



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Master-Thesis

Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

**Simulation des Antriebssystems auf Basis von
Elektromotoren in mobilen Anwendungen**

Daniel Lück

17.05.2013

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Department Fahrzeugtechnik + Flugzeugbau
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Trinamic Motion Control GmbH & Co. KG
Waterloohain 5
22769 Hamburg

Verfasser: Daniel Lück
Abgabedatum: 17.05.2013

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Volkher Weißermel
2. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Netzel

Industrieller Betreuer: Dr.-Ing. Enrico Dressler

Eidesstattliche Erklärung

Ich, Daniel Lück, Matrikel-Nr. 1898124, versichere hiermit, dass ich meine Master–Thesis mit dem Thema

Simulation des Antriebssystems auf Basis von Elektromotoren in mobilen Anwendungen

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, wobei ich alle wörtlichen und sinngemäßen Zitate als solche gekennzeichnet habe. Sämtliche Abbildungen ohne Quellenangabe entstammen eigenständig erstellten Fotografien und Grafiken. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Mir ist bekannt, dass ich meine Master–Thesis zusammen mit dieser Erklärung fristgemäß nach Vergabe des Themas gebunden im Prüfungsamt der HAW Hamburg abzugeben oder spätestens mit dem Poststempel des Tages, an dem die Frist abläuft, zu senden habe.

Hamburg, den 17.05.2013

DANIEL LÜCK

Zusammenfassung

Das alltägliche Leben ist geprägt von einer großen Vielfalt an elektrischen Antriebssystemen, welche ihre Nutzer in den unterschiedlichsten Branchen unterstützen. Die wachsende Mobilität dieser Anwendungen erweitert ihr Einsatzspektrum von einem kleinen Akkuschauber bis zu einem leistungsstarken Kraftfahrzeug. Dabei wird der Entwicklungsprozess solcher Systeme zunehmend durch preisgünstige und schnelle Echtzeitsimulationen begleitet.

Der Kernpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer allgemeingültigen Strategie zur Modellierung von elektrischen Antriebssystemen in mobilen Anwendungen. Durch die Erfassung ihrer wesentlichen Aufgaben und Komponenten lässt sich ein modulares Gesamtmodell ableiten. Dieses Modell erlaubt den Austausch und die Parametrierung seiner einzelnen Bestandteile und ist deshalb vielfältig einsetzbar. Die praktische Umsetzung der entwickelten Strategie am Beispiel eines Elektrofahrrads verdeutlicht die Möglichkeiten und Besonderheiten der einzelnen Module. Durch die Nutzung von „hardware-in-the-loop“ lassen sich die Modelle zusätzlich mit realen Systemen verbinden. Abschließende Vergleichsmessungen dienen neben der Modellbewertung auch der Validierung und geben Anreize für einen praktischen Gebrauch in anderen Anwendungen und eine Vertiefung einzelner Modellbestandteile in weiterführenden Arbeiten.

Abstract

Many applications base on the huge variety of electric power systems, which support users in everyday life. Growing engineering advances enhance the mobility of power systems and extend their fields of application. In addition the product development of this systems is increasingly supported by fast and economical real time simulations.

This work deals with the development of a universal model to simulate mobile electric power systems. The fundamental functions and components of these systems lead to a modular model. Single modules of the entire concept can be parameterized or replaced by other models to simulate and analyse different kinds of power systems. The implementation of the essential components of an electric bicycle illustrates the models opportunities and features. Furthermore the concept allows hardware-in-the-loop simulations to gain new insights by connecting and integrating a real electric motor. Final comparing measurements validate the developed model and provide incentives for its successful usage and extension in further works.



Aufgabenstellung für die Master-Thesis von Herrn Daniel Lück

Thema: Simulation des Antriebssystems auf Basis von Elektromotoren in mobilen Anwendungen

1. Einführung:

Der wachsende Trend zur Mobilität von elektrischen Antriebssystemen begegnet uns in verschiedenen Bereichen des täglichen Lebens. Der Leistungsbereich dieser Antriebe erstreckt sich von kleinen „Power Tools“, die uns in Form von Akkuschraubern in handwerklichen Bereichen, oder auch als Haushaltsgeräte die Arbeit erleichtern, über elektrische Kinder- und Krippenwagen, bis hin zu elektrisch angetriebenen Fahrrädern (Pedelects/E-Bikes), Mopeds, Autos und sogar Bussen. Diese Anwendungsgebiete erfordern immer höhere Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Energieeffizienz des eingesetzten Antriebssystems.

In mobilen Anwendungen kommt der Energiebilanz des Antriebssystems eine besondere Rolle zu. Neben der Einschätzung einer Restlaufzeit des Systems ist eine intelligente Einteilung der noch zur Verfügung stehenden Energie sinnvoll. Auf diese Weise kann z.B. die restliche Energie bei einem E-Bike auf die restliche Strecke einer vom Nutzer gewählten Fahrradtour verteilt werden, wobei verschiedene Parameter (restlicher Weg, Höhenprofil, aktuelle Fitness des Fahrers,...) in einer Simulation erprobt und anschließend durch Einbindung realer Komponenten validiert werden können.

2. Ziel der Arbeit:

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer lauffähigen Simulationsumgebung zur Modellierung des Antriebssystems in mobilen elektrischen Anwendungen mit Schnittstelle zur Einbindung realer Elektronikkomponenten. Dabei sind verschiedene Teilbereiche wie die mobile Energieversorgung, die Elektronik zur Steuerung des Motors, Sensorik, aber auch eine dynamische Last zu betrachten, die auf den angetriebenen Motor entsprechend eines einfachen Bewegungsprofils sowohl bremsend als auch beschleunigend wirken kann. Innerhalb der Simulation des Antriebssystems sollen die Teilbereiche zunächst als einzelne Funktionsblöcke umgesetzt werden. Weiterhin ist eine geeignete Schnittstelle zwischen Simulation und realer Umgebung zu entwickeln, durch die ausgewählte Funktionsblöcke der Simulation durch reale Komponenten ersetzt und somit als „hardware in the loop“ in der Simulation genutzt werden können.

3. Aufgaben:

Die Aufgabenstellung der Masterarbeit stellt sich im Detail wie folgt dar:

- Aufstellung eines Zeitplanes der Masterarbeit
- Thematische Aufarbeitung des Einsatzes von Elektromotoren als Antriebssystem mit Focus auf mobile Anwendungen
- Einarbeitung in das Thema der Modellierung elektrischer Antriebe
- Einarbeitung in die Simulationsumgebung Scilab/Xcos und dessen Funktionen
- Entwicklung eines Konzepts zur Simulation des Antriebssystems bestehend aus Energieversorgung, Elektronik, Aktuator (BLDC-Motor), Sensorik
- Implementierung der Antriebskomponenten in Scilab/Xcos
- Implementierung und Test einer geeigneten Schnittstelle, um einzelne Komponenten bzw. reale Messwerte auch als „hardware in the loop“ in die Simulation einbinden zu können
- Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

Die Master-Thesis wird bei und in Zusammenarbeit mit der Abteilung F&E der TRINAMIC Motion Control GmbH & Co. KG in Hamburg durchgeführt. Für die Ausführung des Berichtes sind die Empfehlungen auf der Webseite der HAW zu beachten.

Der Betreuer der Masterarbeit im Unternehmen ist Dr.-Ing. Enrico Dressler.

Hamburg, 27. November 2012

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit in der Abteilung F&E der Trinamic Motion Control GmbH & Co. KG in Hamburg.

Die hochschulseitige Betreuung der Arbeit wurde von Herrn Prof. Weißermel und Herrn Prof. Netzel übernommen. Beiden möchte ich an dieser Stelle für die Unterstützung und die gezeigten Hinweise danken. Des Weiteren bedanke ich mich beim gesamten Team der Trinamic Motion Control GmbH & Co. KG für die angenehme Zeit bei der Bearbeitung meiner Thesis. Besonders hervorzuheben ist hier die Leistung von Herrn Enrico Dressler der nicht nur die industrielle Betreuung übernahm, sondern mir bei Fragen und Problemen jederzeit zur Seite stand und wertvolle Tipps bei der Anfertigung dieser Arbeit gab.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Familie für die wertvolle Unterstützung während meiner gesamten Studienzeit sowie für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

DANIEL LÜCK

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Technik	4
2.1	Mobile elektrische Antriebssysteme und deren Modellierung	4
2.2	Elektrisch kommutierte Motoren	5
2.2.1	Aufbau und Funktionsweise	5
2.2.2	Modellierung von EC-Motoren	8
2.2.3	Motorregelung	10
2.3	Lithium-Ionen-Batteriesysteme	12
2.3.1	Aufbau und Funktion	12
2.3.2	Modellierung von Li-Ionen Batterien	13
2.3.3	Batteriemanagement	16
2.4	Pedelecs und E-Bikes	17
2.4.1	Aufbau und Komponenten	18
2.4.2	Mensch-Maschine-Schnittstelle	18
2.5	Relevante Grundlagen der Regelungstechnik	19
2.5.1	Übertragungsverhalten von Regelkreisen	19
2.5.2	Stabilitätskriterien von Regelkreisen	21
3	Universelles Modellierungskonzept für mobile elektrische Antriebssysteme	23
3.1	Anforderungen an das Gesamtsystem	23
3.2	Modularer Aufbau des Antriebssystems	25
3.3	Modellierung des Antriebs	26
3.3.1	Motormodul	27
3.3.2	Motorregelung	29
3.4	Modellierung der Energieversorgung	31
3.4.1	Modul Energiequelle	31
3.4.2	Energiemanagement	33
3.5	Belastungsmodul	34
3.6	Modul Hybridantrieb	35
3.7	Einbindung von realer Hardware in das Modellierungskonzept	36

4	Spezielles Modellierungskonzept für elektrische Antriebssysteme	37
4.1	Gesamtsystem am Beispiel eines Pedelecs	37
4.1.1	BLDC–Motormodell	38
4.1.2	BLDC–Motorregler	42
4.1.3	Lithium–Ionen–Batteriemodell	45
4.1.4	Batteriemanagement	47
4.1.5	Fahrwiderstände	48
4.1.6	Fahrermodul	51
4.1.7	Leistungsmanagement	52
4.2	Modellierung eines Testmotors	53
4.3	Strategien zum Reglerentwurf bei BLDC–Motoren	54
4.3.1	Analytischer Reglerentwurf im Frequenzbereich	54
4.3.2	Empirischer Reglerentwurf im Zeitbereich	57
5	Implementierung und Test	59
5.1	Implementierung der entwickelten Modelle in Scilab und Xcos	59
5.1.1	Übersicht der verwendeten Zusatzpakete und Einstellungen	59
5.1.2	Strategien zur Verwendung von „hardware–in–the–loop“ via USB– Schnittstelle	61
5.2	Messungen am Pedelec	64
5.2.1	Randbedingungen der existierenden Referenzmessung	64
5.2.2	Simulations– und Messergebnisse beim Pedelec	64
5.3	Messungen am Testmotor	69
5.3.1	Randbedingungen und Aufbau des Prüfstands	70
5.3.2	Simulations– und Messergebnisse beim Testmotor	71
6	Fazit und Ausblick	74
6.1	Zusammenfassung	74
6.2	Ausblick	75
A	Anhang	i
A.1	Eingestellte Parameterwerte beim speziellen Modellierungskonzept	i
A.1.1	Parameterwerte und Kennlinien beim Pedelec–Modell	i
A.1.2	Parameterwerte beim Testmotor–Modell	iv
A.2	Nachweis zur Stabilität der modellierten Regler	v
A.2.1	Übertragungsverhalten und Stabilität des Motorreglers beim Pedelec– Modell	v

A.2.2 Übertragungsverhalten und Stabilität des Motorreglers beim Testmotor- Modell	vi
A.3 Verwendetes Fahrrad bei der Referenzmessung	vii
A.4 Charakteristik der gefahrenen Strecke bei der Referenzmessung	vii
Literaturverzeichnis	viii
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	xii
Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xvii

1 Einleitung

Der Wunsch der Menschheit nach einer wachsenden und umweltverträglichen Mobilität ist allgegenwärtig. Durch die technischen Fortschritte in der Leistungselektronik und in der Batterietechnik erhöht sich die Attraktivität von mobilen elektrischen Antriebssystemen enorm und macht sie für den Anwender vielfältig einsetzbar. Die Entwicklung dieser Systeme wird dabei zunehmend durch die Simulation unterstützt oder sogar ersetzt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung einer Strategie zur allgemeingültigen Modellierung von mobilen elektrischen Antriebssystemen. Die Nachbildung der bedeutenden Funktionen am Beispiel eines Elektrofahrrads bildet die praktische Anwendung des entwickelten Konzepts. Auf den folgenden Seiten werden deshalb die wesentlichen Beweggründe sowie die Vorgehensweise bei der Anfertigung dieser Arbeit betrachtet.

1.1 Motivation

Elektrisch betriebene Antriebssysteme sind in den unterschiedlichsten Branchen in diversen Formen und Größen anzutreffen. Die Darstellung in der folgenden Abbildung 1.1 zeigt dabei nur einen Ausschnitt der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieser Systeme. Bei den meisten aufgeführten Beispielen erzeugt ein Elektromotor die vom Anwender gewünschte mechanische Energie. Da dieser Prozess überwiegend reversibel ist, besitzen elektrische Maschinen einen entscheidenden Vorteil gegenüber konventionellen Antrieben. Zusätzlich zu der motorischen Arbeitsweise lassen sich einige dieser Maschinen auch als Generator betreiben und können somit neben einem mechanischen Antrieb auch elektrische Energie generieren.

Die Nutzung der Windkraft schafft die Voraussetzungen für eine regenerative und ökologische Energiegewinnung. Wird diese elektrische Energie in einem Akkumulator chemisch gespeichert, lassen sich die Anwendungen unabhängig vom öffentlichen Stromnetz jederzeit mit einer Spannung versorgen. Dieser Zuwachs an Mobilität kann zum einen in handhabbaren Werkzeugen oder Haushaltsgeräten im täglichen Gebrauch genutzt werden. Darüber hinaus dienen mobile Antriebe in einem Automobil oder Elektrofahrrad der globalen Fortbewegung. Aus diesen Gründen gilt die wirtschaftliche Nutzung der elektrischen Energie auch in der Automobilindustrie als zukunftsweisende Technologie.

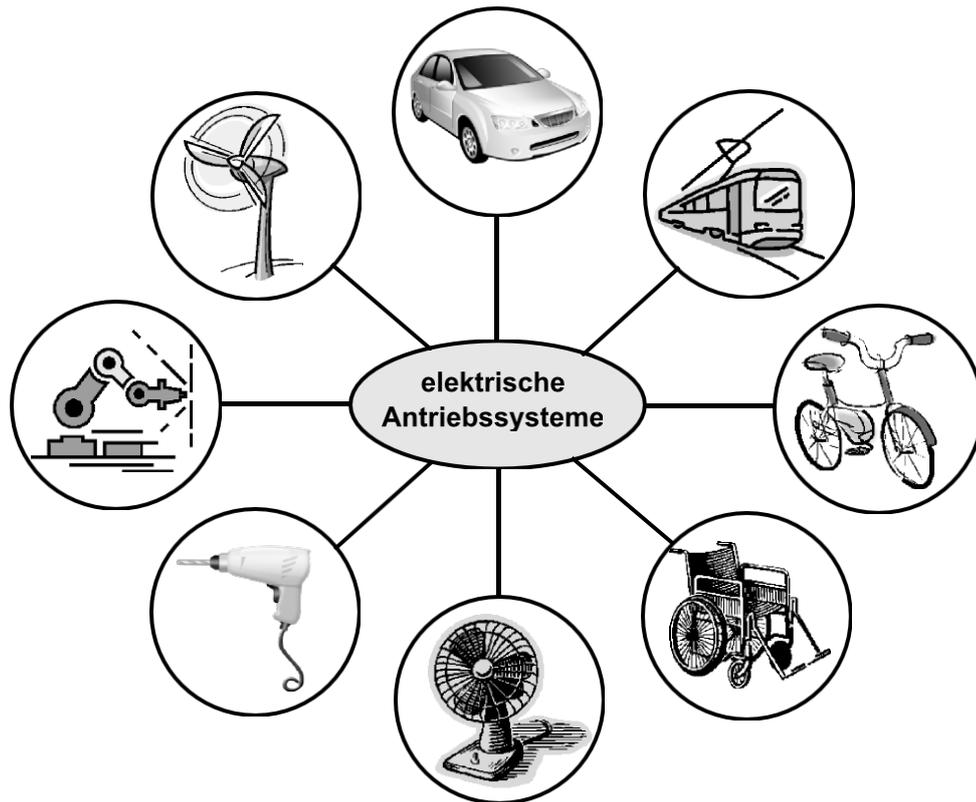


Abbildung 1.1: Einsatzspektrum von elektrischen Antriebssystemen ¹

Die Entwicklung der einzelnen Antriebssysteme wird dabei überwiegend am PC vorgenommen und durch preisgünstige und schnelle Simulationen begleitet. Die Kosten- und Zeitvorteile der modellbasierten Entwicklung gegenüber teuren und aufwendigen Messungen sind aber nur zwei wichtige Aspekte. Durch gezielte Parametervariation ist es in der Simulation möglich, verschiedene Szenarien abzubilden und Phänomene zu beobachten, welche im Versuch nicht zugänglich sind oder aus Sicherheitsgründen nicht erprobt werden können [12].

Die Entwicklung und Konstruktion eines Antriebssystems und deren einzelner Komponenten findet nur selten alleine statt sondern basiert auf der Kooperation mehrerer Geschäftspartner. Ist das Verhalten der unterschiedlichen Systembestandteile dabei klar erkennbar, lassen sich diese in der Simulation als Einzelmodelle einbinden und austauschen. In der Funktions- und Algorithmenentwicklung können die einzelnen Komponenten auch durch reale Hardware ersetzt und in das Gesamtmodell eingebunden werden. Die Kommunikation zwischen dem Modell und der Hardware erfolgt über eine geeignete Schnittstelle und eröffnet dem Gesamtsystem neue Strategien und Möglichkeiten.

¹alle abgebildeten Grafiken entstammen der Clipart-Sammlung aus dem Office-Paket von Microsoft (<http://office.microsoft.com/de-de/images/>)

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit behandelt gemäß der Aufgabenstellung diverse Aspekte zur Modellierung der mobilen elektrischen Antriebssysteme. Diesem eröffnenden Kapitel folgt der Abschnitt 2, welcher die notwendigen theoretischen Grundlagen bezüglich der elektrischen Maschinen sowie der Batterie- und Regelungstechnik beschreibt. Dabei unterliegen der aktuelle Forschungsstand und existierende Ansätze zur Modellierung einzelner Komponenten besonderer Betrachtung.

Die Entwicklung des Gesamtkonzepts für die universelle Simulation ist der Hauptbestandteil des Abschnitts 3. Ausgehend von wiederkehrenden Standardelementen wird ein modulares Konzept und der Aufbau seiner Einzelmodelle erläutert. Die Erfassung und Fokussierung der wesentlichen Einflussfaktoren ist dabei von besonderer Bedeutung.

Die praktische Ausführung des entwickelten Konzepts am Beispiel eines Elektrofahrrads ist ein weiterer Kernpunkt dieser Arbeit. Anhand dieser speziellen Lösung findet eine Bewertung der universellen Strategie hinsichtlich seiner Qualität und Gültigkeit statt. Detaillierte Untersuchungen der modellierten elektrischen Maschinen und der Motorregelung erfolgen dabei separat an einem eigenständigen Modul. Dieser Testmotor wird zusätzlich zusammen mit einem geeigneten Steuergerät als reale Hardware in die Simulation eingebunden und seine Einsatzmöglichkeiten untersucht. Der Abschnitt 4 verdeutlicht den Aufbau und die Modellierung beider Systeme.

Die Implementierung der entwickelten Modelle und die Durchführung von Tests ist der Inhalt des Abschnitts 5. Vor der Beschreibung und Bewertung der Testergebnisse werden alle notwendigen Einstellungen und Hintergründe zur eingesetzten Simulationssoftware aufgeführt. Die aus der Simulation stammenden Ergebnissen werden anschließend mit äquivalenten Referenzmessungen verglichen. Etwaige Abweichungen und Unstetigkeiten unterliegen dabei einer genauen Betrachtung.

Die abschließenden Seiten in Abschnitt 6 dienen der Zusammenfassung der gewonnenen Kenntnisse. Ein folgender Ausblick rundet diese Arbeit mit zahlreichen weiterführenden Strategien ab.

2 Stand der Technik

Die Grundlage für das in dieser Arbeit entwickelte allgemeingültige Konzept mobiler elektrischer Antriebssysteme bildet der aktuelle technische Forschungsstand dieser Systeme und deren Modellierung. Die Anwendung dieses Konzepts am Beispiel eines Elektrofahrrads erfordert darüber hinaus gewisse Grundkenntnisse im Bereich der elektrischen Maschinen, insbesondere der elektrisch kommutierten Motoren, und der Batterietechnik. Der gegenwärtige technische Standard und einige vorhandene Modellierungsstrategien dieser speziellen Anwendungen werden deshalb vorab näher erklärt. Dieses Kapitel schließt mit dem Aufbau und der Funktion von Elektrofahrrädern in Form von E-Bikes und Pedelecs sowie einigen Grundlagen aus der Regelungstechnik ab.

2.1 Mobile elektrische Antriebssysteme und deren Modellierung

Häufig werden mobile elektrische Antriebssysteme auf Fahrzeuge aus dem Bereich der Elektromobilität reduziert. Diese Verallgemeinerung ist jedoch unzureichend und vernachlässigt diverse Applikationen und Anforderungen. Einige Merkmale der Elektromobilität lassen sich jedoch auch in anderen Anwendungen antreffen. So basieren alle Systeme auf der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie oder umgekehrt [2]. Die elektrische Energie wird dabei größtenteils aus chemischer Energie gewonnen. Diese Wandlung zwischen den Energieformen erfordert gewisse Komponenten, welche das Grundgerüst aller Anwendungen bilden [13]:

- Energieversorgung (elektrisch oder chemisch–elektrisch)
- elektrischer Antrieb (Aktorik)
- mechanische Belastung

Die Belastung macht den Einsatz eines Elektromotors als Bindeglied zwischen Elektrik und Mechanik notwendig. Die Energieversorgung ist verantwortlich für den Stromfluss im System. Weitere Energiewandlungen, etwa in die magnetische oder die thermische Energie, treten innerhalb der Systeme auf.

Aufgrund des breiten Einsatzspektrums von Antriebssysteme lassen sich in einschlägiger Literatur einige Modellierungskonzepte antreffen. Diese konzentrieren sich jedoch überwiegend auf detaillierte Lösungen einer konkreten Anwendung. Allgemeine Strategien für ein modulares Gesamtsystem sind entweder nicht vorhanden oder nicht frei zugänglich. Eine Untersuchung von vorliegenden detaillierten Modellen ist dennoch erforderlich, um eine Schnittmenge wiederkehrender Aspekte aufzudecken. Diese bilden später den Grundstein für das allgemeine Modellierungskonzept.

2.2 Elektrisch kommutierte Motoren

Die in mobilen Anwendungen zum Einsatz kommenden Elektromotoren arbeiten entweder rotatorisch (Drehstrommotoren) oder translatorisch (Linearmotoren). Innerhalb beider Klassen lassen sich unzählige Variationen in einem großen Leistungsspektrum vom einfachen Gleichstrommotor mit Kohlebürsten bis hin zu einer permanent- oder fremderregten Asynchronmaschine antreffen. Da eine detaillierte Auflistung aller Varianten den Rahmen dieser Arbeit überschreitet, wird eine Beschreibung am Beispiel eines bürstenlosen Gleichstrommotors vorgenommen. Alle anderen Variationen sind für den Gebrauch in einer mobilen Anwendung ebenfalls geeignet.

Der Trend zum Einsatz von bürstenlosen elektrisch kommutierten (EC) Motoren in vielen Anwendungen ist auf deren Vorteile in der Lebensdauer, Effizienz und im Drehzahlpektrum gegenüber Motoren mit Kohlebürsten zurückzuführen [21]. Da EC-Motoren nicht nur motorisch sondern auch als Generator nutzbar sind [13], lässt sich dieser Trend ebenfalls in der Elektromobilität sowohl bei hybriden Kraftfahrzeugen als auch bei Elektrofahrzeugen beobachten.

Auf den folgenden Seiten werden deshalb einige fundamentale Eigenschaften und Funktionen der EC-Motoren sowie Ansätze zu deren Modellierung erläutert. Eine Beschreibung der gebräuchlichen Strategien zur Regelung solcher Motoren rundet diesen Abschnitt ab. Allgemeine Hintergründe zu diesen und weiteren Elektromotortypen lassen sich darüber hinaus beispielsweise in [13] oder [33] finden.

2.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Für gewöhnlich bestehen EC-Motoren wie in der folgenden Abbildung 2.1 dargestellt im Wesentlichen aus mehreren stromdurchflossenen Leitern (Phasen) im Stator und einem mehrpoligen Permanentmagneten im Rotor [23]. Je nach Anordnung von Stator und

Rotor wird zwischen Außenläufer (Rotor außerhalb des Stators) und Innenläufer (Rotor innerhalb des Stators) unterschieden. Die einzelnen Phasen sind als Spulen gewickelt und bewirken die Induktion eines Magnetfeldes sobald ein Strom durch sie fließt. Durch wechselnde Bestromung der einzelnen Phasen entsteht so ein magnetisches Drehfeld im Stator, welches dem Magnetfeld des Permanentmagneten entgegen wirkt und eine Drehung des Rotors hervorruft [24]. Die Anzahl der Phasen und deren Anordnung zueinander kann dabei je nach Motortyp variieren. Häufig kommen dreiphasige Systeme zum Einsatz [27], bei denen die Phasen über eine Sternschaltung (rechtes Bild in Abbildung 2.1) oder eine Dreiecksschaltung verbunden sind [21].

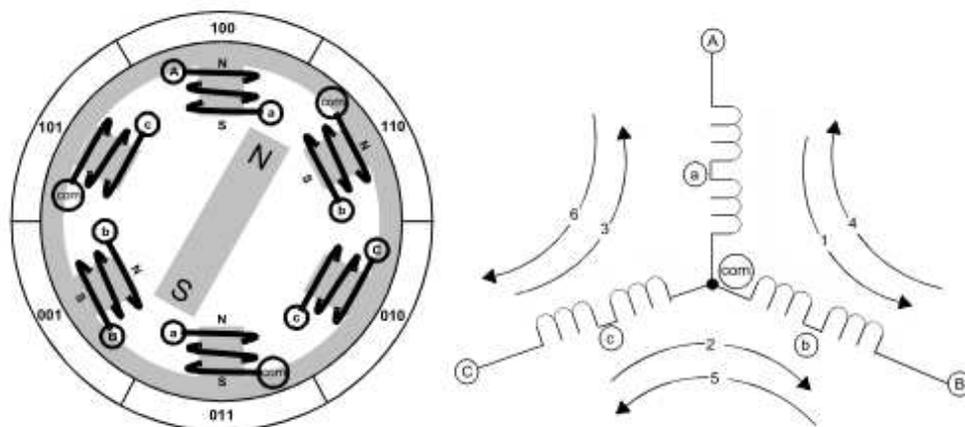


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines EC-Motors [23]

Die Stromversorgung findet bei EC-Motoren über eine Gleichspannungsquelle statt, welche durch verschiedene Kommutierungsvorgänge eine Wechselspannung generiert. Diese Form der Umpolung wird durch den Wegfall von Kohlebürsten über einen Schaltkreis rein elektrisch realisiert [33]. Die Darstellung in der nachfolgenden Abbildung 2.2 liefert eine Übersicht über den schematischen Aufbau einer Kommutierungsschaltung solcher EC-Motoren. Genau genommen ist die Schaltung nicht mehr Teil des Motors sondern liegt als Inverter in einem Motorregler vor. Dieser übernimmt die Ansteuerung der einzelnen elektrischen Schalter Q1 bis Q6 und die Bestromung der Phasen. Verschiedene Schaltstrategien verändern dabei die individuellen Eigenschaften bezüglich des Stromverlaufs in den Phasen und die Laufruhe [21]. Häufige Vertreter der EC-Motoren sind die bürstenlosen Gleichstrommotoren, welche auch als BLDC-Motoren bekannt sind, und eine gepulste blockförmige Bestromung aufweisen. Eine weitere Möglichkeit stellt die sinusförmige Ansteuerung da. Diese Maschinen sind z. B. in [19] unter der Bezeichnung permanentenerregte Synchronmaschine (PMSM) anzutreffen. Die Benennung beider Varianten ist in der Industrie und Literatur jedoch nicht einheitlich.

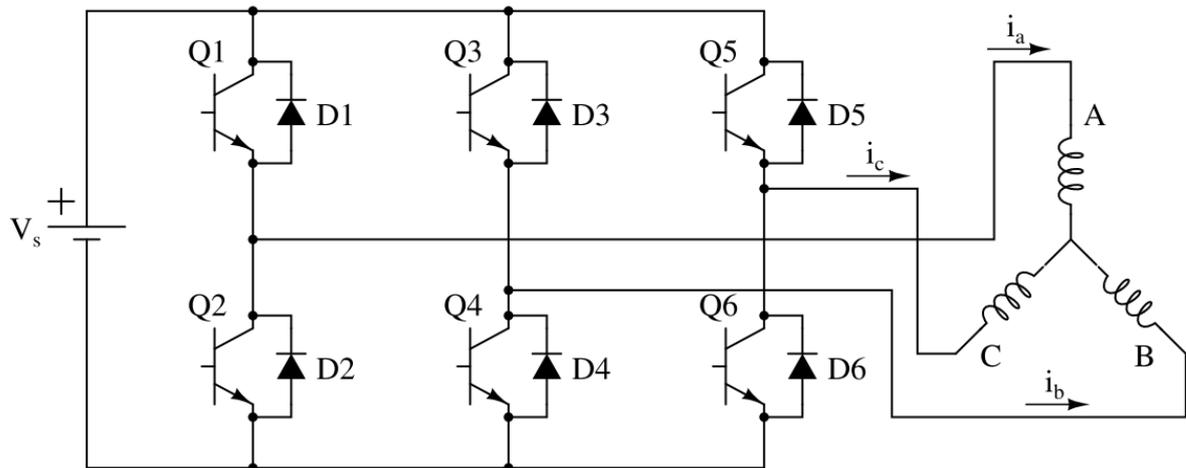


Abbildung 2.2: Vereinfachtes Schaltungsbild von EC-Motoren [4]

Unabhängig von der Schaltungsstrategie unterliegen alle EC-Motoren neben Verlusten durch Reibung und ohm'schen Widerständen auch elektromagnetische Verluste in Form einer Gegenkraft. Diese im englischen Sprachraum BEMF genannte Größe entspricht physikalisch einer Spannung und entsteht durch die Drehung des Rotors. In den Spulen wird durch das sich drehende Magnetfeld des Rotors eine Spannung induziert, welche der angelegten Quellspannung in den Phasen entgegen wirkt [24]. Analog zur Schaltungsstrategie (blockförmig oder sinusförmig) weisen auch die Gegenspannungen unterschiedliche Verläufe auf. Bei BLDC-Motoren nimmt die BEMF eine trapezförmige Form an während sie bei einer PMSM entsprechend der Bestromung ebenfalls sinusförmig ist [24]. In der Praxis weichen die Verläufe von diesen idealen theoretischen Annahmen jedoch ab.

Aufgrund ihres Aufbaus können die Phasen nur zwei verschiedene Zustände annehmen. Entweder liegen sie an der konstanten Gleichspannungsquelle an oder sind vor ihr getrennt. Um die effektiv anliegende Spannung dennoch variieren zu können, werden die Schalter auch zwischen den üblichen Schaltungsvorgänge betätigt und der Stromfluss so unterbrochen. Dieser Vorgang wird als Pulsweitenmodulation (PWM) bezeichnet [19] und ist in der folgenden Abbildung 2.3 schematisch dargestellt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei EC-Motoren ist die Positionsmessung, welche für deren Regelung unerlässlich ist. Eine Möglichkeit hierfür ist die Verwendung von drei Hallsensoren im Motor. Diese arbeiten nach dem Hall-Effekt und beruhen auf der Spannungsänderung, welche durch ein bewegtes Magnetplättchen in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters hervorgerufen wird [13]. Die Motorregelung wertet die gemessenen Signale der Hallsensoren aus und betätigt dementsprechend die jeweiligen Schalter. Alternativ lassen

sich Position und Drehzahl auch sensorlos über die induzierten Gegenspannungen direkt in der Elektronik erfassen [24].

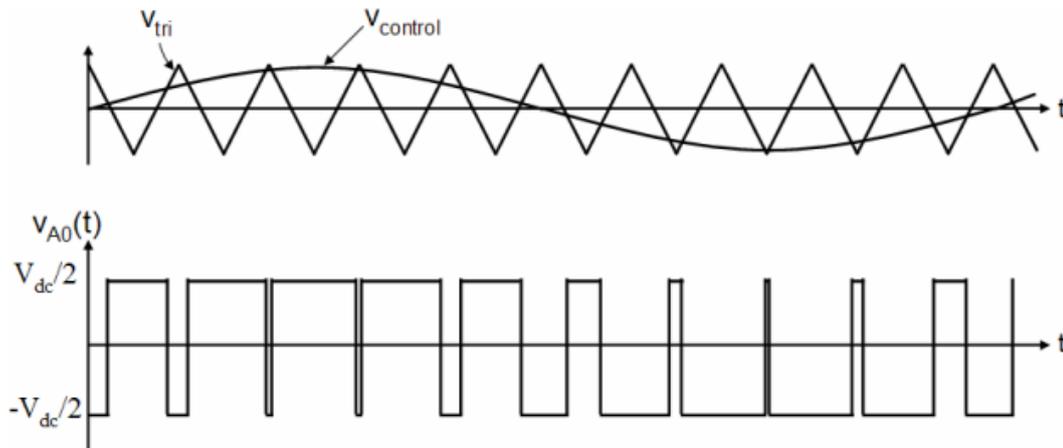


Abbildung 2.3: Pulsweitenmodulation bei EC-Motoren [16]

2.2.2 Modellierung von EC-Motoren

Die mathematische Beschreibung von EC-Motoren in Form eines Modells ist ein häufiges Thema verschiedener Arbeiten und wird beispielsweise in [4] oder [37] untersucht. Trotz unterschiedlicher Ansätze in der Kommutierungslogik ist die Beschreibung der elektrischen und mechanischen Kernpunkte dieser Maschinen identisch. Als elektrisches Ersatzmodell dient wie in Abbildung 2.2 dargestellt häufig eine Zusammenschaltung der einzelnen Phasen, welche aus einem ohm'schen Widerstand und einer Spuleninduktivität bestehen. Der Zusammenhang zwischen der angelegten Spannung über einer Phase und dem entstehenden Stromfluss lässt sich mit folgender Gleichung nach [30] beschreiben:

$$U_k = R_k \cdot I_k + L_k \cdot \frac{dI_k}{dt} + E_k \quad (2.1)$$

U_k – Spannung über Phase

R_k – Phasenwiderstand

I_k – Strom durch Phase

L_k – Spuleninduktivität

E_k – elektromagnetische Gegenkraft über der Phase

dt – zeitliche Änderung

k – Laufindex der einzelnen Phasen

Der angelegten Phasenspannung wirken neben ohm'schen Widerstandsverlusten auch der Spannungsabfall an der Spule und die BEMF entgegen. Der Spannungsverlust an der

Spule ist von der Änderung des Stromflusses abhängig, weshalb sich dieser mit einer Differentialgleichung erster Ordnung beschreiben lässt. Der Phasenwiderstand und die Induktivität ergeben sich als elektrische Motorgrößen aus der Konstruktion und sind daher häufig in Datenblättern angegeben. Die Summe der einzelnen Phasenströme ist aufgrund der Knotenregel dabei immer 0 [30].

