



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



Diplomarbeit

Aufbau und Regelung eines Batteriesimulators für automotiv Anwendungen

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieurs

Betreuung durch

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Wolbank

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johann Ertl

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Hofmann

eingereicht an der

Technischen Universität Wien
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

von

Dominik Geringer BSc

Matrikelnummer 0725513

2434 Pischelsdorf, Bründlfeldgasse 7

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst habe. Die zugrundeliegende Literatur und alle aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Hilfsmittel, sind als solche kenntlich gemacht worden. Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher, noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Pischelsdorf, 23. September 2015

Dominik Geringer

Kurzfassung

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges bei Fahrzeugen hat in den vergangenen Jahren immer mehr zugenommen und wird in Zukunft noch weiter ansteigen. Dieser Trend geht nicht nur in Richtung reiner Elektrofahrzeuge, sondern auch hin zu Hybridfahrzeugen. Durch diese Elektrifizierung steigt das Erfordernis, die Systeme entsprechend zu testen. Gerade in der frühen Testphase wird der Punkt, wo nur einzelne Komponenten getestet werden können schnell erreicht. Speziell die Traktionsbatterie ist dabei oft noch nicht verwendbar oder zu unhandlich für einen Prüfstands-aufbau. Deswegen wird als Ersatz für die Batterie bei solchen Prüfständen ein Batteriesimulator verwendet, welcher die eigentliche Traktionsbatterie ersetzt und so den Test eines Elektromotors ermöglicht.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines solchen Batteriesimulators für automotiv-e Anwendungen. Dieser Simulator stellt eine Erweiterung eines vorhandenen Motorprüfstandes dar. Es wird dabei der Prüfstand für Tests an elektrifizierten Fahrzeugantriebssträngen erweitert, wie zum Beispiel Tests von Einzelkomponenten oder auch das Zusammenspiel bei Hybridantriebsmodulen. In der Arbeit wird der Entwicklungsvorgang des Aufbaus eines Batteriesimulators dargestellt, welcher von Grund auf beginnt und beim fertigen Schaltschrank endet. Außerdem enthalten sind verschiedene Konzepte und die Auswahl der finalen Variante, die auch umgesetzt wurde. Es wird auch das Regelkonzept vorgestellt, mit dem schnell auf Lastsprünge reagiert werden kann. Abschluss der Arbeit sind die Messungen bei Belastung sowie die Identifikation der Kennwerte des Batteriesimulators sowie eine Diskussion der Ergebnisse.

Abstract

The electrification of the powertrain of vehicles has risen the last years and will rise even more in the future. This trend is not only towards pure electric cars but also to hybrid cars. According to this electrification there will be also a growing need for a decent testing of this powertrains. In the early stage of testing, most likely only individual components could be tested. Especially the traction battery is often not ready to use at this point or too inconvenient for the test bench. That is why as a substitute for this traction battery a battery simulator will be used for testing of electric motors or hybrid modules.

This thesis contains the design and implementation of such a battery simulator for automotive applications. This simulator is an extension for an existing engine test bench. It extends the test bench for tests on electrified vehicle powertrains, for example individual components testing and the interaction of hybrid modules. The development progress of the battery simulator will be shown from the scratch. The thesis contains some concepts to realize such simulators and the implementation of the final method. Also the concept of a control system to react on fast load transients is given. At the end of this thesis the resulting measurements under load as well as the identifying parameters of the simulator are demonstrated and also a discussion of the results is given.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	4
2.1. Leistungselektronik	4
2.1.1. Halbleiterbauelemente	5
2.1.2. Wechselstrom-Wechselstrom-Umrichter	11
2.2. Regelung	16
2.2.1. Beispiel Raumtemperaturregelung	17
2.2.2. Steuerung	18
2.2.3. Kaskadierte Regelung	19
2.3. Batteriemodelle	19
3. Aufbau des Batteriesimulators	22
3.1. Allgemeines	22
3.2. Konzept des Batteriesimulators	23
3.2.1. Gleichrichter mit variabler Eingangsspannung	24
3.2.2. Gleichrichter mit DC-DC Wandler	25
3.2.3. Antriebsumrichter mit Filter	26
3.3. Mechanischer Aufbau	28
3.3.1. Auslegung der Komponenten	28
3.3.2. Praktischer Aufbau	36
3.3.3. Bedienung	40
3.3.4. Probleme	41
3.4. Regelung	41
3.5. Integration der Batteriemodelle	43
4. Simulation und Messung	45
4.1. Simulation des Batteriesimulators	45
4.1.1. Simulationsmodell	46
4.1.2. Simulationsergebnisse	47
4.2. Messungen des Batteriesimulators	47
4.2.1. Messaufbau	49
4.2.2. Messungen	50
4.2.3. Messergebnisse	51
4.3. Vergleich von Simulation und Messungen	58
5. Zusammenfassung und Ausblick	60

Inhaltsverzeichnis

Literatur	62
Abbildungsverzeichnis	64
Tabellenverzeichnis	66
Anhang A. Anhang	67
A.1. Messungen	67

1. Einleitung

Ein Grundbedürfnis der Menschheit war schon immer die Mobilität und dabei spielte das Automobil in den letzten 100 Jahren eine sehr wichtige Rolle. Dies zeigt auch die Zahl der Autos, die sich auf unseren Straßen befinden. Jedoch hat die hohe und weiter steigende Zahl von Fahrzeugen auch einige nachteilige Effekte. Neben Parkplatz- oder Lärmproblem ist der weitaus größte Punkt der durch die Anzahl der Automobile einhergehende Kraftstoffverbrauch, sowie der daraus folgende Kohlendioxid (CO₂)-Ausstoß. Dieser Aspekt rückt wegen der Umweltverschmutzung auch immer stärker in den Blickpunkt der Öffentlichkeit. Dem folgten in vielen Ländern regulative Eingriffe wie Abgasnormen, so etwa in der Europäischen Union die Euro-Norm, die den Schadstoffausstoß von Neuwagen reguliert. Im Jahr 2012 wurde auch ein Durchschnittsverbrauch der Neuwagenflotte (Flottenverbrauch) eingeführt und der daraus folgende CO₂- Ausstoß auf 120 g/km begrenzt.

Damit diese Ziele bzw. zukünftige, noch schärfere Ziele, die bereits in der Planung sind, erreicht werden können, müssen die neuen Fahrzeuge noch effizienter werden. So geht der Trend in der Fahrzeugindustrie hin zu höheren Wirkungsgraden bei der Energieumwandlung, sowie zur Möglichkeit der Energierückgewinnung bei Bremsvorgängen. Neben diesen beiden Themen hat sich ebenfalls gezeigt, dass die Hybridfahrzeugtechnologie sowie auch das Elektrofahrzeug ein vielversprechendes Potential für das Erreichen der zukünftigen Vorgaben ist. Denn diese Fahrzeuge haben vor allem in der Stadt einen erheblichen Vorteil gegenüber von konventionellen Fahrzeugen. Wobei sich bei diesem Thema auch immer die Frage stellt wie der Strom hergestellt wurde, ob regenerativ oder mittels fossilen Brennstoffen.

Der generelle Trend hin zu einer erhöhten Elektrifizierung des Antriebsstrangs zeigt auch eine Marktstudie der Firma Roland Berger in Abbildung 1.1. In dieser Grafik sind die Marktanteile für die verschiedenen Antriebsvarianten für das Jahr 2020 dargestellt. Dabei ist ein erheblicher Anteil an Hybridfahrzeugen und Elektrofahrzeugen prognostiziert, etwa ein Viertel der Fahrzeuge in Westeuropa und auch Japan. Neben den Fahrzeugen mit einem elektrischen Antrieb ist auch eine beachtliche Entwicklung bei konventionellen Antrieben mit Start-/Stoppautomatik festzustellen.

Die Umsetzung des Trends der Elektrifizierung des Antriebsstrangs bedarf auch einer geeigneten Möglichkeit diese neuen Komponenten zu testen. Es soll dabei nicht nur möglich sein den gesamten Antriebsstrang zu testen, sondern auch Einzelkomponenten. Um solche Versuche durchführen zu können, werden bei konventionellen

1. Einleitung

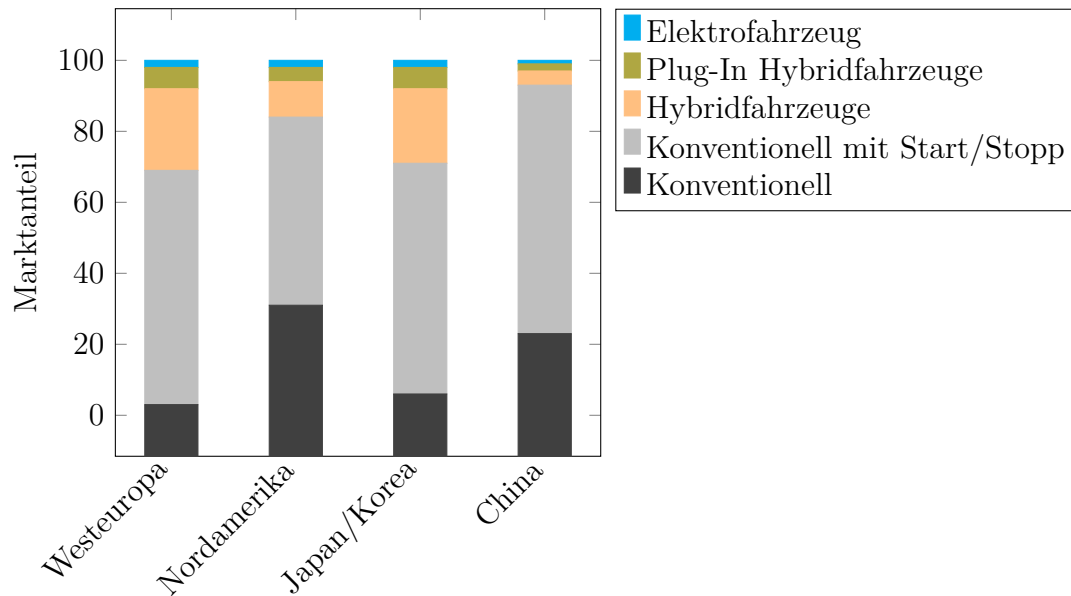


Abbildung 1.1.: Anteil von Hybrid- und Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 [10]

Antrieben Motorprüfstände verwendet, bei denen der Motor samt Getriebe aufgebaut wird um damit die gewünschten Tests ausführen zu können. Damit auch ein Elektromotor an einem solchen Prüfstand betrieben werden kann, muss entweder die Traktionsbatterie mitverbaut oder ein Batteriesimulator, welcher die Batterie simuliert, benützt werden. Da die Batterie aber meist aus Platzgründen am Prüfstand zu unhandlich ist oder auch oft noch gar nicht bereit zum Testen ist, werden hierfür meist Batteriesimulatoren verwendet. Neben den beiden bereits erwähnten Gründen sind aber meist die gute Reproduzierbarkeit von Ergebnissen und auch das Ersparen der Ladezeit der Batterie ausschlaggebender als Platzprobleme.

Diese Diplomarbeit beschreibt nun den Aufbau eines solchen Batteriesimulators für automotive Anwendungen. Der Simulator ist als Erweiterung zu einem bereits existierenden Motorprüfstand geplant um damit in Zukunft auch Elektromotoren an diesem testen zu können. Die Arbeit beinhaltet den gesamten Entwicklungsvorgang von Grund auf bis hin zum fertigen Schaltschrank. Darin eingeschlossen sind etwa die Konzeptfindung, der mechanische Aufbau und auch die Identifikation von Kennwerten der Regelung. Die Arbeit gliedert sich insgesamt in fünf Kapitel wobei das erste diese Einleitung ist:

- In dem Kapitel 2 ist die grundlegende Theorie zu der Leistungselektronik beschrieben mit den verschiedenen Halbleiterbauelementen und den Umrichtern. Außerdem sind in diesem Kapitel noch die Grundlagen zu Regelungen und Batteriemodellen zu finden.
- Das Kapitel 3 beschreibt den Aufbau des Batteriesimulators vom Konzept bis zum fertigen Schaltschrank. Hier werden unter anderem auch die Bau-

1. Einleitung

teildimensionierungen, die Bedienung und auch auftretende Probleme beim Bau des Batteriesimulators besprochen. Es wird hier auch die Regelungsauswahl und deren Auslegung beleuchtet. Abschließend ist noch eine theoretische Umsetzung von Batteriemodellen beschrieben.

- Im Kapitel 4 geht es um die Simulation und Messung des Batteriesimulators. Dies beinhaltet unter anderem das Aufstellen eines Regelmodells, die Identifikation der Systemkennwerte sowie einem Vergleich von Simulation und den Messungen.
- Als Abschluss der Arbeit ist in Kapitel 5 eine Zusammenfassung der Arbeit und auch ein Ausblick auf Verbesserungen des Simulators zu finden.

2. Grundlagen

Das Grundlagenkapitel besteht aus einem allgemeinen Überblick über die Leistungselektronik, Regelungen und die allgemeine Theorie zu Batteriemodellen. Die Leistungselektronik wird nur in Hinsicht auf die vorliegende Aufgabe des Aufbaus eines Batteriesimulators betrachtet. Das beinhaltet unter anderem die Grundlagen der verwendeten Schaltung aus dem Aufbaukapitel sowie deren Halbleiterbauelementen. Bei der Theorie von Regelungen wird ein allgemeiner Überblick gegeben und das Prinzip der verwendeten Regelung gezeigt. Als Abschluss dieses Kapitels werden Batteriemodelle behandelt bzw. welche Möglichkeiten es gibt, eine Batterie zu modellieren.

An dieser Stelle sei auch erwähnt, dass bei dem Grundlagenkapitel nur ein Überblick zu den einzelnen Themen gegeben wird. Für vertiefende Informationen sei auf einschlägige Literatur verwiesen.

2.1. Leistungselektronik

Die grundlegende Aufgabe der Leistungselektronik besteht in der Umwandlung eines elektrischen Betriebszustandes in einen anderen Zustand. Dabei kann das Netz ein solcher Zustand sein und ein Motor der zweite Betriebszustand. Die Leistungselektronik muss dann die Betriebsgrößen wie Spannung, Frequenz und Phasenanzahl denen des Zielzustandes anpassen. Bei dem Beispiel mit dem Motor werden die drei Größen des Netzes den Nenngrößen des Motors angeglichen, so dass danach der Motor durch das Netz versorgt wird. Der gesamte Vorgang soll im Idealfall verlustfrei vonstattengehen. [9]

In Abbildung 2.1 sind alle möglichen Richtungen einer Umwandlung bei elektrischen Systemen dargestellt. Ausgehend von der Abbildung können die Wandler nach ihrer Primärfrequenz eingeteilt werden und in vier verschiedene Grundwandlungsarten unterschieden werden. Es sind in dieser Aufzählung auch die Schaltungen angeführt die diese Umwandlungen bewerkstelligen können. [9]

- **Gleichstrom-Gleichstrom-Umrichter**
Gleichstromumwandler, DC/DC-Wandler, Gleichstromsteller
- **Wechselstrom-Gleichstrom-Umrichter**
AC/DC-Wandler, gesteuerte Gleichrichter

2. Grundlagen

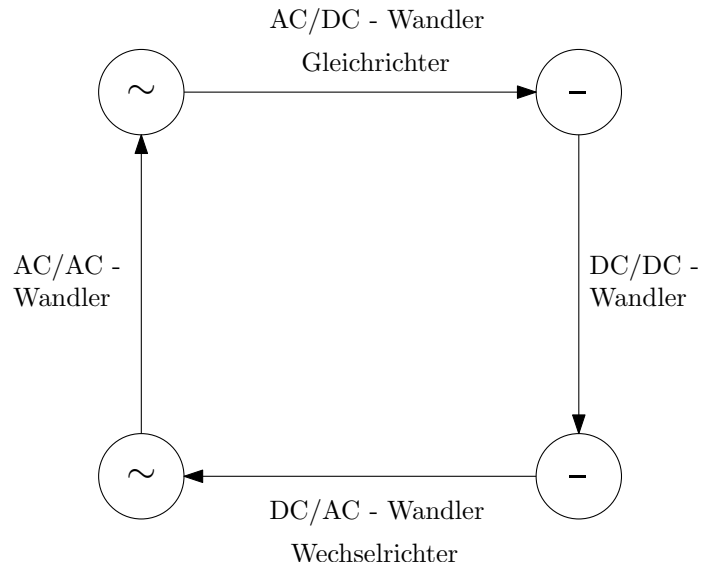


Abbildung 2.1.: Umwandlungsrichtungen

- **Gleichstrom-Wechselstrom-Umrichter**
DC/AC-Wandler, Wechselrichter
- **Wechselstrom-Wechselstrom-Umrichter**
Wechselstromumrichter, AC/AC-Wandler, Frequenzumrichter

2.1.1. Halbleiterbauelemente

Bevor näher auf leistungselektronische Schaltungen von Umrichtern eingegangen wird, werden Halbleiterbauelemente besprochen, die in solchen Umrichtern verwendet werden. Solche Bauteile sind etwa Dioden, Thyristoren, Mosfets und IGBTs. Diese Bauelemente sind mitunter die wichtigsten Bestandteile von Schaltungen in der Leistungselektronik. Der Fortschritt bei der Entwicklung dieser Bauteile trägt maßgeblich zur rasanten Verbreitung der Leistungselektronik in den letzten Jahren in allen möglichen Bereichen bei.

Im Wesentlichen beruht eine Umrichterschaltung auf der Verwendung von elektronischen Ventilen. Solche Ventile sind Bauelemente, welche in den leitenden oder in den nichtleitenden Zustand gebracht werden können. Mittlerweile sind das ausschließlich Halbleiterbauelemente. Das Umschalten der Zustände bei Ventilen kann entweder durch die Änderung von der Richtung einer elektrischen Größe oder durch ein Steuersignal erfolgen. Jene Ventile bei denen durch die Richtungsänderung umgeschaltet wird, werden als nichtsteuerbare elektronische Ventile bezeichnet. Die zweiten erwähnten Ventile mit dem Steuersignal werden steuerbare elektronische Ventile genannt. Wobei bei den steuerbaren Ventilen nochmals unterschieden werden muss und zwar ob das Ventil nur eingeschalten werden kann oder ob es auch

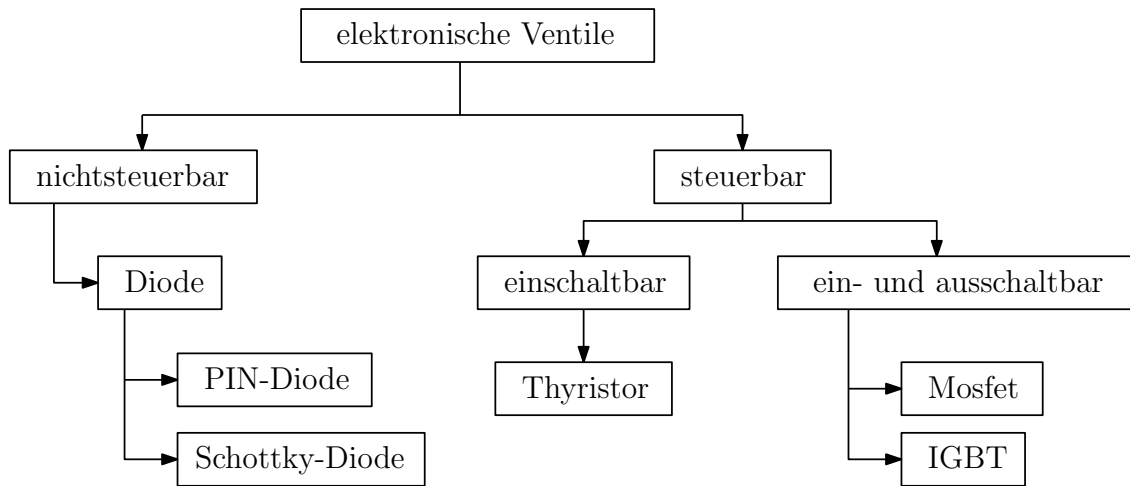


Abbildung 2.2.: Übersicht von elektronischen Ventilen

durch ein Signal wieder ausgeschaltet werden kann. In Abbildung 2.2 ist eine Einteilung der einzelnen elektronischen Ventile zu sehen die üblicherweise bei Umrichterschaltungen verwendet werden. [13]

Die nicht gesteuerten und die nur einschaltbaren Ventile, also die Dioden und Thyristoren, werden typischerweise in Gleichrichterschaltungen verwendet, da hier kein Abschalten des Ventiles durch ein Steuersignal benötigt wird. Das Abschalten geschieht durch die Kommutierung durch die Netzspannung. Im Gegensatz dazu werden bei Wechselrichtern Ventile benötigt die auch den Strom abschalten können, deshalb werden hier die ein- und ausschaltbaren Ventile verwendet, wie Mosfets oder IGBTs.

