



ELEKTRIFIZIERUNG, REGELUNG UND SIMULATION EINES
SKALIERTEN FAHRZEUGES

DIPLOMARBEIT

VON

ROLAND NAUTA

24. OKTOBER 2011

BEGUTACHTER:

DIPL.-ING. DR.TECHN. UNIV.-DOZ. DANIEL WATZENIG

BETREUER:

DIPL.-ING. DR.TECHN. ALLAN TENGG

Das virtuelle Fahrzeug – Area E
Technische Universität Graz
Institut für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung

Kurzfassung

Modellierung und Simulation sind heutzutage wichtige Schlagworte in der Entwicklung, Verifikation und Validation von Systemen jeglicher Art. Mit realitätsnahen Simulationsmodellen werden teure Prototypentests mehr und mehr überflüssig und so Entwicklungszeit und Entwicklungskosten gesenkt. Mit der erhöhten Einbindung von Simulationsumgebungen in den Entwicklungsprozess steigt auch der Bedarf, virtuelle Modelle zu testen und diese direkt mit der Realität zu vergleichen (*Hardware in the Loop*).

Der erste Teil dieser Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem mechanischen und elektrischen Aufbau eines im Maßstab 1:5 skalierten Elektrofahrzeuges. Aufbauend auf dem Prinzip des *Conversion Design* basiert die Idee auf der Elektrifizierung eines VKM-Fahrzeuges. Die Komponenten des vorhandenen benzinbetriebenen Modellautos, wie Fahrzeugchassis, Radaufhängung und Getriebe, können durch geringen Aufwand für das Elektrofahrzeug verwendet werden. Um ein geeignetes System zu erstellen, werden die Vor- und Nachteile verschiedener möglicher Komponenten diskutiert und nach Auswahl geeigneter Teile zu einer funktionierenden Hardware zusammengesetzt.

Die gesamte, am Fahrzeug angebrachte Elektronik, hat mehrere Aufgaben. Zum einen ermöglicht sie die Kommunikation mit einem PC über einen FlexRay-Bus. Durch diesen werden Fahrbefehle wie Geschwindigkeitsvorgaben an das Fahrzeug weitergegeben. Ein ebenso skaliertes Rollenprüfstand kann die Hinterachse mit einem positiven oder negativen Drehmoment beaufschlagen (Bremsen oder Antreiben). Das Fahrzeug reagiert auf diese äußeren Einflüsse und kann auf eine konstante Geschwindigkeit regeln. Positive Momente, welche durch simuliertes Abbremsen oder Bergabfahrten entstehen, werden aktiv gebremst, die Bremsenergie kann durch die Rekuperationsfunktion zurück in den Akkumulator gespeist werden. Zum anderen übernimmt die Elektronik die für die Temperaturmessung, Strommessung, Spannungsmessung, und Drehzahlmessung notwendigen Verstärker- und Umwandlungsaufgaben.

Über die Bedienoberfläche können verschiedene, genormte Fahrzyklen (NEDC, Europa City. . .) gestartet werden, um die charakteristischen Messwerte während des Ablaufs aufzuzeichnen.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschreibt sämtliche Schritte, um ein virtuelles Modell des skalierten Fahrzeuges erstellen zu können. Die einzelnen mechanischen und elektrischen Komponenten werden vermessen und aus den Ergebnissen werden die zur Modellierung notwendigen Parameter extrahiert. Durch die kalibrierte Simulation können verschiedene Werte, wie Motorleistung und Akkumulatortension während eines Fahrzyklus berechnet werden. Der Vergleich mit der realen Messung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Simulation. Somit kann die Simulation als Ersatz für eine reale Messung dienen.

Abstract

Today, modelling and simulation are important key terms in the development, verification and validation of systems of any kind. Through simulation models, which are close to reality, tests with prototypes become more and more redundant, which may lead to a reduction of time and costs in the developmental process. As a result of the increasing integration of simulation environments in the developmental process, the necessity of testing virtual models and comparing them directly to reality (*Hardware in the loop*) also increases.

The first part of this diploma thesis deals with the mechanical and electrical construction of a 1:5 scaled electric vehicle. The idea is based on the electrification of a vehicle with a combustion engine (*Conversion design*). The components of the existing scaled car with a petrol powered engine, like chassis, wheel suspension and transmission, can easily be used for the electric vehicle. In order to design a suitable system, the advantages and disadvantages of the possible components have to be discussed. As soon as the appropriate parts have been selected, a functional hardware has to be designed.

All electronic parts placed on the vehicle have several functions. First of all, they allow the communication between the vehicle and a computer through a FlexRay-bus. Using this communication, driving commands as, for instance, velocity can be send to the vehicle. A roller, which is also scaled, can control a positive or negative torque to the rear axle (breaking or driving). The vehicle is therefore able to control a constant velocity, despite these external influences. A positive torque is produced by simulated breaking or driving downhill. While controlling the velocity by breaking, the break energy can be reloaded into the battery (recuperation function).

Secondly, the electronic is responsible for measurement amplifying and the conversion of temperature, current, voltage and rotary speed signals.

With the graphical user interface, different standardized driving cycles (NEDC, Europe City. . .) can be started in order to save the characteristic measurements during the cycle.

The second part of this thesis deals with the description of the necessary steps in order to generate a virtual model of the scaled electric vehicle. The mechanical and electrical parts are measured and with the results obtained, the parameters required for modelling are extracted. By means of the calibrated simulation, it is possible to calculate different values like motor-power and battery-voltage during a driving cycle. As the comparison of the real measurement and the simulation shows very good conformity, the simulation is an alternative to a real measurement.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

Unterschrift

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

signature

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Elektrifizierung in der Automobilindustrie	6
1.2	Simulation – HIL	6
1.3	Die Co-Simulation	7
1.4	Motivation	7
2	Aufgabenstellung	8
2.1	Mechanischer, elektrischer Umbau	8
2.2	Ansteuerung, Regelung, Messung	8
2.3	Simulation	9
3	Literaturrecherche	10
3.1	Elektrischer Traktionsantrieb	10
3.1.1	Elektrische Maschinen	11
3.1.2	Energiespeicher	12
3.1.3	Regler	15
3.1.4	Leistungselektronik – Umrichter	16
3.2	Rekuperation	17
3.2.1	Methoden der Rekuperation	18
3.3	Messensoren	22
3.3.1	Geschwindigkeitsmessung	22
3.3.2	Temperaturmessung [Ele03]	23
3.4	FlexRay-Bus [Fle09]	23
3.5	Grundlagen der Simulation	24
3.5.1	Physikalische Grundlagen und Kinematik	24
3.5.2	Parametrisierung von permanentmagneterregten Gleichstrommaschinen [Hun04]	28
4	Implementierung – Design	34
4.1	Auswahl der elektrischen Komponenten	34
4.1.1	Elektrische Maschine	34
4.1.2	Energiespeicher	34
4.1.3	Messensoren	34
4.1.4	Microcontroller	35
4.2	Mechanischer Umbau, Elektrifizierung	35
4.2.1	Motorhalterung und Getriebe	35
4.2.2	Befestigung Akkumulatoren und Reglerplatine	35

4.2.3	Wasserkühlung	37
4.3	Entwurf und Implementierung des Fahrzeug-Reglers	37
4.3.1	FlexRax-Node [Pat10]	38
4.3.2	DC/DC-Umsetzer	39
4.3.3	Strom- und Spannungsmessung	40
4.4	Software	41
4.4.1	Regler	41
4.4.2	FlexRay-Interface [Sch11]	43
4.4.3	Überwachung von Strom und Spannungen	43
4.4.4	Thermische Überwachung – Kühlkreislauf	44
5	Messergebnisse	45
5.1	Kennwerte der Betriebsmodi	45
5.1.1	Antrieb	45
5.1.2	Rekuperation	45
5.2	Eigenschaften der Regelung	48
5.3	Fahrzyklus	50
6	Simulation	52
6.1	Simulationsaufbau	52
6.1.1	Elektrischer Motor	52
6.1.2	Akkumulator	54
6.1.3	Fahrzeug	56
6.1.4	Getriebe	57
6.1.5	Fahrzyklus	59
6.1.6	Umsetzer	60
6.2	Parametrisierung	61
6.2.1	Elektrischer Motor	61
6.2.2	Akkumulator	65
6.2.3	Fahrzeug	68
6.2.4	Getriebe	69
6.2.5	Fahrzyklus	70
6.2.6	Umsetzer	70
6.3	Simulationsergebnisse	72
6.3.1	Einstellung I	72
6.3.2	Einstellung II	74
6.4	Diskussion	76
6.4.1	Gegenüberstellung	76
6.4.2	Abweichungen	76
6.4.3	Rekuperation	78
7	Zusammenfassung	79
7.1	HILCOS	79
7.2	Zukünftige Erweiterungen	80
7.2.1	Von der Simulation zur Co-Simulation	80
7.2.2	Akkumulatorstromzähler	80
7.2.3	Einbau moderner Komponenten	80

8 Conclusio	81
Literaturverzeichnis	82
Abbildungsverzeichnis	84
Tabellenverzeichnis	86
Anhänge	87
A Überblick der Fahrzeugbestandteile	87
B Schaltpläne	89

Abkürzungen

Co-Simulation	Coupled Simulation
HIL	Hardware in the Loop
HILCOS	Hardware in the Loop Co-Simulation
ICOS	Independent Co-Simulation
VKM	Verbrennungskraftmaschine
SOC	State of Charge
GM	Gleichstrommaschine
DC	Duty-Cycle
PWM	Pulse Width Modulation
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
IR	Infrarot
FET	Feldeffekttransistor

Verwendete Symbole

m	Masse [kg]
r	Radius [m]
F	Kraft [N]
M	Drehmoment [Nm]
v	Geschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]
A	Fläche [m^2]
J	Trägheitsmoment [kgm^2]
U	Spannung [V]
I	Strom [A]
P	Leistung [W]
η	Wirkungsgrad $[-]$
R	Widerstand [Ω]
L	Induktivität [H]
C	Laderate $[-]$
h	Schrittweite [s]
k	Rechenschritt $[-]$
ω	Winkelgeschwindigkeit [$\frac{rad}{s}$]
n	Drehzahl [$\frac{1}{s}$]
c	Maschinenkonstante [Vs]
ψ	magn. Erregung [Wb]

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Elektrifizierung in der Automobilindustrie

Mobilität ist ein Luxus, auf den der Mensch des 21. Jahrhunderts nicht mehr verzichten will. Nach nun 125 Jahren Automobilgeschichte sind 31% des weltweiten Energiebedarfs dem Sektor *Transport* zuzuschreiben [Gös08], davon entstehen 58% rein durch den PKW-Verkehr. Aufgrund der akzeptablen Ölpreise der vergangenen Jahrzehnte war die Verbrennungskraftmaschine das führende Antriebssystem für Fahrzeuge sämtlicher Art. Durch intensive Forschung und den immer höher werdenden Einsatz von elektronischen und mechatronischen Systemen ist aus dem einfachen Ottomotor eine komplexe Leistungsmaschine mit niedrigem Verbrauch geworden. Jedoch hat diese Technologie ihre Grenzen, sie wird immer abhängig von einem begrenzten Rohstoff sein.

Ressourcenknappheit, Rohölpreise und Umweltverschmutzung sind die Hauptgründe, um auf ein Fahrzeugkonzept zu wechseln, welches mit erneuerbaren Energieformen und somit nachhaltig und umweltfreundlich betrieben werden kann. Vorteile wie der hohe Wirkungsgrad oder der fast komplette Verzicht auf aufwendige Getriebestufen und Kupplung machen den Elektromotor zum idealen Antrieb für diese neuen Fahrzeuge. Dabei ist die Idee des Elektroautos nicht ganz neu, bereits 1888, also zwei Jahre nach dem Erscheinen des ersten Automobils von Carl Benz, wurde das erste Patent für ein Elektroauto angemeldet. Das Problem damals ist dasselbe wie heute: die geringe Reichweite aufgrund der viel kleineren Energiedichte von elektrischen Energiespeichern gegenüber fossilen Brennstoffen. Die veraltete Bleizelle wurde durch moderne Lithium-Polymer-Zellen, Brennstoffzellen und Supercaps ersetzt, Rekuperation (*Rückladung*) und der Einsatz von Hilfsaggregaten („*Range Extender*“) machten in den vergangenen Jahren einige Defizite wett.

In Zukunft wird jedoch noch viel Forschung und Entwicklung notwendig sein, um das Elektroauto in Leistung und Reichweite auf das Niveau eines Fahrzeuges mit Verbrennungskraftmaschine zu stellen.

1.2 Simulation – HIL

Die Implementierung mehrerer Steuergeräte, unzähliger Sensoren, Aktuatoren und mechatronischer Komponenten in ein Fahrzeug macht es fast unmöglich, alle möglichen Zustände real zu testen, um die sichere Funktion zu gewährleisten. Die Lösung sind möglichst realitätsnahe, virtuelle Modelle der einzelnen Komponenten, welche über geeignete Simulationsplattformen (z.B. MATLAB oder Modelica), die Berechnung unterschiedlichster Szenarien

möglich machen. Durch den Einsatz von Simulationen können Entwicklungszeit und Entwicklungskosten gesenkt werden, da auf den Bau von teuren und aufwendigen Prototypen teilweise verzichtet werden kann.

Eine bestimmte Variante der Simulation ist die *Hardware in the Loop* (HIL). Dabei wird eine reale Hardware und ein virtuelles Modell dieser parallel mit den selben Eingangsdaten gespeist. Die Ausgangsdaten der Hardware werden in das Modell zurückgelesen und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen (d.h. der HIL-Simulator sollte echtzeitfähig sein). Stimmen die Ergebnisse nicht überein, muss das Modell neu kalibriert oder ersetzt werden. Bei einer Übereinstimmung kann der HIL-Simulator für die Validierung und Entwicklung eingesetzt werden, z.B. um Systemgrenzen zu berechnen, ohne das Zielsystem zu beschädigen [Rot04].

1.3 Die Co-Simulation

Um komplexe Systeme als Modell abzubilden, reichen einfache Modellplattformen nicht mehr aus. Diese sind meist nur auf einen physikalischen Bereich ausgelegt und nicht fähig multiphysikalische Probleme darzustellen. In der Fahrzeugtechnik findet man solche Systeme in Form von Mechatronik bis hin zur Auslegung eines Konzeptes *Mensch-Fahrzeug-Umgebung*. Für solche Problemstellungen werden Co-Simulationsplattformen eingesetzt. Diese sind in der Lage Teilsysteme verschiedener physikalischer Gebiete zusammenzuführen und zeitlich zu synchronisieren.

1.4 Motivation

Die Motivation, eine Diplomarbeit zu diesem Thema zu verfassen, entstand aus dem Projekt HILCOS (*Hardware in the Loop Co-Simulation*). Die Idee dieses Projektes ist der vollständige Aufbau eines Demonstrators zum Verifizieren von Co-Simulationsergebnissen. Der Aufbau soll aus einem skalierten Fahrzeug mit geregelter Elektromotor und einem ebenso maßstabsgetreuen Rollenprüfstand, welcher verschiedene Betriebsmodi simulieren kann, bestehen. Zusätzlich wird am Fahrzeug eine Wasserkühlung angebracht, um auch thermischen Probleme zu simulieren.

Das Fahrzeug und der Rollenprüfstand werden separat angesteuert und geregelt, um verschiedene Fahrzyklen, wie z.B. den *Europa City*, möglichst real abzufahren, aber auch, um direkte Fahrbefehle eines Benutzers auf die Hardware zu übertragen.

Parallel dazu soll die Co-Simulation laufen, um die tatsächlichen mechanischen, elektrischen oder thermischen Messwerte mit den errechneten Werten der Simulation zu vergleichen. Ziel ist, zu zeigen, dass die Co-Simulation ein Ersatz für reale Messungen sein kann.

Kapitel 2

Aufgabenstellung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf dem kompletten Aufbau und der Inbetriebnahme eines skalierten, elektrisch angetriebenen Fahrzeuges sowie dem Erstellen einer einfachen Simulation.

Ein vorhandener, maßstabsgetreuer Rollenprüfstand [Sch11] kann an der Antriebsachse des Fahrzeuges verschiedene Zustände hervorrufen (z.B. geregeltes Antreiben oder Bremsen). Auf diese Weise können unterschiedliche Drehmomente (positiv oder negativ) am Rad des Fahrzeuges hervorgerufen werden, welche während Beschleunigungs- und Bremsvorgängen auftreten. Ziel ist es, dass das Fahrzeug auf diese äußeren Einflüsse reagiert und somit ungeachtet der Belastung auf eine konstante, vorgegebene Geschwindigkeit regelt. Die Informationen Fahrzeuggeschwindigkeit und Rollendrehmoment genormter Fahrzyklen (z.B. NEDC, Europa City) sollen als Vorgabe für Fahrzeug und Rollenprüfstand dienen. Während eines solchen Zyklus werden wichtige Kennwerte gemessen und aufgezeichnet, um sie in späterer Folge mit der Simulation zu vergleichen.

2.1 Mechanischer, elektrischer Umbau

Im ersten Schritt soll ein vorhandenes benzinbetriebenes 1:5 Modellauto so umgebaut werden, dass der Benzinmotor durch einen Elektromotor ersetzt wird. Hierzu sind alle Halterungen für Motor und Getriebe selbst anzufertigen. Weiters sollen Befestigungsmöglichkeiten für Akkumulatoren und die gesamte Elektronik am Fahrzeug angebracht werden. Nach Abschätzung der benötigten Kennwerte aller Bauteile (Leistung, Kapazität, Betriebsspannung) werden alle Teile zu einer funktionierenden Hardware zusammengefügt.

Zusätzlich sollen alle verlustleistungsbehafteten Bauteile wie Motor und Leistungselektronik mit einer Wasserkühlung ausgestattet werden. Auch hierzu sind geeignete Komponenten auszuwählen und im Fahrzeug zu integrieren.

2.2 Ansteuerung, Regelung, Messung

Für die Ansteuerung und Regelung wird als Grundlage die Reglerplatine des Rollenprüfstandes verwendet. Diese soll durch Veränderungen der Hardware und Software an die Anforderungen des Fahrzeuges angepasst werden. Die Geschwindigkeitsregelung soll für den Antriebsmodus sowie im Rekuperationsbetrieb funktionieren.

Die Befehle erhält das Fahrzeug über einen FlexRay-Bus, über diesen werden in weiterer Folge die Geschwindigkeitswerte eines Fahrzyklus vom PC übergeben. Die durch geeignete Sensorik aufgenommenen Messwerte werden ebenfalls über FlexRay an den PC zurückgegeben.

2.3 Simulation

Die mechanische und elektrische Simulation wird in MATLAB/Simulink erstellt. Die Modellierung bezieht sich zum einen auf das Fahrzeug inklusive dem Antriebsstrang (Reifen und Getriebe), zum anderen auf die elektrischen Komponenten wie Elektromotor und Energiespeicher. Als Grundlage dient eine Simulationsbibliothek auf quasistationärer Basis (*QSS Toolbox* [AA05]), welche diese einzelnen Teile als Modellblöcke zur Verfügung stellt. Um die einzelnen Modellblöcke auf das skalierte Fahrzeug anzupassen, sind alle Parameter zu messen bzw. die physikalischen Zusammenhänge zu veranschaulichen. Nach korrekter Kalibrierung des Gesamtmodelles sollen die Kennwerte während eines Fahrzyklus berechnet werden, um diese mit den tatsächlich gemessenen Werten zu vergleichen. Es ist zu zeigen, dass die Simulation mit der Realität übereinstimmt.

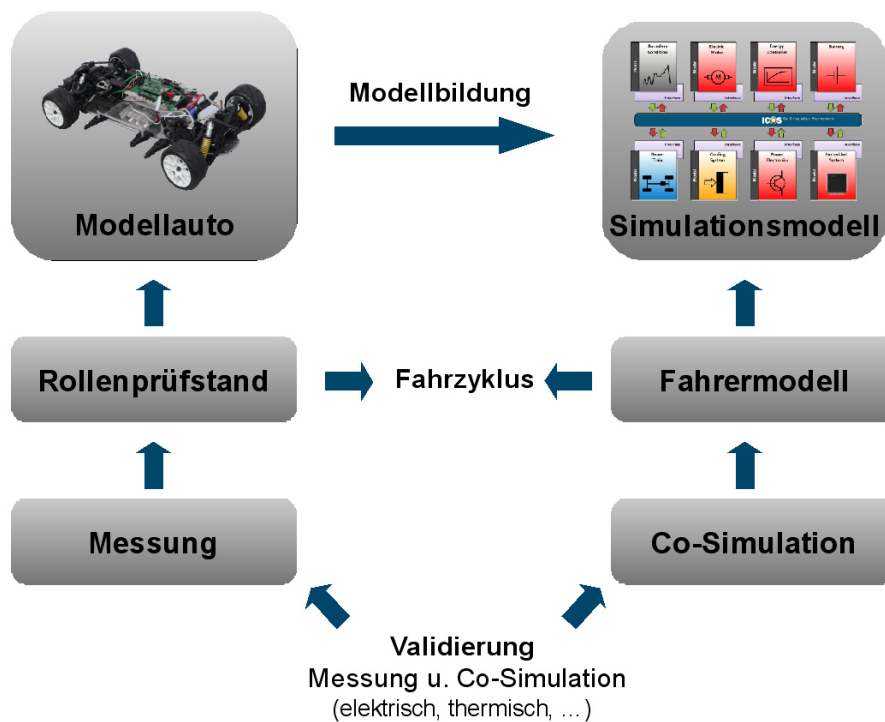


Abbildung 2.1: Von der Realität zur Co-Simulation

Kapitel 3

Literaturrecherche

3.1 Elektrischer Traktionsantrieb

Unter dem Begriff *geregelter Elektroantrieb* versteht man zusammenhängende Komponenten, um einen Fahrwunsch (Sollwert) möglichst schnell und genau über einen mechanischen Antriebsstrang an die Straße weiterzugeben. Solch ein Sollwert kann die Schubkraft F_a , das Antriebsmoment M_a oder die Kreisfrequenz Ω (entspricht proportional der Geschwindigkeit v) sein. Da Geschwindigkeit und Drehmoment positiv als auch negativ sein sollen, spricht man bei einem solchen Antrieb von einem Vierquantenbetrieb. Dieser ist im Gegensatz zum Verbrennungsmotor beim elektrischen Antrieb einfach zu realisieren und ermöglicht es Energie bei positiven Antriebsmomenten (Beschleunigung) in den Motor, aber auch bei negativen Antriebsmomenten (Bremsen) wieder zurück in den Energiespeicher zu schicken. Dieses Rückladen – Rekuperation genannt – kann je nach Fahrzyklus bis zu 10% Gewinn an Reichweite bewirken [Hof06].

Im folgenden Punkt werden die Komponenten eines elektrischen Traktionsantriebes und deren verschiedene Ausführungsformen erklärt. Abbildung 3.1 zeigt den Aufbau und einige vorkommende Parameter eines geregelten Elektroantriebes für Straßenfahrzeuge.

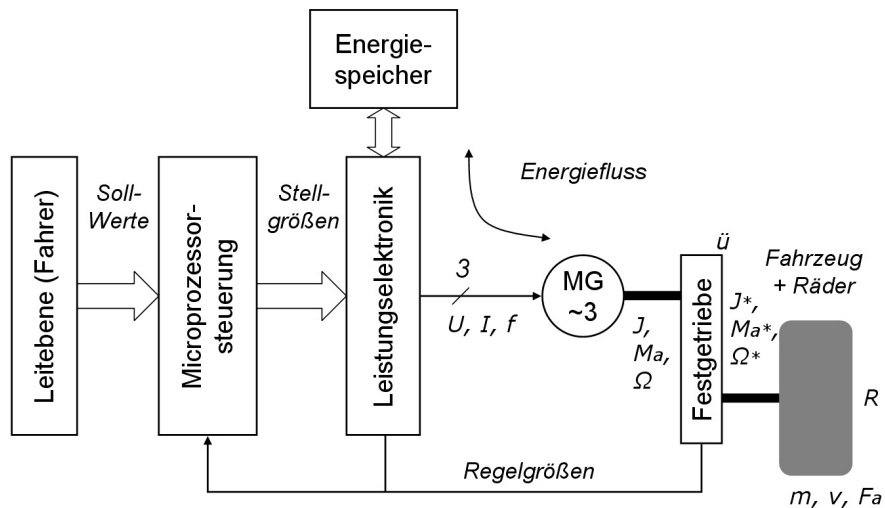


Abbildung 3.1: Aufbau eines elektrischen Traktionsantriebes [Hof06]

3.1.1 Elektrische Maschinen

Grundlegend kennen wir drei Arten von elektrischen Maschinen, welche alle als Motor und Generator betrieben werden können (wichtig für die Rekuperation).

Synchronmaschine

Die Synchronmaschine besteht aus einem Permanentmagneten, welcher meist den Rotor darstellt, und Spulen im Stator, welche durch richtiges Ansteuern der einzelnen Phasen, z.B. durch dreiphasigen Drehstrom, ein Drehfeld erzeugen. Vorteil dieser Maschine ist vor allem der Verzicht auf Schleifringe, da diese verschleißbehaftet und empfindlich auf Vibrationen sind. Großer Nachteil ist jedoch die Ansteuerung über ein Drehfeld, bei Betrieb mit Akkumulatoren. Das Drehfeld müsste durch Wechselrichter aus der Gleichspannung erzeugt werden, was wiederum hohe Umrichtverluste zur Folge hätte. Der Begriff *bürstenlose Gleichstrommaschine* beschreibt eine solche Synchronmaschine, welche mit geeigneter Ansteuerung das Verhalten einer Gleichstrommaschine aufweist. Daher sind die Vor- und Nachteile ähnlich. Bürstenlose Gleichstrommaschinen werden jedoch immer mehr eingesetzt, da die notwendige Elektronik mittlerweile sehr billig und der Wartungsaufwand minimal ist.

Assynchronmaschine

Bei der Assynchronmaschine wird das Drehmoment ebenfalls durch ein Drehfeld erzeugt. Hierbei wird durch das Drehfeld eine Spannung in den Läufer induziert, welche einen Strom im Läufer erzeugt. So entsteht ein Magnetfeld, welches dem Drehfeld zu folgen versucht. Der Versatz zwischen Drehfeld und Läuferfeld wird Schlupf s genannt, durch diesen fällt im Läufer die Verlustleistung $P_v = s \cdot n_s \cdot M$ an (n_s ...Drehzahl des Statorfeldes, M ...Drehmoment an der Welle). Durch Verwendung von Kurzschlussläufern kann auch hier auf Schleifringe verzichtet werden. Weitere Möglichkeiten sind der Glockenläufer und der Scheibenläufer. Diese können relativ kompakt gebaut werden und haben durch ihr geringes Gewicht ein gutes Dynamikverhalten. Nachteil dieser Maschine ist gleich wie bei der Synchronmaschine der Aufwand des Umrichtens, sowie der hohe Aufwand bei der Regelung [Bra09].

Gleichstrommaschine

Die permanentmagneterregte Gleichstrommaschine ist eine sehr einfache Form einer elektrischen Maschine. Der Permanentmagnet erzeugt ein räumlich konstantes Feld. Die einzelnen Phasen des Läufers werden über den Kommutator so mit Spannung beaufschlagt, dass das Läuferfeld ebenso räumlich konstant zu dem Feld des Permanentmagneten liegt. Der Wirkungsgrad dieser Maschine kann bis zu 80 % betragen, jedoch nur bei hohen Drehzahlen. Die permanentmagneterregte Gleichstrommaschine weist ein sehr einfaches Strom/Moment- bzw. Moment/Drehzahlverhalten auf, was die Regelung sehr vereinfacht. In Abbildung 3.2 werden diese Zusammenhänge dargestellt (M ...Drehmoment an der Welle, n ...Drehzahl der Welle, I ...Stromaufnahme).

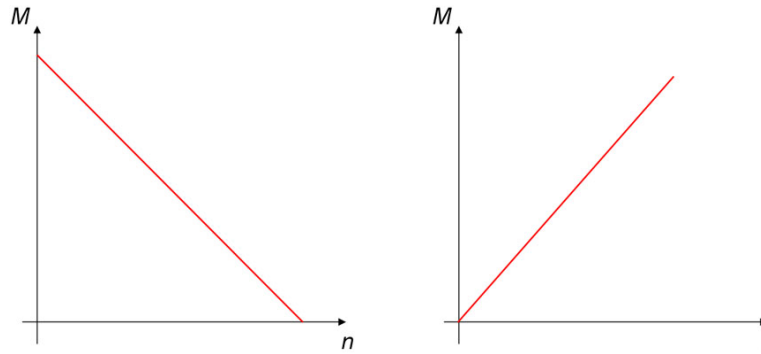


Abbildung 3.2: Kennlinien einer permanentmagneterregten Gleichstrommaschine

Bei der fremderregten Gleichstrommaschine werden diese Kennlinien zu Kennlinienscharen mit dem Parameter Erregerstrom. Die Fremderregung hat beim Rekuperieren den Vorteil, dass die Ausgangsspannung des Generators auch bei niedrigeren Drehzahlen akzeptable Werte annimmt, da bei Erhöhung des Erregerstromes auch die Ankerspannung steigt [Par08].

3.1.2 Energiespeicher

Um einen für eine Anwendung passenden Akkumulator auszuwählen, werden diese über verschiedenen Gütekriterien wie Leistungsdichte, Energiedichte, Kapazität, Zyklenverhalten (Lebensdauer), Selbstentladung, Entladekurve, max. Entlade-/Ladestrom und Anfälligkeit auf den Memoryeffekt beschrieben. Im folgenden Punkt werden verschiedene Akkumulatortypen beschrieben und verglichen [TR02].

Bleizelle

Für Anwendungen wie Starterbatterien, Energiespeicher für Solarsysteme oder Notstromspeicher werden gerne Bleiakumulatoren verwendet, da diese relativ günstig und sehr robust sind. Der Aufbau, bestehend aus zwei Bleielektroden und 38-prozentiger Schwefelsäure, liefert eine Zellenspannung von 2 V . Für Anwendungen mit weniger maximalen Strombedarf können auch sogenannte Gel-Bleiakumulatoren verwendet werden. Die ansonsten flüssige Säure ist bei diesem Typ gebunden, die Zelle ist komplett verschweißt. Durch die gebundene Säure können keine unterschiedlichen Mischverhältnisse auftreten, dadurch weist der Gel-Bleiakkumulator einen geringeren Kapazitätsverlust über die Lebensdauer auf.