Die Verläufe der angelegten Spannung und die der BEMF sind wie erwähnt abhängig von der Kommutierung und deshalb in den einzelnen Arbeiten je nach Themenschwerpunkt unterschiedlich definiert. Da sich die BEMF nur bei einer Drehung des Rotors durch die Induktivität ergibt, ist ihr Amplitudenwert neben der Kommutierung auch von der Drehzahl und einer Motorkonstanten abhängig [37]:

$$E_k = \omega \cdot k_{el} \cdot f_k(\theta_{el}) \quad (2.2)$$

E_k – elektromagnetische Gegenkraft ω – Winkelgeschwindigkeit

k_{el} – Motorkonstante f_k – Verlauf der elektromagnetischen Gegenkraft

θ_{el} – elektrischer Drehwinkel k – Laufindex der einzelnen Phasen

Üblicherweise ist auch die Motorkonstante in Datenblättern direkt angegeben, da sie ebenfalls je nach Motorkonstruktion variiert und unter anderem von der Anzahl der Spulenwindungen, der magnetischen Kenngrößen des Rotors und der Motorgröße abhängig ist [24]. Der Verlauf der BEMF ergibt sich je nach Kommutierungsvariante immer über den elektrischen Drehwinkel. Durch den häufig mehrpoligen Magneten im Rotor ist das elektrische Drehfeld dabei schneller als die Rotordrehzahl und induziert entsprechend öfter eine Spannung. Die Drehzahl des Rotors bzw. dessen Drehwinkel und der elektrische Winkel sind über die Anzahl der Pole linear miteinander gekoppelt:

$$\frac{d\theta_{el}}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{P}{2} = \omega \cdot \frac{P}{2} \quad (2.3)$$

θ_{el} – elektrischer Drehwinkel

dt – zeitliche Änderung

θ – Rotordrehwinkel

P – Anzahl der Pole im Rotor

ω – Winkelgeschwindigkeit

Der sich einstellende Stromfluss in den einzelnen Phasen bewirkt die Induktion eines rotierenden Magnetfeldes. Dieses Drehfeld wird in der Modellierung von EC-Motoren

als elektrisches Drehmoment betrachtet und ist von der Maschinenkonstanten und dem Gesamtstrom im Motor abhängig. Es lässt sich z. B. nach [37] wie folgt berechnen:

$$T_{el} = k_{el} \cdot \sum I_k \cdot f_k(\theta_{el}) \quad (2.4)$$

T_{el} – elektrisches Drehmoment	k_{el} – Motorkonstante
I_k – Strom durch Phase	f_k – Verlauf der elektromagnetischen Gegenkraft
θ_{el} – elektrischer Drehwinkel	k – Laufindex der einzelnen Phasen

Die Rotordrehzahl kann in einem mechanischen Ersatzmodell über eine Bilanz der auftretenden Drehmomente bestimmt werden. Berücksichtigt wird dabei in den existierenden Modellen neben der Drehträgheit des Rotors bei einer Beschleunigung oder Verzögerung auch eine drehzahlabhängige Reibung in den Lagern. Die Rotordrehzahl berechnet sich deshalb wie in [37] häufig über eine Differenzialgleichung:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} + k_{fric} \cdot \omega = T_{el} - T_{load} \quad (2.5)$$

J – Massenträgheitsmoment	ω – Winkelgeschwindigkeit
dt – zeitliche Änderung	k_{fric} – Reibungskoeffizient
T_{el} – elektrisches Drehmoment	T_{load} – äußeres Lastmoment

Das Lastmoment wirkt von außen auf den Motor und ist stellvertretend für alle Formen der Belastung. Je nach Vorzeichen kann es im motorischen Betrieb bremsend und im generatorischen Betrieb antreibend wirken.

Mithilfe der Gleichungen 2.1 bis 2.5 lassen sich abhängig von der Kommutierungsvariante, der äußeren Belastung und der Motorparameter die wesentlichen elektrischen und mechanischen Kenngrößen eines EC-Motors in einem sich wiederholenden Prozess berechnen. Die Vorgabe der Kommutierung und die Regelung wird dabei vom vorangeschalteten Motorregler übernommen.

2.2.3 Motorregelung

Aufgabe des Motorreglers ist neben der Kommutierung auch die Überwachung und Regelung des elektrischen Antriebs. Hierzu werden entsprechend der Ausführung dynamisch Motorgrößen gemessen und mit definierten Sollgrößen verglichen. Je nach Abweichung

von Soll- und Istwert berechnet der Regler die einzustellenden Eingangsgrößen des Motors und nimmt so Einfluss auf die gemessenen Ausgangsgrößen. Die einzelnen Regler sind dabei gemäß Abbildung 2.4 ineinander verschachtelt und liegen als Kaskadenregelung vor [34].

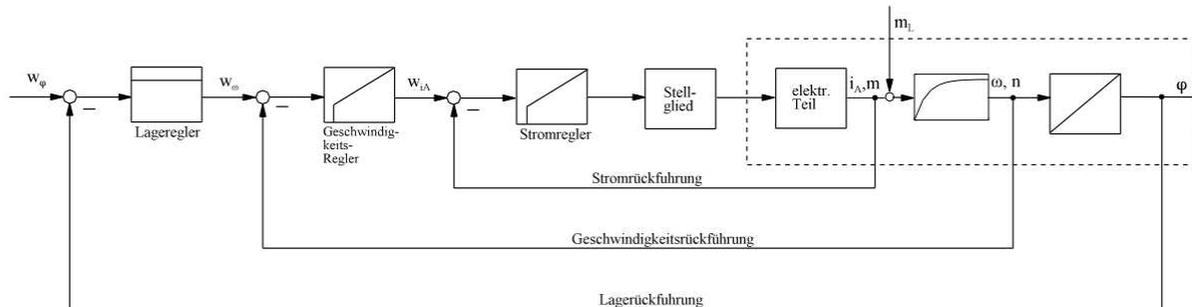


Abbildung 2.4: Kaskadierter Aufbau eines Motorreglers [34]

Geregt werden in einer verfügbaren Struktur in [35] das Drehmoment bzw. der Motorstrom sowie die Rotordrehzahl und dessen Position. Als endgültige Führungsgröße dient die am Motor anliegende Phasenspannung durch Vorgabe einer Kommutierungslogik wie der PWM. Ein Vorteil des kaskadierten Aufbaus ist neben dem vereinfachten Reglerentwurf im Vergleich zu einem großen Regler auch die schnellere Reaktion auf einzelne Störgrößen innerhalb eines Regelkreises. Allerdings ist hierzu für jede zu regelnde Größe eine Datenerfassung und ein eigenständiger Regler notwendig [32].

Die Reihenfolge der einzelnen Regler innerhalb der Kaskadenregelung wird durch die zeitliche Abfolge der Ausgangsgrößen des Motormodells vorgegeben. Aus den Gleichungen 2.1 bis 2.5 lässt sich diese zeitliche Reihenfolge zu

$$\text{Position} \longrightarrow \text{Kommutierung} \longrightarrow \text{Strom} \longrightarrow \text{Drehzahl} \longrightarrow \text{Position} \dots$$

ableiten. Für die Regler ergibt sich hierdurch die Einhaltung der Reihenfolge

$$\text{Positionsregler} \longrightarrow \text{Drehzahlregler} \longrightarrow \text{Stromregler}$$

Wegen des direkten Zusammenhangs von Strom und Moment, wird der Stromregler häufig auch Momentenregler genannt, während der Drehzahlregler auch als Geschwindigkeitsregler anzutreffen ist [35].

Die Ausführung der einzelnen Regler kann von einem reinen P-Regler bis zu einem PID-Regler variieren. Wichtig ist neben der Einhaltung der Reihenfolge auch die zeitliche

Ansteuerung. Die Taktung muss dabei von innen nach außen abnehmen [32]. In der Praxis bedeutet dies, dass der innere Stromregler häufiger aufgerufen wird als die äußeren Drehzahl- und Positionsregler.

2.3 Lithium-Ionen-Batteriesysteme

Als Energiespeicher kommen in mobilen elektrischen Antriebssystemen üblicherweise wiederaufladbare Sekundärbatterien zum Einsatz [36]. Als Batterie wird dabei eine Zusammenschaltung mehrerer galvanischer Zellen bezeichnet [17], welche die gespeicherte chemische Energie in nutzbare elektrische Form umwandeln; im Falle einer Sekundärzelle auch umgekehrt. Analog zum Elektromotor existieren auch bei der Energieversorgung von mobilen Systemen zahlreiche Varianten. So eignen sich grundsätzlich alle Batterietypen, von einer Bleibatterie bis zum Hochleistungskondensator, für den Einsatz in einem elektrischen Antriebssystem. Im Bereich der Elektromobilität haben sich jedoch überwiegend Nickelmetallhydridsysteme sowie Lithium-Ionen-Batterien wegen ihrer hohen Energiedichte und Spitzenleistung durchgesetzt [17]. Der folgende Abschnitt erläutert am Beispiel einer Lithium-Ionen-Zelle die relevanten Funktionen des Batteriesystems. Die Schwerpunkte sind dabei die allgemeine Funktion und die Modellierung solcher Systeme sowie eine Einführung in das Batteriemangement. Weiterführende Informationen zu Lithium-Ionen- und alternativen Batteriesystemen sind in [17] und [36] aufgeführt.

2.3.1 Aufbau und Funktion

Die Hauptbestandteile der galvanischen Zelle eines Lithium-Ionen-Systems sind ein Elektrodenpaar, bestehend aus Anode und Kathode, ein Elektrolyt sowie ein Separator [17]. Einen schematischen Überblick über den Aufbau einer Zelle liefert die nachfolgende Abbildung 2.5.

An der Anode, welche aus mehreren Graphitschichten besteht, findet unter Abgabe eines Elektrons eine Oxidation des eingelagerten Lithiums zu einem positiv geladenen Ion statt. Dieses Ion wandert durch den Elektrolyten, einer meist wässrigen Lösung, an die Kathode, wo es unter Aufnahme eines Elektrons wieder zu Lithium reduziert wird und sich zu einem Metalloxid verbindet [38]. Der Separator verhindert einen direkten Übergang der Elektronen von Anode zu Kathode innerhalb der Zelle. Die Bewegung der Elektronen zwischen den Elektroden außerhalb der Zelle bewirkt einen nutzbaren Stromfluss. Beim Laden der Zelle kehrt sich dieser Prozess um, allerdings bleibt die festgelegte Bezeichnung für die Anode und Kathode erhalten [39].

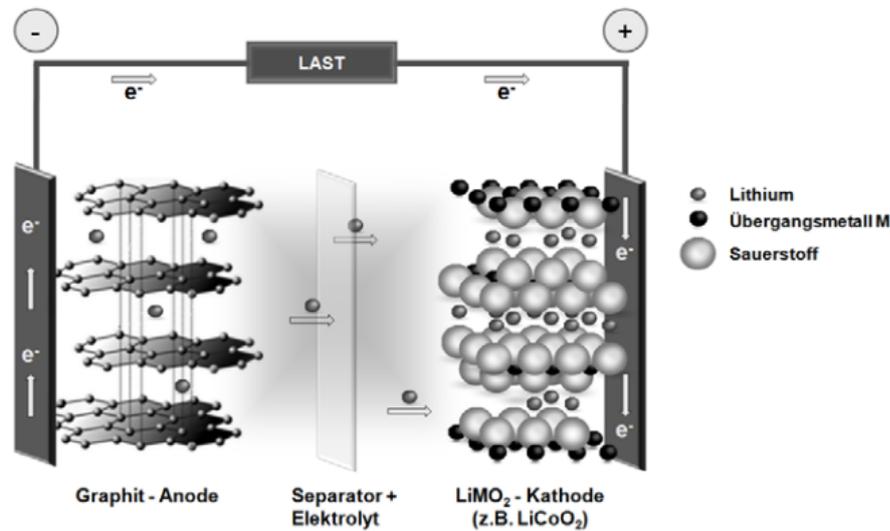


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung einer Lithium-Ionen-Zelle [17]

Während das Anodenmaterial stets aus mehreren Graphitschichten besteht, kann die Zusammensetzung des Elektrodenmaterials an der Kathode variieren. Als Übergangsmetall wird neben der oben abgebildeten Lithiumkobaltverbindung auch eine entsprechende Mangan- oder eine Eisenphosphatverbindung eingesetzt. Da Lithium von allen Metallen das höchste Normalpotenzial besitzt [39] und eine geringe Dichte aufweist, ist es als Verbindungsbestandteil in allen Systemen enthalten [38].

Die Effizienz einer Zelle wird hauptsächlich durch die vorherrschende Temperatur sowie die Geschwindigkeit des Entladeprozesses durch der entnommenen Stromstärke beeinträchtigt. Vor allem niedrige Temperaturen führen zu einem zähen Elektrolyten erhöhen den Widerstand innerhalb der Zelle [1]. Hinzu kommen Verluste durch ohm'sche Widerstände. Auch die chemischen Reaktionen an den Elektroden sind nicht verlustfrei und benötigen eine gewisse Zeit. Die Dauer der Diffusion des Lithium-Ions und die damit verbundene Freisetzung des Elektrons sind daher für den maximalen Stromfluss verantwortlich [17].

2.3.2 Modellierung von Li-Ionen Batterien

Ähnlich dem EC-Motormodell existieren für eine Lithium-Ionen-Batterie diverse physikalische Modelle, welche sich in Hinblick auf Umfang und Einsatzgebiet deutlich unterscheiden. Einige dieser Modelle (z. B. aus [25]) bilden die chemischen Prozesse innerhalb einer Zelle ab und beschreiben so den Ionentransport. Mögliche chemische Verluste und Alterungseffekte lassen sich auf diese Weise sehr gut abbilden. Allerdings ist der Aufwand

dieser Modelle nicht unerheblich und würde dadurch den Umfang dieser Arbeit deutlich überschreiten.

Besonders geeignet sind Modelle, welche die chemischen und physikalischen Prozesse mithilfe einer elektrischen Ersatzschaltung abbilden und in diversen Arbeiten zu finden sind. Exemplarisch wird an dieser Stelle das Modell aus [18] vorgestellt. Es ist in Abbildung 2.6 dargestellt und besteht aus einer Spannungsquelle, drei ohm'schen Widerständen sowie zwei Kondensatoren, welche parallel zu zwei der drei Widerständen angeordnet sind.

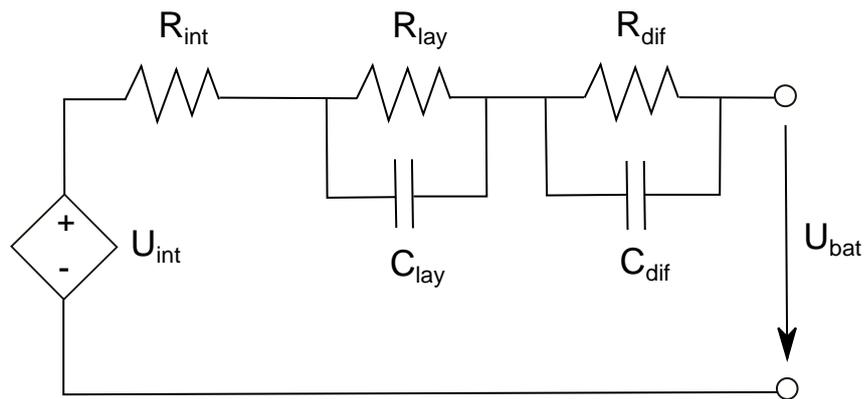


Abbildung 2.6: Ersatzschaltbild einer Lithium-Ionen-Batterie nach [18]

Die Spannungsquelle repräsentiert das chemische Spannungspotential innerhalb einer Zelle. Die drei Widerstände beschreiben die chemischen und elektrischen Verluste, welche sich hauptsächlich durch den internen ohm'schen Widerstand in den Leitern, der Diffusion des Lithium-Ions an den Elektroden und der gegenseitigen Beeinflussung von Elektrode und Elektrolyten an deren Grenzschicht ergeben [1]. Die beiden Kondensatoren repräsentieren die zeitlichen Aspekte der erläuterten Verluste. An jedem dieser Bauteile entsteht ein Spannungsabfall vom chemischen Potenzial. Zu beachten ist hierbei, dass die Kondensatoren eine elektrische Kapazität besitzen, welche sich grundlegend von der Kapazität der Batterie unterscheidet und im Modell einen rein funktionellen Stellenwert besitzen. Die effektiv nutzbare Klemmspannung der Batterie kann mit einer Gleichung nach [18] und der Zellenanzahl berechnet werden:

$$U_{bat} = (U_{int} + U_{loss}) \cdot N_{cell} \quad (2.6)$$

U_{bat} – Klemmspannung der Batterie U_{int} – internes Spannungspotenzial einer Zelle

U_{loss} – Spannungsverluste einer Zelle N_{cell} – Anzahl der Zellen

Die Spannungsverluste werden in diesem Fall zum chemischen Potenzial addiert, da sie wie in Formel 2.7 zu erkennen mit einem negativen Vorzeichen definiert werden. Die zeitlichen Verluste über den Kondensatoren und die konstanten Verluste über den Widerständen lassen sich durch die Differenzialgleichung in Form einer Matrix wie in [18] bestimmen:

$$\frac{dU_{loss}}{dt} = \begin{pmatrix} -(R_{lay} \cdot C_{lay})^{-1} & 0 \\ 0 & -(R_{dif} \cdot C_{dif})^{-1} \end{pmatrix} \cdot U_{loss} + \begin{pmatrix} -C_{lay}^{-1} \\ -C_{dif}^{-1} \end{pmatrix} \cdot I_{bat} - R_i \cdot I_{bat} \quad (2.7)$$

U_{loss} – Spannungsverluste einer Zelle	dt – zeitliche Änderung
I_{bat} – Stromfluss durch Batterie	C_{lay} – Kapazität für Grenzschichtverluste
C_{dif} – Kapazität für Diffusionsverluste	R_{lay} – Widerstand für Grenzschichtverluste
R_{dif} – Widerstand für Diffusionsverluste	R_{int} – Widerstand für interne Verluste

Das chemische Spannungspotenzial verhält sich proportional zum Entladezustand der Batterie. Diese als „state of decharge“ (SoD) bekannte Größe ist ein Quotient aus der entnommenen Energie und der maximal verfügbaren Kapazität einer Zelle. Die entnommene Energie ist dabei abhängig von der Dauer des fließenden Stroms. Für den SoD ergibt sich damit:

$$SoD = \frac{1}{Q_n} \cdot \int I_{bat} \cdot dt \quad (2.8)$$

SoD – Entladezustand	Q_n – nominelle Kapazität einer Zelle
I_{bat} – Stromfluss durch Batterie	dt – zeitliche Änderung

Da die Funktion der Zelle von der Stromstärke und der vorherrschenden Temperatur abhängig ist, wird der SoD häufig mithilfe zweier Korrekturfaktoren berechnet, welche den Einfluss des Stroms und der Batterietemperatur berücksichtigen. Über Kennlinien werden im Modell von [1] beide Faktoren in Formel 2.8 eingebunden:

$$SoD = \frac{1}{Q_n} \cdot \int \alpha(I_{bat}) \cdot \beta(T_{bat}) \cdot I_{bat} \cdot dt \quad (2.9)$$

SoD – Entladezustand	Q_n – nominelle Kapazität einer Zelle
I_{bat} – Stromfluss durch Batterie	dt – zeitliche Änderung
α – Korrekturfaktor des Stroms	β – Korrekturfaktor der Temperatur
T_{bat} – Batterietemperatur	

Die unbekannte Temperatur kann bei Verwendung geeigneter Sensorik innerhalb der Batterie entweder direkt gemessen oder ebenfalls modelliert werden. Als Ansatz für die Temperaturmodellierung dient eine Wärmebilanz der Batterie, welche die auftretenden Wärmequellen und Wärmeströme erfasst. Die elektrischen und chemischen Verluste innerhalb der Batterie wandeln sich komplett in thermische Energie um und bilden eine Wärmequelle. Abgeführt wird diese Energie zum Teil durch den Wärmeübergang von Batterie zur Umgebung. Die Differenz beider Größen bewirkt eine Veränderung der Batterietemperatur. Während das Modell in [1] nur einen Wärmeübergang berücksichtigt, beinhalten alternative Temperaturmodelle z. B. [6] auch Strahlungseffekte und Entropieänderungen. Allgemein lässt sich die Temperatur als Differenz aus Wärmequelle und Wärmeabfuhr beschreiben:

$$\frac{dT_{bat}}{dt} \cdot C_{p,cell} = U_{loss} \cdot I_{bat} - K_{cell} \cdot f(T_{amb} - T_{bat}) \quad (2.10)$$

T_{bat} – Batterietemperatur

dt – zeitliche Änderung

$C_{v,cell}$ – Wärmekapazität einer Zelle

U_{loss} – Spannungsverluste einer Zelle

I_{bat} – Stromfluss durch Batterie

K_{cell} – Wärmeaustauschkonstante einer Zelle

T_{amb} – Umgebungstemperatur

Die Ableitung der Batterietemperatur nach der Zeit beschreibt zusammen mit der spezifischen Wärmekapazität der Batterie die Änderung der inneren Energie. Diese ergibt sich aus der Differenz der Wärmequelle und der abgeführten Wärme, welche zusammen mit einer Wärmeaustauschkonstanten eine Funktion der Temperaturdifferenz zwischen der Umgebung und der Batterie ist.

2.3.3 Batteriemangement

Das Batteriesystem verfügt zur Überwachung ein eigenständiges Kontrollsystem. Die Aufgabe dieses Batteriemangements ist die Überwachung des Batteriestatus zum Schutz vor thermischen und elektrischen Schäden. Besonders der Batterietemperatur kommt dabei eine große Bedeutung zu. Während tiefe Temperaturen hauptsächlich die Leistungsfähigkeit der Zelle aber nicht deren Sicherheit beeinflussen, können hohe Temperaturen zu starken Schäden führen und unter Umständen ein Zersetzen des Separators verursachen. Der resultierende Kurzschluss in der Zelle führt zu einer weiteren Temperatursteigerung und erhöht das Explosionsrisiko. Diese Kettenreaktion wird oft als „thermal runaway“ bezeichnet [39].

Eine Überwachung des Ladezustands ist ebenfalls notwendig, da die Batterie zum Schutz vor irreversible Kapazitätsverluste nicht tiefentladen werden sollte [1]. Die Spannungsgrenze bei einer Entladung liegt deshalb deutlich über dem theoretischen Wert von 0 V. Auch während des Ladeprozesses ist der Zustand der Batterie zur Vermeidung einer Überladung zu überwachen.

2.4 Pedelecs und E-Bikes

Die Umsetzung des allgemeinen Modellierungskonzepts erfolgt in dieser Arbeit am Beispiel eines Elektrofahrrads, welches zu der Kategorie der Light Electric Vehicles gehört [26] und im Wesentlichen in zwei Varianten unterteilt ist:

- Pedelecs
- E-Bikes

Die Bezeichnung Pedelec gilt Fahrrädern, welche dem Fahrer bei der Trittbewegung eine motorische Unterstützung liefern. Solange keine Bewegung der Pedale durch den Fahrer erfolgt, liefert auch der Motor keinen Antrieb. Rechtlich gelten Pedelecs deshalb als reine Fahrräder und dürfen trotz der motorischen Unterstützung ohne eine spezielle Fahrerlaubnis betrieben werden [11]. Allerdings sind die hierbei zum Einsatz kommenden Motoren in ihrer Nennleistung auf 250 W begrenzt und dürfen nur bis zu einer Geschwindigkeit von 25 km/h antreibend tätig sein [28]. Wünscht der Fahrer eine höhere Geschwindigkeit, so muss er die zusätzlich notwendige Leistung alleine aufbringen.

Die zweite häufig anzutreffende Kategorie ist die der E-Bikes. Im Gegensatz zum Pedelec unterstützt der zum Einsatz kommende Motor auch bei ausbleibender Pedalbewegung den Fahrer. Gesteuert wird die Motorleistung dabei über einen Gasgriff am Lenker [28]. Dadurch zählen die E-Bikes rechtlich zu den Leichtmofas und erfordern eine Mofa-Fahrerlaubnis. Ihre Geschwindigkeit darf 25 km/h ebenfalls nicht überschreiten, allerdings ist ihre maximale Nennleistung mit 500 W höher als die der Pedelecs [11].

Weitere Elektrofahrradtypen, wie etwa das S-Pedelec, dessen Geschwindigkeit und Leistung nicht auf 25 km/h bzw. 250 W begrenzt sind, werden an dieser Stelle nicht näher betrachtet, da die gesetzliche Regelung dieser Fahrzeuge noch nicht einheitlich ist.

2.4.1 Aufbau und Komponenten

Der wesentliche Unterschied zu einem normalen Fahrrad ist bei der elektrischen Variante der Motor, welcher meistens als Radnabenmotor im Vorder- oder Hinterrad verbaut ist. Weniger gebräuchlich aber durchaus möglich ist das Mittelmotorkonzept, bei dem der Motor im Trittlager positioniert und über die Kette mit dem Hinterrad verbunden ist [11]. Einen Überblick über die Anordnung von Motor und den weiteren wichtigen Komponenten ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Je nach Anforderung und Konzept ist die Übersetzung vom Motor auf das Rad konstant oder durch Nutzung eines Planetengetriebes variabel.

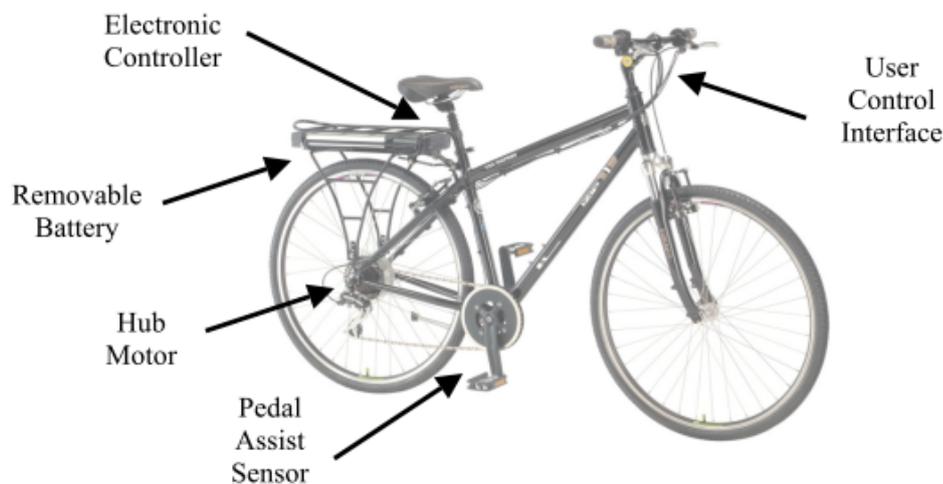


Abbildung 2.7: Wesentliche Komponenten an einem Elektrofahrrad [7]

Zweiter wichtiger Bestandteil ist das Batteriesystem, welches häufig unterhalb des Sattels oder in der Nähe des Gepäckträgers installiert ist, und den Motor mit elektrischer Energie versorgt. Unterstützt die Fahrradvariante eine Rekuperation kann die Batterie die beim Bremsen aufgebrachte Energie speichern [11]. In der Praxis haben sich bei den Elektrofahrrädern die beschriebenen Lithium-Ionen-Akkus durchgesetzt [28].

Überwacht und geregelt werden Motor und Batterie von einem Leistungsmanagement, welches als zentrales Element alle Komponenten bedient [15]. Eine Alternative stellt die eigenständige Regelung von Motor, Batterie und Gesamtsystem durch separate Regler da. Diese bilden dabei das Bindeglied zwischen den Fahrereingaben und dem Motor.

2.4.2 Mensch–Maschine–Schnittstelle

Vor allem Pedelecs sind auf eine gute Schnittstelle zum Fahrer angewiesen, da sie nur bei Pedalbetätigung unterstützend tätig sind. Die Überwachung der Pedalbewegung ist

daher von essentieller Bedeutung. Die einfachste Form ist hierbei die Verwendung eines Bewegungssensors [11], welcher auf der Tretlagerachse neben dem Kurbelarm verbaut ist. Vorteilhaft bei dieser Lösung ist die einfache Nachrüstbarkeit sowie der geringere Applikationsaufwand in der Leistungselektronik, da jederzeit die volle Motorunterstützung unabhängig von der Pedalkraft aufgebracht wird [11]. Einzig der gewählte Modus kann in diesem Fall die Unterstützung reduzieren.

Eine weitere Form der Erfassung des Fahrerwunsches ist die Messung der Pedalkraft mittels eines Drehmomentsensors. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass eine dosierte Motorunterstützung je nach erfasster Pedalkraft möglich ist [11]. Problematisch ist bei dieser Lösung die notwendige intelligente Kraftunterstützung, welche auch bei starker Pedalkraft beim Anfahren eine gemäßigte ruckelfreie Fahrt gewähren muss. Zu diesem Zweck werden neben der Pedalkraft häufig auch die Trittfrequenz und die Geschwindigkeit zur Berechnung der Unterstützung mit einbezogen [11].

Neben der eher passiven Vorgabe der Last hat der Fahrer die Möglichkeit die Unterstützung durch den Motor direkt auszuwählen. Dies kann entweder indirekt durch Auswahl definierter Modi (Eco, Sport, usw.) oder durch direkte Vorgabe eines Unterstützungsgrads erfolgen. Diese Vorgabe kann auch während der Fahrt verändert werden. Als Schnittstelle dient hierbei häufig ein Display, über welches der Fahrer nicht nur die Unterstützung wählen kann, sondern auch Informationen über den Ladezustand der Batterie oder der zurückgelegten Strecke erhält [11].

2.5 Relevante Grundlagen der Regelungstechnik

In vielen elektrischen Systemen sind durch das Zusammenspiel von Motor und der Antriebsregelung dynamische Regelkreise anzutreffen. Der offene Kreis des Elektromotors wird dabei durch einen oder mehrere Regler geschlossen. Um ein Aufschwingen zu vermeiden, ist bei solchen Regelkreisen neben den optimalen Übertragungsverhalten auch ein stabiler Regelvorgang wichtig. Da die Parameterwerte der Regelstrecke durch die Konstruktion des Motors vorgegeben sind, kann das Verhalten der Regelung nur über die Veränderung der einzelnen Reglerparameter angepasst werden.

2.5.1 Übertragungsverhalten von Regelkreisen

In der Regelungstechnik wird dieses Verhalten für gewöhnlich anhand der Übertragungsfunktion des Regelkreises bewertet. Diese ist das Verhältnis von Ausgangs- und Eingangs-

größe des betrachteten Systems. Da es sich hierbei häufig um Differenzialgleichungen handelt, wird die Übertragungsfunktion mittels der Laplace-Variablen beschrieben [32]:

$$\frac{\text{Ausgangsgröße}(s)}{\text{Eingangsgröße}(s)} = \text{Übertragungsfunktion}(s) \quad (2.11)$$

s – komplexe Laplace-Variablen

Neben der direkten Vorgabe der zu regelnden Größe durch einen Führungswert kann auch eine äußere Störung als Eingang am Regelkreis anliegen und eine Änderung des Systemausgangs erzeugen. Weil sich die Eingangsgrößen in beiden Fällen unterscheiden, sind auch die Zähler der Übertragungsfunktionen von Führungsgröße und Störung verschieden. Ihre Nenner sind jedoch stets identisch, da der betrachtete Regelkreis konstant bleibt [32]. Sein Übertragungsverhalten wird in der Regelungstechnik häufig über eine Analyse der Polstellen der Übertragungsfunktion bewertet. Hierzu wird die Laplace-Variablen durch die imaginäre Einheit ersetzt und der Nenner der entstehenden komplexen Übertragungsfunktion in seinen Real- und Imaginärteil zerlegt. Die Bewertung des Regelkreises anhand seiner Polstellen erfolgt in einem geeigneten Wurzelortsdiaagramm [29].

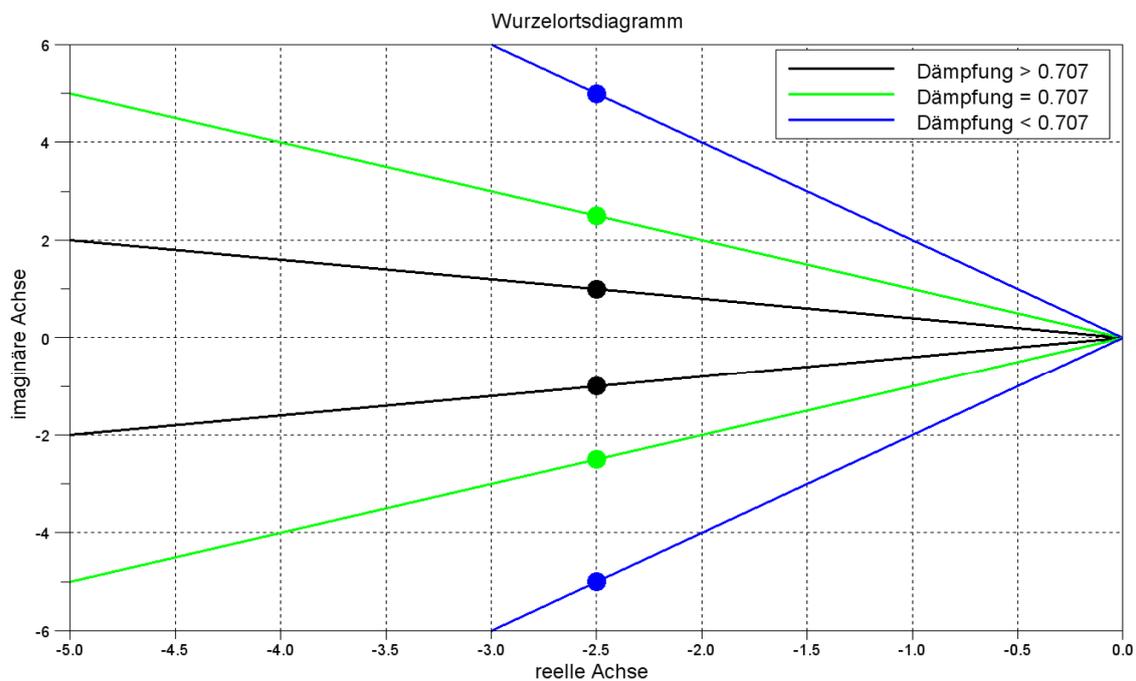


Abbildung 2.8: Lage der Polstellen verschiedener Regelkreise

Die Lage der Polstellen in der vorangehenden Abbildung 2.8 gibt Aufschluss über das Übertragungsverhalten verschiedener Regelkreise. Bei den grün dargestellten Polstellen sind der Imaginär- und der Realanteil gleich groß und liegen auf einer Geraden, welche einen Winkel von 45° besitzt. Die auf diese Weise erzielte Dämpfung stellt einen üblichen Mittelwert zwischen der großen Dämpfung der in schwarz dargestellten Polstellen und der geringen Dämpfung der blauen Polstellen dar. Der Kompromiss zwischen einem schnellen Regler und einem geringen Überschwingen ist bei den grünen Polstellen am besten ausgeprägt [29].