Dioden

Die Diode ist das einfachste Ventil und ist der praktische Aufbau eines PN-Überganges aus der Halbleitertechnik. Sie ist wie alle Ventile ein nichtlineares Bauteil, da sie erst ab einem bestimmten Wert in den leitfähigen Zustand übergeht. Die Diode ist außerdem unidirektional, das heißt sie leitet den Strom nur in eine Richtung und sperrt ihn in der anderen. Das Umschalten vom nichtleitenden Zustand in den leitenden Zustand erfolgt durch ein Überwinden der Schwellenspannung U_S (0,6 – 0,7V) in positiver Richtung. Wenn diese Schwelle danach wieder unterschritten wird, sperrt die Diode. Bei Wechselstromanwendungen leitet sie nur eine Halbwelle und sperrt die andere und ist damit schon ein einfacher Gleichrichter. Die Schwelle ist in der Kennlinie in Abbildung 2.3 auf der rechten Seite im 1. Quadranten zu sehen. Wegen des Einschaltens rein durch ein Überwinden der Schwelle, lässt die Diode wie schon erwähnt zu den nicht steuerbaren elektronischen Ventilen zählen. Das Bild 2.3 zeigt auch den Unterschied einer realen zu einer idealen Diode. Der Unterschied besteht im Wesentlichen in dem Durchbruch der realen

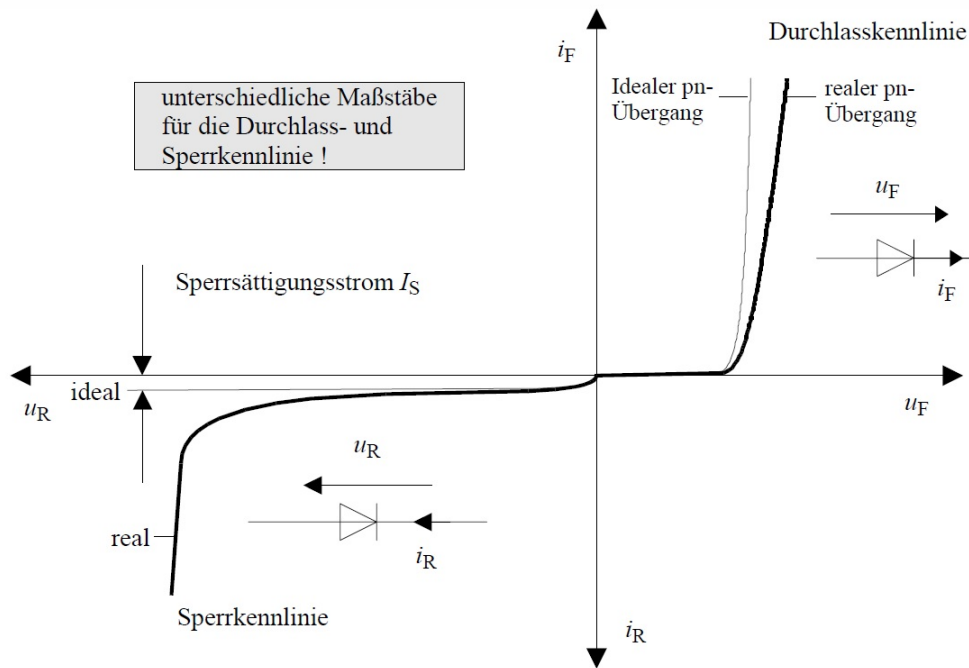


Abbildung 2.3.: Kennlinie einer Diode [15, S.15]

Diode in Rückwärtsrichtung ab einer Spannung, der Durchbruchspannung, wo sie dann ebenfalls leitet. Ein solcher Durchbruch zerstört die Diode aber üblicherweise irreparabel und ist somit kein normaler Betriebszustand.

Für höhere Leistungen speziell bei höheren Spannungen, ist die Spannungsfestigkeit der Diode ein Thema und deshalb wird sie nicht mehr nur mittels eines PN-Übergangs aufgebaut, sondern es wird eine zusätzliche Zwischenschicht eingefügt. Die Leistungsdiode, wie sie dann bezeichnet wird, ist als PIN-Diode aufgebaut. Sie besitzt dann eine schwachdotierte Zwischenschicht (I für intrinsisch, eigenleitend) zwischen der P und der N Schicht und dadurch eine breitere Raumladungszone womit die Spannungsfestigkeit erhöht wird. Durch diese zusätzliche Schicht besitzt die Diode aber auch einen erhöhten Bahnwiderstand und dadurch verbundene höhere Durchlassverluste. [15]

Thyristoren

Thyristoren werden im Gegensatz zu Dioden mit einem Steuersignal eingeschalten und darum werden sie als einschaltbare elektronische Ventile bezeichnet. Das klassische Einsatzgebiet war die Gleichstromantriebstechnik, welche mittlerweile durch die Drehstromantriebstechnik abgelöst wurde, wo aber abschaltbare Ventile benötigt werden. Aktuell typische Anwendungen für Thyristoren sind etwa Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Anlagen, Netzkupplungen oder Stromrichter motoren höherer Leistung.

2. Grundlagen

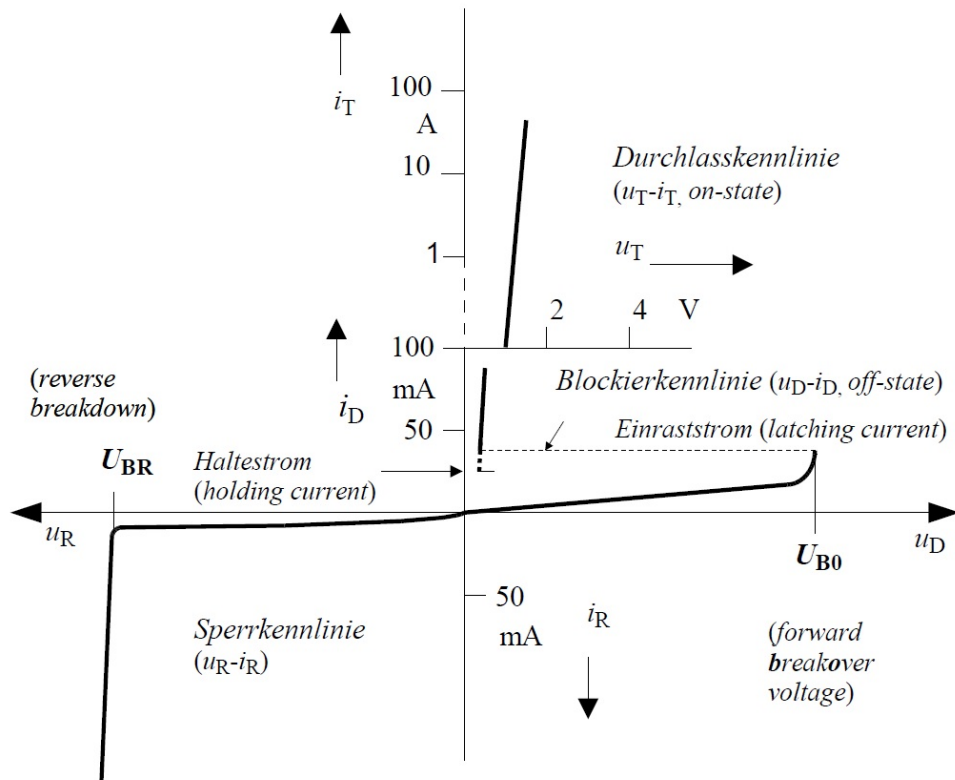


Abbildung 2.4.: Kennlinie eines Thyristors [15, S.75]

2. Grundlagen

Die Funktion ist vereinfachend darin beschrieben, dass der Thyristor nur vom Blockierzustand ($U_{AK} > 0$) heraus eingeschalten werden kann. Dieses Einschalten kann durch mehrere Ursachen ausgelöst werden:

- Überschreiten der zulässigen Blockierspannung
- Überschreiten der zulässigen Spannungsteilheit
- Gatezündstrom

Wobei die ersten beiden Möglichkeiten nicht die normale Arbeitsweise darstellen und den Thyristor zerstören können bzw. es zu einem ungewollten Einschalten kommen kann. Die normale Methode den Thyristor einzuschalten ist mittels eines Gatezündimpulses. In Abbildung 2.4 ist die Kennlinie dargestellt, dabei zeigt sich der Blockierzustand bei $U_{AK} > 0$ und der Thyristor leitet erst, wenn der Strom i_D fließt. Danach ist er erst selbständig (d.h. ohne weiteren Gatestrom) leitend, wenn der sogenannte Einraststrom i_{AK} erreicht wird. Das Ausschalten geschieht durch ein Unterschreiten des Haltestrom der typischerweise bei max. 400mA liegt. [15]

Mosfet

Die Bezeichnung Mosfet steht für die englische Bezeichnung „**metal oxide semiconductor field effect transistor**“, es handelt sich also um einen Metall-Oxid-Feldefekttransistor. Die Besonderheit dieses Transistortyps ist die durch das Metalloxid isolierte Steuerelektrode (Gateelektrode). Der Mosfet leitet erst wenn zwischen dem Gate G und Source S eine Spannung U_{GS} angelegt wird. Es bildet sich durch diese Spannung ein leitender Kanal unter dem Gateoxid aus, wodurch der Mosfet im Endeffekt zwischen D und S leitet. Wenn die Spannung wieder abgeschaltet wird, schließt sich der Kanal und der Mosfet sperrt. Der Aufbau und das Schaltsymbol eines n-Kanal selbstsperrenden Mosfets sind in Abbildung 2.5 zu sehen.

Im Gegensatz zu Kleinsignal-Transistoren bestehen Leistungsmosfets aus einem zellularen, vertikalen Aufbau, bei dem viele einzelne Zellen parallel geschaltet werden und wodurch sie höheren Belastungen standhalten. Das Problem von Leistungsmosfets ist der parasitäre Bipolartransistor den sie besitzen und der die Ursache der Inversdiode ist, welche sich zwischen S und D als parasitäre Rückwärtsdiode ausbildet. Leider hat diese Diode relativ schlechte Schalteigenschaften. [11]

Die Vorteile von Mosfets:

- Sie sind sehr schnelle Schalter und haben auch keine Speichereffekte wie sie etwa Bipolartransistoren haben, da sie Majoritätsbauteile sind (nur Elektronen und keine Elektronen/Loch-Paare)
- Mosfets sind leistungslose Schalter, da kein Gatestrom im stationären Fall fließt

2. Grundlagen

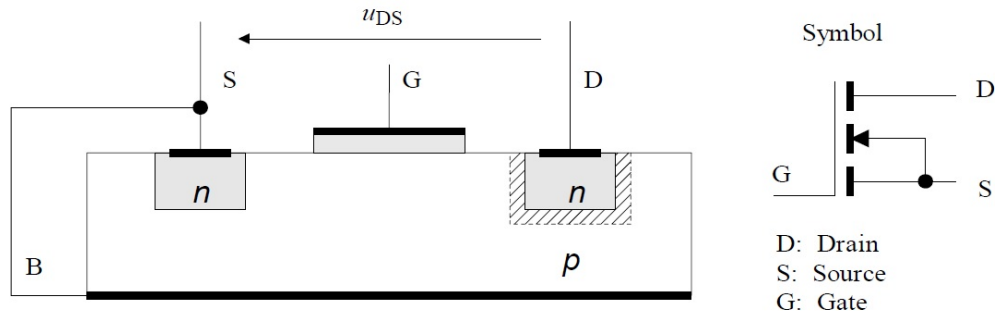


Abbildung 2.5.: Aufbau und Schaltsymbol eines Mosfets [15, S.50]

- Sie besitzen eine ohmsche Durchlasscharakteristik
- Mosfets sind robust und haben eine hohe Überlastfähigkeit

Ein Nachteil liegt in der Tatsache begründet, dass sie wie schon erwähnt Majoritätsbauteile sind und nur Elektronen zur Leitung verwenden. Denn dadurch ist keine Leitfähigkeitsmodulation durch bipolare Ladungsträger möglich, wie diese bei IGBTs angewendet wird. Bei Mosfets kommt es zu einem starken Ansteigen des Durchlasswiderstandes $R_{DS,ON}$ bei hohen Sperrspannungen und deshalb werden sie typischerweise nur für Anwendungen bis zu 500V verwendet. [11]

IGBT

IGBT steht für die englische Bezeichnung „Insulated Gate Bipolar Transistor“, also ein Bipolartransistor mit einer isolierten Gateelektrode. Ein IGBT ist ähnlich wie ein Mosfet aufgebaut, der einzige Unterschied besteht in der untersten Schicht des Substrates, das eine p-Schicht beim IGBT gegenüber einer n-Schicht beim Mosfet ist, siehe Abbildung 2.6. Damit kann der IGBT die Vorteile eines Bipolartransistors nämlich hohe Sperrspannung, gutes Durchlassverhalten und der Robustheit mit den Vorteilen eines Mosfets, welcher ein leistungsloser Schalter ist verbinden. Der IGBT ist im Prinzip ein stromlos steuerbarer Bipolartransistor allerdings in Mosfet-Struktur. Es handelt sich aber um ein Minoritätsbauteil, zum Leiten werden Elektronen/Loch-Paare verwendet, wodurch eine Leitfähigkeitsmodulation möglich ist.

Die Vorteile:

- Da es sich bei einem IGBT um ein Minoritätsbauteils handelt, besitzt er für eine gleiche Chipfläche eine geringere Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} als der Mosfet.
- Er besitzt ebenfalls eine leistungslose Ansteuerung, weil kein Gatestrom im stationären Fall fließt.

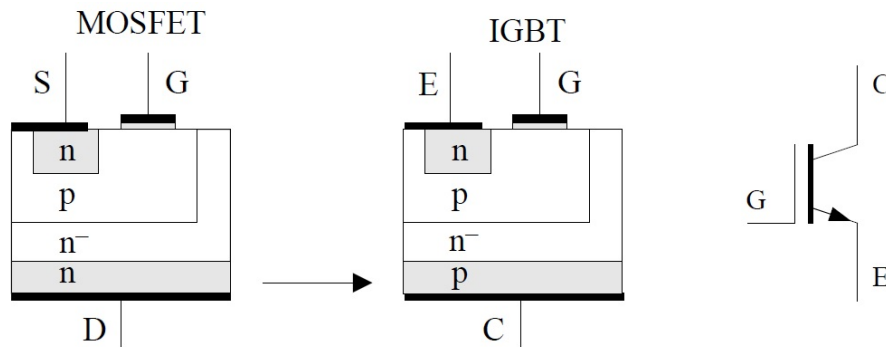


Abbildung 2.6.: Aufbau und Schaltsymbol eines IGBT [15, S.56]

- Der IGBT ist wie ebenfalls der Mosfet sehr robust und gut überlastfähig.

Die Nachteile sind:

- Der IGBT besitzt aufgrund der Leitung über Elektronen/Loch-Paare eine erhöhte Schaltzeit. Die Paare müssen beim Einschalten erst aufgebaut werden und beim Ausschalten müssen sie erst rekombinieren, damit er gesperrt ist. Der Ausschalteffekt wird als „tailcurrent“ bezeichnet.
- Die Durchlasscharakteristik ist im Gegensatz zum Mosfet keine rein ohmsche, sondern sie weist infolge der PN-Zone am Kollektor C eine „Schwellspannung“ auf.
- Der IGBT besitzt keine Diodenfunktion in Rückwärtsrichtung, wodurch eine Freilaufdiode zusätzlich verbaut werden muss.

Die Hauptvorteile des IGBT sind die hohen Spannungs- und Stromgrenzen wodurch er in Umrichterschaltungen höherer Leistung besonders oft verbaut wird. [11, 15]

2.1.2. Wechselstrom-Wechselstrom-Umrichter

Dieses Unterkapitel beschreibt nur die Wechselstrom-Wechselstrom-Umrichter, da diese Schaltung beim Batteriesimulator verwendet wurde. Die Gründe für diese Entscheidung werden in Kapitel 3 näher beschrieben und auch warum kein Wechselstrom-Gleichstrom-Umrichter verwendet wurde.

Die Betriebsgrößen (Spannung, Frequenz und Phasenanzahl) eines Wechselstrom-Wechselstrom-Umrichter, auch AC/AC-Umrichter genannt, lassen sich nicht immer uneingeschränkt und wirtschaftlich umwandeln. Das gilt insbesondere wenn sich die Frequenz ändern soll. Um dies trotzdem wirtschaftlich zu bewerkstelligen, wird ein Zwischenbetriebszustand, geschaffen der bei diesem Problem hilft. Dieser Zwischenbetriebszustand ist meist eine Gleichspannung, dabei wird die Netzspannung

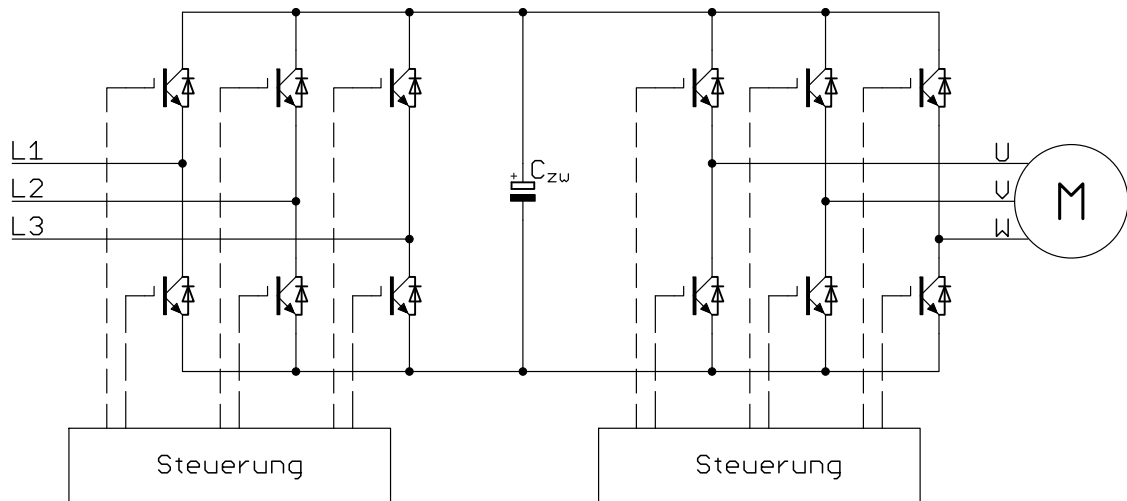


Abbildung 2.7.: Zwischenkreisumrichter

gleichgerichtet und in einer Drossel oder einem Kondensator gespeichert. Der Speicher wird danach wieder verwendet um aus diesem wieder eine Wechselspannung mit der gewünschten Frequenz zu erzeugen. Ein solcher Wandler heißt Zwischenkreisumrichter und wird aus zwei Teilumrichtern zusammengesetzt. Beispielsweise finden diese Wandler in Lokomotiven Verwendung um die Fahrmotoren zu versorgen. Abbildung 2.7 zeigt einen Zwischenkreisumrichter mit einem Kondensator als Zwischenkreisspeicher. Dadurch ist die Kondensatorspannung die Zwischengröße, welche als Speichergröße verwendet wird. Deswegen kann so eine Schaltung auch genauer als Spannungszwischenkreisumrichter bezeichnet werden. [9]

Wie schon erwähnt setzt sich ein Umrichter dieser Art aus zwei Einzelumrichtern zusammen. Das wären zum einen ein Gleichrichter (Abbildung 2.7 linke Seite) und zum anderen ein Wechselrichter (Abbildung 2.7 rechte Seite). Eine wichtige Eigenschaft die die Schaltung hat, ist ihre Rückspeisefähigkeit. Das System kann Energie vom Netz zum Motor liefern oder Energie ins Netz rückspeisen, wenn der Motor bei Bremsvorgängen als Generator arbeitet. Des Weiteren ist mit einem so aufgebauten Umrichter ein echter 4-Quadranten-Betrieb möglich, das heißt es kann Wirkleistung in beide Richtungen übertragen werden und zusätzlich können unterschiedliche Blindleistungsverhältnisse am Netz bzw. am Motor definiert werden. Die Bezeichnung 4-Quadranten-Betrieb kommt daher da eine elektrische Maschine entweder als Motor oder als Generator verwendet werden, wobei dieser jeweils noch im Uhrzeigersinn oder dagegen gedreht werden kann.

