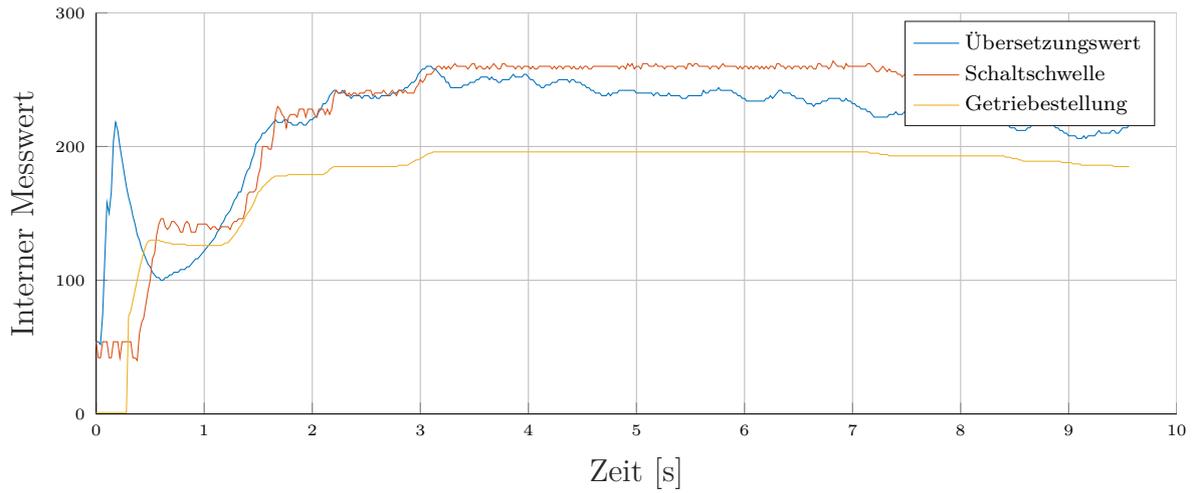


Abbildung 9.13: Hubtest: AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

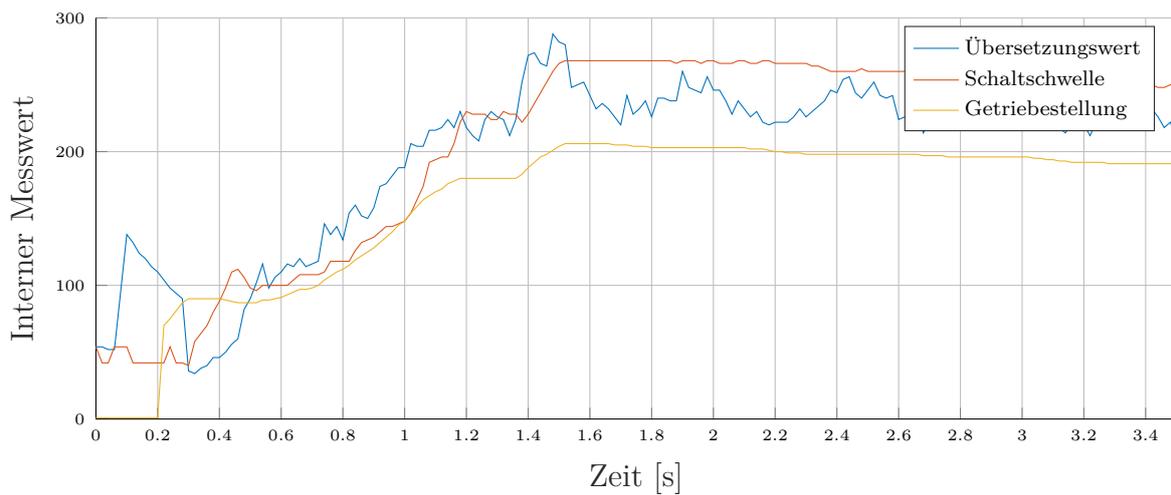


Abbildung 9.14: Hubtest AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 55% Maximalgeschwindigkeit

9 Anhang

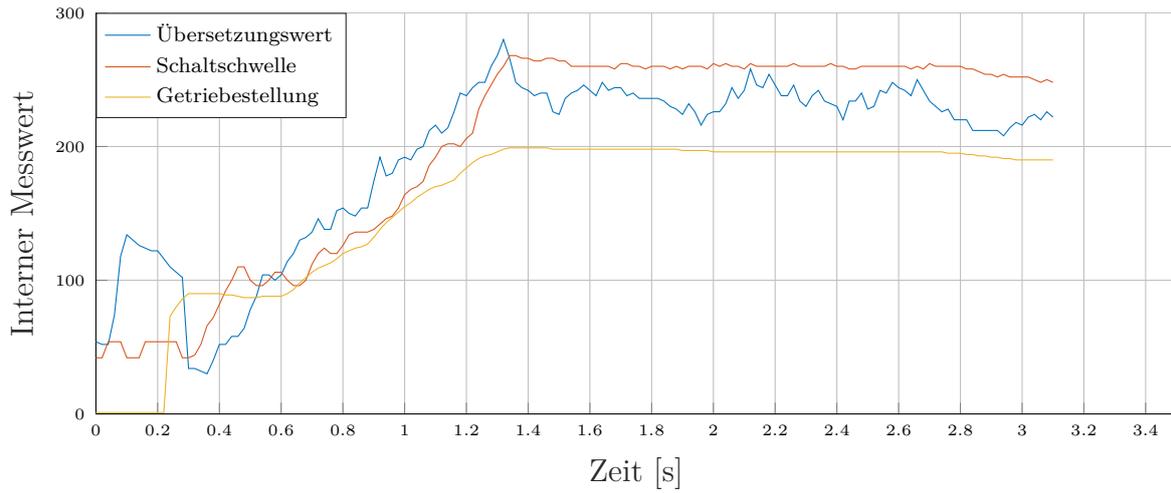


Abbildung 9.15: Hubtest AFB eingestellt, Belastung 3kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit

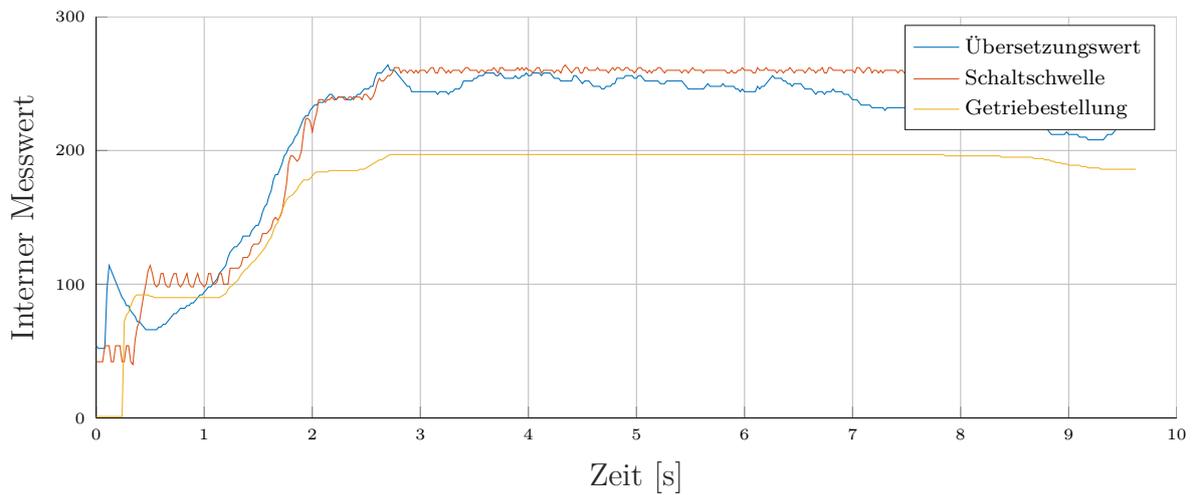


Abbildung 9.16: Hubtest AFB entspannt, Belastung 3kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