Gleichzeitig ist die erzielte Dämpfung im Übertragungsverhalten sowohl bei der Führungsgröße als auch bei der Störgröße im ähnlichen Maß anzutreffen [32]. Eine niedrige Dämpfung reduziert zum einen die Wirkung einer äußeren Störung auf die Regelung. Die Änderung der Führungsgröße führt allerdings zu einem starken Überschwingen der zu regelnden Größe. Bei der in schwarz dargestellten höheren Dämpfung ist die Reaktion entsprechend umgekehrt. Um einen guten Kompromiss zwischen der Reaktion von Führung und Störung zu erreichen, ist deshalb eine Lage der Polstellen in der Nähe der in grün gekennzeichneten Geraden umzusetzen. Überwiegt eine der genannten Eingangsgrößen bei manchen Systemen, kann die Lage der Polstellen zur Optimierung von dieser Geraden abweichen.

2.5.2 Stabilitätskriterien von Regelkreisen

Eine verbreitete Möglichkeit die Stabilität von geschlossenen Regelkreisen sicherzustellen ist die Erfüllung des Nyquist-Stabilitätskriterium in einem gleichnamigen Diagramm. Das folgende Diagramm in Abbildung 2.9 zeigt die Übertragungsfunktionen zweier Regelkreise in der Darstellung nach Nyquist. Entscheidend ist an dieser Stelle die Lage der Kurven im Bezug zum kritischen Punkt bei -1 auf der reellen Achse [29]. Bei der in grün abgebildeten Übertragungsfunktion liegt dieser Punkt bei einem Durchlauf in Pfeilrichtung auf der linken Seite. Dieser Regelkreis gilt deshalb als stabil [29]. Bei der in rot dargestellten instabilen Übertragungsfunktion liegt der kritischer Punkt hingegen auf der rechten Seite. Weiterführende Informationen zur Herleitung und Bewertung von Nyquist-Diagrammen sowie zu der Analyse der Polstellen können in geeigneter Literatur, z. B. [29] oder [32], nachgelesen werden.

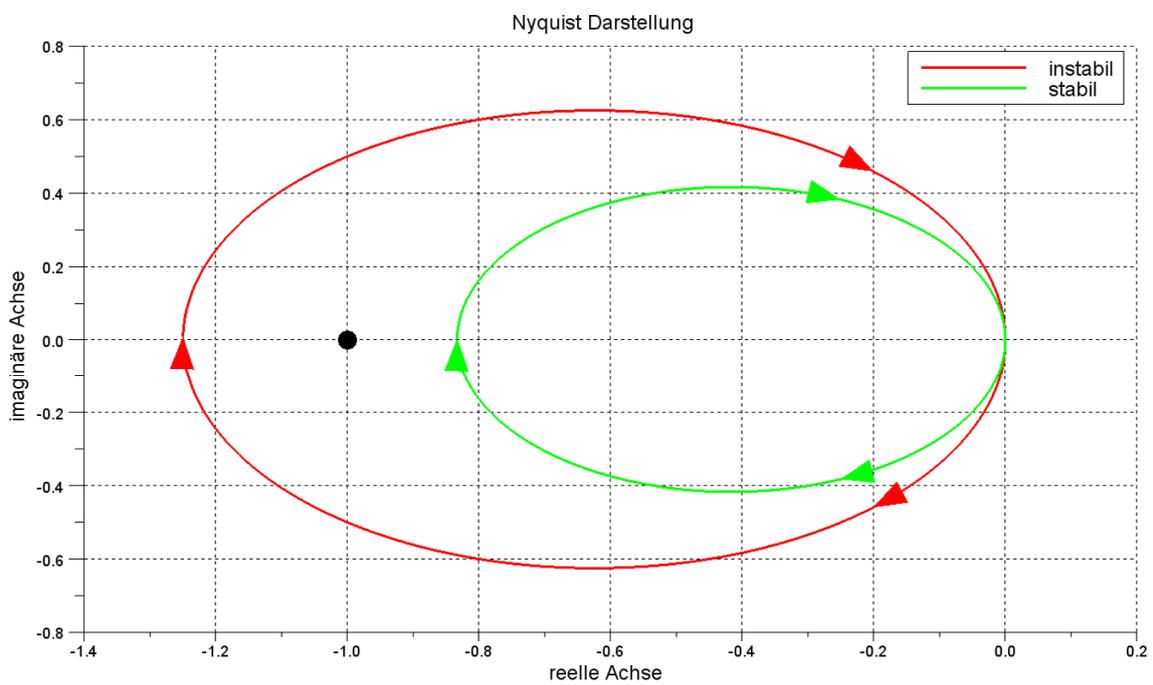


Abbildung 2.9: Stabilitätskriterium nach Nyquist für verschiedene Regelkreise

3 Universelles Modellierungskonzept für mobile elektrische Antriebssysteme

Die Entwicklung einer allgemeingültigen Strategie zur Modellierung von mobilen elektrischen Antriebssystemen ist der Kernpunkt dieser Arbeit und fungiert als Basis für weiterführende Detaillösungen. Besonderer Bedeutung kommt dabei dem modularen Aufbau aus wiederkehrenden Standardelementen zu. Dieses Kapitel erklärt die notwendigen Schritte zur Entwicklung des Modells aus den unterschiedlichen Anforderungen realer Systeme. Zusätzlich werden die Möglichkeiten der einzelnen Modellbestandteile und die verschiedenen Ausführungen näher beschrieben, bevor im nachfolgenden Kapitel die praktische Umsetzung am Beispiel eines Elektrofahrrads erfolgt.

3.1 Anforderungen an das Gesamtsystem

Beim Übergang von realen detaillierten Systemen zu einem allgemeinen Konzept für mobile elektrische Antriebssysteme ist darauf zu achten, alle grundlegenden Bestandteile zu erfassen ohne bereits Einschränkungen bei der Modellanwendung hervorzurufen. Es muss deshalb eine Schnittmenge der gebräuchlichen Anwendungen anhand deren Anforderungen gefunden werden.

Die Kernaufgabe elektrischer Antriebe ist die Umwandlung von elektrischer Energie in eine kraft- und eine weggebende Komponente der mechanischen Energieform. Die Leistung der Systeme umspannt aufgrund ihrer großen Einsatzgebiete von kleinen Power Tools wie Haushaltsgeräten bis zu leistungsstarken Fahrzeugantrieben einen weiten Bereich. Die einzelnen Maschinenparameter beeinträchtigen das Betriebsverhalten und die in der folgenden Tabelle 3.1 aufgeführten Leistungsklassen maßgeblich.

Zu erkennen sind in der tabellarischen Auflistung auch die verschiedenen Betriebsstrategien und Anforderungen diverser Systeme. Während die meisten Geräte nur eine antreibende Funktion besitzen, wird besonders in der Elektromobilität auch eine bremsende Wirkung gewünscht. In diesem generatorischen Betrieb ist eine Rekuperation der Bewegungsenergie in den elektrischen Energiespeicher möglich. Viele dieser Antriebe arbeiten deshalb in einem 4-Quadranten-Betrieb und benötigen eine umfangreiche Überwachung der Leistung mittels einer Kraft- und einer Drehzahlregelung. Bei Produktionsanlagen

und in der Robotik ist darüber hinaus eine exakte Positionserfassung und –regelung erforderlich [33].

Antriebssystem	Betrieb	Leistungsbereich	Regelung
Power Tools	Motor	W	Leistung, Position
PKW, LKW	Motor, Generator	kW	Leistung
Elektrofahrrad	Motor, Generator	W–kW	Leistung
Küchengeräte	Motor	W	Leistung
Roboter	Motor	W	Leistung, Position
Anlagen	Motor	W–MW	Leistung, Position
Windkraft	Generator	kW–MW	Leistung

Tabelle 3.1: Anforderungsprofile von unterschiedlichen elektrischen Antrieben

Bei allen oben erwähnten Systemen treten im Betrieb Verluste bei der Energiewandlung auf. Infolge Reibung existieren diese Verluste in der Mechanik und durch ohm'sche Widerstände auch auf der elektrischen Seite. Beide Arten bestimmen zusammen den Wirkungsgrad der Systeme.

Die in Tabelle 3.1 aufgeführten Aspekte beschreiben die wesentlichen Anforderungen aller elektrischen Antriebe. Jedes System besitzt zusätzlich individuelle Aufgaben wie ein geräuscharmer Betrieb oder eine elektromagnetische Verträglichkeit. Diese Punkte werden in der allgemeinen Modellierung nicht erfasst, da sie je nach Anwendungsfall stark variieren und sehr ergebnisbezogen sind. Eine weitere wichtige Modellanforderung ist hingegen eine ressourcenschonende Implementierung. Vor allem bei der Einbindung realer Hardware ist eine echtzeitfähige Simulation wünschenswert.

Für das zu modellierende allgemeingültige Gesamtsystem ergeben sich zusammengefasst folgende Aufgaben:

- 4–Quadranten–Betrieb des Antriebs
- Wirkungsgrad < 1
- Regelung von Leistungsgrößen und Position
- uneingeschränkter Leistungsbereich
- parametrierbare Bauteilkennwerte
- ressourcenschonende Modellierung

3.2 Modularer Aufbau des Antriebssystems

Ausgehend von den Anforderungen elektrischer Antriebssysteme lassen sich eigenständige Module zur Simulation dieser Systeme ableiten. Das Modellierungskonzept beschreibt die Verbindung der einzelnen Bausteine zu einem Ganzen. Die Hauptbestandteile des gesamten Modells bilden die drei in Abschnitt 2.1 vorgestellten Grundbausteine für die Energieversorgung, den elektrischen Antrieb und die mechanische Belastung. Eine Übersicht über den Aufbau des Gesamtmodells ist in der nachfolgenden Abbildung 3.1 dargestellt.

Darüber hinaus beinhaltet das Konzept Schnittstellen zu einem möglichen Hybridmodul oder zu eventuell vorhandener Leistungselektronik. Während das Hybridmodul eine zweite Antriebsart berücksichtigt, repräsentiert die Leistungselektronik die Überwachungsblöcke für den Elektromotor oder die Energiequelle. Diese Zusatzmodule sind für einen ordnungsgemäßen Gebrauch nicht erforderlich und können im Gegensatz zu den essentiellen Hauptbestandteilen je nach Anwendung entfallen.

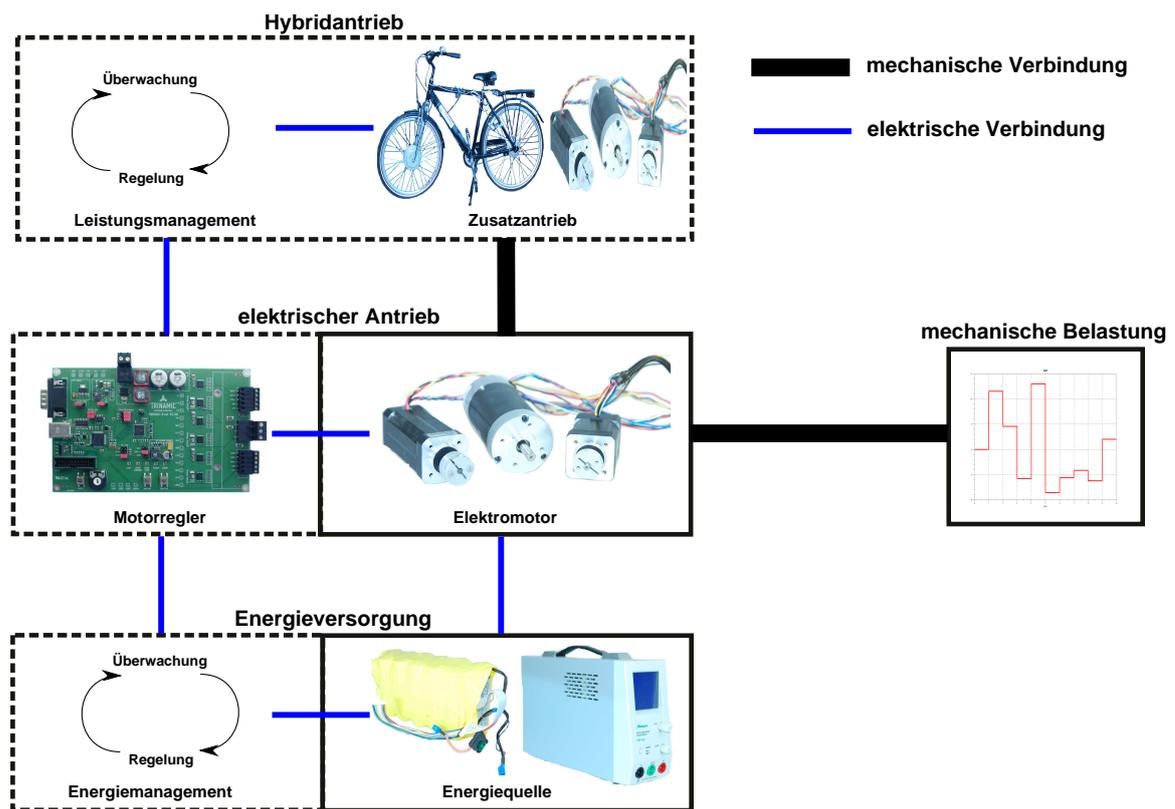


Abbildung 3.1: Modularer Aufbau des Gesamtkonzepts

Um eine Trennung der elektrischen Module von den mechanischen erkenntlich zu gestalten, ist die Anordnung der Module nach Abbildung 3.1 ebenfalls vorgegeben. Der

Elektromotor dient dabei als Verbindungsglied zwischen der Elektrik und der Mechanik. Diese Trennung hat für die Simulation erhebliche Vorteile. So lässt sich zum einen bei der Einbindung realer Hardware sowohl der komplette elektrische Zweig als auch der mechanische leicht durch real existierende Baugruppen ersetzen. Zum anderen werden dadurch Voraussetzungen für eine von der Software unabhängige Gesamtsimulation geschaffen, da viele Simulationstools eine Modellierung anhand elektrischer Bausteine unterstützen. In diesem Fall lassen sich die Schnittstellen der elektrischen Module als Stromflüsse abbilden. Alternative Simulationstools ohne diese Unterstützung bilden hingegen sowohl die elektrischen wie auch die mechanischen Schnittstellen als reine Signalflüsse ab.

Neben der Trennung von Elektrik und Mechanik unterstützt das Gesamtkonzept den Austausch und die Parametrierbarkeit einzelner Bausteine. Die individuellen Systemparameter wie die Nennspannung der Energieversorgung oder die Motorkennwerte können gezielt geändert werden, ohne andere Module direkt zu beeinflussen. Bei Bedarf ist auch ein Austausch kompletter Module durch alternative Blöcke oder das Löschen dieser Module realisierbar. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise Module mit geringem Umfang durch komplexere detaillierte Lösungen ersetzen. Die eigenständigen Modelle müssen dabei nicht selber entwickelt werden, sondern können auch einer alternativen Arbeit entstammen.

Der Umfang und die damit verbundene Simulationsdauer des Gesamtkonzeptes variieren je nach Komplexität und Modellierungstiefe der Einzelmodule. Die Simulation eines geregelten Batteriesystems kann beispielsweise deutlich mehr Rechenressourcen erfordern als eine Modellierung einer gleichmäßigen Stromentnahme aus einer konstanten Spannungsquelle.

Die nächsten Seiten beschreiben die Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Module sowie deren funktionellen Inhalte. Zusätzlich zeigen Strategien zur Entwicklung von Schnittstellen zwischen den Modulen an welchen Punkten sich gegebenenfalls reale Bauteile in die Simulation einbinden lassen.

3.3 Modellierung des Antriebs

Der elektrische Antrieb besteht im Wesentlichen aus einem Modul für den Elektromotor. Bei einer elektrisch kommutierten Maschine oder einem geregelten System kann dem Motormodul bei Bedarf eine Regelung vorangestellt werden. Diese bildet zusammen mit dem Motor eine Einheit und ist deshalb je nach verwendetem Modell auszuwählen und einzustellen.

3.3.1 Motormodul

Das Motormodul stellt das Kernstück des Gesamtkonzepts dar und ist die Schnittstelle zwischen dem elektrischen und dem mechanischen Pfad. Die einzige elektrische Eingangsgröße ist die angelegte Spannung. Je nach Ausführung und Modell kann diese entweder direkt aus der Spannungsquelle entnommen werden oder ist durch die Leistungselektronik vorgegeben, sofern hierfür ein Modul implementiert ist. Die Ausgangsgröße für den elektrischen Pfad ist der sich einstellende Stromfluss im Motor.

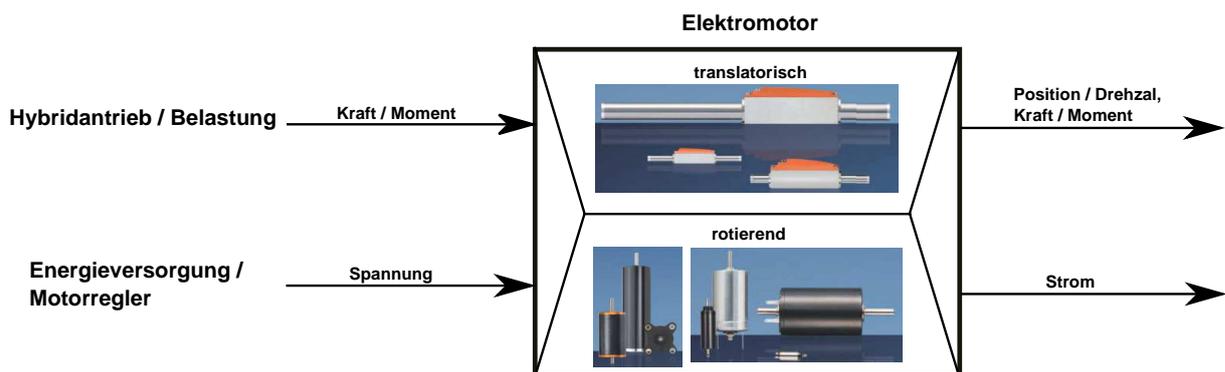


Abbildung 3.2: Signalfluss im Motormodul (Bilder aus [9])

Auf der mechanischen Seite unterscheiden sich die Ein- und Ausgangsgrößen je nach Motorausführung. Im Falle einer rotierenden Maschine bewirkt eine von außen zugeführte Belastung in Form eines Moments eine Drehung des Rotors. Als Ausgangsgrößen stellen sich die Drehzahl und das erzeugte Drehmoment ein. Bei einem translatorisch wirkenden Linearantrieb generiert der Stromfluss eine Motorposition und eine Kraft. In diesem Fall muss die Eingangsgröße auch einer Belastung in Form einer Kraft entsprechen. Sofern das zu untersuchende Gesamtsystem über einen Hybridantrieb verfügt, kann dessen Wirkung ebenfalls als eine Art der Belastung angesehen werden. Die tatsächliche Belastung und das Ergebnis des Hybridantriebs sind dann innerhalb oder außerhalb des Motormoduls zu einer Gesamtlast kombinierbar. Eine schematische Übersicht über die Ein- und Ausgangsgrößen des Motormoduls ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Zu beachten ist im Modul die Vorzeichendefinition der Ein- und Ausgangsgrößen, welche im Gesamtkonzept individuell festgelegt werden kann aber konsequent einzuhalten ist. Vorteilhaft ist an dieser Stelle eine Festlegung, welche sich nach der gebräuchlichen Arbeitsweise von Elektromotoren innerhalb von vier Quadranten richtet (z. B. in [22]). Die motorische Wirkweise bei identischen Vorzeichen der kraft- und der weggebenden Motorkomponenten ist in der folgenden Abbildung 3.3 ersichtlich. In diesem Fall wird der

Motor bei positiver Bewegung mit einer positiven Kraft belastet und bewirkt einen positiven Stromfluss. Ändert sich die Drehrichtung kehren sich alle Vorzeichen um und der Motor wechselt von Quadrant I zu III. Unterscheiden sich die Vorzeichen von Bewegung und Last bzw. Strom, deutet dies auf eine bremsende Funktion und einen generatorischen Betrieb in Quadrant II oder IV hin. Diese Fälle erlauben eine Rekuperation der Energie aus dem Motor in den Energiespeicher, sofern dies im System gewünscht und unterstützt wird. Ist eine generatorische Funktionsweise des Motormodells unerwünscht, lässt sich dies über geeignete Modellierungsstrategien wie eine Begrenzung der Belastung oder der Bewegung realisieren.

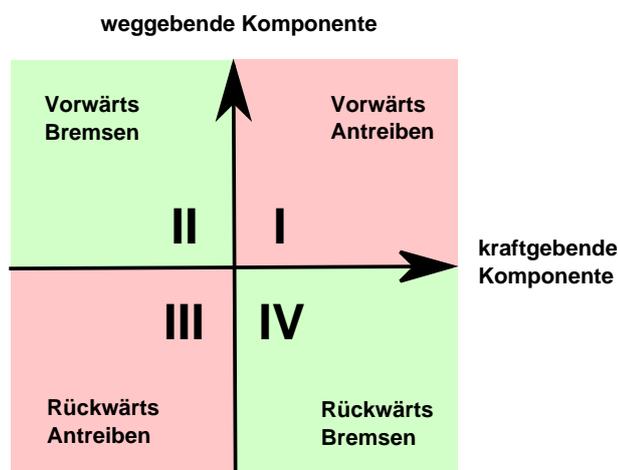


Abbildung 3.3: 4-Quadranten-Betrieb des Motormodells

Die eingehende Spannung sollte vorzugsweise nicht vorzeichenbehaftet sein. Bei Systemen mit Wechselspannung erreicht eine Phasenverschiebung die gewünschte Umpolung. Elektrisch modellierte Systeme mit einer Gleichspannungsquelle lassen sich durch einen Wechsel der Anschlüsse ebenfalls problemlos umpolen. Einzig bei mathematisch modellierten Gleichstromquellen kann eine Umpolung durch Vorgabe einer negativen Spannung erreicht werden, gleichwohl in diesem Fall die Einbindung realer Hardware erschwert ist.

Innerhalb des Motormoduls findet abhängig von der Bauart, d. h. dem Modell, die Berechnung des Stroms und der Drehzahl oder der Position statt. Dies geschieht bei Elektromotoren in einem wiederkehrenden Prozess. Die eingehende Spannung bewirkt zusammen mit der induzierten BEMF, welche entweder als Kennfeld oder über mathematische Zusammenhänge vorgegeben wird, einen Stromfluss. Dieser Vorgang lässt sich je nach Wunsch entweder ebenfalls rein mathematisch oder mittels elektrischer Bausteine modellieren, sofern dies von der Software unterstützt wird. Die Berechnungsschritte sind abhängig von der Motorbauart und teilweise sehr komplex. Der Übergang vom elektrischen zum me-

chanischen Pfad erfolgt im Motormodul stets physikalisch über die Momentenberechnung aus dem Strom und den Maschinenkennwerten.

Neben diesen Basisfunktionen lässt sich das Motormodul je nach Anwendungsfall auch um verschiedene Teilmodule erweitern. Eine vom Stromfluss ausgehende Modellierung der Motortemperatur ist ebenso möglich wie die Berechnung der mechanischen Beanspruchung auf die Lager. Solche speziellen Untersuchungen verlangen allerdings eine umfangreiche Modellierung und sollten nicht in Kombination mit anderen aufwendigen Modulen aus dem Gesamtkonzept in Verbindung gebracht werden.

Je nach Umfang und Ausstattung können bestimmte Blöcke im Motormodul durch Einbindung gemessener Variablen komplett entfallen oder ausgetauscht werden. Anhand einer Messung von Motordrehzahl bzw. -position und dem Strom lässt sich das Motormodul innerhalb des Gesamtkonzeptes durch einen realen Motor ersetzen. Die Ansteuerung erfolgt dann wahlweise über einen realen Regler oder ein passendes Reglermodell. Die Belastung auf den Motor kann beispielsweise durch ein konstantes Klemmmoment oder einen gekoppelten zusätzlichen Motor auch variabel realisiert werden. Eine alternative Möglichkeit, welche überwiegend für etwaige Testzwecke sinnvoll ist, stellt die parallele Betreibung von einem realen Motor und dem Modell dar.

3.3.2 Motorregelung

Neben dem Motor zählt auch das Modul für dessen Regler zum elektrischen Antrieb. Im Gegensatz zum Motor ist die Verwendung dieses Modells im Gesamtkonzept nicht zwingend erforderlich und ist je nach Motortyp auszuwählen. Geeignete Motormodelle wie z. B. eine einfache Gleichstrommaschine mit Kohlebürsten können auch ohne einen Regler erfolgreich betrieben werden. Einem elektrisch kommutierten Antrieb muss hingegen immer eine Reglereinheit vorangestellt sein.

Gemäß den Grundlagen in Abschnitt 2.2.3 steuert und überwacht die Elektronik den Elektromotor. Hierzu existieren innerhalb des Antriebsmoduls verschiedene Schnittstellen zwischen den beteiligten Blöcken, welche in der unten stehenden Abbildung 3.4 schematisch aufgezeigt sind. Einzige Ausgangsgröße des Moduls ist die am Motor anliegende Spannung, welche sich abhängig von Art der Kommutierung unterschiedlich darstellt. Beeinflusst wird die Kommutierung bzw. die Ansteuerung des Motors von der zu regelnden Größe. Je nach Motorvariante ist dies der Stromfluss, die Motordrehzahl oder dessen Position. Eine kombinierte Regelung dieser Größen ist ebenfalls möglich.

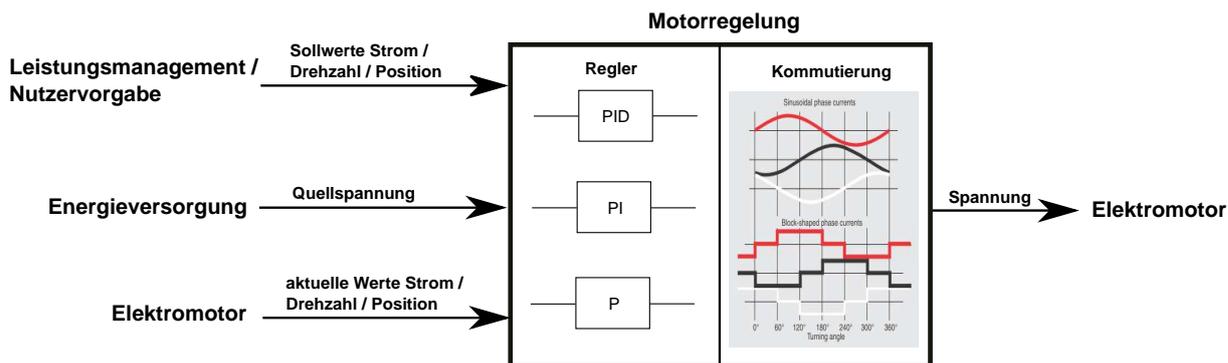


Abbildung 3.4: Signalfluss im Modul des Motorreglers (Bild aus [21])

Die aktuellen Werte erhält der Regler direkt aus dem Motormodul. Die Vorgabe der Sollwerte findet entweder durch das Leistungsmanagement statt oder erfolgt während der Simulation manuell durch den Nutzer. Zusätzlich besitzt der Motorregler eine Schnittstelle zum Modul der Energieversorgung, über welches er mit der Quellspannung versorgt wird. Zu beachten ist beim Signalfluss zwischen Motor und Regler die Einhaltung einer gemeinsamen Vorzeichendefinition für die entsprechenden Eingangsgrößen.

Die Regelung und Kommutierung erfolgt innerhalb des Moduls in weiteren Funktionsblöcken, welche entsprechend der Kaskadenregelung aus Strom-, Drehzahl- und Positionsregler angeordnet sind. Eine Verwendung aller Regler ist dabei möglich aber nicht erforderlich. Die genaue Ausführung ist ebenfalls variabel und kann von einem einfachen P-Regler bis zu einem komplexen PID-Regler variieren. Da in vielen Simulationstools bereits Regler als Bauteile existieren, lassen sich diese in das System implementieren. Alternativ sind die Regler auch mathematisch modellierbar. Die Reglerparameter können dabei jederzeit manuell eingestellt werden, um so ein optimales Ansprechverhalten des Motors zu bewirken. Für den Reglerentwurf sollte allerdings nicht das komplexe Gesamtmodell benutzt werden. Empfehlenswert ist stattdessen die Erprobung der Regler in einem separaten Modell über geeignete Übertragungsfunktionen, welche das Motorverhalten abbilden. Dies kommt zum einen der Übersicht als auch dem Rechenaufwand beim häufig aufwendigen Reglerentwurf zugute. In Abschnitt 4.3 ist dieser Vorgang am Beispiel einer Regelung von BLDC-Motoren veranschaulicht.

Ausschlaggebend ist neben den Ein- und Ausgangsgrößen auch die zeitliche Ansteuerung der Leistungselektronik und der einzelnen Regler, da deren Taktung innerhalb der Kaskadierung von innen nach außen abnehmen muss. Um die Geschwindigkeit der Kaskadenregelung möglichst hoch zu halten, sollte der innerste Regler mit der größtmöglichen Taktung aufgerufen werden. Innerhalb des gesamten Modells ist dies die in der Software

eingestellte Diskretisierung. Für die möglicherweise eingesetzten äußeren Regler ist eine etwas geringere Taktung in der Simulation zu realisieren.

Wird anstelle des Motormoduls ein realer Elektromotor in das Gesamtsystem eingebunden, erhält das Reglermodell seine aktuellen Eingangswerte durch Messung der relevanten Größen direkt aus dem Motor. Solange der Motor auch durch einen realen Regler angesteuert wird, können die gemessenen Größen auch zum schnellen Reglerentwurf im Modell genutzt werden. Andernfalls kann das Reglermodul die Kommutierung des realen Motors vornehmen. In diesem Fall muss der Motor jedoch über geeignete Hardware in Form eines Steuergerätes oder einer variablen Spannungsquelle verfügen, welche vom Modell gesteuert werden kann.

3.4 Modellierung der Energieversorgung

Neben dem Antriebsmodul gehört die Energieversorgung ebenfalls zu den essentiellen Bestandteilen eines elektrischen Antriebssystems. Um eine Spannung an das Antriebsmodul und insbesondere den Motor anzulegen, besteht die Energieversorgung im Wesentlichen aus einer elektrischen Energiequelle. Ähnlich dem Motor kann der Stromquelle ein Modul zur Überwachung in Form eines Energiemanagements vorausgehen. Dieses ist entsprechend der Stromquelle auszuwählen und zu parametrieren.

3.4.1 Modul Energiequelle

Die Energiequelle ist der wichtigste Bestandteil der Energieversorgung und in elektrischen Systemen unerlässlich. Sie kann sowohl aus einer Gleichspannungsquelle wie einer Batterie (aufladbar oder nicht aufladbar) oder einer Wechselspannungsquelle wie der Spannung aus dem öffentlichen Stromnetz bestehen. Letztere Variante ist in mobilen Anwendungen zwar eher selten anzutreffen, wäre aber innerhalb des Konzepts und der Modellierung durchaus möglich.

Aufgrund ihrer Funktion besitzt die Energiequelle eine Ausgangsschnittstelle zum Antriebsmodul, über welche sie dieses mit einer Quellspannung versorgt. Je nach Ausführung des Antriebssystems liegt diese Spannung direkt am Motor oder am Motorregler an. Die schematische Übersicht in der nachfolgenden Abbildung 3.5 zeigt, dass bedingt durch die Art der Stromquelle weitere Ausgangsschnittstellen vorzufinden sind. Wird das Modul durch ein Energiemanagement überwacht liefert es ergänzende Informationen wie etwa Temperatur, Zustand oder Lebensdauer der Stromquelle an das Managementmodul.

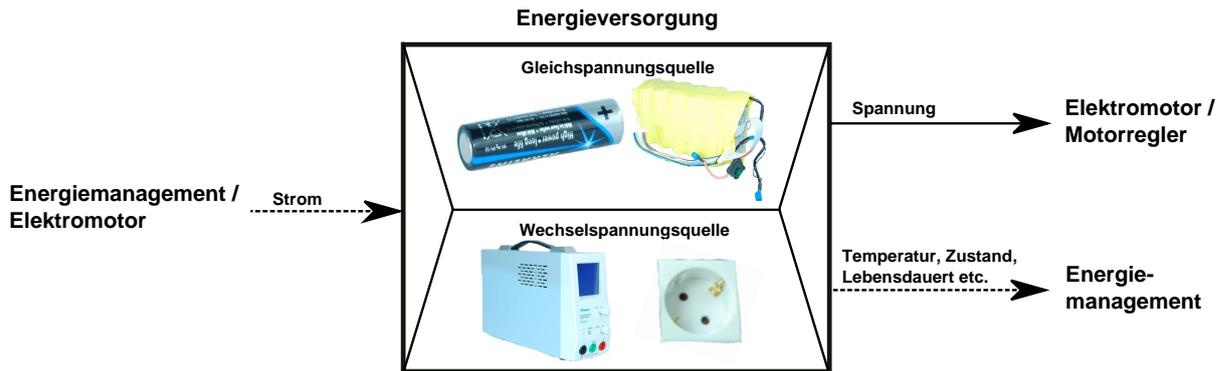


Abbildung 3.5: Signalfluss im Modul der Energiequelle

Auch die Eingänge des Modells sind von der Ausführung der Energieversorgung abhängig. Ein vorangeschaltetes Managementmodul bestimmt den Stromfluss der Stromquelle, sodass dieser als Eingangsgröße vorliegt. Wird im System kein Energiemanagement verwendet, bedient sich das Modul dem Stromfluss aus dem Motormodell. Wenn die Ausgangsspannung direkt im Modul generiert wird, ist eine Umsetzung ohne Eingangsgrößen unter Umständen ebenfalls denkbar.