Gleichrichter

Ein Gleichrichter erzeugt einen Gleichstrom aus einem Wechselstrom. Im einfachsten Fall ist dies nur eine Diode am Wechselspannungsnetz, die dann die negativen

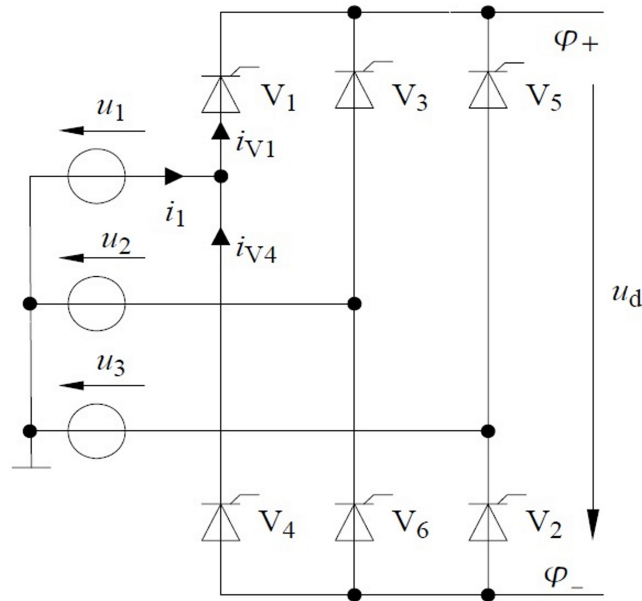


Abbildung 2.8.: B6-Brückengleichrichter [15, S.149]

Periodenhälften sperrt und nur mehr die positive durchlässt. Das Resultat ist eine pulsierende Gleichspannung. Dieser einfache Gleichrichter kann durch einen Kondensator noch verbessert werden. Für dreiphasige Anwendungen ist der einfachste Gleichrichter der M3-Gleichrichter, hier ist wie schon beim einfachen Gleichrichter fürs Wechselspannungsnetz eine Diode pro Strang verbaut. Die bessere und auch weit verbreitetste Gleichrichterschaltung ist aber der B6-Brückengleichrichter, eine solche Schaltung ist in Abbildung 2.8 zu sehen. Das B6 steht dabei für eine 6-pulsige Brückenschaltung, es leiten abschnittsweise sechs Gleichrichterzweige innerhalb einer Periodendauer und jedes einzelne Ventil leitet dabei für 120° . Hier wird nicht nur die obere Halbwelle verwendet, wie etwa beim M3-Gleichrichter, sondern auch die untere Halbwelle der Eingangsschwingung. Im Prinzip besteht die B6-Schaltung somit aus einer Reihenschaltung von zwei um 60° verschobenen M3-Gleichrichtern.

Es leiten beim Gleichrichten immer zwei Ventile gleichzeitig, eines in der oberen Brückenhälfte (φ_+) und eines in der unteren Brückenhälfte (φ_-). Bei ungesteuerten Brücken ($\alpha = 0$) erfolgt die Umschaltung der Ventile in dem Schnittpunkt der Phasenspannungen. Es leitet hier immer nur das Ventil mit der momentan höchsten Phasenspannung. In ungesteuerten Gleichrichtern werden als Ventile Dioden eingesetzt. Thyristoren hingegen ermöglichen einen gesteuerten Betrieb, wodurch die Spannung variiert werden kann. Dies ist durch den dazugewonnenen Steuerungswinkel α möglich. Die Ausgangsspannung $U_{di\alpha}$ lässt sich wie in Formel 2.2 beschrieben variieren.

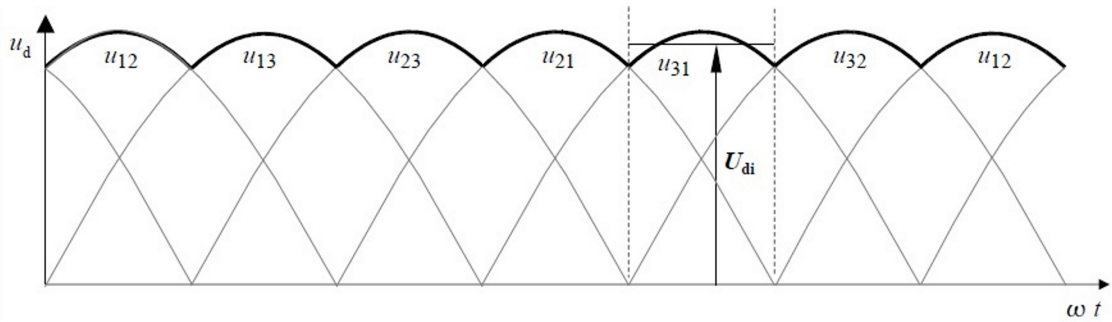


Abbildung 2.9.: Ausgangsspannung des B6-Brückengleichrichters [15, S.150]

$$U_{di0} = \frac{\hat{U}_{j0} \cdot 3\sqrt{3}}{\pi} \quad (2.1)$$

$$U_{di\alpha} = U_{di0} \cdot \cos \alpha \quad (2.2)$$

Die Abbildung 2.9 zeigt die resultierende Ausgangsspannung U_{di} eines solchen Gleichrichters bei $\alpha = 0$. Es ist noch eine gewisse Restwelligkeit zu beobachten, welche durch eine höhere Pulszahl verbessert werden würde, jedoch reicht dieser Spannungsverlauf für die meisten Anwendungen aus. [11, 13, 15]

Wechselrichter

Ein Wechselrichter hat die Aufgabe aus einer Gleichspannung eine Wechselspannung zu erzeugen. Der Wechselrichter aus Abbildung 2.10 ist ein Spannungszwischenkreisumrichter wegen des Kondensators im Zwischenkreis und der Spannung als Speichergröße. Diese Schaltung braucht abschaltbare Ventile, deshalb werden hierfür Mosfets oder IGBTs benötigt.

Das Massesymbol neben dem Kondensator deutet den Mittelpunkt der Zwischenkreisspannung an, die bei einem einphasigen Aufbau benötigt würde und durch die symmetrischen Eigenschaften bei einer dreiphasigen Ausführung entfällt. Bei diesem Umrichter wird die Zwischenkreisspannung U_{zw} (Gleichspannung) immer so umgeschaltet, dass eine resultierende Wechselspannung am Ausgang entsteht. Dabei kann es pro Strang nur zu zwei verschiedenen Schaltzuständen kommen, nämlich $\frac{+U_{zw}}{2}$ oder $\frac{-U_{zw}}{2}$. Bei einem dreiphasigen Aufbau resultieren dadurch $2^3 = 8$ Schaltzustände und damit auch 8 Spannungszustände. In der Tabelle 2.1 sind die im Vollblockbetrieb verwendeten sechs Schalterstellungen dargestellt. [11]

Die verketteten Spannungen des Motors U_{UV} , U_{VW} und U_{WU} , sowie die Spannungen für die einzelnen Phasen U_U , U_V und U_W setzen sich wie in den Formel 2.3 und 2.4 beschrieben zusammen. In Abbildung 2.11 sind die resultierenden Spannungen

2. Grundlagen

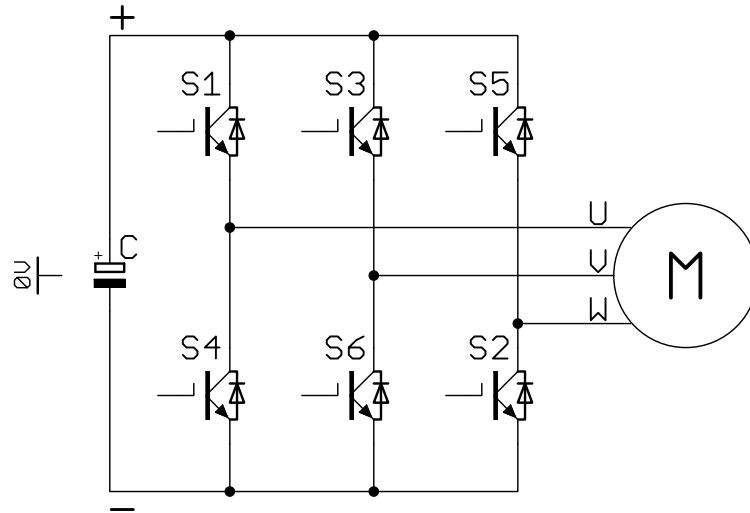


Abbildung 2.10.: Wechselrichter [11]

Tabelle 2.1.: Schalterstellungen und resultierende Spannungen [11, 13]

Zustand	α [°]	Strang U	Strang V	Strang W	U_{UV}	U_U
1	0-60	S1	S6	S5	U_{zw}	$\frac{U_{zw}}{3}$
2	60-120	S1	S6	S2	U_{zw}	$\frac{2 \cdot U_{zw}}{3}$
3	120-180	S1	S3	S2	0	$\frac{U_{zw}}{3}$
4	180-240	S4	S3	S2	$-U_{zw}$	$-\frac{U_{zw}}{3}$
5	240-300	S4	S3	S5	$-U_{zw}$	$-\frac{2 \cdot U_{zw}}{3}$
6	300-360	S4	S6	S5	0	$-\frac{U_{zw}}{3}$

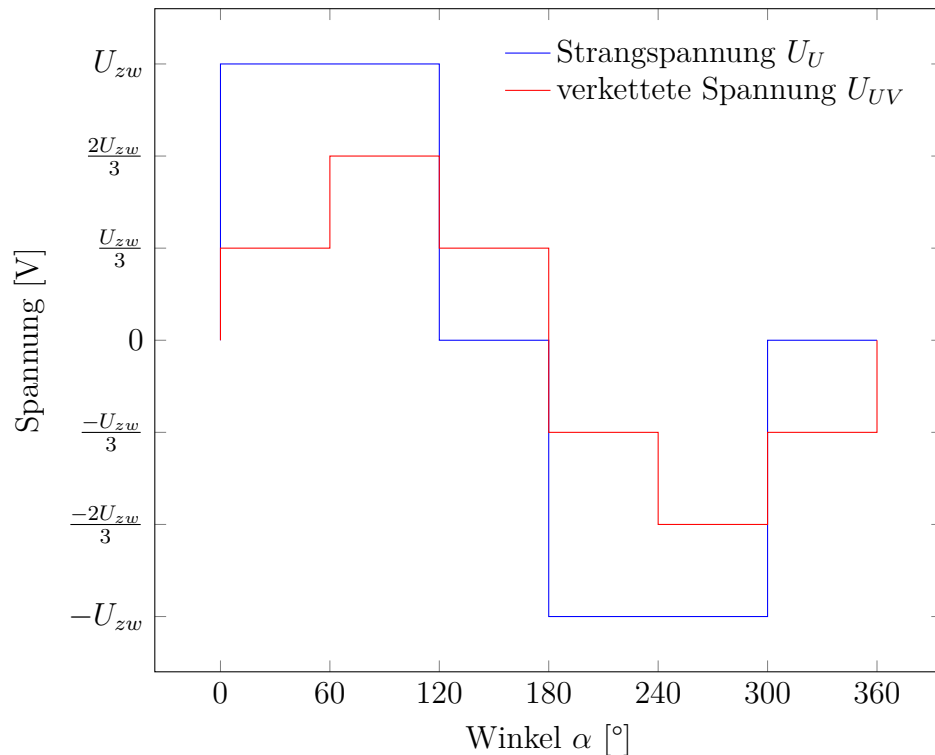


Abbildung 2.11.: Spannungen des Wechselrichters

grafisch dargestellt. Die Spannung bei einem Wechselrichter wird ähnlich einer Sinusform modelliert, was in dem Bild gut zu sehen ist. Es kommt jedoch bedingt durch das Schalten im Umrichter zu schaltfrequenten Oberschwingungen. Um diese Störungen zu unterdrücken, wird ein Filter benötigt das so ausgelegt ist um diese Frequenzen möglichst zu unterdrücken.

$$U_{UV} = (U - V) \cdot \frac{U_{zw}}{2} \quad (2.3)$$

$$U_U = \left(U - \frac{V}{2} - \frac{W}{2} \right) \cdot \frac{U_{zw}}{3} \quad (2.4)$$

2.2. Regelung

Der wesentliche Bestandteil einer Regelung ist der Rückkoppelzweig, wodurch sie sich von einer reinen Steuerung unterscheidet. Die Rückkopplung dient dazu, die zu regelnde Größe (die Regelgröße) unabhängig gegenüber Störeinflüssen (die Störgröße) zu machen und sie stets an den vorgegebenen Wert (Sollwert) heranzuführen. Die Regelgrößen sind in technischen Anwendungen immer physikalische Größen wie

etwa Druck, Temperatur, Drehzahl oder Spannung. Die Wirkungsweise einer Regelung sei am besten an einem einfachen Beispiel einer Raumtemperaturregelung erklärt.

2.2.1. Beispiel Raumtemperaturregelung

Die Temperatur ϑ_{ist} in einem Raum soll auf einer vorgegebenen Temperatur ϑ_{soll} (der Sollwert) gehalten werden. Die Wärmezufuhr in den Raum erfolgt über einen Heizkörper. Für eine Regelung wird zum Messen ein Thermometer benötigt um die Temperatur ϑ_{ist} im Raum zu kennen. Als nächstes muss diese Temperatur mit der Solltemperatur ϑ_{soll} verglichen werden. Weicht die Temperatur ϑ_{ist} von ϑ_{soll} ab, muss das Ventil des Heizkörpers, wenn eine höhere Temperatur benötigt wird, aufgedreht oder wenn eine niedrigere Temperatur gebraucht wird das Ventil zuge dreht werden. Der Grund warum sich die Temperatur ändert liegt in der Störgröße des Regelsystems begründet. Diese Störung kann viele Gründe haben so kann sich die Außentemperatur ändern, es kann ein Fenster geöffnet werden oder es kann sich die Zahl der Leute im Raum ändern. [16]

Anhand dieses Beispiels der Raumtemperaturregelung sind die Grundfunktionen einer Regelung schon beschrieben worden und ergeben sich zusammengefasst zu:

- Messen der zu regelnden Größe
- Vergleich der Regelgröße mit dem Sollwert
- Erzeugung einer Stellgröße
- Verstellen eines Stellorgans

Eine Regelung muss alle diese Funktionen beherrschen und auch selbstständig ausführen können. Weil mittlerweile die meisten Regler in der jetzigen Zeit elektronische Regler auf Basis von Mikrocontroller sind, müssen alle Größen in elektronische Signale umgewandelt werden und dem Regler zugeführt werden. Dieser berechnet dann aus der Abweichung $e(t)$ eine Stellgröße $u(t)$. Die Abweichung ist die Differenz von der Regelgröße $y(t)$ (Istwert) und der Sollgröße $r(t)$ (Sollwert) $e(t) = y(t) - r(t)$. Mit der Stellgröße $u(t)$ wird ein Stellglied in Form eines Aktors angesteuert. Ein solcher Regelkreis wird in der Regelungstechnik in Form eines Blockschaltbildes, siehe Abbildung 2.12, dargestellt. Es wird meistens noch eine Vereinfachung verwendet in dem das Stellglied und die Strecke zu einer Regelstrecke zusammengefasst werden, da sie kaum einzeln auftreten. Die Störung ist in dem Bild mit $d(t)$ bezeichnet und wirkt auf die Strecke bzw. wird beim vereinfachten Regelkreis vor der Regelstrecke hinzu addiert. Der Sensor stellt die Messung der physikalischen Größe dar und deren Umwandlung in ein Istwertsignal für den Regler. Grundlegend für die Auswahl und die Dimensionierung ist die Abbildung des Systems mit Hilfe eines Modells,

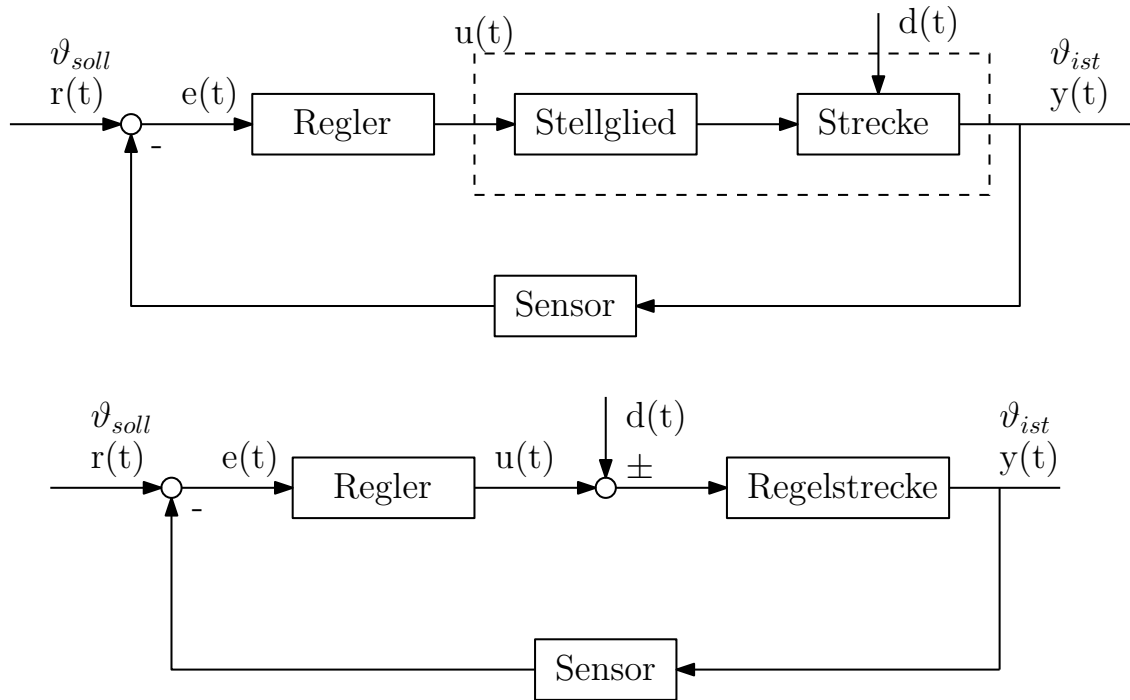


Abbildung 2.12.: allgemeiner Regelkreis (oben), vereinfachter Regelkreis (unten)

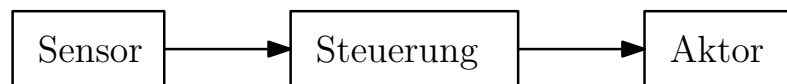


Abbildung 2.13.: Steuerkette

worin dann alle Zustände und auch die Auswirkungen von Größenänderungen mit Hilfe von Differentialgleichungen berechnet werden können.

2.2.2. Steuerung

Der große Unterschied der Steuerung gegenüber der Regelung ist die nicht vorhandene Rückkopplung. Die Steuerung funktioniert als einfache Kette wie in Abbildung 2.13 zu sehen ist. Es wird eine Größe gemessen und daraufhin ein Aktor angesteuert. Die Steuerung kann dadurch auch nur bedingt auf Störungen reagieren. Der Vorteil ist, bei Steuerungen können keine Instabilitäten auftreten wie sie bei Regelungen möglich sind. Sie werden dort eingesetzt wo keine Störkompensation benötigt wird, wie etwa bei Ablaufsteuerungen von Produktionsprozessen. Als Stichwort seien in diesem Zusammenhang noch die Speicherprogrammierbaren-Steuerungen (SPS) genannt, die nach dem Steuerungsprinzip arbeiten und Daten einlesen, verarbeiten und danach Aktoren ansteuern.

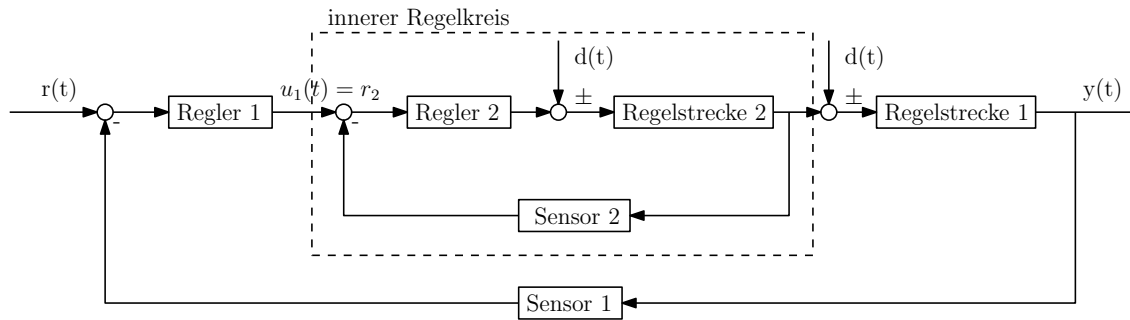


Abbildung 2.14.: Kaskadierter Regelkreis

2.2.3. Kaskadierte Regelung

Die kaskadierten Regelungen werden in der Antriebstechnik oft verwendet da damit zum Beispiel bei einem Motor sowohl der Strom als auch die Drehzahl geregelt werden. Es müssen hier beide Regelgrößen gemessen werden. Der innere Regelkreis arbeitet in der kaskadierten Regelung normalerweise viel schneller als der äußere Regler, so dass dieser den inneren Kreis quasi nicht bemerkt. Die Führungsübertragungsfunktion im Arbeitsbereich im interessierten Frequenzbereich muss hier annähernd 1 sein. Zur Funktion sei soviel gesagt, die Stellgröße des Regler 1 ist gleich die Führungsgröße für den Regler 2. Der Regler 2 regelt zum Beispiel den Strom auf einen gewünschten Sollwert, die Ausgangsgröße des Reglers 2 ist dann gleich der Stellgröße vom Regler 1. Die Gesamtregelstrecke wird dadurch in kleinere, besser regelbare Teilstrecken aufgeteilt. So kann die Regelgenauigkeit verbessert werden.