Vorteile:

- robust
- günstig
- einfacher Aufbau
- unkritisches Handling

Nachteile:

- Tiefentladen führt zu irreparablen Schäden
- enthält giftiges Blei
- enthält umweltschädliche Schwefelsäure
- geringe Energiedichte

Nickel-Cadmium-Zelle

Nickel-Cadmium-Akkumulatoren gibt es als offene und gasdichte Zelle, wobei für mobile Zwecke nur die gasdichte Variante in Frage kommt. Der Aufbau ist meist zylindrisch, da diese Form mechanische und elektrische Vorteile aufweist. Die Nennspannung einer Zelle beträgt $1,2\text{ V}$, weswegen sie auch gerne als Ersatz für nichtwiederaufladbare Batterien verwendet wird.

Vorteile:

- Zellen sind verschleißt
- hohe Zyklenzahl
- schnellladefähig
- unempfindlich auf hohe oder tiefe Temperaturen

Nachteile:

- niedrige Kapazität gegenüber NiMh oder LiPo
- Ausgasen durch Überhitzung/Überladung
- empfindlich auf Tiefentladung
- enthält giftiges Cadmium

Nickel-Metallhydrid-Zelle

Einige Verbesserungen gegenüber der NiCd-Zelle bietet die Nickel-Metallhydrid-Zelle, welche eine mehr als doppelt so große Energiedichte besitzt. Um die Zellen vor Überladung und somit vorzeitiger Alterung zu schützen, ist es notwendig, auf eine genaue Ladeüberwachung zurückzugreifen (die Verfahren bei NiMh und NiCd sind ähnlich). Wie in Abbildung 3.3¹ ersichtlich steigt die Spannung ab 100% *SOC* schneller an, als in der vorhergehenden Ladezeit. Dieser Spannungsanstieg muss vom Ladegerät erkannt werden, um eine Überladung zu verhindern. Zusätzlich wird meist die Temperatur der Zelle überwacht, da die Energie, welche ab dem vollen Ladestatus in die Zelle fließt, in Wärme umgewandelt wird. Beide Messungen bewirken ein sicheres, rechtzeitiges Abschalten des Ladevorganges.

¹NiMh 7,2 V Racing Pack 2400 mAh TAMIYA Datasheet Ver. 01

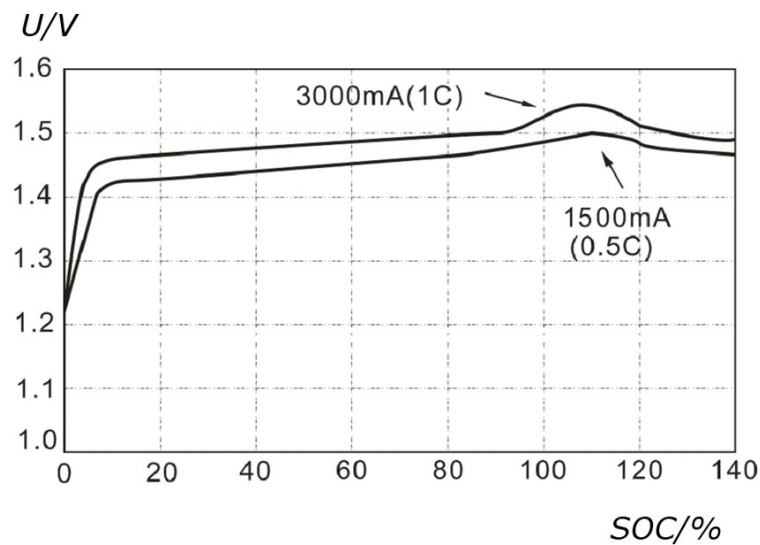


Abbildung 3.3: Beispiel einer Ladekurve einer NiMh-Zelle

Vorteile:

- höhere Energiedichte als NiCd
- kein giftiges Cd
- fast kein Memory-Effekt

Nachteile:

- empfindlicher auf mindere Ladeverfahren gegenüber NiCd
- geringere Lade-/Entladeströme als NiCd
- Batterieträgheitseffekt bei häufigen Teilentladungen
- geringere Zyklenzahl als NiCd

Lithium-Polymer-Zelle

Der modernste Akkumulator ist der Lithium-Polymer-Akkumulator (LiPo), welcher eine Weiterentwicklung des Lithium-Ionen-Akkumulators ist. Dieser Typ zeichnet sich durch seine hohe Energiedichte und seinen kaum vorhandenen Memory-Effekt aus. Die Nennspannung einer Zelle beträgt meist 3,7V. LiPos sind jedoch elektrisch und thermisch empfindlicher als andere Typen. So sollen Temperaturen von $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, Tiefentladen, Überladen, zu hohe Ströme sowie Lagern im entladenen Zustand vermieden werden, da es sonst meist zur Zerstörung der Zelle kommt. Gerade beim Überladen oder bei zu hohen Strömen kann es sogar zur Entzündung und Explosion der Zelle kommen. Daher ist unbedingt eine Kontrolle jeder einzelnen Zelle (Temperatur, Spannung) beim Laden und Entladen erforderlich.

Vorteile:

- hohe Energiedichte
- kein Memoryeffekt

Nachteile:

- genaue Lade- und Entladeüberwachung notwendig
- teuer

Zellentyp	Spannung [V]	Energiedichte [$\frac{Wh}{kg}$]	Leistungsdichte [$\frac{W}{kg}$]	Zyklen [-]
Blei	2	30	300	500
NiCd	1,2	40	200	800
NiMh	1,2	80	300	500
LiPo	3,7	140	1500	1000

Tabelle 3.1: Kennwerte verschiedener Zellentypen

3.1.3 Regler

In Abbildung 3.4 ist die Regelung eines elektrisch angetriebenen Fahrzeuges mit einer Dreifach-Kaskode dargestellt. Dieses Regelverfahren ermöglicht die Regelung von Weg, Geschwindigkeit und Drehmoment am Antriebsrad.

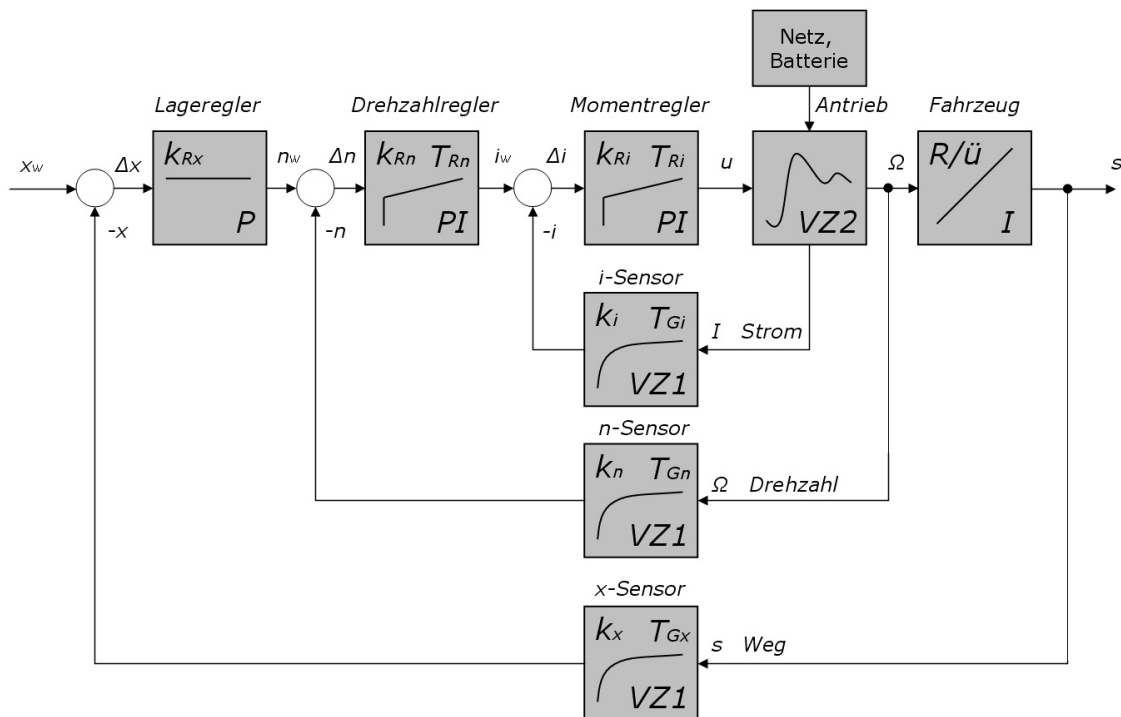


Abbildung 3.4: Dreifach-Kaskodenstruktur für elektrische Antriebe [Hof06]

Für eine reine Geschwindigkeitsregelung des Fahrzeuges bzw. Drehzahlregelung der elektrischen Maschine reicht ein weitaus simpleres Reglerschema aus (Abbildung 3.5).

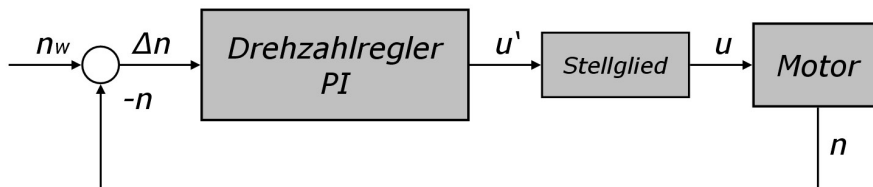


Abbildung 3.5: Prinzip der Drehzahlregelung [Hof06]

3.1.4 Leistungselektronik – Umrichter

Wesentlich bei der Ansteuerung von elektrischen Maschinen ist die Umformung einer vorhandenen Spannung (z.B. die Gleichspannung eines Akkumulators) in eine variable Spannung bzw. Frequenz, um die Maschine in verschiedenen Betriebspunkten zu betreiben. Bei der Gleichstrommaschine genügt die Veränderung der Amplitude, bei Wechselstrommaschinen werden Amplitude und Frequenz variiert.

Die H-Brücke erlaubt es, eine Gleichstrommaschine in allen vier Quadranten zu betreiben (vorwärts Motor / rückwärts Motor / vorwärts Generator / rückwärts Generator). Sie besteht aus vier Schaltern, die jeweils paarweise diagonal durchgeschaltet den Strom in die jeweilige Richtung durch die Maschine leiten. Um die Spannung zu variieren, wird ein Schalter pulsweitenmoduliert angesteuert. Beim Abschalten entstehen aufgrund der Induktivität des Motors hohe Spannungen, welche die Schalter beschädigen würden. Um dies zu verhindern, befinden sich Freilaufdioden über jedem Schalter, um die Spannung auf die Diodenspannung zu begrenzen [Bra09].

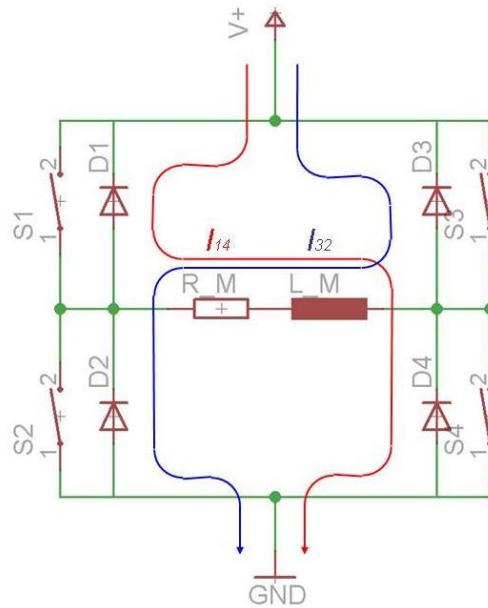


Abbildung 3.6: H-Brücke

3.2 Rekuperation

Rekuperation wird im Allgemeinen ein technisches Verfahren der Energierückgewinnung genannt (von lateinisch *recuperare* = wiedererlangen, wiedergewinnen). Z.B. wird das Vorwärmen von Heizluft durch die Abgasenergie eines Ofens auch als Rekuperation bezeichnet, in diesem Fall nach dem Prinzip eines Wärmetauschers.

Bei einem Fahrzeug speziell redet man von der Rückgewinnung der Energie, welche bei Verzögerungsvorgängen oder Fahrten auf negativem Gefälle ansonsten in reine Wärme an den Bremsen übergehen würde. Um diese anfallende Energie bei späteren Energiebedarfsvorgängen wieder nutzen zu können, muss sie zwischengespeichert werden. Bekannt ist das Prinzip des Hybridautos. Der Antrieb besteht aus einem oder mehreren Elektromotoren. Bei einer Bremsung oder Bergabfahrt kann über diesen elektrischen Antrieb (nun als Generator fungierend) ein Akkumulator oder eine Supercap (je nach Ladestrom und Ladedauer) geladen werden. Ist der elektrische Speicher nach einiger Zeit entleert, besitzt das Hybridauto auch noch einen Verbrennungsmotor, welcher über einen Generator den Energiespeicher laden kann. Dieser Verbrennungsmotor kann im Verhältnis zu einem herkömmlichen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor kleinvolumig ausgeführt sein, da er immer im Drehzahl/Drehmoment-Optimum betrieben werden kann.

Reine Elektrofahrzeuge besitzen dieses Hilfsaggregat nicht. Sie werden zu 100 % ohne fossile Brennstoffe betrieben. Daher müssen die elektrischen Energiespeicher wesentlich größer sein, um eine akzeptable Reichweite zu gewährleisten. Die Methode der Rekuperation ist der der Hybridautos gleich.

Nicht nur elektrische Rekuperations- und Speichermethoden haben sich in der Fahrzeugtechnik durchgesetzt. Hydraulische Antriebssysteme mit großen Druckspeichern findet man vor allem bei Baumaschinen oder schweren Nutzfahrzeugen mit hydraulischen Nebengeräten (z.B. Kran). Ein sehr einfaches, aber wirkungsvolles mechanisches Prinzip zeigt

der schweizer Gyrobus (1953). Ein 1500 kg schweres Schwungrad mit 160 cm Durchmesser kann den Bus aufgeladen 20 km bewegen. Schwungräder machen einen sehr günstigen Energiespeicher mit hohem Wirkungsgrad möglich ($> 80\%$). Die heutzutage eingesetzten Systeme wiegen um die 20 kg und können über sehr hohe Drehzahlen ca. 90 Wh speichern. Das „Laden“ und „Entladen“ des Rades erfolgt elektrisch [Böc11] [Bra09].

Im Folgenden werden nur elektrische Verfahren erklärt.

3.2.1 Methoden der Rekuperation

Das Grundprinzip der elektrischen Rekuperation kann durch das Laden eines Akkumulators mit einem Generator beschrieben werden. Ein Akkumulator mit einer Nennspannung U_M speist eine Gleichstrommaschine mit konstanter Erregung. Der dadurch hervorgerufene Strom I_M bewirkt ein Moment auf den Anker, welches eine gewisse Drehzahl n der Welle hervorruft. Treibt man nun die Welle der Maschine mechanisch mit der Drehzahl n an, so wird durch das generatorische Prinzip der Gleichstrommaschine wiederum eine Spannung U_G induziert. Der Wirkungsgrad ist im motorischen und generatorischen Betrieb $< 100\%$, daher gilt $U_G < U_M$ d.h. der Generator kann nur kleinere Spannungen als die Nennspannung des Akkumulators erzeugen, vorausgesetzt, die Drehzahl ist beim Laden nicht größer als jene beim Antreiben. Um einen Akkumulator zu laden, muss die anliegende Spannung größer sein als seine momentane Spannung.

Variation der Erregung

Eine Möglichkeit, die Klemmenspannung eines Gleichstromgenerators mit konstanter Drehzahl zu erhöhen, wäre die Erhöhung der Erregung ψ , da gilt [Par08]:

$$U_G = R_i * I_G + L_i \frac{dI_G}{dt} + 2\pi * \psi * n \quad (3.1)$$

U_G	Klemmenspannung des Generators [V]
I_G	Ankerstrom des Generators [A]
R_i	ohmscher Widerstand der Ankerwicklung [Ω]
L_i	Induktivität der Ankerwicklung [H]
ψ	Erregung [Wb]
n	Drehzahl [$\frac{1}{s}$]

Bei permanentmagneterregten Gleichstrommaschinen hat man keine Möglichkeit, die Erregung zu erhöhen, der Erregerfluss ψ ist durch den Permanentmagneten vorgegeben. Die Gleichung der Klemmenspannung wird zu:

$$U_G = R_i * I_G + L_i \frac{dI_G}{dt} + 2\pi * c * n \quad (3.2)$$

c	Maschinenkonstante [Vs]
-----	-------------------------

Die Maschinenkonstante ist durch den Aufbau der permanentmagneterregten Gleichstrommaschine vorgegeben und kann nicht beeinflusst werden. Wie man der Gleichung entnehmen kann, kann die Spannung nicht erhöht werden. Man hilft sich mit externen, getakteten Aufwärtswandlern, um die Spannung auf das gewünschte Niveau zu erhöhen.

Prinzip des getakteten Aufwärtswandlers [CS09]

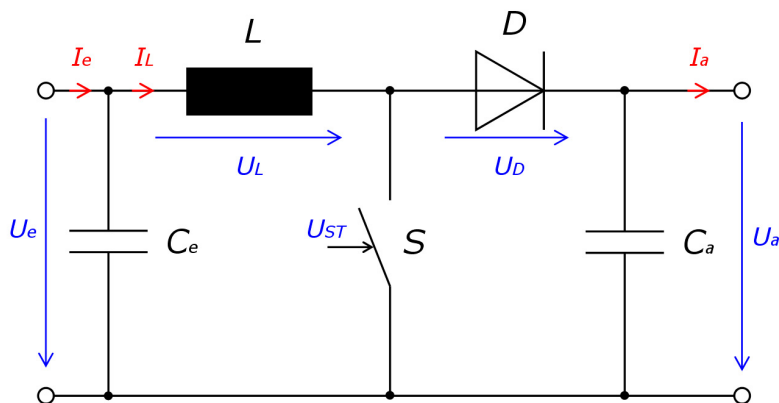


Abbildung 3.7: Schaltung eines Aufwärtswandlers

Ist der Schalter S geschlossen, wird der Ausgangskondensator C_a über die Induktivität L und die Diode D auf die Eingangsspannung U_e aufgeladen. Schließt man nun den Schalter, liegt an der Induktivität U_e an, der Drosselstrom I_L steigt (die Induktivität wird aufgeladen). Beim Öffnen des Schalters liegt nun $U_e + U_L$ am Ausgang und I_L sinkt. Im eingeschwungenen Zustand stellt sich eine Spannung $U_a > U_e$ ein, welche rein vom Tastverhältnis des Schalters und nicht von der Last abhängig ist.

Für den kontinuierlichen Fall (der Ausgangsstrom ist nicht lückend) gilt mit dem Induktionsgesetz:

$$\Delta I_L = \frac{1}{L} U_e * t_1 = \frac{1}{L} (U_a - U_e) * (T - t_1) \quad (3.3)$$

Daraus folgt für die Ausgangsspannung:

$$U_a = U_e \frac{T}{T - t_1} \quad (3.4)$$

Die Größe der Induktivität hängt von der Schaltfrequenz f und der Stromwelligkeit ΔI_L ab. Je größer die Schaltfrequenz ist, desto kleiner kann die Induktivität werden. Es erhöhen sich dadurch aber auch die Schaltverluste am Schalter. Eine größere Induktivität bewirkt eine geringere Stromwelligkeit, allerdings vergrößern sich dadurch Baugröße und Gewicht der gesamten Schaltung.

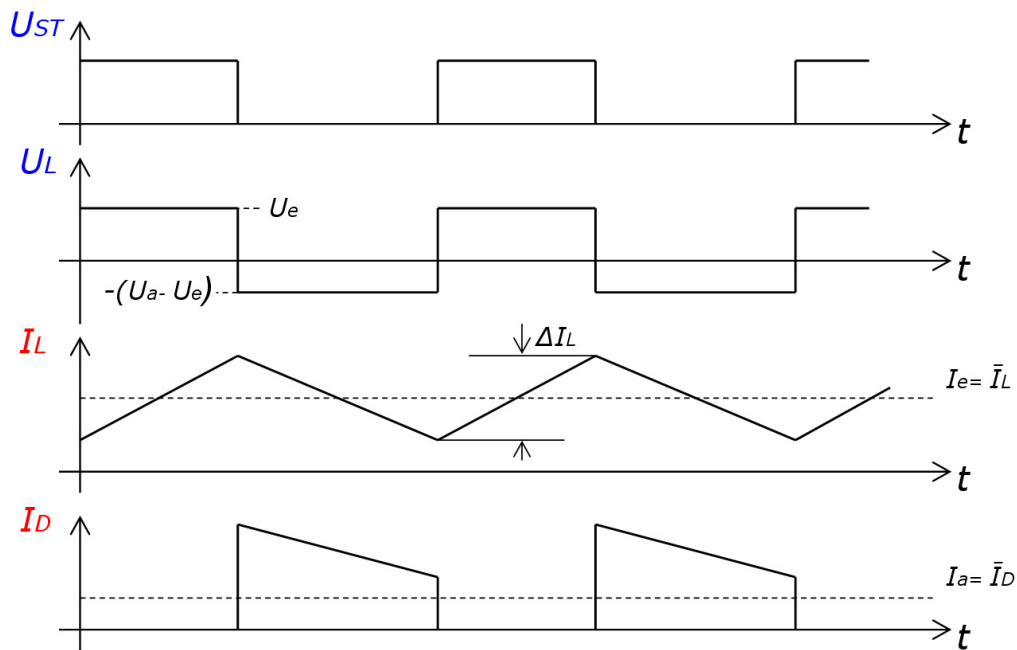


Abbildung 3.8: Strom- und Spannungskennlinien eines Aufwärtswandlers

Aus der Leistungsbilanz

$$U_e * I_e = U_a * I_a \quad (3.5)$$

erhält man für einen Laststrom I_a :

$$I_e = I_a \frac{U_a}{U_e} \quad (3.6)$$

Damit gilt für die Induktivität L :

$$L = \frac{1}{\Delta I_L} (U_a - U_e) \frac{U_e}{U_a} * \frac{1}{f} \quad (3.7)$$

Der Ausgangskondensator C_a soll die Ausgangsspannung U_a glätten, deren Welligkeit ΔU_a durch den pulsformigen Ladestrom I_D entsteht. Die Dimensionierung hängt vom benötigten Laststrom und der gewünschten Ausgangswelligkeit der Schaltung ab.

$$C_a = \frac{I_a}{\Delta U_a} \quad (3.8)$$

Der Aufwärtswandler ist nicht kurzschlussfest, da kein schaltbares Element im Kurzschlussweg ist. Im unregulierten Fall ist er außerdem nicht leerlauffest, da durch ständiges Pumpen von Energie an den Ausgang die Bauteile zerstört werden würden.

Anwendung des Aufwärtswandlers an einem Gleichstromgenerator

Nimmt man an, dass die Eingangsspannung eines Aufwärtswandlers die eines permanentmagneterregten Gleichstromgenerators ist, erkennt man durch das Ersatzschaltbild 3.19, dass die Induktivität L durch die Induktivität des Ankers L_i ersetzt werden kann. Somit kann der Aufwärtswandler rein über die Beschaltung eines Gleichstromgenerators mit einem Transistor und einer Diode realisiert werden.

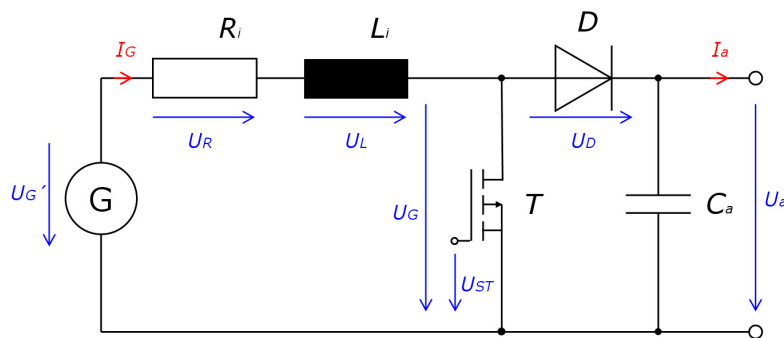


Abbildung 3.9: Aufwärtswandler mit Gleichstromgenerator

Geschaltete Kapazitäten

Ladet man zwei parallel geschaltete Kapazitäten mit der Spannung U , erhält man bei der seriellen Umschalten die Spannung $2U$. Nach diesem Prinzip kann man durch beliebig viele Kapazitäten unterschiedliche Spannungsvervielfachungen erzeugen [CS09].

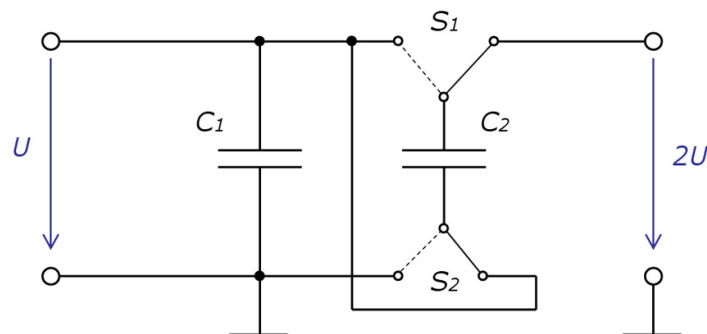


Abbildung 3.10: Spannungsverdoppler mit geschalteten Kapazitäten

3.3 Messsensoren

3.3.1 Geschwindigkeitsmessung

Eine Möglichkeit zur Geschwindigkeitsmessung bietet die Gabellichtschranke. Es handelt sich hierbei um eine elektronisch-optische Methode. Eine Lochkarte schattet das Licht einer IR-Leuchtdiode ab oder lässt es ungehindert an einen Fototransistor weiter. Die Frequenz des so entstehenden Rechtecksignals ist proportional der Geschwindigkeit der Lochkarte bzw. der Umdrehungen pro Minute. Eine hohe Anzahl der am Umfang der Lochscheibe angebrachten Löcher erhöht die Genauigkeit der Messung, die Schaltgeschwindigkeit des Fototransistors muss jedoch berücksichtigt werden, da sonst keine exakten Flanken erkannt werden können [Omr11].

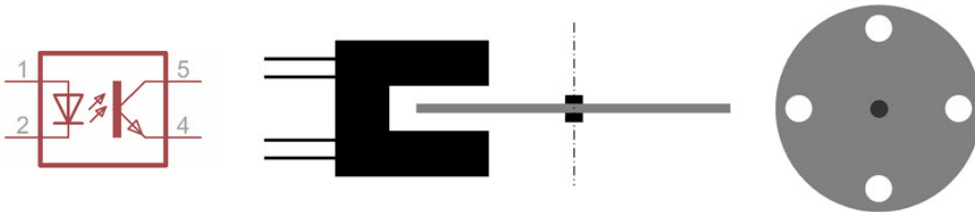


Abbildung 3.11: Prinzip der Gabellichtschranke

Abbildung 3.12 zeigt eine mögliche Beschaltung einer Gabellichtschranke. Die Auswertung im Microcontroller kann über Impulszählung über eine konstante Zeit oder über die Periodendauer zwischen zwei Flanken mittels Timer erfolgen.

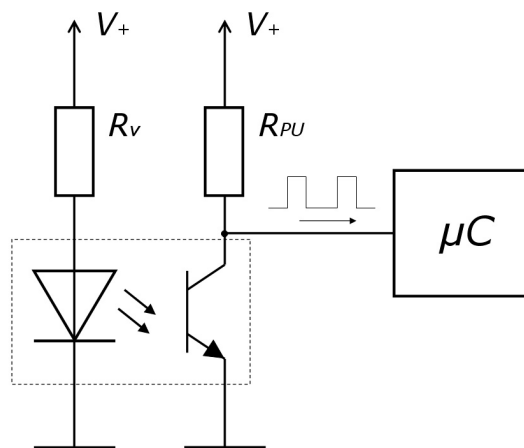


Abbildung 3.12: Beschaltung einer Gabellichtschranke

3.3.2 Temperaturmessung [Ele03]

PTC, NTC

Zur Messung der Temperatur stehen verschiedene Sensoren zur Verfügung. Eine Variante sind Widerstände mit positiven oder negativen Temperaturkoeffizienten (PTC, NTC). Durch Beschaltung als Spannungsteiler oder Brückenschaltung erhält man so eine der Temperatur proportionale Spannung. Der Zusammenhang ist nicht linear und muss daher im betrachteten Bereich linearisiert werden.

Thermoelement

Eine weitere Möglichkeit bieten Thermoelemente. Der Seebeck-Effekt bewirkt, dass an den Kontaktstellen zweier Leiter aus verschiedenen Materialien eine geringe Spannung auftritt, wenn die Kontaktstellen unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Thermoelemente funktionieren bis zu 2500°C , müssen aber kalibriert werden und liefern ohne Verstärkung kein brauchbares Signal.

Halbleitersensoren

Eine wesentlich günstigere und einfachere Methode, Temperatur elektrisch zu messen, ist ein Halbleitertemperaturfühler. Die Basis-Emitterstrecke eines Bipolartransistors fällt konstant mit 2 mV/K . Durch Verstärkung und eventuelle Umsetzung in ein digitales Signal kann der Sensor direkt eine analoge, linear der Temperatur proportionale Spannung oder ein serielles Signal weitergeben. Da der Temperaturbereich eines Halbleiters eingeschränkt ist, funktioniert dieser Typ nur bis ca. 140°C .

3.4 FlexRay-Bus [Fle09]

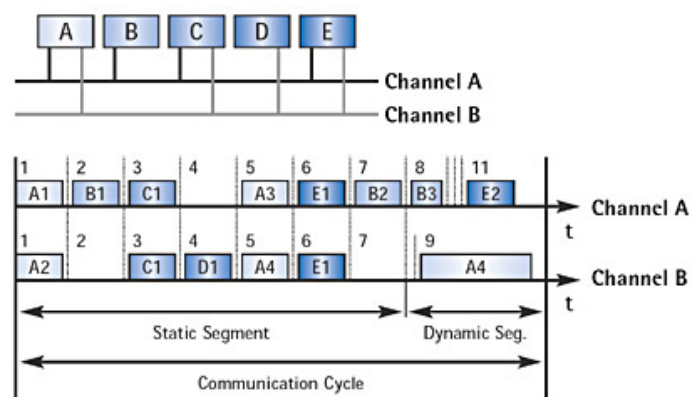


Abbildung 3.13: FlexRay-Kommunikationszyklus [IXX04]

FlexRay ist ein Bussystem, welches im automobilen Bereich eingesetzt wird, wenn erhöhte Anforderungen an Fehlertoleranz und Echtzeitfähigkeit gestellt sind. Das System arbeitet nach dem TDMA (Time Division Multiple Access) Prinzip, d.h. den Nachrichten sind feste Zeitschlitze für die Übertragung zugewiesen, der Buszugriff erfolgt deterministisch. Da

dies negative Auswirkungen auf die Bandbreite hat, unterteilt sich der Zyklus in einen statischen und einen dynamischen Bereich. Die festen Zeitschlitz befinden sich im statischen Bereich. Im dynamischen Bereich wird der Buszugriff in nur kurzer Zeit, den sogenannten „Minislots“, vergeben. Wenn innerhalb eines Minislots ein Zugriff erfolgt, wird der Zeitschlitz um die benötigte Zeit verlängert.