Stellt das Modul eine wiederaufladbare Batterie dar, bestimmt das Vorzeichen des Stromes zusammen mit dem Vorzeichen der Bewegungsrichtung des Motors den aktuell betriebenen Quadranten. Wichtig ist dabei die kombinierte Betrachtung beider Größen. Sofern das Gesamtsystem über eine generatorische Funktion verfügt, kann der eingehende Stromfluss zu einer Aufladung des Energiespeichers verwendet werden. In diesem Fall sollte zusätzlich ein Energiemanagement zur Überwachung der Batterie zwischen dem Modul und dem Motor geschaltet sein.

Die Berechnung der Spannung im Modell unterscheidet sich je nach ausgewähltem Modellierungsansatz, wobei in der Literatur diverse Ansätze zur Modellierung von Stromquellen, insbesondere von Batterien, anzutreffen sind. Für das Gesamtkonzept ist es unerheblich, ob die Spannung aus einem chemischen oder elektrischen Ersatzmodell stammt oder mathematisch berechnet wird. Ein elektrisches Ersatzmodell besitzt im Bereich der Implementierung Vorteile, da es sich leicht mit einem ebenfalls elektrisch modellierten Motormodell verbinden lässt und Teil des elektrischen Pfades im Gesamtkonzept werden kann. Für die Abbildung von dynamischen Effekten wie die Spannungsschwankungen im Stromnetz ist hingegen eine rein mathematische Umsetzung von Vorteil. Ergänzende Hilfsgrößen wie die Temperatur oder der Zustand der Stromquelle sollten im Modul in gesonderten Blöcken abgebildet werden, um sie je nach Bedarf ohne großen Aufwand austauschen, bearbeiten oder löschen zu können.

3.4.2 Energiemanagement

Weiterer Bestandteil der Energieversorgung kann neben der Stromquelle auch ein Energiemanagement sein. Ähnlich dem Motorregler müssen dieses Modul und das zu überwachende System, d. h. die Energiequelle, auf einander abgestimmt und entsprechend ausgewählt sein. Die Hauptaufgaben des Modells sind sowohl die Kontrolle der aus der Energieversorgung stammenden Kenngrößen wie Temperatur, Ladezustand oder Lebensdauer als auch eine Begrenzung des eingehenden Stroms. Dieser geht aus dem Motormodell hervor während die weiteren Überwachungsgrößen direkt aus dem Modul für die Stromquelle entnommen werden. Wie in Abbildung 3.6 dargestellt, ist die einzige Ausgangsgröße dieses Moduls ein Stromfluss, welcher das Modul in Richtung der Stromquelle verlässt.

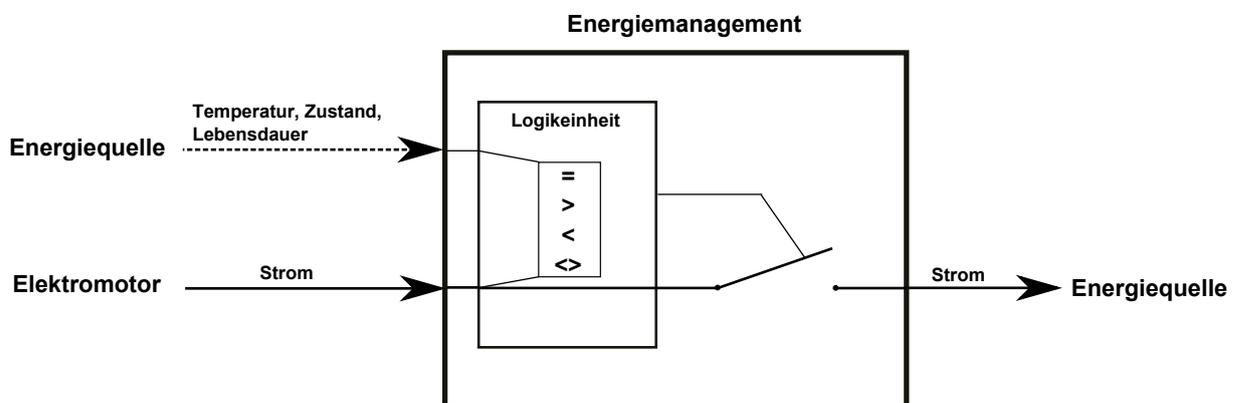


Abbildung 3.6: Signalfluss im Energiemanagement

Die Funktionen innerhalb des Moduls variieren je nach Anzahl der Eingangsgrößen. Gemeinsame Funktion ist in jedem Fall die Trennung der (elektrischen) Verbindung von Motor und der Spannungsquelle bei Erkennung eines Fehlers infolge unzulässiger Eingangswerte. Hierzu vergleicht eine funktionelle Logikeinheit die einzelnen Eingangswerte mit vorzugsweise parametrierbaren Referenzwerten. Sofern diese zulässigen Werte unter- oder überschritten werden, trennt das Energiemanagement die elektrische Verbindung von Motor und Stromquelle. Eine alternative Möglichkeit bei Modellen ohne elektrische Bauteile bietet die direkte Begrenzung des Stroms. In beiden Fällen ist darauf zu achten, dass der Wechsel zwischen der Fehlererkennung und einem einwandfreiem Betrieb nicht fließend stattfindet, da dies unter Umständen ein endloses Pendeln beider Zustände hervorrufen kann.

3.5 Belastungsmodul

Dritter Hauptbestandteil des Gesamtkonzeptes neben dem Motor als Verbraucher und der Energiequelle ist das Belastungsmodul. Es handelt sich um ein rein mechanisches Modul und bildet zusammen mit dem Elektromotor und einem möglichen Hybridantrieb den mechanischen Pfad des Konzepts. Im Gegensatz zu den anderen genannten Hauptmodulen lässt sich das Gesamtmodell für eventuelle Tests von einzelnen Bausteinen auch ohne eine Belastung betreiben. Für die Simulation einer konkreten Anwendung, bei welcher der Motor regelmäßig belastet wird, sollte diese Last hingegen immer berücksichtigt und implementiert sein.

Der Aufbau und die einzelnen Schnittstellen unterscheiden sich je nach Anwendungsfall stark voneinander, da die Belastung individuell dem zu untersuchenden System angepasst werden muss und unter Umständen nur wenig Gemeinsamkeiten zu Lasten anderer Systeme aufweist. Einzige wiederkehrende Ausgangsschnittstelle ist bei allen Anwendungen die eigentliche Last, welche das Modul in Richtung Motormodell verlässt. Je nach Motorausführung (translatorisch oder rotatorisch) beschreibt diese Last die äußere Kraft oder das Moment auf den Elektromotor. Häufig ist die Belastung abhängig von der Motorposition bzw. dessen Drehzahl. In diesen Fällen existiert auf der Eingangsseite vom Lastmodell eine weitere Schnittstelle zum Motormodul, über welche die jeweilige Ausgangsgröße des Motors übermittelt wird. Möglich ist weiterhin eine Schnittstelle zum etwaigen Hybridmodul. Über diese lassen sich Informationen zur Belastung und anderen Faktoren an den Hybridantrieb schicken, um auf diese Weise eine angepasste Unterstützung und ein optimales Betriebsverhalten beider Antriebsmodule zu erzielen.

Die vom Gesamtsystem abhängige Lastberechnung innerhalb des Moduls führt zu unterschiedlichen Berechnungsstrategien. Es lassen sich sowohl auf Kennfeldern basierende Lastprofile wie auch drehzahl- oder positionsabhängige Lasten oder einfache konstante Kräfte und Momente abbilden. Sollte die gesamte Belastung aus mehreren modellierbaren Einzellasten zusammengesetzt sein, so sind entsprechende Blöcke innerhalb des Moduls für die jeweiligen Lasten einzubinden. Auf diese Weise ist ein Austausch oder eine Anpassung der Lastmodelle relativ leicht umsetzbar. Da es sich bei der Belastung um ein rein mechanisches Problem handelt, kann diese nur mathematisch abgebildet werden.

Der Einsatz von realer Hardware anstelle des Belastungsmoduls ist in bestimmten Fällen ebenfalls möglich. Sofern das betrachtete System über geeignete Sensorik verfügt, lassen sich Kräfte und Momente durch Messung erfassen und in das Modell implementieren.

3.6 Modul Hybridantrieb

In einigen Anwendungen kommen neben dem Elektromotor weitere Antriebsformen zum Einsatz. Ähnlich dem Belastungsmodul ist dieser Hybridantrieb daher individuell vom modellierten Gesamtsystem abhängig und entsprechend auszuwählen. Da es in jedem Fall der mechanischen Unterstützung des Elektromotors dient, muss eine Ausgangsschnittstelle zum zentralen Motormodul bestehen. Es lässt sich hierbei die bereits vorhandene Schnittstelle zwischen Belastung und Motor nutzen, wobei die Wirkung von Last und Hybridsystem und damit das jeweilige Vorzeichen zu beachten ist. Da neben der Belastung auch das Hybridsystem je nach Betriebspunkt bremsend und antreibend auf den Motor wirkt, müssen beide Module sinnvoll kombiniert sein. Je nach Art des Hybridsystems existieren weitere Schnittstellen innerhalb der Module im Gesamtkonzept. Dient ein zweiter Elektromotor als unterstützendes Element, lässt sich das Hybridmodul gegebenenfalls an den elektrischen Pfad des Gesamtkonzepts anschließen.

Zusätzlich zu dem eigentlichen mechanischen Antriebselement macht häufig auch der Einsatz eines eigenen Leistungsmanagements im Hybridmodul Sinn oder ist im Fall eines zweiten Elektromotors sogar erforderlich. Eine Aufgabe dieses Moduls kann neben der Steuerung und Überwachung des Hybridmoduls auch die Vorgabe von Zielwerten des zentralen Motorreglers sein. Wie beschrieben sind diese Zielwerte direkt im Modul definiert oder werden zur Anpassung des Elektromotors an das Verhalten des Hybridantriebs aus dem Leistungsmanagement vorgegeben. Zur optimalen Unterstützung je nach anliegender Last, sollte ebenfalls eine Schnittstelle zwischen dem Belastungsmodul und dem Hybridsystem vorhanden sein. Insgesamt kann das Hybridmodul unter Umständen Schnittstellen zu allen anderen Blöcken besitzen und daher den Umfang und Aufwand des Gesamtkonzepts enorm erhöhen.

Aufgrund der großen Vielfalt ist eine exakte Erklärung von Funktion und Aufbau des Hybridmoduls an dieser Stelle nicht möglich. Die Spannweite reicht hierbei von der Verwendung einer konstanten Kraftquelle bis zur Einbindung externer Motormodelle, beispielsweise eines Verbrennungsmotors für ein Hybridfahrzeug. Neben der Unterstützung einer Maschine hat auch eine natürliche Leistungsquelle eine antreibende oder bremsende Wirkung. Die menschliche Leistung eines Fahrradfahrers ist deshalb ebenfalls als Antriebselement zu betrachten.

Die Einsatzmöglichkeit realer Bauteile wird entscheidend von der Art des Gesamtsystems beeinflusst. Lassen sich die unterstützende Wirkung am realen Bauteil messen, kann das Hybridmodell durch das Bauteil ersetzt werden.

3.7 Einbindung von realer Hardware in das Modellierungskonzept

Eine weitere Anforderung an das Gesamtkonzept ist neben der eigenständigen Simulation elektrischer Antriebssysteme auch die Möglichkeit, reale Hardware in das Modell einzubinden. Die folgenden Absätze beschreiben einige Strategien und Möglichkeit zur Nutzung dieses als „hardware-in-the-loop“ (HIL) bekannten Verfahrens innerhalb des allgemeinen Konzepts. Der Begriff HIL bezeichnet laut Definition die Schließung einer realen Reglerschleife durch den Einsatz von Modellen im Gesamtsystem [31].

Um reale Hardware in ein Simulationstool zu implementieren, muss für einen erfolgreichen Datenaustausch zuerst eine Verbindung zwischen der einzubindenden Geräte und dem PC mit der Simulation hergestellt sein. In einigen Fällen kann diese Verbindung auch für die Spannungsversorgung der implementierten Hardware genutzt werden. Sollte die Spannung aus dem PC nicht ausreichen, sind die angeschlossenen Geräte mit einer eigenständigen Spannungsquelle auszurüsten. Die Art der Schnittstelle beeinflusst dabei neben der Signalform, welche entweder analog oder digital ausfallen kann, auch die Übertragungsrate der Daten. Umfangreiche Simulationen mit einer hohen zeitlichen Auflösung erzeugen mitunter große Datenmengen, welche nur mit einer begrenzten Datenrate und entsprechender Verzögerung übertragen werden können. Die Datenrate entscheidet daher auch über die Echtzeitfähigkeit der Simulation bei der Einbindung von eingebetteten Systemen. Die Leistung des PCs und die Effizienz der eingesetzten Software ist für eine echtzeitfähige Simulation ebenfalls bedeutend. Nur bei einer ausreichend schnellen Verarbeitung im PC können die Daten innerhalb eines Zeitintervalls wieder an die eingebundene Hardware gesendet werden [31].

Das Verfahren der HIL wird überwiegend zum Testen realer Steuergeräte durch Einbindung simulierter Hardware genutzt. Für das Gesamtkonzept bietet sich hier der Einsatz eines realen Motorreglers zur Ansteuerung des Motormodells an. Das Motormodell schließt in diesem Fall die offene Reglerschleife der Elektronik durch Empfang der Kommutierungsvorgabe bei gleichzeitigem Senden von berechneten Istwerten wie dem aktuellen Strom. Ein großer Vorteil ist die schnelle Variation der Motorparameter, welche den Verwendung von verschiedenen Motormodellen am realen Regler erlaubt. Auch eine automatische Reglerauslegung ist auf diese Weise möglich. So lassen sich für ein bestimmtes Motormodell die Reglerparameter des realen Reglers solange gezielt verändern, bis sich ein optimales Motorverhalten einstellt, ohne dabei Schäden an Bauteilen befürchten zu müssen.

4 Spezielles Modellierungskonzept für elektrische Antriebssysteme

Das im vorherigen Abschnitt erläuterte allgemeine Modellierungskonzept für elektrisch Antriebssysteme beschreibt eine universelle Strategie zur Modellierung jener Anwendungen ohne konkrete Lösungsansätze. Erst die detaillierte Ausführung einer definierten Aufgabenstellung, d. h. eines bestimmten Systems, ermöglicht eine Modellbewertung hinsichtlich dessen Qualität und Gültigkeit. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Umsetzung durch Simulation eines Elektrofahrrads und eines separaten Testmotors inklusive Steuergerät. Aufgrund seines eingeschränkten Antriebs dient das Elektrofahrrad der Modellbewertung für ein komplettes Antriebssystem. Für die gezielte Analyse des Motormodells sowie für die Einbindung realer Hardware wird zusätzlich der Testmotor mit entsprechender Regelung modelliert. Abschließend beinhaltet dieses Kapitel verschiedene Strategien für den Reglerentwurf der implementierten Motorregelung beider Systeme anhand von geeigneten Übertragungsfunktionen.

4.1 Gesamtsystem am Beispiel eines Pedelecs

Die Entwicklung des Pedelec-Modells beruht auf der Konstruktion und der Funktion eines vorhandenen Elektrofahrrads. Gemäß der in den Grundlagen festgelegten Definition zählt es zur Kategorie der Pedelecs und ist mit zwei Radnabenmotoren ausgerüstet. Der ursprüngliche BLDC-Motor in der Vorderradnabe wird dabei infolge eines nachträglichen Umbaus um ein passendes Pendant im Hinterrad ergänzt. Da im Rahmen dieser Arbeit nur Messwerte bei der Nutzung des Vorderradmotors verfügbar sind, ist eine Abbildung des Hinterradmotors nicht erforderlich. Der einzige zu modellierende BLDC-Motor ist dabei im 28 " großen Vorderrad verbaut und direkt mit diesem gekoppelt. Als Energieversorgung dient ein Lithium-Ionen-Akku, welcher zusammen mit dem Motor eine Rekuperation der beim Bremsen oder bei Bergabfahrten generierten Energie zulässt. Überwacht und geregelt werden alle genannten Systeme von einer zentralen Leistungselektronik. Die Darstellung in Anhang A.3 zeigt das Referenzfahrrad dieser Arbeit.

Der Aufbau der Simulationsumgebung für das Pedelec basiert auf der in Abschnitt 3 beschriebenen Modellierungsstrategie für elektrische Antriebssysteme. Er besteht aus einem

Antriebsblock, welches den BLDC-Motor und einen entsprechenden Regler beinhaltet. Die Lithium-Ionen-Batterie und ein dazugehöriges Batteriemanagement bilden die Energieversorgung. Zusätzlich verfügt das Modell über ein Belastungsmodul für die Berechnung der auftretenden Fahrwiderstände und ein Modul für den Hybridantrieb. Dieser besteht aus dem Fahrer als hauptsächliches Antriebselement und dem erforderlichen Leistungsmanagement. Der Aufbau des Gesamtsystems ist in der Abbildung 4.1 dargestellt und orientiert sich stärker an das universelle Gesamtkonzept als an das reale System. Sämtliche im Modell eingesetzten Parameter entstammen verschiedenen Quellen und sind in Anhang A.1.1 tabellarisch aufgeführt.

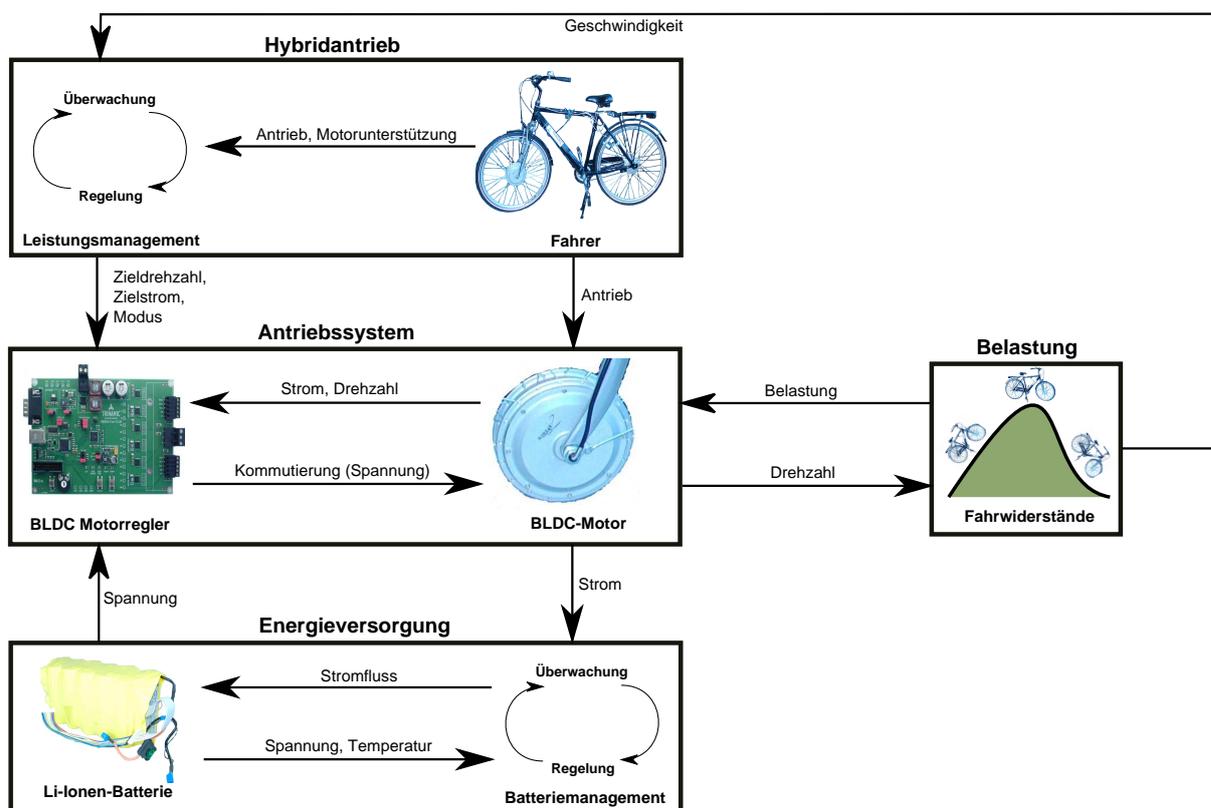


Abbildung 4.1: Modularer Aufbau des Pedelec-Modells

4.1.1 BLDC-Motormodell

Der in der Vorderradnabe eingebaute BLDC-Motor besteht aus drei Phasen, welche über eine Sternschaltung miteinander verbunden sind. Die Ansteuerung des Motors erfolgt mit der in Abbildung 2.2 vorgestellten Schaltung über eine Blockkommutierung. Für die Modellierung ist die Kenntnis der Ansteuerwinkel der einzelnen Schalter sowie die Stromrichtungen in den Phasen notwendig. Beide Informationen richten sich nach der Festlegung in [4] und sind in der folgenden Tabelle 4.1 aufgeführt.

Pos.	elektr. Winkel	Hall-Sensor			geschlossene Schalter	Phase		
		H1	H2	H3		a	b	c
1	$0^\circ - 60^\circ$	1	0	0	Q1, Q4	+	-	off
2	$60^\circ - 120^\circ$	1	1	0	Q1, Q6	+	off	-
3	$120^\circ - 180^\circ$	0	1	0	Q3, Q6	off	+	-
4	$180^\circ - 240^\circ$	0	1	1	Q3, Q2	-	+	off
5	$240^\circ - 300^\circ$	0	0	1	Q5, Q2	-	off	+
6	$300^\circ - 360^\circ$	1	0	1	Q5, Q4	off	-	+

Tabelle 4.1: Schaltungssequenz des modellierten BLDC-Motors nach [4]

Das „off“ bezeichnet in diesem Fall eine nicht bestromte Phase, ein + kennzeichnet den Anschluss der Phase an den Pluspol der Spannungsversorgung und das - deren Erdung. Die Reihenfolge der sechs durchlaufenden Schritte bestimmt den Drehsinn des Motors. Ein Durchlauf von 1 \rightarrow 6 bewirkt eine Drehung des Rotors im Uhrzeigersinn und eine positive Drehzahl. Die Geschwindigkeit des Pedelecs hängt direkt von der Motordrehzahl ab und ist daher ebenfalls positiv. Eine negative Drehrichtung wird bei einem Durchlauf von 6 \rightarrow 1 erreicht. Da das Pedelec stets vorwärts fahren soll, ist dieser Fall im Modell nur von theoretischer Bedeutung. Die Nummerierung der Schritte und die Benennung der Phasen kann bei Bedarf geändert und an die Modelle anderer Arbeiten beispielsweise in [27] oder [23] angepasst werden. Zu beachten ist hierbei, dass die Festlegung konsequent eingehalten und an die Verläufe der induzierten BEMF und die Signale der Hallsensoren angeglichen wird.

Das Motormodul selbst besteht aus fünf Unterblöcken, in denen die jeweiligen Kenngrößen bestimmt werden. Der elektrische Winkel ergibt sich aus der Winkelgeschwindigkeit und der Anzahl der Pole durch Integration von Formel 2.3. Das Integral der Winkelgeschwindigkeit liefert dabei nach einer Motorumdrehung einen Winkel von $\theta_{el} \geq 360^\circ$. Eine Sägezahnfunktion innerhalb der Winkelberechnung begrenzt diesen Wert auf 360° und setzt ihn bei Bedarf wieder auf 0° zurück. Für die Berechnung der aufgeführten sechs Positionen beinhaltet der erste Unterblock weiterhin die Quantisierung des elektrischen Winkels auf 60° -Schritte.

Mittels des elektrischen Winkels modelliert der nachfolgende Unterblock die BEMF der drei Phasen. Wie bei blockkommutierten BLDC-Motoren üblich weisen die Gegenspannungen einen trapezförmigen Verlauf auf. Die Umsetzung der in der folgenden Abbildung 4.2 gezeigten Verläufe ist im Modell über Kennfelder realisiert. Die Multiplikation der Verläufe mit der Winkelgeschwindigkeit und der Motorkonstanten liefert entsprechend der Formel 2.2 die Amplitude der jeweiligen BEMF.

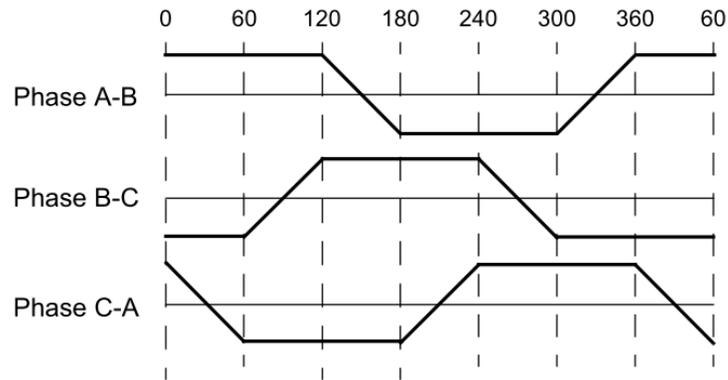


Abbildung 4.2: Trapezförmiger Verlauf der BEMF [24]

Eine alternative Möglichkeit stellt die mathematische Beschreibung einer einzelnen Trapezfunktion dar. Über eine Phasenverschiebung von 120° und 240° lassen sich auch die anderen Verläufe abbilden:

$$f(\theta_{el}) = \begin{cases} 1, & 0^\circ \leq \theta_e \leq 120^\circ \\ 1 - \frac{\theta_{el} - 120^\circ}{30^\circ}, & 120^\circ \leq \theta_{el} \leq 180^\circ \\ -1 & 180^\circ \leq \theta_{el} \leq 300^\circ \\ -1 + \frac{\theta_{el} - 300^\circ}{30^\circ}, & 300^\circ \leq \theta_{el} \leq 360^\circ \end{cases} \quad (4.1)$$

f_k – Verlauf der elektromagnetischen Gegenkraft θ_{el} – elektrischer Drehwinkel

Die Differenz der angelegten Phasenspannung und der induzierten BEMF bildet die Grundlage für die effektiv wirksame Spannung der einzelnen Phasen und ist Bestandteil des dritten Unterblocks. Da dieses Motormodell nicht aus elektrischen Bausteinen besteht sondern rein mathematisch modelliert ist, muss die angelegte Spannung manuell auf die einzelnen Phasen überführt werden. Mithilfe der nachfolgenden Tabelle 4.2 lassen sich die Phasenspannungen für die definierte Schrittfolge in Abhängigkeit von der BEMF und der Spannungsquelle auch mathematisch beschreiben [4]. Da am realen Motor grundsätzlich zwei Phasen aktiv sind, wird die modellierte Spannung je nach aktueller Position ebenfalls paarweise angegeben. Die auf diese Weise erzielte Kommutierung ist normalerweise Aufgabe der Leistungselektronik und damit Teil des Motorreglers. Eine Spannungsberechnung im Motorregler erfordert jedoch weitere Schnittstellen für die Position und die induzierte Gegenspannung in das entsprechende Modul. Für die Übersichtlichkeit des Gesamtmodells ist die direkte Kommutierung im Motormodul deshalb von Vorteil.

Pos.	$U_{ab} - E_{ab}$	$U_{bc} - E_{bc}$
1	$U_{bat} - E_a + E_b$	$0,5 \cdot (-U_{bat} + E_a + E_b)$
2	$0,5 \cdot (U_{bat} - E_a + E_c)$	$0,5 \cdot (U_{bat} - E_a + E_c)$
3	$0,5 \cdot (-U_{bat} + E_b - E_c)$	$U_{bat} - E_b + E_c$
4	$-U_{bat} - E_a + E_b$	$0,5 \cdot (U_{bat} + E_a - E_b)$
5	$0,5 \cdot (-U_{bat} - E_a + E_c)$	$0,5 \cdot (-U_{bat} - E_a + E_c)$
6	$0,5 \cdot (U_{bat} + E_b - E_c)$	$-U_{bat} - E_b + E_c$

U – Spannung über Phase

a, b, c – einzelne Phasen

E – elektromagnetische Gegenkraft über Phase

U_{bat} – Klemmspannung der Batterie

Tabelle 4.2: Effektive Phasenspannung im Motormodell nach [4]

Die Berechnung der Phasenströme und des Gesamtstroms erfolgt über die Differentialgleichung aus Formel 2.1 in einem korrespondierenden vierten Unterblock. Da die Spannung stets über zwei Phasen angelegt wird, lassen sich die zwei Differentialgleichungen jeweils voneinander subtrahieren, um den effektiven Stromfluss zweier Phasen zu erhalten. Wegen des direkten Zusammenhangs aller drei Phasenströme, benötigt die Berechnung des Stroms in der dritten Phase nicht die Differentialgleichung sondern basiert auf der Knotenpunktregel:

$$\frac{d}{dt} \cdot (I_a - I_b) = -\frac{R}{L} \cdot (I_a - I_b) + U_{ab} - E_{ab} \quad (4.2)$$

$$\frac{d}{dt} \cdot (I_b - I_c) = -\frac{R}{L} \cdot (I_b - I_c) + U_{bc} - E_{bc}$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (4.3)$$

I – Strom durch Phase

a, b, c – einzelne Phase

R – Phasenwiderstand

L – Spuleninduktivität

U – Spannung über Phase

E – elektromagnetische Gegenkraft über Phase

dt – zeitliche Änderung

Durch Einsetzen der Formel 4.3 in Formel 4.2 lassen sich nach anschließender Umformung zwei Gleichungen für die unbekanntenen Phasenströme aufstellen. Innerhalb der Simulationsumgebung sind diese in einer Matrixform, dem sogenannten „State-Space-Modell“, eingebettet:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{2}{3 \cdot L} & \frac{1}{3 \cdot L} \\ -\frac{1}{3 \cdot L} & \frac{1}{3 \cdot L} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{ab} - E_{ab} \\ U_{bc} - E_{bc} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

In einem weiteren Schritt berechnet dieser Unterblock den sich einstellenden Gesamtstrom. Ausgangspunkt für diesen Prozess ist die in Formel 2.4 vorgestellte Multiplikation der Phasenströme mit dem dazugehörigen Trapezverlauf aus dem Block der BEMF.

Der abschließende Unterblock beschreibt nach Formel 2.5 die Winkelgeschwindigkeit des Rotors über eine Bilanz der anliegenden Drehmomente. Das elektrische Moment ergibt sich über eine Multiplikation von Gesamtstrom und Maschinenkonstante, das Lastmoment wird dem Motormodul von außen vorgegeben.

Die konstanten Motorkenngrößen sind im Modell als Parameter hinterlegt und lassen sich so jederzeit anpassen. Die Daten des modellierten Pedelec-Motors entstammen teilweise dem Datenblatt vom Hersteller und sind in Anhang A.1.1 tabellarisch aufgeführt.

4.1.2 BLDC-Motorregler

Die modellierte Motorregelung besteht hauptsächlich aus zwei Reglern. Der Stromregler und der vorgeschaltete Drehzahlregler sind beide in einer kaskadierten Anordnung im Modul implementiert. Der Aufbau orientiert sich an eine bereits existierende Motorregelung in [35]. Auf den Einsatz eines Positionsreglers wird an dieser Stelle verzichtet, da die Regelung der Position im Gesamtsystem des Pedelecs nicht sinnvoll ist und gemäß Tabelle 3.1 auch nicht in das Anforderungsprofil der Elektromobilität fällt. Die beiden modellierten Regler sind jeweils in einem eigenen Unterblock untergebracht. Um Sprünge in der Solldrehzahl zu unterbinden, beinhaltet ein dritter Unterblock vor dem Drehzahlregler eine Rampenfunktion. Die Sollwerte für die Drehzahl und den Motorstrom werden von außen durch das Leistungsmanagement vorgegeben oder je nach Modus im Motorregler berechnet. Die aktuellen Werte dieser Größen erhalten die Regler wie bekannt aus dem Motormodul. Der Aufbau der modellierten Regelung ist der folgenden schematischen Darstellung in Abbildung 4.3 zu entnehmen.

Um Drehzahlsprünge und die damit verbundenen unendlichen Beschleunigungen zu umgehen, begrenzt eine Rampenfunktion im ersten Unterblock die Solldrehzahl in ihrer Steigung. Unter Angabe einer maximalen Beschleunigung und der im Simulationstool eingestellten Schrittweite wird die Solldrehzahl in jedem Rechenschritt um einen Betrag erhöht oder gesenkt, bis sie den gewünschten Zielwert erreicht. Zu Testzwecken lässt sich die Rampenfunktion über einen manuellen Schalter jederzeit ein- oder ausschalten.

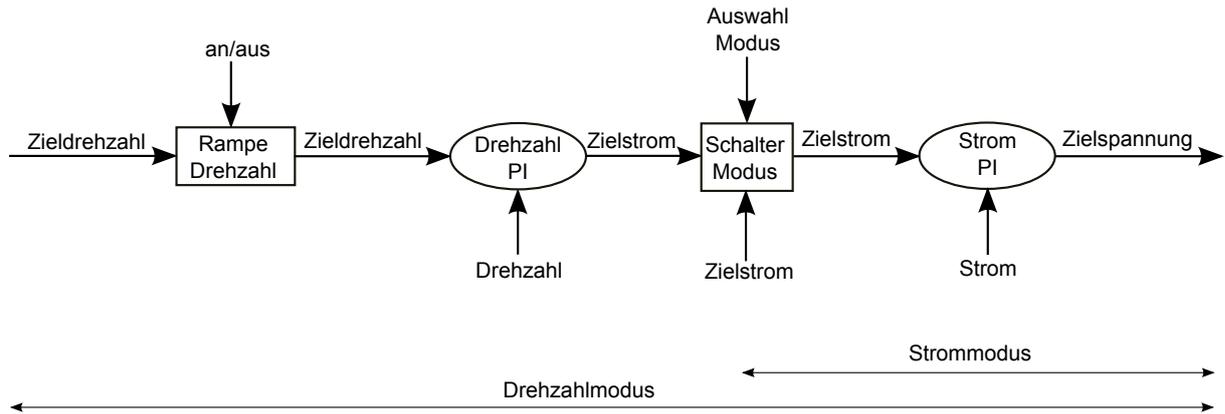


Abbildung 4.3: Aufbau der Motorregelung beim Pedelec-Modell

Die mathematische Beschreibung der Rampenfunktion lautet:

$$n_{targ} = \begin{cases} n_{targ} + a_{max} \cdot dt_{sim} & \text{wenn } n_{targ} < n_{des} \\ n_{targ} - a_{max} \cdot dt_{sim} & \text{wenn } n_{targ} > n_{des} \\ n_{targ} & \text{wenn } n_{targ} = n_{des} \end{cases} \quad (4.6)$$

n_{targ} – Zieldrehzahl nach Rampe

n_{des} – Zieldrehzahl vor Rampe

a_{max} – maximale Beschleunigung

dt_{sim} – Schrittweite in der Simulation

Die im Simulationstool eingestellte Schrittweite beeinflusst die Aktivierung dieser Funktion. Sofern sie im Vergleich zum restlichen Modell mit einer geringeren Taktung aufgerufen wird, so ist dieser Parameter durch den gewünschten Zeitschritt zu ersetzen oder durch einen Vorfaktor entsprechend zu skalieren. Da im Gesamtmodell des Pedelecs der folgende Drehzahlregler langsamer als der innere Stromregler aufgerufen wird, ist die Taktung der Rampenfunktion um den Faktor zehn kleiner als die eingestellte Schrittweite.