2.3. Batteriemodelle

Batteriemodelle befassen sich mit der Nachbildung des Verhaltens einer realen Batterie, zum Beispiel einer Lithium Ionen Batterie. Bei einer Batterie gibt es ein statisches Verhalten, welches durch die ladezustandsabhängige Ruhespannung bestimmt ist und ein dynamisches Verhalten, bei dem die physikalisch-chemischen Effekte von Bedeutung sind. Die Ruhespannung einer Batterie ist die Spannung bei einem unbelasteten Ruhezustand und sie hängt hauptsächlich von dem Ladezustand, dem State of Charge SOC, ab und kann nach dem Abklingen aller dynamischen Vorgänge an den Klemmen gemessen werden. Daraus resultiert eine Ruhespannungskennlinie, worin der Zusammenhang zwischen Ladezustand SOC und der Ruhespannung dargestellt ist. In Abbildung 2.15 ist eine typische Kennlinie für eine Lithium Ionen Batterie zu sehen, inklusive der einzelnen Messschritte zur Identifizierung der Ruhespannung.

2. Grundlagen

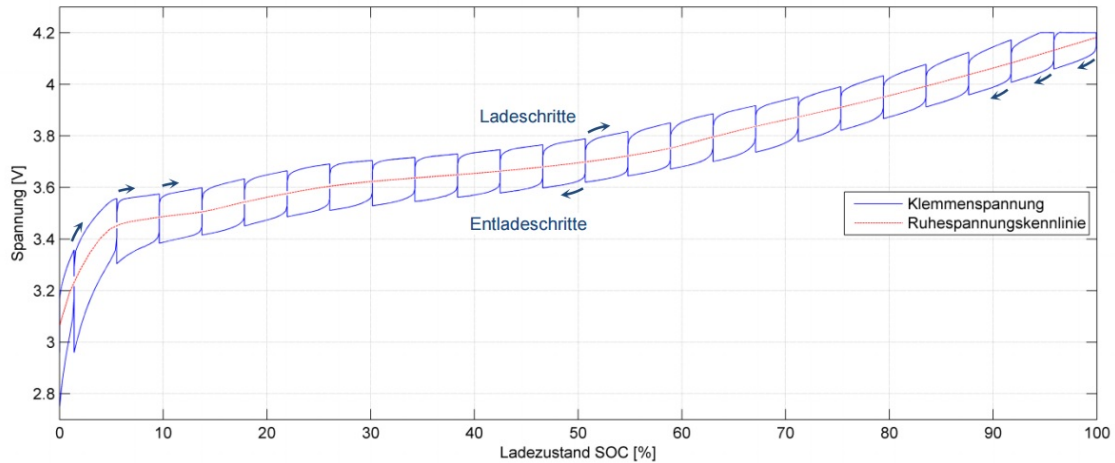


Abbildung 2.15.: Ruheszustandskennlinie einer Lithium Ionen Batterie [12]

Das dynamische Verhalten einer Batterie kann zum Beispiel mit Hilfe der elektrischen Impedanzspektroskopie (EIS) ermittelt werden. Es wird bei dem Verfahren die Batterie mit einem sinusförmigen Signal angeregt und dabei die Systemantwort gemessen. Daraus resultiert ein Impedanzspektrum, in welchem einzelne physikalische und elektrochemische Effekte erkennbar sind. [12]

Bei der Modellierung von Batterien gibt es drei verschiedene Modellansätze, die in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden [12]:

- **Elektrische Ersatzschaltkreise**

Bei diesem Ansatz wird das Verhalten der Batterie mittels einfacher elektrischer Bauelemente wie Spannungsquellen, Widerständen und Kondensatoren nachgebildet. Ein großer Vorteil davon ist eine hohe Flexibilität, wodurch eine einfache Anpassung des Modells auf verschiedene Anwendungen leichtfertig bewerkstelligt werden kann. Es können dabei detaillierte Modelle verwendet werden die die Batteriedynamik präzise nachbilden können oder einfache Modelle mit wenigen Widerständen und Kondensatoren, welche eine schnelle Berechnung ermöglichen. Eine schnelle Berechnung kann etwa bei komplexen Simulationen oft von Vorteil sein.

- **Physikalisch-chemisch motivierte Modelle**

Dieser Modellierungsansatz bildet die innere Struktur und die Materialien im Inneren der Batterie möglichst genau ab. Hierzu werden die Potential- und Diffusionsgradienten mittels komplexer mehrdimensionaler Differenzialgleichungen dargestellt. Diese höchst aufwendigen Modelle werden in der Praxis kaum eingesetzt, denn dazu sind die einzelnen benötigten Parameter der Materialien nur schwer zu ermitteln.

- **Mathematische Modelle**

Die mathematischen Modelle orientieren sich nicht wie die vorigen an phy-

2. Grundlagen

sikalische oder chemische Funktionsprinzipien sondern sind reine mathematische Ansätze bei denen die Eingangsgrößen mit den Ausgangsgrößen nach empirischer Ermittlung verknüpft werden. Solche Modelle sind zum Beispiel analytische Klemmenspannungsmodelle oder stochastische Batteriemodelle.

Für Anwendungen wie den Batteriesimulator wird in der Regel der Modellansatz mit dem elektrischen Ersatzschaltkreis gewählt, dabei stellt eine Spannungsquelle die Ruhespannung dar und die Widerstände sowie Kondensatoren bilden das dynamische Verhalten ab. Eine Ladezustandsbilanzierung protokolliert dabei alle Ladezustandsänderungen in dem betrachteten Zeitraum.

3. Aufbau des Batteriesimulators

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau des Batteriesimulators vom grundlegenden Konzept beginnend bis hin zum fertigen Schaltschrank. Es werden verschiedene mögliche Konzepte aufgezeigt und die Umsetzung der finalen Variante beschrieben. In diesem Kapitel geht es auch um Themen wie den mechanischen Aufbau an sich, die Auslegung von Bauteilen und der Regelung oder die Integration von Batteriemodellen. Begonnen wird mit den allgemeinen Randbedingungen von denen die grundlegende Auslegung ausgeht und auch Anforderungen die der Batteriesimulator erfüllen soll bzw. muss.

3.1. Allgemeines

Der Aufbau basiert hauptsächlich auf den Anforderungen, die der Batteriesimulator grundlegend erfüllen soll, wodurch auch die Rahmenbedingungen geschaffen werden:

- Abdeckung der aktuell üblichen Batteriespannungen im Kraftfahrzeug
- Möglichkeit der Abdeckung auch von zukünftig höheren Automobilbatteriespannungen
- Die Ausgangsspannung soll frei variierbar oder mittels eines frei parametrierbaren Batteriemodells vorgegeben werden können
- Erzeugte elektrische Energie soll ins Netz zurück gespeist werden
- Einfach bedienbar auch für nicht Elektrotechniker
- Sicherer Aufbau mit allen üblichen Absicherungen

Diese Anforderungen definieren auch die grundlegenden technischen Daten des fertigen Simulators und stellen daher auch die Grundlagen für ein Konzept dar. Da die Ausgangsspannung des Batteriesimulators die aktuellen Batteriespannungen der Elektro- und Hybridfahrzeuge abdecken soll, muss sie mindestens 500V sein, denn aktuell liegen die Batteriespannungen von Fahrzeugen im Bereich zwischen 60V und 500V [14]. Als maximale Ausgangsspannung wurde wegen der Anforderung der Abdeckung von zukünftigen Batteriespannungen relativ optimistisch die Spannung von 700V genommen, um so mit Sicherheit auch für die Zukunft gerüstet zu

3. Aufbau des Batteriesimulators

sein. Der Simulator wird wegen des großen Spannungsbereichs in zwei Spannungsbereiche unterteilt, damit es einfacher für die Regelung wird. Die Verwendung soll somit entweder im Hochvolt- oder im Niedervoltbereich möglich sein. Die genaue Aufteilung und die Gründe dafür folgen in dem kommenden Kapitel. Der maximale Dauerausgangsstrom wurde mit 300A definiert, dies entspricht den üblichen maximalen Stromstärken in der Automobiltechnik [14]. Etwaige durch einen Generatorbetrieb gewonnene Energien sollen in das Netz zurück gespeist werden und nicht in einem Widerstand vernichtet werden, das gesamte System soll rückspeisefähig sein. Diese Forderungen stellen nun die grundlegenden technischen Daten des Batteriesimulators dar und dienen auch als Ausgangspunkt für ein Realisierungskonzept.

Technische Daten

In Tabelle 3.1 sind die finalen technischen Daten des Batteriesimulators zu sehen.

Tabelle 3.1.: Technische Daten des Batteriesimulators

Eingangsspannung	3 x 400V
Eingangsstrom	max. 630A
Ausgangsspannung	0 - 700V
Ausgangsstrom	300A _{Dauer} , max. 700A _{kurzfristig}
Ausgangsleistung	210kW
Anstiegszeit	6,7ms auf 300V
Spannungseinbruch bei Stromsprung	0,8% bei einem 120A-Sprung
Abmessungen	L 4400mm x T 500mm x H 2200mm
Gewicht	rund 2000kg

3.2. Konzept des Batteriesimulators

Die Auswahl eines Konzeptes umfasst im Generellen drei verschiedene Konzepte, welche in Anlehnung an vergleichbare Batteriesimulatoren oder auch mögliche Bauteile für ähnliche Anwendungen erstellt wurden. Eine große Hilfe bei diesem Stadium der Planung und später bei der Auswahl der richtigen Bauelemente war die Firma Siemens AG Österreich, die hier beratend zur Seite stand. Die erste Variante ist auch die einfachste und war im Grunde der Ausgangspunkt. Sie besteht aus einem Gleichrichter der mit einem Stufentransformator gespeist wird. Bei der zweiten Methode wird die erste Variante um einen DC/DC-Wandler erweitert, damit eine frei wählbare Ausgangsspannung möglich ist. Das dritte Konzept beinhaltet einen handelsüblichen Dreiphasen-Antriebsumrichter mit einem nachfolgenden Ausgangsfilter, der aber wie eine Gleichstromquelle betrieben wird.

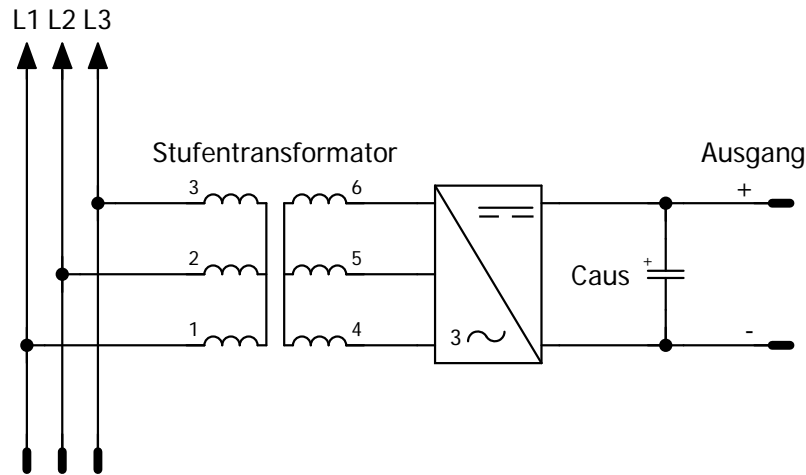


Abbildung 3.1.: Konzept mit dem Gleichrichter

3.2.1. Gleichrichter mit variabler Eingangsspannung

Das erste Konzept der Schaltung eines Gleichrichters (siehe dazu Kapitel 2.1.2) ist auf den ersten Blick auch die einfachste Methode zur Realisierung eines solchen Batteriesimulators. Jedoch ist das Problem an diesem Konzept die beschränkte Ausgangsspannung die mit einem Gleichrichtermodul abgedeckt werden kann, da nur ein gewisser Bereich einer Ausgangsspannung erzeugen kann. So zum Beispiel kann ein hierfür geeignetes Gleichrichtermodul von Siemens (Active Line Module ALM) minimal das 1,4-fache und maximal das 3,0-fache der Eingangsspannung am Ausgang erzeugen. Somit kann nicht der geforderte gesamte Ausgangsspannungsbereich abgedeckt werden. Um jedoch den gesamten Bereich der Spannung von 0 - 700V abzudecken, müsste die Eingangsspannung variiert werden. Diese Variation kann etwa durch einen Transformator mit mehreren Sekundärspannungsabgriffen (Stufentransformator) geschehen. Eine solche Schaltung ist in Abbildung 3.1 zu sehen. Um den gewünschten Spannungsbereich komplett abzudecken sind wahrscheinlich vier Sekundärspannungen vorzusehen, welche dann entweder jeweils für den gewünschten Arbeitsbereich umgeklemmt oder umgeschaltet werden müssen. Die Schaltung ist bei diesem Konzept relativ einfach, denn sie besteht im Wesentlichen nur aus dem Transformator zur Eingangsspannungsvariation und dem Gleichrichter. Der Ausgangskondensator C_{aus} dient zur Glättung der Ausgangsspannung und als Puffer für kurzfristige Änderungen der Spannung.

Vorteile

- einfacher Aufbau
- relativ kostengünstig

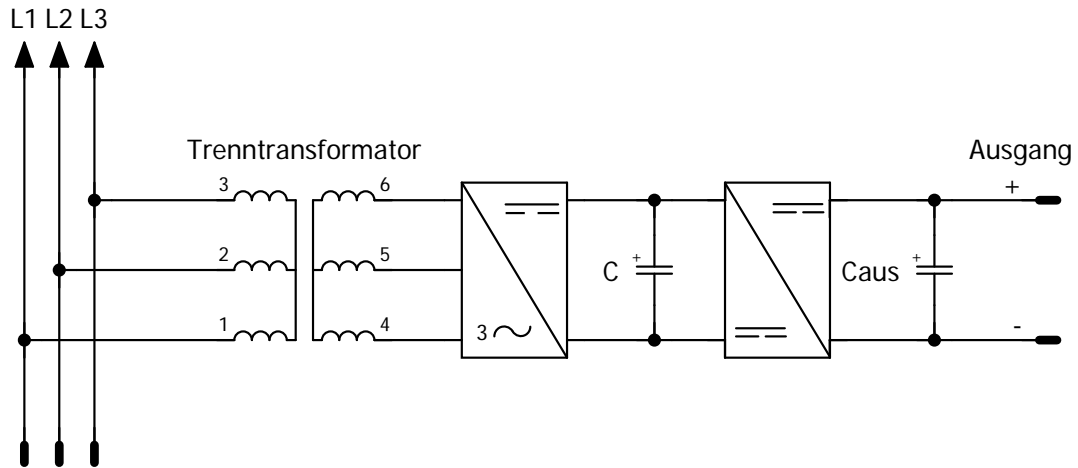


Abbildung 3.2.: Konzept mit Gleichrichter und DCDC-Wandler

Nachteile

- nur gewisse Spannungsbereiche möglich
- Probleme bei Messungen von Spannungen an der Bereichsgrenze
- umklemmen oder umschalten notwendig

Das Konzept des Gleichrichters mit der variablen Eingangsspannung wurde aufgrund der fixen Spannungsbereiche und der dadurch benötigten Umschaltungen nicht realisiert, da es so bei Messungen an den Spannungsbereichsgrenzen zu Problemen führen würde. Dieser Umstand schränkt auch eine einfache Bedienung ein, weil immer darauf geachtet werden muss, wie weit der Bereich noch geht und ob umgeschaltet werden muss.

3.2.2. Gleichrichter mit DC-DC Wandler

Diese Variante ist eigentlich eine Erweiterung des Konzeptes aus dem vorigen Kapitel 3.2.1. Hier speist nun ein Gleichrichter einseitig einen Gleichspannungszwischenkreis. Bei diesem Konzept wird also nicht die Eingangsspannung verändert, sondern ein ausgangsseitiger DC-DC-Wandler (ein Gleichstrom-Gleichstrom-Wandler) verwendet. Ein solcher Wandler kann aus einer Eingangsspannung (Gleichspannung) eine höhere, niedrigere oder invertierte Ausgangsspannung (Gleichspannung) erzeugen. Somit wird nur mehr eine fixe Spannung benötigt, welche als Eingangsspannung für den Wandler dient und in eine frei wählbare Ausgangsspannung umgewandelt werden kann. Die Schaltung dieses Konzeptes ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Der Transformator ist weiterhin notwendig zur galvanischen Trennung der Schaltung vom Eingangsnetz.

Vorteile

- es wird kein Stufentransformator benötigt
- ein gesamter Spannungsbereich
- kein Umklemmen oder Umschalten notwendig

Nachteile

- aufwendigere Schaltung
- zu hoher Strom für den DC-DC-Wandler

Der Gleichrichter mit dem anschließenden DC-DC-Wandler wurde ebenfalls nicht realisiert, da der Strom zu hoch für einen einfach verfügbaren Wandler gewesen wäre. Auch eine Variante mit mehreren parallelen DC-DC-Wandler war nicht möglich, da dieser Betriebsfall nicht vorgesehen ist und deshalb auch nicht einfach realisierbar war.

3.2.3. Antriebsumrichter mit Filter

Dieses Konzept orientiert sich an der Antriebstechnik bei der Umrichter zur Versorgung von Traktionsmotoren verwendet werden und wo ein hoher Strom keine so Probleme darstellt wie beim vorigen Konzept 3.2.2. Die einzige Hürde dabei ist, dass es sich bei den Antriebstechnikanwendungen fast ausschließlich um Drehstromanwendungen handelt und so muss eine Möglichkeit gefunden werden, mit dem Antriebsumrichter einen Gleichstrom auszugeben. Zuerst einmal grundlegend ist ein solcher Umrichter ein Zwischenkreisumrichter, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben. Er besteht neben dem Gleichrichter auch aus einem Wechselrichter, um so seine Ausgangsgrößen frei zu konfigurieren. Entgegen der grundsätzlichen Funktion kann ein entsprechender Zwischenkreisumrichter auch für den Batteriesimulator verwendet werden, dazu muss aber der Ausgangswechselrichter als Gleichspannungsquelle zweckentfremdet werden. Hierbei wird die Ausgangsfrequenz auf 0Hz gesetzt und beim Wechselrichter werden nur zwei Abgänge verwendet, da es bei einem parallelen Strom von allen drei Abgängen zu Fehlern in der Sicherheitssoftware des Wechselrichters führen würde. Am Ausgang des Wechselrichters befindet sich zudem ein LC-Filter (L_1 , L_2 und C_{aus}) bei dem der Kondensator C_{aus} des Filters auf den Zwischenkreis zurückgeschaltet ist. Der Filter dient hierbei der Unterdrückung der Schaltfrequenz des Wechselrichters, welche bei 5kHz liegt. Damit dies möglich ist muss die Grenzfrequenz des Filters so ausgelegt werden (Formel 3.1) damit die 5kHz-Komponenten ausreichend abgeschwächt werden. Dazu muss die Frequenz sehr viel kleiner sein als die Schaltfrequenz, wobei hier gilt je kleiner die Filterfrequenz ist desto besser auch die Abschwächung. Die Schaltung eines entsprechenden Konzeptes ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

3. Aufbau des Batteriesimulators

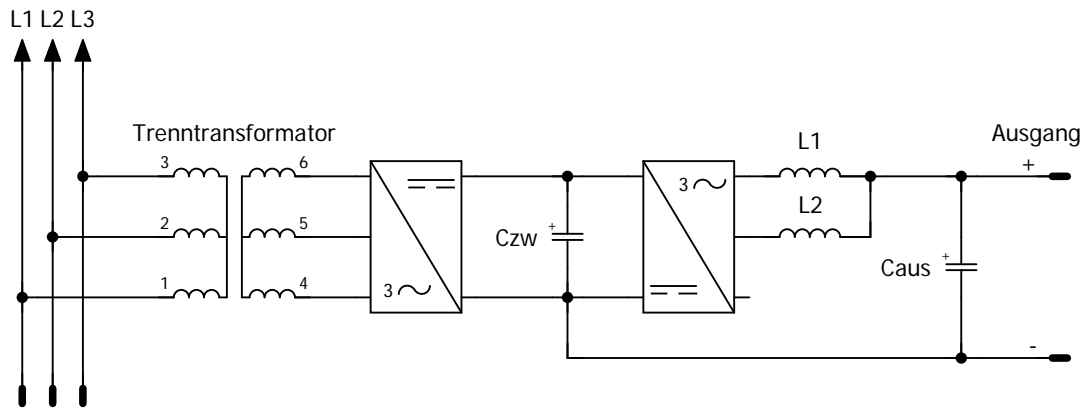


Abbildung 3.3.: Konzept mit Umrichter und Filter

$$f_{\text{Filter}} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (3.1)$$

$$f_{\text{Filter}} \ll 5\text{kHz!}$$

Vorteile

- kein Stufentransformator benötigt
- ein gesamter Spannungsbereich
- kein Umklemmen oder Umschalten notwendig
- hoher Ausgangsstrom ist möglich

Nachteile

- aufwendigerer Aufbau
- Filter wird benötigt
- große Drosseln und Kondensatoren nötig

Dieses Konzept wurde trotz des Filters und der wegen der hohen Ausgangsgrößen bedingten teuren Filterbausteinen ausgewählt, da es sich dabei um die technisch beste Lösung mit den wenigsten Nachteilen handelt. Zudem ist der Zwischenkreisumrichter ein bewährtes Konzept in der Antriebstechnik wodurch sich hier eine größere Auswahl an möglichen Bauelementen ergibt. Das einzig aufwendige ist die Adaption des Wechselrichters für einen Gleichstrombetrieb, damit er als Batteriesimulator verwendet werden kann. Es wird auch ab jetzt in den folgenden Kapiteln nur mehr von diesem Konzept die Rede sein.