Physikalisch gesehen arbeitet FlexRay über zwei getrennte Kanäle mit einer Datenrate von 10 MBit/s (kann auf 5 MBit/s oder $2,5\text{ MBit/s}$ herabgesenkt werden). Die zwei Kanäle dienen meist zur Fehlererkennung, können aber auch zur Verdoppelung der Datenrate genutzt werden.

Ein FlexRay-Knoten besteht aus einem Host-Prozessor, einem Communication-Controller (CC), einem optionalen Bus-Guardian (BG) und Bus-Treibern. Der Host-Prozessor liefert die Daten, welche übertragen werden sollen. Über die Treiber werden die zwei Kanäle des Busses angesteuert, der Bus-Guardian überwacht dabei den Zugriff auf den Bus, d.h. den Sendezugriff, nur in den Zeitschlitz. Empfangen von Daten ist zu jedem Zeitpunkt möglich.

Die Synchronisation der Knoten erfolgt über eine Synchronisationsnachricht.

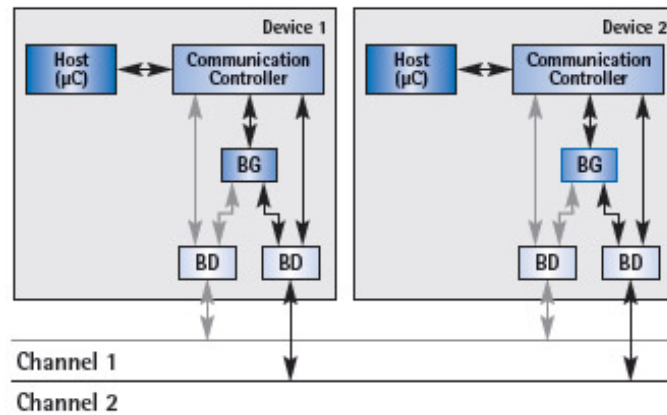


Abbildung 3.14: FlexRay-Netznoten [IXX04]

3.5 Grundlagen der Simulation

3.5.1 Physikalische Grundlagen und Kinematik

Im folgenden Punkt werden die physikalischen Zusammenhänge einer bewegten Masse näher beschrieben. Es wird zuerst ein Zylinder in der Ebene betrachtet, um Reibungskräfte, Strömungswiderstand und translatorische und rotatorische Bewegungsabläufe zu beschreiben [Hal07].

Bei der rollenden Bewegung eines Zylinders auf einer Ebene spricht man von Rollreibung. Sie entsteht durch die Verformung des Zylinders und der Ebene durch die Kraft, welche senkrecht auf den Zylinder wirkt. Beschrieben wird diese Verformung durch den Rollreibungskoeffizienten c_R .

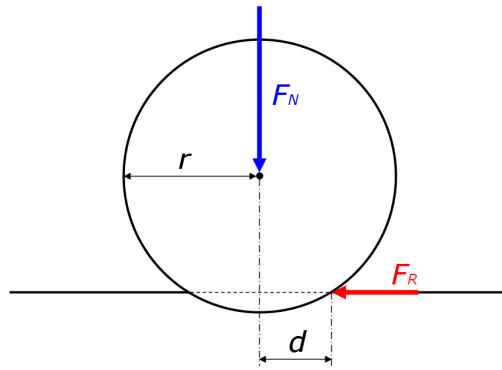


Abbildung 3.15: Darstellung Rollreibung

$$c_R = \frac{d}{r} \quad (3.9)$$

$$F_R = c_R * F_N \quad (3.10)$$

Der Strömungswiderstand, auch Luftwiderstand genannt, hängt vom Quadrat der Geschwindigkeit v , der Gasdichte ρ , der zum Geschwindigkeitsvektor normal stehenden Fläche A und dem Strömungswiderstandskoeffizient c_F ab. Der Strömungswiderstandskoeffizient kann nur durch Experimente oder durch approximierende Rechnungen wie z.B. der Finite-Elemente-Methode ermittelt werden. Die resultierende Kraft ergibt sich aus:

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * c_F \quad (3.11)$$

Man unterscheidet bei der physikalischen Betrachtung von Fahrzeugen translatorische (geradlinige) und rotatorische (drehende) Bewegungsabläufe. Für die translatorische Kraft F_b gilt, dass die Differenz aus Antriebskraft F_a und Widerstandskraft F_w gleich der partiellen Ableitung des Bewegungsimpulses mv nach der Zeit ist [Hof06].

$$F_b = F_a - F_w = \frac{d}{dt}(mv) = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \quad (3.12)$$

m Masse [kg]

t Zeit [s]

Bei Betrachtung einer konstanten Masse vereinfacht sich der Zusammenhang zu:

$$F_b = F_a - F_w = m \frac{dv}{dt} \quad (3.13)$$

Für die drehende Bewegung gilt, dass die Differenz aus Antriebsmoment M_a und Widerstandsmoment M_w gleich der partiellen Ableitung des Drehimpulses $J\Omega$ nach der Zeit entspricht.

$$M_b = M_a - M_w = \frac{d}{dt}(J\Omega) = J \frac{d\Omega}{dt} + \Omega \frac{dJ}{dt} \quad (3.14)$$

M_b	rotatorisches Drehmoment [Nm]
J	Trägheitsmoment [kgm^2]
Ω	Winkelgeschwindigkeit [$\frac{rad}{s}$]

Bei Betrachtung einer konstanten Massenträgheit vereinfacht sich der Zusammenhang zu:

$$M_b = M_a - M_w = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.15)$$

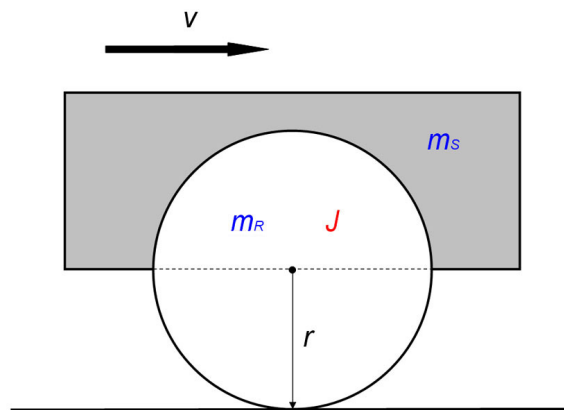


Abbildung 3.16: Darstellung Trägheitsmoment

Geht man nun von einem Reifen in der Form eines Zylindermantels aus ($J = m_R * r^2$), erhält man als zusammenfassendes Moment M_I , welches aus Translation und Rotation resultiert:

$$m = m_S + m_R \quad (3.16)$$

$$M_I = r * v' * (m + m_R) \quad (3.17)$$

Um die Kraft zu beschreiben, welche bei einer Steigung bzw. einem Gefälle mit dem Winkel α die Masse nach unten zieht bzw. anschiebt, muss die Gravitationskraft F_R in ihre zwei Komponenten F_N und F_P aufgeteilt werden [Böc11].

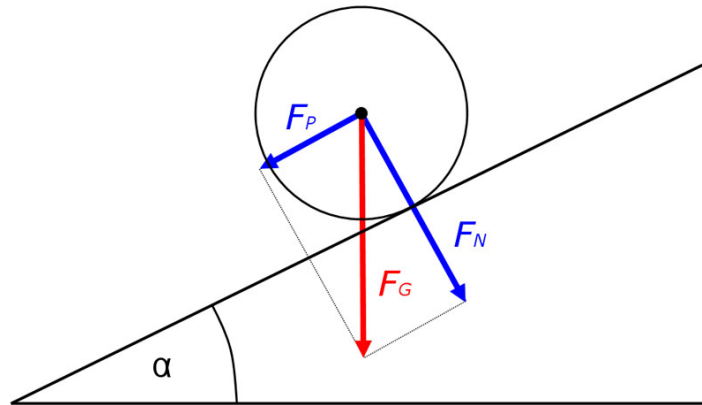


Abbildung 3.17: Auswirkungen der Steigung

Die Kraft F_P ergibt sich aus:

$$F_g = m * g \quad (3.18)$$

$$F_P = F_g * \sin \alpha \quad (3.19)$$

$$F_N = F_g * \cos \alpha \quad (3.20)$$

Setzt man nun diese von der Steigung α abhängigen Kräfte zusammen, erhält man die Kraft F_A .

$$F_A = m * g * (\sin \alpha + \cos c_R) \quad (3.21)$$

Über den Radius r können die einzelnen Kräfte in Momente umgerechnet werden.

$$M_R = F_A * r = r * m * g * (\sin \alpha + \cos c_R) \quad (3.22)$$

$$M_L = r * \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * c_F \quad (3.23)$$

M_R resultierendes Moment der Reibung [Nm]

M_L resultierendes Moment des Luftwiderstandes [Nm]

Das resultierende Moment M_G ergibt sich aus der Summe der Teilmomente.

$$M_G = M_R + M_L + M_I \quad (3.24)$$

$$M_G = r * \left(m * g * (\sin \alpha + \cos c_R) + \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * c_F + v' * (m + m_R) \right) \quad (3.25)$$

3.5.2 Parametrisierung von permanentmagneterregten Gleichstrommaschinen [Hun04]

Auch wenn die Gleichstrommaschine von Aufbau und Funktion komplizierter ist als andere Maschinen, lassen sich die wenigen zur Modellierung benötigten Parameter über einige Messungen leicht bestimmen. Alle wichtigen Eigenschaften des stationären Betriebes sind in den Größen R_i (Innenwiderstand) und c (Maschinenkonstante) enthalten. Alle anderen Kenngrößen werden aus diesen Parametern abgeleitet.

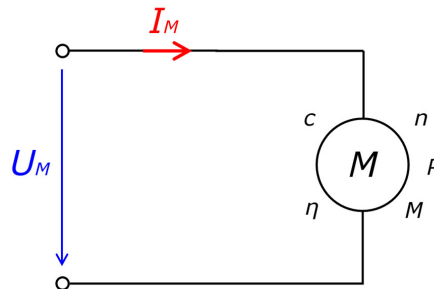


Abbildung 3.18: Parameter der Gleichstrommaschine

Wie in Abbildung 3.19 ersichtlich, kann die permanentmagneterregte Gleichstrommaschine als einfache Serienschaltung eines ohmschen Widerstandes und einer Induktivität betrachtet werden. Diese Darstellung ist erst bei der Betrachtung dynamischer Vorgänge, z.B. bei der Reglersimulation, notwendig.

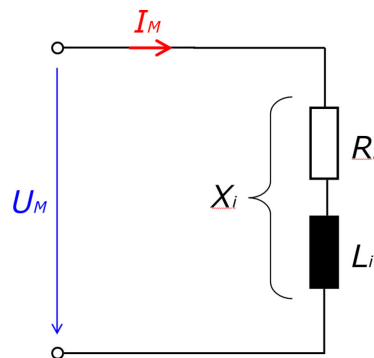


Abbildung 3.19: Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine

Grundlage für die Charakterisierung ist die Leistungsbilanz:

$$U_M * I_M = I_M^2 * R_i + c * I_M * 2 * \pi * n \quad (3.26)$$

und daraus folgend:

$$U_M = I_M * R_i + c * 2 * \pi * n \quad (3.27)$$

U_M	Versorgungsspannung [V]
I_M	Stromaufnahme [A]
R_i	ohmscher Widerstand der Ankerwicklung [Ω]
c	Maschinenkonstante [Vs]
n	Drehzahl pro Sekunde [$\frac{1}{s}$]

$U_M * I_M$ entspricht der aufgenommenen Leistung, $I_M^2 * R_i$ ergibt die elektrische Verlustleistung im Anker, welche als reine Wärme abgegeben wird. $c * I_M * 2 * \pi * n$ setzt sich aus der mechanischen Verlustleistung (Reibung, Luftwiderstand) und der mechanischen Nutzleistung zusammen.

Zur Ermittlung der unbekanntenen Größen c und R_i müssen zwei unterschiedliche Lastzustände bei gleicher Versorgungsspannung vorliegen. Gemessen werden der Versorgungsstrom I_M und die Drehzahl n . Es eignen sich der mechanische Leerlauf (Lastmoment = 0) und eine Nennlast. Der gemessene Leerlaufstrom I_{LL} wird in weiterer Folge ohnedies für die Bestimmung der mechanischen Verlustleistung benötigt. Man erhält durch Einsetzen der gemessenen Werte in die Leistungsbilanz zwei Gleichungen, welche man nun nach den zwei Unbekannten auflösen kann. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass das aufgeschlagene Lastmoment nicht bekannt sein muss (Drehmomente sind nur sehr aufwendig zu messen).

Um in späterer Folge den Wirkungsgrad errechnen zu können, wird die mechanische Nutzleistung $P_{mechNutz}$ benötigt. Man erhält sie aus der Differenz der mechanischen Gesamtleistung und der mechanischen Verlustleistung.

$$P_{mechNutz} = P_{mechGesamt} - P_{mechVerlust} \quad (3.28)$$

$$P_{mechNutz} = (c * I_M * 2 * \pi * n) - (c * I_{LL} * 2 * \pi * n) = (c * 2 * \pi * n)(I_M - I_{LL}) \quad (3.29)$$

Die Gleichung berücksichtigt die Drehzahlabhängigkeit der mechanischen Verlustleistung. Bei Leerlaufdrehzahl ist sie am höchsten und fällt bis zum Stillstand auf Null (bei stehender Welle existiert keine Reibung).

Zwischen Drehmoment und Leistung gilt allgemein der Zusammenhang:

$$M = P/\omega = P/2 * \pi * n = c * I \quad (3.30)$$

M	Drehmoment [Nm]
P	Leistung [W]
ω	Winkelgeschwindigkeit [$\frac{rad}{s}$]

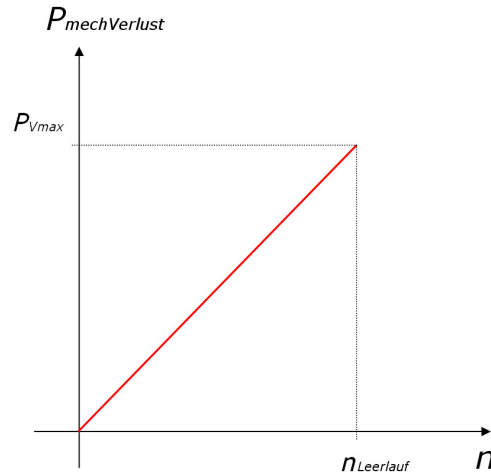


Abbildung 3.20: Drehzahlabhängigkeit der mechanischen Verlustleistung

Das Nutzmoment ergibt sich gleich wie die Leistung aus der Differenz von Gesamtmoment und Verlustmoment:

$$M_{Nutz} = M_{Gesamt} - M_{Verlust} = c * (I_M - I_{LL}) \quad (3.31)$$

Den Wirkungsgrad η erhält man nun einfach aus dem Verhältnis der mechanischen Nutzleistung zur elektrisch zugeführten Leistung.

$$\eta = \frac{P_{mechNutz}}{P_{elektrZu}} \quad (3.32)$$

Um nun einige Zusammenhänge graphisch darzustellen, wird die Leistungsbilanz für die Kennlinie Drehzahl/Stromaufnahme nach der Drehzahl aufgelöst:

$$n = (U_M - R_i * I_M) * (I_M - I_{LL}) \quad (3.33)$$

oder:

$$n = \frac{U_M - R_i * I_M}{c * 2 * \pi} \quad (3.34)$$

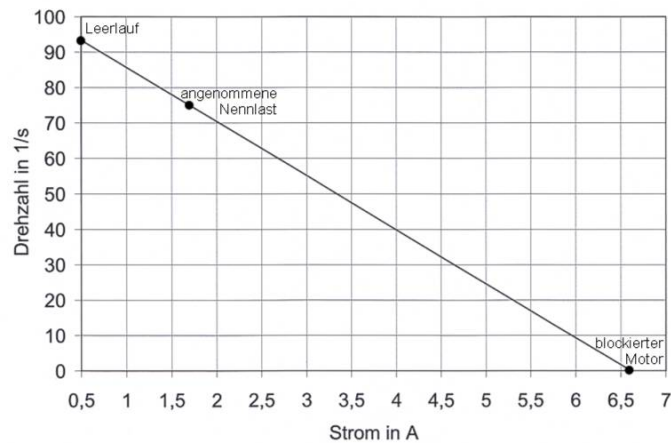


Abbildung 3.21: Beispiel für eine Drehzahl/Stromaufnahme-Kennlinie einer permanentmagneterregten Gleichstrommaschine

Leistungsverlauf und Drehmomentverlauf ergeben sich durch Einsetzen obiger Gleichung,

$$P_{mechNutz} = (U_M - R_i * I_M) * (I_M - I_{LL}) \quad (3.35)$$

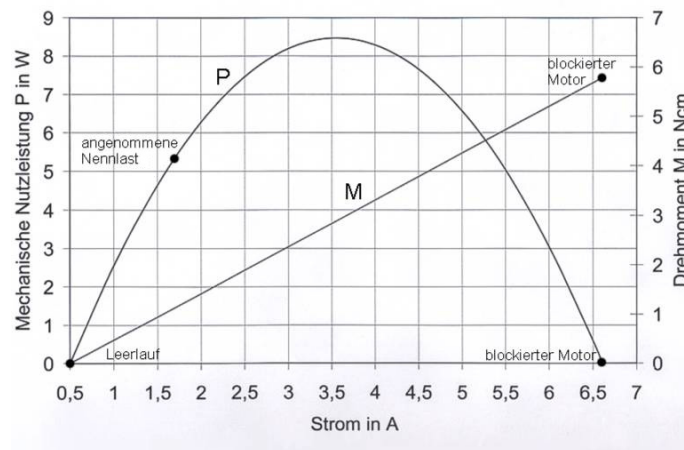


Abbildung 3.22: Beispiel für Leistungsverlauf und Momentverlauf einer permanentmagneterregten Gleichstrommaschine

ebenso wie der Wirkungsgrad.

$$\eta = \frac{(U_M - I_M * R_i) * (I_M - I_{LL})}{U_M * I_M} \quad (3.36)$$

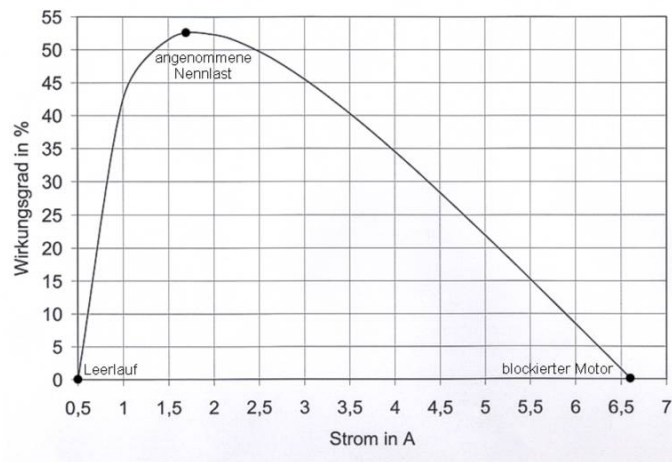


Abbildung 3.23: Beispiel für den Verlauf des Wirkungsgrades einer permanentmagnet-erregten Gleichstrommaschine

Trägheitsmoment des Rotors

Für die Bestimmung des Trägheitsmomentes eines Rotors J_R sind die Auslaufzeit von maximaler Geschwindigkeit $n = n_{max}$ auf $n = 0$ sowie das Reibungsmoment bei $n = n_{max}$ nötig. In Abbildung 3.24 sind die notwendigen Größen veranschaulicht. Der kurvenförmige Verlauf ergibt sich durch das drehzahlabhängige Reibungsmoment und kann durch eine Gerade angepasst werden.

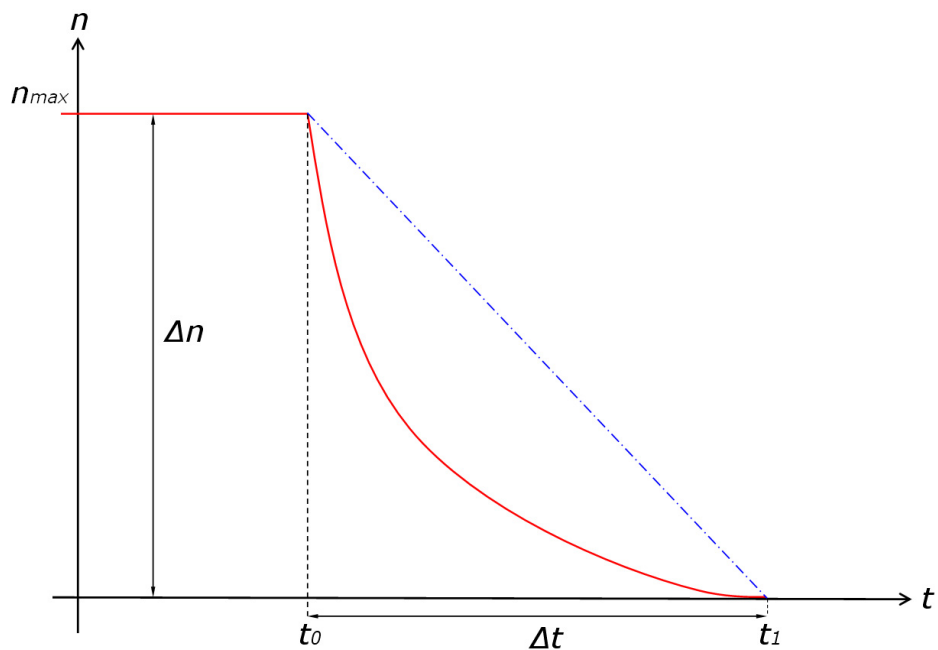


Abbildung 3.24: Drehzahlverlauf beim Auslaufen eines Rotors

Analog zu der translatorischen Beziehung

$$F = \frac{m * v}{t} \quad (3.37)$$

kann man für die rotatorischen Größen folgende Beziehung festlegen:

$$M = \frac{J_R * \omega}{t} \quad (3.38)$$

Daraus folgt:

$$J_R = \frac{M * t}{\omega} \quad (3.39)$$

Für die Berechnung von J_R wird für $\omega = n_{max} * 2\pi$ und $t = \Delta t$ eingesetzt. M ist das Reibungsmoment und kann über den Leerlaufstrom und die Maschinenkonstante berechnet werden.

$$M_R = I_{LL} * c \quad (3.40)$$

Kapitel 4

Implementierung – Design

4.1 Auswahl der elektrischen Komponenten

4.1.1 Elektrische Maschine

In Elektrofahrzeugen werden bürstenlose Gleichstrommaschinen verwendet. Der hohe Wirkungsgrad und der geringe Verschleiß sind bei dem skalierten Fahrzeug jedoch weniger ausschlaggebende Kriterien. Grund für die Motorwahl ist die einfache Regelbarkeit einer permanentmagneterregten GM.

Das ausgewählte Modell ist ein Motor aus dem Modellsport mit einer maximalen Leistung von 185 W . Die maximale Drehzahl liegt bei der Betriebsspannung von $7,2\text{ V}$ bei $24000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$.

4.1.2 Energiespeicher

Für das Fahrzeug werden zwei Akkumulatoren benötigt. Ein sehr leistungsstarker Akkumulator liefert die Energie für den Antrieb. Lithium-Polymer-Zellen sind sehr empfindlich auf hohe Lastströme, Tiefentladung und Überladung. Eine eigene Akkumulatorüberwachung wäre notwendig. Ein Nickel-Metallhydrid-Akkumulator bietet weniger Kapazität bei gleichem Gewicht und gleicher Größe, dafür sind Lade- und Entladeströme unkritischer. Der Leistungsakkumulator hat sechs NiMh Zellen mit einer Nennspannung von $7,2\text{ V}$ und einer Kapazität von 2400 mAh .

Eine kleinere Version mit 1300 mAh ist für die Stromversorgung des FlexRay-Nodes zuständig. Grund für die separate Stromversorgung sind die relativ hohen Spannungseinbrüche der Leistungsversorgung bei hohen Strömen. Somit wird verhindert, dass es bei hoher Belastung zum Unterschreiten der minimalen Versorgungsspannung des FlexRay-Nodes kommt. Dies hätte eine fehlerhafte Messung und Kommunikationsunterbrechung zur Folge.

4.1.3 Messsensoren

Temperaturmessung

Die Wahl der Temperatursensoren fiel auf den Halbleitersensor LM35DZ [Sem00]. Durch die kompakte Bauform lässt er sich leicht an den gewünschten Stellen anbringen. Es ist keine zusätzliche Beschaltung nötig, lediglich eine Spannungsversorgung (V_s , GND) von 4 V bis 20 V . Der Ausgang liefert eine der Temperatur proportionale Spannung ($10\text{ mV}/^\circ\text{C}$).

toren. Unter der Plexiglasenebene, welche für Reglerplatine und sonstige Platinen gedacht ist, finden zwei Akkumulatoren mit jeweils sechs Zellen für die Leistungsversorgung sowie ein kleinerer für die Versorgung der Elektronik Platz.



Abbildung 4.2: 1:5 Modell mit Benzinantrieb

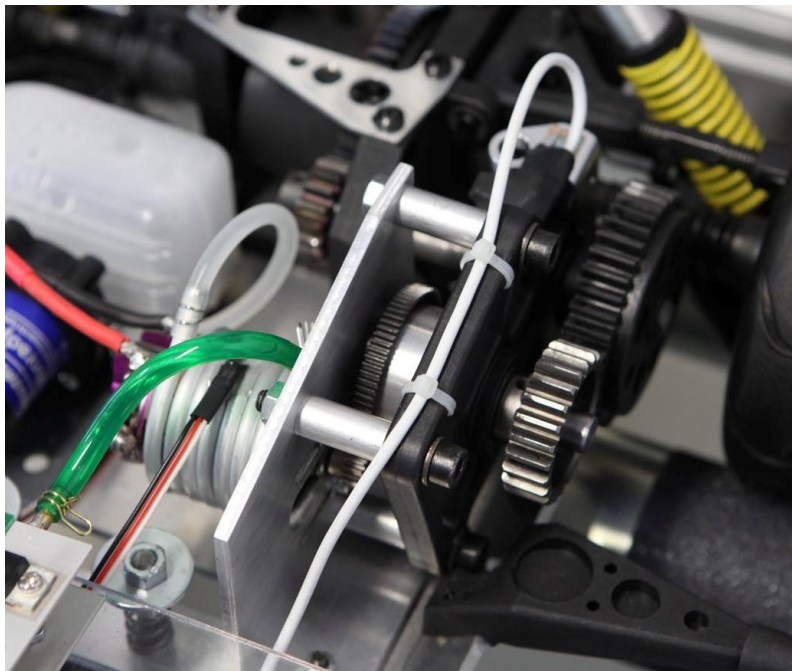


Abbildung 4.3: Motorhalterung und Getriebe

4.2.3 Wasserkühlung

Zweck der Co-Simulation ist, mehrere Simulationsplattformen unterschiedlicher physikalischer Teilgebiete zusammenzufassen und zeitlich zu synchronisieren. Um in späteren Ausbaustufen des Projekts auch thermodynamische Probleme zu behandeln, wird die Abfuhr der Verlustwärme von Regler und Motor durch eine Wasserkühlung gewährleistet. Abbildung A.1 zeigt unter anderem die Kühlkreislaufkomponenten wie Umlaufpumpe, Ausgleichsgefäß, Kühlschlange, Kühlkörper für den Regler und eine Ventilator-Kühlergrillkombination.