Der Rampe nachgeschaltet ist in einem weiteren Unterblock der eigentliche Drehzahlregler, welcher als PI-Ausführung vorliegt und entsprechend der gewünschten Schrittweite getaktet aufgerufen wird. Zur Vermeidung von unzulässigen Werten in der Drehzahlvorgabe ist der Sollwert der Regelung vorab auf einen maximalen Betrag zu begrenzen:

$$-n_{max} \leq n_{targ} \leq n_{max} \quad (4.7)$$

n_{targ} – Zieldrehzahl nach Rampe

n_{max} – maximal zulässige Drehzahl

Anschließend erfolgt wie bei der Drehzahlregelung die Berechnung der Abweichung des Vorgabewertes vom tatsächlichen Strom. Diese Differenz wird als Eingangssignal an den eigentlichen Regler gesendet und dort in eine Zielspannung überführt. Um ein endloses Aufsummieren zu vermeiden, ist auch hier auf die Begrenzung der Fehlersumme zu achten. Als Maximalwert dient dabei die aus der Stromquelle entnehmbare Spannung. Die am Motor anliegende Spannung berechnet sich aus:

$$U_{targ} = KP_I \cdot (I_{targ} - I) + KI_I \cdot \int (I_{targ} - I) \quad (4.10)$$

I_{targ} – Zielstrom	I – aktueller Motorstrom
KP_I – P-Anteil des Stromreglers	U_{targ} – Zielspannung
KI_I – I-Anteil des Stromreglers	

Die Ausgangsgröße des Stromreglers ist in diesem Fall nicht die bei EC-Motoren typische Vorgabe der PWM sondern der am Motor anliegende Spannungswert. Die über eine PWM erzielte effektive Spannung wird in diesem Modell direkt als konstanter Wert ausgegeben, da das Motormodell mit einer speziellen Art der Kommutierung durch Angabe der Phasenspannung betrieben wird. Negative Drehzahlen lassen sich in der Realität über eine phasenverschobene PWM erreichen. Innerhalb dieses Modells ergibt die Vorgabe einer negativen Spannung eine Motorbewegung in negative Drehrichtung.

Begrenzt wird der Spannungswert durch das maximale Potenzial der Stromquelle. Innerhalb des Pedelec-Modells ist dies die Kapazität der Lithium-Ionen-Zellen aus dem Batteriemodell. Die aus dem Stromregler ermittelte Sollspannung wird deshalb abschließend auf einen definierten Arbeitsbereich beschränkt und verlässt den Regler in Richtung Motormodell:

$$-U_{Bat} \leq U_{targ} \leq U_{Bat} \quad (4.11)$$

U_{targ} – Zielspannung	U_{Bat} – Klemmspannung der Batterie
---------------------------	--

4.1.3 Lithium-Ionen-Batteriemodell

Die Batterie des zu untersuchenden Pedelecs ist als Verbindung aus Lithium-Eisen-Phosphat, einer sogenannten LiFePO Batterie, ausgeführt und wird maßgeblich nach dem in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Verfahren der elektrischen Ersatzschaltung modelliert. Insgesamt besteht das Batteriemodell dabei aus vier Unterblöcken.

Ausgehend von der in den Grundlagen vorgestellten Formel 2.9 berechnet der erste Unterblock die interne Spannung der Batterie aus ihrem chemischen Potential. Neben dem eigentlichen SoD-Wert beinhaltet das Modell zusätzlich einen SoD-Startwert. Dieser kann zu Testzwecken eine bereits zu Simulationsbeginn teilweise entladene Batterie abbilden und wird deshalb zum aktuellen Ladezustand addiert:

$$SoD = \left(\frac{1}{Q_n} \cdot \int \alpha(I_{bat}) \cdot \beta(T_{bat}) \cdot I_{bat} \cdot dt \right) + SoD_0 \quad (4.12)$$

SoD – Entladezustand	Q_n – nominelle Kapazität einer Zelle
I_{bat} – Stromfluss durch Batterie	dt – zeitliche Änderung
α – Korrekturfaktor des Stroms	β – Korrekturfaktor der Temperatur
T_{bat} – Batterietemperatur	SoD_0 – Startwert für den Entladezustand

Die Korrekturfaktoren für den Strom und die Temperatur sind im Modell als Kennlinien hinterlegt. Ausgehend vom Entladezustand lässt sich die interne Spannung der Batterie über eine weitere Kennlinie berechnen. Die Kennlinien sowie alle weiteren Parameter aus dem Batteriemodell sind ebenfalls in Anhang A.1.1 aufgeführt.

Im zweiten Unterblock dieses Moduls werden die Spannungsverluste über die Differentialgleichung aus Formel 2.7 für das elektrische Ersatzschaltbild berechnet. Die effektive nutzbare Klemmspannung der gesamten Batterie ergibt sich aus der Summe der internen Spannung und den Spannungsverlusten in einer Zelle sowie der Anzahl der verwendeten Zellen.

Die im dritten Unterblock durchgeführte Berechnung der Gesamtmasse des Batteriesystems dient der abschließenden Wärmebilanz zur Ermittlung der Temperatur. Die Masse einer Zelle ergibt sich aus der Energiedichte, welche für verschiedene Batterietypen angegeben ist:

$$m_{cell} = \frac{Q_n \cdot U_n}{E_{spec}} \quad (4.13)$$

m_{cell} – Masse einer Zelle	Q_n – nominelle Kapazität einer Zelle
U_n – nominelle Spannung einer Zelle	E_{spec} – Energiedichte

Im finalen Unterblock wird gemäß der grundlegenden Formel 2.10 abschließend die Temperatur einer Zelle bzw. die der gesamten Batterie berechnet. Um die wesentlichen Effekte

zu erfassen, ist bei der Modellierung die Auswahl einer geeigneten Form der Wärmeübertragung erforderlich. Da die zu erwartenden Temperaturdifferenzen relativ gering sind, werden Strahlungseffekte wie in [6] vernachlässigt und stattdessen ein Wärmeübergang wie in [1] abgebildet:

$$\frac{dT_{bat}}{dt} \cdot C_{v,cell} = U_{loss} \cdot I_{bat} - hc_{cell} \cdot A_{cell} \cdot (T_{amb} - T_{bat}) \quad (4.14)$$

T_{bat} – Batterietemperatur	$C_{v,cell}$ – Wärmekapazität einer Zelle
U_{loss} – Spannungsverluste einer Zelle	I_{bat} – Stromfluss durch Batterie
hc_{cell} – Wärmeübergangskoeffizient einer Zelle	T_{amb} – Umgebungstemperatur
A_{cell} – wirksame Oberfläche einer Zelle	

Die Wärmekapazität einer Einzelzelle hängt über die berechnete Zellmasse direkt mit der spezifischen Wärmekapazität zusammen:

$$C_{v,cell} = m_{cell} \cdot c_{v,cell} \quad (4.15)$$

$C_{v,cell}$ – Wärmekapazität einer Zelle	$c_{v,cell}$ – spezifische Wärmekapazität einer Zelle
m_{cell} – Masse einer Zelle	

4.1.4 Batteriemangement

Das Modul für das Batteriemangement überwacht die Batterie und gewährleistet deren Sicherheit. Hierfür erhält es Informationen über den Ladezustand der Batterie und der Batterietemperatur aus dem entsprechenden Modul sowie über den Motorstrom aus dem BLDC-Modul. In Abhängigkeit dieser Größen stellt das Management eine Verbindung zum Motor her und steuert den Stromfluss in der Batterie. Im Normalfall ist der Motor direkt mit der Batterie gekoppelt, sodass der im Motor verbrauchte Strom gleich dem Stromfluss in der Batterie ist.

$$I_{bat} = I \quad (4.16)$$

I – aktueller Motorstrom	I_{bat} – Stromfluss durch Batterie
----------------------------	---------------------------------------

In speziellen Fällen wird die Verbindung beider Module unterbrochen und der Batterie-strom auf Null gesetzt:

$$I_{bat} = 0 \text{ A} \begin{cases} T_{bat} > T_{bat,high} \\ U_{bat} < U_{bat,low} \\ U_{bat} > U_{bat,high} \end{cases} \begin{cases} I \cdot \omega > 0 \text{ (Entladevorgang)} \\ I \cdot \omega < 0 \text{ (Ladevorgang)} \end{cases} \quad (4.17)$$

I_{bat} – Stromfluss durch Batterie	T_{bat} – Batterietemperatur
$T_{bat,high}$ – maximale Batterietemperatur	U_{bat} – Klemmspannung der Batterie
$U_{bat,low}$ – minimale Batteriespannung	$U_{bat,high}$ – maximale Batteriespannung

Zum einen erfolgt eine Unterbrechung der Verbindung sobald die Batterietemperatur einen zulässigen Höchstwert überschreitet. Sobald sich die Batterie anschließend wieder auf einen bestimmten Wert abkühlt, ist sie für eine Ladung oder eine Entladung ein-satzbereit. Um ein Pendeln zwischen $I_{bat} = 0 \text{ A}$ und $I_{bat} = I$ zu vermeiden, sollte dieser Abkühlwert etwas unterhalb des zulässigen Höchstwertes liegen. Die Umsetzung des Tem-peraturvergleichs ist im Modell daher über eine Hystereseschleife realisiert.

Zusätzlich muss die Verbindung zum Motor sowohl im Falle einer Tiefentladung, bei wel-cher die Batteriespannung unter den zulässigen Wert fällt, als auch bei einer Überladung unterbrochen werden. Wichtig ist hierbei neben der Spannungskontrolle auch die Erfas-sung des aktuellen Motorquadranten. Dieser ergibt sich aus der kombinierten Betrachtung des Motorstroms und dessen Drehzahl. Da bei einer entladenen Batterie eine weitere Be-anspruchung vermieden werden muss, eine Aufladung aber weiterhin zulässig ist, ist das Vorzeichen des Stroms zusammen mit dem Vorzeichen der Drehzahl zu überwachen. Im Falle einer Überladung verhält es sich entsprechend umgekehrt. Im Modul ist diese Kon-trolle über logische Vergleichsoperatoren umgesetzt.

4.1.5 Fahrwiderstände

Das Belastungsmodul berechnet die auf den Motor einwirkende Last in Form eines äuße-ren Drehmoments. Bei dem Pedelec ergibt sich die gesamte Belastung durch die Summe der einzelnen Fahrwiderstände, welche zum Teil geschwindigkeitsabhängig sind und in ei-genständigen Unterblöcken berechnet werden. Die Geschwindigkeit des Fahrrads ist dabei proportional der aus dem Motormodul entnommenen Drehzahl. Ein Unterblock ermittelt

aus der Motordrehzahl bzw. der Winkelgeschwindigkeit und der Felgenreöße die sich einstellende Geschwindigkeit:

$$v_{bike} = \omega \cdot \frac{D_{whe}}{2} \quad (4.18)$$

v_{Bike} – Geschwindigkeit des Pedelecs ω – Winkelgeschwindigkeit
 D_{Whe} – Felgendurchmesser

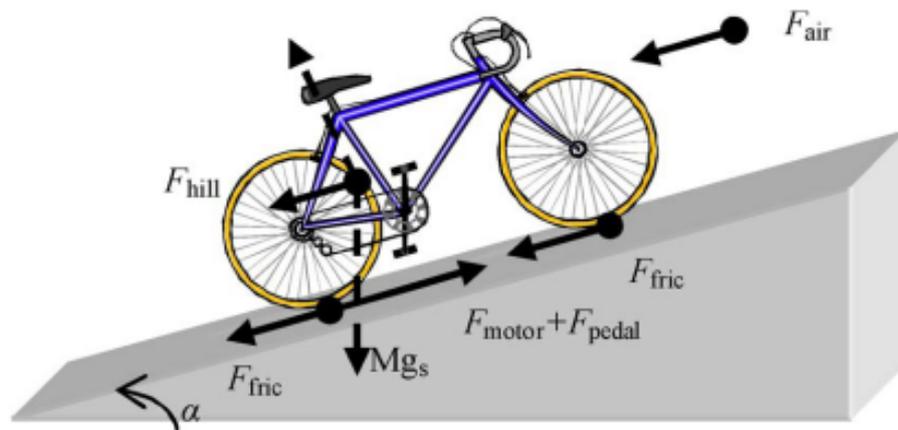


Abbildung 4.4: Fahrwiderstände am Pedelec [15]

Als relevante Fahrwiderstände lassen sich der aerodynamische Widerstand, der Rollwiderstand, der Beschleunigungswiderstand und der Steigungswiderstand der Fahrbahn antreffen. Die Darstellung in der obenstehenden Abbildung 4.4 zeigt die Richtungen der auftretenden Kraftkomponenten. Das auf den Motor wirkende Lastmoment ergibt sich aus der Summe aller Widerstände und dem Felgenreadius:

$$T_{load} = (F_{drag} + F_{roll} + F_{acc} + F_{tr}) \cdot \frac{D_{whe}}{2} \quad (4.19)$$

T_{load} – äußeres Lastmoment F_{drag} – aerodynamischer Widerstand
 F_{roll} – Rollwiderstand F_{acc} – Beschleunigungswiderstand
 F_{tr} – Steigungswiderstand D_{whe} – Felgendurchmesser

Der aerodynamische Widerstand entsteht durch die Druck- und Reibungsverluste der bewegten Luft an der Pedelec/Fahrer-Kombination. Die Strömungsgeschwindigkeit ist bei Windstille identisch der Fahrradgeschwindigkeit. Die Windgeschwindigkeit ist in der Realität im dynamischen Betrieb nur schwer erfassbar und wechselt bei einer gewollten

Die letzte Form der Belastung ist in der Steigung der Strecke anzutreffen. Durch die Neigung der Fahrbahn wirkt ein Teil der Gewichtskraft des Gesamtsystems in oder gegen die Bewegungsrichtung:

$$F_{tr} = m_{bike} \cdot g \cdot \tan \gamma \quad (4.23)$$

F_{tr} – Steigungswiderstand m_{bike} – Masse von Pedelec/Fahrer
 g – Erdbeschleunigung γ – Steigungswinkel der Fahrbahn

Der Ausdruck $\tan \gamma$ ist der Quotient der zurückgelegten Strecke und der Höhenänderung. Während sich die zurückgelegte Strecke durch Integration der Geschwindigkeit bestimmen lässt, kann die Höhenänderung innerhalb der Simulation aus dem als Kennfeld vorliegenden Höhenprofil entnommen werden. Die Formel 4.23 modifiziert sich somit zu:

$$F_{tr} = m_{bike} \cdot g \cdot \frac{\Delta H}{\int v_{bike}} \quad (4.24)$$

F_{tr} – Steigungswiderstand m_{bike} – Masse von Pedelec/Fahrer
 g – Erdbeschleunigung v_{bike} – Geschwindigkeit des Pedelecs
 ΔH – Höhenänderung der Fahrbahn

4.1.6 Fahrermodul

Innerhalb dieses Moduls erfolgt die Vorgabe der relevanten Eingaben des Fahrers. Dies ist neben der gewählten Unterstützung durch den BLDC-Motor auch die Vorgabe einer definierten Antriebsleistung. Von besonderer Interesse ist dabei das vom Fahrer generierte Drehmoment, welches als Lastmoment auf den Motor einwirkt. Im Gegensatz zu den Fahrwiderständen ist der Drehsinn des Fahrermoments und der des Motors größtenteils identisch und muss daher vor dem Motormodell als negative Eingangsgröße mit der äußeren Belastung kombiniert werden. Das erzeugte Moment berechnet sich abhängig von der Fahrerleistung und seiner Trittfrequenz:

$$T_{whe} = \frac{P_{dr}}{\omega} \quad (4.25)$$

T_{whe} – Drehmoment durch Fahrer am Rad P_{dr} – Antriebsleistung des Fahrers
 ω – Winkelgeschwindigkeit

Die Trittfrequenz und das vom Fahrer erzeugte Drehmoment sind durch eine Übersetzung direkt mit den am Rad wirkenden Kenngrößen gekoppelt. Die hierbei auftretenden Verluste sind verschwindend gering und werden an dieser Stelle vernachlässigt.

Zweiter wichtiger Aspekt in diesem Modul ist die Vorgabe der gewünschten Motorunterstützung. Diese Größe wird wie die Fahrerleistung direkt in diesem Modul erzeugt und ohne Weiterverarbeitung an das Leitungsmanagement übermittelt. Die Unterstützung sollte zu Testzwecken in einem sinnvollen Arbeitsbereich von 0 % bis etwa 100 % liegen.

4.1.7 Leistungsmanagement

Im Leistungsmanagement des Pedelecs findet die Schnittstelle von Mensch zu Maschine statt. Die aus dem Fahrermodell stammenden mechanischen Vorgaben werden hier in systematische Ansteuersignale für die BLDC-Regelung überführt. Je nach Radmoment des Fahrers und dem eingestellten Unterstützungsgrad berechnet ein Unterblock das zu erzeugende Sollmoment des BLDC-Motors. Da die direkte Vorgabe eines Moments im Motorregler nicht möglich ist, wird es über die Maschinenkenngröße in einen Zielstrom umgerechnet:

$$I_{targ} = \frac{S_{mot} \cdot T_{whe}}{k_{el}} \quad (4.26)$$

I_{targ} – Zielstrom

S_{mot} – Unterstützungsgrad des Pedelec

T_{whe} – Drehmoment durch Fahrer am Rad

k_{el} – Motorkonstante

Zu beachten ist in diesem Fall die zulässige Höchstgeschwindigkeit für eine Motorunterstützung. Ein zweiter Unterblock überwacht hierfür die aktuelle Fahrradgeschwindigkeit und setzt je nach Ergebnis den Wert für einen Status. Im Normal liegt der Wert für den Status bei 1. Wird die für Pedelecs zulässige Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h überschritten beträgt der Status 0. Durch eine Multiplikation von Status und der Batteriespannung lässt sich auf diese Weise eine Unterbrechung der Stromzufuhr leicht realisieren.

Die dritte Aufgabe des Leistungsmanagements ist die Vorgabe für den Modus des Motorreglers. Im Normalfall wird der Motor durch die direkte Vorgabe des Zielstroms im Strommodus betrieben. Ist die Geschwindigkeit des Pedelecs gering ist ein Wechsel in den Drehzahlmodus als Boostunterstützung sinnvoll. Vor allem beim Anfahren lässt sich so ein schnelles Erreichen der gewünschten Reisegeschwindigkeit erzielen. Der vorgegebene Zielstrom ist in diesem Fall bedeutungslos und wird durch eine gewünschte Zielgeschwindigkeit ersetzt.

4.2 Modellierung eines Testmotors

Die Umsetzung der allgemeinen Modellierungsstrategie am Beispiel eines Pedelecs verdeutlicht das Zusammenspiel der einzelnen Module im ganzen System. Aufgrund seines großen Umfangs ist das Pedelec-Modell für eine detaillierte Untersuchung des BLDC-Motors allerdings nicht geeignet. Die Einbindung realer Hardware in das Pedelec-System ist ohne Demontage des vorhandenen Fahrrads ebenfalls nur sehr schwer umsetzbar und daher in diesem Modell nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wird zusätzlich ein weiteres Antriebssystem in Form eines einzelnen Testmotors entwickelt. Dieser lässt sich später mit geringerem Aufwand untersuchen und mit einer realen elektrischen Maschine verbinden.

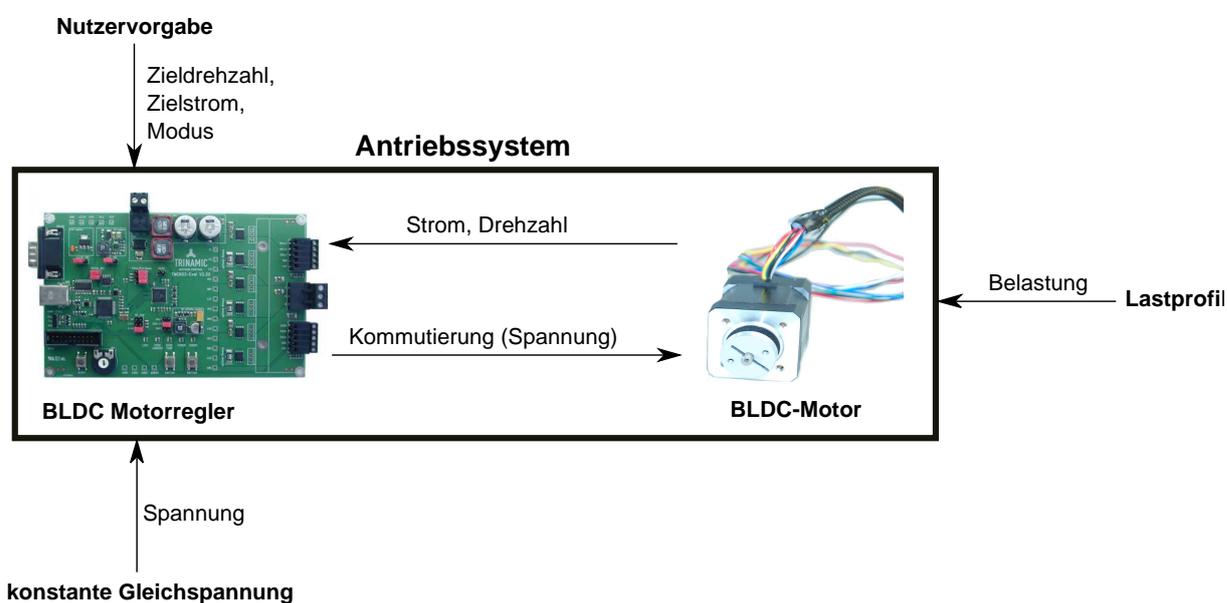


Abbildung 4.5: Modularer Aufbau des Testmotormodells

Das gesamte System besteht gemäß der oben stehenden Abbildung 4.5 aus einem BLDC-Motor und einem passenden Motorregler, deren Aufbau mit den jeweiligen Modulen aus dem Pedelec-Modell identisch sind. Einzig die vorgegebenen Einstellparameter unterscheiden sich hinsichtlich der entsprechenden Maschinenkenngrößen. Als Spannungsversorgung dient bei diesem Modell ein einfacher konstanter Wert, welcher die Spannung eines Netzteils abbildet und die Lithium-Ionen-Batterie des Pedelecs ersetzt. Die Belastung auf den Motor ist im Gegensatz zum Fahrrad nicht drehzahlabhängig und wird über ein variables Lastprofil definiert. Durch das fehlende Hybridsystem erhält der Motorregler seine Vorgabewerte wie die Solldrehzahl oder den Modus aus einer direkten Nutzervorgabe, welche ebenfalls je nach Anwendungsfall veränderbar ist.

4.3 Strategien zum Reglerentwurf bei BLDC–Motoren

Die optimale Auswahl der Reglerparameter ist für ein funktionierendes Gesamtmodell von großer Bedeutung. Der kaskadierte Aufbau führt zu einer gegenseitigen Beeinflussung des Strom– und des Drehzahlreglers und erschwert auf diese Weise den Reglerentwurf. Als Abhilfe ist hier die eigenständige Betrachtung von Motor und Regelung in einer vom Gesamtsystem unabhängigen Testumgebung zu empfehlen. Die Antriebseinheit lässt sich dabei als ein Zusammenspiel einzelner Übertragungsfunktionen betrachten und kann in seiner Funktion im Zeit– oder Frequenzbereich bewertet werden.

4.3.1 Analytischer Reglerentwurf im Frequenzbereich

Für beide Auswertestrategien ist es sinnvoll, den Antrieb in seine Hauptbestandteile zu zerlegen. Die Darstellung in Abbildung 4.6 zeigt den schematischen Aufbau des Systems als Blockschaltbild, welches im Wesentlichen aus vier Übertragungsfunktionen zusammengesetzt ist. Die zwei in blau dargestellten Funktionen ersetzen die Wirkung des Strom– sowie des Drehzahlreglers. Die beiden weiteren in gelb gekennzeichneten Funktionen bilden das physikalische Verhalten des Motors bei Berechnung der zu regelnden Größen ab. Die Eingangswerte für die Regler sind wie bekannt die Differenz der Soll– und Istwerte. Auf Seiten des Motors existieren neben den Eingangsgrößen auch Störgrößen in Form der induzierten BEMF bei der Strombildung und der äußeren Last bei der Drehzahlberechnung.

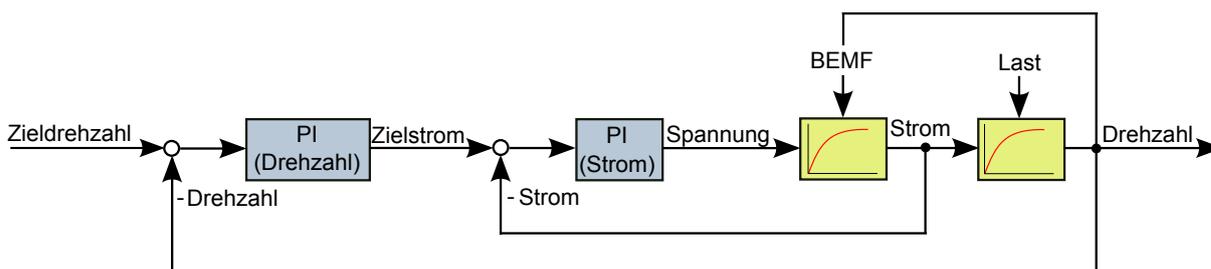


Abbildung 4.6: Blockschaltbild des Antriebssystems

Um den Einfluss der BEMF bei der Strombildung zu eliminieren, sollte die Auslegung des Stromreglers im Stillstand erfolgen, da der Motor in diesem Betriebspunkt keine Spannung induziert. Im Motormodell wird ein Stillstand erzielt, wenn die äußere Last identisch mit dem erzeugten elektrischen Drehmoment ist.

Ausgehend von Formel 2.1 lässt sich die Übertragungsfunktion (ÜF) des Stromflusses bei Motorstillstand als PT1–Verhalten beschreiben:

$$G_{S,I}(s) = \frac{I}{U_{targ}} = \frac{1/R}{1 + L/R \cdot s} \quad (4.27)$$

$G_{S,I}$ – ÜF des Motorstroms	s – komplexe Laplace–Variable
I – aktueller Motorstrom	U_{targ} – Zielspannung
R – Phasenwiderstand	L – Spuleninduktivität

Werden die Begrenzungsfunktionen innerhalb des Stromreglers vernachlässigt, lässt sich sein Übertragungsverhalten basierend auf Formel 4.10 wie folgt ausdrücken:

$$G_{R,I}(s) = \frac{U_{targ}}{I_{targ} - I} = \frac{K P_I \cdot s + K I_I}{s} \quad (4.28)$$

$G_{R,I}$ – ÜF des Stromreglers	s – komplexe Laplace–Variable
U_{targ} – Zielspannung	I_{targ} – Zielstrom
I – aktueller Motorstrom	$K P_I$ – P–Anteil des Stromreglers
$K I_I$ – I–Anteil des Stromreglers	

Da die BEMF durch den stillstehenden Motor entfällt, ist der Regelkreis des Stromreglers störungsfrei. Die gesamte Übertragungsfunktion ist deshalb das Verhältnis vom aktuellen Strom zum Zielwert und ergibt sich durch Kombination und Umformung von Formel 4.27 und 4.28:

$$G_I(s) = \frac{I}{I_{targ}} = \frac{G_{R,I}(s) \cdot G_{S,I}(s)}{1 + G_{R,I}(s) \cdot G_{S,I}(s)} \quad (4.29)$$

G_I – ÜF des Stromkreises	s – komplexe Laplace–Variable
I – aktueller Motorstrom	I_{targ} – Zielstrom
$G_{R,I}$ – ÜF des Stromreglers	$G_{S,I}$ – ÜF des Motorstroms

Die beiden zusätzlichen Übertragungsfunktionen der Drehzahlregelung beschreiben die Wirkung des entsprechenden Reglers sowie des Motors bei der Drehzahlberechnung und

sind äquivalent zur Stromregelung aufgebaut. Die Momentenbilanz in Formel 2.5 liefert das Übertragungsverhalten des Motors:

$$G_{S,n}(s) = \frac{\omega}{T_{el} - T_{load}} = \frac{1/k_{fric}}{1 + J/k_{fric} \cdot s} \quad (4.30)$$

$G_{S,n}$ – ÜF der Winkelgeschwindigkeit	s – komplexe Laplace-Variable
ω – Winkelgeschwindigkeit	T_{el} – elektrisches Drehmoment
T_{load} – äußeres Lastmoment	k_{fric} – Reibungskoeffizient
J – Massenträgheitsmoment	

Die Wirkung des Drehzahlreglers in Formel 4.8 kann ebenfalls mithilfe der Laplace-Variablen dargestellt werden. Zu beachten ist an dieser Stelle die Umrechnung von der Winkelgeschwindigkeit zur Drehzahl über die Kreiszahl, welche zur besseren Übersicht nicht aufgeführt ist:

$$G_{R,n}(s) = \frac{I_{targ}}{n_{targ} - \omega} = \frac{KP_n \cdot s + KI_n}{s} \quad (4.31)$$

$G_{R,n}$ – ÜF des Drehzahlreglers	s – komplexe Laplace-Variable
I_{targ} – Zielstrom	n_{targ} – Zieldrehzahl
ω – Winkelgeschwindigkeit	KP_n – P-Anteil des Drehzahlreglers
KI_n – I-Anteil des Drehzahlreglers	

Die gesamte Drehzahlregelung beinhaltet neben den erläuterten vier Übertragungsfunktionen auch die induzierte BEMF und die äußere Belastung. Die Störung durch die BEMF ist dabei gemäß Formel 2.2 über die Maschinenkonstante linear von der Drehzahl abhängig. Die Berechnung des elektrischen Moments aus dem aktuellen Motorstrom erfolgt ebenfalls über die Maschinenkonstante.

Da bei der Drehzahlregelung infolge der Belastung eine äußere Störgröße anzutreffen ist, können aus den oben aufgeführten Gleichungen zwei umfangreiche Übertragungsfunktionen abgeleitet werden. Neben der Systemantwort bei einer Änderung der Führungsgröße lässt sich auch die Wirkung der Belastung in einer Übertragungsfunktion darstellen. Als Beispiel ist an dieser Stelle das Verhältnis der aktuellen Drehzahl und dem Sollwert beim

lastfreien Betrieb beschrieben. Zur besseren Übersicht wird die Laplace-Variable an dieser Stelle weggelassen:

$$G_n = \frac{\omega}{n_{targ}} = \frac{k_{el} \cdot G_{R,n} \cdot G_{R,I} \cdot G_{S,I} \cdot G_{S,n}}{1 + k_{el}^2 \cdot G_{S,I} \cdot G_{S,n} + G_{R,I} \cdot G_{S,I} + k_{el} \cdot G_{R,n} \cdot G_{R,I} \cdot G_{S,I} \cdot G_{S,n}} \quad (4.32)$$

G_n – ÜF des Drehzahlkreises	ω – Winkelgeschwindigkeit
n_{targ} – Zieldrehzahl	k_{el} – Motorkonstante
$G_{R,n}$ – ÜF des Drehzahlreglers	$G_{R,I}$ – ÜF des Stromreglers
$G_{S,I}$ – ÜF des Motorstroms	$G_{S,n}$ – ÜF der Winkelgeschwindigkeit

Für den analytischen Reglerentwurf können die Übertragungsfunktionen mit einer geeigneten Software untersucht werden. Neben der Stabilitätsprüfung anhand des Nyquist Kriteriums sind vor allem die Lage der Polstellen der jeweiligen Funktionen von großer Relevanz. Da es im Motorbetrieb immer wieder zu Störungen durch die BEMF und einer Last kommt, befinden sich die Polstellen in der Nähe der grünen Geraden aus Abbildung 2.8. Die Verhältnisse der P- und I-Anteile sind somit festgelegt. Die absoluten Werte der P-Anteile richten sich nach der jeweiligen Ausführung und den zulässigen Werten im Reglermodell. Idealerweise liegen die im Regler berechneten Sollwerte bei einem Sprung etwas unterhalb der maximal zulässigen Werte. Die Darstellung der Polstellen und die Nyquist-Diagramme des Pedelec-Modells und des Testmotors sind Anhang A.2 zu entnehmen. Die auf diese Weise ermittelten Reglerparameter sind im Anhang A.1 aufgeführt.

4.3.2 Empirischer Reglerentwurf im Zeitbereich

Eine Alternative zu der analytischen Reglerauslegung stellt der empirische Reglerentwurf dar. Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist der direkte Praxisbezug und die schnelle Verwendung aufgrund des geringen Aufwands. Hierdurch ist es auch für Nutzer ohne fachspezifische Kenntnisse im Bereich der Regelungstechnik anwendbar. Im Gegensatz zur analytischen Methode wird an dieser Stelle eine Bewertung im Zeitbereich vorgenommen.

Das Übertragungsverhalten der einzelnen PI-Regler kann entweder direkt am realen Bauteil oder am Motormodell getestet werden. Sofern dieses Verhalten als Funktion bekannt und darstellbar ist, lässt sich eine Bewertung auch anhand der erläuterten Übertragungsfunktion durchführen. Ausgehend von einer definierten Änderung des Sollwerts ist die Antwort des gesamten Regelkreises aufzuzeichnen.

