



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Pawel Kozlowski

Hardware-in-the-Loop-Simulation eines elektrisch  
unterstützten Lastenfahrads

Pawel Kozlowski  
Hardware-in-the-Loop-Simulation eines elektrisch  
unterstützten Lastenfahrrads

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Mechatronik  
an der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Jens Ginzel  
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Jochen Maaß

Abgegeben am 6. Februar 2017

**Pawel Kozlowski**

**Thema der Bachelorthesis**

Hardware-in-the-Loop-Simulation eines elektrisch unterstützten Lastenfahrrads

**Stichworte**

E-Bike, Lastenrad, Hardware-in-the-Loop (HiL), Simulation, Steuerung, physikalische Modellierung, Signalfluss, Energiefluss, Datenübertragung, Fahrwiderstände

**Kurzzusammenfassung**

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es eine Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulationsumgebung aufzubauen, die beliebige, physikalisch motivierte Fahrzyklen des Lastenrads abbilden kann und so einen Test der Antriebselektronik ermöglicht

**Pawel Kozlowski**

**Title of the paper**

Hardware-in-the-Loop simulation for an electrically assisted cargobike

**Keywords**

E-Bike, cargobike, Hardware-in-the-Loop (HiL), simulation, control, physical modeling, signal flow, energy flow, data transmission, driving resistance

**Abstract**

The aim of this thesis is to build up a Hardware-in-the-Loop (HiL) simulation environment that can arbitrarily depict any physically motivated driving cycles of the cargobike and thus allows testing of the drivetrain electronics

## **Danksagung**

An erster Stelle möchte ich all jenen danken, die mich während der gesamten Studienzeit, sowie in der Fertigstellung dieser Thesis unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Stephan Kubisch und Herrn Dr.-Ing. Onno Martens für die fachliche Betreuung und das interessante und vielschichtige Thema dieser Bachelorthesis. Weiterer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Ginzler als betreuender Prüfer dieser Thesis, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Maaß als Zweitgutachter für die Betreuung dieser Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich meine Mutter hervorheben, der ebenfalls ein ganz besonderer Dank für das Ermöglichen des Studiums und für die geistige Unterstützung während der Anfertigung der Bachelorarbeit gilt. Auch möchte ich Linda Holtz für die tatkräftige Unterstützung und Motivation in den letzten Wochen meines Studiums ganz herzlich danken.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1. Motivation . . . . .	9
1.2. Aufgabenstellung . . . . .	10
<b>2. Stand der Technik</b>	<b>11</b>
2.1. Was ist ein E-Bike? . . . . .	11
2.2. Typen von E-Fahrrädern . . . . .	12
2.3. Sensorvergleich . . . . .	13
<b>3. LeichtLast</b>	<b>15</b>
3.1. Sensorik . . . . .	15
3.1.1. Gasgriffsteuerung . . . . .	15
3.1.2. Bremsdetektion . . . . .	16
3.1.3. Drehzahlsensorik . . . . .	16
3.1.4. Trittfrequenzsensorik . . . . .	17
3.1.5. Drehmomentsensorik . . . . .	18
3.2. Beschaltung . . . . .	18
3.3. Elektronik . . . . .	19
3.3.1. Evaluationskit . . . . .	19
3.3.2. Bremschopper . . . . .	20
3.3.3. Supercap-Einheit . . . . .	21
3.3.4. Akku . . . . .	22
3.4. Datenübertragung . . . . .	23
3.5. Konfiguration . . . . .	23
3.6. Signalflussgraph . . . . .	24
3.7. Energieflussgraph . . . . .	25
<b>4. Modellierungskonzept</b>	<b>26</b>
4.1. Motormodul . . . . .	26

---

4.2. Belastungsmodul . . . . .	27
4.3. Fahrermodul . . . . .	29
4.4. Last- und Antriebsleistung . . . . .	30
<b>5. Implementierung und Inbetriebnahme</b>	<b>31</b>
5.1. Aufbau des Prüfstands . . . . .	31
5.2. Beschaltung am Prüfstand . . . . .	32
5.3. Konfiguration . . . . .	32
5.4. Datenübertragung . . . . .	32
5.5. Simulationssoftware . . . . .	34
5.6. Bestimmung der Kenngrößen . . . . .	35
5.7. Hardware-in-the-Loop . . . . .	43
<b>6. Test</b>	<b>44</b>
6.1. Messstörgrößen . . . . .	44
6.2. Untersuchung der Wiederholgenauigkeit . . . . .	48
6.3. Durchführung von Beispielmessung . . . . .	50
6.4. Auswertung der Messung . . . . .	51
<b>7. Fazit</b>	<b>52</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>ii</b>
A.1. Benutzte Software . . . . .	ii
A.2. Parameterwerte . . . . .	ii
A.3. Lastenradmotorparameter . . . . .	iii
A.4. Beschaltung am Lastenrad . . . . .	iv
A.5. Prüfstandmotorparameter . . . . .	v
A.6. Beschaltung am Prüfstand . . . . .	v
A.7. Akkuparameter . . . . .	vi
A.8. Halterung . . . . .	vii
<b>B. Anhänge auf der beigelegten CD</b>	<b>viii</b>

# Tabellenverzeichnis

2.1. Pedelec vs S-Pedelec . . . . .	12
5.1. Simulationsumgebung . . . . .	35
5.2. MOSFET-Endstufe am Lastenrad . . . . .	37
5.3. Lastenrad Momentverlauf (MOSFET) . . . . .	38
5.4. Lastenrad Momentverlauf (eGaN) . . . . .	39
5.5. MOSFET-Endstufe am Prüfstand . . . . .	40
5.6. eGaN-Endstufe am Prüfstand . . . . .	41
A.1. Benutzte Software . . . . .	ii
A.2. Parameterwerte . . . . .	ii
A.3. Lastenradmotorparameter . . . . .	iii
A.4. Beschaltung am Lastenrad . . . . .	iv
A.5. Prüfstandmotorparameter . . . . .	v
A.6. Beschaltung der Motorleitungen am Prüfstand . . . . .	v
A.7. Akkuparameter . . . . .	vi

# Abbildungsverzeichnis

3.1. SinCos . . . . .	16
3.2. Trittfrequenz . . . . .	17
3.3. Drehmoment . . . . .	18
3.4. Weasel-Eval-Kit . . . . .	19
3.5. Bremschopper . . . . .	20
3.6. SCU-Zustandsautomat . . . . .	21
3.7. SCU . . . . .	22
3.8. Signalflussgraph . . . . .	24
3.9. Energieflussgraph . . . . .	25
5.1. IEEE-754 . . . . .	33
5.2. TMCL-Reference . . . . .	33
5.3. Stirnfläche . . . . .	36
5.4. Drehmoment pro Inkremente für MOSFET-Endstufe . . . . .	38
5.5. Drehmoment pro Inkremente für eGaN-Endstufe . . . . .	40
5.6. Drehmoment pro Inkremente für MOSFET-Endstufe . . . . .	41
5.7. Drehmoment pro Inkremente für eGaN-Endstufe . . . . .	42
6.1. Drehzahl am Sensor bei Ansteuerung = 0 . . . . .	45
6.2. Drehzahl am Sensor bei Ansteuerung $\neq 0$ . . . . .	46
6.3. Drehmoment am Sensor bei Ansteuerung = 0 . . . . .	47
6.4. Drehmoment am Sensor bei Ansteuerung $\neq 0$ . . . . .	47
6.5. Rauschen an der Endstufe . . . . .	48
6.6. Wiederholgenauigkeit der Drehzahl . . . . .	49
6.7. Wiederholgenauigkeit des Drehmoments . . . . .	49
6.8. Fahrstrecke . . . . .	50
6.9. simulierte Fahrstrecke . . . . .	51
A.1. Motorstecker . . . . .	iii
A.2. Halterung . . . . .	vii
B.1. Anhang CD . . . . .	viii



# 1. Einleitung

Die Menschheit strebt immer mehr nach einer umweltfreundlichen Umsetzung für Mobilität. 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 und das Testen dieser Systeme werden dabei zunehmend durch die Simulation unterstützt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Strategie zur Hardware-in-the-Loop-Simulation eines elektrisch unterstütztes Lastenfahrrads zu entwickeln. Diese soll auf einem Prüfstand umgesetzt und mit einem realem E-Bike verglichen werden. Auf den folgenden Seiten wird deshalb die Vorgehensweise bei der Anfertigung dieser Arbeit betrachtet.

## 1.1. Motivation

Elektrisch betriebene Antriebssysteme sind schon heutzutage in den unterschiedlichsten Branchen in diversen Formen und Größen anzutreffen. Im Transportbereich ist es meistens auf Grund von langen Strecken und hohem Gewicht noch unwirtschaftlich, Elektro-Fahrzeuge zu verwenden. Lediglich für kurze Auslieferungstrecken wie vom Paketzentrum bis zum Endkunden werden von den Kurierdienstleistern Lösungen für Kleintransportwagen immer attraktiver. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf einer speziellen Form von elektrisch angetriebenen Fahrrädern, den Lastenfahrrädern (engl. cargobikes). Diese funktionieren prinzipiell wie Elektro-Fahrräder mit dem Unterschied einer größeren Zuladung.

Die Entwicklung eines elektrischen Antriebes wird von preisgünstigen und schnellen PC-Basierenden Simulationen begleitet. Die Kosten und Zeitvorteile der modellbasierten Entwicklung gegenüber teuren und aufwendigen Messungen sind nur zwei wichtige Aspekte. Durch gezielte Parametrisierung 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.

## 1.2. Aufgabenstellung

Die Trinamic Motion Control GmbH baut im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts "LeichtLast" gemeinsam mit drei Partnern ein elektrisches Lastenfahrrad aus. Schwerpunkt der Forschungsarbeit für Trinamic sind der Entwurf und Erprobung eines neuartigen Regelverfahrens für permanenterrregte Synchronmaschinen. Zusätzlich soll das Lastenfahrrad im Stande sein, rekuperierte Bremsenergie in einem dynamischen Speicher auf Basis von Superkondensatoren (Supercaps) zu speichern und später wieder zu nutzen. Ziel dieser Bachelorarbeit ist eine Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulationsumgebung aufzubauen, die beliebige, physikalisch motivierte Fahrzyklen des Lastenrads abbilden kann und so einen Test der Antriebselektronik ermöglicht.

Die Arbeit gliedert sich in drei Teile, Im ersten Teil erfolgt die elektromechanische Modellierung des Lastenfahrrads bei Nennlast in Bezug auf die internen Energieflüsse. Für die Identifikation der Modelle sind Testmessungen mit einem vorhandenen Lastenfahraddemonstrator, der über einen Drehmomentsensor an der Welle verfügt, auszuwerten. Dies schließt unter anderem die Identifikation von Reibkennlinien und den Wirkungsgrad des elektrischen Motors ein. Ströme und Spannungen können durch die Antriebselektronik erfasst werden.

Im zweiten Schritt erfolgt die Abbildung von Antrieb und Last mithilfe eines Maschinensatzes. der Maschinensatz besteht aus Lastmaschine und Prüflingsmotor. Der Prüflingsantrieb bildet den Antriebsmotor des Lastenfahrrads inkl. Steuer- und Leistungselektronik ab. Der Lastentrieb bildet das Lastenprofil des zu untersuchenden Fahrzyklus mit Bezug zum zurückgelegten Weg ab und ist als Servoantrieb ausgeführt. Die Drehmomentenanforderung wird dem Prüfling über eine Softwareschnittstelle oder durch einen emulierten Trittfrequenzsensor bereitgestellt.

Im dritten Schritt wird ein exemplarischer Fahrzyklus am Prüfstand in unterschiedlichen Antriebskonfigurationen umgesetzt, Die Ergebnisse werden gegeneinander verglichen. Dabei konzentriert sich ein Teil der Bewertung auf die energetische Effizienz des Prüflings und eine zweiter Teil auf die Abbildungsfähigkeit des HiL-Simulators.

Ziele der Arbeit:

- Elektromechanische Modellierung des Lastenrads und der internen Energieflüsse
- Identifikation des Modells anhand von Testfahrten
- Aufbau des HiL-Simulators
- Durchführung einer Beispielmessung
- Auswertung der Messung

## 2. Stand der Technik

Die Geschichte des Elektrofahrrads reicht etwa bis in das Jahr 1895, wo aus den alten Patentschriften hervorgeht, dass in dieser Zeit auf den Straßen Europas und Amerikas erste Elektrofahrräder verkehrten. Die Weiterentwicklung des E-Bikes im 20. Jahrhundert wurde durch die stärkeren und günstigeren Benzinmotoren stark gebremst. Die Entwicklung in der Neuzeit setzte in den 1970er Jahren ein, als japanische Großkonzerne wie Panasonic, Yamaha und Sanyo begannen, an Zusatzantrieben für Fahrräder zu arbeiten. Vermutlich war dies der ersten Ölkrise in 1973 zu verdanken. Als Taktgeber gilt der Panasonic-Firmengründer Konuske Matsushita. Er stellte im Jahr 1975 in Japan ein E-Bike vor, das optisch an den heute üblichen Zentralantrieb erinnert. Schon damals war die Batterie hinter dem Sattelrohr und der Motor befand sich beim Tretlager. Der steigende Ölpreis und der Mountainbike-Boom zu Beginn der 1980er Jahre waren in der Folge die Gründe, dass an diversen Universitäten und in Unternehmen weltweit an alternativen Antrieben geforscht wurde (10).

### 2.1. Was ist ein E-Bike?

Unter dem Begriff E-Bike versteht man ein zweirädriges Fortbewegungsmittel, welches mit einem elektrischen Motor angetrieben wird. Hier wird zwischen zwei Typen, dem Pedelec und dem S-Pedelec unterschieden.

Ein Pedelec (engl. **Pedal Electric Cycle**) ist eine Ausführung eines Elektrofahrrads, bei der der Fahrer von einem Elektroantrieb nur dann unterstützt wird, wenn er gleichzeitig auch selbst in die Pedale tritt. In Deutschland ist ein Pedelec einem Fahrrad rechtlich gleichgestellt, wenn es erstens mit einem maximal 250 Watt starken Motor ausgestattet ist und zweitens die Motorunterstützung konstruktiv auf eine Geschwindigkeit von maximal 25 km/h begrenzt wird (3).

Der Motor des S-Pedelecs (engl. **Speed Pedelec**) unterstützt den Fahrer bis zu einer Geschwindigkeit von 45 km/h. Für den Gebrauch werden Versicherungskennzeichen sowie eine allgemeine Betriebserlaubnis benötigt. Das nötige Mindestalter für die Benutzung eines S-Pedelecs beträgt 15 Jahre. Die Benutzung von Radwegen ist innerorts untersagt. Eine Ausnahme besteht dann, wenn der Motor ausgeschaltet ist oder die Benutzung für Mofas freigegeben ist (12).

Zusammenfassung der Unterschiede zwischen einem Pedelec und einem S-Pedelec:

Parameter	Pedelec	S-pedelec
max. Leistung [W]	250	500
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	25	45
Versicherungspflichtig	nein	ja

Tabelle 2.1.: Pedelec vs S-Pedelec

## 2.2. Typen von E-Fahrrädern

Die Elektro-Fahrräder gibt es mittlerweile in verschiedenen Ausführungen. Zu den Unterschieden gehören die Form, das Design und der Einsatzbereich der Fahrräder. Darüber hinaus gibt es diese Bewegungsmittel in verschiedenen Motorisierungsklassen mit unterschiedlicher Antriebsart.

Sowie es konventionelle Fahrräder in verschiedenen Ausführungsformen gibt, so sind auch elektrisch angetriebene Bikes für vielfältige Einsatzbereiche konstruiert. Grundsätzlich alles was sonst rein mechanisch bewegt wird, kann elektrisch angetrieben werden. Zurzeit (2016) gibt es folgende E-Bike-Typen auf dem Markt:

City e-Bike	Trekking e-Bike
e-Mountainbike	(Speed) Pedelec
Lifestyle e-Bike	Klapprad e-Bike
e-Bike XXL	Dreirad e-Bike

Aktuell wetteifern zwei grundsätzlich verschiedene Motor-Konzepte um die Gunst der Hersteller und Kunden. Nabenmotoren, die es für den Einbau ins Vorder- oder Hinterrad gibt, und Tretlagermotoren, sog. Mittelmotoren. Welche Motorbauart die geeignete ist, hängt vom Einsatzzweck und den Vorlieben des Fahrers ab. Diese werden unabhängig vom Typ meist in zwei Motorisierungsklassen (siehe Tabelle 2.1) unterschieden.

## 2.3. Sensorvergleich

Die Motorunterstützung eines E-Bikes wird über Sensoren an das eigene Fahrverhalten angepasst. Es gibt im wesentlichen drei Sensorentypen: Drehmoment- oder Kraftsensoren, Bewegungssensoren (überprüfen Bewegung am Pedal) und Geschwindigkeitssensoren (zählen die Radumdrehungen). Der Einsatz mehrerer Sensoren ist sinnvoll. Konzepte, die an der Sensorik sparen können zwar auch gut funktionieren, haben aber konstruktionsbedingte Einschränkungen.