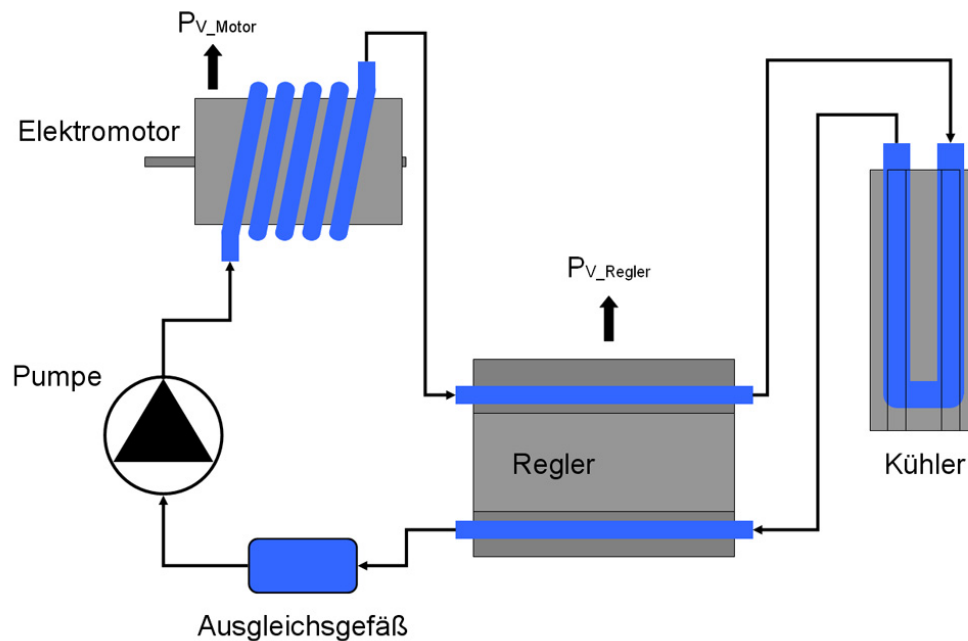


Abbildung 4.4: Komponenten der Wasserkühlung

4.3 Entwurf und Implementierung des Fahrzeug-Reglers

Das gesamte Microcontroller-Regler-System hat mehrere Aufgaben:

- Kommunikation mit einem PC über FlexRay-Bus
 - Senden von Fahrbefehlen
 - Übergabe der Messwerte an den PC (Strom, Spannung, Temperatur, Drehzahl)
 - Überwachung des Systems zur Gewährleistung des sicheren Betriebes
- Umsetzen der Akkumulatorspannung zur Regelung der Motordrehzahl und des Motormomentes
 - Messung der Akkumulatorspannung, um Tiefentladung zu verhindern

- Messung von Motorstrom und Motorspannung zur Leistungs- und Momentbestimmung
- Vergleich der tatsächlichen Drehzahl mit der gewünschten Drehzahl
- Rekuarationsmodus
 - Selbstständiges Erkennen einer möglichen Rückladung
 - Hochsetzen der Generatorspannung auf eine geeignete Ladespannung
 - Geschwindigkeitsregelung im Rekuarationsmodus
- Temperaturmessung
 - Messung der Temperaturen von Regler, Motor und Akkumulator, um eine Überhitzung zu verhindern
 - Zusätzliches Messen der Kühlmitteltemperatur zur Regelung des Kühlkreislaufes
- Bereitstellung mehrerer Ausgänge für Aktuatoren, wie Wasserpumpe oder Servomotoren

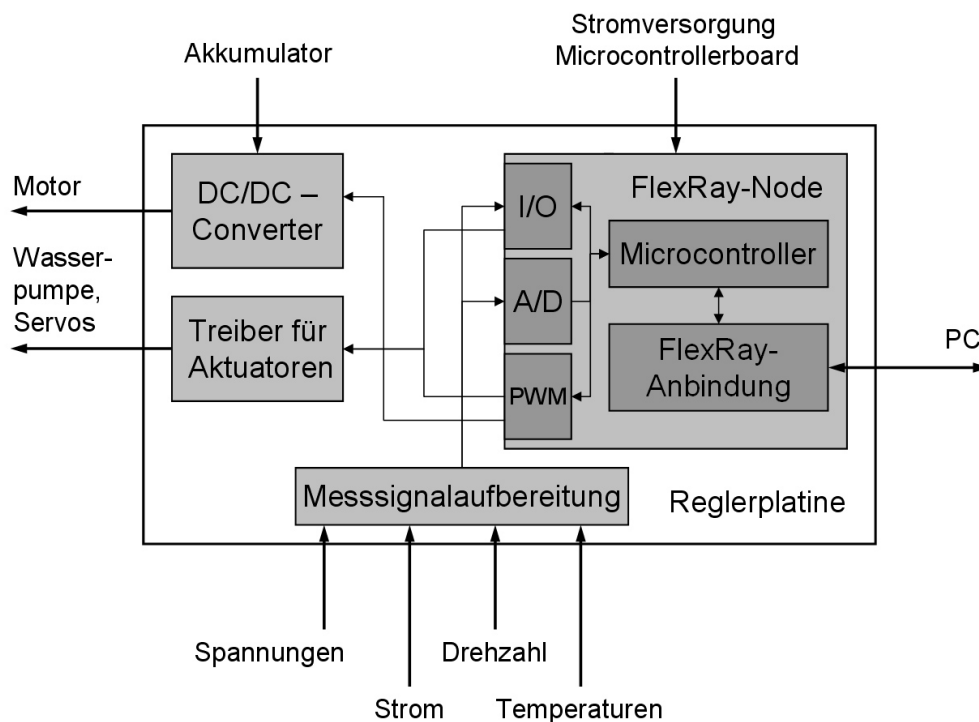


Abbildung 4.5: Schematischer Aufbau der Reglerplatine

4.3.1 FlexRax-Node [Pat10]

Der VIF-FlexRay-Node wird über drei Steckleisten auf die Reglerplatine aufgesteckt. Kern des Nodes ist ein ATMEL 128 Microcontroller [ATM11]. Aufgabe des Controllers ist vor

allein die digitale Regelung der Motordrehzahl, die Feststellung der momentanen Drehzahl über Impulse einer Gabellichtschranke sowie die A/D-Umsetzung der Temperatur-, Strom- und Spannungsmesswerte.

Für die Ansteuerung des Treiber-ICs der H-Brücke werden neben den einfachen I/O-Pins insgesamt drei PWM-Ausgänge des 16-bit Timer1 verwendet.

Die Strom-, Spannung- und Temperaturmessung (2xSpannung, 1xStrom, 5xTemperatur) erfolgt über die acht ADC-Kanäle des Microcontrollers, die Drehzahlmessung mittels Periodendauermessung am Interrupt INT1.

4.3.2 DC/DC-Umsetzer

Da der Elektromotor den Vierquantenbetrieb abdecken soll, ist der DC/DC-Umsetzer als H-Brücke realisiert. Diese deckt die Funktionen Vorwärts- und Rückwärts-Antrieb ab. Die Steuerung der FETs der H-Brücke erfolgt über den Treiber-IC HIP4081A, welcher über die PWM-Kanäle des Microcontrollers angesteuert wird. Die Ansteuerung der pulswidenmodulierten Transistoren erfolgt mit $7,8\text{ kHz}$.

Für den Generatorbetrieb, also den Rekuperationsmodus, ist ein Aufwärtswandler nachgeschaltet. Dieser setzt sich aus der Inneninduktivität des Motors, dem FET als Schalter und einer Diode zusammen. Sperrt der FET Q_5 (Abbildung: 4.6), ist der Motor kurzgeschlossen. Der durch das generatorische Prinzip entstehende Kurzschlussstrom lädt die Inneninduktivität auf. Beim Öffnen des Schalters (Q_5 leitet) fließt die in der Induktivität gespeicherte Energie in den Akkumulator. Im Zeitraum des Kurzschlusses entsteht an der Welle ein Moment, welches das Fahrzeug bremst. Durch Pulsweitenansteuerung von Q_5 kann so auf ein gewünschtes Bremsmoment geregelt werden.

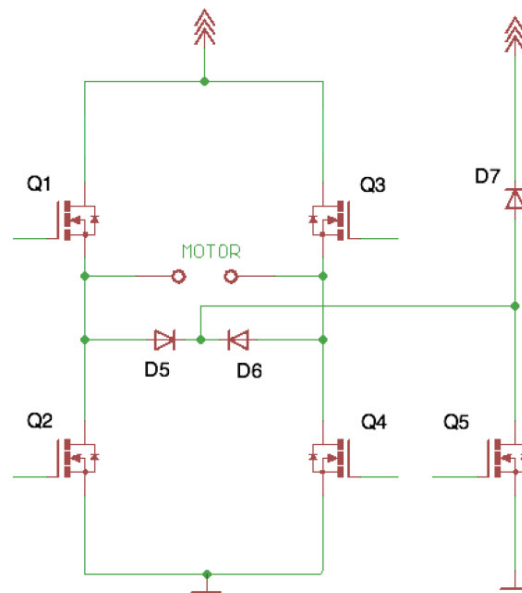


Abbildung 4.6: H-Brücke mit Aufwärtswandler [Sch11]

4.3.3 Strom- und Spannungsmessung

Die Motorstrommessung erfolgt über einen $1\text{ m}\Omega$ Shuntwiderstand. Die dadurch entstehende Spannung ist relativ klein und muss daher über einen Differenzverstärker auf ein brauchbares Level angehoben werden. Zusätzlich wird eine Offsetspannung von $2,5\text{ V}$ hinzu addiert, da positive und negative Ströme gemessen werden sollen. Der Motorstrom weist durch den getakteten Betrieb eine sehr hohe Welligkeit auf und muss durch einen Tiefpass geglättet werden, um vom A/D-Eingang des Microcontrollers richtig umgewandelt zu werden.

Die Spannungswerte Motorspannung und Akkuspannung werden ebenfalls über den A/D-Eingang eingelesen. Auch diese werden dem Pegel des Wandlers angepasst. Der Motorspannung wird gleich dem Motorstrom ein Offset von $2,5\text{ V}$ addiert, da diese auch negativ werden kann.

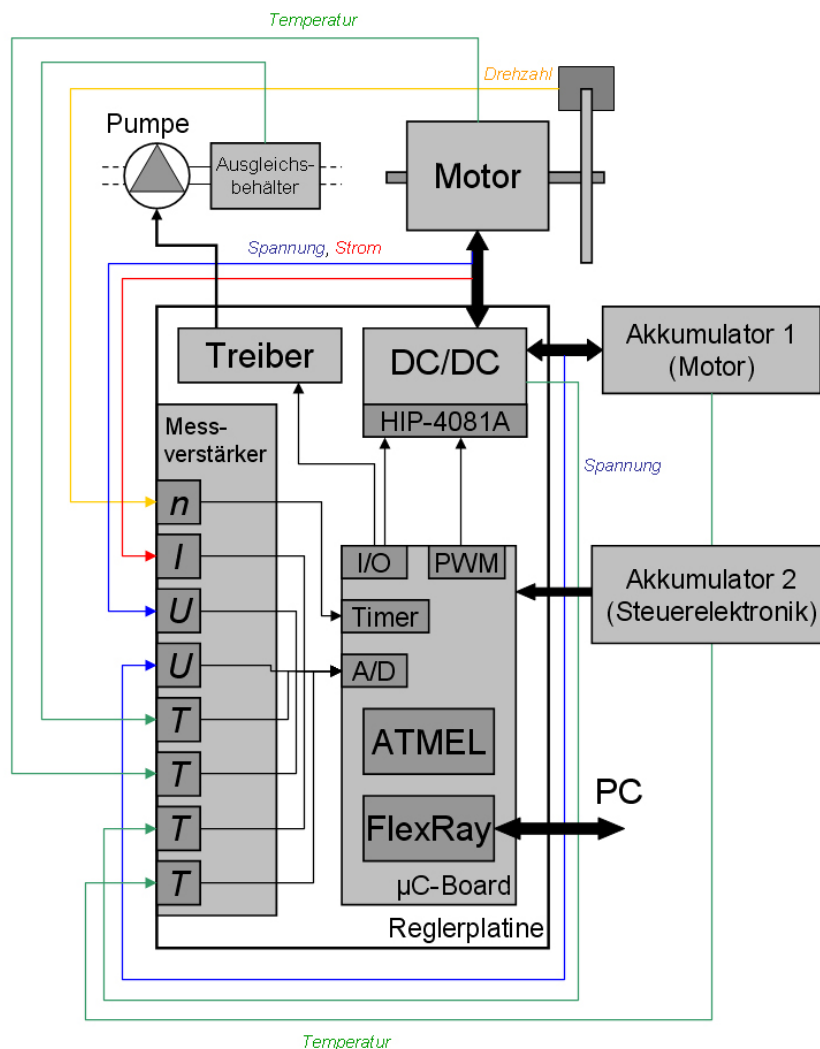


Abbildung 4.7: Überblick Gesamtsystem

4.4 Software

4.4.1 Regler

Für die Ansteuerung des Fahrzeuges gibt es folgende Modi:

FORWARD_SPEED.....Geschwindigkeitsregelung im Vorwärtsbetrieb (v)
REVERSE_SPEED.....Geschwindigkeitsregelung im Rückwärtsbetrieb (r)
RECUPERATE_FORWARD....Geschwindigkeitsregelung vorwärts durch Bremsen (l)
FORWARD_FIX_VALUE....Vorgegebener Duty-Cycle im Vorwärtsbetrieb (d)
REVERSE_FIX_VALUE....Vorgegebener Duty-Cycle im Rückwärtsbetrieb (e)
SAILING.....Fahrzeug inaktiv

Die Aufgabe der Reglersoftware ist, einerseits zu erkennen, in welchem Modus sich das Fahrzeug befindet (Antrieb oder Bremsung), andererseits soll eine vorgegebene Geschwindigkeit unabhängig vom vorhandenen Drehmoment am Rad möglichst schnell erreicht und gehalten werden.

Im Vergleich mit einem realen Fahrzeug, welches eine beliebige Art zu rekuperieren beherrscht, ist ein rein software-geregeltes Fahrzeug problematischer. Im realen Fahrzeug ist der eigentliche Regler der Bediener, dieser übernimmt die Entscheidung zwischen Gasgeben oder Bremsen und regelt selbst die Geschwindigkeit über den Tachometer. Im ersten Schritt muss also ein software-geregeltes Fahrzeug entscheiden, ob die gewünschte Geschwindigkeit durch Antreiben oder Bremsen erreicht werden kann. Eine Bremsung (diese ist automatisch mit Rekuperation verbunden) kann nur dann erfolgen, wenn die gewünschte Geschwindigkeit geringer ist als die momentane Ist-Geschwindigkeit und das Moment am Rad negativ ist, also entsprechend einer Bergabfahrt oder einer ausreichend starken Bremsung. Im Falle des Betriebes auf dem Rollenprüfstand bedeutet das, dass die Rolle durch Antreiben auf ein gewünschtes Moment regelt. Die Umschaltsschwellen, bei denen zwischen den beiden Moden gewechselt wird beschreiben eine Hysterese, da ansonsten bei kleinen Geschwindigkeitsschwankungen sehr unruhige Verläufe in der Geschwindigkeit und im Motorstrom zu beobachten sind. Dies folgt aus dem Zeitaufwand des Umschaltens zwischen den Modi.

Sämtliche Geschwindigkeitsangaben in der Software sowie in den FlexRay-Frames sind nicht an die Skalierung des Fahrzeuges angepasst, d.h. sämtliche Angaben in den Quellcodes sind um den Faktor 5 größer als die tatsächliche Geschwindigkeit.

Quellcode für den Modiwechsel:

```
if ( roller_speed_ > ( roller_value_ + 4 ) && roller_value_ > 9 )  
    new_mode = RECUPERATE_FORWARD;  
  
if ( roller_speed_ <= ( roller_value_ - 4 ) )  
{
```



```

new_mode = FORWARD_SPEED;

    if ( roller_mode_ == RECUPERATE_FORWARD )
        dc_save = TRUE;
}
break;
roller_speed_...gemessene Geschwindigkeit
roller_value_...vorgegebene Geschwindigkeit

```

Die eigentliche Geschwindigkeitsregelung erfolgt über einen PI-Regler. Im Modus *Antrieb* sieht dieser wie folgt aus:

Quellcode des Antriebreglers:

```

error = roller_value_ * 100 - roller_speed_ * 100;
u = u_alt + error * 0.0007 + 0.002 * error_alt;

```

Die Regelabweichung **error** ist die Differenz aus der vorgegebenen und der gemessenen Geschwindigkeit. Der Faktor 100 ermöglicht eine höhere Auflösung in der Berechnung (*FixPoint*). **u** und **u_alt** sind die Duty-Cycle-Werte für die PWM-Ansteuerung der Leistungstransistoren. Bei voller Aussteuerung wäre **u** gleich 25500 (8bit * 100), also *DC* = 1.

Äquivalent dazu der Bremsregler:

Quellcode des Bremsreglers:

```

if ( dc_save )
    {
        dc_save = FALSE;
        u_alt = roller_speed_ * 300;
    }
else
    u_alt = 0;

....
error = -(roller_value_ * 100 - roller_speed_ * 100);
u = u_alt + error * 0.005 + 0.01 * error_alt;

```

Der so erhaltene DC-Wert schaltet im Antriebsmodus den linken oder rechten oberen Transistor der H-Brücke an (rückwärts oder vorwärts fahren). Im Bremsmodus wird der Bremstransistor geschaltet, welcher zusammen mit der Diode den Aufwärtswandler für die Rekuperation bildet.

Wechselt der Betriebsmodus von Bremsen auf Antreiben, würde das einen massiven Einbruch in der Geschwindigkeit zur Folge haben. Dieses Problem entsteht dadurch, dass nach der Umschaltung des Modus der DC-Wert wieder von 0 weg hochgerechnet wird. Die Variable `dc_save`, welche in diesem Fall gesetzt wird, bewirkt das Setzen von `u_alt` auf einen von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängigen DC-Wert.

4.4.2 FlexRay-Interface [Sch11]

Die gesendeten und empfangenen Variablen werden in jeweils einen Frame mit 32 Byte geschrieben.

Input-Frame:

- `Auto_Mode`
- `Auto_Value`

Output-Frame:

- `Auto_MotorCurrent`
- `Auto_MotorVoltage`
- `Auto_Moment`
- `Auto_RotationSpeed`
- `Auto_SupplyVoltage`
- `Auto_Temp1` bis `Auto_Temp5`
- `Auto_Info`

Ein möglicher Sendebefehl wäre z.B.: `v010`. Der Befehl würde eine Vorwärtsregelung des Fahrzeuges mit $2\frac{km}{h}$ zur Folge haben (Faktor 5 für die Skalierung).

Für die Übertragung von positiven und negativen Gleitkommazahlen werden die Messwerte mit 100 multipliziert und ein Offset von 10000 dazugezählt.

Beispiel: $-25,50 \equiv 7450$

4.4.3 Überwachung von Strom und Spannungen

Ein Motorstrom über $30 A$ bewirkt ein sofortiges Stoppen des Programmes. Diese Stromstärke könnte nach einer gewissen Zeit zu Schäden an Motor, Leistungselektronik oder Akkumulator führen. Die Messung wird über die Software gefiltert, da ansonsten einmalige Messfehler und Stromspitzen zum wiederholten Abbruch führen würden.

Um den Akkumulator vor Tiefentladung zu schützen, wird bei einer Akkuspannung von $4,5 V$ (tritt nur bei Belastung auf) in den Modus *SAILING* geschaltet.

4.4.4 Thermische Überwachung – Kühlkreislauf

Die drei am Fahrzeug angebrachten Temperatursensoren befinden sich am Kühlkörper des Reglers (Leistungstransistoren), an der Kühlschlange des Motors und im Kühlmittel-Ausgleichsgefäß. Die Pumpe des Kühlkreislaufes schaltet sich bei einem Schwellwert des Reglers oder des Motors von 40°C ein, abgeschaltet wird erst bei einer Abkühlung auf 38°C . Sollte bei längerer Beanspruchung der Leistungskomponenten das Kühlmittel über 36°C erreichen, sorgen die zwei Ventilatoren am Kühlergrill für zusätzliche Wärmeabfuhr. Diese ist aktiv, bis die Temperatur im Ausgleichsgefäß auf 34°C abgesunken ist. Bei Ausfall des Kreislaufes und Überschreiten der Motortemperatur bzw. Reglertemperatur wird automatisch der Motor gestoppt und eine Fehlermeldung ausgegeben.

Kapitel 5

Messergebnisse

5.1 Kennwerte der Betriebsmodi

5.1.1 Antrieb

In der folgenden Kennlinie ist die gemessene Leistung der GM des Fahrzeuges im motorischen Betrieb dargestellt. Das vorhandene Bremsmoment wird nicht elektrisch erzeugt, sondern wird rein durch das Leerlaufmoment der Rolle hervorgerufen (inklusive Reibung der Reifen).

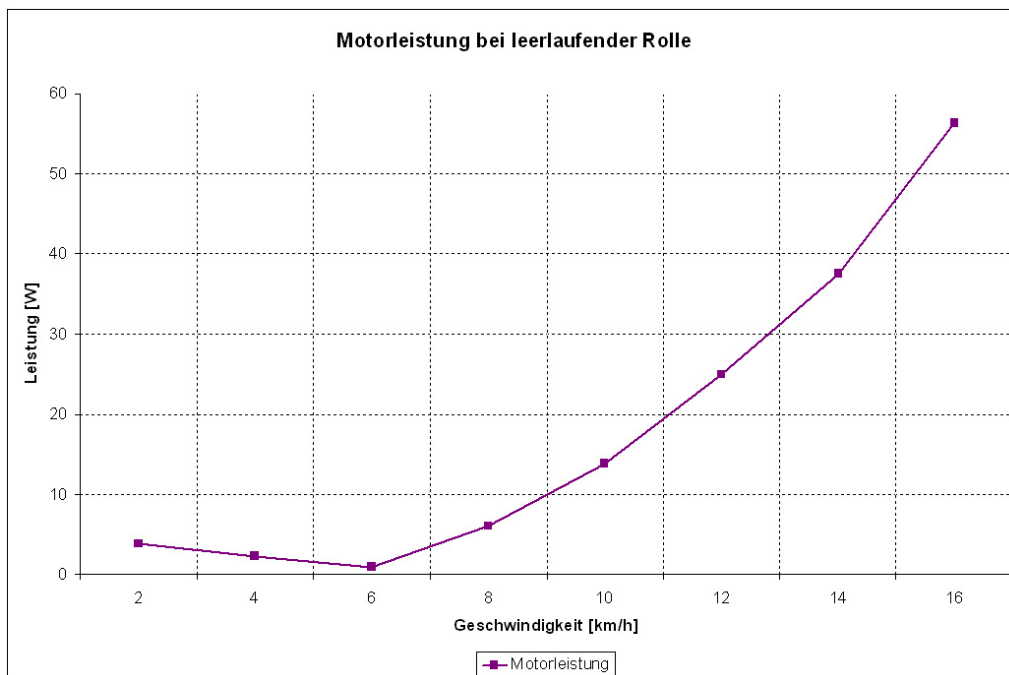


Abbildung 5.1: Motorleistung des Fahrzeuges auf leerlaufender Rolle

5.1.2 Rekuperation

Die folgende Oszilloskopaufnahme zeigt die zwei Zeitabschnitte des Aufwärtswandels für eine erfolgreiche Rekuperation. Im längeren Zeitabschnitt sind die Klem-

men der GM kurzgeschlossen. In der kürzeren Zeit, in der die Klemmen mit dem Akkumulator verbunden sind, ist die Spannung U_M höher als die Akkumulatorspannung U_A . In diesem Abschnitt findet der Stromfluss in den Glättungskondensator statt.

Kennwerte:

Fahrzeuggeschwindigkeit: $8 \frac{km}{h}$

Moment an der Hinterachse: $-100 Ncm$

Frequenz der PWM: $7,8 KHz$

gemessener Ladestrom: $780 mA$

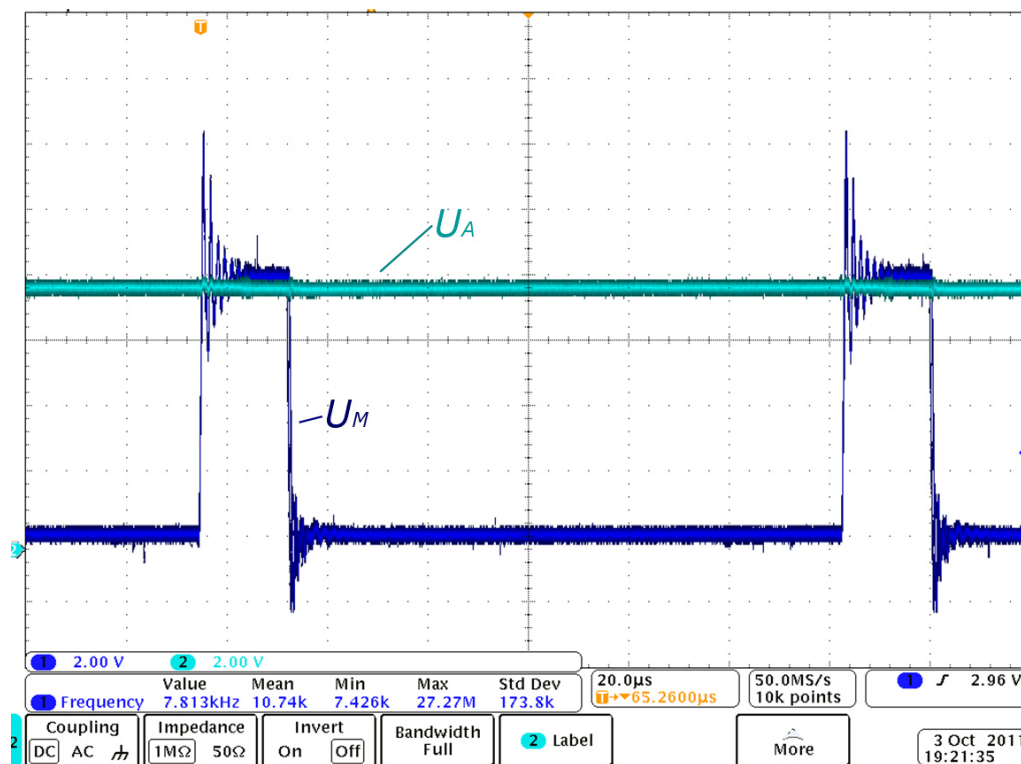


Abbildung 5.2: Oszilloskopaufnahme der Klemmen- und Akkumulatorspannung

Das Hochsetzen der Motorspannung ist mit Verlusten verbunden. Um eine Vorstellung zu bekommen, zu welchem Grad sich diese Verluste auswirken, wird die im generatorischen Betrieb gemessene Motorleistung mit der Leistung verglichen, welche tatsächlich am Eingang des Akkumulators anliegt (Rekuperationsleistung).

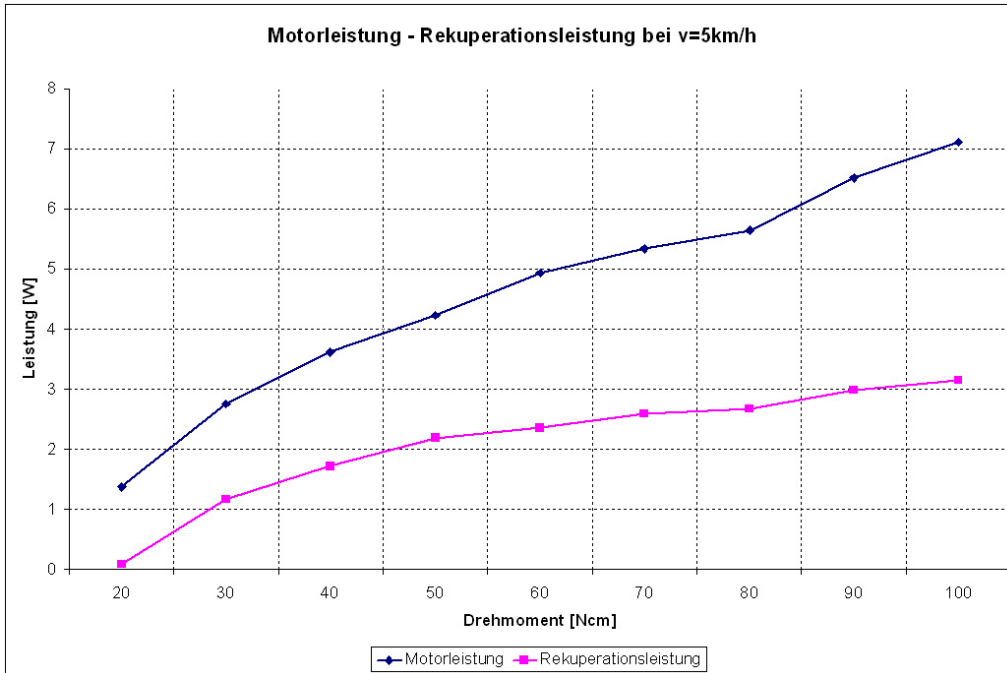


Abbildung 5.3: Motorleistung und Rekuperationsleistung bei $v = 5 \frac{km}{h}$

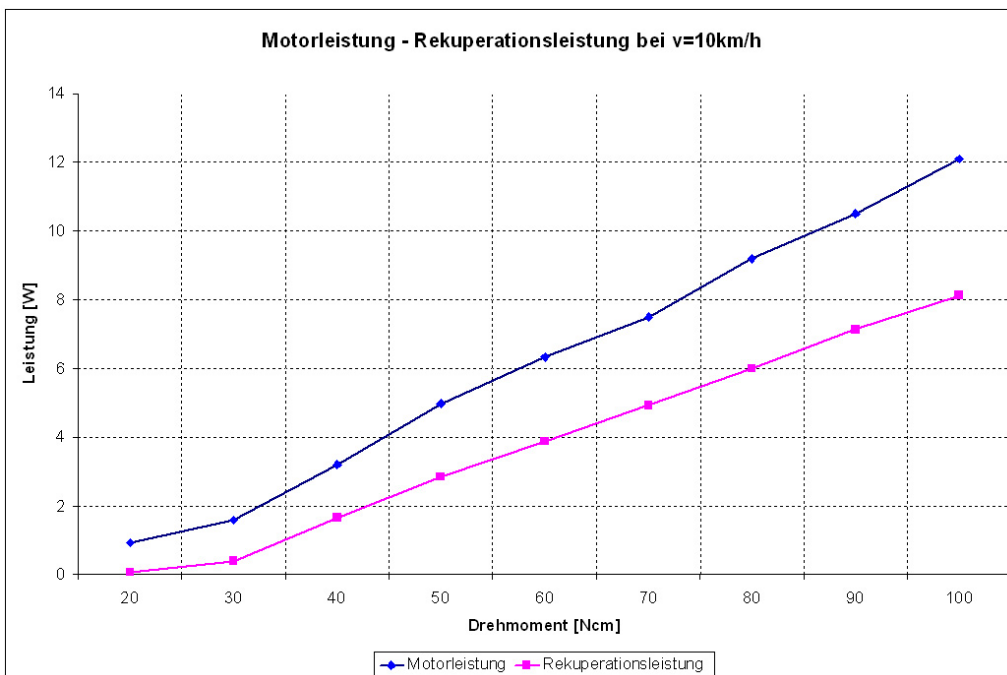


Abbildung 5.4: Motorleistung und Rekuperationsleistung bei $v = 10 \frac{km}{h}$

Aus diesen Messdaten wird der Wirkungsgrad des Aufwärtswandlers bestimmt – dargestellt in Abbildung 5.5

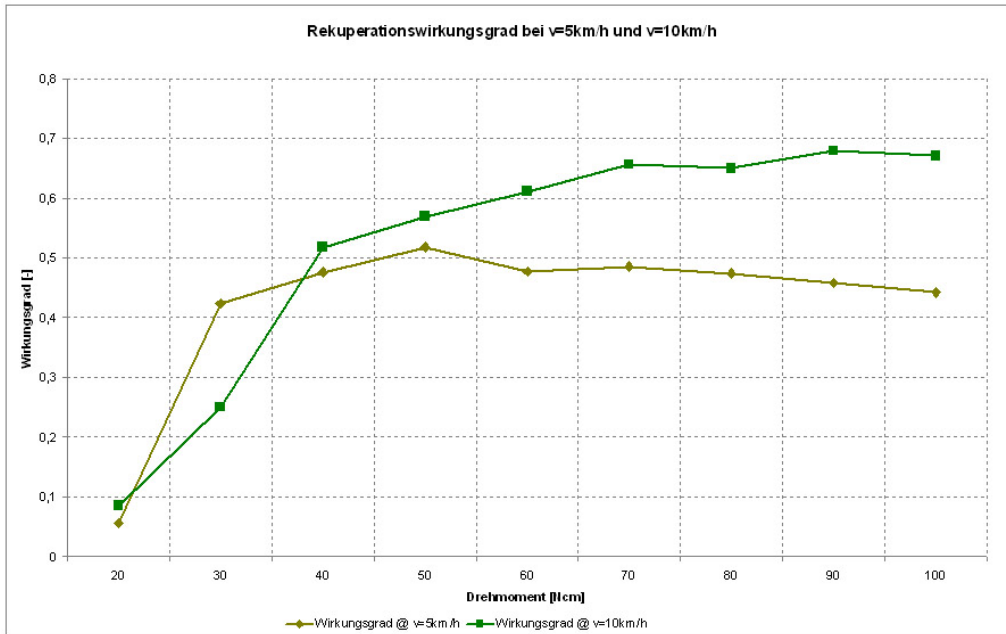


Abbildung 5.5: Wirkungsgrad des Aufwärtswandlers bei $v = 5 \frac{km}{h}$ und $v = 10 \frac{km}{h}$

5.2 Eigenschaften der Regelung

Die folgenden Kennlinien sind über einen am FlexRay-Bus angeschlossenen Bus-Doktor gemessen. Für sämtliche Messungen steht das Fahrzeug am leerlaufenden Rollenprüfstand.