Abbildung 3.4.: Batteriesimulator

3.3. Mechanischer Aufbau

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den mechanischen Aufbau des Batteriesimulators, darin enthalten sind die Themen zur praktischen Umsetzung. Begonnen wird bei der BauteilAuslegung entsprechend der Schaltung, danach folgen Aspekte wie Absicherung und Bedienung des Schaltschrankaufbaus. Am Schluss des Kapitels werden die Regelung sowie die Integration von Batteriemodellen besprochen. Bei dem Aufbau wurde von Anfang an darauf geachtet, dass dieser auch sicher ist und von Nicht-Elektrotechniker ohne Gefahr auf Verletzung oder Zerstörung der Anlage bedient werden kann. Die Abbildung 3.4 zeigt ein Foto des fertigen Schaltschrankaufbau.

3.3.1. Auslegung der Komponenten

Die Komponentenauslegung der für die Schaltung benötigten Bauteile gliedert sich in die Auslegung der Umrichtercomponenten, der Filtercomponenten, dem Trenntransformator und sonstiger Bauteile.

Umrichterkomponenten

Die Auslegung der Umrichterkomponenten geschieht nach den Anforderungswünschen und den bereits beschriebenen technischen Daten aus dem Kapitel 3.1. Die Gleich- und der Wechselrichter stammen aus der Sinamics S120-Umrichterreihe vom Industriepartner Siemens, diese Reihe ist ein modularer Systembaukasten für Antriebsanwendungen im industriellen Maschinen- und Anlagenbau und eignet sich deswegen für diese Anwendung [1]. Ein solches Umrichtersystem besteht neben dem Gleich- und Wechselrichter zusätzlich aus einer Control Unit, einem Eingangsfilter, einer Eingangsspannungsmessung und einer Busverbindung zwischen den einzelnen Komponenten. Die Control Unit stellt dabei die Schaltzentrale dar und steuert den gesamten Umrichter, soweit dieser mit den entsprechenden Elementen aus diesem Systembaukasten aufgebaut ist. Sie managt die grundlegende Funktion der einzelnen Komponenten untereinander, so stellt sie den Zwischenkreis bereit, gibt die Ausgangsspannung aus oder ermöglicht eine etwaige Rückspeisung von Energie in das Netz. Neben diesen Grundaufgaben ist die Control Unit auch für die gesamten Sicherheitsaufgaben zuständig die an das System gestellt werden wie abschalten bei Überspannung, normalerweise auch abschalten bei einem Erdschluss und noch viele mehr. Das angesprochene Bussystem welches zur Kommunikation zwischen den Bauteilen dient ist ein Siemens-Unternehmenseigener Bus namens „Drive Cliq“.

So muss nun für die Umrichterkomponenten eine Control Unit, ein geeigneter Gleich- und Wechselrichter, ein Eingangsfilter und eine Eingangsspannungsmessung ausgelegt werden. Als Erstes wird eine Control Unit ausgewählt welche sich für Sinamics S120 Bauteile eignet und über einen Profinet-Bus verfügt, dazu im Kapitel 3.3.3 Bedienung mehr. Für die Control Unit wurde eine „CU-320-2 PN“ ausgewählt. Das Modell des Wechselrichters leitet sich aus dem benötigten Ausgangsstrom ab, wo ein Dauerstrom von 300A und ein kurzfristiger Strom von 700A gefordert wird. So ergibt sich ein Motor Module (Bezeichnung des Wechselrichters der S120 Reihe) mit der Chassisgröße, welches einen Bemessungsdauerstrom von 745A hat [4]. Dieser hohe Strom ist dadurch begründet, da für die Regelung eine möglichst hohe Pulsfrequenz erwünscht ist und bei dem Wechselrichter ist eine Frequenzerhöhung nur mit einem Stromderating möglich. Eine Erhöhung der Schaltfrequenz von den standardmäßigen 1,25kHz bei der der Bemessungsstrom angegeben ist auf die maximale Pulsfrequenz von 5kHz bewirkt ein Derating von 50% des Ausgangsstromes. Der Gleichrichter ergibt sich aus dem zu versorgenden Wechselrichter bzw. des Ausgangs der zu versorgen ist. Der Gleichrichter muss also einen Strom von mindestens 372,5A in den Zwischenkreis speisen können. Es wurde dazu aus Kostengründen eine parallele Anordnung von zwei kleineren Active Line Modules (Bezeichnung des Gleichrichters der S120 Reihe) der Booksizegröße mit einer Bemessungsleistung von jeweils 120kW gewählt [3]. Der Eingangsfilter, Active Interface Module genannt, dient für eine störungsfreie Rückspeisung ins Netz und für einen EMV gerechten Aufbau der Schaltung. Dazu wird jeweils ein Eingangsfilter für jeden Gleichrichter benötigt und die Auswahl der ergibt sich aus der

3. Aufbau des Batteriesimulators



Abbildung 3.5.: Schaltschrank mit den Gleichrichtern

Auswahl der Gleichrichter. Sie sind deswegen ebenfalls in der Booksizegröße und haben jeweils eine Bemessungsleistung von 120kW. Die fertig eingebauten Gleichrichter und Eingangsfiler sind in Abbildung 3.5 zu sehen, wobei die oberen beiden die Gleichrichter (Active Line Module) sind und die unteren beiden die Eingangsfiler (Active Interface Module). Es werden auch noch Netzschütze benötigt aber deren Auswahl wird in dem Unterkapitel 3.3.1 über sonstige Bauteile erklärt.

Neben den eigentlichen Bauteilen muss noch eine Zwischenkreisspannung festgelegt werden mit der der Wechselrichter versorgt wird und die die maximal mögliche Ausgangsspannung bestimmt. Sie muss also mindestens die maximale Ausgangsspannung von 700V sein, damit das Motormodul (Wechselrichter) eine Spannung dieser Größe auch ausgeben kann. Es wurde aber die maximal mögliche Zwischenkreisspannung des Gleichrichters gewählt, nämlich 720V, wodurch dann eine Reserve für die Regelung gewonnen wird, selbst wenn die maximale Ausgangsspannung

ausgegeben wird.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Gleichrichter}} &= 120\text{kW} \\
 I_{\text{Wechselrichter}} &= 745\text{A} \\
 I_{\text{Wechselrichter}_{\text{max}}} &= 1087\text{A} \\
 I_{\text{Dauer}} &= 300\text{A} \\
 I_{\text{Kurz}} &= 700\text{A} \\
 f_{\text{Schalt}} &= 5\text{kHz} \\
 U_{\text{Zwischenkreis}} &= 720\text{V}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Filterkomponenten

Die nächste auszulegende Komponente ist der LC-Filter, er besteht in dem verwendeten Konzept aus zwei parallelen Drosseln und einem Kondensator am Ausgang. Um die Dimensionen für die einzelnen Bauteile berechnen zu können, werden noch einige Rahmenbedingungen benötigt. Zu diesen zählen unter anderem der Stromrippel, die Schaltfrequenz und die Spannungsänderung die während einer Auf- bzw. Entladung auftreten darf. Der Stromrippel ΔI in den Drosseln ist auf 10% festgelegt worden was einem Wert von maximal 30A bei vollem Ausgangsdauerstrom entspricht. Die Schaltfrequenz ist bereits durch den Wechselrichter vorgegeben worden und liegt bei 5kHz. Die Spannungsänderung ΔU ist unterschiedlich vorgegeben, da es nämlich auf den Arbeitsbereich ankommt in dem der Batteriesimulator betrieben werden soll. Es wird unterschieden in einen Nieder- und einen Hochspannungsbereich. Die niedere Arbeitsspannung soll im Bereich von rund 50V liegen, wie etwa das zukünftige 48V-Bordnetz und dabei soll die Änderung bei einer Entlastung maximal 4,5V betragen. Diese Forderung kommt daher, da alle Fahrzeugumrichter vor Erreichen der Berührungsspannungsgrenze von 60V abschalten wobei auch eine Toleranz inkludiert ist. Darum wurde hier zur Sicherheit 52,5V als Grenze ausgewählt. Die höhere Arbeitsspannung wie etwa 300V bedarf keiner solchen strengen Forderung mehr, so wurde ein ΔU von 5% ausgewählt. Die Drosseln wurde nach anfänglichen Voruntersuchungen auf jeweils 2mH festgelegt. Dieser Wert ergibt sich durch die Wahl der maximalen Ausgangsspannung zu 700V und des maximalen Ausgangsstromes zu 300A mit der Beziehung für die Spannung von Induktivitäten $U = L \frac{dI}{dt}$. Jede der Drosseln hält einen Dauerstrom von 150A aus und kann solange überlastet werden, so lange die Kerntemperatur nicht zu hoch wird, welche dazu gemessen werden muss. Es werden für den Aufbau Eisendrosseln verwendet, damit bei den Rahmenbedingungen die Kernverluste nicht zu groß werden. Bei den Drosseln handelt es sich um eigens für diese Anwendung von der Firma Trafo Modern gefertigte Bauteile die genau für diese Bedingungen ausgelegt wurden.

3. Aufbau des Batteriesimulators

$$\Delta I = 10\% \quad \Delta U_{50V} = 4,5V \quad \Delta U_{300V} = 5\%$$

Der Kondensator des Filters wird aufgrund der Ladungsänderung und der Spannungsdifferenz berechnet. Auf Grund der Berechnung der Kapazität über die Spannungsänderung unterscheidet sich die Dimensionierung des Kondensators für die beiden Bereiche und resultiert in zwei verschiedenen Endwerten. Wie mit diesen beiden Enddimensionen für den Kondensator weiter vorgegangen wird, steht am Ende nach der Berechnung eben dieser. Als erstes folgt nun die Berechnung für die niedrige Ausgangsspannung von 50V, hier kann der Tiefsetzer bei einer vollen Entlastung von 300A auf 0A maximal 50A/ms (Formel 3.3) abbauen. Dafür benötigt er laut Formel 3.4 eine Zeit von 6ms. Diese Zeit führt dann zu der Ladungsänderung aus der Formel 3.5 und mit der festgelegten Spannungsänderung von $\Delta U_{50V} = 4,5V$ auf einen relativ großen Ausgangskondensator bei den niedrigen Ausgangsspannungen von $C = 200mF$, siehe Formel 3.6.

$$\frac{50V}{1mH} = 50A/ms \quad (3.3)$$

$$\frac{300A}{50A/ms} = 6ms \quad (3.4)$$

$$\Delta Q = \frac{300A \cdot 6ms}{2} = 900mAs \quad (3.5)$$

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{900mAs}{4,5V} = 200mF \quad (3.6)$$

Bei der größeren Ausgangsspannung von 300V und der dabei einfacheren Forderung der Spannungsänderung von $\Delta U_{300V} = 5\%$ sind die Verhältnisse viel günstiger als bei der niedrigeren Spannung. Hierbei kann die Stromentlastung schon in 1ms abgebaut werden und es ergibt sich daraus ein kleinerer Ausgangskondensator von $C = 10mF$, siehe Formel 3.10.

$$\frac{300V}{1mH} = 300A/ms \quad (3.7)$$

$$\frac{300A}{300A/ms} = 1ms \quad (3.8)$$

$$\Delta Q = \frac{300A \cdot 1ms}{2} = 150mAs \quad (3.9)$$

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{150mAs}{15V} = 10mF \quad (3.10)$$

Auf Grund dieser Berechnungen sieht die Lösung für den Schaltschrankaufbau folgendermaßen aus: Als Kondensator wird der für die 300V Spannungsberechnung

3. Aufbau des Batteriesimulators

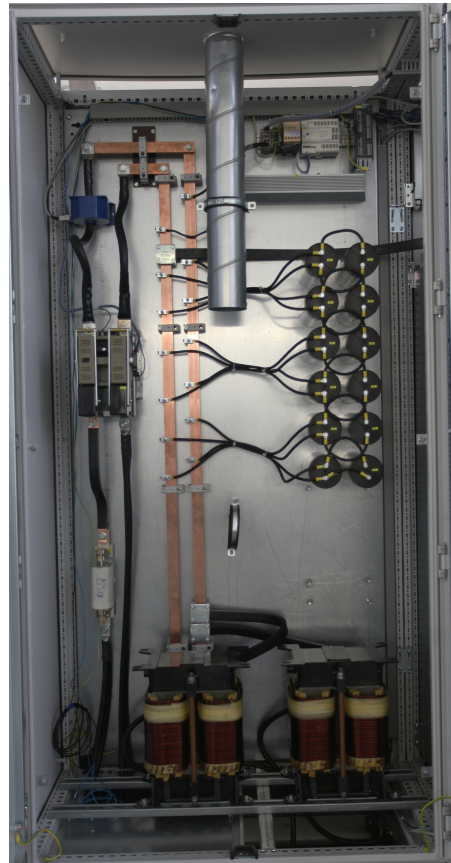


Abbildung 3.6.: Schaltschrank mit dem Ausgangsfilter

resultierende Wert von 10mF in den Schaltschrank eingebaut. Dabei müssen aber wegen der maximalen Spannung von 700V Folienkondensatoren verwendet werden, da diese einer so hohen Spannung standhalten können (im Gegensatz zu etwa Elektrolytkondensatoren, wo eine Serienschaltung notwendig wäre). Die Berechnung des Kondensatorwerts für eine Ausgangsspannung von 300V stellt übrigens kein Problem für höhere Spannungen dar, denn desto höher die Spannung ist umso kleiner wird auch der benötigte Kondensatorwert. Bei 700V ergibt sich anhand der vorigen Berechnung ein Wert von nur 1,8mF. Das einzige Problem stellt die kleine Ausgangsspannung von rund 50V dar, wo ein 200mF Kondensator benötigt wird. Als Lösung ist aber eine zusätzliche mobile Kondensatorbank vorgesehen wodurch die zusätzlichen Kondensatoren dann einfach bei Bedarf hinzugeschlossen werden können. Diese Kondensatoren benötigen dadurch auch keine so hohe Spannungsfestigkeit wie die fix eingebauten und es können dadurch relativ billige Elektrolytkondensatoren verwendet werden, da diese dann nur eine Spannung von etwa 100V aushalten müssen. Es ergibt sich übrigens für den fest verbauten Filter eine Filterfrequenz laut Formel 3.1 von $f_{\text{Filter}_{300\text{V}}} = 50,3\text{Hz}$. Bei der Hinzuschaltung der mobilen Kondensatoren ändert sich diese Frequenz zu $f_{\text{Filter}_{50\text{V}}} = 11,3\text{Hz}$. Der Schaltschrank mit dem Ausgangsfilter ist in Abbildung 3.6 ersichtlich. Darin sind die beiden parallelen Drosseln am Boden und die Kondensatorbank der Folienkondensatoren in der Mitte auf der rechten Seite zu sehen.

Trenntransformator

Der Transformator in der Schaltung dient als Trenntransformator zur galvanischen Trennung des Batteriesimulators vom Eingangsnetz, da der Simulator als IT-System arbeiten soll. IT-System bedeutet dabei, die Schaltung sowie die Komponenten besitzen keine Erdverbindung und das System hat damit eine erhöhte Fehlersicherheit. Denn es ist somit kein Problem, wenn zum Beispiel eine Phase einen Erdschluss hat, da es zwar zu einer Spannungsverschiebung kommt, aber trotzdem normal weitergearbeitet werden kann. Erst bei einem zweiten Erdschluss kommt es zu einem wirklichen Fehler bei dem die Anlage unverzüglich abgeschaltet werden muss. IT-Netze mit ihrer erhöhten Ausfallsicherheit werden daher zum Beispiel auch in OP-Sälen oder in der Papierindustrie eingesetzt. Der Transformator hat hier auch noch die Aufgabe, die schaltfrequente Gleichtaktspannung die bei dreiphasigen Pulsumrichtern prinzipiell auftritt vom Netz bzw. der Last fernzuhalten.

Der Transformator ist bei dem Batteriesimulator ein Yyn-Transformator für die Eingangsspannung von 400V. YYn beschreibt die Schaltung der primären und sekundären Verschaltung der Phasen, das Y steht dabei für eine Sternschaltung. Das n in der Yyn Bezeichnung zeigt an, dass der Sternpunkt an der Sekundärseite herausgeführt ist und angeschlossen werden kann. Der Transformator besitzt nur einen Übersetzungsfaktor von 1, es findet also keine Spannungsänderung zwischen den beiden Seiten statt und die Nennleistung beträgt 260kVA. Es wird neben



Abbildung 3.7.: Schaltschrank mit dem Trenntransformator

dem Trenntransformator im Hauptkreis auch einer für den Steuerspannungskreis benötigt, hier ist es aber nur ein Einphasentrenntransformator. Dieser hat aber im Gegensatz zu dem großen Transformator ein Übersetzungsverhältnis wobei die Netzspannung von 400V auf 230V bei einer Nennleistung von 1,6kVA umgewandelt wird. In Abbildung 3.7 ist ein Bild des Schaltschranks mit dem Trenntransformator.

Sonstige Bauteile

Neben den bereits angesprochenen Bauelementen sind noch einige kleinere Komponenten auszulegen, hierzu zählen unter anderem die Schalter, Sicherungen, das Netzteil und Schütze. Die Auslegung der Schütze, Sicherungen und Schalter wurde aber nicht selbst gemacht sondern stammt aus dem Siemens-Katalog für das Zubehör von S120-Umrichter [2]. Auch die Auslegung der Kühlung für die Umrichter-komponenten stammt nicht aus eigenen Überlegungen sondern ist ebenfalls aus der entsprechenden Siemens-Dokumentation [5], darin sind die Mindestabstände für einen Schaltschrank einbau beschrieben und auch die notwendigen Größen der

Luftzufuhr und Abfuhr. Einzig die 24V-Versorgung wurde ausgelegt, dazu muss eine Summation aller Verbraucherleistungen die an diesem Spannungsniveau angeschlossen sind gemacht werden um das entsprechende Netzteil zu finden. Dies ergibt ein 480W-Netzteil damit die gesamten Komponenten am 24V Netz mit einer Reserve sicher versorgt werden können.

3.3.2. Praktischer Aufbau

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem physischen Aufbau der Schaltung und deren Komponenten in einen Schaltschrank. Wichtig bei diesem Aufbau war eine hohe Sicherheit für den Umgang mit dem Simulator, da dieser später auch von Nicht-Elektrotechniker ohne Gefahr bedient werden soll. Damit dies gewährleistet ist wurde für die Anwendung eine CE-Zertifizierung nach EN-60 439-1 angestrebt. Die CE-Zertifizierung bescheinigt einen sicheren Aufbau eines Gerätes, damit dieses ohne Gefahr einer Verletzung bedient werden kann. Für die Erlangung dieser Zertifizierung war eine Abnahme der Schaltung und der Montage im Schaltschrank durch einen Ziviltechniker erforderlich. Genauer bezieht sich diese Zertifizierung auf einen sicheren Aufbau, die grundlegende Absicherung durch die Schaltung selber und auf eine korrekte Erdung der gesamten Anlage. Der mechanische Aufbau des gesamten Simulators erfolgte durch die Firma ETEK, die dadurch für den korrekten Aufbau der Schaltschränke in Hinsicht auf die Zertifizierung sorgte.

Die Unterbringung aller Komponenten und ihre Platzierung im Schaltschrank geschieht in Anlehnung an den Schaltplan um dadurch die Leitungslängen möglichst kurz zu halten, da die Leitung auf Grund des hohen Stromes einen großen Querschnitt haben und damit auf Grund des vielen Kupfers teuer sind. Der gesamte Batteriesimulator ist insgesamt in fünf Schaltschränke untergebracht, wobei die größte Herausforderung der Schaltschrank mit dem großen Trenntransformator wegen seines großen Gewichtes war und der damit an die Gewichtsgrenzen von handelsüblichen Schaltschränken stößt. Das Problem wurde durch die Platzierung des Transformators in einem einzelnen Schaltschrank und mit zusätzlichen Verstrebungen im Boden gelöst.