Drehmomentsensoren (Kraftsensoren) messen die Kraft, mit der ins Pedal getreten wird, sie können auch die Trittfrequenz feststellen. Denn immer dann, wenn die Pedale oben und unten stehen, ist der Druck auf dem Pedal sehr gering. Diese Tiefpunkte im Kraftverlauf können erkannt und gezählt werden. Im Grunde beinhaltet ein Drehmomentsensor also einen Trittfrequenzsensor. Die Unterstützung des Motors kann sich an der Leistung des Fahrenden orientieren. Erhöht sich die Kraft wird mehr unterstützt. Die Motorunterstützung kann bspw. immer 50% oder 100% der Leistung sein. Die Kunst ist, die Motorsteuerung so zu programmieren, dass die Unterstützung einerseits ein direktes Fahrgefühl ergibt, also auf weniger oder mehr eigene Leistung direkt reagiert. Andererseits muss sie so verzögert sein, dass nicht bei jedem Tritt wenn das Pedalpaar oben und unten ist der Motor nachlässt.

Drehmomentsensoren werden entweder im Bereich des Tretlagers oder des Antriebslagers angebracht. In der Regel bedienen sie sich der Hall-Sensor Technik, bei der die (vom Pedaldruck abhängige) Verschiebung einer Spule gegen einen Magneten eine messbare Spannung erzeugt. Wird ein Drehmomentsensor ohne einen Geschwindigkeitssensor verwendet, regelt der Motor in den kleinen Gängen früher ab. In dem Fall ist die maximale Trittfrequenz bei der noch unterstützt wird, die bei der im schwersten Gang die maximale Geschwindigkeit mit Motorunterstützung erreicht wird (bspw. 25 oder 45km/h). Nur wenn dazu ein Geschwindigkeitssensor verwendet wird, ist es möglich, auch in leichteren Gängen die maximale Geschwindigkeit, bei der der Motor noch unterstützt zu erreichen.

Viele Drehmomentsensor gestützte Systeme reagieren trotz gezogener Bremse auf Druck am Pedal bspw. wenn man an der Ampel steht und einen Fuss aufs Pedal stellt. Man spürt ein ruckeln. Je nach Qualität der Sensoren erkennt man bei festem Treten ein merkliches Nachgeben der Kurbeln.

Bewegungssensoren messen nur, ob und ggf. wie schnell in die Pedale getreten wird, nicht wie fest. Ein E-Bike, das einen Trittfrequenzsensor nutzt, wird entweder immer gleich unterstützen oder mehr, wenn schnell getreten wird (unabhängig vom eingelegten Gang). Häufig laufen Systeme mit dieser Sensorik nach, wenn man bereits zu treten aufgehört hat und verzögern am Anfang. Ein Trittfrequenzsensor System hat zusätzlich einen Geschwindigkeitssensor, um bei der richtigen Geschwindigkeit abzuriegeln.

Dadurch, dass die Sensorik nicht misst, wie fest ins Pedal getreten wird, ist die Unterstützung weniger direkt an die Leistung des Fahrenden gekoppelt. Das kann einem gefallen, bspw. weil man nur gemächlich im leichten Gang treten muss und der Motor gibt alles. Andererseits finden viele es unharmonisch. Die fehlende Direktheit ist beispielsweise bei e-Mountainbikes ein Defizit, denn im sportlichen Einsatz ist Nachlauf und Verzögertes Ansprechen besonders störend.

Geschwindigkeitssensoren messen die Geschwindigkeit und sind vor allem dafür gut, die Abriegelung des Motors bei 25km/h (normales E-Rad/Pedelec) oder max. 45km/h (schnelles E-Rad/S-Pedelec) zu veranlassen. Sie können aber auch komplexer in die Motorsteuerung eingebunden werden, viele Motoren regeln bspw. stufenweise ab, bevor die maximale Geschwindigkeit erreicht wird (11).

## **3. LeichtLast**

Unter dem Forschungsprojekt "LeichtLast" wird an der neuen Antriebselektronik geforscht. Diese wird im Lastenrad eingebaut. Dank der verwendeten Sensoren kann das Fahrrad in drei Modi angesteuert werden. Im Gasgriff-Modus wird der Soll-Wert über die Proportionalität des Anschlags geregelt. Im Trittfrequenz-Modus erfolgt diese auf Grund der Drehgeschwindigkeit des am Pedal gemessener Frequenz. Zuletzt kann das Bike über die Auswertung des Drehmoments angesteuert werden. In allen Modi wird es über das Moment als Soll-Wert angetrieben.

### **3.1. Sensorik**

In dieser Arbeit wird als Referenz ein bestehendes Lastenfahrrad (Demonstrator) verwendet. Das Fahrrad verfügt über einen Hinterrad-Nabenmotor mit einer Nennleistung von 1000 Watt. Dort befindet sich ein Drehmomentsensor sowie ein Drehzahlsensor. Extern wurden an dem Fahrrad zwei Trittfrequenzsensoren angebracht. Mit diesen Sensoren wird die Drehrichtung der Pedale erkannt und somit sichergestellt, dass das e-Bike nicht unterstützt, wenn man in die falsche Richtung dreht. Damit das realisierbar ist, wurden sie in einem 90 Grad Winkel zueinander versetzt. Zur Feststellung des Bremsvorgangs wurden Bremsgriffe mit einer Bremserkennung montiert. Zudem wurde in der anfänglichen Phase ein Gasgriff verwendet um Kenngrößen bei einem konstanten Moment zu bestimmen. Zuletzt verfügt das Fahrrad über einen leistungsstarken Akku mit einer Strombegrenzung, der im Falle eines Defekts der Endstufe die Leitung selbständig trennt.

#### **3.1.1. Gasgriffsteuerung**

Die Gasgriffsteuerung wurde vorwiegend in der Mess- und Testphase verwendet. Diese beruht auf dem Prinzip eines einstellbaren Widerstands, eines sog. Potentiometers und gibt dementsprechend eine Spannung aus die Proportional zu dem Anschlagswinkel ist. Diese Information wird vom Mikrocontroller ausgewertet.

### 3.1.2. Bremsdetektion

Eine Detektion des Bremsvorgangs wird zunächst über sensorbehaftete Bremsgriffe durchgeführt. Diese erscheint aus zwei Gründen sehr sinnvoll. Bei einer fehlenden Bremsdetektion könnte das Phänomen auftreten, dass während eines Bremsvorgangs der Antrieb nachläuft, da dieser verzögert reagiert. Dies führt zu einem höheren Energieverbrauch bei gleichzeitig erhöhtem Verschleiß der Bremsanlage d.h für einen kurzen Zeitraum wird sowohl der Motor angetrieben als auch mechanisch gebremst. Die Steuerelektronik kann somit auf das Bremsen reagieren und rechtzeitig das Ansteuern des Motors unterbrechen, bis der Bremsvorgang abgeschlossen ist. Der zweite Grund der für eine Überwachung spricht, ist die Rekuperation der beim Bremsen erzeugten Energie. Dadurch schont man die mechanische Bremse und kann gleichzeitig Energie zurückgewinnen um die Reichweite zu verlängern.

### 3.1.3. Drehzahlsensorik

Die Geschwindigkeit des Fahrrads wird über die Drehzahl des Motors ermittelt. Diese wird mit Hilfe des integrierten Encoders bestimmt. Der Sensor liefert zwei analoge Signale, die sinusförmig und um 90 Grad zueinander verschoben sind. Diese werden als Sinus und Cosinus bezeichnet. Die Frequenz gibt Auskunft über die Drehzahl und der Versatz über die Richtung der Drehung. Diese analoge Information wird digitalisiert und in die Form einer inkrementellen Ausgabe gebracht.

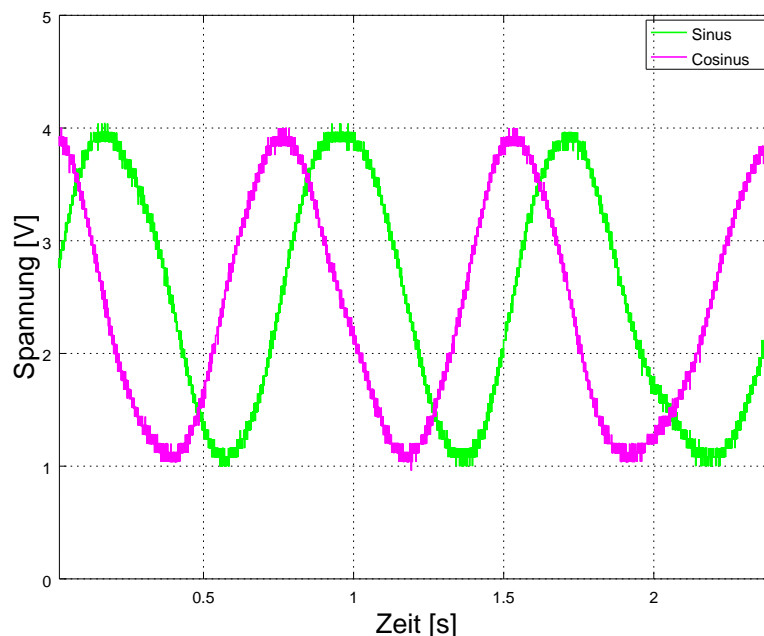


Abbildung 3.1.: SinCos



### 3.1.4. Trittfrequenzsensorik

Die Trittfrequenzdetektion wird in der Regel mit einem Drehimpuls-Sensor realisiert. Es handelt sich dabei um einen fest gelagerten Hall-Sensor, der Magnete bzw. deren Magnetfelder an einer an der Drehachse montierten Drehscheibe detektiert. Dieser kann zwar die Trittdrehzahl aufnehmen aber ist nicht im Stande auch die Drehrichtung zu erkennen. Dafür werden mindestens zwei Sensoren benötigt. Diese sind wie auf der Abbildung 3.2 zu sehen um ca. 90 Grad zueinander verschoben. Die Auswertungseinheit erkennt die Flanken der jeweiligen Signale als digitalen Wert und kann dementsprechend ohne weitere Verarbeitung diese Information weiterleiten.

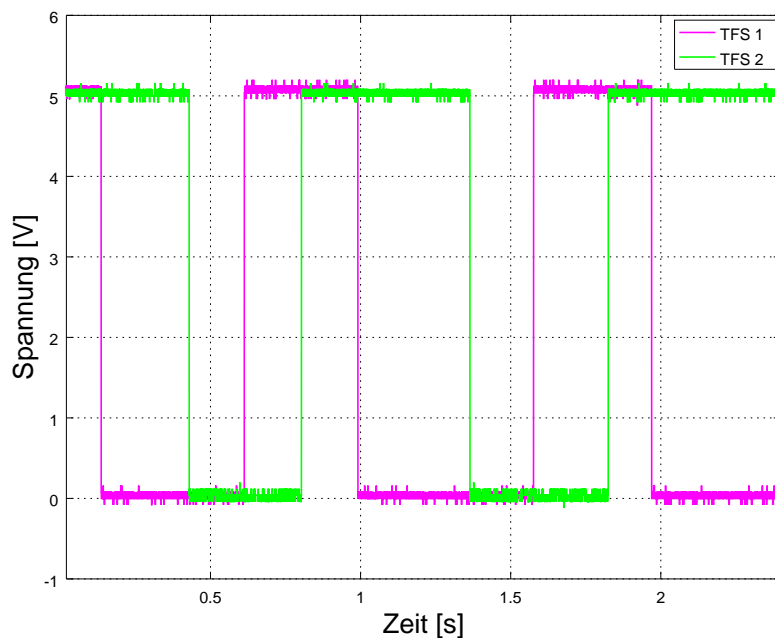


Abbildung 3.2.: Trittfrequenz

Die Längen bzw. Dauer der beiden High- und Low-Flanken sind nicht identisch. Das liegt daran, dass der Abstand der Hall-Sensoren zu der an der Zahnradwelle montierten Magnetscheibe unterschiedlich ist. Montagebedingt mussten die Sensoren aufeinander angebracht werden. Die Detektion der Trittfrequenz kann auch durch einen Drehmomentsensor festgestellt werden. Er misst die Kraft, mit der ins Pedal getreten wird. Wenn die Pedale oben und unten stehen, ist der Druck auf dem Pedal sehr gering. Diese Tiefpunkte im Kraftverlauf können erkannt und gezählt werden. Diese Messung ist nicht so genau wie mit dem Drehimpuls-Sensor, der über eine Magnetscheibe mit zehn Magneten 20 Messpunkte pro Umdrehung bereitstellt.

### 3.1.5. Drehmomentsensorik

Das Drehmoment wird über einen, auf der Antriebswelle integrierten, Drehmomentsensor ermittelt. Es handelt sich um eine Messung, die auf dem Effekt der Megnetostriktion beruht. Dabei wird die Deformation magnetischer Stoffe infolge eines angelegten magnetischen Feldes untersucht. Der Körper erfährt bei einem konstanten Volumen eine elastische Längenänderung. Bei diesem Sensor liegt das Nenndrehmoment bei 12 Nm. Oberhalb dieses Werts ändert sich das Messverhalten und kann nicht mehr als Linear betrachtet werden. Deshalb wird der Messbereich entsprechend begrenzt.

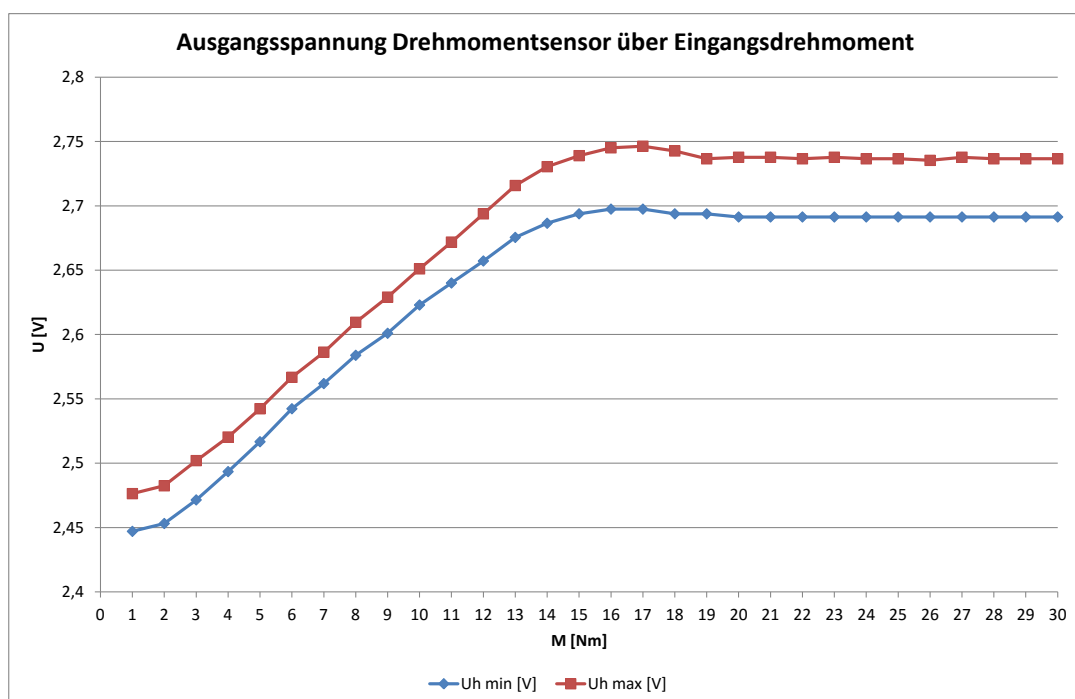


Abbildung 3.3.: Drehmoment

## 3.2. Beschaltung

Die Beschaltung der oben genannten Sensoren und Aktoren am Lastenfahrrad befindet sich im Anhang in der Tabelle A.4. Dort sind alle an das TMC-4670-DEV (Auswertungsboard) angeschlossene Leitungen aufgeführt.

### 3.3. Elektronik

Die verwendete Elektronik für das Lastenfahrzeug besteht aus einem Evaluationskit und einer Bremschopper-Schaltung. Für das Rekuperieren der Bremsenergie ist eine Supercap-Schaltung vorgesehen. Diese ist in dieser Arbeit nicht verwendet und somit nicht modelliert und simuliert worden.

#### 3.3.1. Evaluationskit

Das verwendete Setup besteht aus drei miteinander verbundenen Einheiten. Der Landungsbrücke als Kommunikationseinheit - auf der ein Programm zur Ansteuerung des Motors für den jeweiligen Modus läuft. In der Mitte der Abbildung 3.4 ist das TMC4670-DEV zu sehen. Diese Einheit ist für die Verarbeitung bzw. Auswertung der Eingangssignale vom Encoder-, Gasgriff-, Drehmoment- und Trittfrequenzsensor verantwortlich. Das letzte Element des Evaluationskits ist die Endstufe, das TMC-Leichtlast-Dev-Board, welches für den Antrieb des Motors sorgt.