9 Anhang

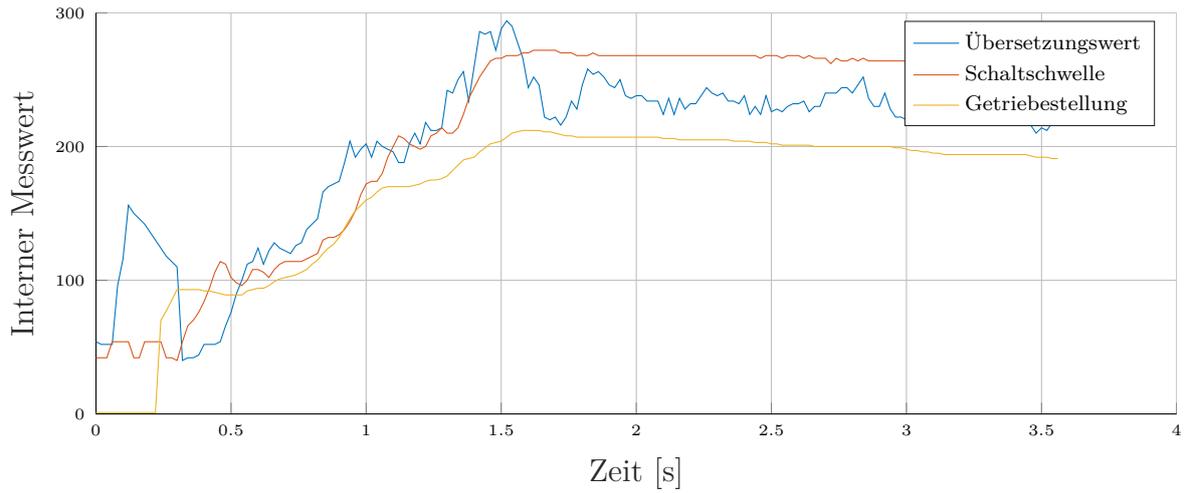


Abbildung 9.17: Hubtest AFB entspannt, Belastung 3kg bei 55% der Maximalgeschwindigkeit

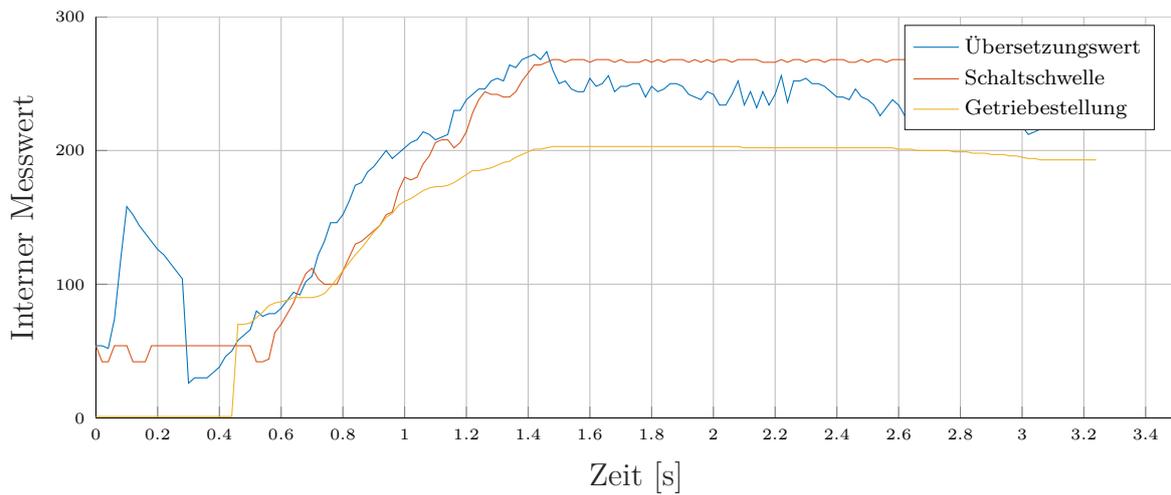


Abbildung 9.18: Hubtest AFB entspannt, Belastung 3kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

9 Anhang

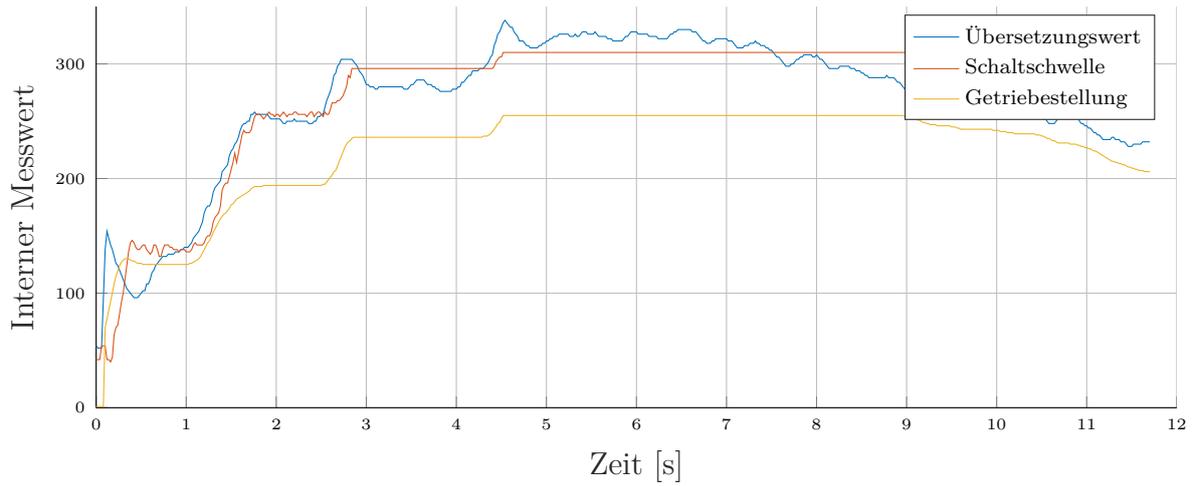


Abbildung 9.19: Hubtest: AFB eingestellt, Belastung 6kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

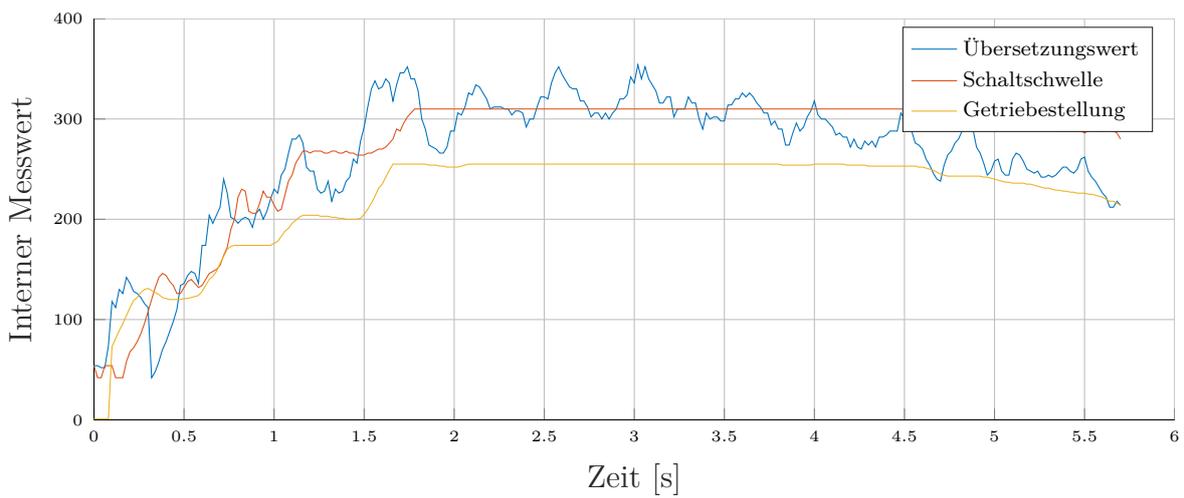


Abbildung 9.20: Hubtest AFB eingestellt, Belastung 6kg bei 55% Maximalgeschwindigkeit

9 Anhang

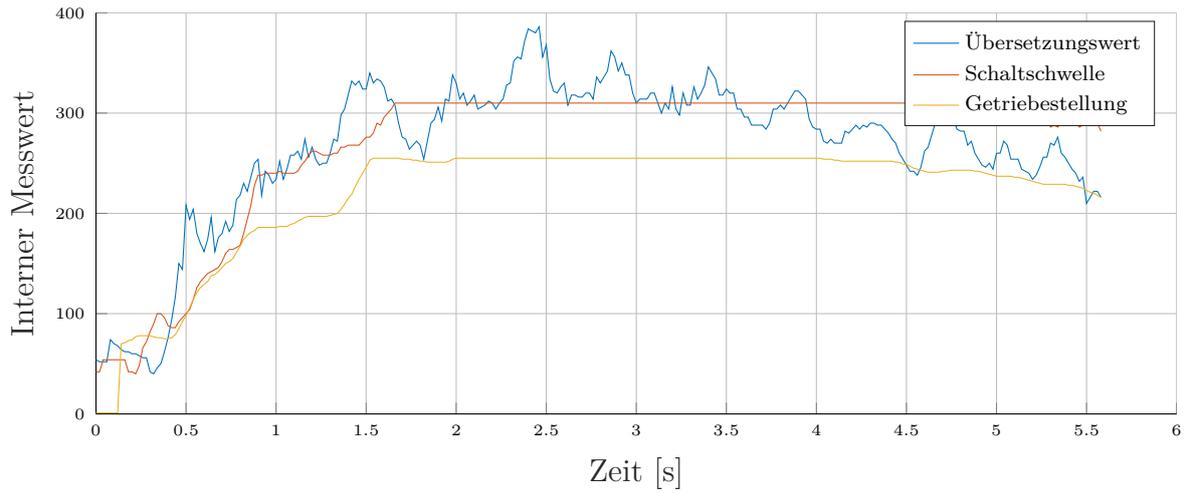


Abbildung 9.21: Hubtest AFB eingestellt, Belastung 6kg bei 100% Maximalgeschwindigkeit