Wegen Platzproblemen am Institut ist der Aufstellungsort der Schaltschränke nicht direkt beim bzw. am Prüfstand wo gemessen werden soll, sondern er befindet sich außerhalb des Raumes in einer relativ weiten Entfernung von etwa 25m Leitungslänge. Der Abgriff des Ausgangs befindet sich aber in einem eigenen kleinen Kasten der direkt im Prüfstandsraum angebracht ist, in dieser Anschlussbox ist außerdem die Ausgangsspannungsmessung untergebracht, um so den Spannungsabfall über die Leitung schon zu berücksichtigen. Nachteilig wirkt sich dieser Aufstellungsort und die hohen Leitungslängen am Ausgang auf Störungen der Ausgangsgrößen aus, da durch die langen Leitungen alle möglichen Störfelder eingefangen werden.

3. Aufbau des Batteriesimulators

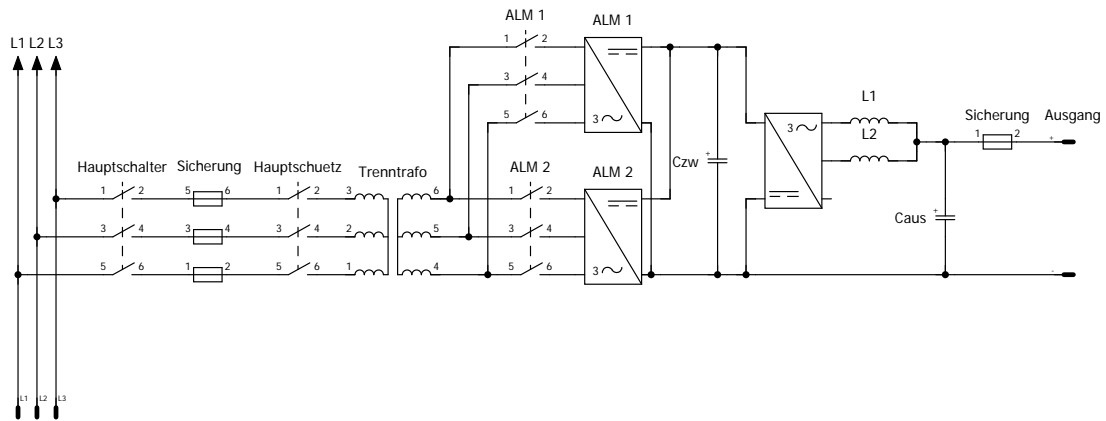


Abbildung 3.8.: Schaltung des Batteriesimulators

Umsetzung der Schaltung

Die bisher gezeigte Schaltung aus Abbildung 3.3 stellt nur das grundlegende Konzept des Umrichters dar und zeigt nicht den genaueren Aufbau, denn es sind da noch einige Elemente und Bedieneinrichtungen wie die Schütze zum Schalten und die Absicherung noch nicht berücksichtigt.

Die genauere Schaltung des Hauptstromkreises des Batteriesimulators auf Basis derer die praktische Umsetzung erfolgte, ist nun in Abbildung 3.8 zu sehen. Dazu soll die Funktion ein wenig erklärt werden, beginnend von der Einspeisung. Dabei ist zu aller erst ein mechanischer Hauptschalter vorgesehen, der am Beginn der Einspeisung platziert ist und der dazu dient die komplette Anlage spannungsfrei zu schalten. Dieser Schalter muss entsprechend groß dimensioniert sein, um den maximal möglichen Eingangsstrom der Gleichrichter zuverlässig abschalten zu können. Mit diesem Hauptschalter wird auch schon die 24V-Versorgung eingeschaltet, damit kann schon eine Kommunikation mit der Control Unit aufgebaut werden, ohne dabei die komplette Anlage einschalten zu müssen. Nach dem Hauptschalter folgt eine eingangsseitige Sicherung, dazu sei aber auf das folgende Unterkapitel verwiesen. Nach der Sicherung kommt nun das Hauptschütz, welches den Trenntransformator versorgt und wodurch in weiterer Folge der Zwischenkreis aufgebaut werden kann, wenn dies durch die Bedienung gewünscht wird. Das Schütz wird erst eingeschaltet, wenn keine Störung vorliegt, also kein Notaus betätigt wurde. Dem Schütz folgt im Schaltplan der Trenntransformator, der im Wesentlichen schon besprochen wurde. Nach diesem kommt der Parallelzweig der beiden Gleichrichter samt den jeweiligen Schützen und Eingangsfiltren. Die beiden Schütze vor jedem Gleichrichter waren anfangs vorgesehen, damit gegebenenfalls nur ein einzelner Gleichrichter bei kleinen Strömen verwendet werden könnte. Jedoch wurde diese Möglichkeit im Laufe der Arbeit wieder verworfen, da sich die Funktion bei der Umsetzung in der Steuerung komplexer darstellte als im Endeffekt der Nutzen

davon wäre. Anschließend folgen nun die Gleichrichter, der Wechselrichter und das Filter welche alle schon in der Konzeptschaltung vorhanden waren.

Bei der Umsetzung der Schaltung sind noch die Spannungs- und Strommessung vorzusehen, die für die Regelung benötigt werden. Die Spannungsmessung gliedert sich in das Messen der Eingangsspannung und in das Messen der Ausgangsspannung. Die dreiphasige Eingangsspannung wird gemessen, damit die Gleichrichter bei einer Rückspeisung von Energie ins Netz die Spannung phasenrichtig zurück speisen können. Dazu wurde für jeden der beiden Gleichrichter eine eigene Spannungsmessung vorgesehen. Die Wahl fiel dabei auf ein Voltage Sensing Module von Siemens, da dieses mit dem Drive Cliq Bussystem einfach in die Regelung integriert werden kann und so ohne weitere Probleme verwendbar ist. Die Ausgangsspannungsmessung ist, wie schon erwähnt, in dem Abgangskasten im Prüfstandraum untergebracht, also nach der 25m-langen Zuleitung, um deren Spannungsabfall ausgleichen zu können. Es wurde auch hier ein solches Voltage Sensing Module von Siemens verwendet. Die Ausgangstrommessung ist im Gegensatz zur Spannungsmessung im Hauptschaltschrank nach den Drosseln untergebracht, dabei handelt es sich um einen Kompensationsstromwandler („Transfoshunt“) der Firma LEM welcher ein hochpräziser Stromsensor ist um damit gegebenenfalls genaue Bilanzmessungen durchführen zu können, falls dies einmal bei einem Projekt gewünscht wird. Die grundsätzliche Aufgabe der Strommessung ist aber den Ausgangsstrom für die Regelung bereitzustellen.

Absicherung

Die gesamte Absicherung dient zum Schutz von Personen bei einer Fehlbedienung der Anlage und auch zum Schutz der in der Anlage verbauten Geräte. Die Absicherung besteht dazu aus mehreren Punkten, darunter als erstes aus Schmelzsicherungen die bei einem Kurzschluss auslösen und je nachdem in welchem Kreis dieser auftritt, diesen zu trennen. Solche Sicherungen befinden sich in den drei Phasen der Einspeisung, nach dem Trenntransformator da die Schaltung dort galvanisch getrennt ist und am Ausgangsgleichstromkreis. Sie schützen die Geräte also gegen einen Ausfall bei einem Überstrom. Beim Steuerkreis wird dazu ein Leitungsschutzschalter verwendet der dieselbe Funktion wie die Schmelzsicherungen übernimmt. Als weitere Sicherheitseinrichtung ist ein bei IT-Systemen notwendiger Isolationswächter vorgesehen, der einen Fehler der Isolation meldet wenn ein Erdschluss aufgetreten ist. Bei nicht isolierten Stromversorgungen (TT-Systemen) übernimmt ein FI-Schalter diese Aufgabe. Diese Lösung kann aber aufgrund der galvanischen Trennung der Erdverbindung aber nicht verwendet werden. Neben den bereits erwähnten Absicherungen ist auch eine Not-Aus Funktion vorgesehen, bei der mittels Not-Aus Schalter bei einer Betätigung sofort die gesamte Anlage abschaltet. Die einzige Erdung die verbaut werden muss ist die Gehäuseerdung der Komponenten zum Schutz vor einer statischen Aufladung, womit einem elektrischen Schlag durch ebendiese

vorgebeugt wird. Als weiterer Absicherungsaspekt dient ein Entladewiderstand für die Kondensatoren, der diese entlädt sobald das Hauptschütz abgeschaltet wird. Zur Absicherung kann auch die Eigensicherung des Siemensumrichtersystems gezählt werden, das bei einer Fehlbedienung oder bei einem Fehler des Umrichters selber sofort den Ausgang abschaltet.

Initialisierung des Siemenssystems

Hierbei ein genauerer Überblick zum Siemensumrichtersystem mit den Bestandteilen, der Initialisierung und den Möglichkeiten der Einstellungen. Der grundlegende Aufbau besteht wie dies schon im Auslegungskapitel 3.3.1 erklärt wurde, aus einer Control Unit die alle weiteren Komponenten steuert. In der Abbildung 3.9 ist nun die Topologie dieses Systems dargestellt. Verbunden sind die einzelnen Komponenten mittels des siemenseigenen Bussystems Drive Cliq, dabei müssen alle Komponenten entsprechend der Topologieregeln verbunden werden um eine reibungslose Funktion zu ermöglichen. In der Topologie sind die einzelnen Geräte (Control Unit, Voltage Sensing Module oder Motor Module) mit den jeweiligen Schnittstellen (X100, X101, X200,...) als Block eingezeichnet und die Verbindungen zwischen den einzelnen Schnittstellen stellt eine physische Busverbindung im Schaltschrank dar. Wie in der Topologie zu sehen ist, wird jedem Active Line Module (Gleichrichter) ein Voltage Sensing Module zugeordnet, um die phasenrichtige Rückspeisung zu ermöglichen. Das erste Modul hängt dabei am ersten Steckplatz (X100) der Control Unit. Das zweite Gleichrichtermodul ist an das erste Modul angeschlossen. Die Ausgangsspannungsmessung ist mittels des Voltage Sensing Modules „Ausgang“ an die X202-Schnittstelle des Active Line Module 2 angeschlossen. Die gesamte Topologie kann dementsprechend gelesen und interpretiert werden und dient einem reibungslosen Inbetriebnahmeprozess.

Alle Komponenten zur Steuerung und Regelung des Batteriesimulators sind in das Siemenssystem integriert, so werden etwa die Schütze der Gleichrichter mittels digitaler Ausgänge der Control Unit geschaltet oder das Strommesssignal wird auf den analogen Eingang des Terminal Modules geführt. Dieser Umstand erlaubt die zentrale Steuerung des Aufbaus mittels der Control Unit, welche mit einer Labview-Anwendung kommuniziert und so seinen Sollwert, Schaltbefehle, usw. erhält.

Die Initialisierung des Systems geschieht mit Hilfe der Siemens Inbetriebnahme-Software „Starter“, dessen Aufgabe es ist, die erstmalige Inbetriebnahme eines Sinamics-Umrichters zu ermöglichen. Dazu werden der Control Unit die grundlegenden Informationen über das vorhandene System vorgegeben. Diese Informationen beinhalten unter anderem die Einstellung der parallelen Gleichrichter, die genauen Typen der Gleich- und Wechselrichter, beliebige Motordaten da die Software grundsätzlich für Antriebsumrichter entwickelt ist, die Erweiterung der Umrichtersoftware für Gleichstromanwendungen und verschiedenste Einstellwerte. Näheres zur Inbetriebnahme eines Sinamics S120 Systems ist in dem Inbetriebnahmehandbuch [7]

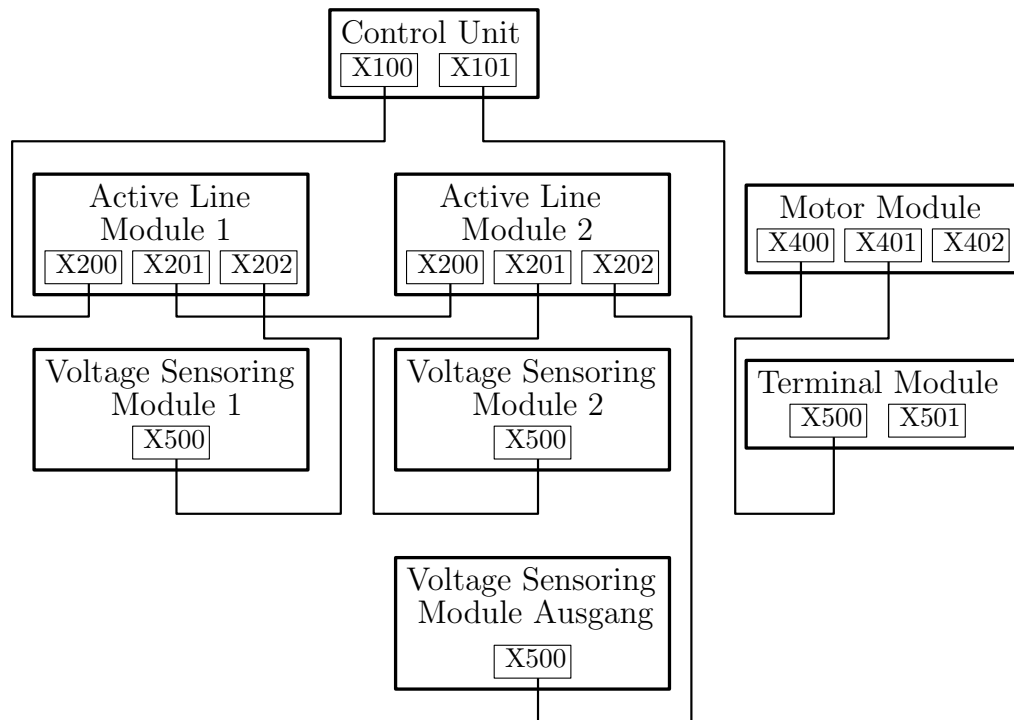


Abbildung 3.9.: Topologie des Siemens Bussystems Drive Cliq

zu finden. Die Erklärung der einzelnen Parameter und Einstellmöglichkeiten sind im Listenhandbuch [8] zu finden.

3.3.3. Bedienung

Die Bedienung des Batteriesimulators erfolgt generell über eine Labview-Anwendung die der Control Unit mittels Profinetbus Befehle schickt und von ihr Daten empfängt. Diese Kommunikation kann erst nach erfolgtem Einschalten der Stromversorgung am Schaltschrank aufgebaut werden, wie schon im vorigen Kapitel 3.3.2 erklärt wurde. Die Initialisierung und der Aufbau der Kommunikation erfolgte nach der Anleitung „SINAMICS G/S: PROFINET Anbindung an Labview“ von Siemens [6]. Darin beschrieben ist die Anbindung der Control Unit an Labview mittels der Standard-Ethernet-Schnittstelle über den Profinetbus. Eine Schwierigkeit dabei war die Adaptierung der Anleitung auf genau die vorhandene Anwendung. So kann hier etwa kein Standardtelegramm verwendet werden, sondern es muss eine freie Telegrammkonfiguration gewählt werden, was zu einigen Änderungen gegenüber der Anleitung führt.

In der Labview-Anwendung geschieht auch das eigentliche Einschalten des Umrichtersystems durch die Einschaltablauffolge, worin die Abfolge von der Einschaltspere bis hin zu der Freigabe der Impulse geschieht. Dies beinhaltet unter anderem das

Schalten der Schütze zum Aufbau des Zwischenkreises und verschiedene Freigaben die erfüllt werden müssen. Wie schon erwähnt beinhaltet die Labview-Anwendung die Bedienung des Batteriesimulators, dies zeigt sich durch die Auswahl des Betriebsmodus oder durch simple Vorgabe einer Sollspannung. Außerdem ist in der Anwendung auch die Übersicht über Störungen und eine Quittierung derer inkludiert. Der Umrichter kann damit natürlich auch ausgeschaltet werden. Die Labview-Anwendung besitzt auch eine Anzeige und Ausgabe der Ausgangsgrößen.

3.3.4. Probleme

Beim mechanischen Aufbau kam es auch zu einigen Problemen, wobei manche schon im Laufe des Kapitels aufgezeigt wurden. Kleinere Probleme waren dabei die Auswahl und die Auslegung von benötigten Bauteilen abseits derer, die in dem Auslegungskapitel vorkommen, wie etwa des richtigen Leistungsschutzschalters für den Steuerkreis oder des richtigen Isolationswächters. Da aber dabei meist Standardgrößen und typische Bauteile für solche Anwendungen verwendet werden konnten, war auch die Lösung kein allzu großes Problem.

Ein größeres Problem welches auch einige Zeit gekostet hat, waren hohe Störspannungen am Ausgang des Batteriesimulators beim Leerlauf und auch bei Last. Die Spannungen hatten teils Amplituden bis zu $\pm 50\text{V}$. Der Fehler konnte beim Versuch eine Ausgangsphase auf das Massepotential zu legen gefunden werden, als es zu einem Kurzschluss kam. Während der darauffolgenden Inspektion der Anlage stellte ich eine unbeabsichtigte Erdverbindung auf Grund eines schlechten Aufbaus der Anschlussbox fest. Es existierte eine Verbindung zwischen der Gehäusemasse des Ausgangsspannung-Messmoduls und der Minusphase. Nach der Behebung dieser Verbindung verschwanden auch die Störungen der Ausgangsgrößen. Jedoch führt dieser Umstand dazu, dass bei zukünftigen Messungen eines geerdeten Motors diese hohen Störungen wieder auftreten werden. Die Störungen können vielleicht durch Erdableitkondensatoren reduziert werden, die Verwendung solcher Kondensatoren wäre die nächste Variante bei der Störungssuche gewesen. Dies wurde aber nicht getestet, da die Störursache inzwischen gefunden werden konnte und zum jetzigen Zeitpunkt kein Bedarf für zusätzliche Maßnahmen besteht.

3.4. Regelung

Die Regelung des Batteriesimulators erfolgt durch einen kaskadierten Regler der mit der DCDC-Konverter-Erweiterung zur Umrichtersoftware hinzugefügt wird. Wichtig für die Regelung ist, wie in der Theorie schon besprochen, die Rückkopplung der

3. Aufbau des Batteriesimulators

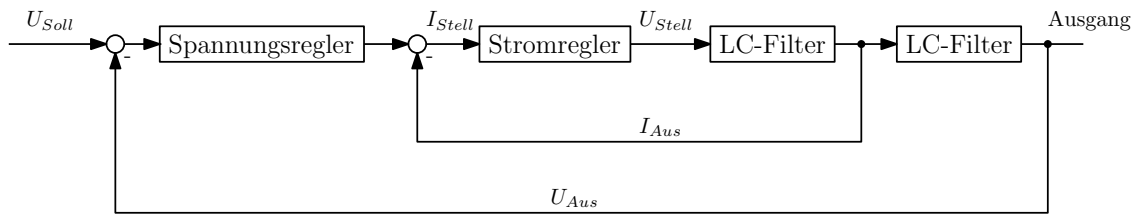


Abbildung 3.10.: Regelkreis des Batteriesimulators

Ausgangsgrößen, darum benötigt es die Ausgangsspannungs- und Ausgangsstrommessung. In der Abbildung 3.10 ist der Regelkreis des Batteriesimulators dargestellt. Der Regelkreis besteht aus einem schnellen Stromregler und einem überlagerten langsameren Spannungsregler. Die beiden Regler sind dabei als PI-Regler vorgesehen, sie bestehen aus einem proportionalen und einen integralen Anteil. Die einstellbaren Regelparameter sind die Verstärkung K_P und die Nachstellzeit T_N . Der proportionale Anteil verstärkt eine Abweichung zwischen Ist- und Sollwert um den Verstärkungsfaktor und der integrale Anteil bildet quasi die Vergangenheit ab in dem die Abweichung aufintegriert wird. Der Spannungsregler gibt dabei den Sollstrom für den Stromregler vor welcher abzüglich des Iststroms vom Ausgang den Stellstrom I_{Stell} ergibt. Der Stromregler gibt wiederum eine Stellspannung aus, welche in der Control Unit in einen Aussteuergrad und einen Phasenwinkel φ umgerechnet wird. Mit diesen beiden Größen erzeugt jetzt das Motor-Modul die Ausgangsspannung die in weiterer Folge an den Drosseln und dem Kondensator anliegt.