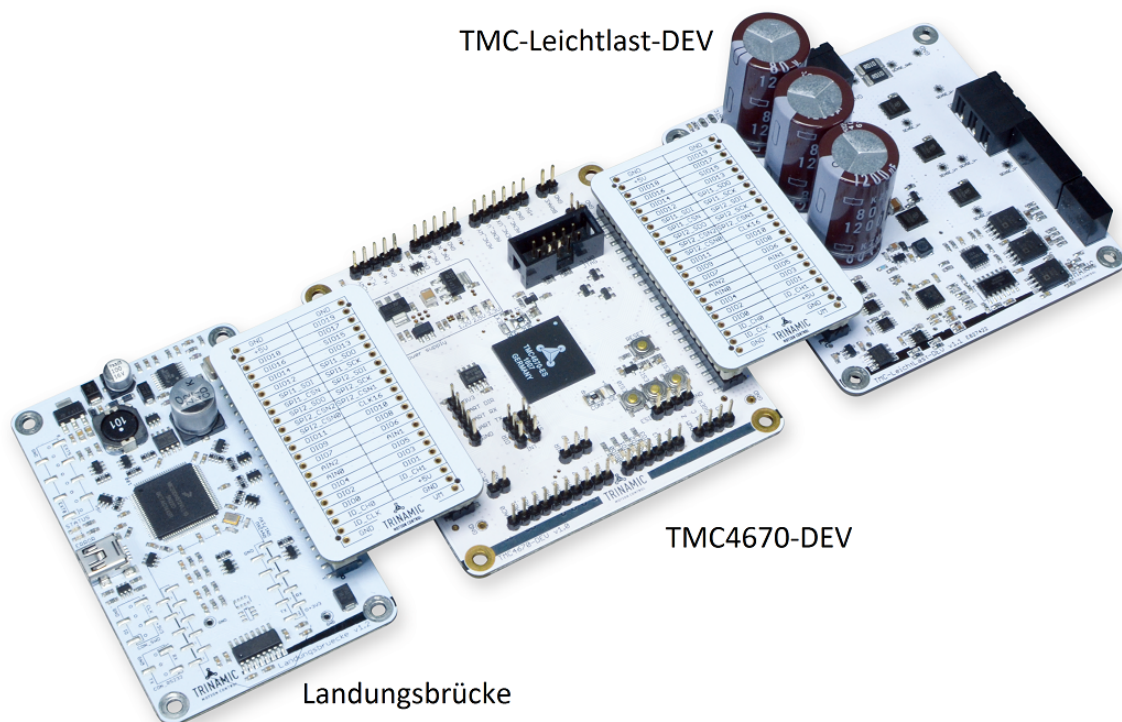


Abbildung 3.4.: Weasel-Eval-Kit

### 3.3.2. Bremschopper

Die folgende Bremschopper-Schaltung, mit der Nummer 3.5, dient der Chopperung im Falle einer Rückspeisung, vom Motor generierten Bremsleistung. Die internen Bauteile werden von einem 12V-DC-DC-Converter betrieben. Der Comperator vergleicht die Eingangsspannung und im Fall einer zu hohen Spannung schaltet er den Gate-Treiber, der wiederum den MOSFET schaltet. Damit wird der Ausgang der Stromversorgung geschaltet und kann an den Bremswiderstand abfließen. Auf der gleichen Platine befindet sich ein Spannungsregler mit einer eingestellten Ausgangsspannung von 6 Volt, mit der die Lichtanlage versorgt wird.

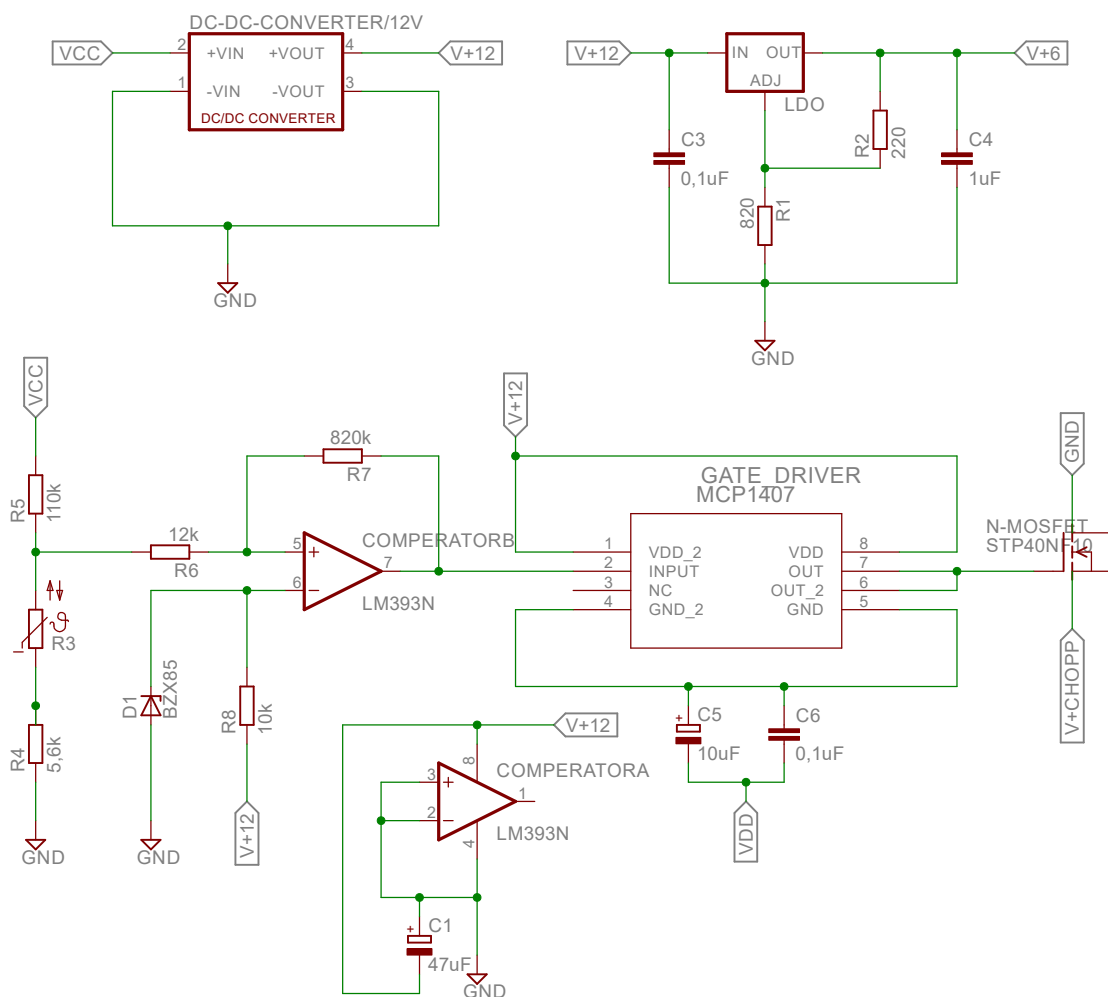


Abbildung 3.5.: Bremschopper

### 3.3.3. Supercap-Einheit

Die Erweiterung der Bremschopperschaltung ist die Supercap-Unit (SCU). Sie erlaubt es, die zurückgespeiste Leistung in Superkondensatoren zu laden und sie zu verwenden, wenn Energie gebraucht wird. Die Erläuterung der Funktion folgt am Zustandsautomat 3.6:

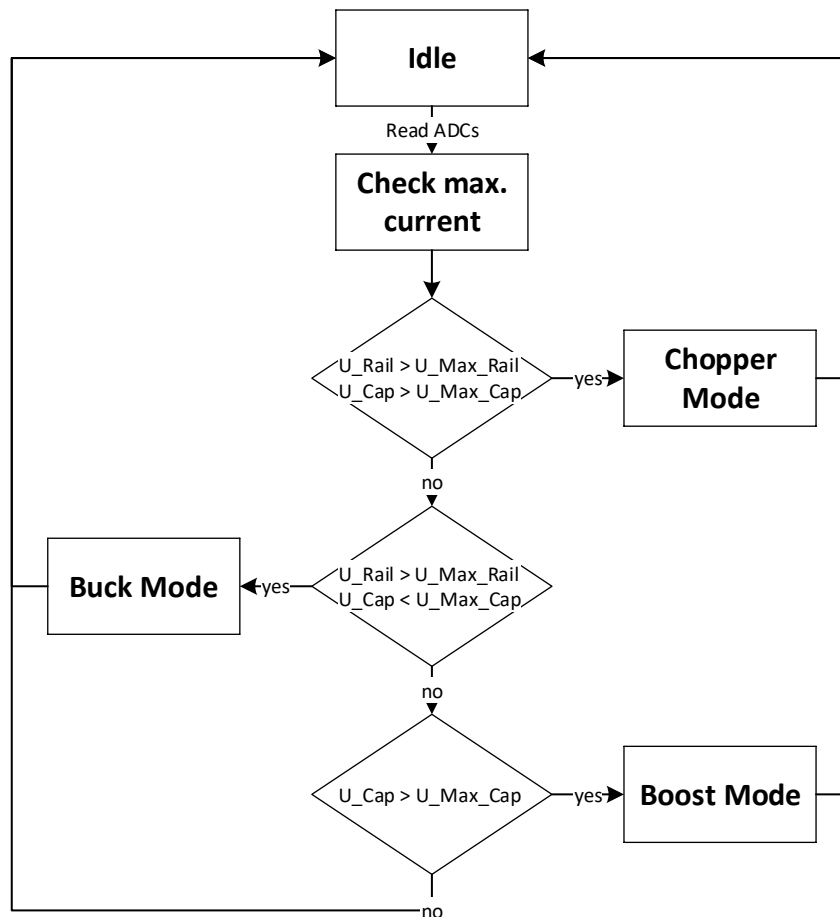


Abbildung 3.6.: SCU-Zustandsautomat

$U_{Rail}$  – aktuelle Betriebsspannung       $U_{Cap}$  – aktuelle Kondensatorspannung  
 $U_{MaxRail}$  – maximale Betriebsspannung     $U_{MaxCap}$  – maximale Kondensatorspannung

Es gibt vier Modi für das Energiemanagement:

- Battery Mode - Energie kommt ausschließlich aus dem Akku
- Buck Mode - Superkondensatoren werden geladen
- Boost Mode - Superkondensatoren werden entladen
- Chopper Mode - Superkondensatoren sind voll, überschüssige Energie wird im Bremswiderstand verbraucht

Das Evaluationskit kann mit bis zu vier hintereinander geschalteten Supercap-Einheiten erweitert werden. Das hat den Vorteil, dass man die Anzahl der Supercaps selber bestimmen kann und somit an Elektronik spart. Jedes Board übernimmt die Überwachung der Lade- und Entladezustände nur für eigene Superkondensatoren.

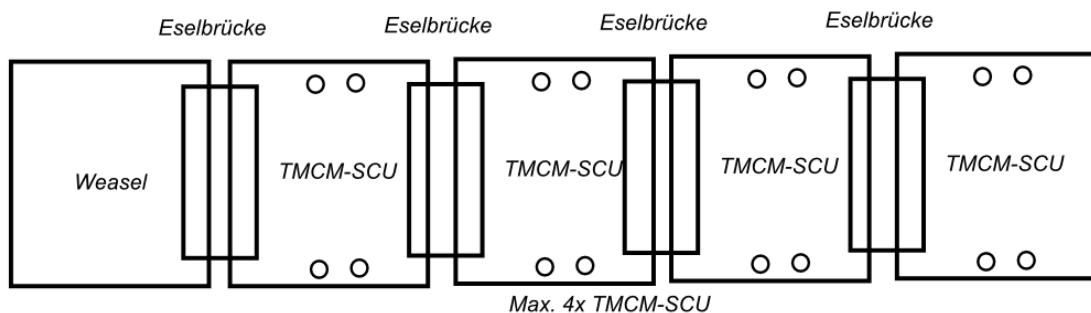


Abbildung 3.7.: SCU

### 3.3.4. Akku

Für den Demonstrator wird ein Akku von GreenPack verwendet. Diesen zeichnen eine sehr große Kapazität und eine selbständige Stromabschaltung aus. Der Sockel des Akkus wird auf einer Metallplatte montiert, die sich wiederum auf der Ladefläche des Lastenfahrrads befindet.

Die Freischaltung der Powerleitungen erfolgt aus Sicherheitsgründen erst nach dem Anschalten des Kill-Switches und der Startleitung. Der Starttaster muss dabei impulsartig in einem bestimmten Zeitbereich zwischen 0,2 - 6 Sekunden betätigt werden. Der Akku besitzt eigene CAN-Schnittstelle, mit der Informationen abgefragt werden können. Weitere Informationen befinden sich im Anhang [A.7](#).

## 3.4. Datenübertragung

Zum Aufnehmen der Daten während der Fahrt wird die Landungsbrücke mittels USB-Kabel mit einem Notebook verbunden. Für die Kommunikation und Aufnahme der Werte ist die TMCL-IDE zuständig. Dort sind Standard-Parameter und Debug-Variablen frei wählbar. Die Aufnahme der Log-Daten wird anschließend als eine CSV-Datei abgespeichert. Es gibt auch eine Möglichkeit mittels WLAN die Daten zu erfragen, dies ist jedoch für Evaluationszwecke recht umständlich, da die Software auf dem Empfangsgerät mit relativ großem Aufwand angepasst werden müsste.

## 3.5. Konfiguration

Je nach Benutzer, Antriebselektronik und Motor müssen die Parameter anders eingestellt werden d.h. sie sind für das E-Bike sowie den Prüfstand unterschiedlich. Für die Parametrisierung wird der Motor in Open-Loop gefahren und mit Hilfe der TMCL-IDE (v.5.6.0) konfiguriert. Diese Informationen werden dann als Skript abgespeichert. Das Skript beinhaltet folgende Parameter:

Zur Schnittstelle:

- welches Modul ist angeschlossen
- welche Schnittstelle (USB) wird verwendet
- welcher Port (COM) wird verwendet
- welche ID (1) hat der Port
- welche Kommunikationsplattform (Landungsbrücke) wird verwendet

Zum Register: WMC, <register>, <upper>, <value>, <module index>

- WMC (write to motion controler register) - Zugriffsart
- <register> - Name des Registers
- <upper> - 32 oder 64 Bit-Register
- <value> - eingetragene Wert
- <module index> - Nummer der Achse

Damit die Konfiguration nicht jedes mal ausgeführt werden muss, werden die Parameter auf das Kommunikationsboard einprogrammiert. Das programmieren erfolgt über Eclipse Neon. Damit wird die erzeugte Hex-Datei über die TMCL-IDE auf das Kommunikationsboard übertragen.

### 3.6. Signalflussgraph

Zur Veranschaulichung der Signalwege zwischen der Motorsteuerung und den Sensoren wird ein Signalflussgraph verwendet. Je nach Art der Ansteuerung müssen nicht grundsätzlich alle Sensoren verwendet werden. Diese sind aber miteinander kombinierbar.

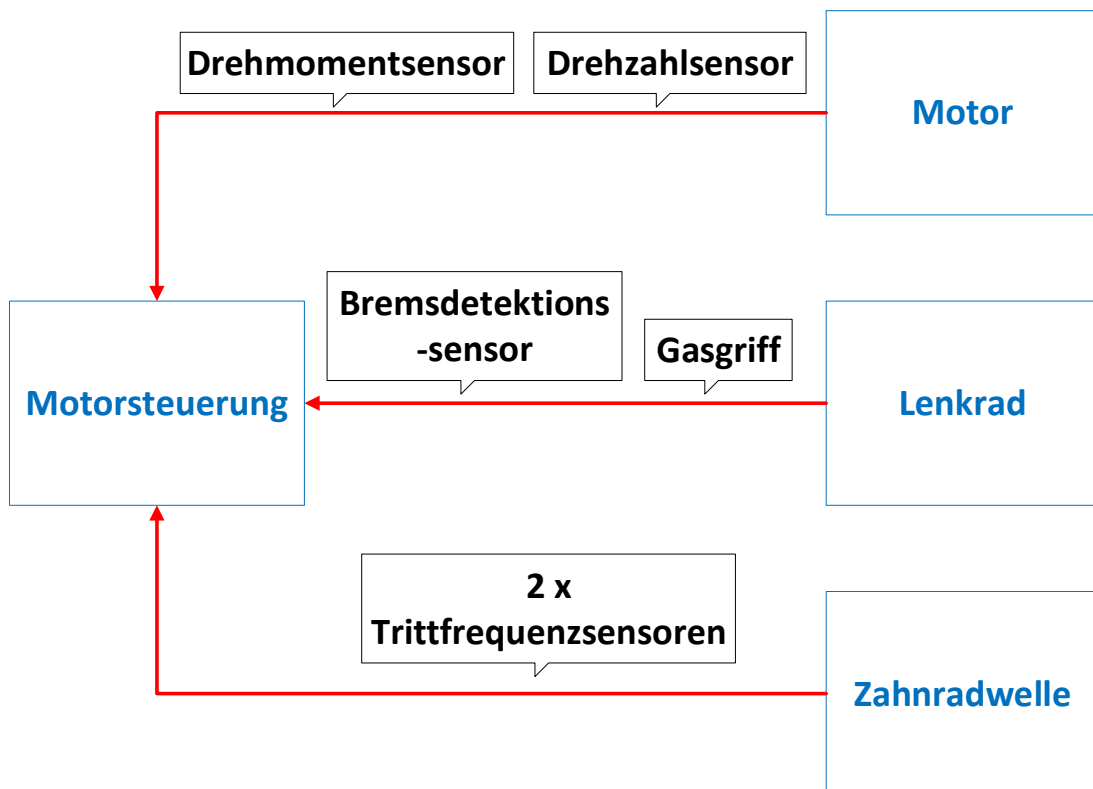


Abbildung 3.8.: Signalflussgraph



### 3.7. Energieflussgraph

Der Verlauf der Energie im Gesamtsystem des Lastenfahrads ist im Energieflussgraph auf der unteren Abbildung 3.9 verdeutlicht. Dort sind Energieflüsse um den Antrieb als zentrales Objekt aufgeführt. Diese wirken sich auf den Vortrieb aus.