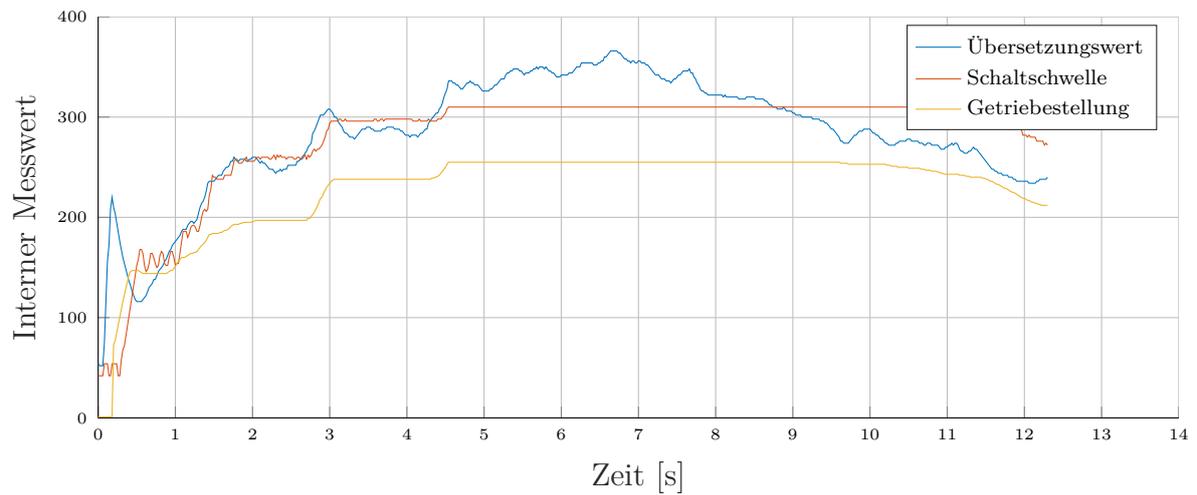


Abbildung 9.22: Hubtest AFB entspannt, Belastung 6kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

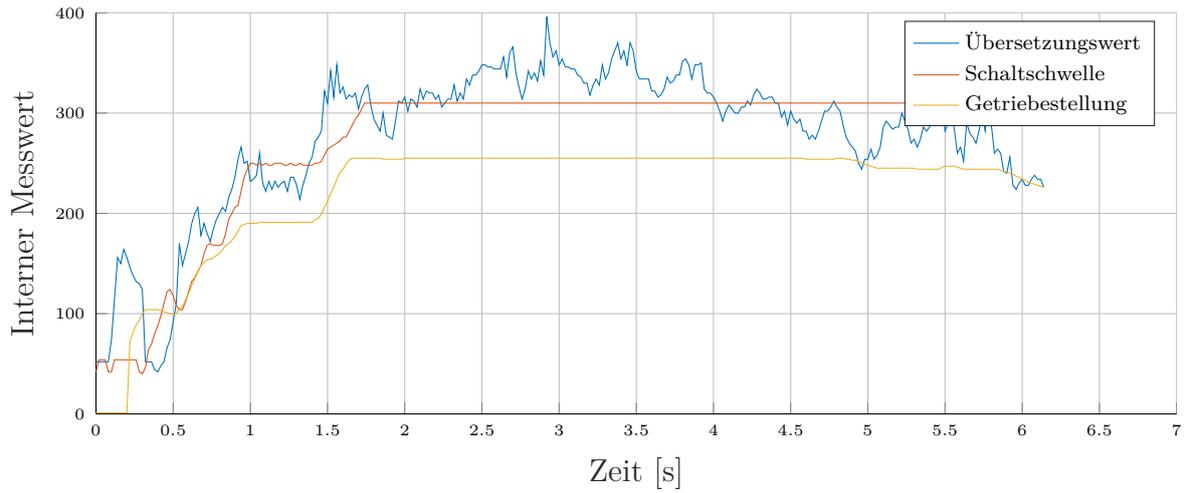


Abbildung 9.23: Hubtest AFB entspannt, Belastung 6kg bei 55% der Maximalgeschwindigkeit

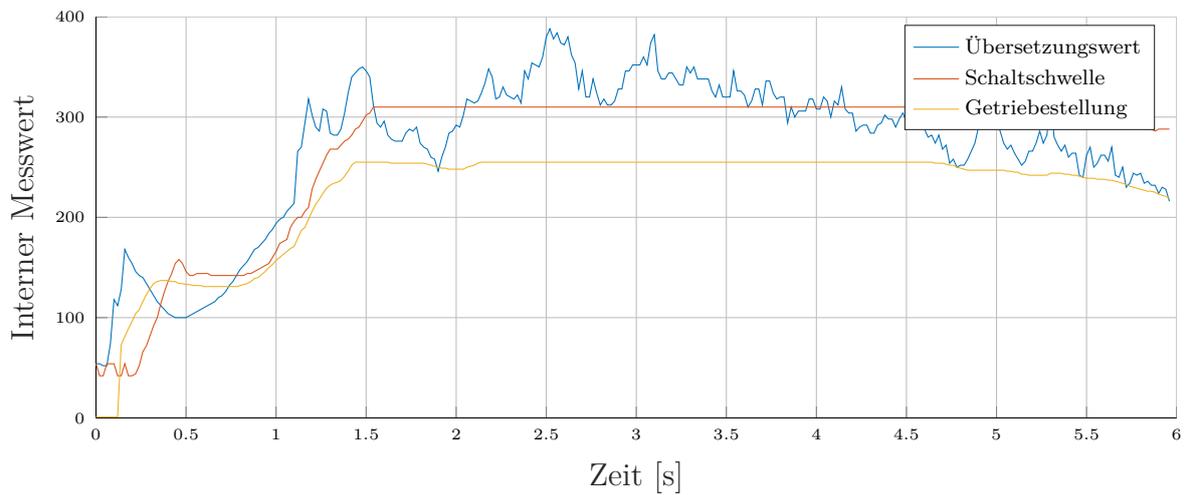


Abbildung 9.24: Hubtest AFB entspannt, Belastung 6kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

9.2 Strommessung

9 Anhang

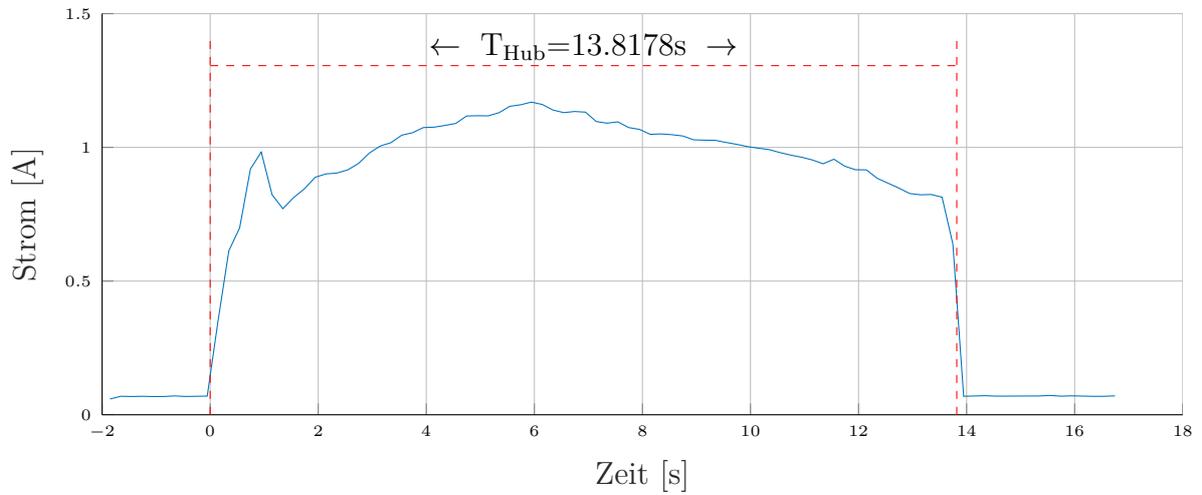


Abbildung 9.25: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 2% der Maximalgeschwindigkeit