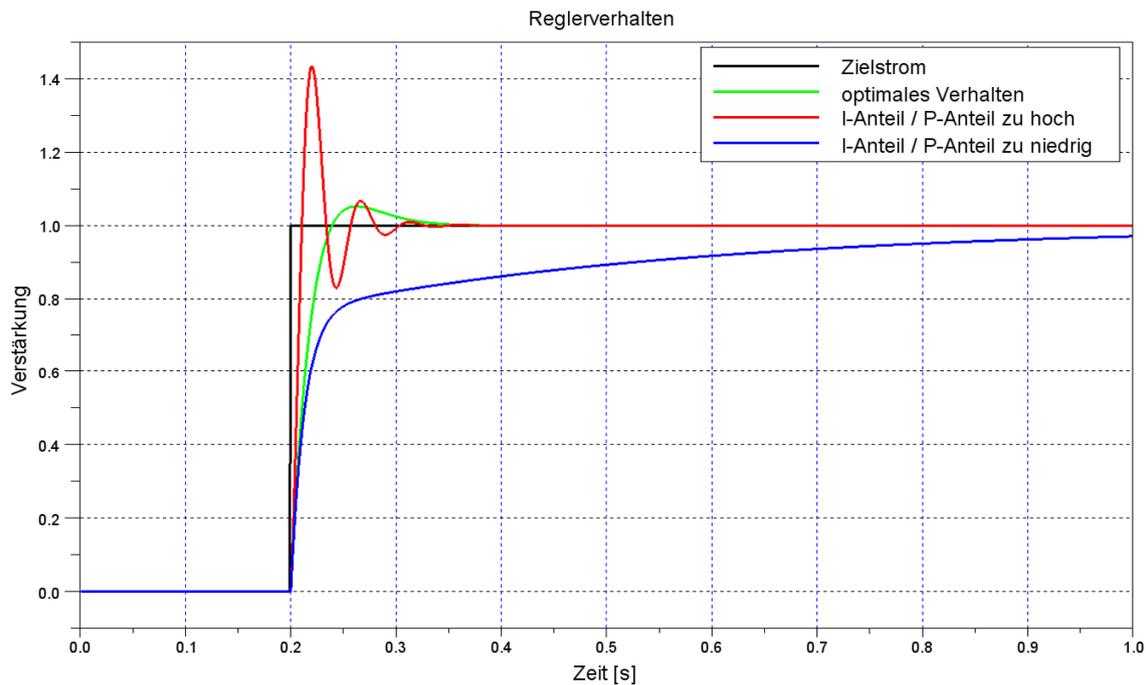


Abbildung 4.7: Übertragungsverhalten eines PI-Reglers

In der Abbildung 4.7 ist die Sprungantwort des Stromreglers bei stehendem Motor und unterschiedlichen PI-Parametern dargestellt. Der gewünschte Verlauf des Zielstroms wird dabei von keinem Regler genau getroffen. Da bei dem verwendeten PI-Regler zwei Kenngrößen variabel sind, ist neben den absoluten Werten des P- bzw. des I-Anteils auch deren Verhältnis entscheidend. Ein im Vergleich zum P-Anteil zu hoher Verstärkungsfaktor des I-Reglers führt zu einem Überschwingen des erzielten Motorstroms. Auf der anderen Seite bewirkt ein geringer I-Anteil eine zu langsame Annäherung des Stroms an den Sollwert, da die Dämpfung des Systems in diesem Fall relativ hoch ist. Optimal ist der Verlauf des grünen Graphen, da dieser einen flüssigen Übergang von der anfänglich proportional wirkenden Verstärkung zur anschließenden integralen Verstärkung aufweist. Das Verhältnis der beiden Reglerparameter ist diesem Verlauf anzupassen. Die absoluten Werte dieser Parameter haben einen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des Reglers und müssen deshalb je nach gewünschtem Verhalten ausgewählt werden.

5 Implementierung und Test

Die folgenden Abschnitte beinhalten die Umsetzung der in den vorangehenden Seiten vorgestellten Systeme in einer Simulationsumgebung. Abschließend werden die implementierten Modelle anhand definierter Randbedingungen getestet und mit Referenzmessungen an realen Bauteilen verglichen. Eine Bewertung der so gesammelten Kenntnisse gibt Aufschluss über die Qualität und die Einsatzbedingungen der entwickelten Modelle.

5.1 Implementierung der entwickelten Modelle in Scilab und Xcos

Das Softwarepaket Scilab ist die in dieser Arbeit eingesetzte Simulationsumgebung. Vorwiegend wird es bei der Modellierung von numerischen Problemen angewandt und ist über die Internetseite der Scilab Enterprises² kostenfrei erhältlich. Die Programmstruktur und -bedienung ähnelt der bekannten Simulationssoftware Matlab und ist zu dieser teilweise kompatibel. Als grafische Oberfläche dient das in Scilab enthaltene Zusatzpaket Xcos, welches analog zum Matlab-Tool Simulink aufgebaut ist.

Dem Anwender stehen dabei für die gebräuchlichen Betriebssysteme verschiedene Programmversionen zur Verfügung. In der Praxis weisen diese Versionen in einigen Konstellationen große Unterschiede in Bezug auf Stabilität und Kompatibilität zueinander auf. Für das in dieser Arbeit eingesetzte Betriebssystem hat sich die in der folgenden Tabelle 5.1 aufgeführte Version von Scilab als stabilste Lösung herausgestellt. Aufgelistet sind an dieser Stelle auch die einzelnen Zusatzpakete, welche für bestimmte Anforderungen und Simulationen unerlässlich sind und auf den folgenden Seiten näher betrachtet werden.

5.1.1 Übersicht der verwendeten Zusatzpakete und Einstellungen

Die in der grafischen Oberfläche Xcos vorhandenen Bausteine müssen vor einer erfolgreichen Verwendung kompiliert werden. Dieser Vorgang wird für die meisten Elemente von einem eigenen Compiler der Software Scilab durchgeführt. Einige Bausteine erfordern jedoch zusätzlich eine Kompilierung in die Programmiersprache C. Obwohl Scilab

²www.scilab.org

auf dieser Programmiersprache basiert, bringt es standardmäßig keinen C-Compiler mit. Da auch das verwendete Betriebssystem über keinen passenden Compiler verfügt, ist eine separate Installation erforderlich. Das von Microsoft empfohlene Paket Visual Studio beinhaltet einen geeigneten C-Compiler. Allerdings ist die Installation vor allem bei der 64 Bit-Version sehr aufwendig, da hier viele kleine Pakete manuell installiert werden müssen. Auch die Speichergröße auf dem Datenträger ist durch den Umfang von Visual Studio sehr groß. Für diese Arbeit wird deshalb der kompakte C-Compiler LCC benutzt. Dieser lässt sich entweder in diversen Quellen ³ finden oder einfach in Scilab über den Modulmanager ATOMS installieren. Da dieser Compiler nur in einer 32 Bit-Version zur Verfügung steht, ist auch die entsprechende Scilab Version zu verwenden.

Betriebssystem	Windows 7	64 Bit
Simulationssoftware	Scilab	5.3.3 32 Bit
C-Compiler	LCC-Win	0.4-1 32 Bit
Zusatzpaket für elektrische Maschinen	XCPL-Toolbox	0.1-2
Zusatzpaket für Verbindung mit serieller Schnittstelle	Serial-Communication-Toolbox	0.4-1
Bibliothek für Verbindung mit USB-Schnittstelle	SiSeLi-Toolbox	0.5

Tabelle 5.1: Eingesetzte Software und Zusatzpakete

Neben dem Compiler lässt sich im Modulmanager auch ein Zusatzpaket für die Simulation elektrischer Maschinen finden. Die genaue Funktionsweise der XCPL-Toolbox ist in der aufgeführten Version jedoch nicht eindeutig nachvollziehbar. Da einige Tests dieser Toolbox auch zu Programmabstürzen führten, wird die Modellierung der Antriebe nicht über dieses Paket realisiert, sondern anhand der in Abschnitt 4 erläuterten Vorgehensweise umgesetzt.

Für die Verbindung von realer Hardware mit dem Simulationsrechner und eine erfolgreiche Kommunikation mit Scilab sind weitere Zusatzpakete erforderlich. Das einzubindende Steuergerät verfügt wie im nächsten Abschnitt 5.1.2 zu sehen sowohl über eine serielle als auch eine USB-Schnittstelle. Für den Datenaustausch über eine serielle Schnittstelle bietet Scilab im Modulmanager die Nutzung der Serial-Communication-Toolbox an. Für eine Verbindung über eine USB-Schnittstelle ist hingegen die Nutzung einer im Internet ⁴ kostenfrei erhältlichen Bibliothek, der SiSeLi-Toolbox, nötig. Im Gegensatz zur Serial-Communication-Toolbox ist die SiSeLi in der Lage auch über eine virtuelle serielle

³z. B. <http://www.cs.virginia.edu/lcc-win32/>

⁴<http://www.askrprojects.net/software/siseli/index.html>

Schnittstelle mit eingebundener Hardware zu kommunizieren. Da der verwendete PC über keine echte serielle Schnittstelle verfügt, stellt die Nutzung der SiSeLi in dieser Arbeit die einzige Möglichkeit dar, Hardware in das Modell einzubinden. Die genaue Vorgehensweise bei diesem Verfahren wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

Neben der Installation von Zusatzpaketen müssen innerhalb der grafischen Oberfläche Xcos weitere Einstellungen zur Simulation vorgenommen werden. Um die Ergebnisse der einzelnen Tests vergleichen zu können, werden die meisten Simulationen mit den in Tabelle 5.2 dargestellten Einstellungen durchgeführt. Die diskrete Berechnung erfolgt in den Modellen im 10 kHz Takt. Dies ist auch die Taktung des Stromreglers aller Reglermodelle, während der Drehzahlregler im 1 kHz Takt angesteuert wird.

absolute Toleranz des Integrators	10^{-4} s
relative Toleranz des Integrators	10^{-4} s
Zeit-Toleranz	10^{-4} s
maximales Zeitintervall der Integration	10^5 s
Gleichungslöser	CVODE
maximale Stufengröße	0

Tabelle 5.2: Simulationseinstellungen in Xcos

Die Auflösung der grafischen Darstellungen in den späteren Abschnitten weichen von den oben aufgeführten Werten ab und variieren je nach Anwendungsfall und Simulationsdauer. Um Rechenzeit und Speicherplatz zu sparen erfolgt die Ausgabe der Ergebnisse bei lange andauernden Messungen teilweise nur mit einer Taktung von 1 Hz.

5.1.2 Strategien zur Verwendung von „hardware-in-the-loop“ via USB-Schnittstelle

Die Einbindung realer Hardware in Scilab und Xcos erfolgt mithilfe eines Testmotors und einem passenden Steuergerät. Dieses „Board“ besitzt im Wesentlichen fünf Anschlüsse, welche in der folgenden Abbildung 5.1 dargestellt sind. Während der erste Anschluss das Gerät mit einer Gleichspannung versorgt (Power), dienen zwei weitere Anschlüsse der Verbindung mit dem eigentlichen Motor. Eine dieser Steckverbindungen legt die genutzte Spannung an den Motor an (Motor). Über den zweiten Anschluss erhält das Steuergerät die Daten der im Motor verbauten Hallsensoren (Hall). Die letzten beiden Anschlüsse dienen der Verbindung mit dem PC über die serielle Schnittstelle (RS232) und die USB-Schnittstelle. Da der genutzte PC wie erwähnt nur über USB-Schnittstellen verfügt, wird er über ein geeignetes Kabel mit dem Gerät verbunden.

Sobald das Gerät mit Spannung versorgt wird und erfolgreich mit dem PC verbunden ist, richtet es auf diesem eine virtuelle serielle Schnittstelle ein. Über diese kann die Software Scilab mittels der SiSeLi-Toolbox mit dem Gerät kommunizieren und einen Datentransfer vornehmen. Hierzu ist zuerst das Laden der Bibliothek innerhalb der Simulationssoftware mit nachfolgender Schnittstelleneinbindung vorzunehmen. Abschließend werden Verbindungseinstellungen festgelegt und die Verbindung schlussendlich hergestellt.

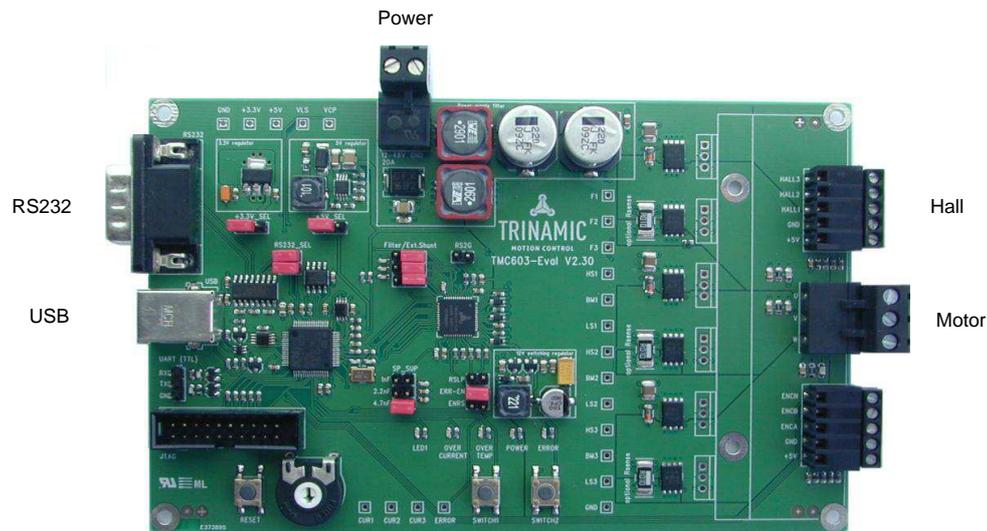


Abbildung 5.1: Anschlüsse des verwendeten Motorreglers (Bild aus [35])

Der eigentliche Datentransfer findet in Form einzelner Bytes statt und unterliegt einem wiederkehrenden Muster:

- Senden von Sollwerten und Anfragen vom PC an das Steuergerät
- Speicherung der Antwortdaten im Speicher der SiSeLi-Toolbox
- Auslesen und Leeren des Toolbox-Speichers

Jedes vom PC korrekt gesendete Signal wird vom Gerät beantwortet und in einem Speicher der Toolbox abgelegt. Dieser Prozess findet sowohl bei der Vorgabe von Sollwerten als auch beim Empfang von Istwerten statt. Das Gerät sendet aktiv keine Daten an den PC sondern kann nur auf dessen Anfragen reagieren. Dies führt beim Auslesen von Motorgrößen zu einem kontinuierlichen Kreislauf der aufgelisteten Vorgänge. Besonders wichtig ist dabei das Löschen des Speichers nach erfolgreichem Auslesen, da dieser nur eine geringe Größe aufweist und schnell überfüllt ist. In diesem Fall werden die gespeicherten Daten überschrieben, wodurch die Zuordnung der einzelnen Bytes nicht mehr korrekt ist. Zwischen den einzelnen gesendeten Kommandos sollte daher stets ein Löschvorgang des Speichers der SiSeLi-Toolbox erfolgen.

Zu beachten ist diese Problematik hauptsächlich beim Auslesen der Motorkenngrößen. Um einen kontinuierlichen Datenstrom zu gewährleisten, muss der PC immer eine Anforderung an das Steuergerät senden. Die gespeicherten Antwortdaten werden dabei immer erst in der Toolbox abgelegt bevor ein Auslesen und Löschen stattfindet. Dieser Prozess führt dazu, dass sich mehrere Kenngrößen gemäß der nächsten Abbildung 5.2 nicht parallel sondern nur nacheinander auslesen lassen.

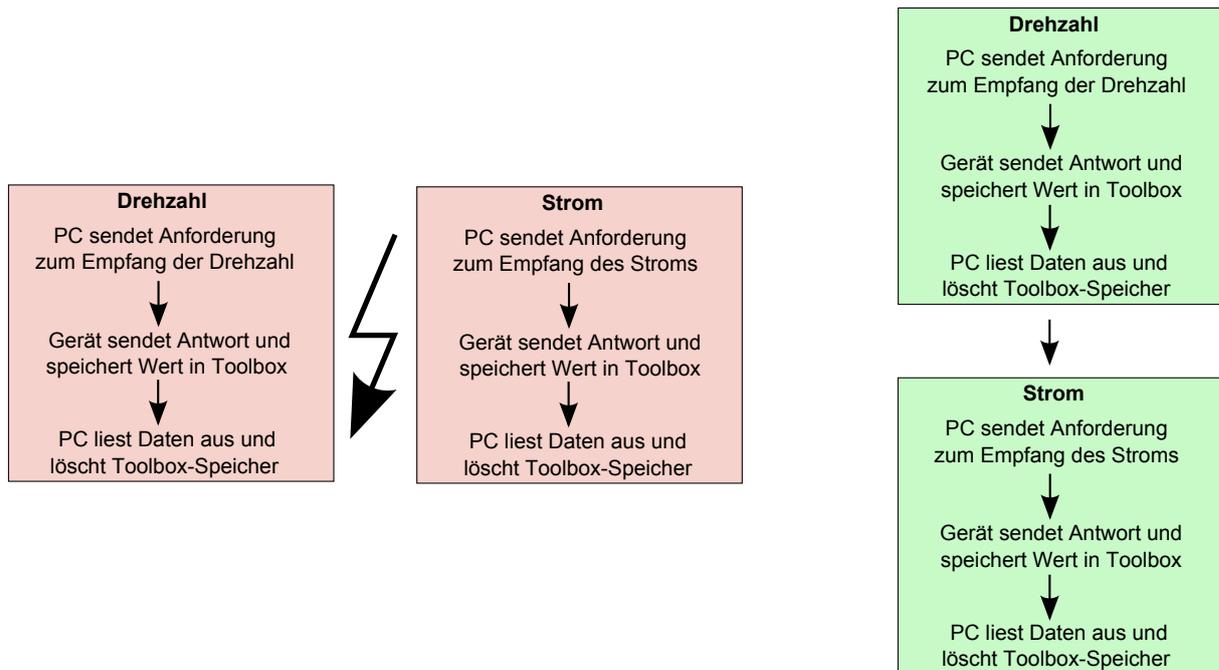


Abbildung 5.2: Datentransfer beim Empfang mehrerer Motorkenngrößen

Da ein paralleler Datentransfer zwischen PC und Gerät eine zeitgleiche Speicherung der einzelnen Bytes zur Folge hat, ist deren Zuordnung in diesem Fall nicht mehr möglich bzw. liefert keine korrekten Ergebnisse. Bei einem zeitgleichen Datentransfer des in Abbildung 5.2 gezeigten Beispiels ist es für die Software nicht möglich zwischen den Bytes für den Strom und die Drehzahl zu unterscheiden.

Behoben wird dieses Problem durch eine zeitliche Abfolge der Auslesevorgänge. Nachteilig bei diesem Verfahren ist die langsamere Taktung der Auslesevorgänge pro Messgröße, welche von der Anzahl der insgesamt zu erfassenden Kennwerte abhängt. Bei den im Beispiel existierenden beiden Messgrößen werden deren einzelne Werte nur in jedem zweiten Simulationsschritt ausgelesen. Eine Erhöhung der Messgrößen verringert diese Taktung zunehmend und führt bei der durchschnittlichen Datenrate der USB-Schnittstelle schnell zu einer groben Datenerfassung. Dieses Problem lässt sich nur durch die Verwendung einer schnelleren Schnittstelle reduzieren. Denkbar wäre hier beispielsweise der Datentransfer

über eine EtherCAT-Schnittstelle, bei der mehrere Messwerte gleichzeitig zwischen Gerät und PC in einem Puffer zyklisch übertragen werden können [5].

5.2 Messungen am Pedelec

Die Validierung des entwickelten Pedelec-Modells erfolgt anhand geeigneter Simulationen, deren Ergebnisse teilweise mit bereits existierenden Referenzmessungen verglichen werden. Da eine Messung am realen Fahrrad auf einer öffentlichen Straße im Rahmen dieser Arbeit aus Zeitgründen nicht möglich ist, werden die Messergebnisse einer anderen Arbeit in [20] verwendet. Allerdings ist ein spezieller Prüfstand für detaillierte Untersuchungen des Pedelec-Motors bereits in Planung und wird voraussichtlich nach Fertigstellung dieser Arbeit einsatzbereit sein. Für die Analyse des Batteriesystems existieren momentan keine geeigneten Messinstrumente. Da auch vom Hersteller keine vergleichbaren Untersuchungen öffentlich verfügbar sind, lassen sich keine Aufzeichnungen am realen System durchführen.

Die folgenden Seiten erläutern die Umstände der bereits existierenden Referenzmessung und zeigen die erzielten Ergebnisse. Außerdem verdeutlicht eine detaillierte Analyse die Qualität der über die Simulation gewonnenen Kenntnisse.

5.2.1 Randbedingungen der existierenden Referenzmessung

Die Ergebnisse einer durchgeführten Testfahrt in einer vorhandenen Arbeit in [20] sind für etwaige Vergleiche verfügbar. Es handelt sich hierbei um eine Fahrt auf dem in Abschnitt 4.1 vorgestellten Pedelec innerhalb des öffentlichen Straßenverkehrs. Durch einen speziellen Umbau erfolgt die Unterstützung des Vorderradmotors nicht über das gemessene Fahrermoment, sondern wird über einen Handschalter variabel vorgegeben. Da die vom Fahrer aufgebrachte Leistung während der Fahrt nicht aufgezeichnet wurde, liegen hierzu keine Daten vor. Die Charakteristik der gefahrenen Strecke ist in Anhang A.4 dargestellt.

5.2.2 Simulations- und Messergebnisse beim Pedelec

Das Zusammenspiel zwischen der modellierten Lithium-Ionen-Batterie und dem Batteriemanagement wird in der nachfolgenden Abbildung 5.3 verdeutlicht. Dargestellt sind hier die Verläufe der relevanten Ströme und Spannungen. Als Vorgabegröße dient der in

grün abgebildete Verlauf des Motorstroms. Nach einem anfänglichen Entladevorgang wird mithilfe des negativen Motorstroms Energie in die Batterie rekuperiert. Dieser Vorgang setzt sich solange fort, bis die Batterie nach etwa 1700 s ihre obere Spannungsgrenze erreicht. Ab diesem Zeitpunkt trennt das Batteriemanagement die Verbindung von Motor und Batterie und unterbindet eine Überladung. Die in schwarz dargestellten Verläufe für den Batteriestrom und die am Motor anliegende Spannung fallen innerhalb dieses Zustands auf Null.

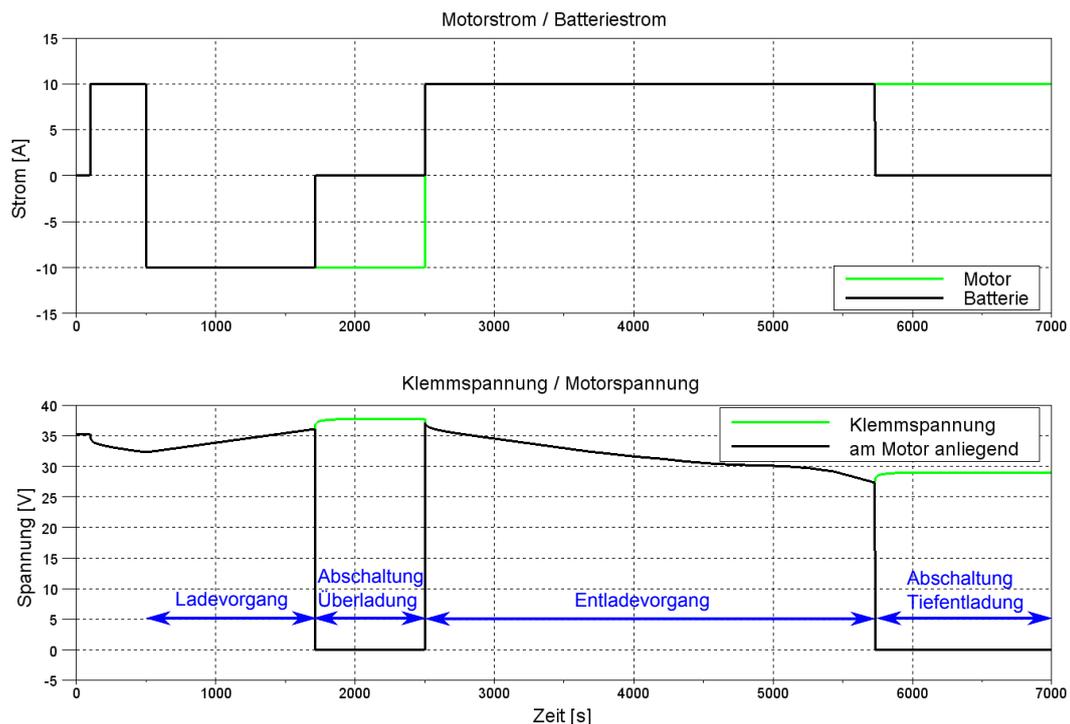


Abbildung 5.3: Überwachung der Spannung im Batteriemodell

Erst bei einer Stromentnahme ab 2500 s werden Batterie und Motor wieder miteinander verbunden. Der anschließende Entladevorgang dauert an, bis die Klemmspannung des Batteriemodells seinen zulässigen unteren Grenzwert erreicht. Ab diesem Zeitpunkt trennt das Management die beteiligten Module wieder voneinander und verhindert auf diese Weise eine Tiefentladung.

Eine weitere Aufgabe des Energiemanagements ist die Überwachung der Batterietemperatur. In der folgenden Abbildung 5.4 sind die Ergebnisse einer Simulation unter warmer Umgebungstemperatur bei vorgegebenem Motorstrom dargestellt. Die Temperatur in der Batterie und die der Umgebung befinden sich zu Beginn der Simulation im Gleichgewicht. Deutlich zu erkennen ist, dass sich die Batterie sowohl beim Entladen als auch

beim Laden kontinuierlich erwärmt. Nach ungefähr 5500 s erreicht ihre Temperatur den maximal zulässigen Wert und bewirkt eine Trennung der elektrischen Verbindung. Da die Verluste durch den ausbleibenden Stromfluss als Wärmequelle entfallen, nähert sich die Temperatur in der folgenden Abkühlphase wieder dem Umgebungswert an. Sobald die Temperatur den in der Hystereseschleife umgesetzten Grenzwert erreicht, verbindet das Energiemanagement nach 7500 s den Motor wieder mit der Batterie.

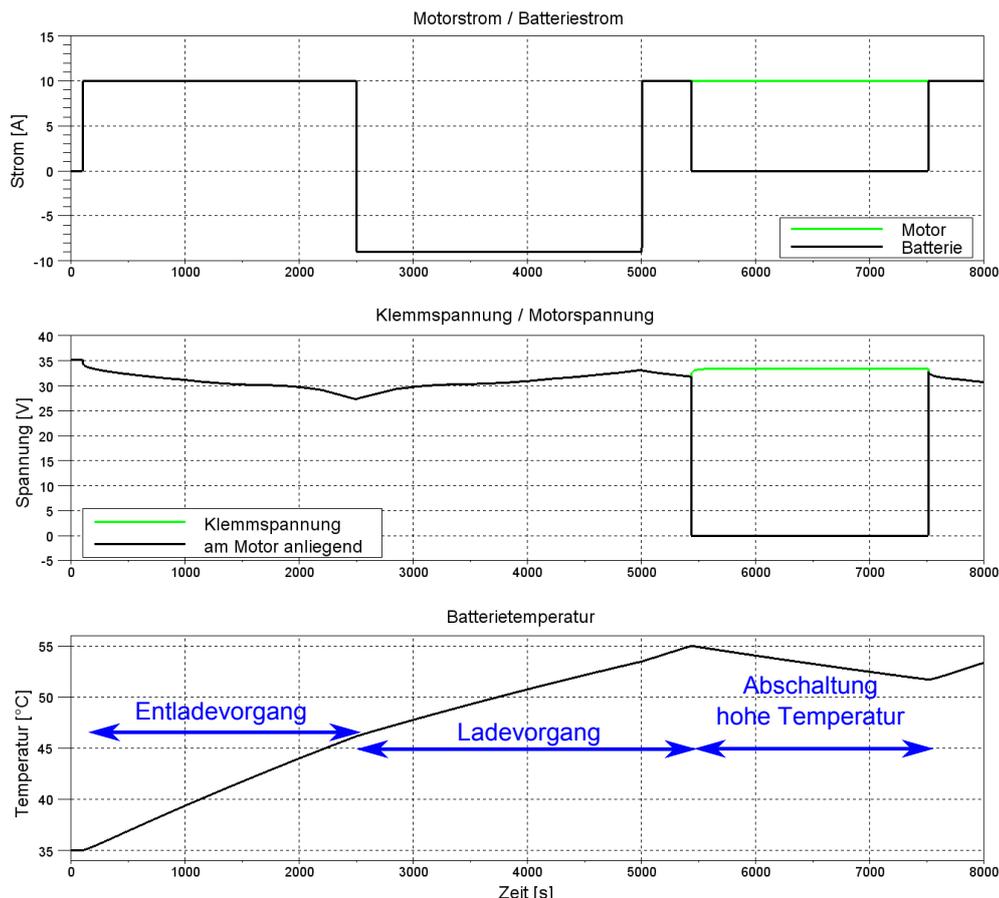


Abbildung 5.4: Überwachung der Temperatur im Batteriemodell

Die Ergebnisse einer Streckensimulation in der nächsten Abbildung 5.5 zeigt die Wirkung des Belastungsmoduls beim Pedelec-Modell. Dargestellt sind hier das Höhenprofil der modellierten Fahrbahn sowie die resultierenden Belastungen bei unterschiedlichen konstanten Geschwindigkeiten. Sämtliche Fahrwiderstände sind gemäß dem Modell zu einem am Rad angreifenden Lastmoment zusammengefasst. Zur besseren Übersicht und Vergleichbarkeit sind die einzelnen Ergebnisse in diesem Fall nicht über die benötigte Zeit sondern über die zurückgelegte Strecke aufgetragen. Infolge der höheren Geschwindigkeit und des zunehmenden Luftwiderstands ist die Belastung des in schwarz dargestellten

Graphen größer als bei der in blau abgebildeten niedrigen Geschwindigkeit. Der absolute Abstand beider Kurven ist dabei konstant. Liegt bei einer Bergabfahrt eine negative Last vor, muss das Pedelec für die Erhaltung der Geschwindigkeit gebremst werden. Eine Rekuperation der notwendigen Bremsenergie in das Batteriesystem ist in diesen Fällen möglich. Die un stetigen Verläufe beider Lastmomente sind auf die Linearisierung des diskreten Fahrbahnprofils zurückzuführen. Diese bewirkt in der Simulation eine sprunghafte Änderung der Fahrbahnsteigung und ruft eine un stetige Belastung hervor. Die erzielten Ergebnisse lassen sich zur weiteren Simulation an das Motormodell leiten. Alternativ können die Belastungen über einen geeigneten Prüfstand auch an einem realen Motor angelegt werden.

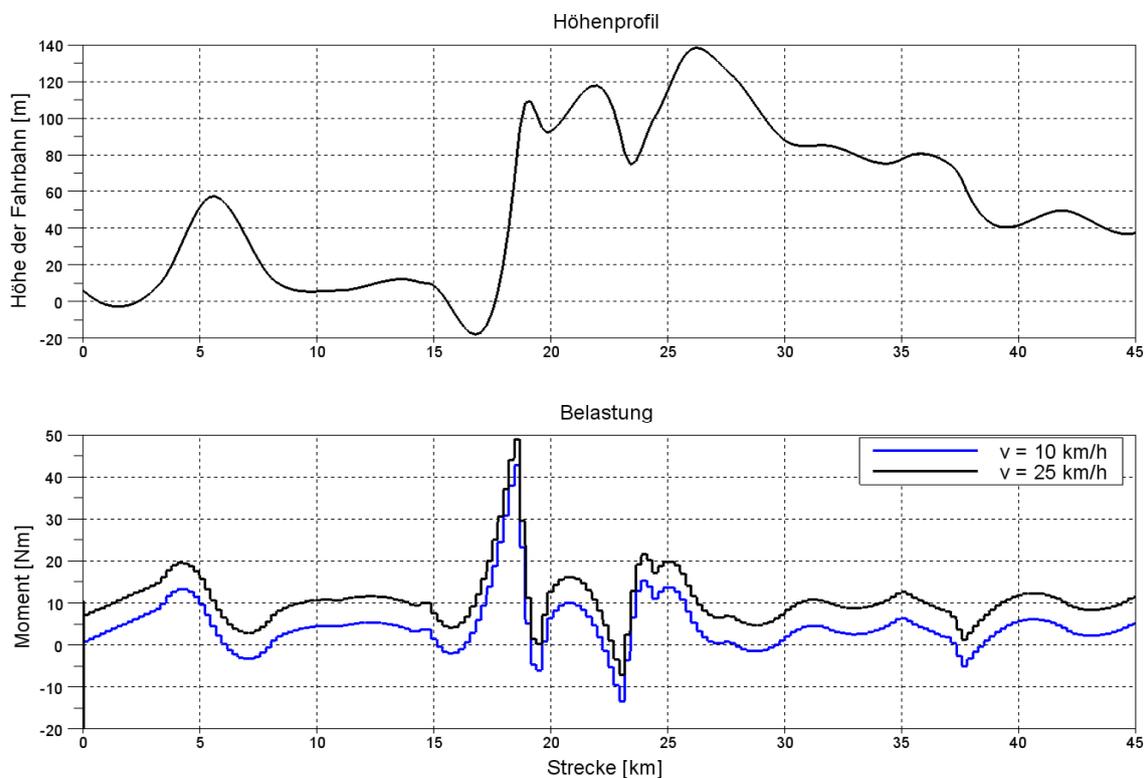


Abbildung 5.5: Belastung durch eine hügelige Strecke

Die folgende Abbildung 5.6 zeigt die Ergebnisse der vorgestellten Referenzmessung und vergleicht diese mit den simulierten Werten. Um die jeweiligen Größen miteinander vergleichen zu können, fungiert die gemessene reale Geschwindigkeit als Zielwert für das Modell, welches im Drehzahlmodus betrieben wird. Da die vom Fahrer erbrachte Antriebsleistung nicht aufgezeichnet ist, wird sie auch im Modell nicht berücksichtigt. Die Vorgabe einer konstanten Leistung scheidet aufgrund der zwischenzeitlichen Stillstände ebenfalls aus. In diesen Fällen würde eine Fahrerleistung eine Gegenregelung des Motormodells hervorrufen.

Aufgeführt sind in der Abbildung neben dem Höhenprofil auch die Fahrradgeschwindigkeiten und Motorströme sowie die Spannungen der Batterie. Die in grün dargestellten Verläufe sind die bei der Testfahrt gemessenen Werte während die schwarzen Verläufe dem Modell entstammen.