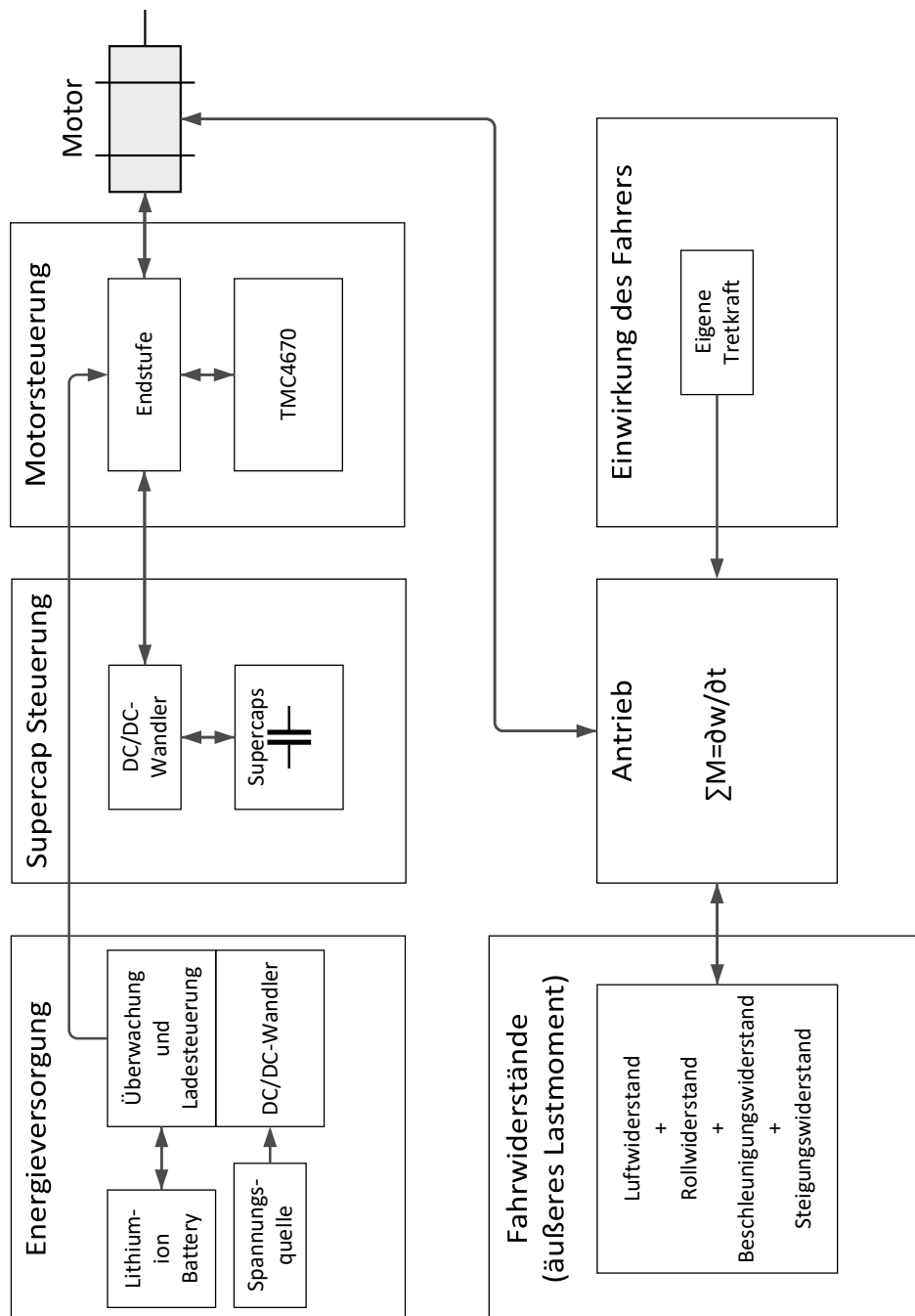


Abbildung 3.9.: Energieflussgraph

## 4. Modellierungskonzept

Das in diesem Abschnitt erläuterte Modellierungskonzept für ein elektrisch angetriebenes Elektrofahrrad beschreibt eine Strategie zur Modellierung dieses Systems. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine Umsetzung durch Simulation eines Elektrofahrrads an einem Prüfstand mit einem Maschinensatz.

Die Entwicklung des Pedelec-Modells beruht auf der Konstruktion und der Funktion eines vorhandenen Elektrofahrrads. Der zu modellierende Antrieb ist im 26" großen Hinterrad verbaut und direkt mit diesem gekoppelt. Als Energieversorgung dient ein Lithium-Ionen-Akku, der in der weiteren Entwicklung um Superkondensatoren ergänzt wird, welche eine Rekupe-ration der beim Bremsen generierten Energie zulassen. Überwacht und geregelt werden die genannten Systeme von einer Leistungselektronik und einer SuperCap-Steuereinheit bzw. einem Bremschopper. Zusätzlich verfügt das Modell über ein Belastungsmodul für die Berechnung der auftretenden Fahrwiderstände. Der Antrieb, welcher aus dem Fahrer als Antriebselement besteht, ist für die Untersuchung der Antriebselektronik irrelevant und wird bei der Modellierung deshalb nicht weiter behandelt. Der Aufbau des Gesamtsystems ist in der Abbildung 3.9 dargestellt. Sämtliche im Modell eingesetzten Parameter entstammen verschiedenen Quellen und sind in Anhang A.2 tabellarisch aufgeführt.

### 4.1. Motormodul

Die mechanische Leistung ergibt sich aus dem Drehmoment und der Drehzahl der Motors. Das erzeugte Moment des Motors ist proportional zu dem zu angesteuerten Wert. Über den Faktor der Proportionalität kann somit zur jeder Zeit die Leistung bestimmt werden.

$$M_{mech} = \frac{P}{2 \cdot \omega} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (4.1)$$

$T_{mech}$  – Motormoment

$\omega$  – Winkelgeschwindigkeit

$P_{mech}$  – mechanische Leistung

$n$  – Drehzahl

## 4.2. Belastungsmodul

Das Belastungsmodul berechnet die auf den Motor einwirkende Last in Form eines äußeren Drehmoments. Bei dem Lastenrad ergibt sich die gesamte Belastung durch die Summe der einzelnen Fahrwiderstände, welche zum Teil geschwindigkeitsabhängig sind und in eigenständigen Unterblöcken berechnet werden. Die Geschwindigkeit des Fahrrads ist dabei proportional zu der aus dem Motormodul entnommenen Drehzahl. Ein Unterblock ermittelt aus der Motordrehzahl bzw. der Winkelgeschwindigkeit und der Radgröße die sich einstellende Geschwindigkeit:

$$v_{bike} = \frac{D_{Rad}}{2} \cdot \omega = D_{Rad} \cdot \pi \cdot n \quad (4.2)$$

$v_{bike}$  – Geschwindigkeit des E-bikes                       $\omega$  – Winkelgeschwindigkeit  
 $D_{Rad}$  – Raddurchmesser                                       $n$  – Drehzahl

Als relevante Fahrwiderstände lassen sich der aerodynamische Widerstand, der Rollwiderstand, der Beschleunigungswiderstand und der Steigungswiderstand der Fahrbahn feststellen. Das auf den Motor wirkende Lastmoment ergibt sich aus der Summe aller Widerstände multipliziert mit dem Raddurchmesser:

$$T_{Last} = (F_{Luft} + F_{Roll} + F_B + F_{Steig}) \cdot \frac{D_{Rad}}{2} \quad (4.3)$$

$M_{Last}$  – äußeres Lastmoment                       $F_{Luft}$  – Luftwiderstand  
 $F_{Roll}$  – Rollwiderstand                               $F_B$  – Beschleunigungswiderstand  
 $F_{Steig}$  – Steigungswiderstand                       $D_{Rad}$  – Raddurchmesser

Der aerodynamische Widerstand entsteht durch Druck- und Reibungsverluste der bewegten Luft an dem Lastenrad inkl. Zuladung und dem Fahrer. 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 Richtungsänderung des Fahrrads ständig seine Wirkung. Im Mittelwert wird sie deshalb als Null angenommen. Für den aerodynamischen Widerstand ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$F_{Luft} = \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot A_{ges} \cdot (v_{Fzg} + v_{Wind})^2 \quad (4.4)$$

$F_{Luft}$ – Luftwiderstand	$\rho$ – Luftdichte
$c_w$ – Strömungswiderstandskoeffizient	$A_{ges}$ – Projizierte Stirnfläche
$v_{Fzg}$ – Fahrzeuggeschwindigkeit	$v_{Wind}$ – Windgeschwindigkeit

Die Dichte der Luft ändert sich innerhalb einer definierten Simulation kaum und ist daher als Konstante umgesetzt. Der Widerstandsbeiwert bezieht sich auf die Stirnfläche des gesamten Systems inklusive des Fahrers und ist deshalb mit dieser Fläche zu multiplizieren.

Ein weiterer Unterblock modelliert den Rollwiderstand, welcher durch die Reibungsverluste beim Kontakt zwischen der Fahrbahn und dem Reifen entsteht. Er ist neben dem Gewicht des Gesamtsystems auch von der Beschaffenheit der Fahrbahn und dem verwendeten Reifen abhängig. Dieser Zusammenhang wird ebenfalls über einen Beiwert abgebildet:

$$F_{Roll} = m_{ges} \cdot g \cdot c_r \cdot \cos(\alpha) \quad (4.5)$$

$F_{Roll}$ – Rollwiderstand	$m_{ges}$ – Masse von Pedelec/Fahrer
$g$ – Erdbeschleunigung	$c_r$ – Rollwiderstandskoeffizient

Der Beschleunigungswiderstand berücksichtigt die Trägheit des Fahrrads bei einer translatorischen Beschleunigung oder Verzögerung. Die rotatorische Trägheit des Motors und des Rades ist an dieser Stelle nicht relevant, da diese durch Messung am Lastenrad ermittelt wurde. Der Beschleunigungswiderstand ergibt sich somit aus:

$$F_B = \frac{dv_{bike}}{dt} \cdot m_{ges} \quad (4.6)$$

$F_B$ – Beschleunigungswiderstand	$v_{bike}$ – Geschwindigkeit des Pedelec
$m_{ges}$ – Masse von Pedelec/Fahrer	

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:

$$F_{Steig} = m_{ges} \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (4.7)$$

$F_{Steig}$ – Steigungswiderstand	$m_{ges}$ – Masse von Pedelec/Fahrer
$g$ – Erdbeschleunigung	$\alpha$ – Steigungswinkel der Fahrbahn

Der Ausdruck  $\tan \alpha$  ist der Quotient der zurückgelegten Strecke und der Höhenänderung. Dieser lässt sich durch Integration der Geschwindigkeit der zurückgelegten Strecke bestimmen. Die Formel 4.6 modifiziert sich somit zu:

$$F_{Steig} = m_{ges} \cdot g \cdot \frac{\Delta H}{\int v_{bike}} \quad (4.8)$$

$F_{Steig}$ – Steigungswiderstand	$m_{ges}$ – Masse von Pedelec/Fahrer
$g$ – Erdbeschleunigung	$v_{bike}$ – Geschwindigkeit des Pedelec
$\Delta H$ – Höhenänderung der Fahrbahn	

### 4.3. Fahrermodul

Innerhalb des folgenden Moduls erfolgt die Vorgabe der relevanten Eingaben des Fahrers. Dies ist neben der gewählten Unterstützung durch den BLDC-Motor die Vorgabe einer definierten Antriebsleistung. Von besonderem Interesse ist dabei das vom Fahrer generierte Drehmoment, welches als Lastmoment auf den Motor einwirkt. Im Gegensatz zu den Fahrwiderständen ist der Drehsinn das 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:



# 5. Implementierung und Inbetriebnahme

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Hardware- und Softwaretechnischen Seite in der Entwicklung des Prüfstands. Dazu gehört der Aufbau der Testeinheit sowie deren Konfigurierung und Übertragung der Daten. Abschließend werden die Kennwerte der Fahrwiderstandsmodelle ergänzt und in eine Simulationssoftware implementiert.

## 5.1. Aufbau des Prüfstands

Der Prüfstand besteht generell aus einem Maschinensatz - zwei miteinander gekoppelten BLDC-Motoren, einem Drehmomentsensor und zwei Endstufen. Der Sensor befindet sich zwischen den Motorenwellen und wird mit diesen über zwei Metallbalgkupplungen (Ausgleichkupplungen) gekoppelt.

Der sog. Transducer - der Drehmomentsensor verfügt über eine digitale sowie analoge Schnittstelle als Ausgang. Bei der digitalen hat man zwei Kommunikationsstandards zur Auswahl - CAN und RS232. Auf diesem Weg werden Informationen vom Rechner angefordert und darauffolgend vom Sensor geantwortet.

Als Maschinensatz werden zwei baugleiche BLDC-Motoren verwendet. Sie verfügen über ein Nennmoment von ca. 2,7 Nm und eine Nenndrehzahl von 3000 rpm. Die restlichen Spezifikationen befinden sich in der Tabelle [A.5](#) im Anhang.

Zur Ansteuerung des Motors wird eine Konstellation aus drei miteinander verbundenen Boards verwendet:

- Landungsbrücke - Kommunikationseinheit
- TMC-4670-DEV - Auswertungseinheit für Encodersignale
- TMC-LeichtLast-DEV - Endstufe

Diese Konstellation kann durch mit bis zu vier TMC-SCU Boards erweitert werden.

## 5.2. Beschaltung am Prüfstand

Die Motoren verfügen jeweils über einen Hall-Sensor und einen optischen Drehwinkelgeber. Beide Sensoren dienen der Lageerkennung der Welle. Die Messung ist bei dem Hall-Sensor über die Erfassung der Lage der Permanentmagnete realisiert. Der Inkrementalgeber dagegen liefert über seinen optischen Sensor eine bestimmte Anzahl an Impulsen pro Umdrehung (bei diesem Geber - 5000 Impulse/U). Am Prüfstand wird nur jeweils ein Encoder verwendet aufgrund einer höheren Auflösung.

## 5.3. Konfiguration

Die Einstellung der Motoren wird auf den Kommunikationsboards (Landungsbrücken) vorgenommen. So wie im Fall des Lastenfahrads ist, werden die Parameter über die hauseigene IDE ermittelt und dann in Software in C++ übertragen. Daraus wird eine Hex-Datei erstellt, welche mittels der TMCL-IDE auf das Board hochgeladen wird. Die Art der im Skript erzeugten Daten wird im Kapitel 3.5 behandelt.

## 5.4. Datenübertragung

Der Transducer wird über eine RS232 Schnittstelle ausgelesen. Dabei werden die Daten nach dem IEEE-754 Standard aufgeteilt. Um die Daten auszulesen muss zuerst bei dem Sensor angefragt werden, welche Funktion er zurück senden soll. Die Kommunikation findet in beide Richtungen statt, aber nie gleichzeitig - nach dem Half-Duplex Prinzip. Die Baud-Rate kann zwischen 9600, 38400 und 115200 bps eingestellt werden. Dies kann nur über das vom Hersteller mitgelieferte Programm erfolgen. Die Standard-Einstellung liegt bei 9600 bps.

Die Darstellung einer Gleitkommazahl nach dem IEEE-754 Standard:

$$x = s \cdot m \cdot b^e \quad (5.1)$$

$x$ – Gleitkommazahl	$s$ – Vorzeichen	$m$ – Mantisse
$b$ – Basis, nach IEEE-754 ist $b=2$	$e$ – Exponent	



Die Daten werden über 1-Byte Kommando angefragt. Dieses beinhaltet eine Nummer, die der jeweiligen Funktion zugeordnet ist. Die Auflistung der Funktionen befindet sich auf der beigelegten CD unter Dokumentation/Datenblätter/TorqSense\_RS232\_Commms\_Protocol. Zurück erhält man eine Gleitzahl die aus 4 Bytes besteht und folgendermaßen aufgeteilt wird:

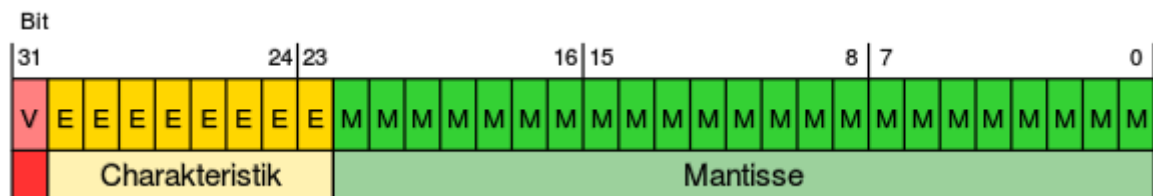


Abbildung 5.1.: IEEE-754

Die empfangenen Daten werden gemäß der Kodierung mit mehreren im Simulationsskript verwendeten Funktionen entschlüsselt. Das Resultat ist eine Gleitkommazahl die in weiteren Schritten ausgewertet und umgerechnet wird.

Die Kommunikationsboards werden an den PC über USB angeschlossen und über einen COM-Port mit einer Baut-Rate von 9600 bps wird Verbindung hergestellt. Die gesendeten und empfangenen Daten haben eine Übertragung von 9 Bytes. Am Beispiel wird die Struktur einer Sende-Abfolge erläutert:

*Binary:*

Byte Index	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Function	Target-address	Instruction Number	Type	Motor/Bank	Operand Byte3	Operand Byte2	Operand Byte1	Operand Byte0	Checksum
Value (hex)	\$01	\$01	\$00	\$02	\$00	\$00	\$01	\$5e	\$62

Abbildung 5.2.: TMCL-Reference

Hier wird eine Drehrichtung und Geschwindigkeit der Drehung eingestellt. Im Byte 0 ist die Boardnummer eingetragen. Die "Instruction Nummer" beinhaltet die angeforderte Funktion (ROR - Rotate Right). Beim "Type" wird die Art der Funktion ausgewählt - sie ist nicht für alle Kommandos vorhanden. Anschließend wird mit der 3 das an das Board angeschlossene Modul ausgewählt. Mit den weiteren vier Bytes wird ein Wert übermittelt, in diesem Fall die Geschwindigkeit in Inkrementen. In dem letzten Byte wird ein Summencheck gebildet. Es handelt sich dabei um eine 8-Bit Addition von allen zuvor erwähnten acht Bytes. Ist die Checksumme unterschiedlich mit den empfangenen Daten, so ist ein Fehler in der Übertragung vorgefallen und somit die Anforderung ungültig.