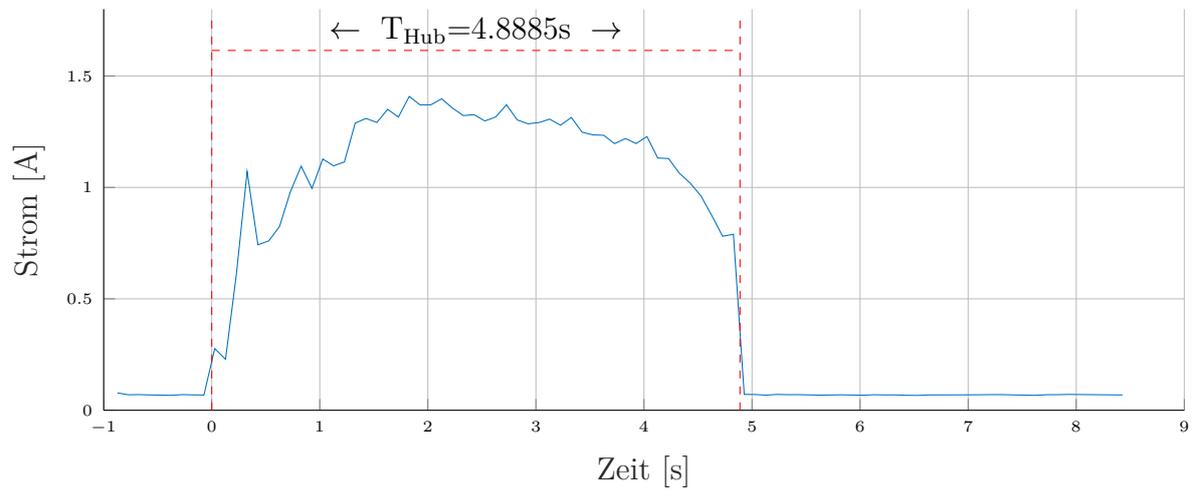


Abbildung 9.26: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

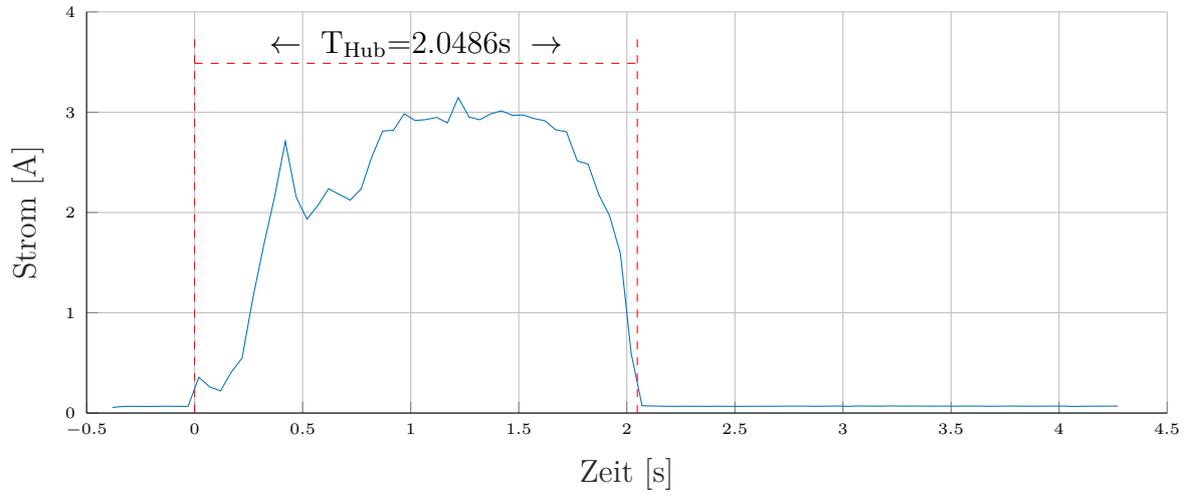


Abbildung 9.27: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 55% der Maximalgeschwindigkeit

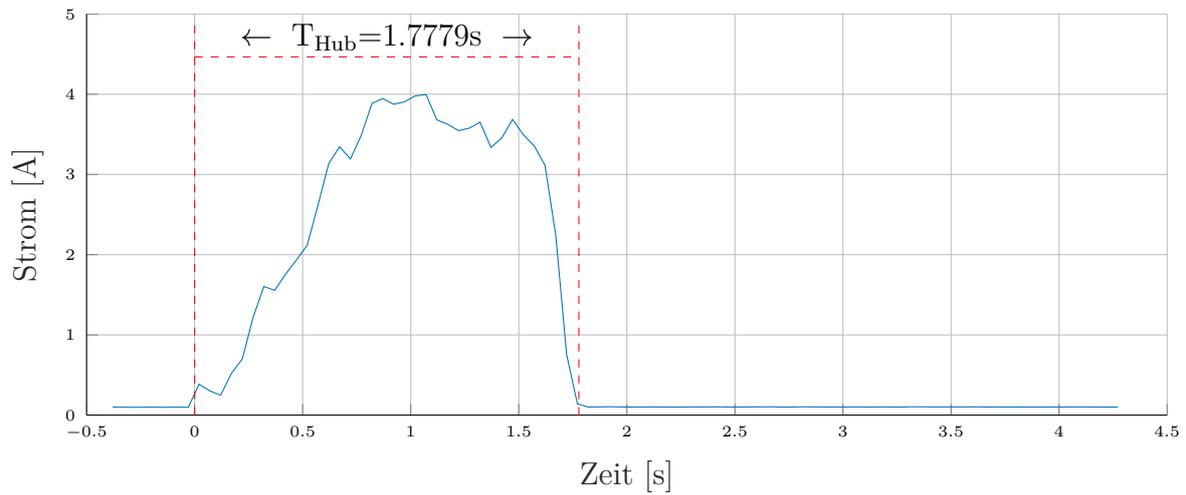


Abbildung 9.28: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

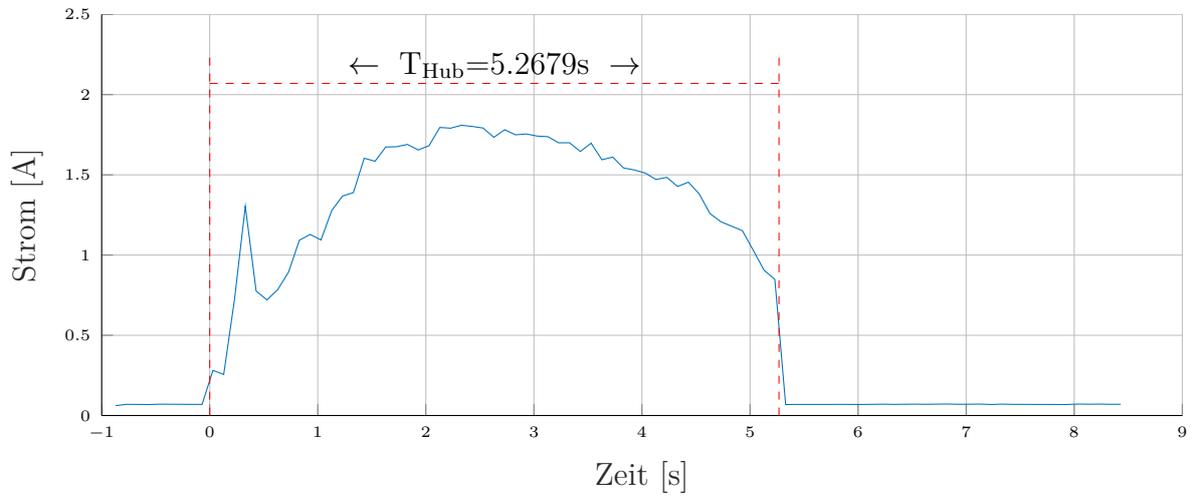


Abbildung 9.29: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 3kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