In Abbildung 5.6 sieht man das kurze Einschwingen bei Geschwindigkeitsänderungen sowie den Einbruch des Motorstromes bei größeren Änderungen nach unten. Dieser Einbruch ist auf den Moduswechsel zurückzuführen. Wird die gewünschte Geschwindigkeit herabgesetzt, kann durch die Trägheit der Räder und des Antriebstranges eine Differenz zwischen Istwert und Sollwert von $> 4 \frac{km}{h}$ entstehen. In diesem Fall versucht das Fahrzeug zu rekuperieren und schaltet in den Bremsmodus. Erst bei einem Absinken unter den Sollwert wird wieder zurück in den Antriebsmodus gewechselt.

Das Fahrzeug reagiert auf Veränderungen des Bremsmomentes, welches der Rollenprüfstand erzeugt, auf ähnliche Weise (Abbildung 5.7). Bei einem Antreiben der Rolle entsteht je nach Moment und Geschwindigkeitssollwert ein unterschiedlicher Rekuperationsstrom. Dieser wird am Motor gemessen und darf nicht mit dem Laststrom verwechselt werden.

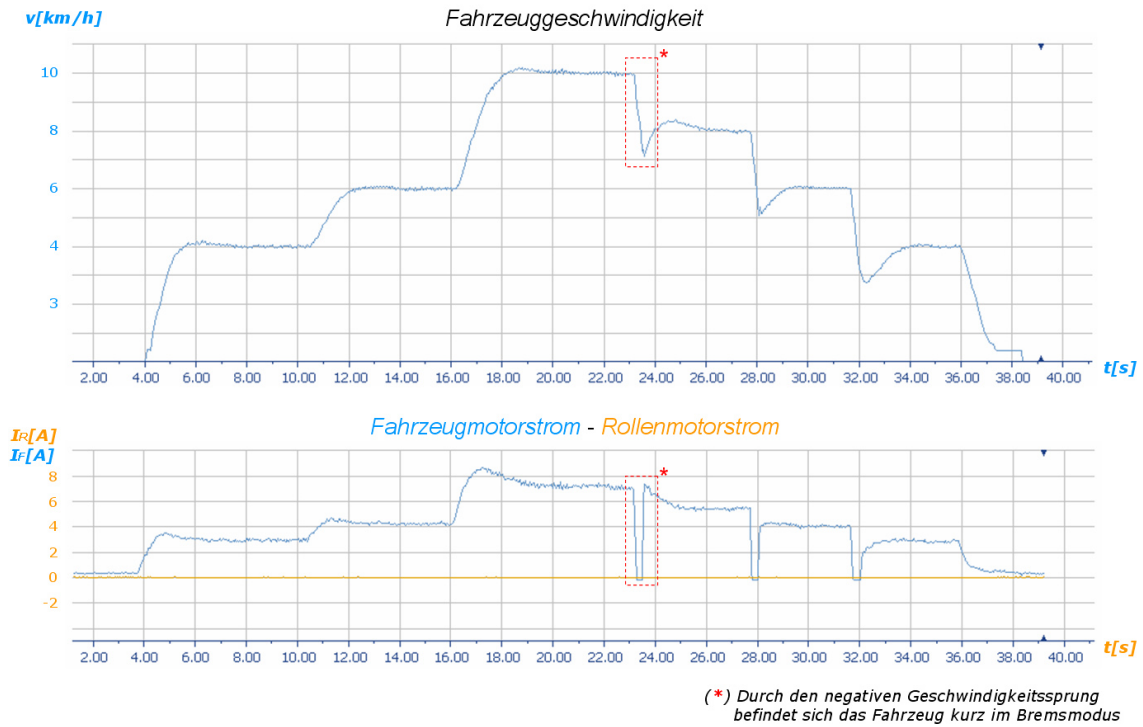


Abbildung 5.6: Verlauf der Regelgrößen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

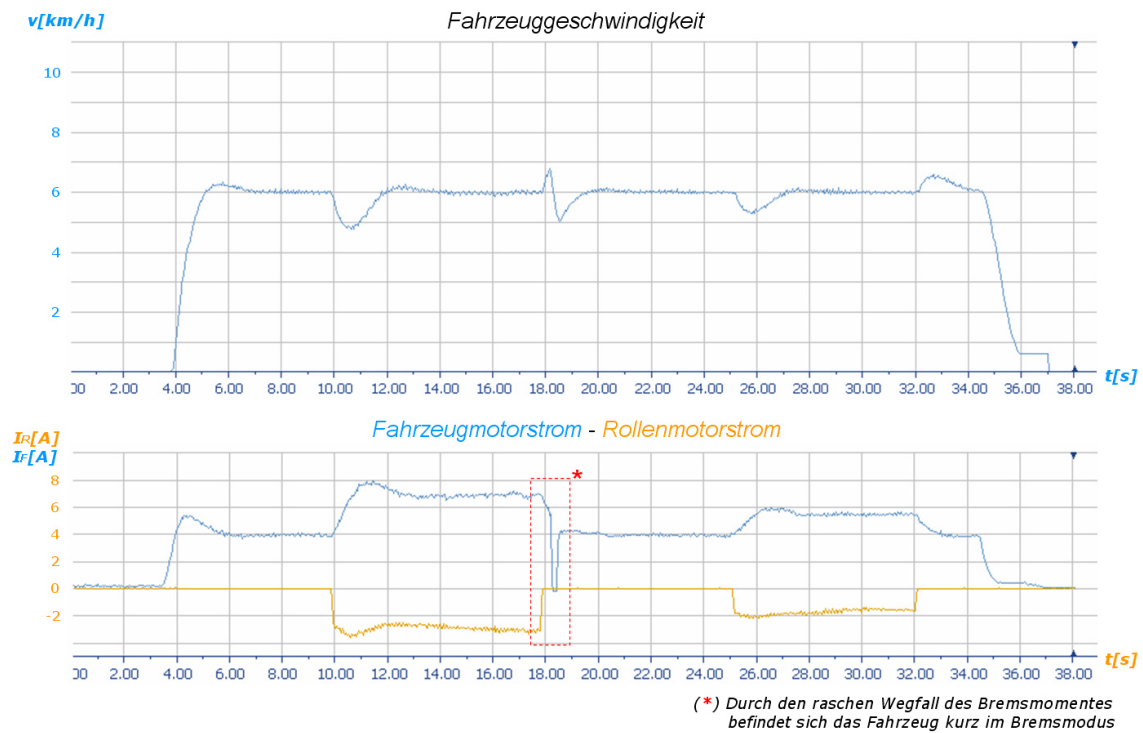


Abbildung 5.7: Regeldynamik bei verschiedenen Bremsmomenten

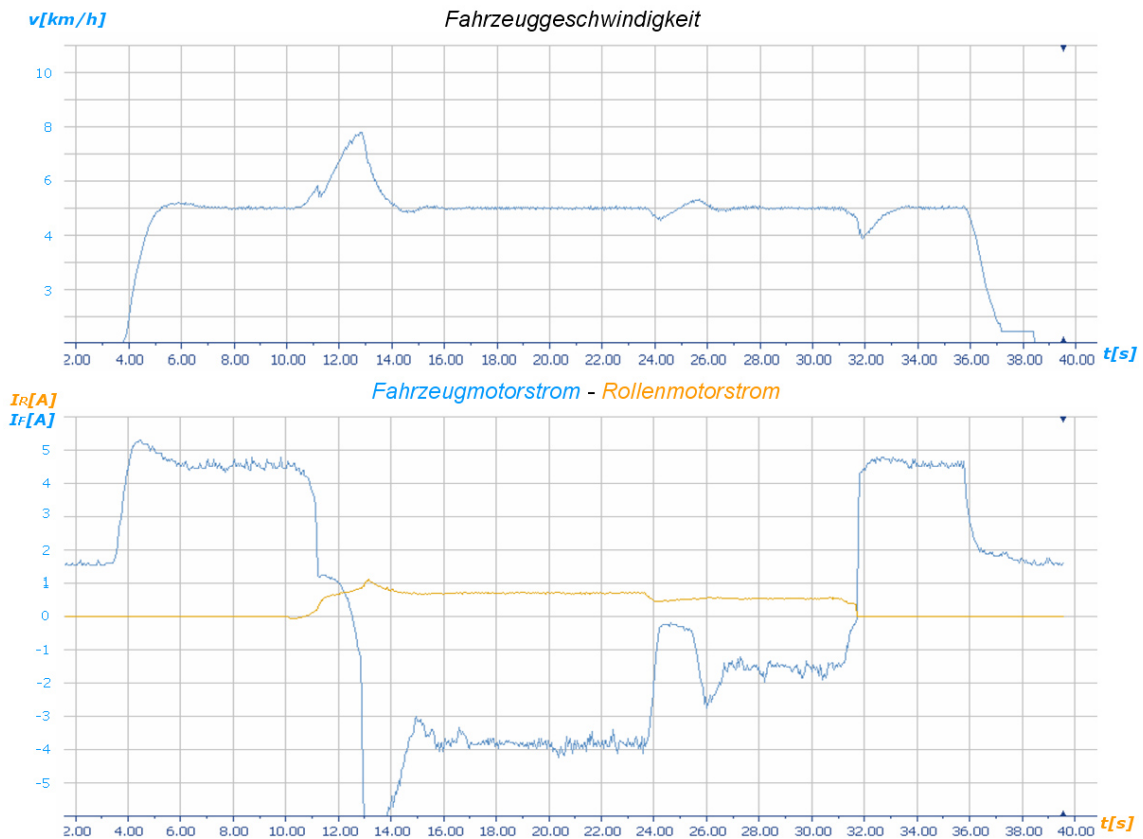


Abbildung 5.8: Rekuperationsstrom bei unterschiedlichen Antriebsmomenten

5.3 Fahrzyklus

Im nächsten Schritt werden Motorleistung und Akkumulatorspannung während eines *Europa City*-Fahrzyklus beobachtet. Um diesen korrekt abzufahren, wird zu jedem einzelnen Zeitschritt (100 ms) die Geschwindigkeit an das Fahrzeug und das dazu errechnete Drehmoment an die Rolle gesendet. Die Berechnung des jeweiligen Momentes geht aus Gleichung 3.25 hervor.

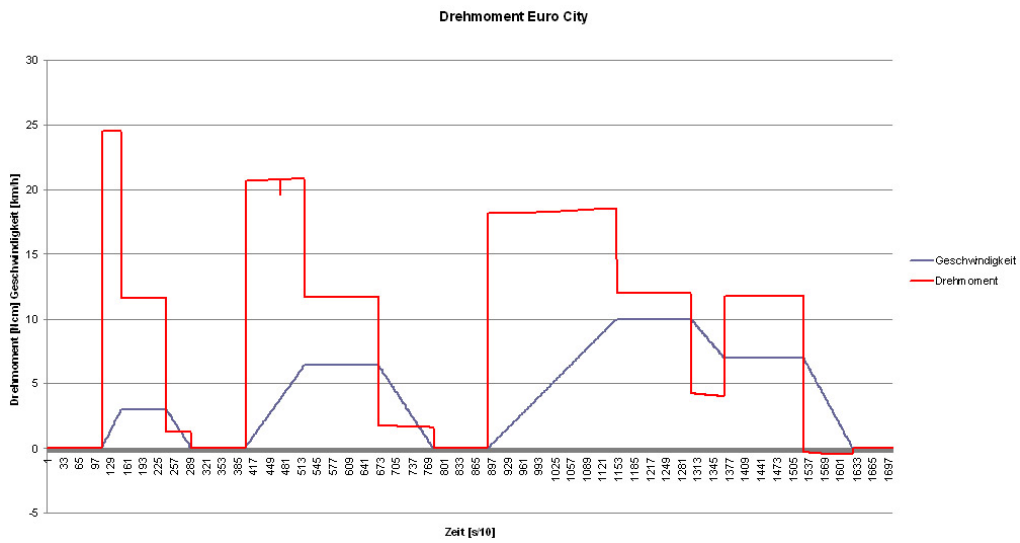


Abbildung 5.9: Errechnetes Drehmoment für den *Europa City*-Fahrzyklus

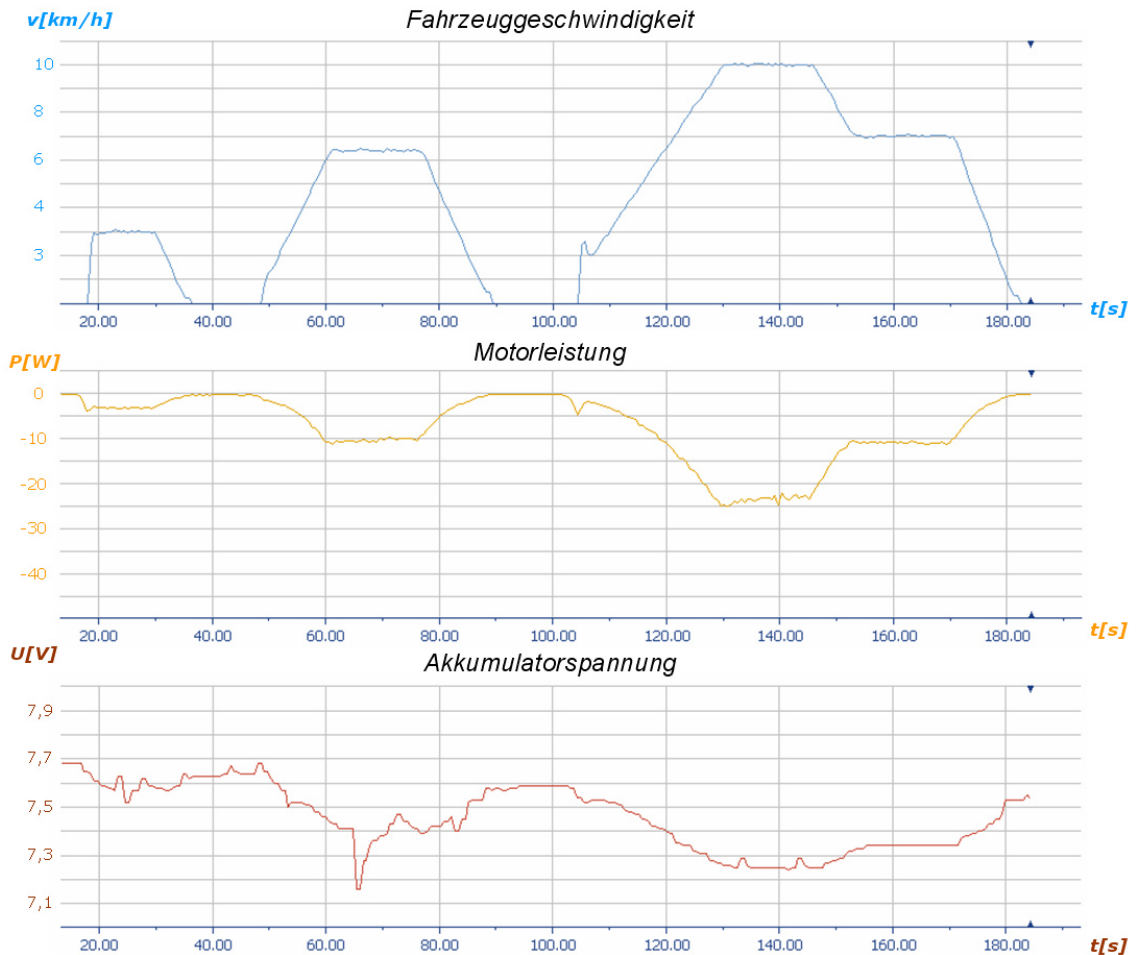


Abbildung 5.10: Motorleistungs- und Akkumulatorspannungsverlauf während des *Europa City*-Fahrzyklus

Kapitel 6

Simulation

6.1 Simulationsaufbau

Die Grundlage der Simulation des 1:5 Modellfahrzeuges bildet eine Matlab/Simulink-Simulationstoolbox auf quasistationärer Basis. Die einzelnen Funktionseinheiten des Fahrzeuges wie Motor und Energiespeicher sind als Blöcke mit Ein- und Ausgängen ausgeführt und können je nach Fahrzeugtyp zusammengesetzt werden. Die Parameter müssen auf das skalierte Fahrzeug angepasst werden.

In Abbildung 6.1 ist der Blockaufbau des Elektrofahrzeuges dargestellt.

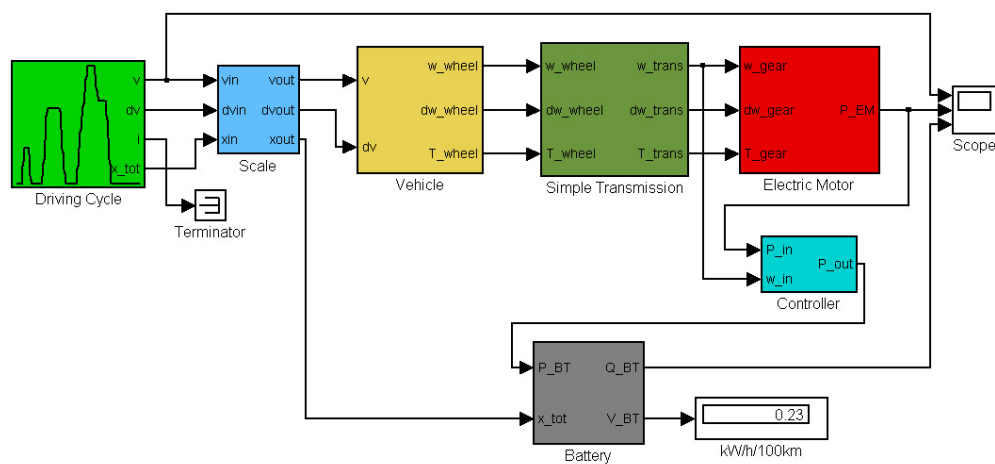


Abbildung 6.1: Blockaufbau Elektrofahrzeug

6.1.1 Elektrischer Motor

- Eingänge

w_{gear} Geschwindigkeit der Getriebewelle [$\frac{rad}{s}$]

dw_{gear} Beschleunigung der Getriebewelle [$\frac{rad}{s^2}$]

T_{gear} Drehmoment der Getriebewelle [Nm]

- Ausgänge

P_{EM} Motorleistung [W]

- Parameter

sk Skalierungsfaktor [$-$]

$theta_{EM}$ Trägheitsmoment [kgm^2]

P_{aux} Leistung von eventuellen Hilfsaggregaten [W]

Der im Auto montierte permanentmagneterregte Gleichstrommotor wird über Trägheitsmoment und eine Drehzahl/Drehmoment/Wirkungsgrad-Matrix in seinen Eigenschaften abgebildet.

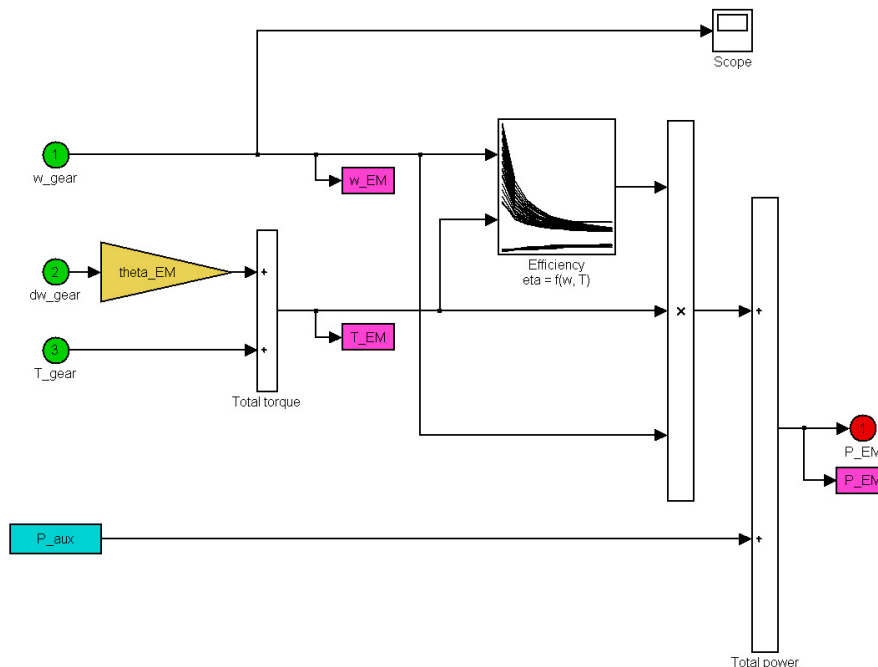


Abbildung 6.2: Simulationsblock elektrischer Motor [AA05]

6.1.2 Akkumulator

- Eingänge

x_{tot} totale Distanz [m]

P_{BT} Leistung vom/zum Akkumulator [W]

- Ausgänge

Q_{BT} momentane Ladung [C]

V_{BT} Energieverbrauch [$\frac{kWh}{100 km}$]

- Parameter

C_0 Kapazität [Ah]

C_i Anfangsladung [%]

t_{max} minimale Zeit zum Laden/Entladen [min]

Um die Lade- und Entladeeigenschaften des verwendeten Akkumulators zu beschreiben, werden die einzelnen Lade- und Entladekurven bei verschiedenen SOC's durch Geraden substituiert. Die Messwerte der Zelle werden in einem Zyklisierer gemessen.

Für den Ladevorgang gilt Folgendes [AA05]:

SOC:

$$q(kh) = \frac{Q(kh)}{Q_0} \quad (6.1)$$

Q_0 ist die angegebene Kapazität der Zelle.

Laderate:

$$c(kh) = \frac{i(kh)}{i_0} \quad (6.2)$$

i_0 ladet die Zelle in einer Stunde.

Es ergibt sich ein Ladeverlauf der Spannung u_{BL} :

$$u_{BL}(kh) = u_{1L}(c(kh)) * q(kh) + u_{0L}(c(kh)) \quad (6.3)$$

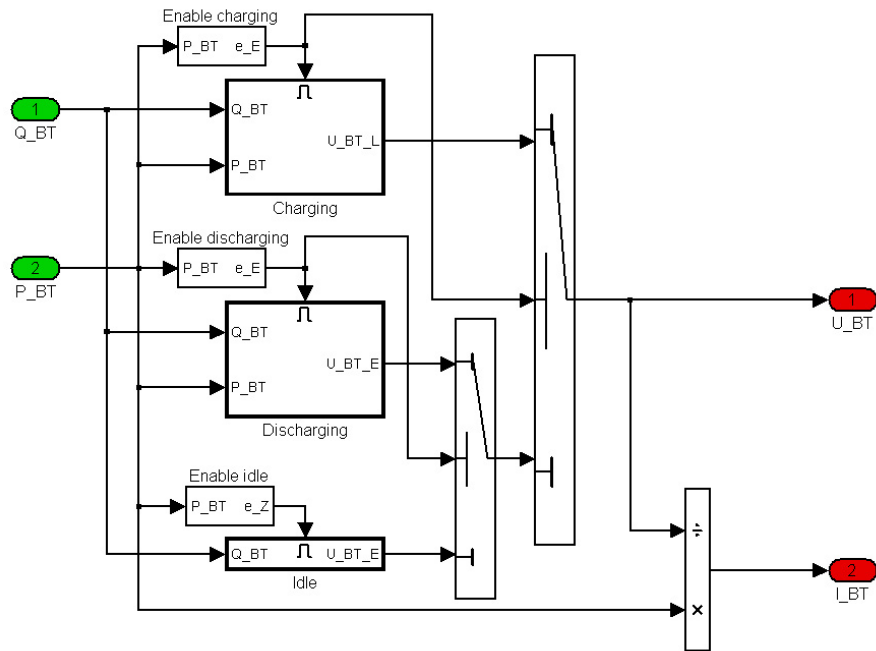


Abbildung 6.3: Simulationsblock Akkumulator [AA05]

$$u_{1L}(c(kh)) = c_{L4} * c(kh) + c_{L3} \quad (6.4)$$

$$u_{0L}(c(kh)) = c_{L2} * c(kh) + c_{L1} \quad (6.5)$$

Für das Entladen sind die Formeln äquivalent:

$$u_{1E}(c(kh)) = c_{E4} * c(kh) + c_{E3} \quad (6.6)$$

$$u_{0L}(c(kh)) = c_{E2} * c(kh) + c_{E1} \quad (6.7)$$

Außerdem gilt:

$$c_{E1} = c_{L1}, \quad c_{E3} = c_{L3} \quad (6.8)$$

k Rechenschritt [–]

h Schrittweite [s]

Diese acht Parameter bestimmen die Lade- und Entladekurven.

6.1.3 Fahrzeug

- Eingänge

v Geschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]

dv Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]

- Ausgänge

w_{wheel} Radgeschwindigkeit [$\frac{rad}{s}$]

dw_{wheel} Radbeschleunigung [$\frac{rad}{s^2}$]

T_{wheel} Drehmoment am Rad [Nm]

- Parameter

m_f Masse des Fahrzeuges [kg]

$mt2m_f$ rotierende Masse [%]

A Frontfläche des Fahrzeuges [m^2]

r_{wheel} Radradius [m]

c_w Strömungswiderstandskoeffizient [–]

μ Reibungskoeffizient [–]

Der gesamte Widerstand, welcher dem Fahrzeug entgegen wirkt, lässt sich in vier Gruppen unterteilen:

- Widerstand durch den Luftwiderstand
- Widerstand durch Rollreibung
- Trägheit
- Zusätzlicher Widerstand durch Steigungen

Da sämtliche Fahrzyklen keine Steigungen berücksichtigen, werden diese im Simulationsblock vernachlässigt.

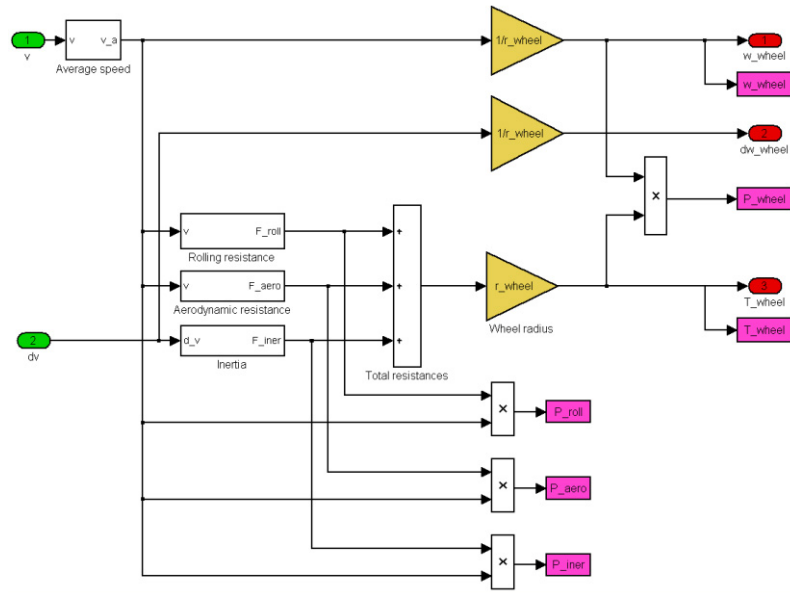


Abbildung 6.4: Simulationsblock Fahrzeug [AA05]

6.1.4 Getriebe

- Eingänge

w_{wheel} Radgeschwindigkeit [$\frac{rad}{s}$]

dw_{wheel} Radbeschleunigung [$\frac{rad}{s^2}$]

T_{wheel} Drehmoment des Rades [Nm]

- Ausgänge

w_{trans} Geschwindigkeit der Getriebewelle [$\frac{rad}{s}$]

dw_{trans} Beschleunigung der Getriebewelle [$\frac{rad}{s^2}$]

T_{trans} Drehmoment der Getriebewelle [Nm]

- Parameter

$gear_{ratio}$ Übersetzung [–]

e_{GT} Effizienz [–]

P_{GT0} Verlustleistung [W]

w_{min} Minimalgeschwindigkeit, bei welcher Verluste entstehen [$\frac{rad}{s}$]

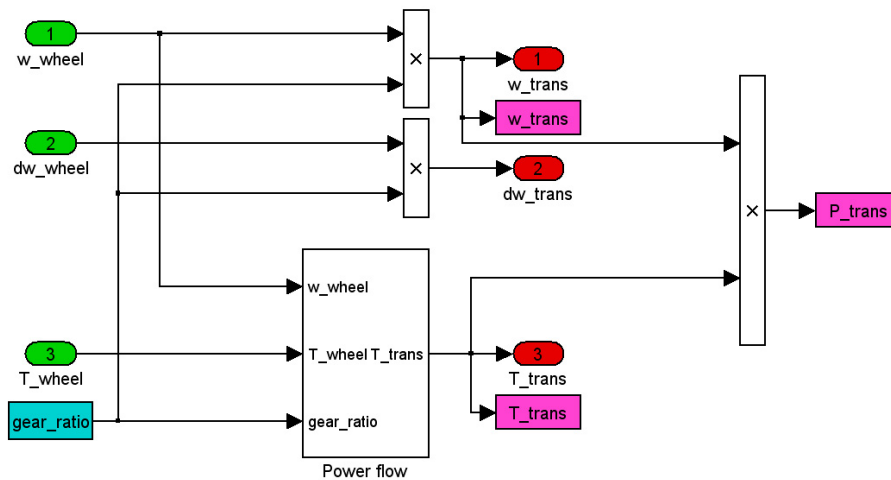


Abbildung 6.5: Simulationsblock Getriebe [AA05]

Die Verlustleistung errechnet sich aus der Beziehung:

$$P_A = e_{GT} * P_E - P_0 \quad (6.9)$$

P_A und P_E repräsentieren die nach außen gehenden und eingehenden Leistungen des Systems. Die Eigenschaften des Getriebes müssen für die beiden Fälle des Antriebes (Antrieb vom Motor, Antrieb vom Rad) separat betrachtet werden.