Auslegung der Regelung

Die Regler wurden auf Basis der Grenzfrequenz ausgelegt, dabei wurden die für geschaltete Konvertersysteme üblichen Annahmen für die Auslegung eines Reglers verwendet. Diese Annahmen sind in den Formeln 3.11 zu sehen. Die Grenzfrequenz eines Reglers wird mit rund einem Zehntel der Schaltfrequenz angenommen damit es zu keinen Gleitvorgängen kommt. Da bei einem kaskadierten Regler der unterlagerte Regler schneller sein soll als der überlagerte Regler wird die Frequenz des unterlagerten inneren Stromreglers um den Faktor vier höher angesetzt als die Frequenz des überlagerten äußeren Spannungsreglers. Es ergibt sich also eine Frequenz von 500Hz für den Stromregler und 125Hz für den Spannungsregler.

$$\begin{aligned}
 f_{\text{grenz}} &\approx \frac{f_{\text{Schalt}}}{10} = \frac{5\text{kHz}}{10} = f_I = 500\text{Hz} \\
 f_{\text{außen}} &\approx \frac{f_{\text{innen}}}{4} = \frac{500\text{Hz}}{4} = f_U = 125\text{Hz}
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

Es gilt für die Regler, dass die Verstärkung des Stromreglers einem Widerstand R entspricht, da der Eingang des Stromreglers ein Strom und der Ausgang eine

Spannung ist. Beim Spannungsregler ist dies entsprechend umgekehrt und dessen P-Verstärkung entspricht einem Leitwert G . Eine Vereinfachung für die Auslegung der Regelparameter ist eine Reduktion des Filters beim Strom auf nur die Drosseln und bei der Spannung nur auf den Kondensator. Des Weiteren kann der Wechselrichter als Spannungsquelle (P-Glied) angenommen werden, da er die Ausgangsspannung des Stromreglers entsprechend umsetzt. Die Berechnung der Verstärkung der beiden Regler ist in den Formel 3.12 und 3.13 beschrieben. Diese Berechnung bzw. die Auslegung der Regelparameter geschieht über die Funktion des offenen Regelkreises F_O dabei wird nur der Regler und die Regelstrecke betrachtet ohne die Rückkopplung. Der Regler ist in beiden Fällen ein Proportionalregler (P-Regler) wodurch seine Übertragungsfunktion ein reiner Verstärkungsfaktor ist, hier sind es R bzw. G . Die Regelstrecken bestehen durch die Vereinfachungen nur aus der Übertragungsfunktion einer Induktivität bzw. eines Kondensators.

$$|F_{O_I}| = \left| \frac{1}{sL} \cdot R \right| = 1 \Rightarrow \quad (3.12)$$

$$R = |s \cdot L| = 2\pi f \cdot L = 2\pi \cdot 0,5\text{kHz} \cdot 1\text{mH} = 3,14 \text{ V/A}$$

$$|F_{O_V}| = \left| \frac{1}{sC} \cdot G \right| = 1 \Rightarrow \quad (3.13)$$

$$G = |s \cdot C| = 2\pi f \cdot C = 2\pi \cdot 125\text{Hz} \cdot 10\text{mF} = 7,85 \text{ A/V}$$

Die Regler sind als reine P-Regler ausgelegt damit sie möglichst schnell sind. Jedoch stellte ich beim ersten Testen dieser Einstellung eine bleibende Regelabweichung der Spannung fest, wodurch ein Integralanteil mit einer Nachstellzeit von $T_N = 8\text{ms}$ hinzugefügt wurde, der diese Abweichung eliminierte. Es zeigte sich bei den Tests außerdem, dass eine etwas kleinere Verstärkung des Spannungsreglers bessere Ergebnisse lieferte, wodurch die endgültigen Regelparameter aus Formel 3.14 gewählt wurden.

$$\begin{aligned} K_{P_V} &= G = 7 \text{ A/V} \\ T_{N_V} &= 8\text{ms} \\ K_{P_I} &= R = 3,14 \text{ V/A} \\ T_{N_I} &= 0\text{ms} \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.5. Integration der Batteriemodelle

Die bereits in den Grundlagen angesprochenen Batteriemodelle wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit noch nicht in die Labview-Anwendung zur Bedienung eingebaut, da deren gesamte Integration den Zeitrahmen sprengen würde und sie sich

3. Aufbau des Batteriesimulators

ideal für eine eigene Diplomarbeit eignen würde. Denn es ist ein großer Aufwand die benötigten Parameter zu aller erst zu ermitteln und danach in die Labview-Anwendung zu integrieren. Dennoch soll hier kurz an Hand des einfachsten Modells von nur einer Spannungsquelle und eines Widerstandes gezeigt werden, wie eine solche Integration möglich wäre.

Nachdem die Daten für die Ruhespannung gegebenenfalls ermittelt wurden und die Ruhespannungskennlinie der Batterie vorhanden ist, kann daraus für jeden Ladezustand ein Ruhespannungswert für die Spannungsquelle vorgegeben werden. Diesem Wert wird der interne Spannungsabfall abgezogen, woraus die endgültige Klemmenspannung resultiert. Nebenbei benötigt so ein Modell noch eine Ladezustandsbilanzierung, diese kann integriert werden indem der abfließende Strom I_{Aus} über die gesamte Zeit aufintegriert wird und vom Anfangsladezustand abgezogen wird. Die für die Integration benötigte Berechnung ist in den Formeln 3.15 angeführt.

$$\begin{aligned} U_{\text{Klemme}} &= U_{\text{Ruhe}} - R \cdot I \\ \text{SOC}_{\text{Akt}} &= \text{SOC}_{\text{Start}} - \int I_{\text{Aus}} dt \end{aligned} \tag{3.15}$$

Simultan zu dem Modell mit der Spannungsquelle und dem Widerstand können auch kompliziertere Modelle eingebunden werden. Jedoch stößt der Batteriesimulator bei der Dynamik von Modellen schnell an seine Grenzen, da die Schaltfrequenz nur 5kHz ist und der langsame Spannungsregler sogar nur eine Frequenz von 125Hz hat.

4. Simulation und Messung

Nachdem sich das vorige Kapitel mit dem Aufbau des Batteriesimulators beschäftigt, geht es in diesem Kapitel um die Simulation des Regelkreises und um Messungen am fertigen Simulator. Dazu werden in einem Unterkapitel die Simulation mit dem Simulationsmodell und seinen Ergebnissen gezeigt. In dem zweiten Unterkapitel geht es um die Messungen am Batteriesimulator bei dem der dazugehörige Messaufbau und die Messergebnisse beschrieben werden. Abschließend folgt noch ein Vergleich von Simulation und der Messung.

4.1. Simulation des Batteriesimulators

Die Simulation dient dazu, das grundlegende Verhalten des fertigen Simulators vorab zu ermitteln und so auch Rückschlüsse bei Veränderungen von Regelparametern oder Begrenzungen zu erhalten. Die Simulation dient außerdem dazu um als Ausgangsbasis für Erkenntnisse bei zukünftigen Erweiterungen des realen Systems zu dienen, da solche Erweiterungen somit vorab simuliert werden können. Eine Simulation kann dabei auf mehrere Varianten durchgeführt werden, so kann eine Schaltungssimulation oder eine Simulation des Regelkreises gemacht werden. Bei der Simulation der Schaltung wird diese in einem Schaltungsprogramm nachgebildet und so kann ihr Verhalten im Programm ausgetestet werden. Dabei müssen aber alle Bauteilgrößen richtig ausgewählt werden und insbesondere müssen die Regler hier als Operationsverstärker aufgebaut werden. Bei dem Ausgangskondensator muss etwa auch auf eine eventuelle Vorladung des Kondensators geachtet werden, wodurch eine derartige Simulation einiges an Erfahrung benötigt. Die etwas einfachere Methode in dem vorliegenden Fall ist die Simulation des Regelkreises. Bei einer solchen Simulation müssen die Übertragungsfunktionen der Regler und der Regelstrecken bestimmt werden und können danach in einem Simulationsprogramm wie Matlab Simulink simuliert werden. Die Ergebnisse dieser Simulation berechnen sich dabei aus Differenzialgleichungen, welche mit Hilfe der Übertragungsfunktionen aufgestellt werden. Es sind dabei auch die Methoden der Regelungstechnik wie Stabilitätsanalysen usw. verwendbar.

Es wurde für die Simulation die Variante mit der Regelkreissimulation mittels Matlab Simulink gewählt, da diese einfacher ist als die Schaltungssimulation und auch keine sehr große Erfahrung mit Schaltkreissimulationsprogrammen bestanden hat.

4. Simulation und Messung

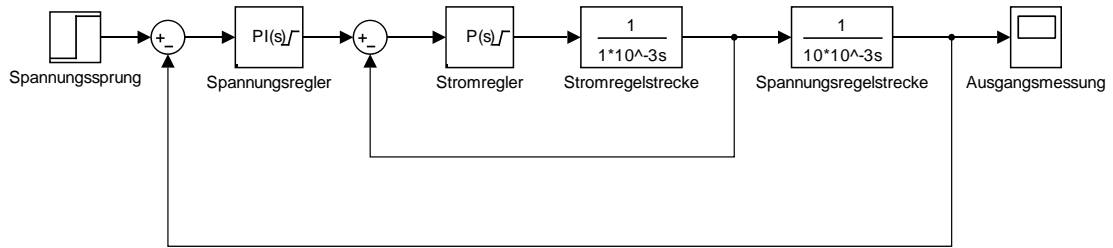


Abbildung 4.1.: Modell für die Simulation

Außerdem war der Regelkreis schon fast komplett vorhanden mit dem Regler der Siemenssoftware. Für die Simulation wurde zuerst das Modell aufgestellt, nach der Simulation wurden die daraus erhaltenen Ergebnisse anschließend mit den realen Messergebnissen verglichen.

4.1.1. Simulationsmodell

Das Modell für die Simulation ist das Standardmodell eines kaskadierten Reglers aus der Regelungstechnik mit einem äußeren und einem inneren Regelkreis. Das verwendete Simulationsmodell ist dem verwendeten Regler nachempfunden und für das Modell mussten die Regelstrecken sowie die Parameter der Regler bestimmt werden. Zu sehen ist dieses Modell in der Abbildung 4.1.

Für die Reglerparameter werden die Werte verwendet, die bereits bei der Reglerauslegung in Kapitel 2.2 berechnet wurden. Die Regelstrecken sind zum einen die Strecke für den Stromregler und zum anderen die Strecke des Spannungsreglers. Bei der Stromregelstrecke wird wie schon bei der Bauteilauslegung wieder die Vereinfachung hinsichtlich des Filters getroffen, sodass für den Stromregler nur mehr die Drosseln betrachtet werden, da diese primär das Stromverhalten beeinflussen. Die Stromregelstrecke ergibt sich daher zu der Übertragungsfunktion G_{S_I} . Für den Spannungsregelkreis wurde mit der ähnlichen Vereinfachung vorgegangen und der LC-Filter wurde hierfür nur auf den Kondensator alleine reduziert, da dieser das Spannungsverhalten darstellt und die Energie in Form der Spannung speichert. Die Übertragungsfunktion der Spannungsregelstrecke ist G_{S_V} .

$$\begin{aligned} G_{S_I} &= \frac{1}{s \cdot L} = \frac{1}{j\omega \cdot 1\text{mH}} \\ G_{S_V} &= \frac{1}{s \cdot C} = \frac{1}{j\omega \cdot 10\text{mF}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Wichtig für die Simulation ist die richtigen Begrenzungen des Spannungs- und des Stromreglers zu wählen. Denn bei einem unbegrenzten Stromregler würde der Ladestrom der Kondensatoren bei einer Spannungsänderung sehr hoch werden und so

einen schnellen Anstieg der Spannung ermöglichen. Dieser hohe Ladestrom darf in der Realität nicht erreicht werden, da der Wechselrichter nur einen maximal zulässigen Ausgangsstrom besitzt. Deshalb sind die Begrenzungen gemäß der möglichen Spannungs- bzw. Stromwerten gewählt worden. Die Werte beziehen sich in Simulink auf die Nennwerte und es wurde beim Spannungsregler als untere Grenze 0 und als obere $\frac{720}{700} = 1,03$ gewählt. Die Grenzen des Stromreglers sind $\pm \frac{350}{300} = \pm 1,17$. Die 350A als maximaler Strom kommen nur von den Messungen, bei denen der Wert zur Sicherheit eingestellt war und danach nicht mehr auf die eigentlich richtigen 700A gestellt wurde. Damit die Simulation mit den realen Messungen vergleichbar sein soll wurde diese Grenze auch bei der Simulation gewählt.

4.1.2. Simulationsergebnisse

Anhand des Modells aus dem vorherigen Unterkapitel wurde nun das System mittels Matlab Simulink simuliert und in der Abbildung 4.2 ist das Ergebnis der Simulation zu sehen. Die Ausgangsgröße dieses Diagramms ist die Spannung in bezogener Größe die über die Zeit aufgetragen wird und welche auf einen Sollwert-Sprung am Eingang bei dem Zeitpunkt von 1s reagiert. Als Ergebnis auf den Sprung folgt ein Ansteigen der Spannung bis sie den Zielwert erreicht. Der Regler ist hier so eingestellt, dass es zu keinem Überschwingen kommt. Das ist auch gut ersichtlich in dem Bild anhand der nur langsam annähernden Kurve an den Zielwert von 1. Der Anstieg ist durch die Begrenzungen die schon im Vorfeld erwähnt wurden beschränkt in seiner Steilheit und dadurch resultiert auch eine langsamere Anstiegszeit mit 9,7ms als es ein unbegrenztes System schaffen würde. Die Anstiegszeit ist die asymptotische Steigung der Spannung, die als zusätzliche Linie (schwarz) in der Grafik eingezeichnet wurde.

4.2. Messungen des Batteriesimulators

Die Messungen am Batteriesimulator erfolgten nach der Fertigstellung der Anlage um die Funktionstüchtigkeit nach dem Zusammenbau zu testen und die signifikanten Kennwerte zu ermitteln. Diese Werte sind mitunter auch das Gütekriterium von einem Batteriesimulator und die wären die Anstiegszeit der Spannung und der Spannungseinbruch in Folge einer sprunghaften Strombelastung. Idealerweise dient ein entsprechend großer Widerstand als Belastung, der mittels eines Schalters ideal zugeschaltet wird um den Spannungseinbruch zu messen und so die Qualität des Reglers zu ermitteln. Das Problem war einerseits, einen entsprechend belastbaren Widerstand zu bekommen, da dieser einen Strom von 300A aushalten muss und andererseits einen Schalter zu finden, der einen so hohen Gleichstrom schalten kann.

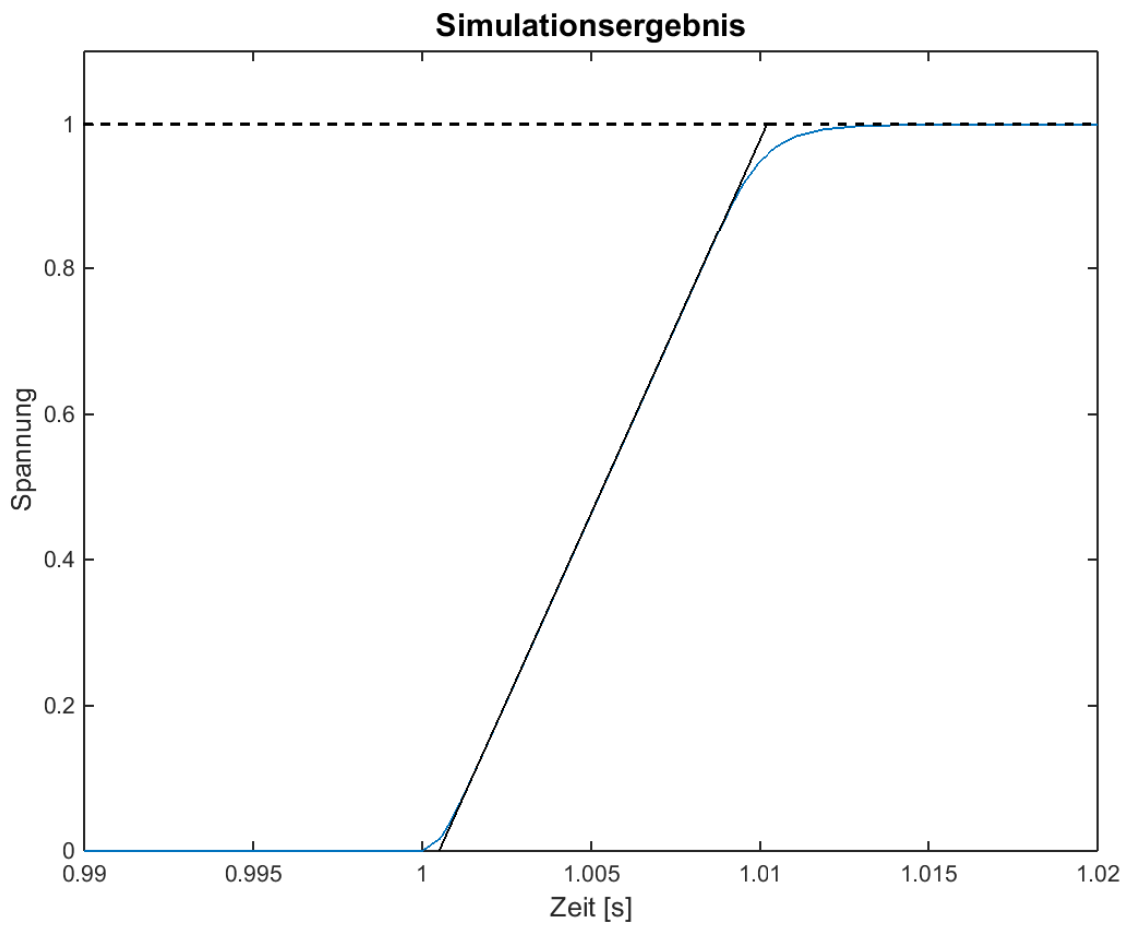


Abbildung 4.2.: Simulationsergebnis einer Sprungantwort der Ausgangsspannung

Eine Möglichkeit, dies zu realisieren wäre im Prinzip ein langer isolierter Kupferdraht mit einem dementsprechend kleinen Widerstand in ein Wasserbad zur Kühlung zu geben und es mittels eines IGBTs als Stoßlast zuzuschalten. Diese Variante wurde aber aufgrund der nur einmaligen Verwendung zum Testen und der benötigten etwas aufwendigeren Schaltung für den IGBT wieder verworfen. Die Wahl der Belastung fiel schlussendlich auf einen umrichter gespeisten Motor, der durch den Batteriesimulator versorgt wird. Der einzige Nachteil ist dabei die relativ langsame Anstiegszeit der Motorspannung gegenüber einer raschen stoßartigen Zuschaltung mittels eines Schalters, darum werden die Kennwerte die im Folgenden ermittelt werden auch ein wenig von ideal ermittelten Werten abweichen. Dieser Umstand ist aber im generellen kein Problem, da in Zukunft wahrscheinlich mehr Anwendungen in diese Richtung verwendet werden und dadurch die Werte eines Motors mehr Aussagekraft haben werden.

4.2.1. Messaufbau

Der Aufbau zum Messen besteht aus einem Motor der als Belastung für den Simulator dient. Bei dem Motor handelt es sich um eine Permanent-erregte-Synchronmaschine (PSM) die mittels eines Motorumrichters versorgt wird und dieser Umrichter wird aus dem Batteriesimulators gespeist. Diese gesamte Einheit die aus einem serienmäßigen Hybridfahrzeug von Volvo stammt, wurde von Magna Powertrain leihweise für die Messungen zur Verfügung gestellt. Als Belastung für den Motor dient eine elektrische Bremse die am Prüfstand normalerweise für Tests mit Verbrennungskraftmaschinen verwendet wird, sich aber auch für die Tests mit elektrischen Motoren eignet. Der Motor von Magna besitzt eine Nennleistung von 60kW bei einer Zwischenkreisspannung des Umrichters von 300V. Die Nenndrehzahl beträgt 14000Upm bei einem maximalen Moment von 200Nm. An den Motor ist aber ein Getriebe verbaut mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:9,6. Durch diese Übersetzung sinkt die maximale Drehzahl die an der Bremse wirkt auf rund 1400Upm und im Gegenzug steigt das maximale Drehmoment auf etwa 2000Nm. Das Problem stellt zum einen das hohe Moment, das der Motor samt Getriebe erzeugen kann dar. Denn die Bremse kann nur ein maximales Moment von 500Nm bremsen welches bei auch nur kurzfristigen Überschreiten dieser Grenze den gesamten Prüfstand abschaltet. Zum anderen ist die niedrige Drehzahl die durch die Bremse vorgegeben wird, da die maximale Drehzahl des Motors schnell überschritten wird. Deswegen kann der Arbeitspunkt des Motors mit dem maximalen Strom nicht eingestellt werden (auf Grund eines zu hohen Moments) sondern nur ein Arbeitspunkt mit einem kleinerem Strom. So konnte der Batteriesimulator im Rahmen der Messungen nicht voll belastet werden, der gemessene Strom war nicht einmal die Hälfte des maximal möglichen Ausgangsstroms von 300A. Nichtsdestotrotz reichte diese Belastung aus um die grundlegende Funktion testen zu können und so konnten auch Rückschlüsse auf die Kennwerte getroffen werden.