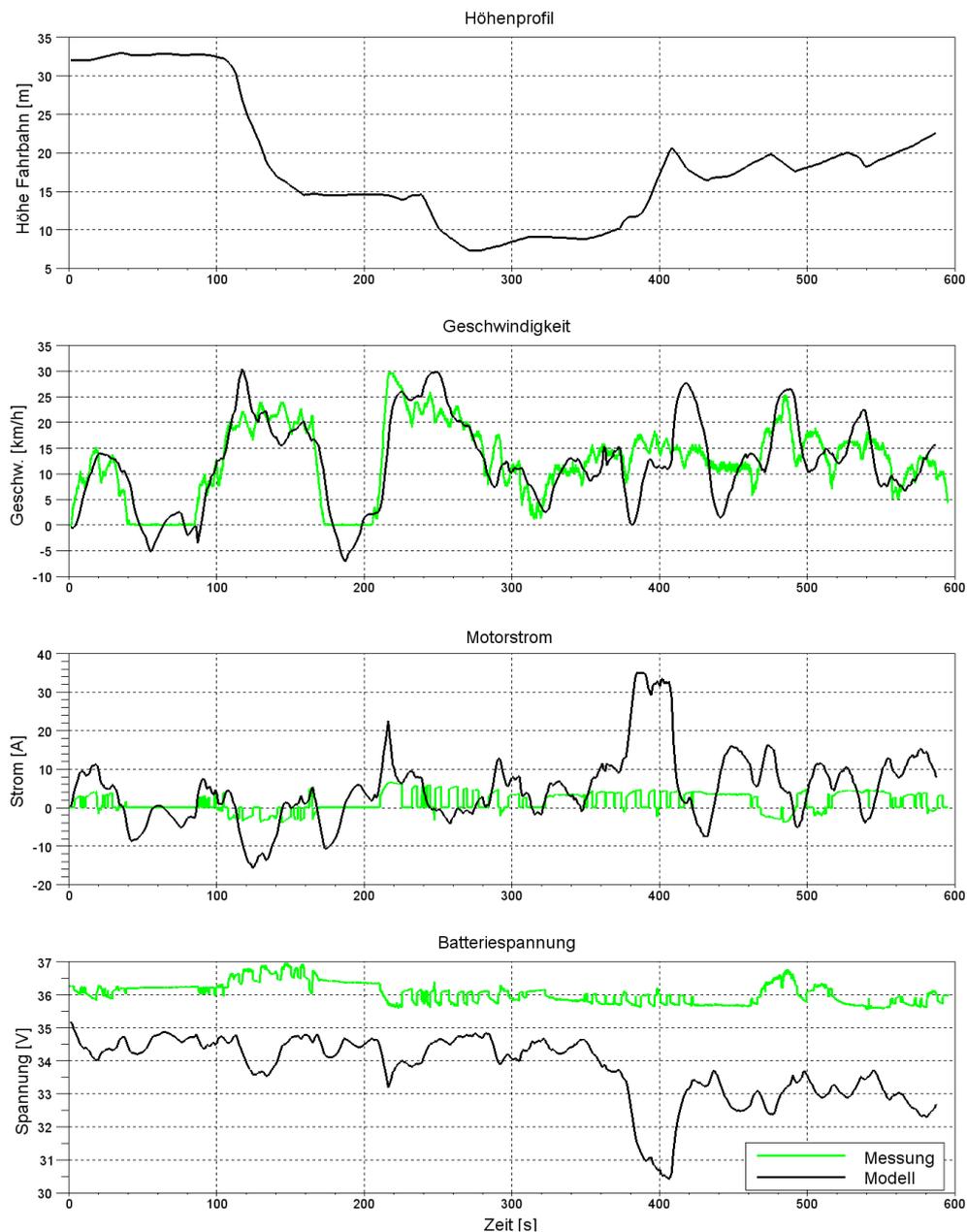


Abbildung 5.6: Ergebnisse der durchgeführten Testfahrt

Auffällig ist das Überschwingen der Drehzahl im Modell, welche bei dem eigentlichen Stillstand zu einer kurzzeitigen negativen Geschwindigkeit führt. Die ermittelten Werte der beiden Regler sind demnach nicht optimal an das Führungsverhalten angepasst. Ein

ähnliches Phänomen lässt sich auch bei den wechselnden Lasten zum Ende der Fahrt beobachten. Die unterschiedlichen Fahrbahnhöhen führen hier zu verschiedenen Belastungen, welche ebenfalls ein Überschwingen der simulierten Geschwindigkeit hervorrufen. Die daraus resultierenden Beschleunigungen und Verzögerungen verstärken diesen Vorgang zusätzlich. Durch die verschiedenen Geschwindigkeiten unterscheiden sich auch die aktuelle Streckenposition und die jeweilige Fahrbahnhöhe zwischen Messung und Modell. Die Vergleichbarkeit beider Größen wird dadurch zusätzlich erschwert. Auch die Verläufe der jeweiligen Motorströme unterliegen einer ähnlichen Abweichung. Da die Leistung des Motors im Modell das einzige Antriebselement darstellt, liegt der Motorstrom hier grundsätzlich auf einem höheren Niveau. Vor allem bei der Bergauffahrt zwischen 380 und 410 s liegen die simulierten Werte deshalb deutlich über den gemessenen Größen. Infolge der nicht optimalen Reglerparameter schwingt auch der simulierte Strom teilweise über. Besonders beim Stillstand führt dies zu einem negativen Strom, welcher eine höhere Rekuperation als die Messung ermöglicht. Bei der realen Fahrt lässt sich ein negativer Strom hauptsächlich bei der Bergabfahrt zwischen 100 und 140 s beobachten. Da das Pedelec hier durch den Fahrer aktiv gebremst wird, liegt der absolute Motorstrom deutlich unterhalb des simulierten Werts.

Auffällig ist weiterhin, dass die gemessene Batteriespannung oberhalb der simulierten Werte liegt und dabei teilweise den vom Hersteller angegebenen Höchstwert überschreitet. Da die realen Motorströme geringer ausgeprägt sind, unterliegt auch die Spannung bei der Messung deutlich geringeren Schwankungen. Hierdurch sinkt der Ladezustand der Batterie im Vergleich zum Modell wesentlich langsamer. Die anfängliche Abweichung von 1 V summiert sich auf diese Weise zu einer endgültigen Differenz von etwa 3 V. Vor allem der höhere Motorstrom während der Bergauffahrt zwischen 380 und 410 s verringert die Spannung des Batteriemodells.

5.3 Messungen am Testmotor

Die Analyse des entwickelten BLDC-Modells und der dazugehörigen Regelung erfolgt mithilfe von Vergleichsmessungen, welche an einem realen System durchgeführt werden. Der vorhandene Motor ist über ein passendes Steuergerät mit einem USB-Anschluss des PCs verbunden. Die folgenden Seiten beschreiben den Aufbau des realen Prüfstands und erläutern seine Besonderheiten. Ein anschließender Abschnitt vergleicht die aufgezeichneten Werte mit den erzielten Simulationsergebnissen und bewertet diese.

5.3.1 Randbedingungen und Aufbau des Prüfstands

Die in dieser Arbeit durchgeführten Vergleichsmessungen erfolgen an einem realen Motor, dessen Bauteilkenngrößen mit denen aus dem entsprechenden Modell übereinstimmen. Angesteuert wird es von einem Steuergerät, welches über eine USB-Schnittstelle mit dem PC verbunden ist. Seine Spannung bezieht der Testaufbau über ein Netzteil aus dem öffentlichen Stromnetz. Da das Steuergerät den realen Motor über eine PWM ansteuert, unterscheiden sich die im Modell eingestellten Reglerparameter von denen des realen Systems. Die Vorgabe der Sollwerte und das Auslesen der Motorkenngrößen erfolgt über die USB-Schnittstelle aus der Simulationsumgebung. Der Motor lässt sich auf diese Weise im Drehzahlmodus lastfrei betreiben.

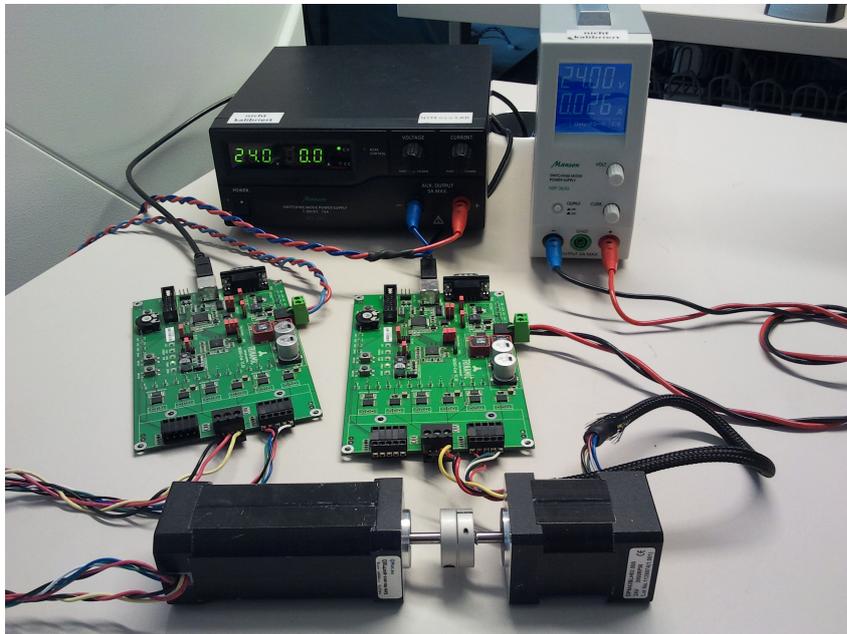


Abbildung 5.7: Kopplung zweier Motoren für eine Lastvorgabe

Für die Vorgabe einer anliegenden Belastung wird der zu untersuchende Motor stirnseitig mit einer zweiten Maschine gekoppelt. Die Drehzahl beider Systeme ist dabei in ihrem Betrag identisch. Verdeutlicht ist der Aufbau des kompletten Prüfstandes in der oben aufgeführten Darstellung in Abbildung 5.7. Beide Motoren sind mit einer eigenständigen Spannungsversorgung und einem eigenen Steuergerät ausgerüstet. Während der zu untersuchende Motor im Drehzahlmodus betrieben wird, unterliegt der zweite Motor dem Strommodus. Auf diese Weise ist die Vorgabe eines Stroms und somit einer definierten Belastung realisierbar. Je nach eingestelltem Quadranten hat der zweite Motor dadurch eine belastende oder unterstützende Wirkung.

5.3.2 Simulations- und Messergebnisse beim Testmotor

Die Ergebnisse eines definierten Sprungs in der Zieldrehzahl bei einem lastfrei betriebenen Motor sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Infolge der vorgegebenen maximalen Beschleunigung steigt die Drehzahl bei der Messung und im Modell nur begrenzt an. Der über die Rampenfunktion erzielte Verlauf ist dabei im Modell idealisiert und daher deutlich ausgeprägter. Auch beim Strom sind geringe Unterschiede zwischen Simulation und Messung sichtbar. Während die Soll- und Istwerte des Stroms beim Modell sehr eng beieinander liegen, erreicht der reale Strom beim Anlauf nicht den Zielwert. Dies ist mit der unterschiedlichen Ansteuerung der beiden Motoren und den damit verbundenen Reglerparametern zu erklären. Während das Motormodell mit einer im Stromregler berechneten Spannung betrieben wird erhält der reale Motor seine Ansteuersignale in Form einer PWM. Die Reglerparameter und das Übertragungsverhalten sind daher verschieden. Auffällig ist außerdem, dass die gemessenen stationären Ströme etwas über den simulierten Werten liegen. In der Praxis treten demnach höhere Widerstände auf als im Modell angenommen. Dies liegt entweder an einer unzureichenden Modellierung der Reibung oder an einer Abweichung der elektrischen Verluste. Da sich der Motor bei dieser Messung jedoch im Drehzahlmodus befindet, ist der Stromverlauf von untergeordneter Bedeutung.

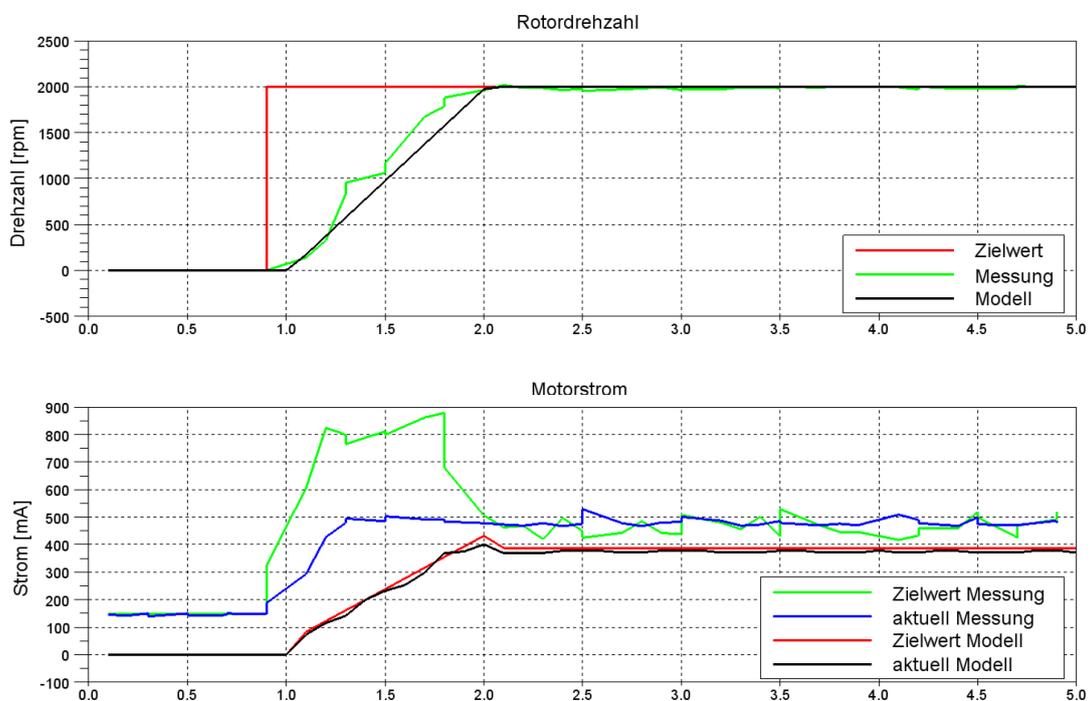


Abbildung 5.8: Drehzahlsprung beim Testmotor ohne Last

Die Resultate einer weiteren Anlaufmessung ohne äußere Belastung in Abbildung 5.9 verdeutlichen die in Abschnitt 5.1.2 aufgeführte Problematik bei einer ungeeigneten Datenerfassung. Dargestellt sind hier die Drehzahlverläufe bei einer Taktung von 10 Hz und 100 Hz. Während bei der langsamen Datenerfassung die gleichen Ergebnisse wie in Abbildung 5.8 erzielt werden, liefert eine Messung mit einer höheren Abtastung einen falschen Drehzahlverlauf. Die Simulation ist in diesem Fall nicht mehr echtzeitfähig, da die Rechengeschwindigkeit höher als die Datenübertragung zwischen der eingebundenen Hardware und dem PC ist. Obwohl die Drehzahlsteigerung bei beiden Messungen identisch ist, ergibt sich bei der schnellen Abtastung eine scheinbar höhere Beschleunigung. Dieses Phänomen lässt sich auch beim Stromverlauf beobachten. Die falsche Datenerfassung betrifft jedoch nur die zeitliche Zuordnung und nicht die absoluten Werte der gemessenen Größen.

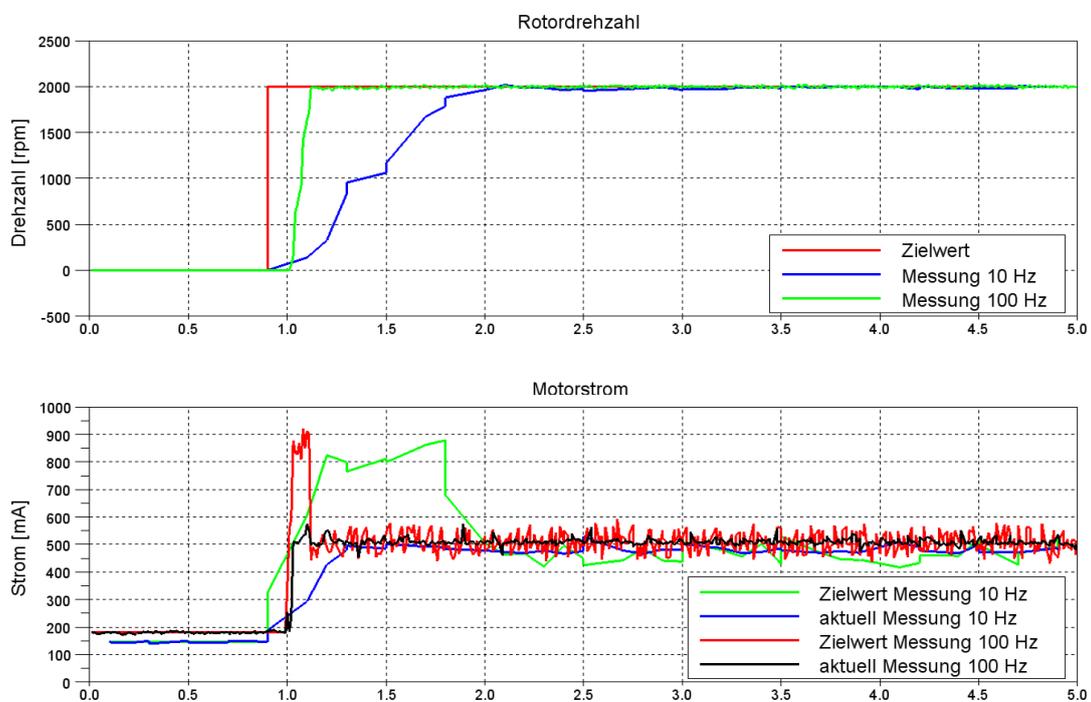


Abbildung 5.9: Fehlerhafte Datenerfassung beim Testmotor ohne Last

Die Analyse des belasteten Testmotors erfolgt mithilfe des im vorherigen Abschnitt erläuterten Testaufbaus. Zu erkennen sind in der folgenden Abbildung 5.10 neben den gemessenen Drehzahl- und Stromverläufen auch das am Motor anliegende äußere Moment auf der rechten Ordinate. Aufgrund des unterschiedlichen Vorzeichens hat der gekoppelte Motor so eine unterstützende und eine bremsende Wirkung. Kurz nach Erreichen seiner Zieldrehzahl von 1000 rpm wird der Motor nach 10 s mit einem konstanten Moment zusätzlich angetrieben und beschleunigt kurzzeitig. Die Drehzahlregelung korrigiert die

anliegende Störung innerhalb 1 s. Sobald das äußere Moment sprunghaft reduziert wird, zeigt sich ein gegenteiliger Effekt, welcher den Motor zuerst verzögert. Die Ergebnisse aus dem Modell und der Messung weisen bis dahin ähnliche Verläufe auf.

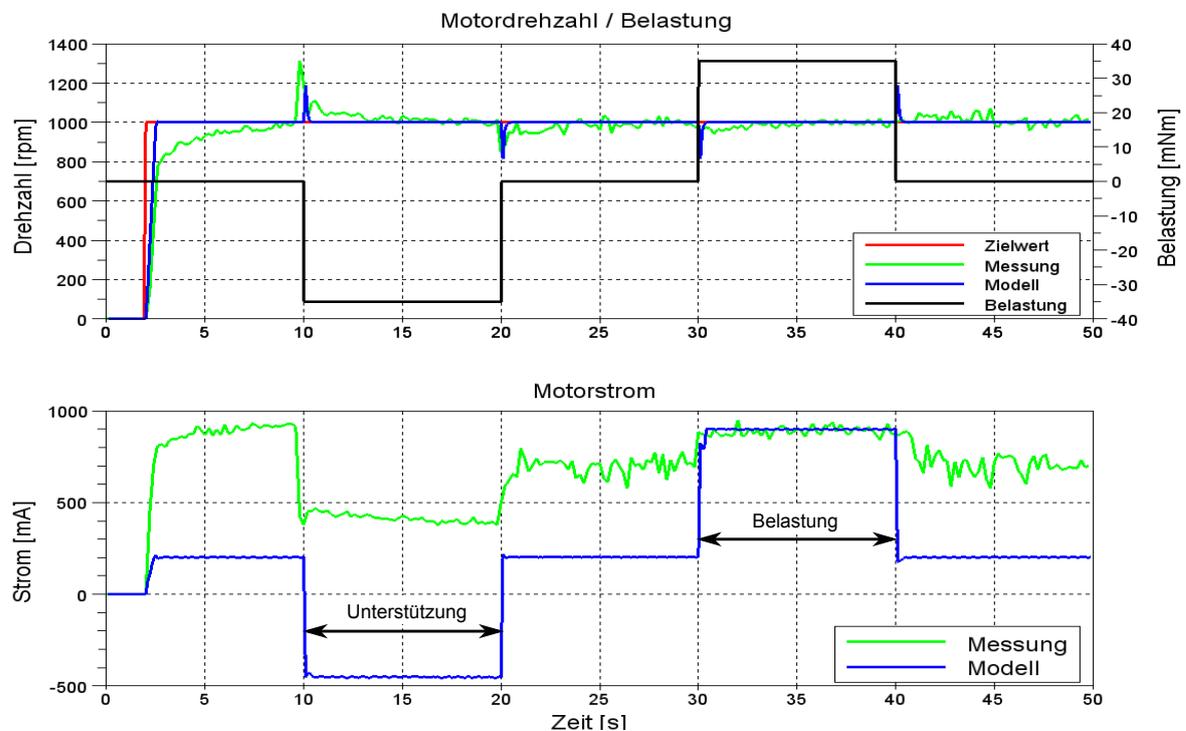


Abbildung 5.10: Lastsprünge beim Testmotor

Während das folgende bremsende Moment nach 30 s in der Simulation einen nahezu identischen Verlauf im Vergleich zur Unterstützung aufweist, verändert sich die Drehzahl innerhalb der Messung nur unwesentlich. Eine Erklärung hierfür ist in den unterschiedlichen Motorströmen zu finden. Die gemessenen Werte liegen dabei immer über dem simulierten Verlauf. Dies deutet auf einen erhöhten Widerstand hin, welcher sich aus der zusätzlichen Drehträgheit und Reibung des gekoppelten Motors ergibt. Da dieser Motor beim Anfahren geschleppt wird, erreicht die Drehzahl innerhalb der Messung den Zielwert deutlich langsamer. Die höhere Reibung führt zusätzlich zu einem stärkeren Motorstrom, welcher sich über die induzierte Spannung auch im gekoppelten Motor antreffen lässt. Der Leerlaufstrom des Gesamtsystems liegt dabei in der Nähe des vorgegebenen Zielstroms bei der Belastung und beeinflusst die Drehzahl in diesen Betriebspunkten nur sehr wenig. Im Modell ist diese zusätzliche Reibung und Drehträgheit nicht berücksichtigt. Die absoluten Stromwerte sind deshalb geringer ausgeprägt und führen bei beiden Lastsprüngen zu ähnlichen Antworten.

6 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines universellen Konzepts zur Modellierung von elektrischen Antriebssystemen in mobilen Anwendungen. Mithilfe von praktischen Umsetzungen am Beispiel eines Elektrofahrrads und eines Testmotors konnte die Parametrierbarkeit und die Flexibilität der entwickelten Strategie verdeutlicht werden. Die folgenden Absätze resümieren die dabei gewonnenen Kenntnisse und geben Anreize zur weiterführenden Verwendung der entwickelten Modelle.

6.1 Zusammenfassung

Basierend auf den Anforderungen der herkömmlichen elektrischen Antriebssysteme konnte eine allgemeine Strategie zur Simulation dieser Anwendungen entwickelt werden. Der Aufbau und das Zusammenspiel seiner eigenständigen Bestandteile orientiert sich dabei an den wiederkehrenden Komponenten der realen Systeme. Sein modulares Grundgerüst erlaubt neben dem Austausch einzelner Bauteile auch die gezielte Variation der Systemparameter und unterstützt auf diese Weise die Simulation unterschiedlich großer Antriebe. Neben der selbstständigen Neuentwicklung der wesentlichen Modelle kann bei der Implementierung auch auf bereits existierende Modellierungsansätze anderer Arbeiten zurückgegriffen werden. Die Modellierung eines Akkuschaubers ist dadurch ebenso möglich wie die Abbildung eines Elektrofahrzeugs.

Bei der Umsetzung der einzelnen Module zu einem Gesamtkonzept bieten sich verschiedene Strategien an. So ist es mit einer geeigneten Simulationssoftware möglich, die Modelle rein physikalisch oder anhand von elektrischen Standardbausteinen abzubilden. Die gezielte Trennung der mechanischen und elektrischen Komponenten erleichtert diesen Prozess erheblich und bietet unterschiedliche Modellierungsansätze. Da das gesamte Modell darüber hinaus die Verwendung von hardware-in-the-loop unterstützt, ist es an einigen Stellen möglich, sowohl die modellierte Sensorik und Aktorik als auch die jeweilige Leistungselektronik durch reale Bauteile zu ersetzen. Die Ansteuerung der eingebundenen Hardware und sein Zusammenspiel mit den restlichen Modellen gewährleistet weitere Einblicke und eröffnet neue Strategien bei der Funktionsentwicklung.

Die praktische Umsetzung des entwickelten Gesamtkonzepts erfolgte am Beispiel eines Elektrofahrrads. Eine physikalische Abbildung der auftretenden Belastung zeigte das Zu-

sammenspiel der separaten Module in einem großen Gesamtsystem zusammen mit den kombinierten Antriebsleistungen des Motors und des Fahrers sowie dem Batteriesystem. Für eine detaillierte Analyse einer elektrischen Maschine wurde des Weiteren ein Testmotor inklusive der passenden Regelung modelliert. Durch die gezielte Einbindung des realen Systems konnte der vorhandene Motor direkt mit dem Modell verglichen werden. Der Entwurf der dabei auftretenden Regelung ließ sich in einem weiteren Schritt anhand seines Übertragungsverhaltens sowohl analytisch als auch empirisch vornehmen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulation des Fahrradmodells zeigten, dass sich die Fahrwiderstände einer definierten Strecke gut erfassen lassen. Die Lasten wurden im Modell dem Antriebssystem zugeführt, um Auskünfte über die vorherrschenden Motorkenngrößen und den Ladezustand der Batterie zu erhalten. Alternativ kann diese Belastung über einen Prüfstand am realen Fahrrad getestet werden. Die Validierungsmessungen des Testmotormodells verdeutlichten, dass eine schnelle Erfassung und Übertragung der zu messenden Daten bei der Einbindung realer Hardware unerlässlich ist. Eine zu hohe Simulationsgeschwindigkeit führte infolge der nicht korrekten zeitlichen Zuordnung deshalb zu fehlerhaften Ergebnissen, da die Übertragungsrate der genutzten USB-Schnittstelle in diesem Fall überschritten wurde. Des Weiteren zeigte sich, dass die Kopplung zweier Motoren für eine dynamische Lastvorgabe realisierbar ist. Zu beachten war hierbei allerdings die erhöhte Grundbelastung des betrachteten Motors, welche sich durch die Widerstände der geschleppten Maschine ergab.

6.2 Ausblick

Die entwickelten Modelle bieten vielfältige Einsatzmöglichkeiten und können in weiterführenden Arbeiten um gewünschte Funktionen erweitert werden. Die zunehmende Einbindung von realen Komponenten gewährt zusätzliche Einblicke und ist bei beiden entwickelten Modellen empfehlenswert. Besonders beim Elektofahrrad ist die parallele Verwendung des Modells und eines geplanten Prüfstands vielversprechend. Die Auswirkungen der im Modell berechneten Belastungen lassen sich auf diese Weise sowohl am realen Fahrrad als auch in der Simulation untersuchen. Die häufig aufwendige Fahrt auf einer öffentlichen Straße ist somit nicht zwingend erforderlich. Die gemessenen oder simulierten Motorströme können abschließend dem Batteriemodell zugeführt werden und geben Auskünfte über den aktuellen Ladezustand. Eine Abschätzung der restlichen Reichweite ist dadurch ebenfalls denkbar. Ist der Prüfstand dabei als reale Hardware direkt in das Fahrradmodell eingebunden, kann dieser Prozess auch in Echtzeit durchgeführt werden.

Auch der modellierte Testmotor ist mit der Nutzung von HIL vor allem bei der Neu- oder Weiterentwicklung allgemeiner Motor- und Regelfunktionen von großer Bedeutung. Die Kopplung zweier Motoren für eine dynamische Vorgabe der vorherrschenden Belastung bietet dabei das größte Potenzial. Für eine schnelle und effiziente Datenerfassung ist an dieser Stelle jedoch die Verwendung einer schnellen Schnittstelle zu empfehlen, da die in dieser Arbeit genutzte USB-Verbindung nur begrenzt tauglich war. So ist bei einer großen Anzahl zu übertragender Daten die Nutzung einer Ethernet-Schnittstelle sinnvoll. Bei echtzeitfähigen Systemen sollte dieser Vorgang für eine optimale zeitliche Zuordnung hingegen über EtherCAT erfolgen. Die Erfassung langsamer Phänomene wie die Modellierung der Batterietemperatur kann hingegen auch in zukünftigen Arbeiten über die erläuterte USB-Schnittstelle stattfinden.

Bei der Verbindung zweier Motoren ist darüber hinaus die Erfassung der zusätzlichen Belastung durch den geschleppten Motor zu beachten. Für eine Vergleichbarkeit der am Prüfstand erzielten Messwerte mit den Simulationsergebnissen ist das jeweilige Modell um diese zusätzliche Belastung zu erweitern. Um den modellierten Antrieb stärker an das reale System zu orientieren, ist auch eine Weiterentwicklung der passenden Motorregelung sinnvoll. Die Abbildung einer PWM oder die Darstellung einer Sinuskommutierung sind an dieser Stelle beispielhaft zu nennen. Werden diese Funktionen über eine geeignete Übertragungsfunktion umgesetzt, lassen sie sich auch in die erläuterte Strategie für den Reglerentwurf implementieren. Die Abbildung des Übertragungsverhaltens ist dabei besonders wichtig und sollte je nach Aufgabenstellung angepasst werden.

Neben den aufgeführten Aspekten bietet auch eine alternative Umsetzung der entwickelten Modelle neue Möglichkeiten. Die Nutzung einer anderen Kombination zwischen dem genutzten Betriebssystem und der Simulationsumgebung führt dabei unter Umständen auch zu einer Verfeinerung der jeweiligen Simulationsschrittweite und liefert dadurch andere Ergebnisse. Ein auf Unix basierendes Betriebssystem kann dafür ebenso sinnvoll sein, wie die Nutzung einer alternativen Simulationsumgebung, welche eine Modellierung anhand von elektrischen Bausteinen unterstützt. Sollte sich diese Strategie als vorteilhaft erweisen, können auch komplexere Gesamtsysteme mit einer angemessenen Genauigkeit modelliert werden.

A Anhang

A.1 Eingestellte Parameterwerte beim speziellen Modellierungskonzept

Die folgenden Seiten beinhalten die in Scilab eingestellten Werte der Systemparameter beim Pedelec– sowie beim Testmotormodell. Die Werte entstammen dabei verschiedenen Quellen und sind in den Tabellen A.1 und A.2 aufgelistet.

A.1.1 Parameterwerte und Kennlinien beim Pedelec–Modell

Die konstruktiven Batteriekenngrößen wie die Nennspannung und die Nennkapazität sind auf der realen Li–Ionen–Batterie angegeben. Die Entladekurve sowie die Verläufe der Korrekturfaktoren werden vom Batteriehersteller nicht veröffentlicht. Da eine Messung der Kennlinien innerhalb dieser Arbeit zeitlich und technisch nicht realisierbar war, entstammen die in den Abbildungen A.1 und A.2 dargestellten Kurven einem vergleichbaren Batteriemodell aus [10]. Diese Quelle beinhaltet auch die angegebenen Werte für die Wärmekapazität und den Wärmeübertragungskoeffizienten. Die typische Energiedichte einer LiFePO Zelle ist in [14] aufgeführt. Die im Batteriemangement eingestellten zulässigen Parameter sind offizielle Angaben des Herstellers ⁵.

Das im Lastmodul angegebene Gewicht von Pedelec und Fahrer ist ein angenommener Durchschnittswert. Die Widerstandsbeiwerte sowie die Stirnfläche sind nach [26] typische Werte für einen aufrecht sitzenden Tourenfahrer. Angegeben ist weiterhin der Felgendurchmesser des realen Fahrrads. Als Luftdichte wird der in diversen Quellen verwendete Referenzwert genutzt. Innerhalb des Fahrermoduls wird mit einer menschlichen Leistung für eine konstante gemächliche Fahrt gerechnet [26].

Die Spuleninduktivität und der Phasenwiderstand des verbauten BLDC–Motors entstammen einer eigenständig durchgeführten Messung. Da die übrigen konstruktiven Daten des Vorderradmotors vom Hersteller nicht öffentlich sind, werden die Daten des nachträglich eingebauten Hinterradmotors aus [3] genutzt, da dieser dem Vorderradmotor sehr ähnlich ist.