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

- Senden von Sollwerten und Anfragen vom PC an das Steuergerät
- Senden von Istwerten vom Steuergerät an den PC
- Speicherung der Antwortdaten im internen Gerätespeicher
- Auslesen und Leeren des Speichers

Jedes vom Rechner korrekt gesendete Signal wird vom Steuergerät bearbeitet. Die Landungsbrücke sendet dann sofort eine Antwort, die im internen Speicher des PCs abgelegt wird. Das Gerät sendet aktiv keine Daten an den PC, sondern kann nur auf dessen Anfragen reagieren.

## 5.5. Simulationssoftware

Das Softwarepaket Scilab ist in dieser Arbeit das eingesetzte Simulationstool. Die Programmstruktur und Bedienung ähnelt der bekannten Simulationssoftware Matlab und ist zu dieser teilweise kompatibel und dennoch kostenfrei erhältlich. Als grafische Oberfläche dient das in Scilab enthaltene Zusatzpaket Xcox, welches analog zum Matlab-Tool Simulink aufgebaut ist. Die Funktionen dieser Software sind im Vergleich zu Matlab begrenzt, trotzdem vollkommen ausreichend. Für viele Zusatzfunktionen gibt es Pakete, die entweder direkt im Programm über den Modulmanager ATOMS oder als Open-Source heruntergeladen werden. So werden sie entweder automatisch beim Start der Software geladen oder manuell jedes Mal in die Umgebung eingebunden.

Dem Anwender stehen 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.

Obwohl das Betriebssystem eine 64 Bit-Architektur aufweist, musste festgestellt werden, dass die 32-Bit Version des Simulationstools im Bezug auf Stabilität und Kompatibilität zu den Zusatzpaketen ausgereifter ist. Aufgelistet ist an dieser Stelle die Konstellation von angewandten Programmen und Zusatzpaketen, welche für bestimmte Anforderungen und Simulationen unerlässlich sind:

Beschreibung	Programm	Version
Betriebssystem	Windows 10	64 Bit
Simulationssoftware	Scilab	5.5.2 32 Bit
Bibliothek für Verbindung mit USB-Schnittstelle	SiSeLi	0.5

Tabelle 5.1.: Simulationsumgebung

Für die Verbindung von realer Hardware mit dem Simulationsrechner und eine erfolgreiche Kommunikation mit Scilab sind weitere Zusatzpakete erforderlich. Das einzubindende Steuergerät verfügt über eine USB-Schnittstelle. Für den Datenaustausch über USB ist die Nutzung der Bibliothek SiSeLi nötig. Das Zusatzpaket ist in der Lage, über eine virtuelle serielle 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 die Simulation einzubinden.

## 5.6. Bestimmung der Kenngrößen

In diesem Unterkapitel sind Messverfahren und Berechnungen aufgeführt, die zur Bestimmung von notwendigen Kenngrößen angewendet wurden. Diese sind chronologisch aufgelistet und aufeinander aufgebaut.

Die erste Unbekannte im System ist die Gesamtmasse. Diese setzt sich aus der Masse des Lastenrads inkl. Akku und dem Fahrer zusammen. Alle drei Gewichte wurden mit Hilfe einer Plattformwaage ermittelt und sehen folgendermaßen aus:

$$m_{LL}(38,9\text{ kg}) + m_{Akku}(8,85\text{ kg}) + m_{Fahrer}(x) = m_{ges}(47,75 + x)\text{ kg} \quad (5.2)$$

Bei der Formel 4.4 für den Luftwiderstand gibt es gleich zwei Unbekannte, den Widerstandsbeiwert ( $c_w$ ) sowie die Stirnfläche. Da der  $c_w$ -Wert üblicherweise im Windkanal gemessen wird, muss die Größe angenommen werden. Der angenommene  $c_w$ -Wert entspricht dem Wert für ein Mountainbike mit einem Fahrer, der aufrecht sitzt (7). Die Annahme wird das Endergebnis nicht gravierend beeinflussen, da das Pedelec nur bis 25 km/h fährt und im Gegensatz zum Beschleunigungswiderstand nur einen sehr kleinen Teil der Gewichtung ausmacht. Die Stirnfläche sowie der  $c_w$ -Wert kann sich je nach Größe und Form von Zuladung und Fahrer ändern. Für einen Beiwert ohne Zuladung wird die Fläche über das Auswerten eines Stirnflächenbildes ermittelt.

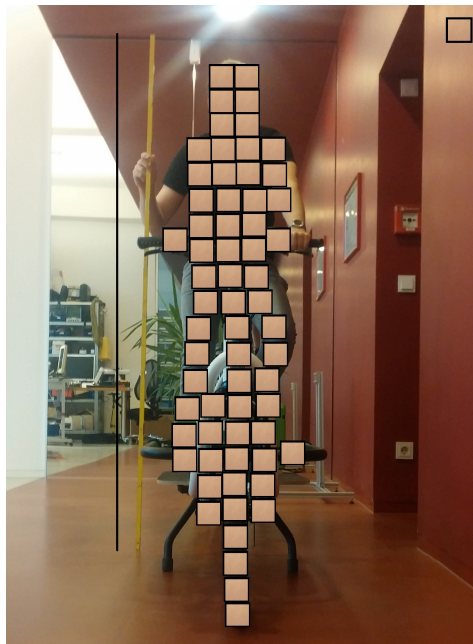


Abbildung 5.3.: Stirnfläche

Hier wird ein Messstab neben das Fahrrad gehalten um die Größe von einem Kästchen auf ein bestimmtes Maß zu bringen. In diesem Fall ist das ein 10x10cm großer Quader. Dann legt man das Kästchen über die Stirnfläche vom E-Bike und Fahrer, bis die vollständig überdeckt ist. Die Anzahl der Quader-Flächen wird addiert und somit die Stirnfläche bestimmt.

Der Rollwiderstand ist von der Gesamtmasse abhängig und mit dieser bekannten Größe bestimmbar. Es wird gemessen wie viel Moment erreicht werden muss, bis sich das Fahrrad bewegt. Da die Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie die Steigung für diesen Fall gleich Null angenommen werden kann, werden die Widerstände vernachlässigt. Um das Moment zu ermitteln wird die Kraft mit dem Hebelarm multipliziert. Dann kann die Gleichung 4.5 nach dem  $c_r$ -Wert umgestellt werden.

$$c_r = \frac{T_{roll}}{m_{bike} \cdot g \cdot R_{whe}} \quad (5.3)$$

Dieser Wert ist Einheitslos und beträgt 0,00369. Bestimmt wurde der Rollwiderstand bei einem Reifendruck von 4 bar. Verglichen mit einem Hollandrad mit einem Rollwiderstand von 0,007 und einem Rennrad mit 0,003 ist unser ermittelte Widerstand recht klein (9). Mit gängigen Reifen wäre das Ergebnis schwierig zu erzielen. Das gute Ergebnis ist den speziellen Reifen zu verdanken, den sog. "Balloons" Modell BIG APPLE von Schwalbe. Diese kennzeichnen sich durch die ballonförmige Geometrie und "beim gleichen Luftdruck rollt der BIG APPLE circa 10 Watt leichter. Beim Komfort-Luftdruck von 2 bar hat der BIG APPLE ungefähr den gleichen Rollwiderstand wie ein Standardreifen bei 4 bar" (1).

Für den Antrieb des Fahrrads sorgt ein Nabenmotor von der Marke "GoSwiss" . Hierbei handelt es sich um einen Prototypen, wodurch einige Kenngrößen nicht im Datenblatt vorfindbar sind. Aus dieser Not müssen erforderliche Parameter bestimmt werden. Es gilt, die Drehmomentkonstante herauszufinden, die proportional zur Anzahl der Inkrementen ist. Begleitend werden Parameter des Prüfstandmotors ermittelt. Die Vorgehensweise bei den beiden Motortypen ist unterschiedlich, da andere Messverfahren zur Verfügung stehen. Gemessen wurde dabei mit zwei jeweils unterschiedlichen Endstufen. Noch mal zu beachten ist, dass bei dem Prüfstand sowie dem Lastenrad gleiche MOSFET-Endstufen verbaut wurden, die sich nur in den Shunt-Widerständen unterscheiden. Bei den egaN-Endstufen sind sie gleich.

Als erstes wurde das Verhältnis von Inkrementen zum Phasenstrom, Akkustrom und der auf den Transistoren gemessenen Temperatur ermittelt. Die Ströme wurden dabei über Stromzangen auf einem Oszilloskop grafisch dargestellt und die Temperatur über eine Wärmebildkamera aufgenommen. Damit der höchste Wert der Ströme erreicht wird, sind die Messungen unter Last und nicht im Leerlauf durchgeführt.

Inkremente	Is [I]	Iakku [I]	Temp. [°C]
2000	3	2	30
4000	6	4	35
5000	7,5	5	37

Tabelle 5.2.: MOSFET-Endstufe am Lastenrad

In der Simulation benötigt man die Drehmomentkonstante der beiden Motor-Endstufen-Kombinationen. Somit sind die Parameter von Inkrementen auf tatsächliches Drehmoment und umgekehrt überführbar. Zuerst wurden die Lastenrad-Endstufen untersucht. Das Fahrrad besitzt einen internen Drehmoment-Sensor, der das Drehmoment registriert. Wie auf der Abbildung 3.3 zu sehen, ist die Abweichung der Messung für diesen Zweck zu groß. Um diese Größe dennoch zu bestimmen wurde die Konstante über einen Hebelarm ermittelt. In gewisser Entfernung, dem Hebelarm, ist ein Gewicht angebracht das bei einem bestimmten Moment anfängt sich zu bewegen. Diese Masse wird entsprechend dem Hebelgesetz in  $90^\circ$  zur Reifenbodenkontaktfläche angebracht. Dabei wird eine Messreihe mit verschiedenen Gewichten durchgeführt:

Inkrement	Gewicht [g]	Gewicht [N]	Hebelarm [m]	Moment [Nm]
1350	250	2,4525	0,37	0,91
1900	500	4,905	0,37	1,81
2500	750	7,3575	0,37	2,72
3250	1000	9,81	0,37	3,63
3650	1250	12,2625	0,345	4,23

Tabelle 5.3.: Lastenrad Momentverlauf (MOSFET)

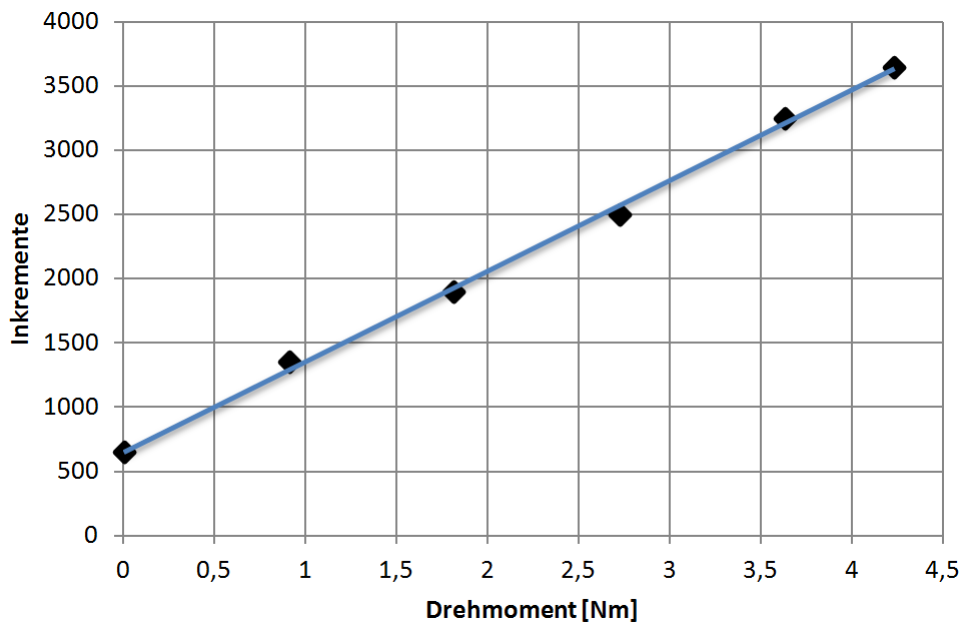


Abbildung 5.4.: Drehmoment pro Inkrement für MOSFET-Endstufe

Die Messung aus der Tabelle 5.3 ist in Form eines Diagramms in der Abbildung 5.4 vorzufinden. Zu sehen ist, dass die Messstrecke annähernd linear ist. Da das Rad eine eigene Trägheit aufweist muss diese vom Ergebnis subtrahiert werden. Dieser Widerstand ist ein Offset von 650 Inkrementen. Um die Rechnung genauer zu gestalten werden die Werte gemittelt. Da die Moment-Vorgabe in Inkrementen konstant ist, kann Sie als Ist-Wert angenommen werden. Gemäß der Formel 5.4 wird die Drehmomentkonstante berechnet:

$$M_A = Torque_{Actual} \cdot k_t \quad (5.4)$$

$M_A$  – Antriebsmoment

$Torque_{Actual}$  – Istmoment

$k_t$  – Drehmomentkonstante

$$k_t = \frac{M_A(mittel) - Offset}{Torque_{Actual}(mittel)} = \frac{2,66}{1880} = 1,415 \cdot 10^{-3} \frac{Nm}{Inkremente}$$

$$\frac{1}{k_t} = 706,8 \frac{Inkremente}{Nm}$$

In der Simulation wird das Lastmoment aus den Fahrwiderständen berechnet. Dieser ist in Nm. Die Lastvorgabe vom Fahrrad dagegen erfolgt in Inkrementen. Somit muss der Moment-Sollwert vom Lastrad in ein Moment in Nm umgerechnet werden. Für die Vorgabe des Moments an die Prüfstandsmotoren ist es umgekehrt. Aus diesem Grund werden für alle Drehmomentkonstanten die dazugehörigen Kehrwerte bestimmt.

Inkrement	Gewicht [g]	Gewicht [N]	Hebelarm [m]	Moment [Nm]
1600	250	2,4525	0,37	0,91
2200	500	4,905	0,37	1,81
3000	750	7,3575	0,37	2,72
3900	1000	9,81	0,37	3,63
4650	1250	12,2625	0,345	4,23

Tabelle 5.4.: Lastenrad Momentverlauf (eGaN)

Diese Messung wurde mit denselben Gewichten an der eGaN-Endstufe wiederholt. Wie erwarten ist der Verlauf der Messung annähernd linear. Die Steigung ist größer als im Fall der MOSFET-Endstufe, was darauf hindeutet, dass diese eine höhere Ansteuerung benötigt um auf das gleiche Moment zu kommen. Darüber hinaus beträgt der Offset diesmal 750 Inkremente.

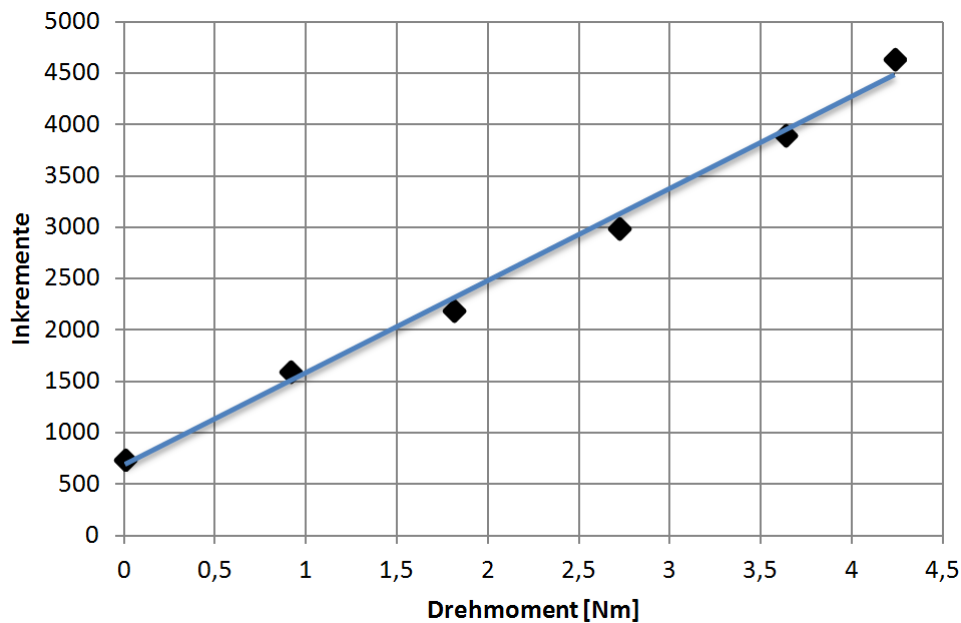


Abbildung 5.5.: Drehmoment pro Inkremente für eGaN-Endstufe

Bei der eGaN-Endstufe musste leider festgestellt werden, dass diese für unsere Lastanforderungen zu warm wurde. Bei dem E-bike wurde schon bei 10000 Inkrementen eine Temperatur von weit über  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  festgestellt. Um die Transistoren nicht zu beschädigen konnte keine höhere Leistung erzielt werden. Aus diesem Grund wurde entschieden, die ursprüngliche MOSFET-Endstufe für den Demonstrator zu benutzen.