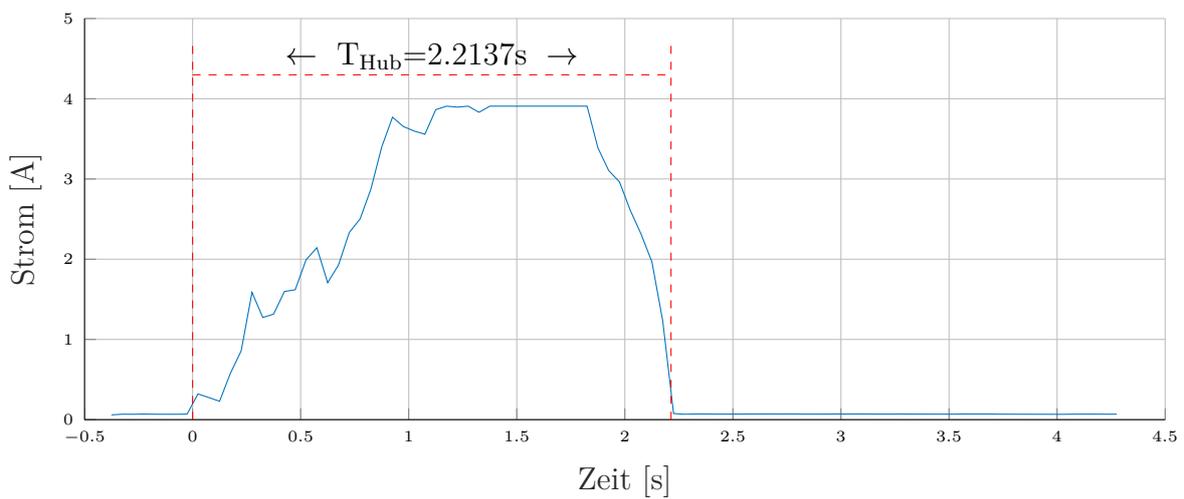


Abbildung 9.30: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 3kg bei 55% der Maximalgeschwindigkeit

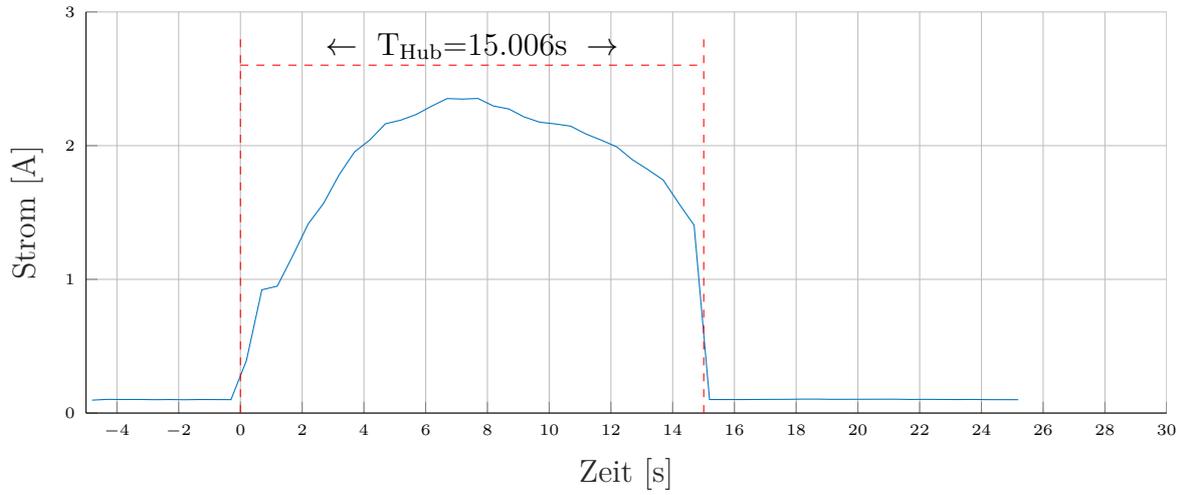


Abbildung 9.31: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 6kg bei 1% der Maximalgeschwindigkeit

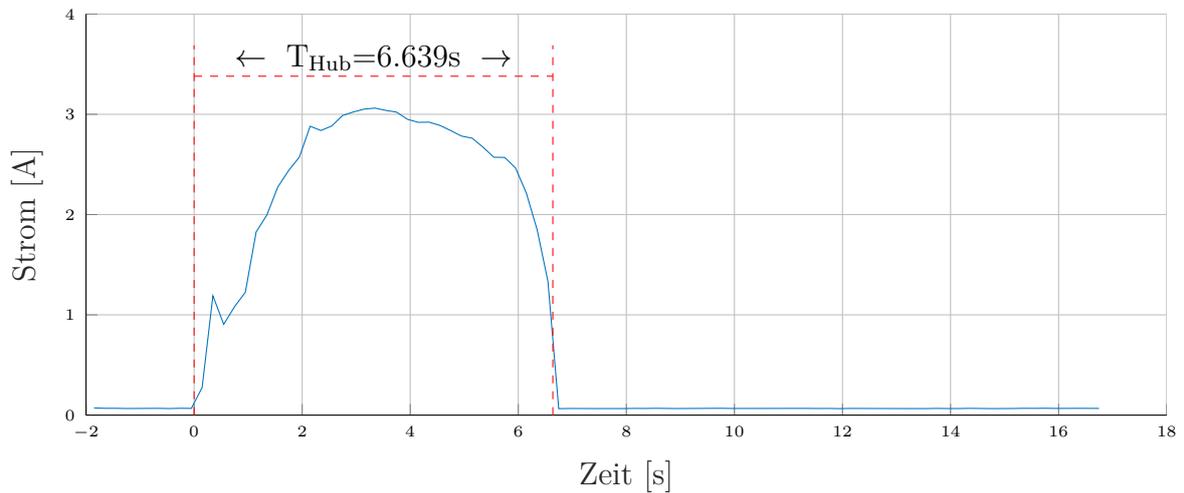


Abbildung 9.32: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 6kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

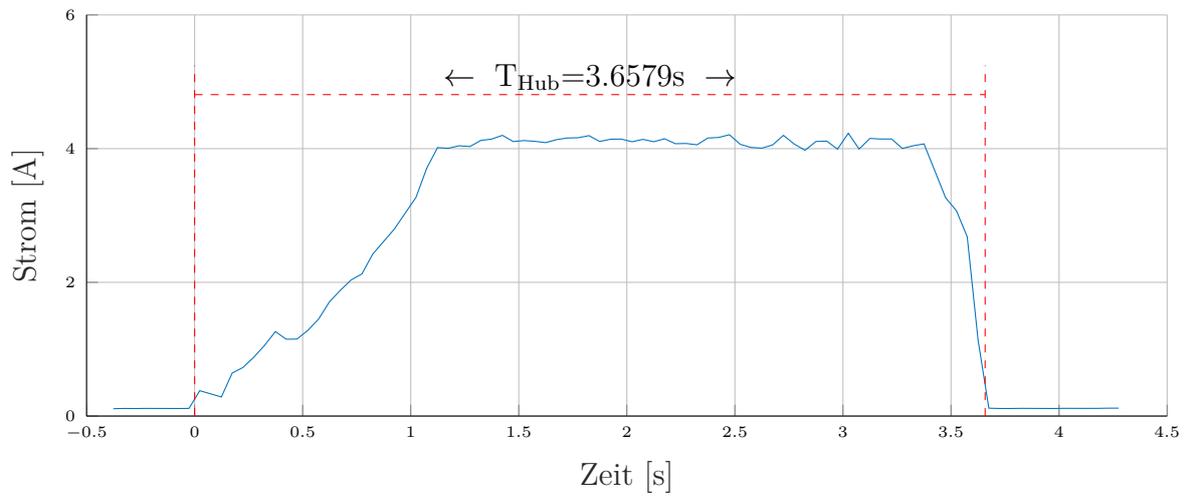


Abbildung 9.33: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 6kg bei 39% der Maximalgeschwindigkeit

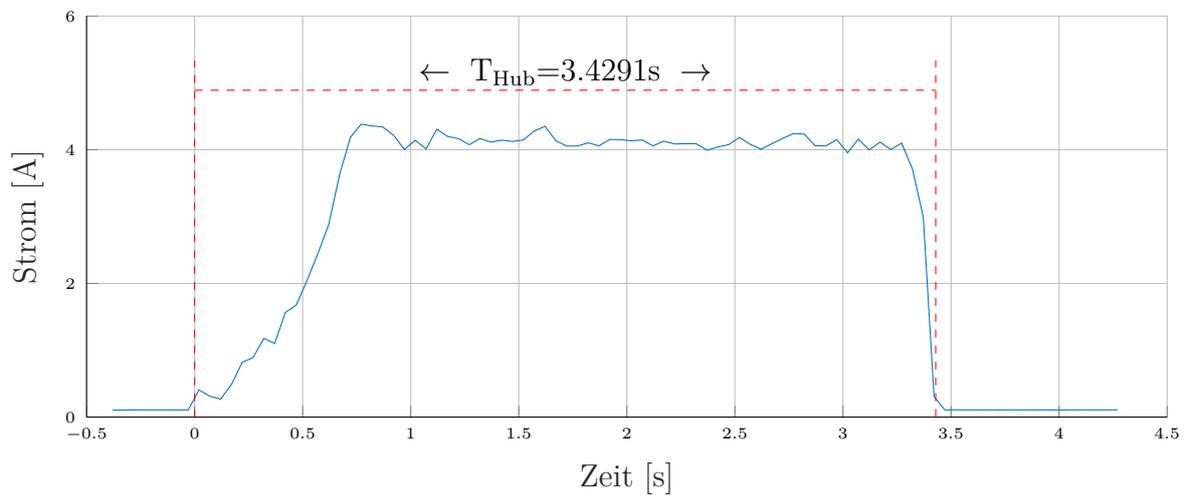


Abbildung 9.34: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung 6kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