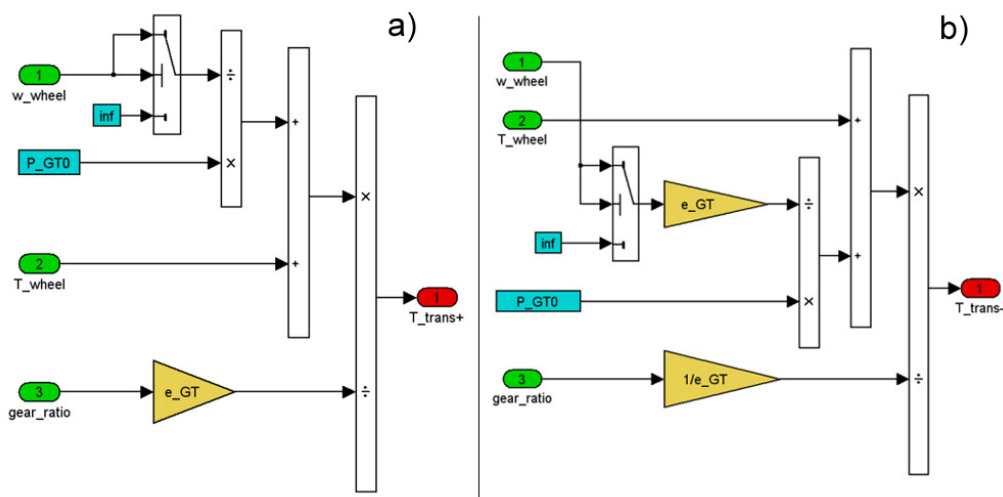


Abbildung 6.6: a) Motor-Rad-Antrieb b) Rad-Motor-Antrieb [AA05]

6.1.5 Fahrzyklus

- Ausgänge

v Geschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]

dv Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]

x_{tot} totale Distanz [m]

- Parameter

h Schrittweite [s]

$cycle$ Fahrzyklus [$-$]

Im Block *Fahrzyklus* können verschiedene internationale Fahrzyklen ausgewählt werden. Definiert werden sie durch zwei Vektoren:

1. Zeitvektor
2. Geschwindigkeitsvektor

Die Beschleunigung des Fahrzeuges errechnet sich aus der Ableitung der Geschwindigkeit über die Zeit. Das entspricht in der zeitdiskreten Betrachtung der Differenz der Geschwindigkeit zweier Rechnungsschritte durch die Schrittweite:

$$a_f(kh) = \frac{v_f(kh + h) - v_f(kh)}{h} \tag{6.10}$$

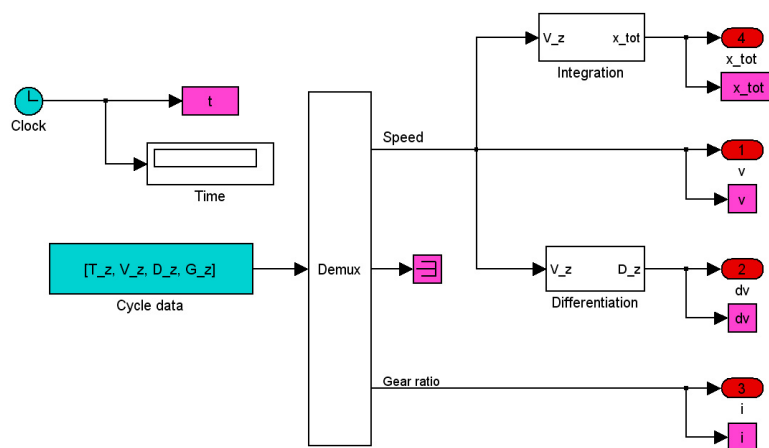


Abbildung 6.7: Simulationsblock Fahrzyklus [AA05]

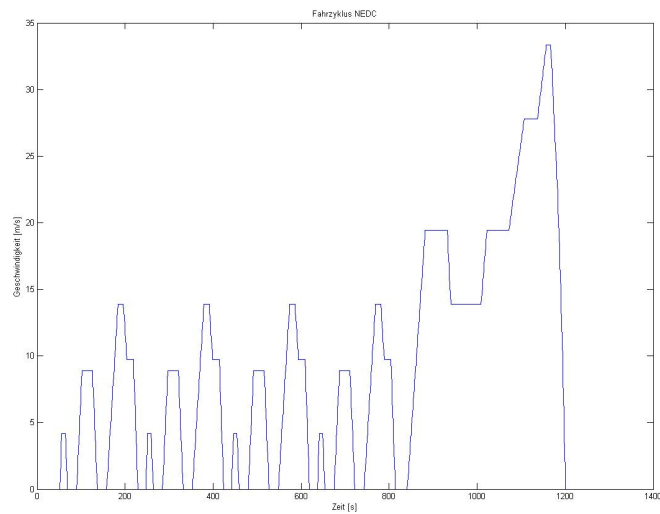


Abbildung 6.8: Beispiel eines Fahrzyklus (NEDC) [AA05]

6.1.6 Umsetzer

Der Umsetzer weist beim Antreiben und Rekuperieren Verluste auf. Im Block *Umsetzer* werden diese durch den Wirkungsgrad beim Tief- und Hochsetzen der Spannung berücksichtigt.

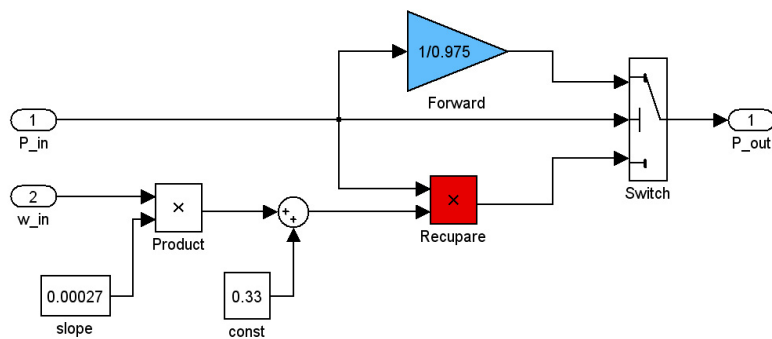


Abbildung 6.9: Simulationsblock Umsetzer

6.2 Parametrisierung

6.2.1 Elektrischer Motor

Innenwiderstand und Maschinenkonstante

Aus zwei unterschiedlichen Lastzuständen können zwei Gleichungen der Leistungsbilanz (Gleichung 3.27) aufgestellt werden.

$U_M[V]$	$I_M[A]$	$n[1/s]$
<i>Leerlauf</i>		
3	2,11	180
<i>Belastet</i>		
3	14,32	88

Tabelle 6.1: Messwerte zweier Lastzustände

$$I : 3 = 2,11 * R_i + 2 * \pi * c * 180 \quad (6.11)$$

$$II : 3 = 14,32 * R_i + 2 * \pi * c * 88 \quad (6.12)$$

Daraus ergibt sich für die Kennwerte der Gleichstrommaschine:

$$R_i = 0,115 \Omega; \quad c = 0,0024 Vs \quad (6.13)$$

Wirkungsgrad

Zur Berechnung der Wirkungsgrad-Matrix benötigt man einen Zusammenhang aus Drehzahl, Moment und Wirkungsgrad. Diesen erhält man durch die Gleichungen 3.36 und 3.34 und dem Zusammenhang $I_M = \frac{M}{c}$.

$$\eta = \frac{n * c * 2\pi * (\frac{M}{c} - I_{LL})}{n * c * 2\pi * \frac{M}{c} + \frac{M^2}{c^2} * R_i} \quad (6.14)$$

Aus diesem Zusammenhang kann für eine konstante Drehzahl eine Wirkungsgrad-/Drehmomentkennlinie erstellt werden. Zusätzlich benötigt man für diese Drehzahl den Strom I_{LL} , also den Leerlaufstrom ohne Belastung der Welle. Der Zusammenhang aus Drehzahl und Leerlaufstrom ist in Tabelle 6.2 und Abbildung 6.10 ersichtlich. Die obere Geschwindigkeitsbegrenzung $n = 250 \frac{1}{s}$ ergibt sich aus der maximalen Geschwindigkeit des Fahrzeuges von $20 \frac{km}{h}$. Um den Bereich des Drehmoments festzustellen, geht man zuerst vom theoretischen Maximalmoment M_{max} aus. Dies ist jenes Moment, welches bei Stillstand der Welle und $U_M = U_{Mmax} = 7,2 V$ auftreten würde. Die Beziehung Moment und Strom ist bekannt:

$$M_R = c * (I_M - I_{LL}) \quad (6.15)$$

$n[1/s]$	$I_{LL}[A]$
25	1,86
50	1,88
75	1,92
100	2,01
125	2,06
150	2,14
175	2,16
200	2,18
225	2,20
250	2,25

Tabelle 6.2: Leerlaufstrom/Drehzahl

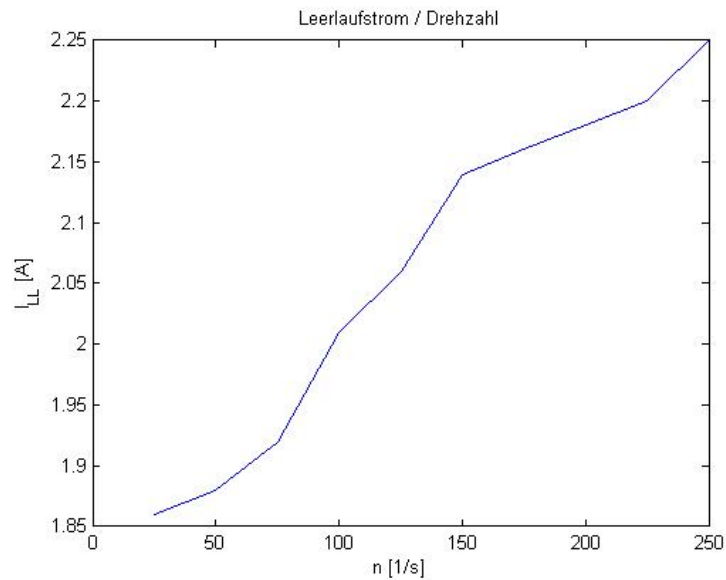


Abbildung 6.10: Leerlaufstrom/Drehzahl

I ist der maximal mögliche Strom, also $\frac{U_{Mmax}}{R_i}$.

$$M_{max} = c * \left(\frac{U_{Mmax}}{R_i} - I_{LL} \right) = 0,0024 * \left(\frac{7,2}{0,115} - 1,86 \right) = 145,5 \text{ Nmm} \quad (6.16)$$

Dieser Zustand ist aufgrund des hohen Stromes zu vermeiden. In der Software wird daher bei einem Dauerstrom von $I = 30 \text{ A}$ der Motor abgeschaltet. D.h. die Simulation ist nur bis zu jenem Moment sinnvoll, welches bei diesem Strom auftritt.

$$M = c * (I_M - I_{LL}) = 0,0024 * (30 - 1,86) = 67,5 \text{ Nmm} \approx 70 \text{ Nmm} \quad (6.17)$$

Man erhält für den motorischen Betrieb die Kennlinienschar aus Abbildung 6.11 und für den generatorischen Betrieb die Kennlinienschar aus Abbildung 6.12.

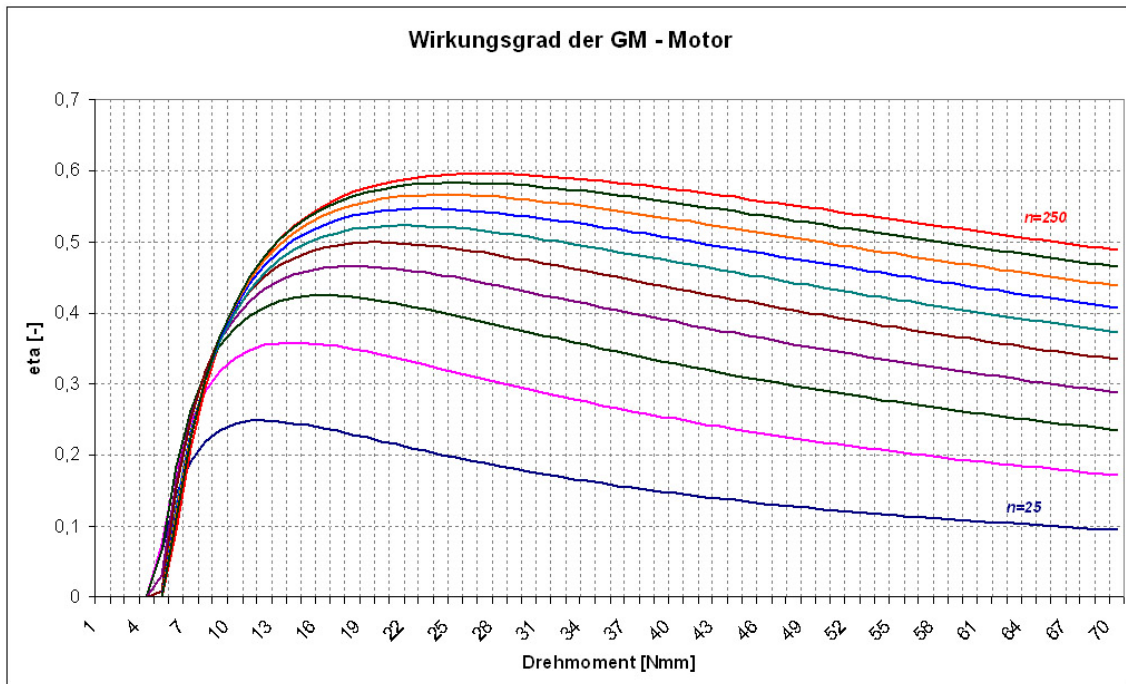


Abbildung 6.11: Wirkungsgradkennlinien für den motorischen Betrieb der GM

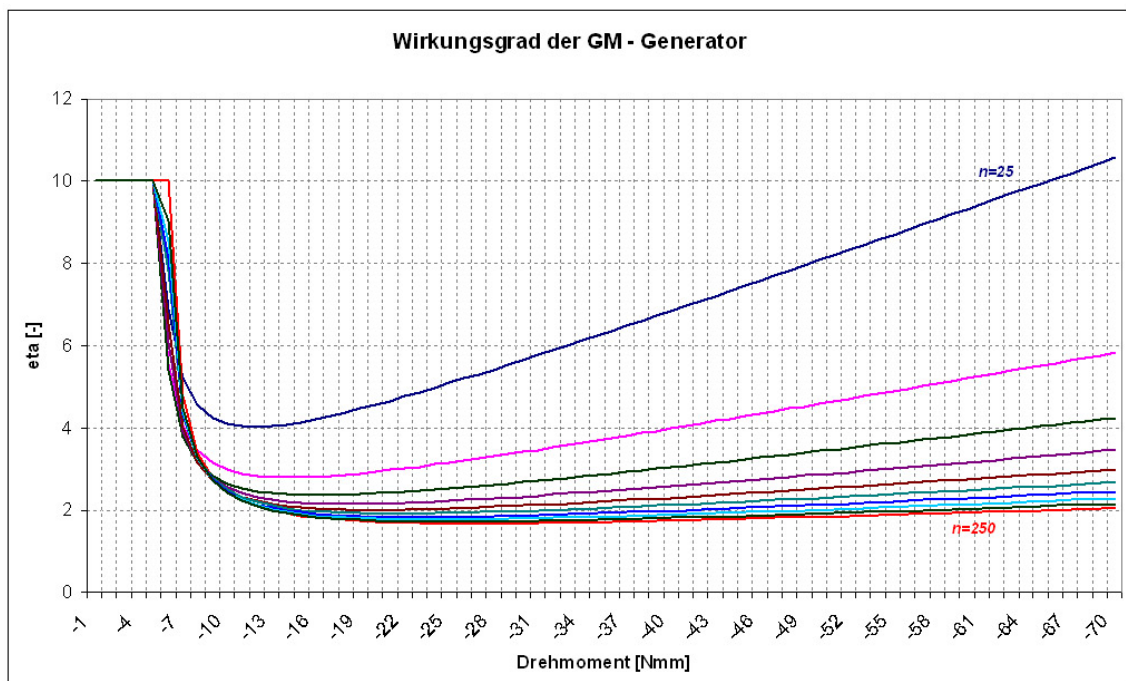


Abbildung 6.12: Wirkungsgradkennlinien für den generatorischen Betrieb der GM

Aus diesen Kennlinien kann nun die Wirkungsgradmatrix erstellt werden. Der Simulationsblock *elektrischer Motor* erhält vom Getriebe eine mechanische Leistung (durch ω und M) und gibt die dafür benötigte oder erzeugte elektrische Leistung weiter. Traditionell versteht man unter Wirkungsgrad die umgekehrte Richtung, daher müssen für die Matrix die jeweiligen Kehrwerte verwendet werden.

$\eta[-]$		$M[Nmm]$													
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
n [$\frac{1}{s}$]	25	10,00	4,102	4,138	4,560	5,086	5,654	6,245	6,848	7,460	8,076	8,696	9,320	9,945	10,00
	50	10,00	2,980	2,794	2,933	3,159	3,421	3,701	3,992	4,290	4,592	4,897	5,204	5,514	5,824
	75	10,00	2,640	2,361	2,400	2,525	2,683	2,859	3,046	3,238	3,425	3,635	3,837	4,040	4,245
	100	10,00	2,546	2,177	2,155	2,223	2,328	2,450	2,582	2,722	2,865	3,012	3,161	3,311	3,463
	125	10,00	2,481	2,060	2,004	2,039	2,110	2,201	2,301	2,409	2,520	2,635	2,752	2,871	2,991
	150	10,00	2,491	2,004	1,916	1,925	1,973	2,041	2,119	2,205	2,295	2,388	2,484	2,581	2,679
	175	10,00	2,453	1,944	1,840	1,834	1,867	1,920	1,983	2,054	2,129	2,207	2,287	2,369	2,453
	200	10,00	2,431	1,902	1,785	1,767	1,789	1,830	1,882	1,941	2,004	2,071	2,140	2,211	2,283
	225	10,00	2,418	1,870	1,742	1,715	1,728	1,760	1,803	1,853	1,908	1,965	2,026	2,088	2,151
	250	10,00	2,450	1,860	1,718	1,681	1,685	1,708	1,744	1,786	1,834	1,884	1,937	1,992	2,048

Tabelle 6.3: Wirkungsgradmatrix im motorischen Betrieb

$\eta[-]$		$-M[Nmm]$													
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
n [$\frac{1}{s}$]	25	0,066	0,244	0,242	0,219	0,197	0,177	0,160	0,146	0,134	0,124	0,115	0,107	0,101	0,095
	50	0,074	0,336	0,358	0,341	0,317	0,292	0,270	0,250	0,233	0,218	0,204	0,192	0,181	0,172
	75	0,065	0,379	0,424	0,417	0,396	0,373	0,350	0,328	0,309	0,291	0,275	0,261	0,248	0,236
	100	0,030	0,393	0,459	0,464	0,450	0,430	0,408	0,387	0,367	0,349	0,332	0,316	0,302	0,289
	125	0,010	0,403	0,485	0,499	0,491	0,474	0,454	0,435	0,415	0,397	0,380	0,363	0,348	0,334
	150	0,000	0,401	0,499	0,522	0,519	0,507	0,490	0,472	0,454	0,436	0,419	0,403	0,387	0,373
	175	0,000	0,408	0,514	0,543	0,545	0,535	0,521	0,504	0,487	0,470	0,453	0,437	0,422	0,408
	200	0,000	0,411	0,526	0,560	0,566	0,559	0,547	0,531	0,515	0,499	0,483	0,467	0,452	0,438
	225	0,000	0,414	0,535	0,574	0,583	0,579	0,568	0,555	0,540	0,524	0,509	0,494	0,479	0,465
	250	0,000	0,408	0,538	0,582	0,595	0,594	0,585	0,573	0,560	0,545	0,531	0,516	0,502	0,488

Tabelle 6.4: Wirkungsgradmatrix im generatorischen Betrieb

Trägheitsmoment

Um die Auslaufkurve der GM zu erhalten, wird an einem Oszilloskop die Klemmenspannung über die Zeit aufgezeichnet (Abbildung 6.13).

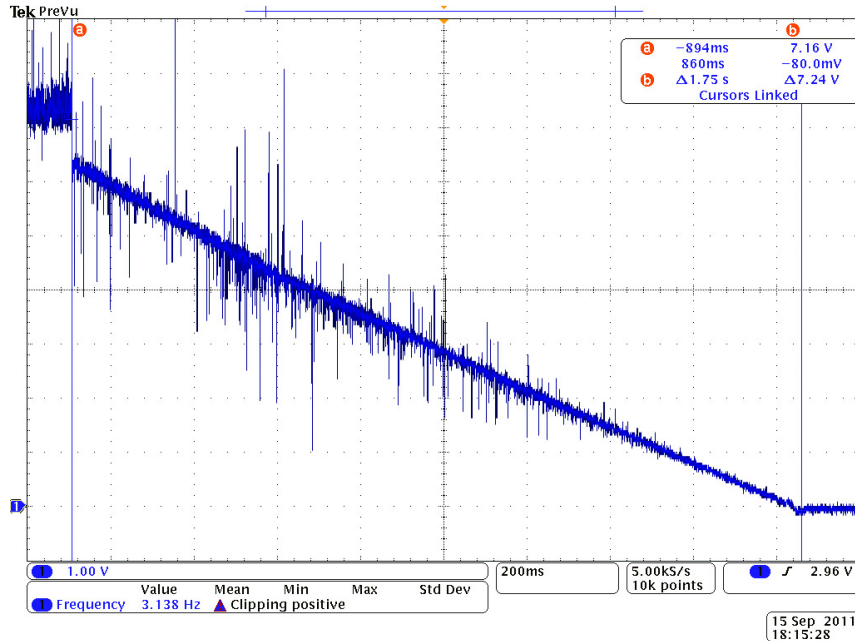


Abbildung 6.13: Auslaufkurve des GM-Rotors

Die $7,2V$ entsprechen der maximalen Drehzahl von $400 \frac{1}{s}$. Aus der Oszilloskopaufnahme erkennt man ein Δt von $1,82s$. Bei der maximalen Betriebsspannung von $U_M = 7,2V$ ohne Lastmoment und einem dabei gemessenen Leerlaufstrom $I_{LL} = 2,31A$ errechnet sich das maximale Leerlaufmoment:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{U_M * I_{LL}}{2 * \pi * n} = \frac{7,2 * 2,31}{2 * \pi * 400} = 6,62Nmm \quad (6.18)$$

und daraus das Trägheitsmoment:

$$J = \frac{M * \Delta t}{\Delta \omega} = \frac{0,00662 * 1,75}{2 * \pi * 400} = 4,61\mu kgm^2 \quad (6.19)$$

6.2.2 Akkumulator

Im Zyklisierer werden nur drei in Serie geschaltete NiMh-Zellen durchgemessen, da bei mehr Zellen die maximale Messspannung überschritten werden würde. Neben Lade- und Entladeverläufen sind die Spannungswerte bei verschiedenen Ladezuständen (SOC oder q) sowie Lade- und Entladeströme von Interesse. In Abbildung 6.14 sind diese dargestellt.

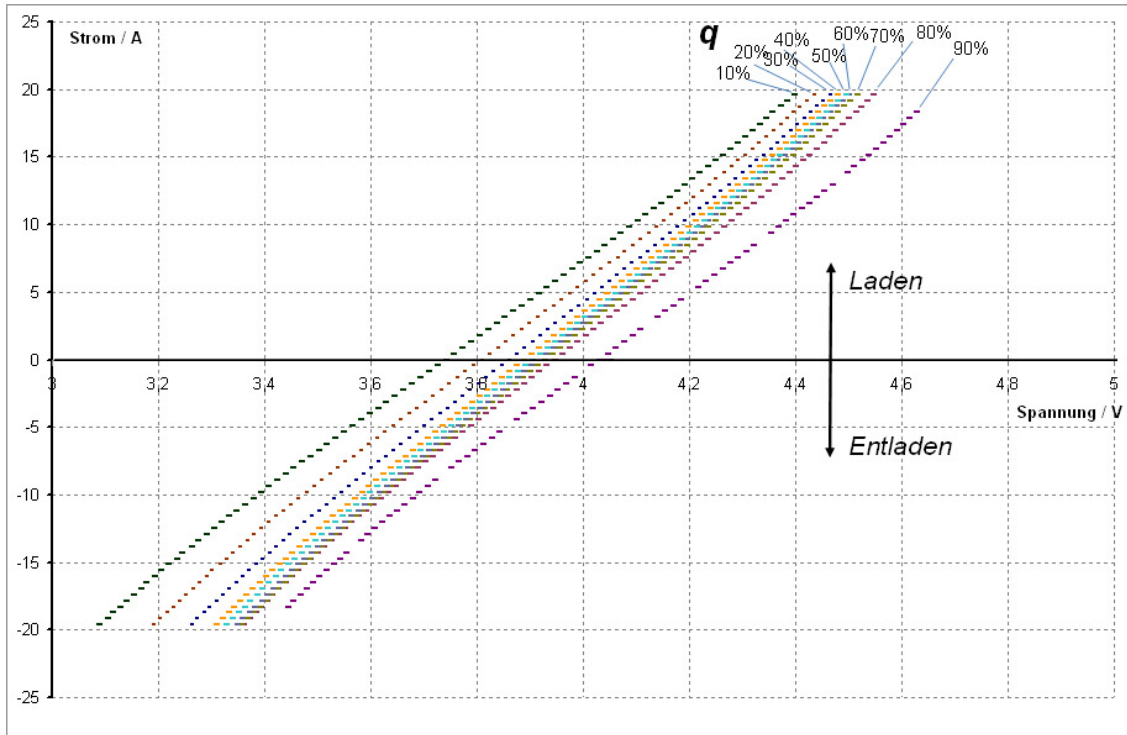


Abbildung 6.14: Strom- und Spannungsverläufe verschiedener Ladungszustände

Die Messwerte der gemessenen drei Zellen werden auf die sechs Zellen des realen Akkumulators extrapoliert, der Strom wird über die Kapazität des Akkumulators von 2, 4 Ah in die Laderate C umgerechnet. Zur Kurvenanpassung sind nur folgende Werte wichtig:

$U_{3Zellen}/V$	$U_{6Zellen}/V$	I/A	$C/-$
<i>SOC = 10 %</i>			
3,7414	7,4827	0	0
4,3983	8,7966	19,6301	8,1792
3,0895	6,1798	-19,6275	-8,1781
<i>SOC = 90 %</i>			
4,0353	8,0705	0	0
4,6280	9,2561	18,2909	7,6212
3,4440	6,8880	-18,2889	-7,6204

Tabelle 6.5: Spannungswerte NiMh-Akkumulator

Um aus diesen Werten die vier Ladeparameter $c_{L1} \dots c_{L4}$ bzw. Entladeparameter $c_{E1} \dots c_{E4}$ herauszulesen, betrachtet man zuerst den Leerlauffall, also $C = 0$, für den Zustand des Ladens. Aus den Gleichungen 6.3, 6.4 und 6.5 erhält man:

$$u_{BL}(kh) = c_{L4} * c(kh) * q(kh) + c_{L3} * q(kh) + c_{L2} * c(kh) + c_{L1} \quad (6.20)$$

und somit für $C = 0$:

$$u_{BL}(kh) = c_{L3} * q(kh) + c_{L1} \quad (6.21)$$

Daraus erkennt man, dass für einen konstanten Ladezustand $q(kh)$ die Summe von c_{L3} und c_{L1} die Leerlaufspannung ergibt. Der Arbeitsbereich des Akkumulators liegt im Bereich von 10 % und 90 % des Ladezustandes $q(kh)$. Setzt man aus den Messwerten des Zyklisierers diese zwei Grenzwerte ein, erhält man die zwei Gleichungen:

$$I : u_{BLI}(kh) = c_{L3} * 0,1 + c_{L1} = 7,4827 V \quad (6.22)$$

$$II : u_{BLII}(kh) = c_{L3} * 0,9 + c_{L1} = 8,0705 V \quad (6.23)$$

Aus diesen erhält man für $c_{L1} = 7,4092 V$ und $c_{L3} = 0,7348 V$. c_{L2} beschreibt die Steigung der Kennlinie. Um die Steigung zu ermitteln wird die Spannungsänderung zweier extremer Messwerte ($C = 0$ und $C = C_{Max}$) betrachtet eines Ladezustandes (in diesem Fall $q(kh) = 10\%$).

$$c_{L2} = \frac{\Delta u_{BL}}{\Delta C} \quad (6.24)$$

$$\Delta u_{BL}(kh) = 8,7966 - 7,4827 = 1,3139 V \quad (6.25)$$

$$\Delta C = 8,1792 - 0 \quad (6.26)$$

$$c_{L2} = 0,1606 V \quad (6.27)$$

c_{L4} kann zur Beschreibung von Veränderungen der Steigung bei verschiedenen Ladezuständen verwendet werden. Bei NiMh-Zellen ist diese Veränderung sehr gering, daher kann c_{L4} vernachlässigt werden ($c_{L4} = 0$).