Inkremente	Moment [Nm]	Strom [I]
2000	0,32	1,9
3000	0,41	2,85
4000	0,48	3,8
5000	0,56	4,75
6000	0,65	5,7
7000	0,74	6,65
8000	0,83	7,6

Tabelle 5.5.: MOSFET-Endstufe am Prüfstand

Die Messung von MOSFET-Endstufen am Prüfstand wurde durch die Abbildung 5.6 veranschaulicht. Der Verlauf ist wie im Fall der Lastenrad-Endstufe annähernd linear. Auch dort muss erst die Trägheit überwunden werden um ein Moment auf der Welle erzeugen zu lassen. Der Bereich unter dem Offset von 1050 Inkrementen ist nicht untersuchbar. Oberhalb



des Wertes ist eine vernünftige Messung erst ab ca. 2000 Inkrementen gegeben. Dies liegt an dem Drehmomentsensor, der bei kleinen Momenten rauscht. Die Formel muss dementsprechend angepasst werden. Pro Tausend Inkremente hat man ein Delta von 0,085 Nm. Das ergibt  $8,5 \cdot 10^{-5}$  Nm pro Inkrement. Die Tangente schneidet die Drehmoment-Achse auf 0,15 Nm, was den Offset für die Berechnung bedeutet. Die dementsprechend überarbeitete Formel für das Drehmoment lautet:  $M = Torque_{Actual} \cdot 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ Nm} + 0,15 \text{ Nm}$

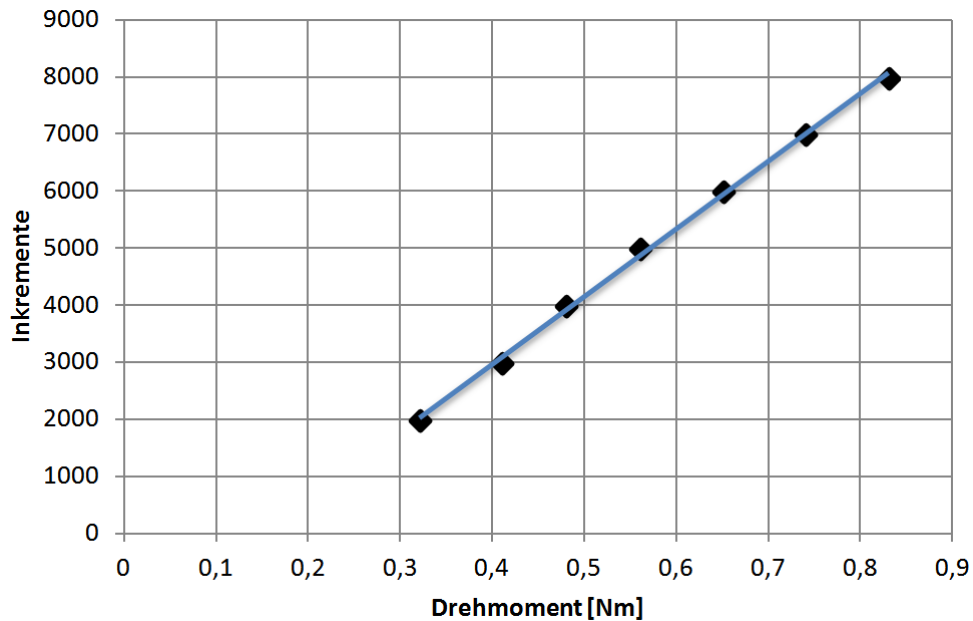


Abbildung 5.6.: Drehmoment pro Inkremente für MOSFET-Endstufe

Zuletzt wurde die eGaN-Endstufe zum Vergleich auch am Prüfstand getestet.

Inkremente	Moment [Nm]	Strom [I]
1000	0,20	1,7
2000	0,33	3,2
3000	0,48	4,3
4000	0,60	6,1
5000	0,75	8
6000	0,86	9,3

Tabelle 5.6.: eGaN-Endstufe am Prüfstand

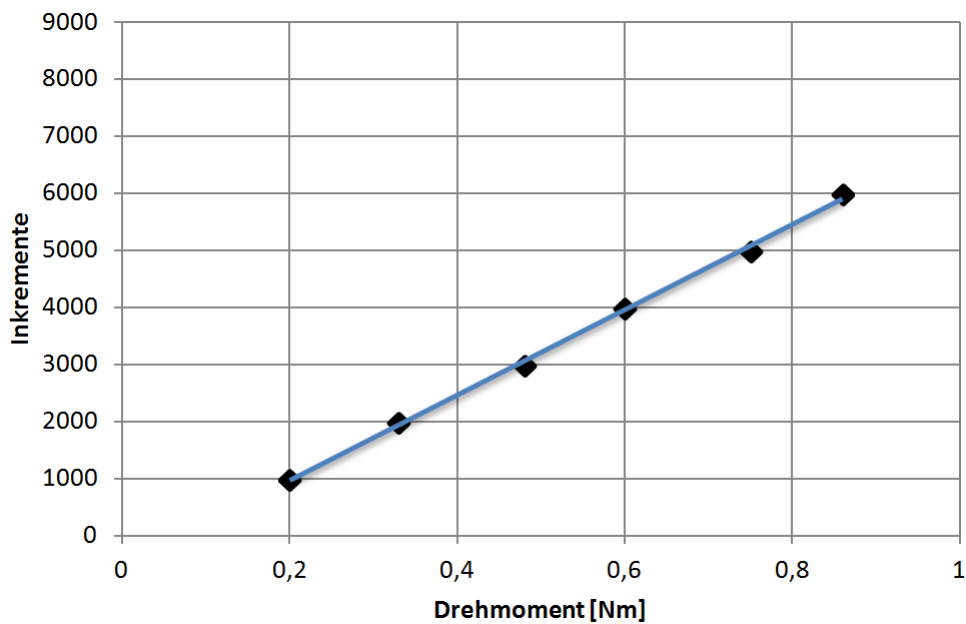


Abbildung 5.7.: Drehmoment pro Inkremente für eGaN-Endstufe

Zum Abschluss eine Zusammenfassung der  $k_t$ -Werte und Offsets für MOSFET- und e-GaN-Endstufen am Lastenfahrzeug sowie am Prüfstand.

$$\text{MOSFET Lastenrad: } k_t = 1,415 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{Nm}}{\text{Inkr.}} \right]; \quad \frac{1}{k_t} = 706,8 \left[ \frac{\text{Inkr.}}{\text{Nm}} \right]$$

$$\text{eGaN Lastenrad: } k_t = 1,147 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{Nm}}{\text{Inkr.}} \right]; \quad \frac{1}{k_t} = 871,8 \left[ \frac{\text{Inkr.}}{\text{Nm}} \right]$$

$$\text{MOSFET Prüfstand: } k_t = 1,140 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{Nm}}{\text{Inkr.}} \right]; \quad \frac{1}{k_t} = 8772 \left[ \frac{\text{Inkr.}}{\text{Nm}} \right]$$

$$\text{eGaN Prüfstand: } k_t = 6,000 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{Nm}}{\text{Inkr.}} \right]; \quad \frac{1}{k_t} = 1667 \left[ \frac{\text{Inkr.}}{\text{Nm}} \right]$$

Offsets:

- MOSFET Lastenrad: 650 Inkremente
- eGaN Lastenrad: 750 Inkremente
- MOSFET Prüfstand: 1050/2 Inkremente
- eGaN Prüfstand: 650/2 Inkremente

## 5.7. Hardware-in-the-Loop

Als Vorbereitung auf die Simulation wurden Fahrwiderstände inklusive aller unbekanntener Größen ermittelt. Die Kommunikation zwischen dem Simulationsrechner und den Prüfstandstufen sowie dem Drehmomentsensor ist hergestellt. Bevor mit der Simulation begonnen werden kann, muss eine Referenzfahrt für Initialisierung des n-Übergangs des Drehgebers einprogrammiert werden. Ansonsten müsste es nach jedem Einschalten der Endstufen manuell durchgeführt werden. Dafür wird erst ein Motor in den Open-Loop Modus gebracht, wobei er über eine ganze Umdrehung macht bis er stoppt. In dieser Zeit wird die Lage des n-Kanals festgestellt. Sobald dieses Procedere abgeschlossen ist, macht der zweite Motor das gleiche. Nach dieser Initialisierungsphase kann die Simulation beginnen.

Wie im Kapitel 3 behandelt kann das E-Bike in drei Modi angesteuert werden und zwar im Gas-, Drehmoment- und Trittfrequenz-Modus. Bei den zwei letzten ist eine Reproduktion der Fahrstrecke in einer Simulation nur bedingt möglich, da das Moment vom Fahrer gemessen oder aufwändig berechnen werden müsste. Somit wird es im Gas-Modus gefahren und dabei werden die Daten aufgenommen. Die anderen Modi sind eine Erweiterung des ersten.

Vor der Fahrt schließt man ein Notebook über USB-Schnittstelle an die Landungsbrücke an. Dieser speichert die aufgenommenen Daten im CSV-Format ab. Es werden drei Parameter aufgezeichnet, der zeitliche Verlauf, das Ziel-Moment und die aktuelle Geschwindigkeit. Diese Datei wird am Prüfstand von dem Simulationsprogramm aufgerufen und deren Werte im internen Speicher abgelegt. Es folgt eine Verarbeitung der Informationen. Das Moment wird entsprechend der Gleichung 5.4 umgerechnet und die Geschwindigkeit mit der Polpaarzahl dividiert um auf Umdrehungen pro Minute zu kommen.

Jedem aufgenommenen Parameter wird ein Zeitstempel zugeschrieben. Dadurch kann die Abtastung ermittelt werden. Somit ist eine Überführung der Werte auf einen gleich langen Vektor möglich. Bevor dies passiert wird die Aufnahme entsprechend gefiltert und interpoliert. Das ist vor allem bei dem Geschwindigkeits-Parameter nötig, weil die Werte von einem Sensor kommen und ein gewisses Rauschen mit sich bringen.

Danach werden die Werte geplottet um eine Begrenzung der Simulation festzulegen. Das ist erforderlich, da das E-Bike zur Zeit der Fertigstellung dieser Arbeit noch über keine Rekupe-rationseinheit verfügt und somit kein negatives Moment aufnehmen bzw. elektrisch bremsen kann. Somit wird es anstatt mit dem Motor, traditionell mit der Bremse gebremst. Aus diesem Grund wird nur der Bereich untersucht, bei dem das Last-Moment positiv ist. Die Grenzen werden je nach Messung manuell eingestellt.

## 6. Test

Im folgendem Abschnitt wird die Simulation samt dem Messverhalten betrachtet. Alle notwendigen Randbedingungen werden festgelegt und beschrieben. Darüber hinaus wird die Messwiederholgenauigkeit untersucht. Zum Schluss folgt eine Durchführung und Auswertung anhand einer Beispielmessung.

Randbedingungen an die Simulation:

- Der Messbereich ist manuell einzugrenzen
- Die  $k_t$ -Konstanten sind individuell für das jeweilige Setup einzusetzen
- Je nach Fahrmodus ist die Umrechnung der Drehmomente unterschiedlich
- Vor jedem Einschalten des Prüfstands ist eine Referenzfahrt durchzuführen

### 6.1. Messstörgrößen

Es werden zwei mögliche Störfaktoren untersucht, die bei einer Messung auf dem Prüfstand sich auswirken bzw. auftreten können. Einmal bei der Regelung der Endstufe vom Soll- auf den Ist-Wert. Dann bei den Sensorsignalen die analoge Werte in Digitale umwandeln, dort kann eine nicht ausreichende Auflösung, Genauigkeit oder Aktualisierungsrate sich auf die Simulation negativ auswirken.

Das Messverhalten wird es in Hinsicht auf die aufgenommene Parameter untersucht. Es wird die Drehzahl und das Moment für zwei unterschiedliche Belastungsfälle ermittelt. Die Messung wird einmal im Stillstand und bei einer konstanten Drehzahl bei einem konstanten Moment durchgeführt.

Die Abbildung 6.1 zeigt eine Drehzahlaufnahme bei einer Drehzahl von 0 rpm (Stillstand). Die Abtastpunkte sind durch blaue Quader gekennzeichnet. Alle von der, sich auf der Welle befindenden Sensor, durchgeführten Messungen wurden mit einer Frequenz von 10 Hz abgetastet.

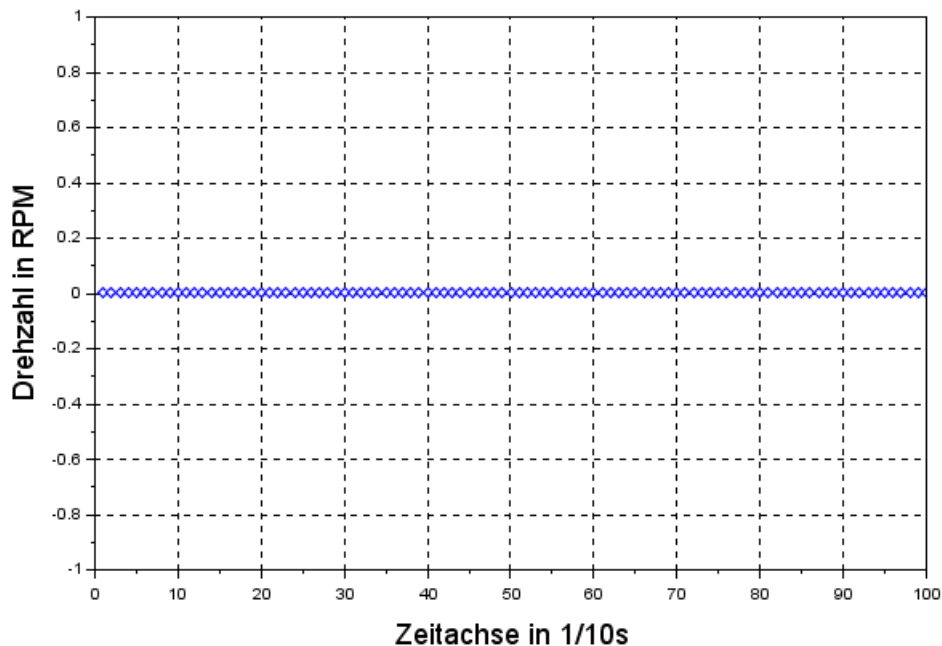


Abbildung 6.1.: Drehzahl am Sensor bei Ansteuerung = 0

Der Drehzahlsensor misst die Frequenz der Drehung mit einem Infrarot-Sendeempfänger unbekannter Herkunft. Über die digitale Schnittstelle wird die Drehzahlmessung mit einer Auflösung von 1 rpm (siehe Abbildung 6.2), Frequenz von 1 Hz sowie einer unbekanntem Genauigkeit ausgegeben. Diese Angaben sind laut Hersteller erst bei einer Drehzahl höher 80 rpm gültig.

Die Auflösung der Rpm-Aufnahme bei einer konstanten Drehzahl ist im Diagramm 6.2 zu beobachten. In der Messung ist eine Schwingung zwischen zwei ganzen Werten erkennbar. Die Abtastung ist 10 mal größer als die Ausgabe dieses Parameters über den Sensor. Zu beobachten ist, dass der tatsächlicher Wert zwischen der Schwingung des Signals liegt. Die Abtastfrequenz von 1 Hz konnte mit dieser Aufnahme ebenfalls bestätigt werden. Die kleine Ungenauigkeit in der Aufnahme von ca.  $+1/10$  des Signals für die Zeitachse ist dem Simulationsprogramm geschuldet, bei dem das Delay für die Abtastung abhängig von der Rechenpower eingestellt werden muss. Mit einer Timer-Funktion war das Problem ebenfalls nicht zu lösen.

In den meisten Messungen war jedoch ein Rauschen nicht feststellbar. Das Schwingverhalten kann nur bei sehr langsamen Drehzahlverläufen auftreten, dafür muss die Drehzahl zwischen zwei ganzen Werten liegen. Zu beobachten ist ebenfalls, dass die Richtung der Drehung nicht detektiert wird, wodurch der Wert der Geschwindigkeit immer positiv ist. Diese Spezifikation kommt durch die Anwendung eines optischen Infrarot-Sensors, der eine Markierung auf der Messwelle wahrnimmt und aus der Frequenz des Signals die RPM bestimmt.