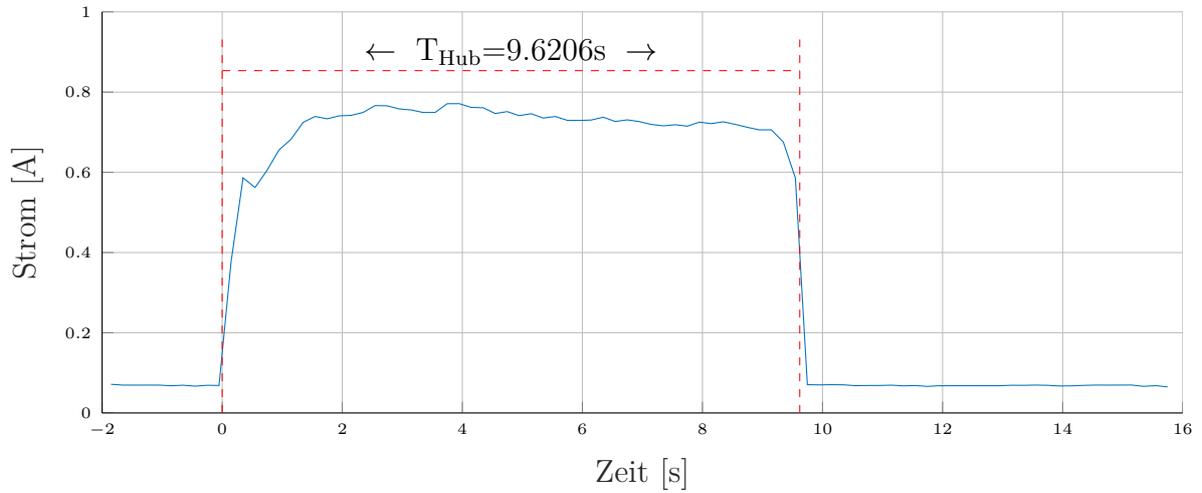


Abbildung 9.35: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung adapter bei 2% der Maximalgeschwindigkeit

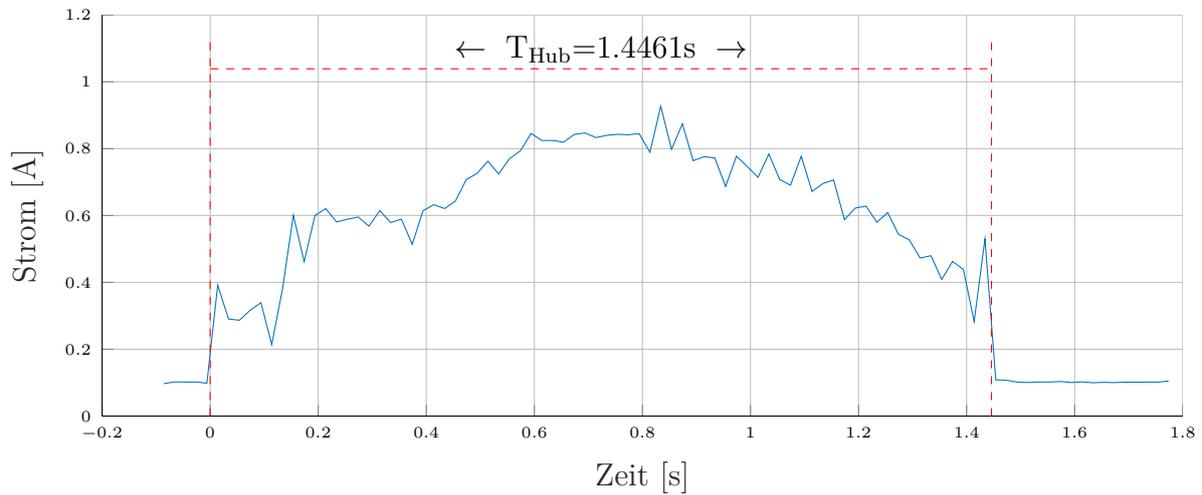


Abbildung 9.36: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung adapter bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

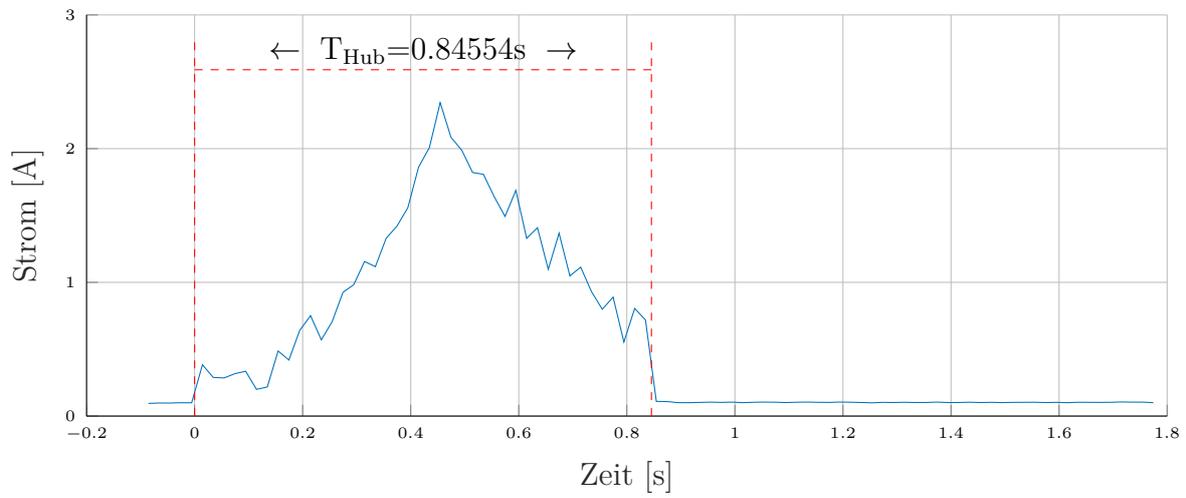


Abbildung 9.37: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung adapter bei 55% der Maximalgeschwindigkeit

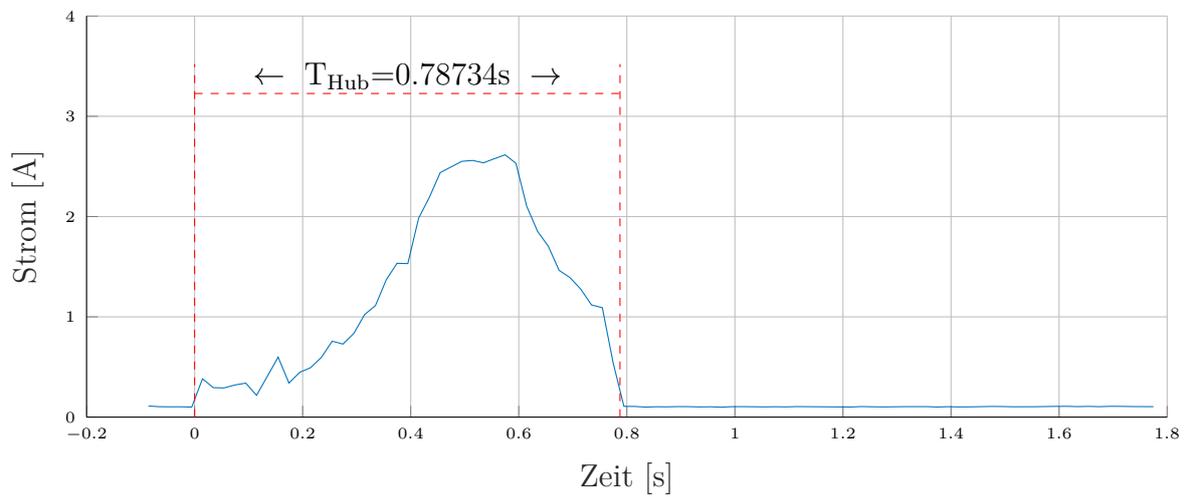


Abbildung 9.38: Strommessung: Prototyp, AFB entspannt, Belastung adapter bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