⁵<http://www.omt.de/french/batteries2.html>

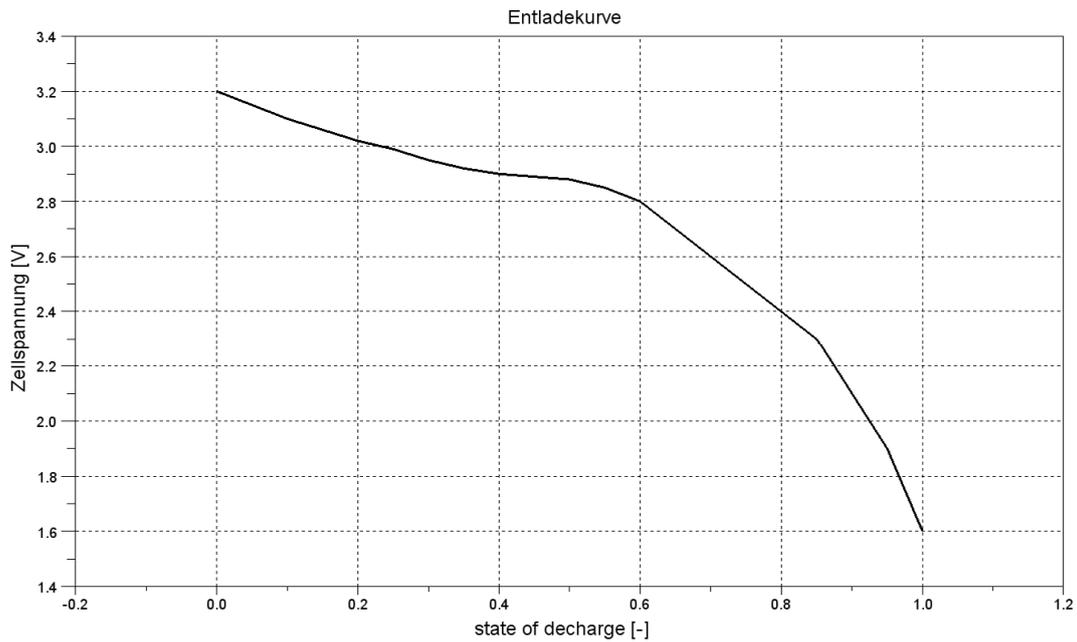


Abbildung A.1: Entladekurve beim Batteriemodell

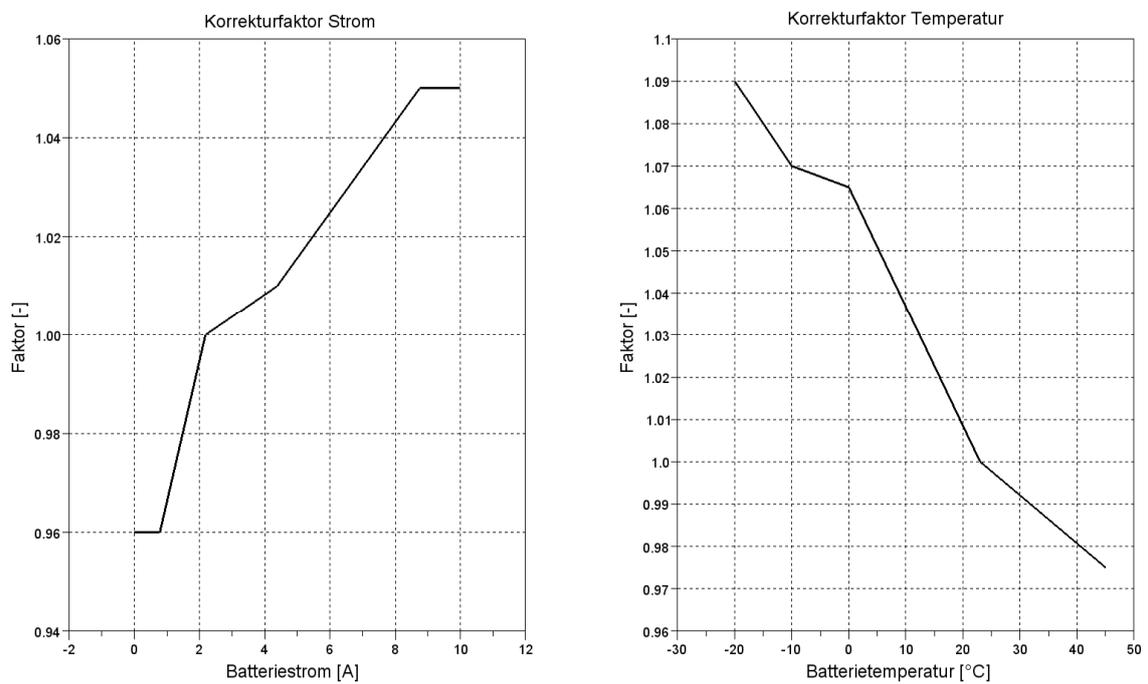


Abbildung A.2: Korrekturfaktoren beim Batteriemodell

BLDC-Motor			
Anzahl Pole	20	Phasenwiderstand	525 m Ω
Spuleninduktivität	800 μ H	Motorkonstante	1,5 Nm/A
Trägheitsmoment	1 gm ²	Reibungskoeffizient	10 ⁻³ Nms/rad
Motorregler			
maximaler Strom	10 A	maximale Drehzahl	200 rpm
maximale Beschleunigung	200 rpm/s		
Stromregler		Drehzahlregler	
P-Anteil	400	P-Anteil	19
I-Anteil	700000	I-Anteil	900
Lithium-Ionen-Batterie			
Nennkapazität Zelle	10 Ah	Nennspannung Zelle	3,2 V
Anzahl Zellen	11	Energiedichte LiFePO	100 Wh/kg
spez. Wärmekapazität	900 J/kgK	Oberfläche Batterie	50 cm ²
Wärmeübertragungskoeffizient	5 W/m ² K	Umgebungstemperatur	20 °C
interner Widerstand	5 m Ω		
Diffusionsverluste		Grenzschichtverluste	
Widerstand	5 m Ω	Widerstand	5 m Ω
Kapazität	15 kF	Kapazität	1,8 kF
Batteriemanagement			
maximale Spannung	38 V	minimale Spannung	22 V
maximale Temperatur	60 °C		
Fahrwiderstände			
Masse Pedelec/Fahrer	90 kg	Erdanziehung	9,81 m/s ²
Stirnfläche Pedelec/Fahrer	0.6 m ²	Luftwiderstandsbeiwert	1,2
Luftdichte	1.2 kg/m ³	Rollwiderstandsbeiwert	0.01
Felgendurchmesser	28 inch		
Fahrer			
Fahrerleistung	100 W	Motorunterstützung	80 %

Tabelle A.1: Parameterwerte beim Pedelec-Modell

A.1.2 Parameterwerte beim Testmotor–Modell

Die konstruktiven Kenngrößen des Motormodells in Tabelle A.2 entsprechen den Werten des genutzten realen Testmotors und entstammen dem Datenblatt des Herstellers [8]. Der Reibungskoeffizient wird aus einer Messung am Motor bestimmt. Bei einer konstanten lastfreien Drehzahl sind das elektrische Moment und das Reibmoment im Betrag identisch. Der Reibungskoeffizient lässt sich über die Messung von Strom und Drehzahl berechnen. Der angegebene Tabellenwert ergibt sich durch eine Mittelwertbildung mehrerer Messungen:

$$k_{fric} = \frac{I \cdot k_{el}}{\omega} \quad (\text{A.1})$$

k_{fric} – Reibungskoeffizient

I – aktueller Motorstrom

k_{el} – Motorkonstante

ω – Winkelgeschwindigkeit

Ebenfalls auf das Datenblatt zurückzuführen sind die maximal zulässigen Werte für Strom und Drehzahl aus dem Reglermodul. Die maximale Beschleunigung wurde auf den angegebenen üblichen Wert selbstständig festgelegt. Sämtliche Reglerparameter wurden ausgehend von der erläuterten Strategie zum Reglerentwurf für BLDC–Motoren empirisch bzw. analytisch ermittelt.

BLDC–Motor			
Anzahl Pole	10	Phasenwiderstand	550 mΩ
Spuleninduktivität	48 mH	Motorkonstante	0,054 Nm/A
Trägheitsmoment	101 gcm ²	Reibungskoeffizient	10 ⁻⁴ Nms/rad
Motorregler			
maximaler Strom	3 A	maximale Drehzahl	3000 rpm
maximale Beschleunigung	2000 rpm/s		
Stromregler		Drehzahlregler	
P–Anteil	500	P–Anteil	0,5
I–Anteil	1670000	I–Anteil	30

Tabelle A.2: Parameterwerte beim Testmotor–Modell

A.2 Nachweis zur Stabilität der modellierten Regler

A.2.1 Übertragungsverhalten und Stabilität des Motorreglers beim Pedelec-Modell

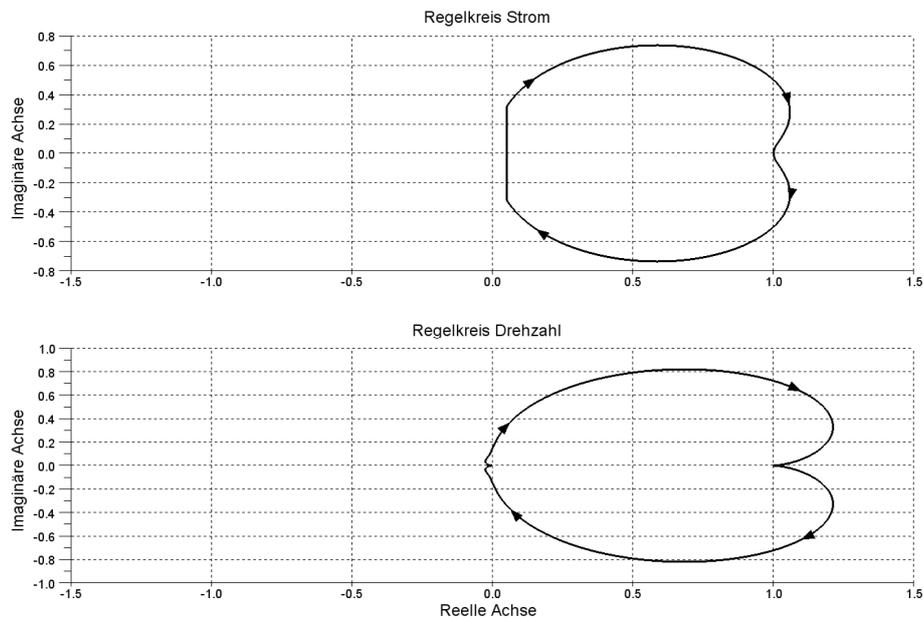


Abbildung A.3: Nyquist Diagramme beim Pedelec-Modell

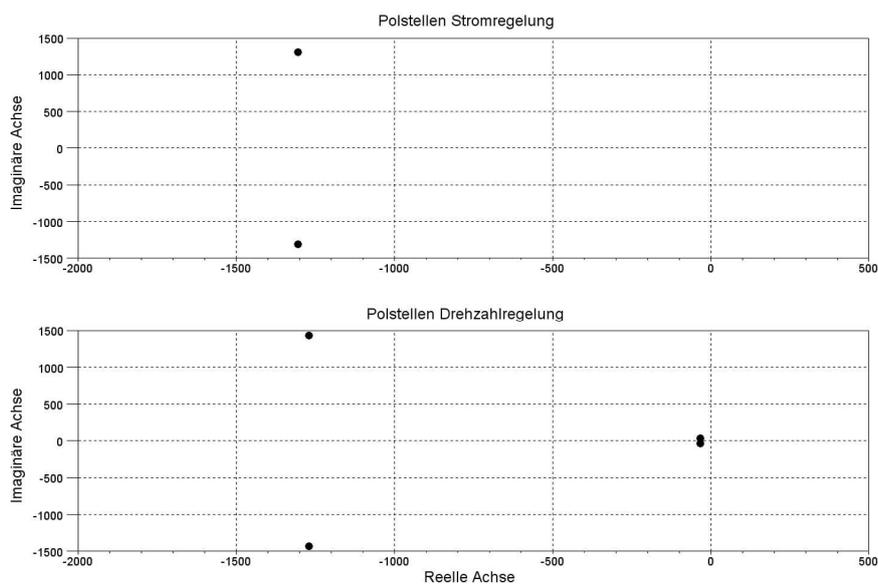


Abbildung A.4: Polstellen beim Pedelec-Modell

A.2.2 Übertragungsverhalten und Stabilität des Motorreglers beim Testmotor-Modell

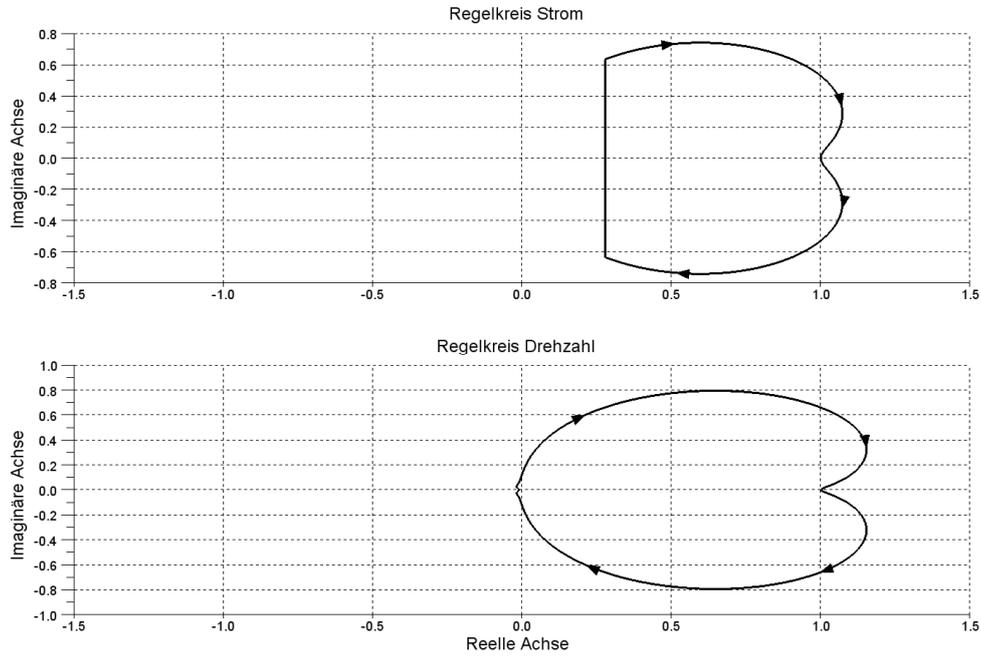


Abbildung A.5: Nyquist Diagramme beim Testmotor-Modell

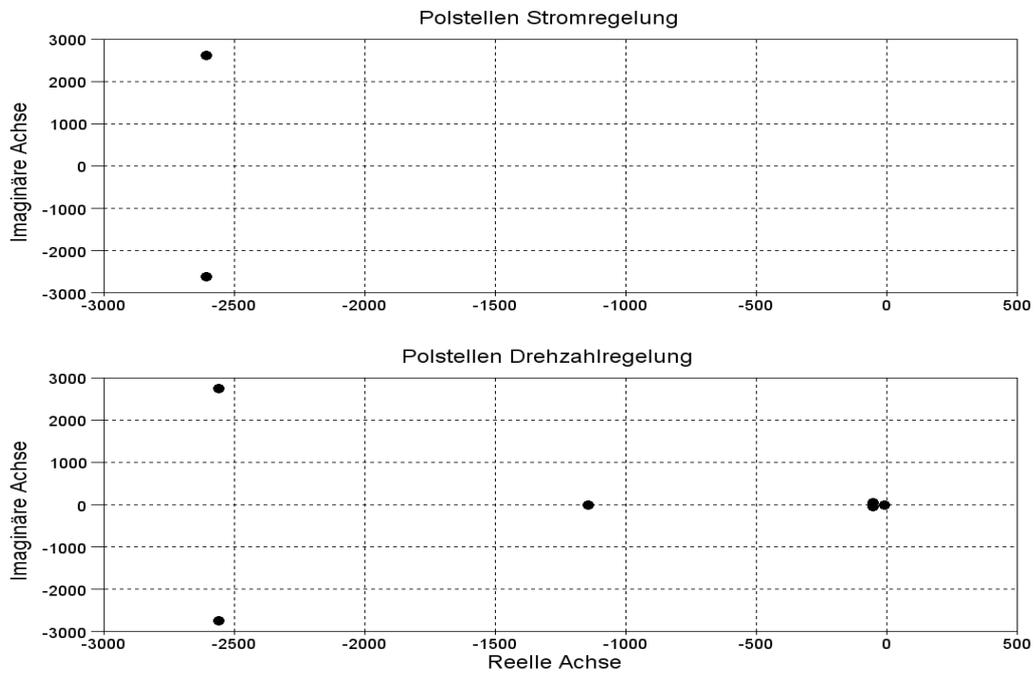


Abbildung A.6: Polstellen beim Testmotor-Modell

A.3 Verwendetes Fahrrad bei der Referenzmessung



Abbildung A.7: Fahrrad bei der Testfahrt [20]

A.4 Charakteristik der gefahrenen Strecke bei der Referenzmessung

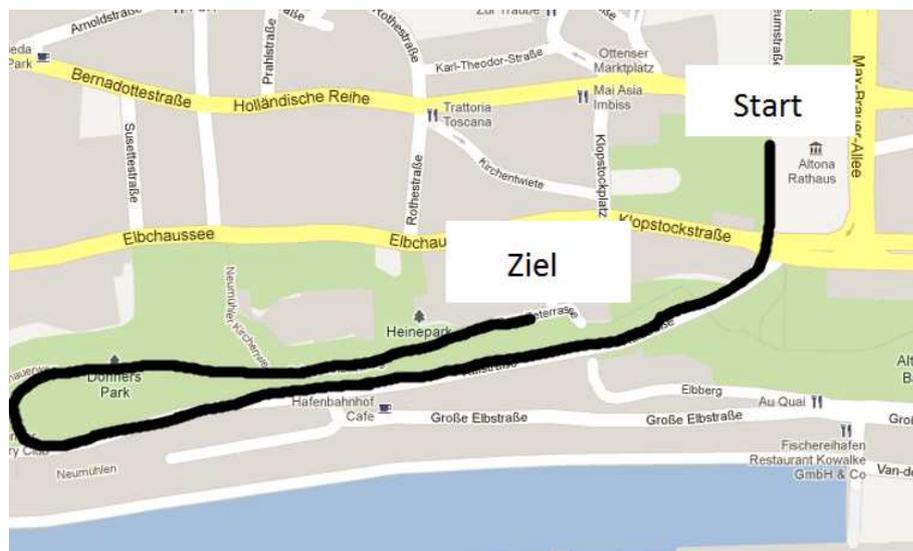


Abbildung A.8: Fahrstrecke bei der Testfahrt ⁶

⁶der Ausschnitt entstammt den Kartendaten aus GoogleMaps (<http://maps.google.de/>)

Literaturverzeichnis

- [1] ANDRE, F.: *Modellierung einer Li-Ionen Batterie für Hybridfahrzeug-Simulationen*, Technische Universität Berlin, Projektarbeit, 2008
- [2] BABIEL, G.: *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik: Lehr- und Arbeitsbuch*. Vieweg+Teubner Verlag, 2009 (Studium Technik). <http://books.google.de/books?id=2D21sXc1CLEC>. – ISBN 9783834805638
- [3] BAFANG ELECTRIC MOTOR SCIENCE-TECHNOLOGY CO.LTD: *SWXH motor technical manual*. V1.1. No.9 HeShun Road LouFeng Town Suzhou Industrial Park. China, 2008–2009
- [4] BALDURSSON, S.: *BLDC Motor Modelling and Control — A Matlab/Simulink Implementation*, Chalmers Tekniska Högskola Göteborg, Master-Thesis, 2005
- [5] BARTZ, R.: *Grundlagen und Einsatz von ASAM-Standards: neue Schnittstellen für die Mess- und Automatisierungstechnik ; mit 55 Literaturstellen*. Expert-Verlag GmbH, 2001 (ASAM compact). <http://books.google.de/books?id=bSnW8FMzSZEC>. – ISBN 9783816920410
- [6] BENDER, R. ; WENZL, H. ; BECK, H.—P. ; JIANG, M ; OHMS, D ; SCHAEDLICH, G: Electrochemical and thermal modeling of lithium-ion cells for use in HEV or EV application. In: *World Electric Vehicle Journal* 3 (2009), S. 1–10
- [7] CHERRY, C. ; WORLEY, S. ; JORDAN, D.: *Electric Bike Sharing-System Requirements and Operational Concepts / University of Tennessee, Knoxville, TN (United States)*. Department of Civil and Environmental Engineering. 2010. – Forschungsbericht
- [8] DELTA PRECISION MOTORS LTD.: *Brushless Motor 42BLH*. 42BLH02. Sheung Shui Plaza 3 Ka Fu Close, Hong Kong, 2005–2209
- [9] FAULHABER GMBH & CO. KG: *Technische Informationen*. 4. Auflage. Daimlerstr. 23-25, 71101 Schönaich, 2012-2013
- [10] GAO, L. ; LIU, S. ; DOUGAL, R.o: Dynamic lithium-ion battery model for system simulation. In: *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on* 25 (2002), Nr. 3, S. 495–505

- [11] GRETT, P. ; NEUPERT, H. ; KÖSTLE, W.: *E-Bikes und Pedelecs: Technik, Typen und Kaufberatung*. Bruckmann Verlag GmbH, 2013 <http://books.google.de/books?id=w0ud1QEACAAJ>. – ISBN 9783765461743
- [12] GRIMM, C.: *Modellierung, Simulation, Entwurf heterogener Systeme*. Version: WS04/05, 2004. http://www.ti.informatik.uni-frankfurt.de/lehre/ws0405/modellierung_simulation/v1.pdf. Vorlesungsskript
- [13] HERING, E. ; VOGT, A. ; BRESSLER, K.: *Handbuch Der Elektrischen Anlagen und Maschinen*. Springer-Verlag GmbH, 1999 (VDI-Buch Series). <http://books.google.de/books?id=ZZ2F0Ty83s0C>. – ISBN 9783540651840
- [14] HILLERMANN, L.: *Starterbatterie in Lithium-Eisen-Phosphat-Technologie — parallele Zellenmodule mit Überwachungs- und Lesitungselektronik*, HAW Hamburg, Diplomarbeit, 2012
- [15] HSU, R.C. ; LIU, Cheng-Ting ; CHAN, Din-Yuen: A Reinforcement-Learning-Based Assisted Power Management With QoR Provisioning for Human-Electric Hybrid Bicycle. In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions* 59 (2012), Nr. 8, S. 3350–3359. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2011.2141092>. – DOI 10.1109/TIE.2011.2141092. – ISSN 0278–0046
- [16] JUNG, J.-W.: *Project# 2 Space Vector PWM Inverter*. 2005
- [17] KETTERER, B.: *Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen*. Forschungszentrum, 2009 (Wissenschaftliche Berichte). <http://books.google.de/books?id=fWVKygAACAAJ>
- [18] KNAUFF, Michael ; MCLAUGHLIN, Jeffrey ; DAFIS, Chris ; NIEBUR, Dagmar ; SINGH, Pritpal ; KWATNY, Harry ; NWANKPA, Chika: Simulink Model of a Lithium-Ion Battery for the Hybrid Power system Testbed. In: *Proceedings of the ASNE Intelligent Ships Symposium*, 2007
- [19] KRISHNAN, R.: *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. Taylor & Francis, 2010 <http://books.google.de/books?id=U-RxikH3aXEC>. – ISBN 9781420014235
- [20] MATTERN, J.: *Ganzheitliches Energiemanagement in ein-/ mehrachsigen Motion-Control-Systemen*, Technische Universität Hamburg Harburg, Diplomarbeit, 2012
- [21] MAXON MOTOR GMBH: *maxon EC motor — ironless winding*. AN857. Truderinger Str. 81825 München, 2011. http://www.maxonmotor.de/medias/sys_master/8796637134878/EC-Technik-kurz-und-buendig_11_DE_026-027.pdf?mime=

- application%2Fpdf&realname=EC-Technik-kurz-und-buendig_11_DE_026-027.pdf. – Technology — short and to the point
- [22] MICROCHIP TECHNOLOGY INC.: *Regenerative Braking of BLDC Motors*. 2355 West Chandler Blvd. Chandler, Arizona, USA 85224-6199,
- [23] MICROCHIP TECHNOLOGY INC.: *Brushless DC Motor Control Made Easy*. AN857. 2355 West Chandler Blvd. Chandler, Arizona, USA 85224-6199, 2002-2011. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00857a.pdf>
- [24] MICROCHIP TECHNOLOGY INC.: *Brushless DC Motor Fundamentals*. AN885. 2355 West Chandler Blvd. Chandler, Arizona, USA 85224-6199, 2003. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
- [25] MIELKE, W.: *Modellierung von Kennlinien, Impedanzspektren und thermischem Verhalten einer Lithium-Eisenphosphat-Batterie*, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, September 2011. <http://elib.dlr.de/71383/>
- [26] MÜLLER, T. ; LLER, T. ; MÜLLER, E.: *E-Bike-Technik: Funktion und Physik der Elektrofahrräder*. Books on Demand, 2012 http://books.google.de/books?id=5twmkk7_8Z0C. – ISBN 9783842361942
- [27] NANOTEC: *Schrittmotor Animation*. http://de.nanotec.com/schrittmotor_animation.html
- [28] NETZ, H.: In die Strompedale getreten. In: *Umwelt Briefe — Aus Kommunen und Forschung* 09 (2012). http://www.umweltbriefe.de/docs/ub_09_12/buergerinfo.html
- [29] NETZEL, T.: *Vorlesungsskript Regelungstechnik 1*. WS10/11. HAW Hamburg, 2010
- [30] RICHTER, J.: *Systemmodellierung eines bürstenlosen Gleichstrommotors mit Drehzahlregelung*, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Diplomarbeit, 2009
- [31] SAX, E.: *Automatisiertes Testen Eingebetteter Systeme in der Automobilindustrie*. Hanser, Carl, 2008 <http://books.google.de/books?id=Dyc5PQAACAAJ>. – ISBN 9783446416352
- [32] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe — Regelung von Antriebssystemen*. Springer, 2009 (Springer-Lehrbuch Bd. 10). <http://books.google.de/books?id=imfgNLew2RAC>. – ISBN 9783540896128

- [33] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe Grundlagen: Mit durchgerechneten Übungen und Prüfungsaufgaben*. Springer, 2009 (Springer-Lehrbuch). <http://books.google.de/books?id=KXIXvQafPfkC>. – ISBN 9783642029905
- [34] SCHUMACHER, W. ; AHLERS, H.: *Vorlesungsskript Prozessrechentchnik*. WS06/07. Fachhochschule Wilhelmshaven, 2006
- [35] TRINAMIC MOTION CONTROL GMBH & CO. KG: *Eval Board Manual—TMC603—Eval*. Rev. 1.06. Waterloohein 5, 22769 Hamburg, 2012
- [36] TRUEB, L.F. ; RUETSCHI, P.: *Batterien und Akkumulatoren: Mobile Energiequellen Für Heute und Morgen*. Springer-Verlag GmbH, 1997 <http://books.google.de/books?id=m3IguSaOdL8C>. – ISBN 9783540629979
- [37] TSAI, M.-F. ; T.-P., Quy ; WU, B.-F. ; TSENG, C.-S.: Model construction and verification of a BLDC motor using MATLAB/SIMULINK and FPGA control. In: *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference*, 2011. – ISSN pending, S. 1797–1802
- [38] WALLENTOWITZ, H. ; REIF, K.: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen — Komponenten — Systeme — Anwendungen*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010 (ATZ/MTZ-Fachbuch). <http://books.google.de/books?id=yMjcMIIdGceoC>. – ISBN 9783834807007
- [39] WEISSERMEL, V.: *Vorlesungsskript Alternative Antriebe und Kraftstoffe*. WS11/12. HAW Hamburg, 2011

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

BEMF	back electromagnetic force
BLDC	brushless direct current
EC	electronic commutated
HIL	hardware-in-the-loop
LiFePO	Lithium-Eisen-Phosphat
PMSM	permanent magnet synchronous motor
PWM	Pulsweitenmodulation
rpm	revolutions per minute
SoD	state-of-charge
ÜF	Übertragungsfunktion
USB	universal serial bus

Griechische Symbole

α	Korrekturfaktor des Stroms	[–]
β	Korrekturfaktor der Temperatur.....	[–]
ΔH	Höhenänderung der Fahrbahn	[m]
γ	Steigungswinkel der Fahrbahn	[°]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[rads ⁻¹]
ρ	Dichte der Umgebungsluft	[kgm ⁻³]
θ	Rotordrehwinkel	[rad]
θ_{el}	elektrischer Drehwinkel	[rad]

Lateinische Symbole

A_{bike}	Stirnfläche von Pedelec/Fahrer	[m ⁻²]
A_{cell}	wirksame Oberfläche einer Zelle	[m ⁻²]
a_{max}	maximale Beschleunigung	[rpms ⁻¹]
C_{dif}	Kapazität für Diffusionsverluste.....	[F]
C_{lay}	Kapazität für Grenzschichtverluste.....	[F]
c_r	Rollwiderstandsbeiwert	[–]

$C_{v,cell}$	Wärmekapazität einer Zelle	$[\text{JK}^{-1}]$
$c_{v,cell}$	spezifische Wärmekapazität einer Zelle	$[\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}]$
c_w	Widerstandsbeiwert von Pedelec/Fahrer	$[-]$
dt	zeitliche Änderung	$[\text{s}]$
dt_{sim}	Schrittweite in der Simulation	$[\text{s}]$
D_{whe}	Felgendurchmesser	$[\text{m}]$
E_{abc}	elektromagnetische Gegenkraft über der Phase a, b, c	$[\text{V}]$
E_{spec}	Energiedichte	$[\text{Whkg}^{-1}]$
$f(\theta_{el})$	Verlauf der elektromagnetischen Gegenkraft	$[-]$
F_{acc}	Beschleunigungswiderstand	$[\text{N}]$
F_{drag}	aerodynamischer Widerstand	$[\text{N}]$
F_{roll}	Rollwiderstand	$[\text{N}]$
F_{tr}	Steigungswiderstand	$[\text{N}]$
g	Erdbeschleunigung	$[\text{ms}^{-2}]$
G_I	Übertragungsfunktion des Stromkreises	$[-]$
G_n	Übertragungsfunktion des Drehzahlkreises	$[-]$
$G_{R,I}$	Übertragungsfunktion des Stromreglers	$[-]$
$G_{R,n}$	Übertragungsfunktion des Drehzahlreglers	$[-]$
$G_{S,I}$	Übertragungsfunktion des Motorstroms	$[-]$
$G_{S,n}$	Übertragungsfunktion der Winkelgeschwindigkeit	$[-]$
hc_{cell}	Wärmeübergangskoeffizient einer Zelle	$[\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}]$
I	aktueller Motorstrom	$[\text{A}]$
I_{abc}	Strom durch Phase a, b, c	$[\text{A}]$
I_{bat}	Stromfluss durch Batterie	$[\text{A}]$
I_{max}	maximal zulässiger Zielstrom	$[\text{A}]$
I_{targ}	Zielstrom	$[\text{A}]$
J	Massenträgheitsmoment	$[\text{kgm}^{-2}]$
K_{cell}	Wärmeaustauschkonstante einer Zelle	$[\text{m}^2\text{K}^{-1}]$
k_{el}	Motorkonstante	$[\text{Vsrad}^{-1} = \text{NmA}^{-1}]$
k_{fric}	Reibungskoeffizient	$[\text{Nmmsrad}^{-1}]$
KI_I	I-Anteil des Stromreglers	$[-]$
KI_n	I-Anteil des Drehzahlreglers	$[-]$
KPI	P-Anteil des Stromreglers	$[-]$

KP_n	P-Anteil des Drehzahlreglers	[-]
L	Spuleninduktivität	[H]
m_{bike}	Masse von Pedelec/Fahrer	[kg]
m_{cell}	Masse einer Zelle	[kg]
N_{cell}	Anzahl der Zellen	[-]
n_{des}	Zieldrehzahl vor Rampe	[rpm]
n_{max}	maximal zulässige Drehzahl	[rpm]
n_{targ}	Zieldrehzahl nach Rampe	[rpm]
P	Anzahl der Pole im Rotor	[-]
P_{dr}	Antriebsleistung des Fahrers	[W]
Q_n	nominelle Kapazität einer Zelle	[Ah]
R	Phasenwiderstand	[Ω]
R_{dif}	Widerstand für Diffusionsverluste	[Ω]
R_{int}	Widerstand für interne Verluste	[Ω]
R_{lay}	Widerstand für Grenzschichtverluste	[Ω]
SoD	Entladezustand	[-]
SoD_0	Startwert für den Entladezustand	[-]
s	komplexe Laplace-Variable	[s^{-1}]
T_{amb}	Umgebungstemperatur	[$^{\circ}\text{C}$]
T_{bat}	Batterietemperatur	[$^{\circ}\text{C}$]
$T_{bat,high}$	maximal zulässige Batterietemperatur	[$^{\circ}\text{C}$]
T_{el}	elektrisches Drehmoment	[Nm]
T_{load}	äußeres Lastmoment	[Nm]
T_{whe}	Drehmoment durch Fahrer am Rad	[Nm]
U_{abc}	Spannung über Phase a, b, c	[V]
U_{bat}	Klemmspannung der Batterie	[V]
$U_{bat,high}$	maximal zulässige Klemmspannung der Batterie	[V]
$U_{bat,low}$	minimal zulässige Klemmspannung der Batterie	[V]
U_{int}	internes Spannungspotenzial einer Zelle	[V]
U_{loss}	Spannungsverluste einer Zelle	[V]
U_n	nominelle Spannung einer Zelle	[V]
U_{targ}	Zielspannung	[V]
v_{bike}	Geschwindigkeit des Pedelecs	[ms^{-1}]

Abbildungsverzeichnis

1.1	Einsatzspektrum von elektrischen Antriebssystemen	2
2.1	Schematischer Aufbau eines EC-Motors	6
2.2	Vereinfachtes Schaltbild von EC-Motoren	7
2.3	Pulsweitenmodulation bei EC-Motoren	8
2.4	Kaskadierter Aufbau eines Motorreglers	11
2.5	Schematische Darstellung einer Lithium-Ionen-Zelle	13
2.6	Ersatzschaltbild einer Lithium-Ionen-Batterie	14
2.7	Wesentliche Komponenten an einem Elektrofahrrad	18
2.8	Lage der Polstellen verschiedener Regelkreise	20
2.9	Stabilitätskriterium nach Nyquist für verschiedene Regelkreise	22
3.1	Modularer Aufbau des Gesamtkonzepts	25
3.2	Signalfluss im Motormodul	27
3.3	4-Quadranten-Betrieb des Motormodells	28
3.4	Signalfluss im Modul des Motorreglers	30
3.5	Signalfluss im Modul der Energiequelle	32
3.6	Signalfluss im Energiemanagement	33
4.1	Modularer Aufbau des Pedelec-Modells	38
4.2	Trapezförmiger Verlauf der BEMF	40
4.3	Aufbau der Motorregelung beim Pedelec-Modell	43
4.4	Fahrwiderstände am Pedelec	49
4.5	Modularer Aufbau des Testmotormodells	53
4.6	Blockschaltbild des Antriebssystems	54
4.7	Übertragungsverhalten eines PI-Reglers	58
5.1	Anschlüsse des verwendeten Motorreglers	62
5.2	Datentransfer beim Empfang mehrerer Motorkenngrößen	63
5.3	Überwachung der Spannung im Batteriemodell	65
5.4	Überwachung der Temperatur im Batteriemodell	66
5.5	Belastung durch eine hügelige Strecke	67
5.6	Ergebnisse der durchgeführten Testfahrt	68
5.7	Kopplung zweier Motoren für eine Lastvorgabe	70

5.8	Drehzahlsprung beim Testmotor ohne Last	71
5.9	Fehlerhafte Datenerfassung beim Testmotor ohne Last	72
5.10	Lastsprünge beim Testmotor	73
A.1	Entladekurve beim Batteriemodell	ii
A.2	Korrekturfaktoren beim Batteriemodell	ii
A.3	Nyquist Diagramme beim Pedelec–Modell	v
A.4	Polstellen beim Pedelec–Modell	v
A.5	Nyquist Diagramme beim Testmotor–Modell	vi
A.6	Polstellen beim Testmotor–Modell	vi
A.7	Fahrrad bei der Testfahrt	vii
A.8	Fahrstrecke bei der Testfahrt	vii

Tabellenverzeichnis

3.1	Anforderungsprofile von unterschiedlichen elektrischen Antrieben	24
4.1	Schaltungssequenz des modellierten BLDC-Motors	39
4.2	Effektive Phasenspannung im Motormodell	41
5.1	Eingesetzte Software und Zusatzpakete	60
5.2	Simulationseinstellungen in Xcos	61
A.1	Parameterwerte beim Pedelec-Modell	iii
A.2	Parameterwerte beim Testmotor-Modell	iv