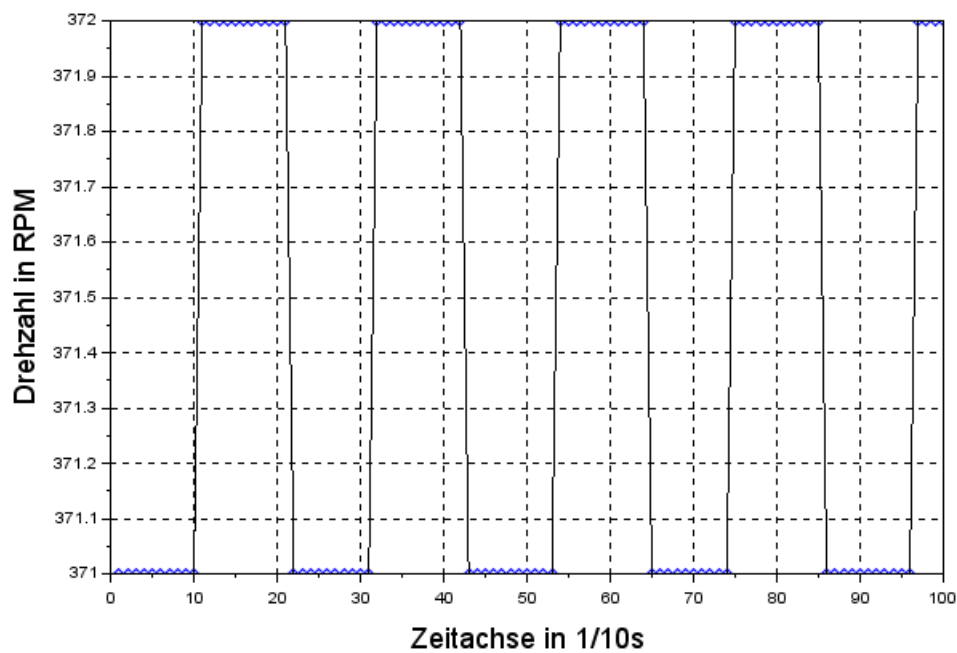


Abbildung 6.2.: Drehzahl am Sensor bei Ansteuerung  $\neq 0$

Unter der Abbildung 6.3 ist ein Drehmoment bei einem Ansteuermoment von 0 aufgenommen. Zu beobachten ist ein mittleres Moment von ca. 0,194 Nm. Es handelt sich dabei nicht um ein Offset sondern um, das auf der Messwelle, erzeugte Moment. Das liegt an der jeweiligen Positionen der beiden Motoren. Die Anzahl der Paare von magnetischen Polen ist gleich vier für jeden Motor. Sehr gut zu sehen ist die Auflösung des ADCs, welche der Auswertung nach  $3,77 \cdot 10^{-3}$  Nm beträgt.

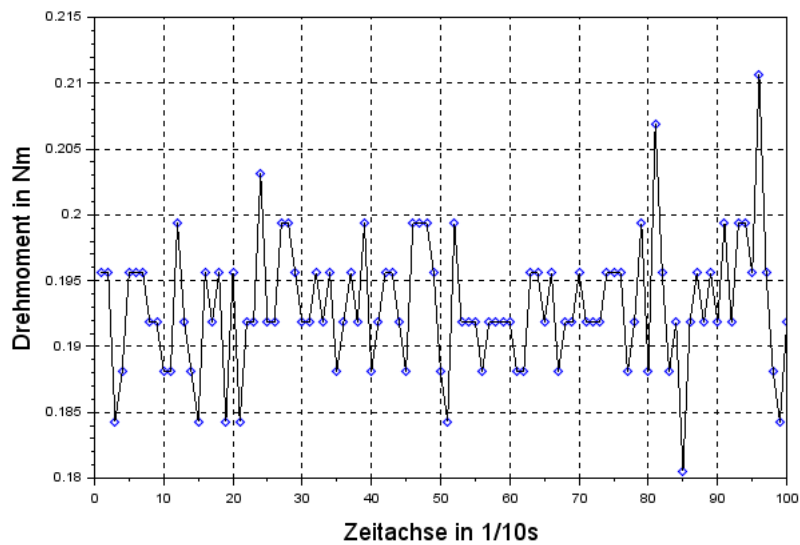
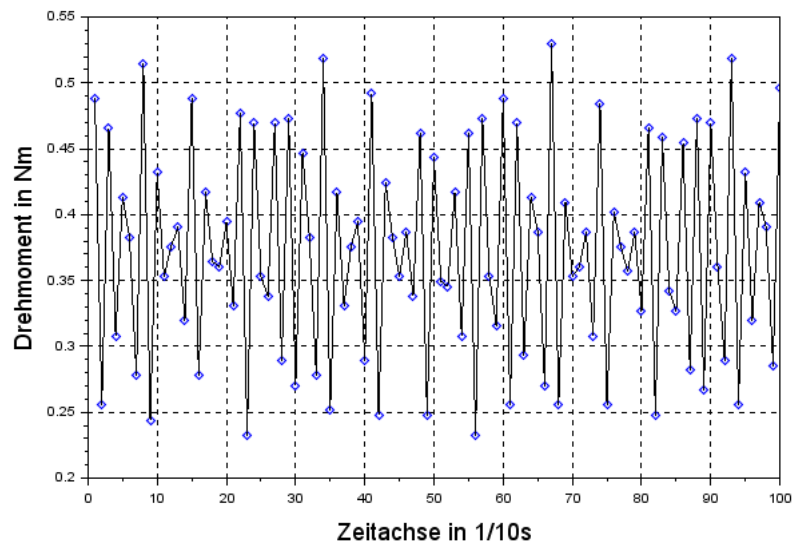


Abbildung 6.3.: Drehmoment am Sensor bei Ansteuerung = 0

Das Verhalten bei einem konstanten Moment größer Null ist im Diagramm 6.4 abgebildet. Damit sich die Welle drehen werden die Motoren mit unterschiedlichen Ansteuerungswerten angeregt. Der erste BLDC-Motor wird mit 4000 und der zweite mit 3000 Inkrementen angesteuert. Dabei entsteht ist ein mittleres Moment von ca. 0,37 Nm. Auf Grund der Drehung ist die Streuung auch hier zu beobachten. Die angegebene Abtastfrequenz liegt bei 101 Hz, wobei es in der Simulation mit 10 Hz abgetastet wird.

Abbildung 6.4.: Drehmoment am Sensor bei Ansteuerung  $\neq 0$

Für die Untersuchung der Streuung an der Endstufe ist ein Ist- sowie ein Soll-Moment im Diagramm 6.5 aufgeführt. Diese Werte sind in Inkrementen angegeben und vom PI-Stromregler und den verwendeten Shunt-Widerständen abhängig. Hier ist eine sehr kleine Streuung zu beobachten die irrelevant für die Simulation ist. Diese beträgt im Mittel -1,2 sowie einen Höchstwert von 263 und Kleinstwert von -209 Inkrementen bei dieser Aufnahme.

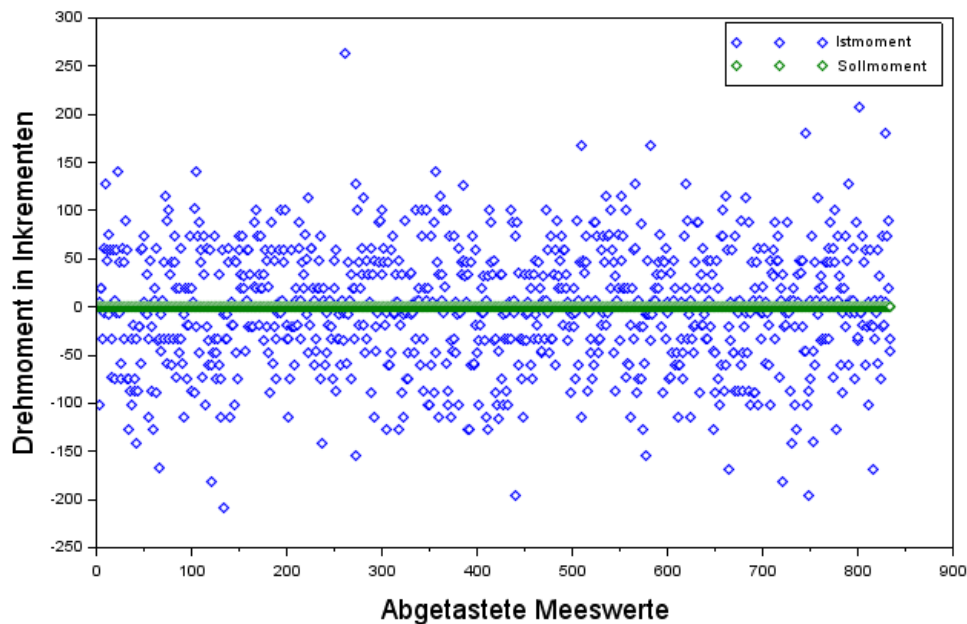


Abbildung 6.5.: Rauschen an der Endstufe

## 6.2. Untersuchung der Wiederholgenauigkeit

Es kann eine Abweichung in der wiederholten Simulierung stattfinden, da reale Hardware im System eingebunden ist. Mit der Untersuchung der Wiederholgenauigkeit wird eine Aussage getroffen wie gut das Zusammenspiel der Aktorik und der Sensorik ist. Es werden jeweils drei Messreihen aufgenommen und verglichen, die bildlich in 6.6 und 6.7 dargestellt sind.

Auf der Abbildung 6.6 wird eine Fahrstrecke drei mal simuliert und deren Drehzahl-Signale in eine Grafik gebracht. Das Drehzahlmessverhalten, wie im Kapitel 6.1 beschrieben, spiegelt sich bei einer realen Messung wieder. Im hohen Drehzahlbereich ist die Auflösung ausreichend, die Tastrate ist jedoch zu klein. Die Anzahl der Werte der Messung ist zu gering um diese ausreichend auswerten zu können. In diesem Fall gibt es die Möglichkeit das Signal aufzubereiten indem interpoliert und gefiltert wird. Diese Bearbeitung des Signals führt zu keiner Verbesserung da aufgrund der Tastrate die Werte fehlen und somit das Signal



verfälscht wird. Die Drehzahl-Messung mit dieser Methode nur für sich langsam ändernde Systeme empfehlenswert.

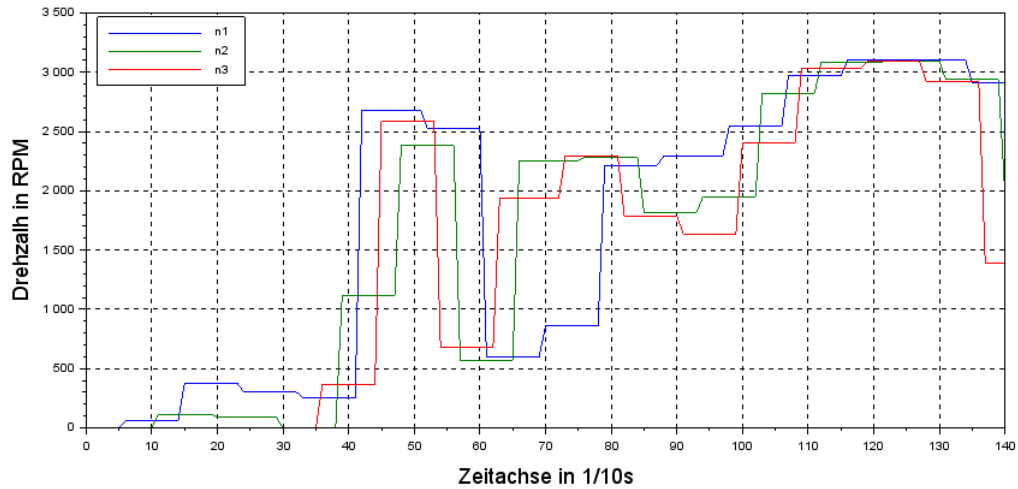


Abbildung 6.6.: Wiederholgenauigkeit der Drehzahl

Die zweite vom Sensor aufgenommene Größe ist das Drehmoment. Der Transducer ist prinzipiell für diese Art von Messungen konzipiert. Auf den ersten Blick ist eine deutlich höhere Auflösung und Abtastung im Vergleich zur Drehzahlgröße zu sehen. Auch die Wiederholgenauigkeit ist viel höher als bei der Drehzahlaufnahme. Die Messung des Moments ist mit einer guten Genauigkeit von  $\pm 0,25\%$  und recht hohen Auslösung durchführbar. Die einzigen beobachtbaren Unterschiede liegen somit an der realen Hardware.

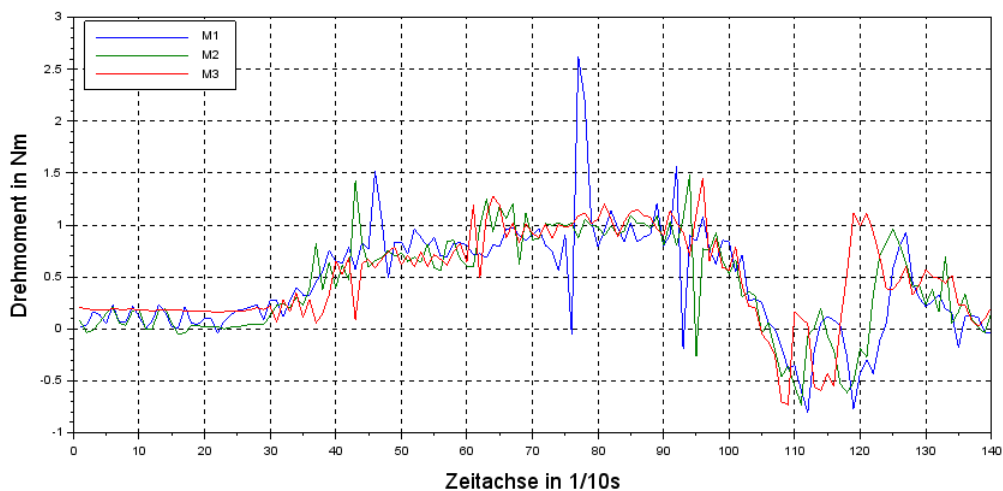


Abbildung 6.7.: Wiederholgenauigkeit des Drehmoments

### 6.3. Durchführung von Beispielmessung

Für eine Hardware-in-the-Loop-Simulation wird einem Prüfstandmotor ein Sollmoment des Fahrradmotors und dem zweiten ein Lastmoment, des aus den Fahrwiderständen kommenden Moments vorgegeben.

Zu erst wird das aus den, bei der Fahr ausgenommenen Daten das Lastmoment errechnet und in ein Drehmoment in Nm gebracht. Übereinander wird die Geschwindigkeit in km/h, Sollmoment des Antriebes und Lastmoment in Nm dargestellt. Aus diesen Informationen werden die Inkrementwerte für die Endstufen errechnet.

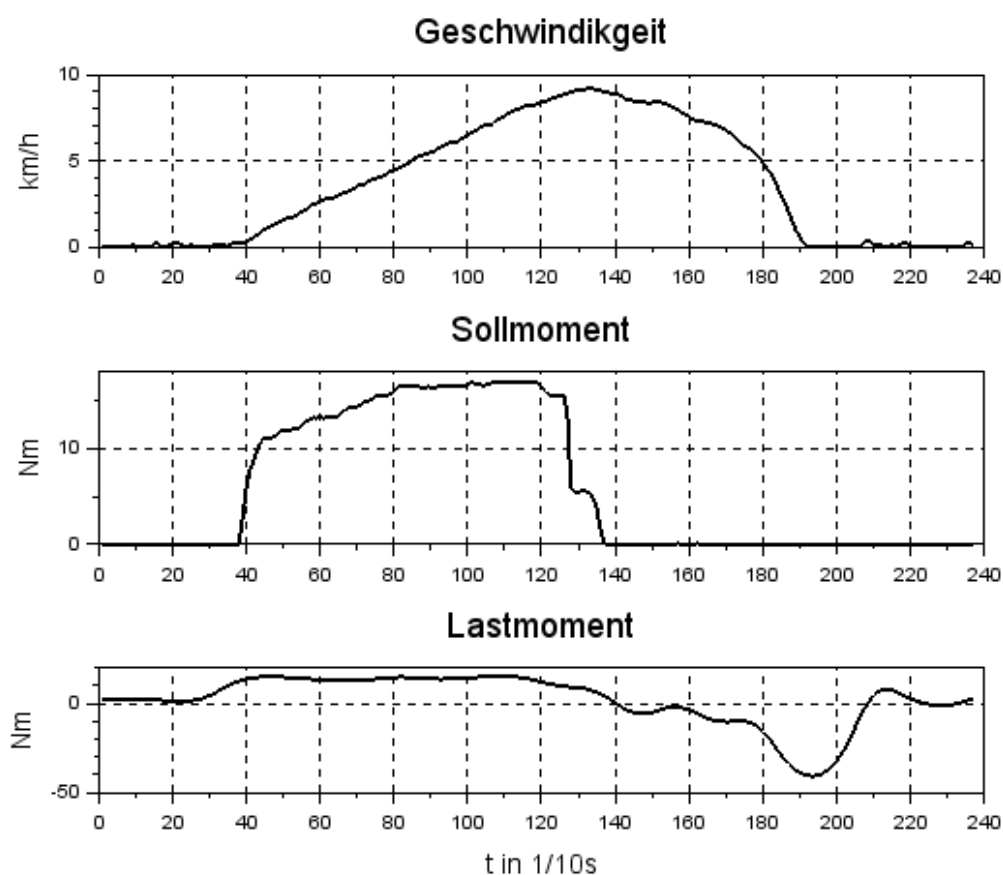


Abbildung 6.8.: Fahrstrecke

Laut den Simulationsanforderungen ist der zu simulierende Bereich einzugrenzen. Für die Beispielmessung ist dieser zwischen 0 und 140 auszuwählen. In diesem Bereich ist das Lastmoment positiv.