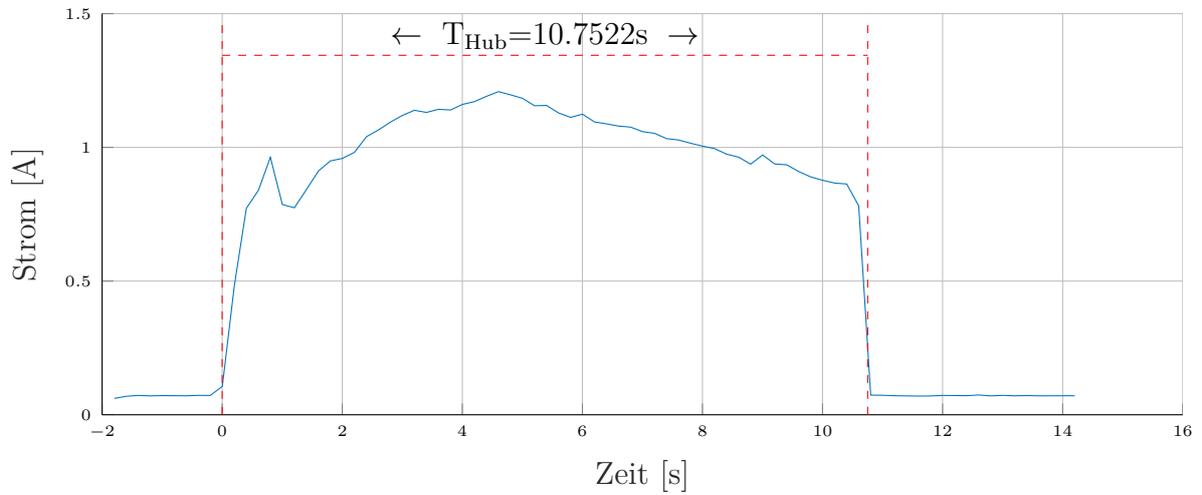


Abbildung 9.39: Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 1% der Maximalgeschwindigkeit

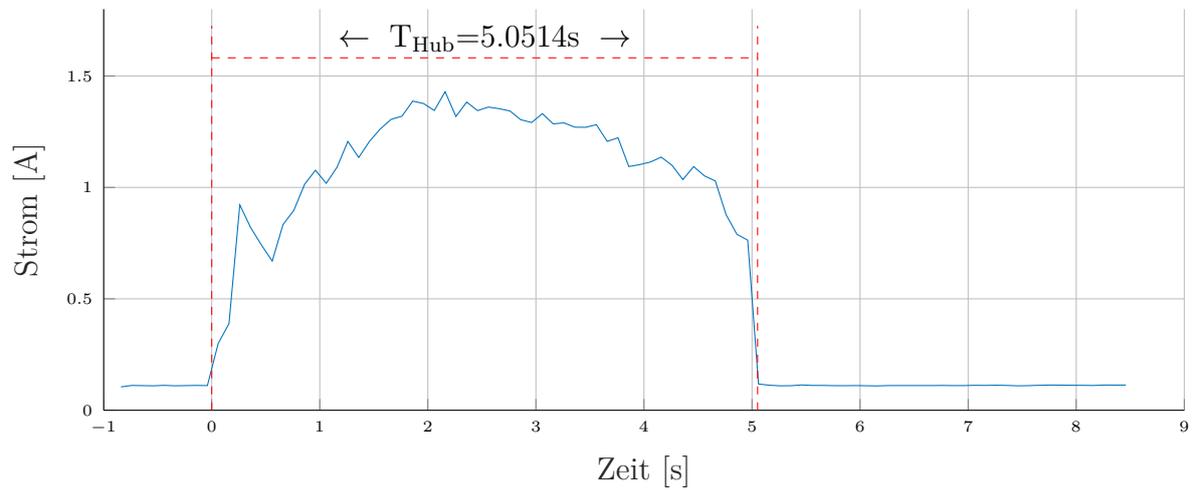


Abbildung 9.40: Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

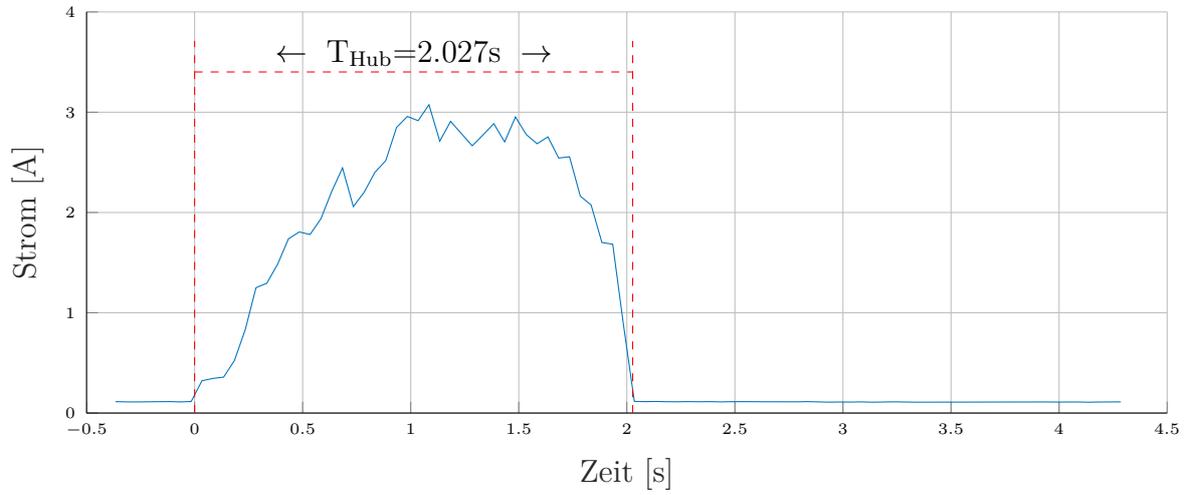


Abbildung 9.41: Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 55% der Maximalgeschwindigkeit

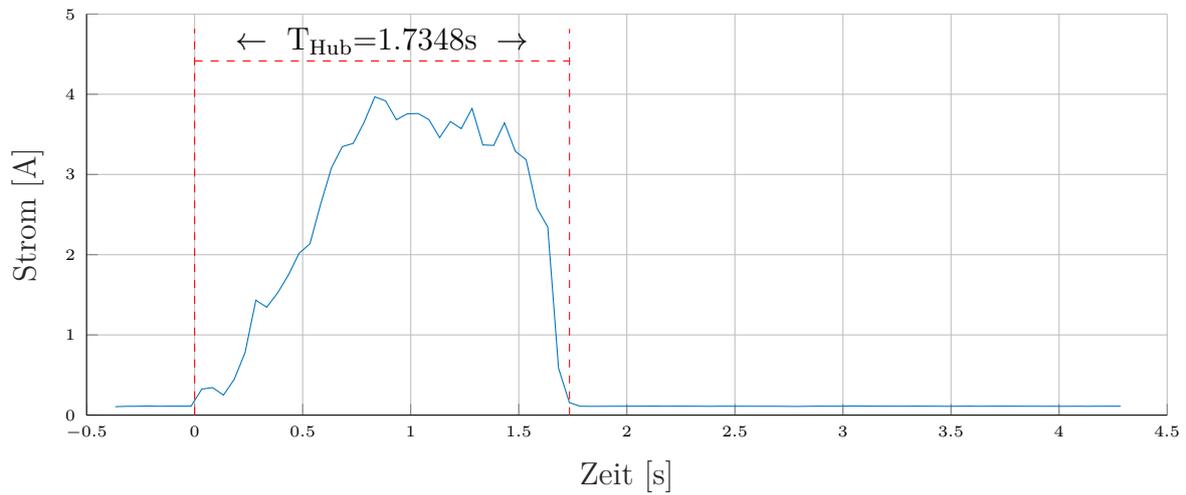


Abbildung 9.42: Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung 2kg bei 100% der Maximalgeschwindigkeit