Die Berechnung der Entladeparameter kann nach dem gleichen Prinzip erfolgen. Beachtet man die Stetigkeit der Kennlinie im Punkt $C = 0$, so gilt: $c_{L1} = c_{E1}$ und $c_{L3} = c_{E3}$. c_{E2} beschreibt die Steigung der Geraden für negative Laderaten, c_{E4} kann vernachlässigt werden.

$$c_{E2} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta C} \quad (6.28)$$

$$\Delta u_{BE}(kh) = 7,4827 - 6,1798 = 1,3029 V \quad (6.29)$$

$$\Delta C = 0 - (-8,1781) \quad (6.30)$$

$$c_{L2} = 0,1593 V \quad (6.31)$$

Abbildung 6.15 zeigt die an die Messwerte angepassten Geraden.

c_{L1}	7,4092	V
c_{L2}	0,1606	V
c_{L3}	0,7348	V
c_{L4}	0	–
c_{E1}	7,4092	V
c_{E2}	0,1593	V
c_{E3}	0,7348	V
c_{E4}	0	–

Tabelle 6.6: Parameter der Geradenanpassung

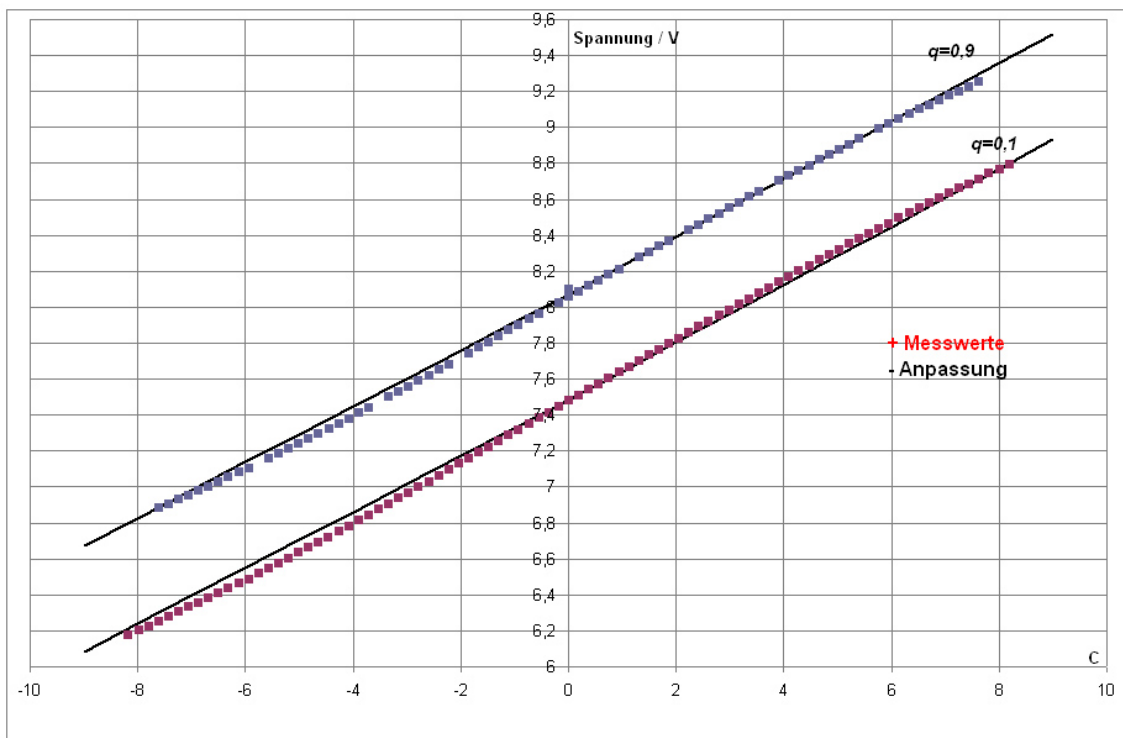


Abbildung 6.15: Geradenanpassung der Lade- und Entladekurve der Zelle

6.2.3 Fahrzeug

Masse des Fahrzeuges: $m_f = 10 \text{ kg}$

Rotierende Masse: $mt2m_f = 5\%$

(Wird in Prozent der gesamten Fahrzeugmasse angegeben.)

Frontfläche: $A = 0,04 \text{ m}^2$

Strömungswiderstandskoeffizient: $c_w = 0,35$ ¹

Reibungskoeffizient: $\mu = 0,02$

6.2.4 Getriebe

Die Übersetzung des Getriebes ist durch Tauschen des Motorritzels veränderbar. In der Testphase wurde eine Übersetzung $\ddot{u} = 16,94$ gewählt. Der Wirkungsgrad des Getriebes η_{Getr} errechnet sich aus dem Verhältnis des eingespeisten Moments M_e zum abgegebenen Moment M_a

$$M_e = \frac{1}{\ddot{u}_{\text{Getr}} * \eta_{\text{Getr}}} * M_a \quad (6.32)$$

bzw. aus den Leistungen:

$$\eta_{\text{Getr}} = \frac{P_a}{P_e} \quad (6.33)$$

P_a abgegebene Leistung

P_e eingespeiste Leistung

Durch Messen des Motorstromes am Fahrzeug kann das Moment an der Motorwelle, also das in das Getriebe eingespeiste Moment bestimmt werden (Gleichung 3.31). Die Messung wird einmal ohne Getriebe und einmal mit angeschlossenem Getriebe durchgeführt.

$n_e \left[\frac{1}{s}\right]$	$I_{LL} [A]$	$I_M [A]$	$M_e = I_{LL} * c [Nmm]$	$M_a = I_M * c [Nmm]$	$\eta_{\text{Getr}} [\%]$
50	1,88	2,43	4,51	5,83	77,4
100	2,01	2,82	4,82	6,77	71,2
150	2,14	3,04	5,12	7,29	70,4

Tabelle 6.7: Wirkungsgrad des Getriebes

Für die Simulation wurde $\eta_{\text{Getr}} = 71\%$ gewählt.

¹<http://www.elweb.info/dokuwiki/doku.php?id=cw-wert>

6.2.5 Fahrzyklus

Die Fahrzyklen sind in der QSS-Bibliothek als Tabellen mit der Schrittweite 1 s abgespeichert. In der Testphase wurde rein der *Europa City*-Zyklus (Abbildung 6.16) gefahren, da keine sehr hohen Geschwindigkeiten vorkommen und die totale Distanz relativ gering ist. Die Division der Geschwindigkeit und der Beschleunigung ist nötig, um diese Werte dem skalierten Fahrzeug anzupassen, da die Blöcke für reale Fahrzeuge ausgelegt sind.

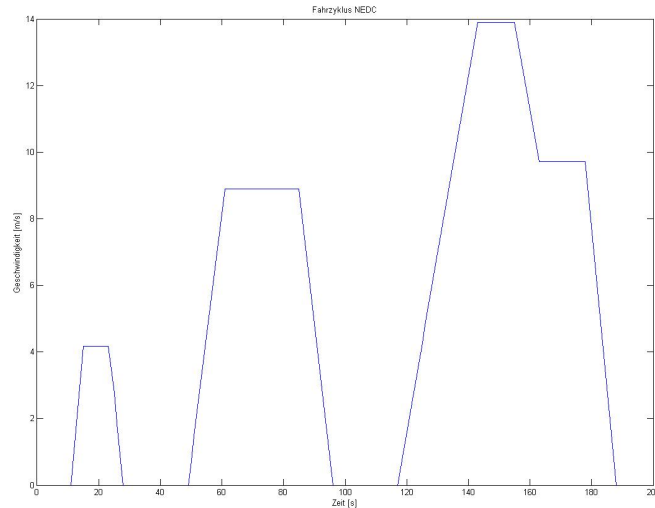


Abbildung 6.16: Fahrzyklus: *Europa City*

6.2.6 Umsetzer

Um den Wirkungsgrad des Umsetzers beim Antreiben ($\eta_{Antrieb}$) zu erhalten, wird der Motor im Antriebsmodus mit voller Leistung angesteuert (PWM: $DC = 1$). In diesem Zustand ist der Stromfluss durch die H-Brücke nie unterbrochen. Die Leistung, welche aus dem Akkumulator entnommen wird (P_A), kann mit der Motorleistung P_M verglichen werden.

Messwerte:

$$\begin{aligned} U_A &= 7,57 V & U_M &= 7,48 V \\ I_A &= 3,63 A & I_M &= 3,58 A \end{aligned}$$

U_A Akkumulatorspannung [V]

I_A Akkumulatorstrom [A]

$$\eta_{Antrieb} = \frac{P_M}{P_A} = 0,975 \quad (6.34)$$

Der Wirkungsgrad der Rekuperation (η_{Rekup}) ist von der Motorklemmenspannung, also der Motordrehzahl ω_{in} , abhängig. In der Kennlinie ist der Rekuperationswirkungsgrad bei verschiedenen Geschwindigkeiten aufgetragen. Das eingestellte Moment beträgt -70 Ncm .

$$\eta_{Rekup} = \frac{P_A}{P_M} \quad (6.35)$$

Die Messwerte sind durch eine Gerade angenähert, um sie in der Simulation durch eine Geradengleichung darstellen zu können.

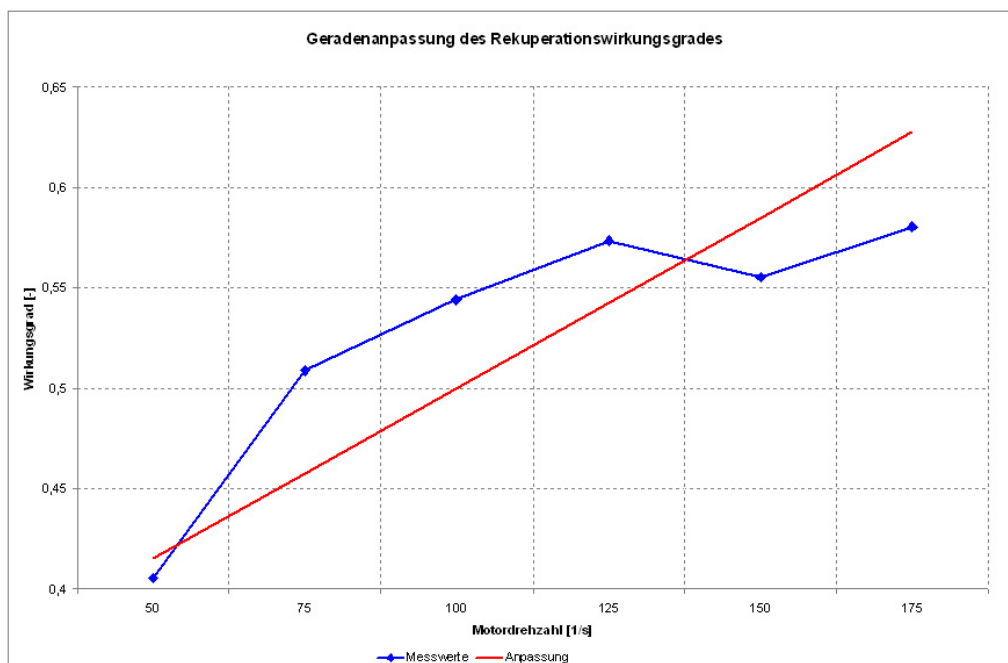


Abbildung 6.17: Gemessener Wirkungsgrad und Anpassung der Rekuperation

Geradengleichung:

$$\eta_{Rekup}(\omega_{in}) = 0,00027 * \omega_{in} + 0,33 \quad (6.36)$$

6.3 Simulationsergebnisse

6.3.1 Einstellung I

Die Werte wie Fahrzeugmasse, Reibungskoeffizient etc. sind für die folgenden Simulationsplots gleich den oben angeführten.

Die simulierten Werte nach dem Block *Fahrzeug* (Abbildung 6.18) müssen exakt mit den errechneten Werten aus Abbildung 5.9 übereinstimmen, da sämtliche Größen in der Simulation und in der Berechnung für den Rollenprüfstand dieselben sind (der Rollenprüfstand „simuliert“ für das reale Fahrzeug den Block *Fahrzeug*).

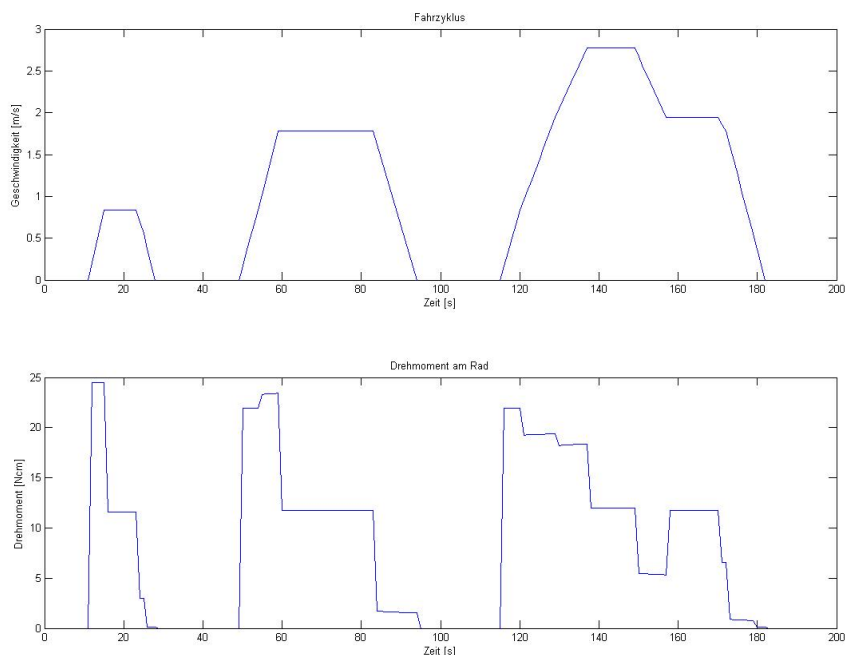


Abbildung 6.18: Errechnetes Bremsmoment am Rad bei einem *Europa City*-Fahrzyklus

Nach der genauen Kalibrierung der einzelnen Simulationsblöcke erhält man das Ergebnis aus Abbildung 6.19. Für den späteren Vergleich mit der realen Messung wird der Ladestatus des Akkumulators in der Simulation auf 35 % gesetzt. Zu Beginn der realen Messung hat der Akkumulator eine Leerlaufspannung von 7,68 V. Laut der U/q-Kennlinie entspricht dies einem $q = 0,35$.

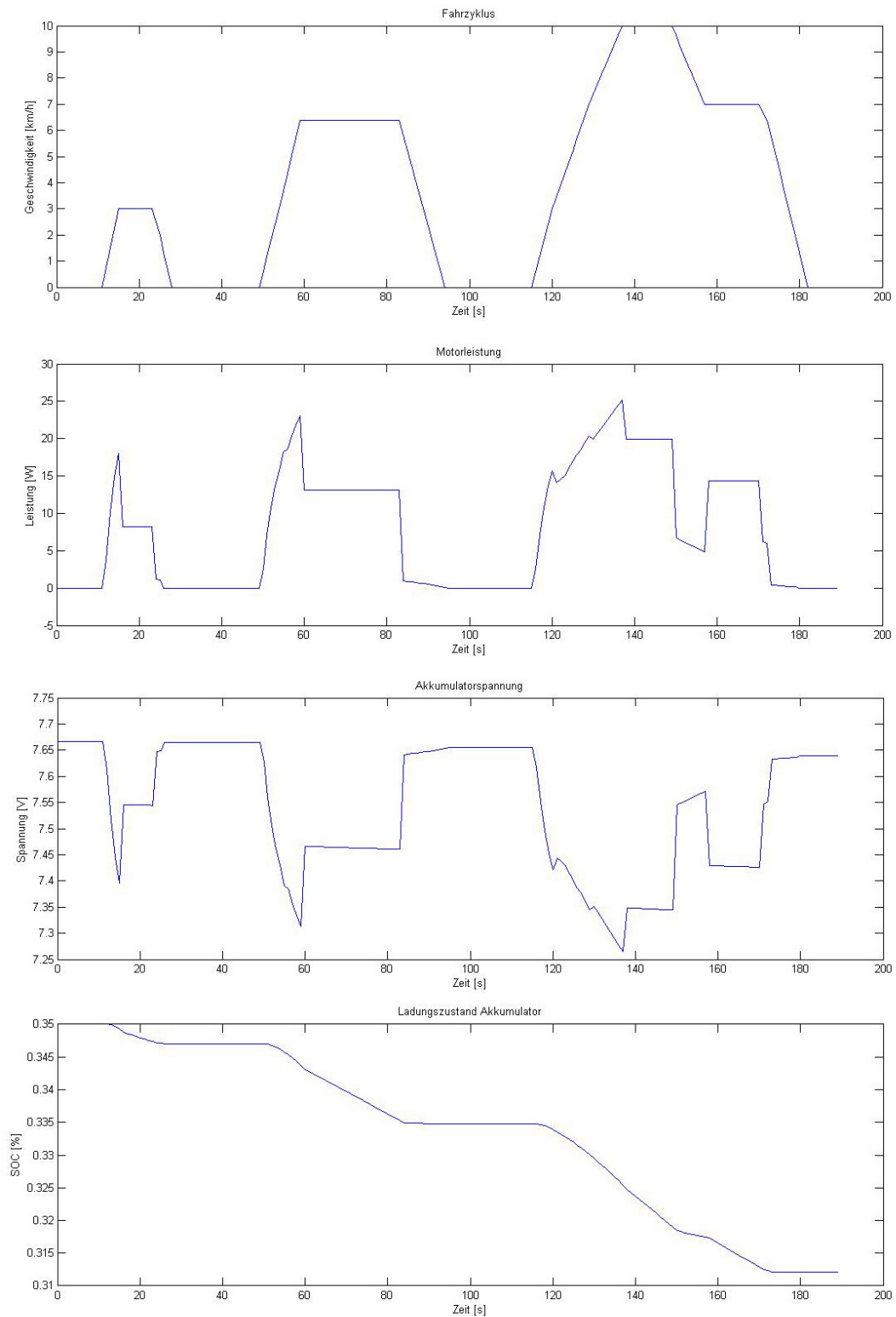


Abbildung 6.19: Simulierte Motorleistung, Akkumulatorspannung und Akkumulatorladung beim *Europa City*-Fahrzyklus

6.3.2 Einstellung II

Bei einer Fahrzeugmasse, welche dem skalierten Fahrzeug entspricht (10 kg), ist die Trägheit beim Verzögern zu gering, um ein negatives Moment zu erzeugen. Zur Veranschaulichung der Rekuperation wird für den nächsten Simulationdurchlauf die Masse auf $m_f = 40\text{ kg}$ erhöht und der Reibungskoeffizient auf $\mu = 0,008$ herabgesetzt.

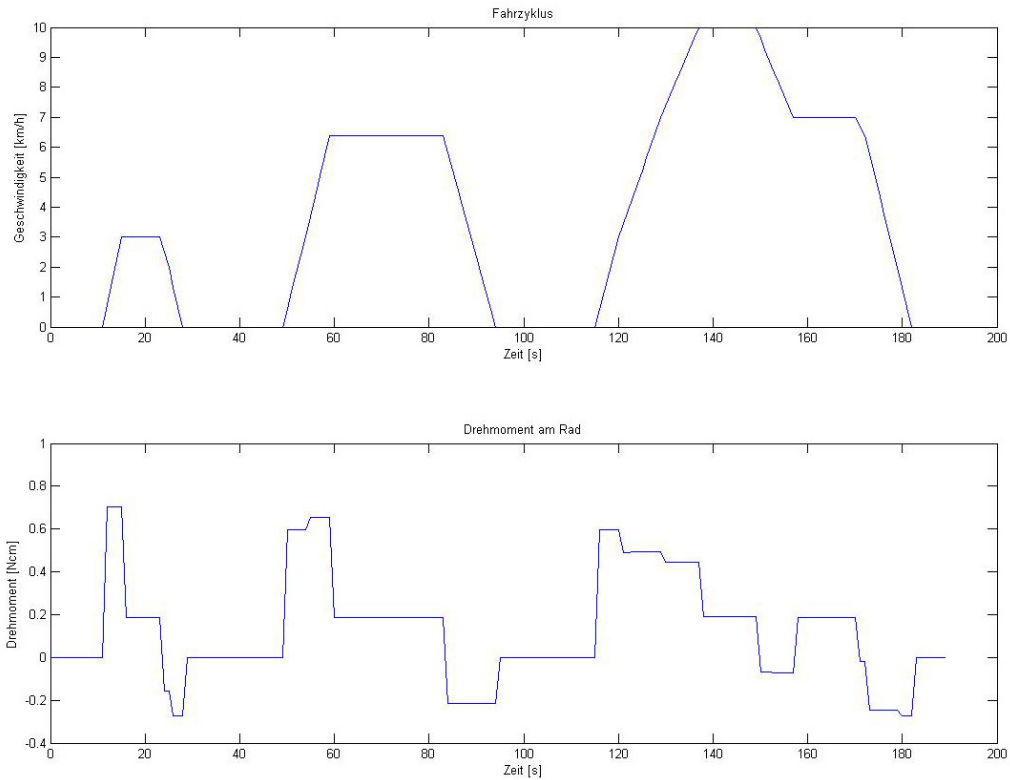


Abbildung 6.20: Errechnetes Bremsmoment am Rad bei einem *Europa City*-Fahrzyklus und erhöhter Fahrzeugmasse

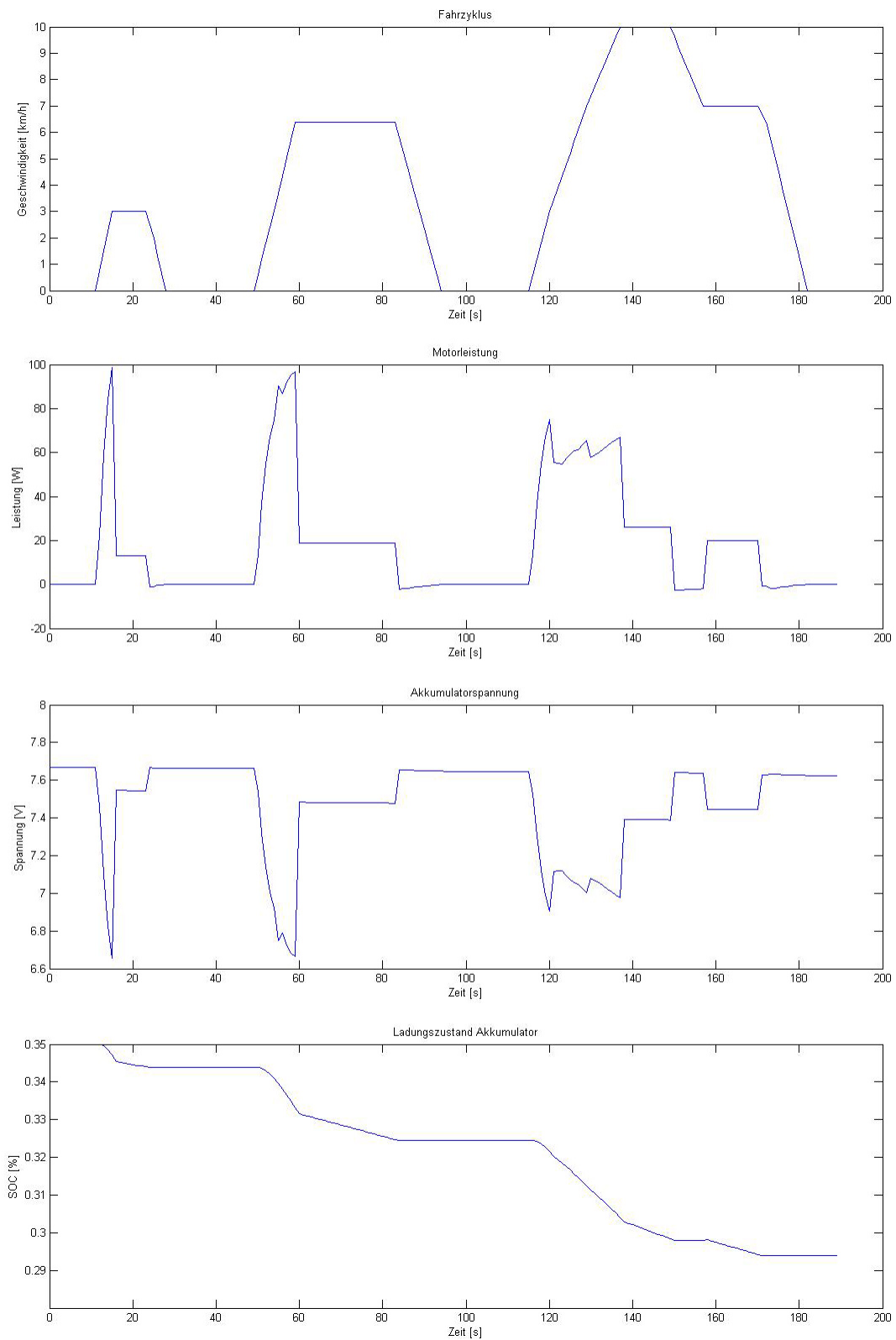


Abbildung 6.21: Simulierte Motorleistung, Akkumulatortenspannung und Akkumulatortladung beim *Europa City*-Fahrzyklus und erhöhter Fahrzeugmasse

6.4 Diskussion

6.4.1 Gegenüberstellung

In der Gegenüberstellung der realen Messung zu den Ergebnissen der Simulation (Abbildung 6.22) werden die Motorleistung und die Akkumulatorspannung verglichen. Die Hinterachse des realen Fahrzeuges wird vom Rollenprüfstand mit denselben Drehmomentwerten beaufschlagt, wie die Berechnung der Simulation ergibt. Die Werte nach den Simulationsblöcken *Fahrzeug* und *Getriebe* können mit dem vorhandenen Aufbau messtechnisch nicht erfasst werden. Der Vergleich der Motorleistung liegt daher nahe.

Im Vergleich der beiden Motorleistungsverläufe erkennt man, dass die Form bzw. die Absolutwerte übereinstimmen. Lediglich die Leistungsspitzen nach den Beschleunigungsvorgängen sind nur in den Simulationsergebnissen erkennbar. Erklärbar ist dies durch die mechanische und elektrische Dämpfung des realen Systemes. In der Berechnung nimmt die Massenträgheit nach dem Beschleunigungsvorgang sprungförmig ab, in der Realität wird dies durch die Verzögerung des Reglers des Fahrzeuges und der Rolle verhindert.

Die Akkumulatorspannung weist in der realen Messung kurze Spikes auf. Diese sind auf Messfehler aufgrund von elektromagnetischen Störungen, welche durch die PWM-Ansteuerung verursacht wird, zurückzuführen. Beobachtet man den letzten Teil des Fahrzyklus stimmen die Spannungen zum Schluss nicht mehr überein. Würde die reale Messung noch 10 bis 20 Sekunden weiterlaufen, würde sich auch hier der simulierte Wert einstellen.

6.4.2 Abweichungen

Die kleineren Abweichungen der Ergebnisse können aus verschiedenen Fehlern resultieren.

Das Drehmoment wird über die Elektronik der Rolle durch die elektrische Leistung und die Drehzahl errechnet. Die Genauigkeit der Momentregelung wird daher von der Messgenauigkeit der Strom- und Spannungsmessung beeinträchtigt. Diese Ungenauigkeit entsteht durch die Toleranz des Shuntwiderstandes und der Nichtlinearität der Verstärkerschaltungen. Da die Drehzahlmessung auf einer Zeitmessung basiert, kann diese sehr genau erfolgen.

Weiters werden die thermischen Einflüsse nicht berücksichtigt. Insbesondere die GM hat große Schwankungen in Bezug auf Stromaufnahme und somit Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Temperaturen. Erst durch eine zusätzliche thermische Modellierung könnte dies berücksichtigt werden.

Weiter Faktoren sind die Alterungserscheinungen der Akkumulatoren in Bezug auf Kapazität und Leerlaufspannung. Erfolgen die Messungen im Neuzustand, kann man einen Kapazitätsverlust nach einigen Ladezyklen feststellen. Die hohe Bauteilstreuung der einzelnen Zellen ist ebenfalls ein Grund für Abweichungen.

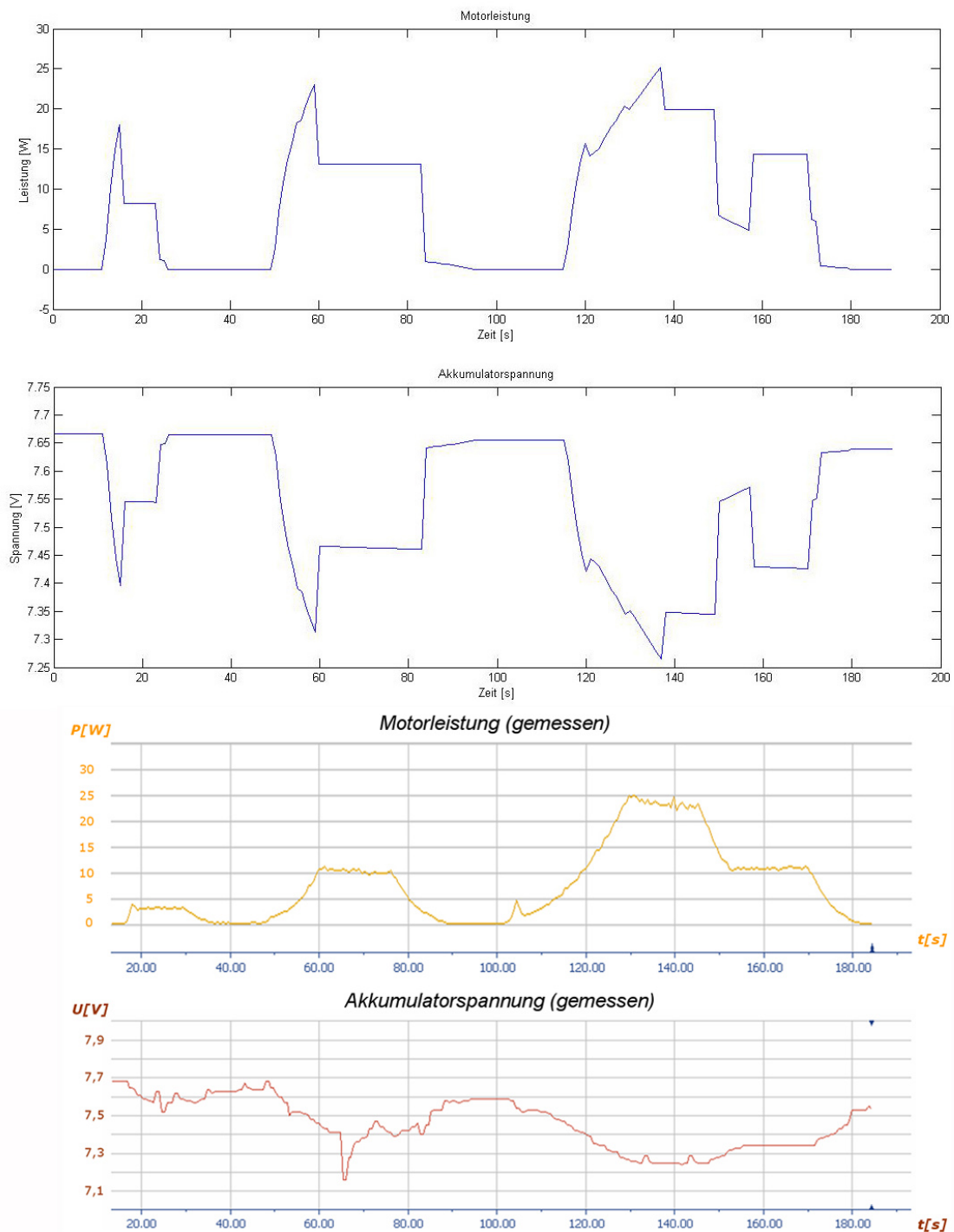


Abbildung 6.22: Gegenüberstellung von Simulation und Messwerten (*Europa City*)

6.4.3 Rekuperation

Die Ergebnisse zeigen, dass die Rekuperation bei Fahrzeugen dieses Maßstabs keine große Wirkung auf die Reichweite hat. Der Grund dafür ist die geringe Masse des Fahrzeuges und der relativ hohe Reibungskoeffizient. Große Massen verbrauchen viel Energie bei der Beschleunigung, es ist daher auch viel kinetische Energie „gespeichert“. Diese Energie kann besser und mit höherem Wirkungsgrad rückgespeist werden. In Abbildung 6.20 erkennt man diese gespeicherte Energie in Form des negativen Momentes beim Abbremsen eines Fahrzeuges mit erhöhtem Gewicht. Die dadurch entstehende negative Leistung des Motors (entspricht einem Generator) führt zur Ladung während des Bremsvorganges. Der schlechte Wirkungsgrad des Aufwärtswandlers bei geringen Drehzahlen ist der Grund, dass diese Ladung sehr gering ist (Abbildung 6.21).