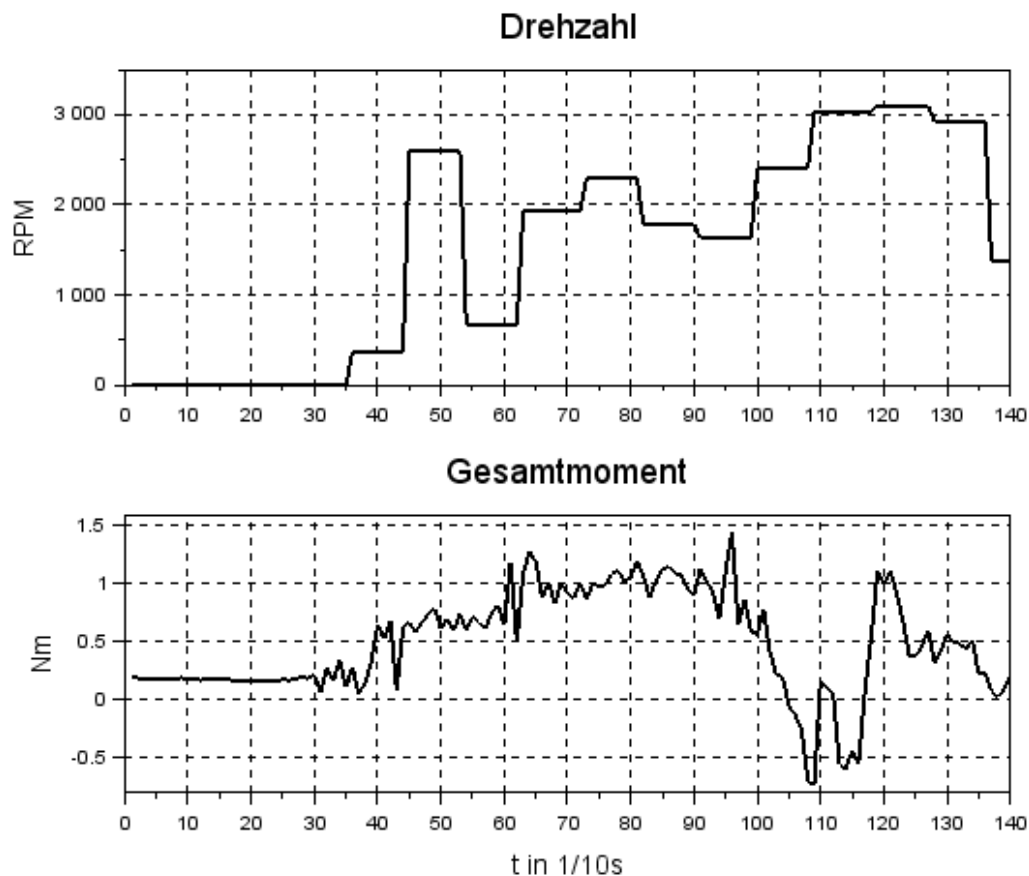


Abbildung 6.9.: simulierte Fahrstrecke

## 6.4. Auswertung der Messung

Die in der Abbildung 6.9 simulierte Fahrstrecke ist mit den realen, am Prüfstand aufgenommenen Werten abgebildet. Zu beobachten ist, dass das Gesamtmoment aus dem aktuellen Moment der simulierten Antriebes subtrahiert mit dem aktuellen Moment der Lastwiderständen besteht.

Bei der Aufnahme der Drehzahl ist nur der Betrag der RPM zu beobachten und nicht die Richtung, somit werden negative Bereiche als positiv dargestellt. In dieser Simulation ist die Drehzahl zwischen 35 und 55 [1/10s] negativ. Das kommt durch die Bearbeitung des Lastensignals zu Stande. Der größte Teil dieses Moments kommt durch den Beschleunigungswiderstand, der gefiltert und anschließend differenziert wird. Somit ist eine Verschiebung des Signals gegeben. Das Lastmoment kommt vor dem tatsächlichen Antriebsmoment, was die negative Drehrichtung an der Stelle erklärt.

## 7. Fazit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Antriebselektronik in Hinsicht der Effizienz und des Ansprechverhaltens zu untersuchen und die Unterschiede in der Parametrisierung abbilden zu können. Dafür werden Messungen am Demonstrator durchgeführt, die vom Rechner aufgenommen und anschließend für die Simulation aufbereitet werden. Die eigene Simulation findet am Prüfstand mit einem Maschinensatz statt. Begleitend dazu werden Werte von einem Sensor, der sich zwischen zwei Motorwellen befindet, aufgenommen.

Es stellt sich die Frage wie genau die Messung ist und welche Schlussfolgerung getroffen werden kann. Es gibt zwei Parameter die aus der Simulation resultieren - die Drehzahl und das Gesamtmoment. Über diese kann außerdem auf die Leistung geschlossen werden und somit der Wirkungsgrad bestimmt werden.

In dieser Arbeit hat sich vor allem herausgestellt wie unterschiedlich der Prüfstand- und der Fahrradmotor ist. Sie haben einen unterschiedlichen Momentverlauf, der den Vergleich nur schwierig gestaltet. Zu den Unterschieden gehören außerdem die Art der Messung die auch einen gewissen Fehler beinhaltet sowie die Shunt-Widerstände an den Endstufen, die der Leistung der Motoren angepasst werden mussten. Alle Faktoren führen zu kleinen Unterschieden in der Umrechnung sowie Messung und Auswertung.

Für eine erfolgreiche Simulation würde ich persönlich vorschlagen andere Motoren zu verwenden, die den Spezifikationen des Antriebsmotors am Fahrrad näher kommen. Die verwendeten Motoren wurden für die Anforderung an die Arbeit aus dem Grund benutzt, dass es die einzigen, auf die Größe bezogen, genormten BLDC-Motoren in dieser Leistungsklasse mit vorhandenen Winkelgebern sind.

Die Messung ist desto trotz vernehmbar und der Verlauf des Moments korrekt. Leider ist die Aufnahme der Drehzahl nicht ausreichend schnell und genau um auf kleine Unterschiede der Regelung schließen zu können. Deshalb muss unbedingt über ein anderes Messprinzip als das derzeitige entschieden werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] *Balloonbikes*. <https://www.schwalbe.com/de/balloonbikes.html>
- [2] *IEEE 754*. [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=IEEE\\_754&action=history](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=IEEE_754&action=history)
- [3] *Pedelec*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Pedelec>
- [4] CİCAK, Alena: *Solarstrom für E-Bikes im Allgäu, Auslegung einer Inselanlage mit Speicher sowie Erstellung eines Marketingkonzeptes*. Januar 2014
- [5] H. J. SCHLICHTING, U. B.: *Physik des Alltags am Beispiel der Energetik des Fahrrads*. (1983)
- [6] HERZOG, Simon: *Fahrwiderstand*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Fahrwiderstand>
- [7] KIRCHNER, Andreas: *Stroemungswiderstandskoeffizient*. <http://www.cw-wert.de>
- [8] LÜCK, Daniel: *Simulation des Antriebssystems auf Basis von Elektromotoren in mobilen Anwendungen*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, Mai 2013
- [9] PIVIT, Rainer: *Die Fahrwiderstände in Formeln*. (1990), Februar. <http://lustaufzukunft.de/pivit/aero/formel.html>
- [10] PLATTER, Martin: *Von Krisen und Tüftlern*. (2015). <http://www.nzz.ch/spezial/e-bike/von-krisen-und-tueftlern-1.18511563>
- [11] RAUCH, Wasilis von: *Sensorik: Bewegungs- oder Kraft-/Drehmomentsensor? was ist besser?* (2011). <http://http://www.eradhafen.de/2011/03/welcher-sensor-ist-der-beste>
- [12] WEBER, Patrick ; LEIBBRAND, Tim ; LEONETTI, Pietro: *Elektromobilität-Das E-Bike-ein neuer Trend?* GRIN Verlag München, Deutschland, 2012

# A. Anhang

## A.1. Benutzte Software

Benutzte Software bei der Erstellung dieser Arbeit		
Programm	Beschreibung	Version
<b>am PC</b>		
Windows	Betriebssystem	10-64Bit Home
Scilab	Simulationssoftware	5.5.2-32Bit
Transducer Control	Software für den Drehmomentsensor	V3
HTerm	Terminal-Programm für serielle Schnittstelle	
TeXstudio	Editor für Erstellung von LaTeX-Dokumenten	2.11.0
MS Excel	Tabellenkalkulationsprogramm	2016
MS Vision	Visualisierungsprogramm	2016
GNU Octave	Mathematik- und Plotprogramm	4.0.3
TMCL-IDE	IDE von TRINAMIC	3.0 v5.6.0
<b>Online</b>		
pdfresizer.com	PDF-Bearbeitungstool	
scholar.google.de	Bibliographie für BibTeX	

Tabelle A.1.: Benutzte Software

## A.2. Parameterwerte

Fahrwiderstände			
Masse Pedelec/Fahrer	142 kg	Erdanziehung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Stirnfläche Pedelec/Fahrer	0.63 m <sup>2</sup>	Luftwiderstandsbeiwert	1,2
Rollwiderstandsbeiwert	0.00369	Luftdichte	1.2 kg/m <sup>3</sup>
Raddurchmesser	26 Zoll		

Tabelle A.2.: Parameterwerte

### A.3. Lastenradmotorparameter

Model	Nennleistung	Nenndrehzahl	kV	Nennspannung	Sensoren
Grace M03p	1kW	250-300 rpm	6	43.2V	Moment, Drehzahl

Tabelle A.3.: Lastenradmotorparameter

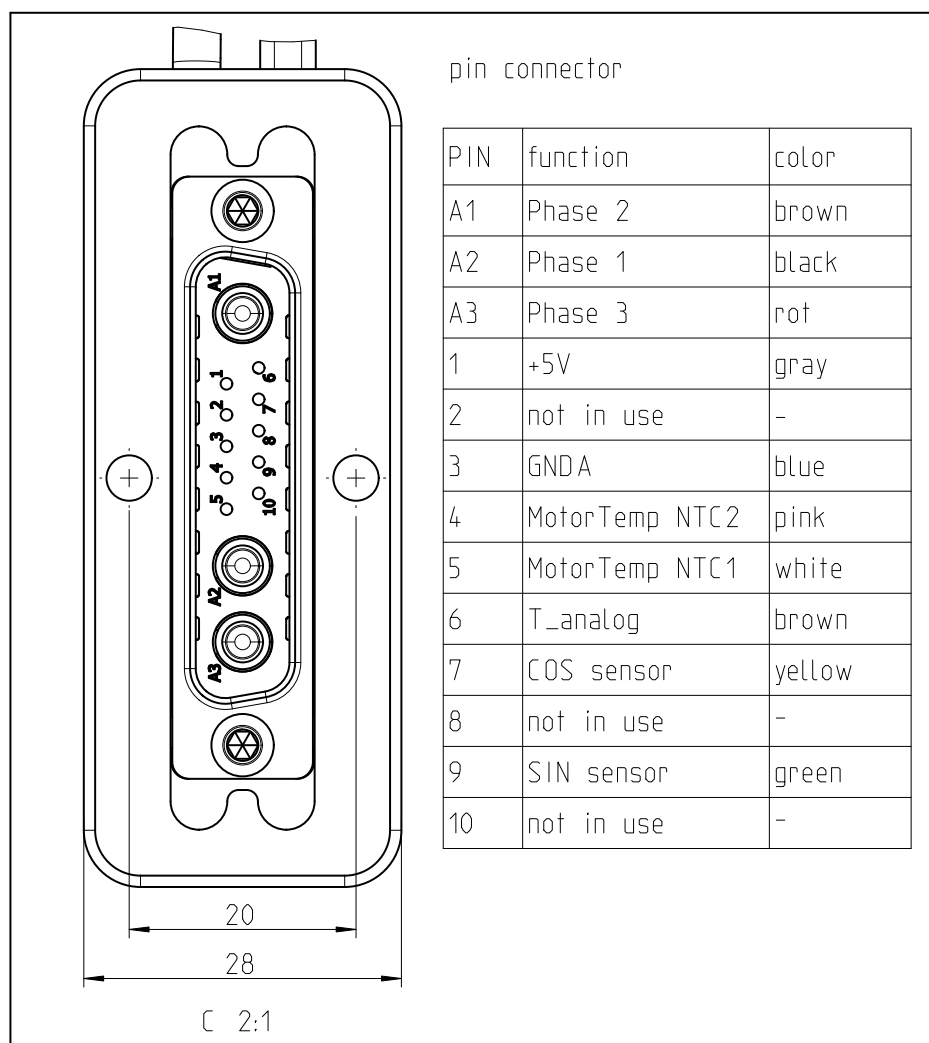


Abbildung A.1.: Motorstecker

## A.4. Beschaltung am Lastenrad

<b>Beschaltung am Lastenrad</b>		
<b>Ausgang</b>	<b>Adapter</b>	<b>Eingang</b>
<b>Drehimpulssensor</b>		
GND (Schwarz)		GND
V+ (Braun)		5V
Signal (Gelb)		Hall_ux + Hall_v
<b>Gashebel</b>		
GND (Schwarz)		GND
V+ (Blau)		5V
Signal (Weiß)		AENC_N
<b>Bremse</b>		
V+ (Rot)		5V
GND (Schwarz)		Hall_wy
<b>Motor</b>		
GND(Blau)		GND
V+(Grau)		5V
cos (Gelb)		AENC_UX
sin (Grün)		AENC_V
T_analog		AENC_WY
<b>Akku</b>		
(1) kill_low (Rot)	(1) (Grün) -> (Grün/Gelb)	Schalter
(5) kill_high (Blau)	(6) (Blau) -> (Blau)	Schalter
(2) wake_up (Weiß)	(2) (Weiß) -> (Weiß)	Taster
(6) GND (Braun)	(7) (Braun) -> (Braun/Schwarz)	Taster
(3) CAN_high (Grau)	(3) (Grau) -> NC	
(7) CAN_low (Lila)	(8) (Lila) -> NC	
(4) Charge_sense (Grün)	(5) (Gelb) -> NC	

Tabelle A.4.: Beschaltung am Lastenrad



## A.5. Prüfstandmotorparameter

Model	Rated Voltage (VDC)	Rated Torque (oz-in)	Rated Current (A)	Torque Constant (oz-in/A)	Motor Efficiency	Back EMF Voltage (V/kRPM)
BLK322D-48V-3000	48	378	23	13.45	86%	8.66

Tabelle A.5.: Prüfstandmotorparameter

## A.6. Beschaltung am Prüfstand

Motorleitung	Kabelkennzeichnung	Eingang am Board
<b>Feedback line (Hall)</b>		
Vcc	Red	5V
GND	Blue	GND
Hall A	Grey	Hall_ux
Hall B	Green	Hall_v
Hall C	White	Hall_wy
<b>Drehgeberleitung</b>		
A	Orange	ENC1_A
B	Green	ENC1_B
I	Red	ENC1_N
5V	Yellow	5V
G	Brown	GND

Tabelle A.6.: Beschaltung der Motorleitungen am Prüfstand

## A.7. Akkuparameter

Parameter	Value
Model	Li-I 03 1410-13
Configuration of Cells	14S 10P
Nominal Capacity	1456 Wh
Weight	8.7 kg
Volume	7.0 l
L x W x H (outside)	368 x 217 x 88 mm
Operating Voltage	35 - 58,8V
Nominal Voltage	51,1 V
System Voltage	48,0 V
Current (continuous)	25A
Current (short Term 30s)	30A
Current (Impuls 3s)	60A
Protection Class	IP 65
Operation Cycles	1.000 typical
Operating Temperature (Charging)	0°C to + 45°C
Operating Temperature (Discharge)	-20°C to + 60°C
Bus	CAN 2.0

Tabelle A.7.: Akkuparameter

Stecker Merkmale:

- Stromlose Kontaktierung
- Freischaltung der Powerleitungen erst nach Schließen der Kill-Switch und Startleitung
- Je 2 Powerkontakte (max. 60A)
- CAN Kommunikation (je nach Applikation und Ladegerät optional)
- Sicherheits-Schalter (muss geschlossen sein)
- Start-Schalter (muss impulsartig geschlossen sein <0,2sek, >1sek, >6sek)
- Wasserdicht vergossen
- Steckzyklenzahl > 10.000



## B. Anhänge auf der beigelegten CD

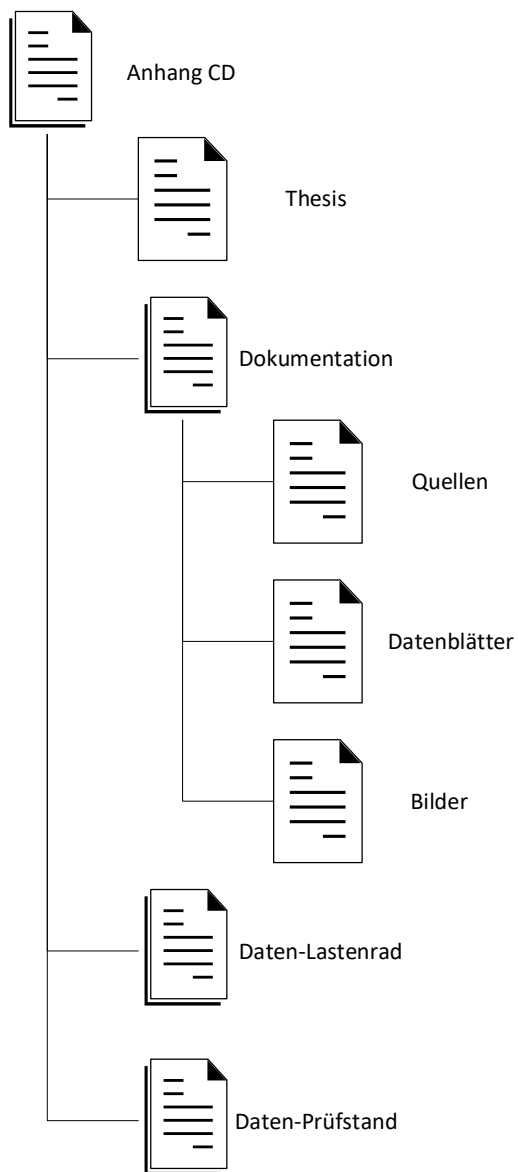


Abbildung B.1.: Anhang CD

# Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 6. Februar 2017

Ort, Datum

Unterschrift