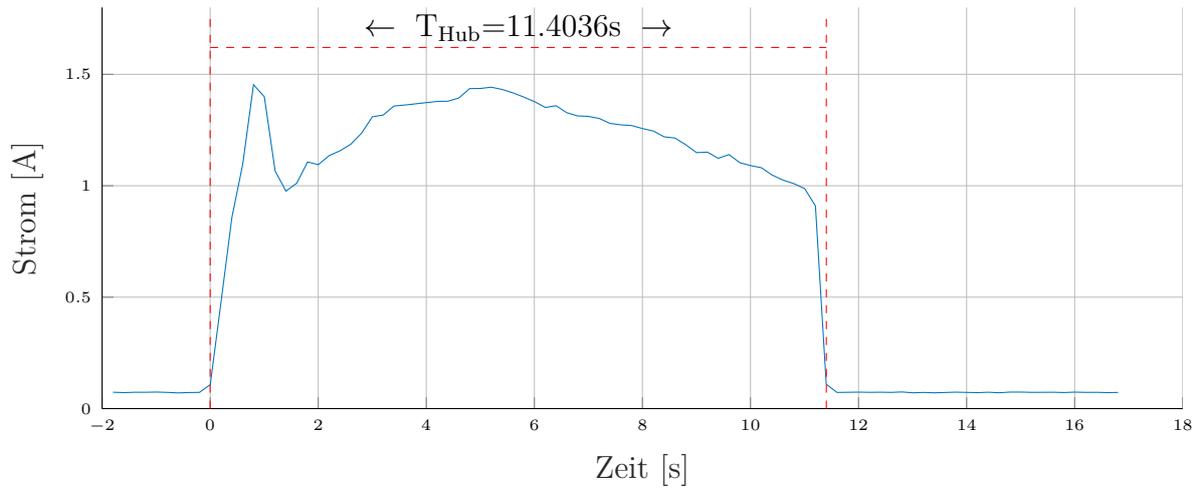


Abbildung 9.43: Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung 3kg bei 1% der Maximalgeschwindigkeit

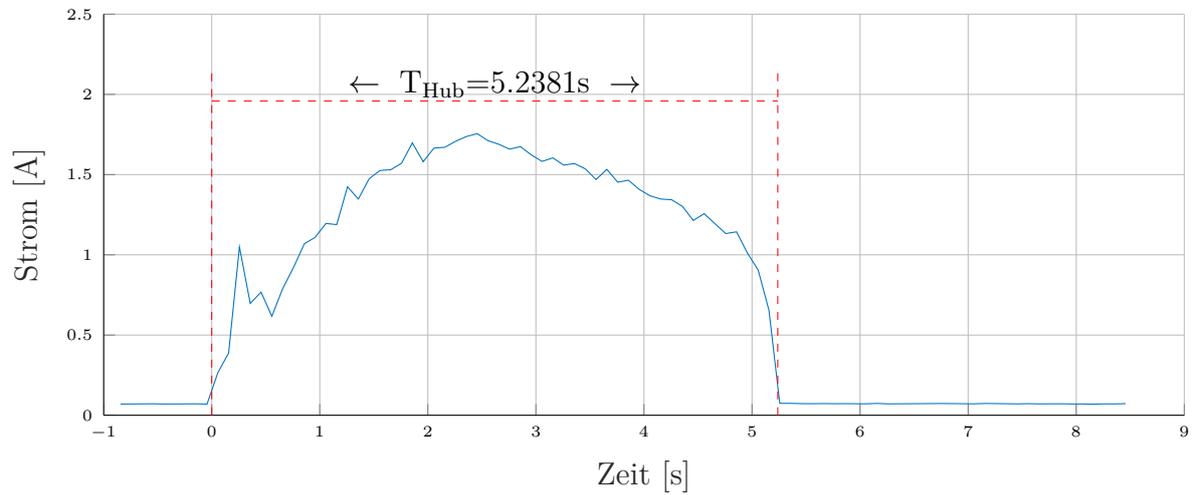


Abbildung 9.44: Strommessung: Original Arm, AFB entspannt, Belastung 3kg bei 17% der Maximalgeschwindigkeit

Literaturverzeichnis

- [1] H.-C. v.d. Wense. Lin specification package. Technical report, LIN Consortium, Sept. 2003.
- [2] D. Anke. *Leistungselektronik*. Oldenbourg Verlag München Wien, 2000.
- [3] Atmel Corporation. *Enhancing ADC resolution by oversampling*.
- [4] *AEDR-850X 3 Channel Reflective Incremental Encoders*. AVAGO Technologies, Apr. 2014.
- [5] H.-J. Böckenhauer und J. Hromkovic. *Formale Sprachen, Endliche Automaten, Grammatiken, lexikalische und syntaktische Analyse*. Springer Vieweg, 2013.
- [6] S. Bernet. *Selbstgeführte Stromrichter am Gleichspannungszwischenkreis*. Springer Vieweg, 2012.
- [7] G. Doblinger. *Signalprozessoren*. J. Schlembach Fachverlag, 2004.
- [8] G. Doblinger. *Zeitdiskrete Signale und Systeme*. J. Schlembach Fachverlag, 2010.
- [9] S. Eberle, C. Ebner, W. Elmenreich, G. Färber, P. Göhner, W. Haidinger, M. Holzmann, R. Huber, R. Schlatterbeck, H. Kopetz, und A. Stothert. Specification of the ttp/a protocol. Research Report 61/2001, Technische Universität Wien, Institut für Technische Informatik, Treitlstr. 1-3/182-1, 1040 Vienna, Austria, 2001.
- [10] W. Elmenreich und R. Ipp. Introduction to ttp/c and ttp/a. Dec. 2003.
- [11] W. Elmenreich, W. Haidinger, R. Kirner, T. Losert, R. Obermaisser, und C. Tröndhandl. Ttp/a smart transducer programming - a beginner's guide. Technical report, Institut für Technische Informatik der Technischen Universität Wien, Österreich, 2005.
- [12] H. Haberbauer. *Maschinenelemente, Gestaltung, Berechnung, Anwendung*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2011.
- [13] E. Hering, A. Vogt, und K. Bressler. *Handbuch der Elektrischen Anlagen und Maschinen*. Springer-Verlag Berlin Keidelberg, 1999.

- [14] ISO. Information technology - open systems interconnection - basic reference model: The basic model. Technical Report ISO/IEC 7498-1, ISO/IEC, June 1996.
- [15] H. Kopetz. *Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011.
- [16] A. Kugi. *Automatisierung*. TU Wien, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik Gruppe komplexe dynamische Systeme, 2015.
- [17] *LIN Specification Package*. LIN Consortium, r edition, Dec. 2010.
- [18] P. Mandl, A. Bakomenko, und W. Johannes. *Grundkurs Datenkommunikation - TCP/IP-basierte Kommunikation: Grundlagen, Konzepte und Standards*. Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [19] R. Merletti und P. Parker. *ELECTROMYOGRAPHY Physiology, Engineering and Noninvasive Applications*. IEEE Press, 2005.
- [20] R. Obermaisser und A. Kanitsar. Application of ttp/a for the otto bock axon bus. Research Report 27/2000, Technische Universität Wien, Institut für Technische Informatik, Treitlstr. 1-3/182-1, 1040 Vienna, Austria, 2000.
- [21] J. Proakis und D. Manolakis. *Digital Signal Processing - Principles, Algorithms, and Applications*. Prentice-Hall International, Inc., 3 edition, 1996.
- [22] *M16C/60, M16C/20, M16C/Tiny Series Software Manual*. Renesas Electronics Corporation, rev.4.00 edition, Jan. 2004.
- [23] *Datasheet M16C/62P Group (M16C/62P, M16C/62PT) SINGLE-CHIP 16-BIT CMOS MICROCOMPUTER*. Renesas Electronics Corporation, rev.2.41 edition, Jan. 2006.
- [24] *M16C/28 Group (M16C/28, M16C/28B) Hardware Manual RENESAS 16-BIT SINGLE-CHIP MICROCOMPUTER M16C FAMILY / M16C/Tiny SERIES*. Renesas Electronics Corporation, rev.2.00 edition, Jan. 2007.
- [25] H. Schüßler. *Digitale Signalverarbeitung 1 - Analyse diskreter Signale und Systeme*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 5 edition, 2008.
- [26] G. Schnell und B. Wiedemann. *Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, 6 edition, 2006.
- [27] D. Schröder. *Elektrische Antriebe-Grundlagen*. Springer, 2009.
- [28] D. Schröder. *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*. Springer, 2009.

Literaturverzeichnis

- [29] W. Stallings. *Operating Systems 7th ed.* Prentice Hall, 2012.
- [30] A. Tanenbaum und M. Van Steen. *DISTRIBUTED SYSTEMS Principles and Paradigms Second Edition*, volume df2313. Pearson Prentice Hall, 2007.
- [31] P. Yedamale. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Microchip Technology Inc., 2003.
- [32] W. Zimmermann und R. Schmidgall. *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik - Protokolle, Standards und Softwarearchitektur*. Springer Vieweg, 5 edition, 2014.

Eidesstattliche Erklärung

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

13.04.2018

Unterschrift