Kapitel 7

Zusammenfassung

7.1 HILCOS

Der HILCOS-Demonstrator besteht aus einem elektrisch angetriebenen, 1:5 skalierten Modellauto und einem ebenso skalierten Rollenprüfstand. Das Fahrzeug ist fest mit dem Prüfstand verbunden, Antrieb und Bremsung erfolgen rein über die hintere Achse.

Über einen FlexRay-Bus ist es möglich, per PC Befehle an das Fahrzeug sowie den Prüfstand zu senden. Geschwindigkeitsvorgaben werden vom Fahrzeug im Antriebs- oder Bremsmodus geregelt, im letzteren Fall erfolgt eine Rekuperation. Der Rollenprüfstand kann das Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit vorwärts und rückwärts antreiben oder ein geregeltes, positives oder negatives Moment an der Hinterachse hervorrufen. Sämtliche Messwerte beider Geräte (Ströme, Spannungen, Drehzahl, Leistung, Drehmoment, Temperaturen) werden über FlexRay an den PC geschickt, um sie dort aufzeichnen zu können.

Gesteuert und visualisiert wird die Anlage über eine Bedienoberfläche (Abbildung 7.1).

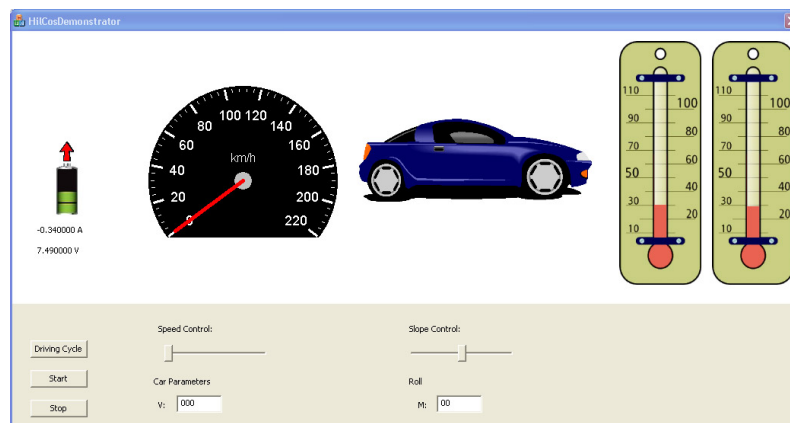


Abbildung 7.1: Bedienoberfläche des HILCOS-Demonstrators

Der Fahrzyklus muss als Tabelle abgespeichert werden und kann von der Bedienoberfläche aufgerufen und gestartet werden.

Neben dem Modellaufbau existiert eine Simulation auf quasistationärer Basis, mit welcher verschiedene Verläufe der Kenndaten des Fahrzeuges während eines Fahrzyklus simuliert werden können. Diese Simulation beinhaltet die mechanischen Komponenten vom Rad bis zur Motorwelle sowie die elektrischen Teile, vom Motor zum Akkumulator.

7.2 Zukünftige Erweiterungen

7.2.1 Von der Simulation zur Co-Simulation

Ziel des HILCOS-Projektes ist, Co-Simulationen mit einer funktionierenden Hardware zu testen. Es soll gezeigt werden, dass die Simulation mit der Realität übereinstimmt und daher, bis zu einem gewissen Grad, teuren Prototypenbau ersetzen kann. Um die Verkoppelung verschiedener Simulationsplattformen zu testen, müssen mehrere physikalische Bereiche auch durch die Hardware abgedeckt werden. Eine Ausbaustufe des Projektes ist die Vermessung des vorhandenen Kühlkreislaufes, um ein thermisches Modell zu erstellen. Um die benötigten Parameter für die Modellierung zu erhalten, müssten sämtliche Ein- und Ausgänge der Kühlkomponenten mit Temperatursensoren versehen werden. Ein Durchflussmesser im Kreislauf ist bereits vorhanden.

Mit diesem Modell wäre es möglich, die Einschaltdauer der Umlaufpumpe zu simulieren, welche wiederum Einfluss auf die Akkumulatorlaufzeit hat.

7.2.2 Akkumulatorstromzähler

Zum jetzigen Zeitpunkt kann die momentane Kapazität des Akkumulators nur grob über die Spannung (U/q -Kennlinie) geschätzt werden. Interessant ist jedoch der Ladestatus nach einem Fahrzyklus. Aus der Differenz der Ladung zu Beginn und am Ende eines Zyklus kann der genaue Leistungsverbrauch berechnet werden.

Aus diesem Grund soll in Zukunft ein Stromzähler (Stromintegrator) vor die Leistungselektronik geschaltet werden.

7.2.3 Einbau moderner Komponenten

Bürstenlose Gleichstrommaschinen und Lithium-Polymer-Zellen werden in der Elektrofahrzeugindustrie eingesetzt, und mittlerweile haben sie auch im Modellsport ihren Platz gefunden. In der ersten Stufe des Projektes war es wichtig, in relativ kurzer Zeit ein funktionierendes System zu erstellen. Daher wurde auch auf einfacher zu handhabende Teile zurückgegriffen. Die permanentmagneterregte GM ist leicht regelbar, besitzt jedoch einen schlechteren Wirkungsgrad als eine bürstenlose GM. Die Nickel-Cadmium-Zelle ist unempfindlich gegen hohe Ströme, jedoch ist ihr Leistungsgewicht geringer als das einer Lithium-Polymer-Zelle. In Zukunft sollen aber auch im HILCOS-Demonstrator, durch Anpassung des Reglersystems, diese Teile verbaut werden.

Kapitel 8

Conclusio

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden geeignete Komponenten für die Elektrifizierung eines skalierten Fahrzeug ausgewählt (Elektromotor, Energiespeicher, Steuerelektronik, Leistungselektronik, Sensorik). Sämtliche mechanische Umbauten wie Motorhalterung, Befestigungen für Elektronik und Akkumulatoren sowie der Einbau eines Wasserkühlungssystems wurden vorgenommen.

Die Elektronik für die Ansteuerung und Regelung des Fahrzeuges wurde von der Projektarbeit *Elektrischer Rollenprüfstand im Maßstab 1:5* übernommen, und auf die Anforderungen des Fahrzeuges angepasst. Nach dem Zusammenfügen der einzelnen Komponenten wurden erste Tests durchgeführt, um die Funktion der Hardware zu überprüfen. In weiterer Folge konnte die Software in Bezug auf Regelalgorithmus und Messsignalaufbereitung verändert sowie die Anbindung an den FlexRay-Bus vorgenommen werden. Nach dem Abstimmen der Regelfunktion beherrschte das Fahrzeug die Betriebsmodi Antreiben mit geregelter Geschwindigkeit und Bremsen durch die Rekuperationsfunktion mit geregelter Geschwindigkeit. Die Anbindung an den FlexRay-Bus sorgt einerseits für die Erfassung der Messwerte, andererseits für das Schicken von Fahrbefehlen, um genormte Fahrzyklen abzufahren.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigte sich mit dem Erstellen eines Modelles des Fahrzeuges durch Verwendung der *QSS-Toolbox*, einer quasistationären Simulationsbibliothek für MATLAB/Simulink. Dieses Modell beinhaltet die mechanischen Komponenten, Fahrzeug/Rad und Getriebe, sowie die elektrischen, Motor, Regler und Akkumulator. Die Parameter für die Kalibrierung der einzelnen Modellblöcke wurden gemessen bzw. aus den physikalischen Zusammenhängen berechnet.

Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messwerten des Fahrzeuges konnte gezeigt werden, dass das virtuelle Modell den realen Prototypen ersetzen kann.

Literaturverzeichnis

- [AA05] L. Guzzella A. Amstutz. *The QSS Toolbos Manual*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2005.
- [ATM11] ATMEL. *ATmega128*. ATMEL, 2011.
- [Böc11] Joachim Böcker. *Antriebe für umweltfreundliche Fahrzeuge*. Universität Paderborn, 2011.
- [Ber00] Kurt Bergmann. *Elektrische Meßtechnik*. Vieweg, 2000.
- [Bra09] Georg Brasseur. *Skriptum: Aktuatoren im Kraftfahrzeug*. EMT TU-Graz, 2009.
- [CS09] Ulrich Tietze Christoph Schenk. *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer, 2009.
- [Ele03] IFM Electronic. *Schulungsunterlagen Temperatursensoren*. IFM Electronic, 2003.
- [Fle09] FlexRay. *FlexRay Communications System Protocol Specifications*. 2009.
- [Gös08] Burkhard Göschel. *Elektrifizierung Antrieb*. Magna Steyr, 2008.
- [Hal07] David Halliday. *Physik*. Wiley, 2007.
- [Hof06] Klaus Hofer. *Elektrotraktion: Elektrische Antriebe in Fahrzeugen*. VDE, 2006.
- [Hun04] Stephan Hunker. *Permanenterregte Gleichstrommaschine*. 2004.
- [IXX04] IXXAT. *Einführung FlexRay*. IXXAT Automation GmbH, 2004.
- [Omr11] Omron. *Technical Information: Features of Photomicrosensors*. Omron, 2011.
- [Par08] N. Parspour. *Die Gleichstrommaschine*. Universität Stuttgart, 2008.
- [Pat10] Franz A. Patz. *Development of a small-sized FlexRay Node*. Virtual Vehicle, 2010.
- [Rot04] Tobias Rothmund. *Bedeutung von Hardware in the Loop in der Automobilindustrie*. FH Pforzheim, 2004.

- [Sch11] Markus Schratte. *Elektrischer Rollenprüfstand im Maßstab 1:5*. Virtuelles Fahrzeug, 2011.
- [Sem00] National Semiconductors. *Datasheet: LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. National Semiconductors, 2000.
- [TR02] David Linden Thomas Reddy. *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill, 2002.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Von der Realität zur Co-Simulation	9
3.1	Aufbau eines elektrischen Traktionsantriebes [Hof06]	10
3.2	Kennlinien einer permanentmagneterregten Gleichstrommaschine . . .	12
3.3	Beispiel einer Ladekurve einer NiMh-Zelle	14
3.4	Dreifach-Kaskodenstruktur für elektrische Antriebe [Hof06]	15
3.5	Prinzip der Drehzahlregelung [Hof06]	16
3.6	H-Brücke	17
3.7	Schaltung eines Aufwärtswandlers	19
3.8	Strom- und Spannungskennlinien eines Aufwärtswandlers	20
3.9	Aufwärtswandler mit Gleichstromgenerator	21
3.10	Spannungsverdoppler mit geschalteten Kapazitäten	21
3.11	Prinzip der Gabellichtschranke	22
3.12	Beschaltung einer Gabellichtschranke	22
3.13	FlexRay-Kommunikationszyklus [IXX04]	23
3.14	FlexRay-Netzknoten [IXX04]	24
3.15	Darstellung Rollreibung	25
3.16	Darstellung Trägheitsmoment	26
3.17	Auswirkungen der Steigung	27
3.18	Parameter der Gleichstrommaschine	28
3.19	Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine	28
3.20	Drehzahlabhängigkeit der mechanischen Verlustleistung	30
3.21	Beispiel für eine Drehzahl/Stromaufnahme-Kennlinie einer permanentmagneterregten Gleichstrommaschine	31
3.22	Beispiel für Leistungsverlauf und Momentverlauf einer permanentmagneterregten Gleichstrommaschine	31
3.23	Beispiel für den Verlauf des Wirkungsgrades einer permanentmagneterregten Gleichstrommaschine	32
3.24	Drehzahlverlauf beim Auslaufen eines Rotors	32
4.1	Temperatursensor LM35DZ [Sem00]	35
4.2	1:5 Modell mit Benzinantrieb	36
4.3	Motorhalterung und Getriebe	36
4.4	Komponenten der Wasserkühlung	37
4.5	Schematischer Aufbau der Reglerplatine	38
4.6	H-Brücke mit Aufwärtswandler [Sch11]	39
4.7	Überblick Gesamtsystem	40

5.1	Motorleistung des Fahrzeuges auf leerlaufender Rolle	45
5.2	Oszilloskopaufnahme der Klemmen- und Akkumulatorspannung	46
5.3	Motorleistung und Rekuperationsleistung bei $v = 5 \frac{km}{h}$	47
5.4	Motorleistung und Rekuperationsleistung bei $v = 10 \frac{km}{h}$	47
5.5	Wirkungsgrad des Aufwärtswandlers bei $v = 5 \frac{km}{h}$ und $v = 10 \frac{km}{h}$	48
5.6	Verlauf der Regelgrößen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten	49
5.7	Regeldynamik bei verschiedenen Bremsmomenten	49
5.8	Rekuperationsstrom bei unterschiedlichen Antriebsmomenten	50
5.9	Errechnetes Drehmoment für den <i>Europa City</i> -Fahrzyklus	51
5.10	Motorleistungs- und Akkumulatorspannungsverlauf während des <i>Europa City</i> -Fahrzyklus	51
6.1	Blockaufbau Elektrofahrzeug	52
6.2	Simulationsblock elektrischer Motor [AA05]	53
6.3	Simulationsblock Akkumulator [AA05]	55
6.4	Simulationsblock Fahrzeug [AA05]	57
6.5	Simulationsblock Getriebe [AA05]	58
6.6	a) Motor-Rad-Antrieb b) Rad-Motor-Antrieb [AA05]	58
6.7	Simulationsblock Fahrzyklus [AA05]	59
6.8	Beispiel eines Fahrzyklus (NEDC) [AA05]	60
6.9	Simulationsblock Umsetzer	60
6.10	Leerlaufstrom/Drehzahl	62
6.11	Wirkungsgradkennlinien für den motorischen Betrieb der GM	63
6.12	Wirkungsgradkennlinien für den generatorischen Betrieb der GM	63
6.13	Auslaufkurve des GM-Rotors	65
6.14	Strom- und Spannungsverläufe verschiedener Ladungszustände	66
6.15	Geradenanpassung der Lade- und Entladekurve der Zelle	68
6.16	Fahrzyklus: <i>Europa City</i>	70
6.17	Gemessener Wirkungsgrad und Anpassung der Rekuperation	71
6.18	Errechnetes Bremsmoment am Rad bei einem <i>Europa City</i> -Fahrzyklus	72
6.19	Simulierte Motorleistung, Akkumulatorspannung und Akkumulatorladung beim <i>Europa City</i> -Fahrzyklus	73
6.20	Errechnetes Bremsmoment am Rad bei einem <i>Europa City</i> -Fahrzyklus und erhöhter Fahrzeugmasse	74
6.21	Simulierte Motorleistung, Akkumulatorspannung und Akkumulatorladung beim <i>Europa City</i> -Fahrzyklus und erhöhter Fahrzeugmasse	75
6.22	Gegenüberstellung von Simulation und Messwerten (<i>Europa City</i>)	77
7.1	Bedienoberfläche des HILCOS-Demonstrators	79
A.1	Bestandteile Fahrzeug	88
B.1	Schaltplan Reglerplatine – Messverstärker	89
B.2	Schaltplan der Reglerplatine – Leistungselektronik	90
B.3	Schaltplan Reglerplatine – Sensoranschlüsse, JTAG	91

Tabellenverzeichnis

3.1	Kennwerte verschiedener Zellentypen	15
6.1	Messwerte zweier Lastzustände	61
6.2	Leerlaufstrom/Drehzahl	62
6.3	Wirkungsgradmatrix im motorischen Betrieb	64
6.4	Wirkungsgradmatrix im generatorischen Betrieb	64
6.5	Spannungswerte NiMh-Akkumulator	66
6.6	Parameter der Geradenanpassung	68
6.7	Wirkungsgrad des Getriebes	69

Anhang A

Überblick der Fahrzeugbestandteile

- 1 Kühler-Ventilatorkombination
- 2 Akkumulatorhalterung – Akkumulatoren
- 3 Temperatursensor Leistungselektronik
- 4 FlexRay-Node
- 5 Getriebe
- 6 Geschwindigkeitssensor
- 7 Temperatursensor Motor
- 8 Motorkühlschlange
- 9 Ausgleichsgefäß Kühlmittel
- 10 Temperatursensor Kühlmittel
- 11 Umlaufpumpe Kühlkreislauf
- 12 Permanentmagneterregte Gleichstrommaschine
- 13 Durchlaufkühlung Leistungselektronik
- 14 Reglerplatine

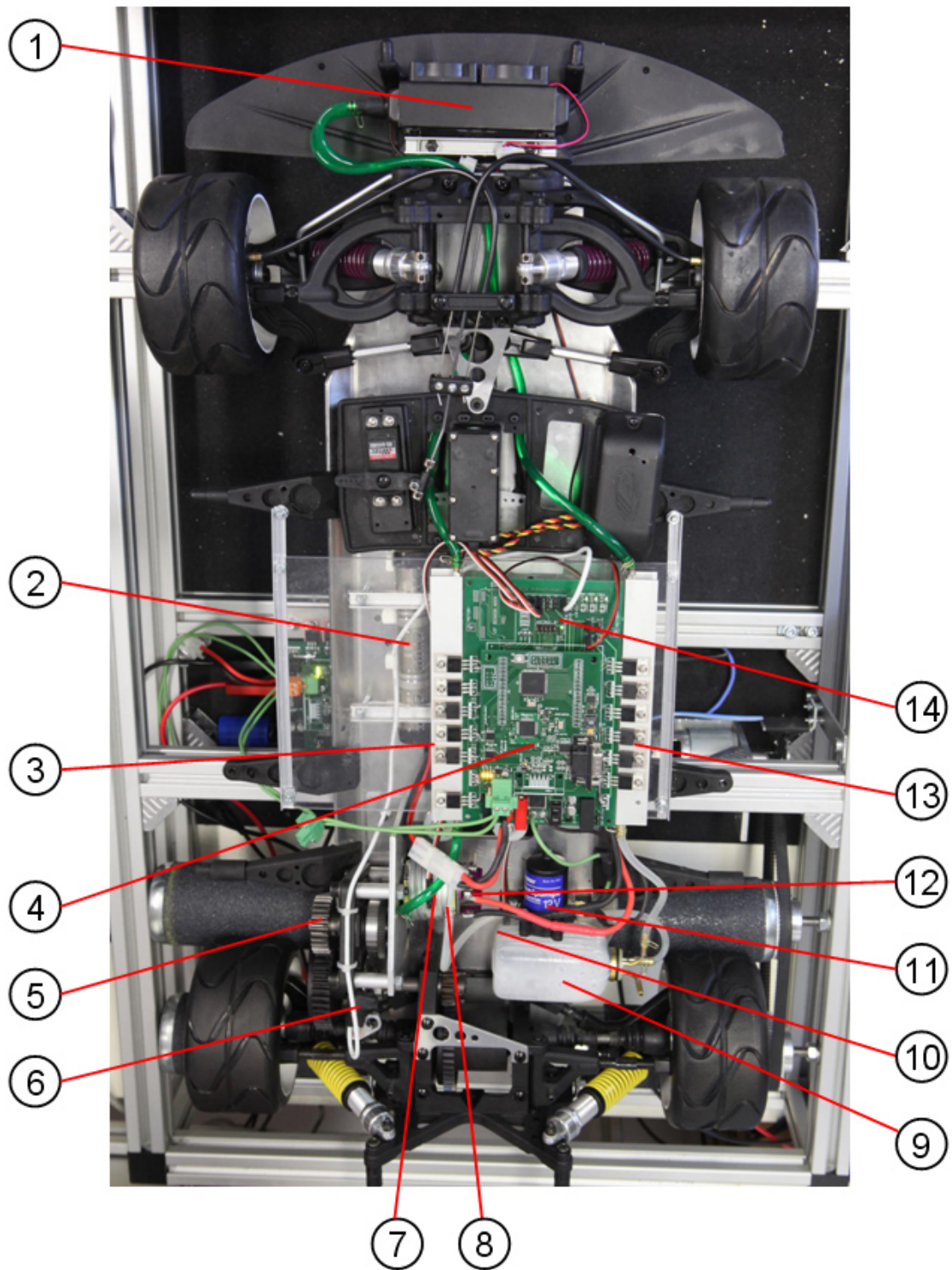


Abbildung A.1: Bestandteile Fahrzeug

Anhang B

Schaltpläne

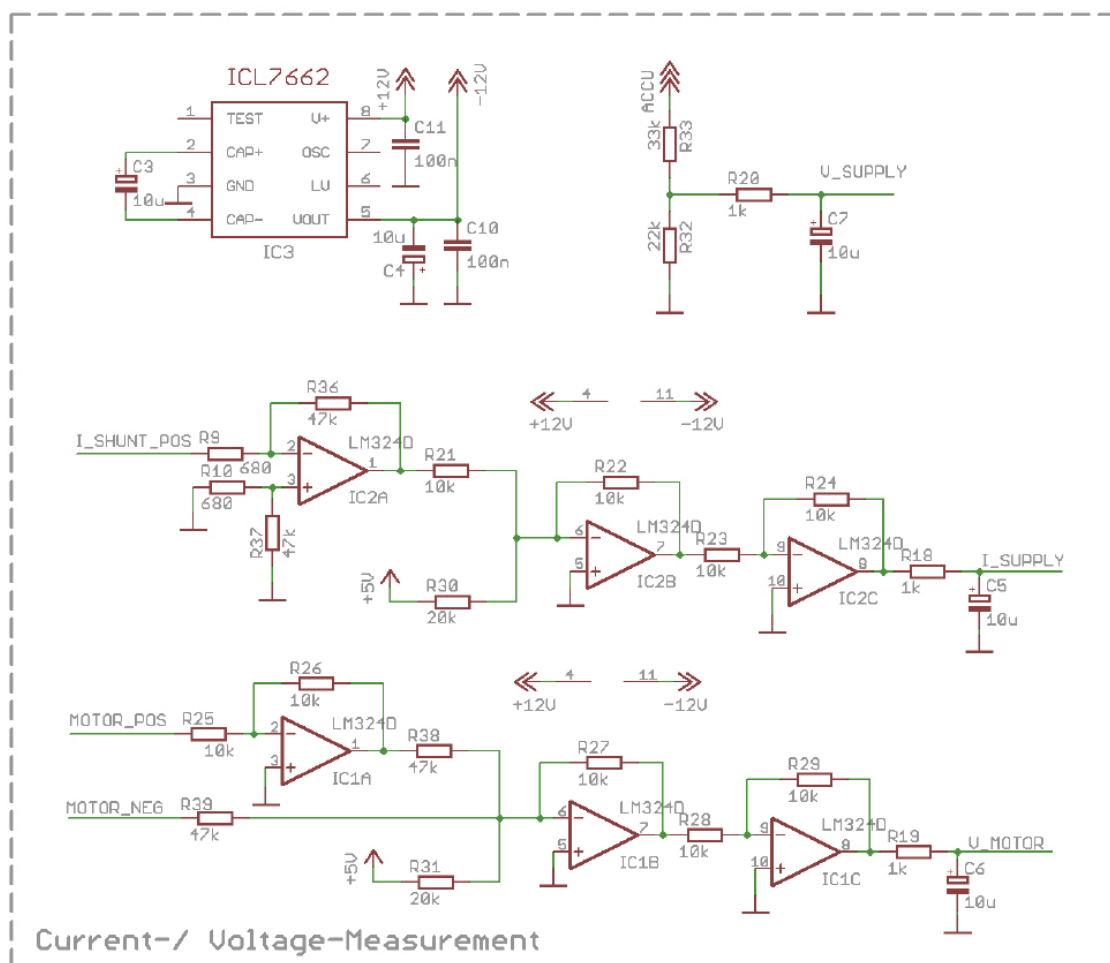


Abbildung B.1: Schaltplan Reglerplatine – Messverstärker

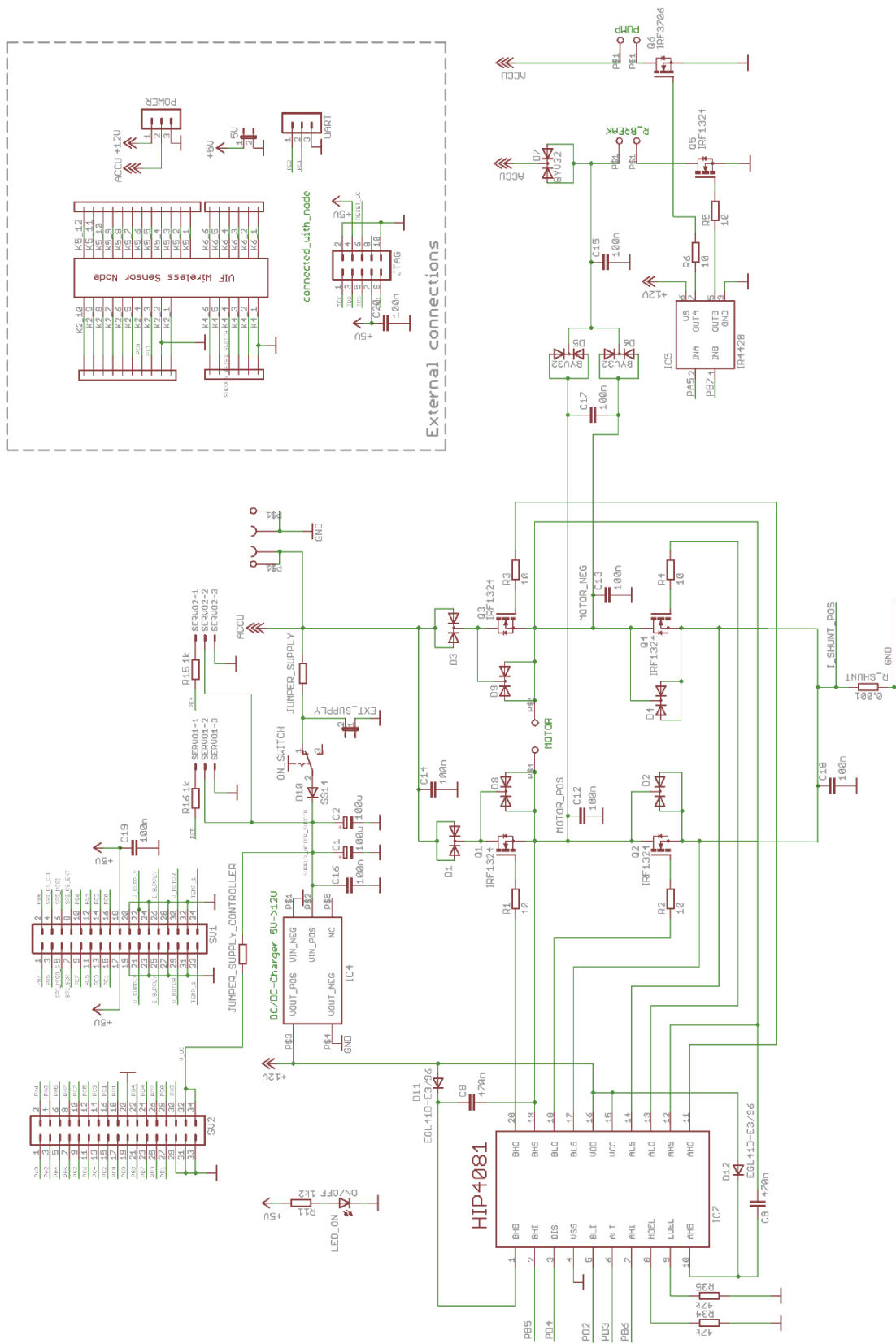


Abbildung B.2: Schaltplan der Reglerplatine – Leistungselektronik

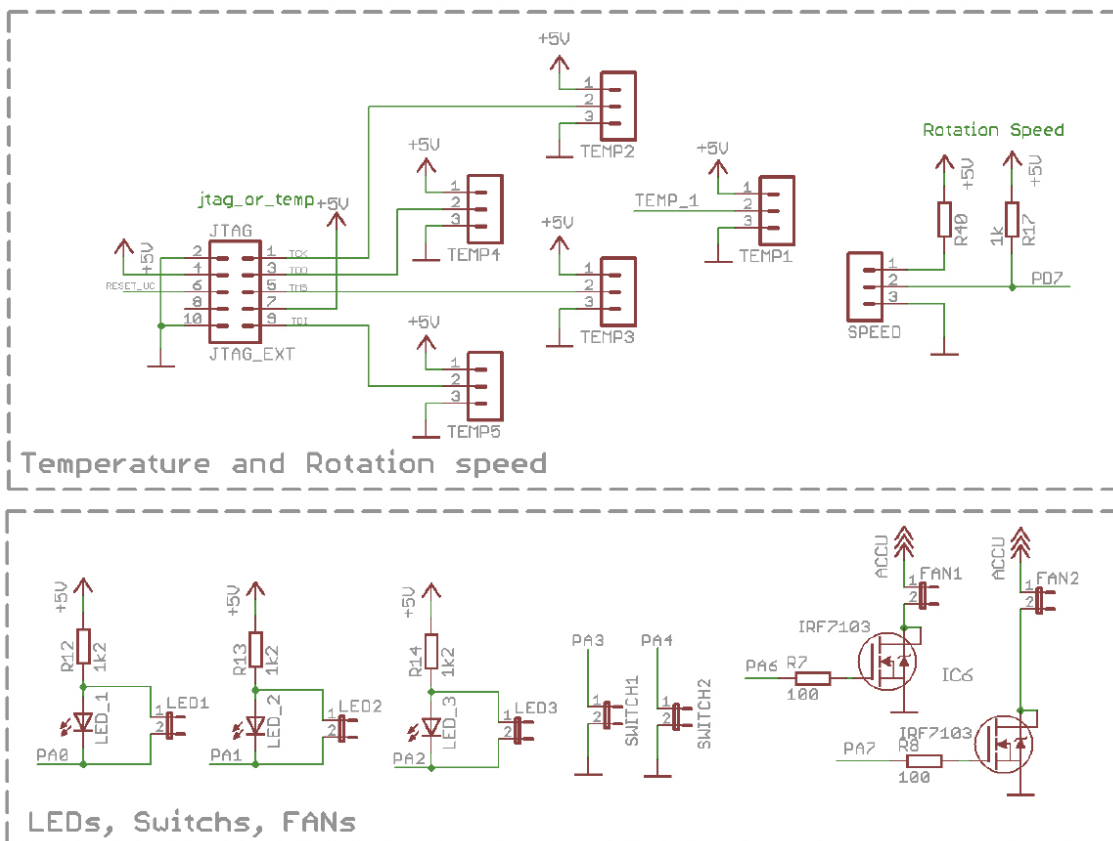


Abbildung B.3: Schaltplan Reglerplatine – Sensoranschlüsse, JTAG