Gemessen wurde mit einem „DEWE-2602“ Messsystem der Firma Dewetron welches als zentrales Messgerät für die Werte von der Ausgangsspannung, des Ausgangstroms, des Drehmoments und der Drehzahl diente. Das verwendete Messsystem besitzt nur Spannungseingänge und so müssen alle Werte in ein Spannungssignal umgewandelt werden. Einzig die Ausgangsspannung die direkt an den Abgangsklemmen der Anschlussbox gemessen wurde, kann direkt auf einen Spannungseingang des Messsystems geführt werden. Bei der Strommessung wurde ein Messwandler der Firma Vakkumschmelze verwendet, der den Strom der zum Fahrzeugumrichter fließt in ein Spannungssignal umwandelt welches ebenfalls mittels eines Spannungseingangs des Dewetron-Gerätes gemessen werden kann. Die Information des Drehmoments kam von einer Smarttorque Drehmomentmesswelle der Firma HBM welche nur ein maximales Drehmoment von 500Nm (wie auch die Bremse) messen kann. Das Ausgangssignal der Messwelle liegt als Spannungssignal vor und muss so nicht mehr umgewandelt werden. Schlussendlich kamen die Daten von der Drehzahl direkt von der Belastungsbremse die von der Firma Kristl und Seibt stammt und über eine integrierte Drehzahlmessung verfügt, welche ebenfalls ein Spannungssignal ausgibt.

Die Steuerung des Motors bzw. des Motorumrichters erfolgt an einem Computer der über den CAN-Bus die Befehle an den Umrichter übermittelt. Zur Ansteuerung wird eine von Magna bereitgestellte Software verwendet mit der das gewünschte Drehmoment und auch Befehle wie zum Einkuppeln des Motors vorgegeben werden können.

4.2.2. Messungen

Ein Ziel der Messungen war es, die Funktion der Anlage zu testen und das andere Ziel war es, die entsprechenden Kennwerte zu identifizieren. Der Funktionstest bestand im Wesentlichen aus einem reinen Einschalten des Batteriesimulators mit beliebigen Spannungsvorgaben und anschließendem Belasten mit einem beliebigen Strom. Dieser Test dient nur der Überprüfung ob der Simulator auch einwandfrei funktioniert und ob die Spannung sowie der Strom richtig ausgegeben werden.

Bei dem Ziel der Kennwertbestimmung macht die Anstiegszeit der Spannung den Anfang. Die Anstiegszeit ist eine charakteristische Größe einer Sprungantwort aus der Regelungstechnik und sie zeigt die Dynamik des Reglers an. Eine Sprungantwort ist die Reaktion auf einen Sollwert-Sprung am Steuereingang des Systems und zeigt wie das System dynamisch reagiert. Die Anstiegszeit ist also ein Maß für die Schnelligkeit des Systems und ist jene Zeit in der die Spannung asymptotisch um den Wendepunkt von null auf den Zielwert ansteigt. Dazu wird bei einer definierten Ausgangsspannung ein Spannungssprung vorgegeben und die sich einstellende Systemantwort aufgenommen. Für diese Messung wurde ein Zielwert mit 300V gewählt. Die Ergebnisse sind in dem Unterpunkt 4.2.3 Messergebnisse zu sehen.

Der zweite Kennwert der zu bestimmen war, ist der Spannungseinbruch bei einer Laststromänderung. Der Wert beschreibt wie gut und wie schnell der Regler eine Änderung des Stroms ausregelt. Um diesen Umstand nachzustellen bedarf es etwas mehr Aufwand als beim vorigen Kennwert, wo nur eingeschalten werden musste. Damit der Spannungseinbruch auftritt, muss ein Lastsprung erfolgen der am besten aus einem nahezu idealen Sprung besteht. Da ein solcher Sprung zu aufwendig zu realisieren war (wie beim Messaufbau schon erklärt wurde) wurde stattdessen ein Laststoß mit dem Motor herangezogen. Da der Strom eines Motors proportional dem Moment ist, wurde ein maximal möglicher Momentensprung eingestellt damit ein entsprechend maximaler Stromsprung daraus resultiert. Der Drehmomentensprung ist aber durch die Bremse und die Drehmomentenmesswelle auf 500Nm begrenzt. Die Ergebnisse dieser Messung sind ebenfalls in dem folgenden Unterpunkt 4.2.3 zu finden.

Neben den beiden Kennwerten wurde auch der Spannungsanstieg bei einem negativen Stromsprung (Lastabwurf) gemessen um generell zu sehen, ob dieser ähnlich zu dem Spannungseinbruch beim Laststoß ist. Damit dieser Anstieg gemessen werden kann wurde ein Sprung in negativer Richtung, also von einem positiven Stromwert auf einen negativen Wert angelegt, als Nebeneffekt konnte zugleich die Rückspeisung ausprobiert werden. Diese Ergebnisse sind ebenfalls in dem Unterpunkt Messergebnisse zu sehen.

Es konnte leider kein Stromsprung getestet werden, der mit einer Sprunghöhe von 300A den gesamten Strombereich ausnutzt, da es (wie schon erwähnt) keine passende Belastung gab, die einen so großen Strom benötigt. Ein solcher Sprung hätte den maximalen Spannungseinbruch sichtbar gemacht und auch generell das Verhalten verdeutlicht, wenn ein so hoher Strom innerhalb von kurzer Zeit gefordert wird. Auf Grund der Verwendung von nur dem einen Motor samt seinem Umrichter mit der Betriebsspannung von 300V, sind auch leicht unterschiedliche Ergebnisse für andere Betriebsspannungen möglich.

4.2.3. Messergebnisse

Die gesamten Messergebnisse beziehen sich auf eine einzelne Messreihe bei der die Spannung, der Strom, das Drehmoment und die Drehzahl aufgezeichnet wurden. Daraus entstammen auch in weiterer Folge die einzelnen Bilder zu der folgenden Identifikation der Kennwerte von Anstiegszeit und dem Spannungseinbruch. Die Gesamtergebnisse sind im Anhang unter Punkt A.1 zu finden, wo diese in zwei Diagramme aufgeteilt sind.

Anstiegszeit

Den Beginn der Identifikation von den Kennwerten macht jene der Anstiegszeitmessung. Die Anstiegszeit ist jene Zeit, in der der Regler einen asymptotischen Anstieg der Ausgangsgröße von null auf den Zielwert bewältigt. Diese Zeit ist hauptsächlich durch die Regelparameter beeinflusst und sagt aus wie schnell die Spannung ansteigt. In dem Fall des Batteriesimulators soll zudem der Regler möglichst kein Überschwingen zulassen, da es sonst zu einem Abschalten des Fahrzeugumrichters kommen könnte und dadurch ist der Regler auch entsprechend langsamer in Bezug auf die Anstiegszeit als ein Regler bei dem ein Überschwingen von rund 10% zugelassen wird.

Das Diagramm in Abbildung 4.3 zeigt nun den Verlauf der Ausgangsspannung bei einem Einschaltvorgang auf 300V, also die Sprungantwort auf einen Spannungssprung. In dem Bild ist auch die Asymptote die zur Identifikation der Anstiegszeit dient mit eingezeichnet (schwarz). Zu beobachten ist eine geringe Welligkeit am Ende des Anstieges, die auf einen schlecht eingestellten Regler hindeutet, bei dem die Verstärkung zu hoch oder die Nachstellzeit zu lange gewählt wurde. Dieser Umstand kommt auf Grund der Optimierung des Reglers hin zu einem guten Verhalten bei einer Stromänderung zustande, wodurch daraus nicht die beste Einstellung für den Spannungssprung resultiert. Dies ist aber nicht so sehr das Problem, da für zukünftige Messungen Spannungssprünge wahrscheinlich nie wirklich verwendet werden, da bei Tests an Batterien die Spannung relativ stationär ist. Außerdem ist bei der Kurve ab ungefähr der Hälfte der Steigung noch eine Abweichung von der eingezeichneten Asymptote zu sehen, dies kann höchstwahrscheinlich auf eine innere Begrenzung im Wechselrichter zurückzuführen zu sein.

Die Anstiegszeit kann nun aus der Abbildung abgelesen werden bzw. aus den Messdaten ausgerechnet werden und diese ergibt sich bei der Messung zu einer näherungsweise Anstiegszeit von 6,7ms, wobei hier die anfängliche Steigung einbezogen wurde, welche gegen Ende des Anstiegs davon aber abweicht. Wie aus dem Bild ebenfalls ersichtlich ist, dient die Anstiegszeit nur als Kennwert und gibt nicht die Zeit bis zum Erreichen des Zielwerts an.

Spannungseinbruch beim Laststoß

Neben der Anstiegszeit ist die wahrscheinlich wichtigere kennzeichnende Größe für einen Batteriesimulator der Spannungseinbruch bei einer Stromänderung (Laststoß). Damit ein solcher Einbruch auftritt, muss es zu einer Stromänderung kommen und dazu wird ein Lastsprung des Motors benötigt. Da bei einem Elektromotor der Strom proportional zum Drehmoment ist, siehe Abbildung 4.4, muss vom Motorumrichter ein maximal mögliches Drehmoment gefordert werden, damit ein entsprechend hoher Stromsprung stattfindet. Bei der Messung wurde neben einem

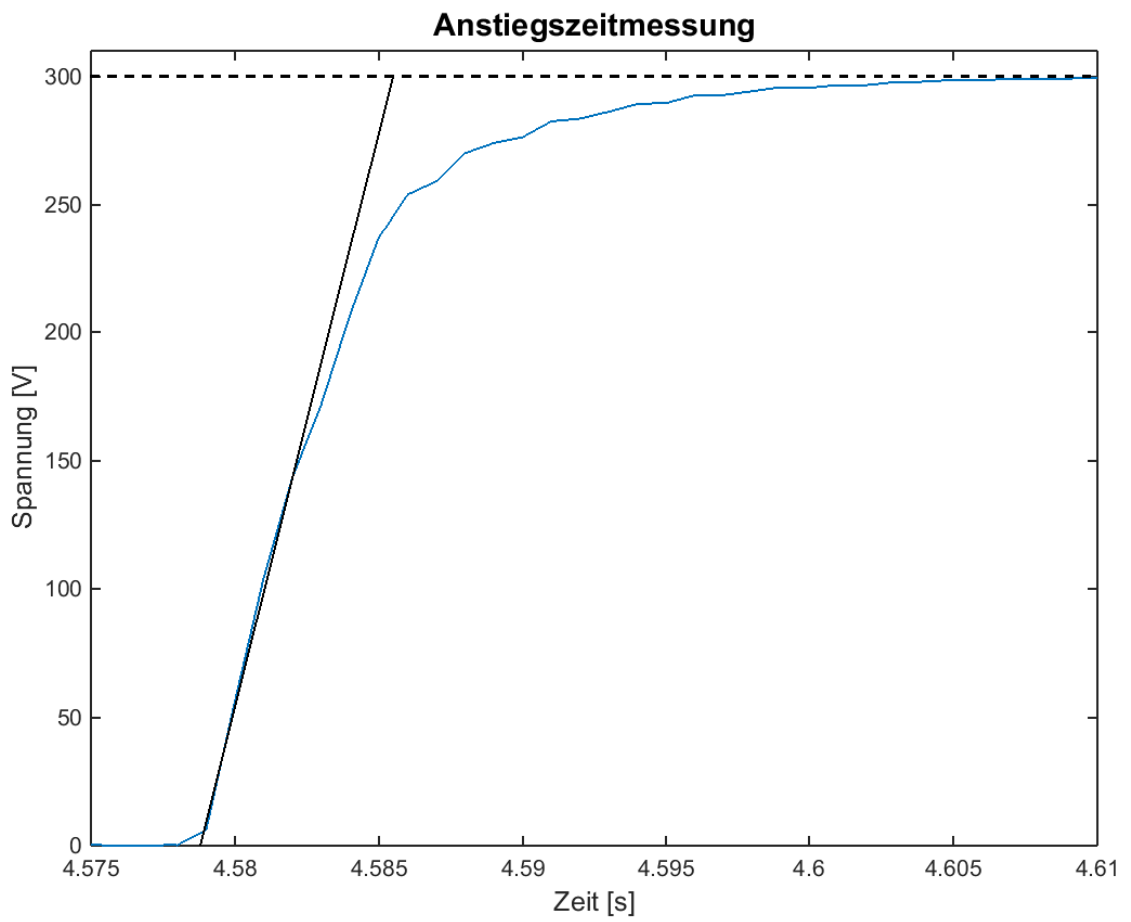


Abbildung 4.3.: Messergebnisse der Anstiegszeit

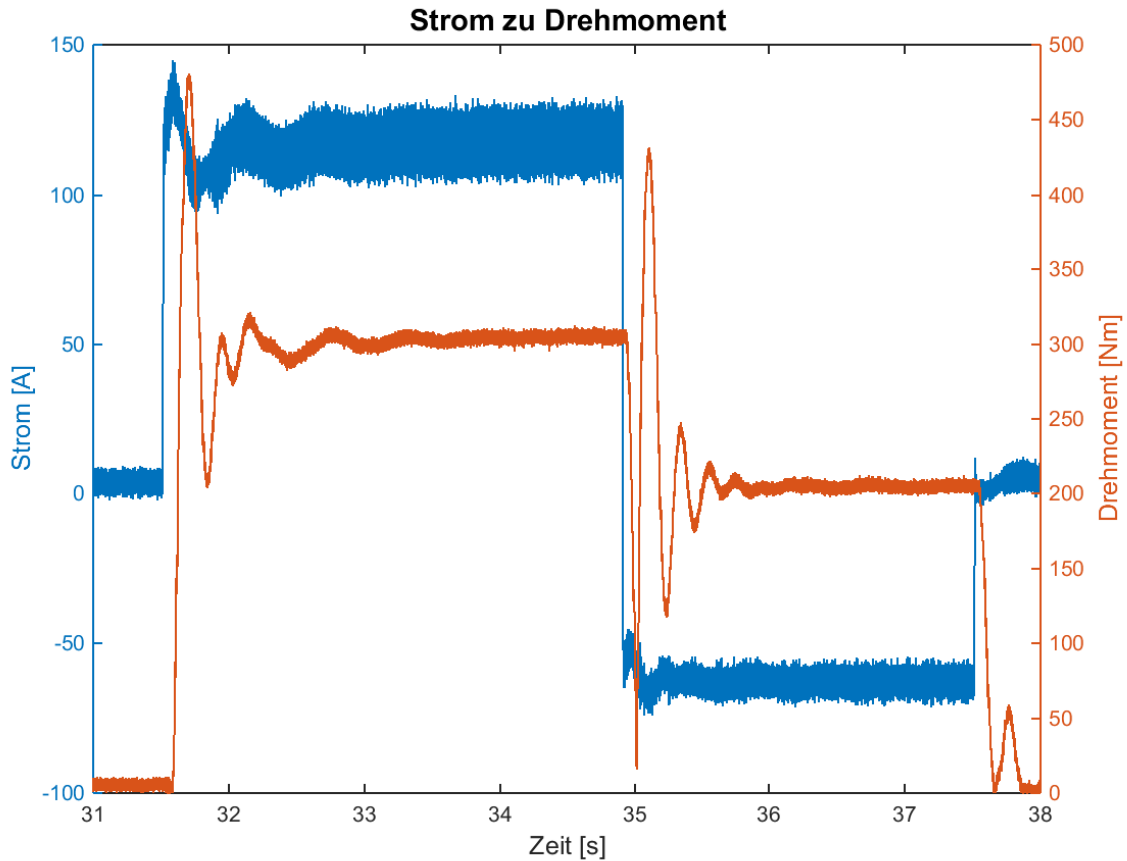


Abbildung 4.4.: Verhältnis von Strom zu Drehmoment

positiven Drehmomentensprung auch ein negativer Sprung angelegt, siehe Abbildung 4.4, um so auch eine Entlastung des Simulators testen zu können. Mit der negativen Drehmomentenvorgabe und dem dadurch negativen Strom wurde somit auch gleichzeitig die Rückspeisefähigkeit der Energie ins Netz ausprobiert. In dem Diagramm ist das Drehmoment trotzdem positiv aufgezeichnet, da von der Messwelle nur der Betrag des Drehmoments gemessen wurde nicht aber dessen Vorzeichen (Richtung). In diesem Diagramm ist aber die erfolgte Rückspeisung trotzdem in Form des negativen Stroms zu sehen. Außerdem ist in dem Bild die Zeit ersichtlich die der Motor benötigt um das Drehmoment aufzubauen, nachdem schon Strom zum Motorrichter fließt.

Die Abbildung 4.5 zeigt nun den Spannungseinbruch bei einem Stromsprung auf rund 120A. Der Anstieg des Stromes geschieht in rund 4ms, wodurch auf Grund der relativ langsamen Steigung des Stromes im Gegensatz zu einem idealen Sprung die nur eingeschränkte Eignung des Motors als Sprungersatz ersichtlich ist. Wenn dieser Anstieg auf einen Sprung auf 300A approximiert wird, ergibt sich so eine Zeit von etwa 10ms.

Der Spannungseinbruch der aus dieser Stromänderung resultiert, ist im Wesentli-

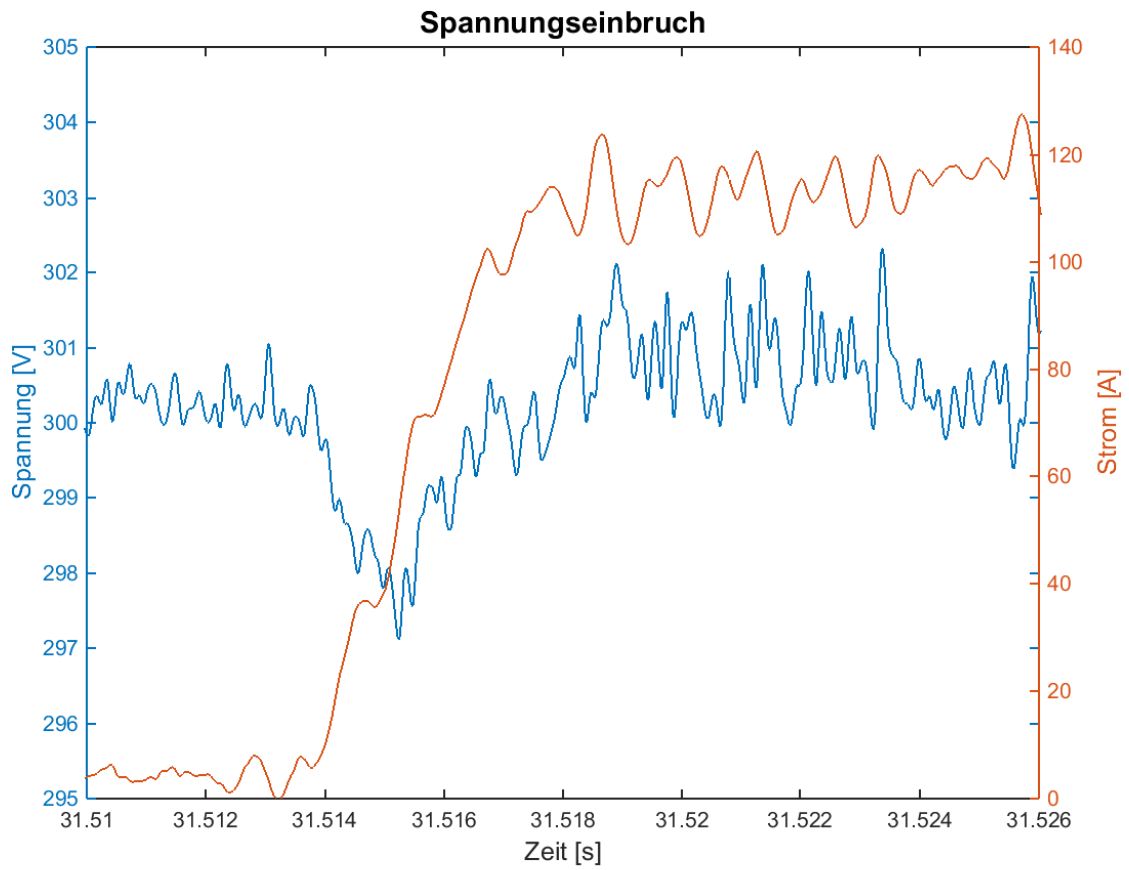


Abbildung 4.5.: Spannungseinbruch bei einem positiven Stromsprung

chen durch den Regler bedingt, denn dieser kann die Spannung nicht schnell genug ausregeln. Der Einbruch beträgt etwa 2,5V bzw. nur 0,8% bei den 300V. Die gezeigte kleine Zeitauflösung verdeutlicht auch das andauernde Ausregeln des Reglers, welcher versucht die Störungen bei der Strommessung auszuregeln und daraus resultiert der Rippel der im Bild zu sehen ist.

Anfänglich war eine zu langsame Verarbeitung des Ist-Stromwerts schuld an einem weitaus größeren Spannungseinbruch von etwa 18V, welcher dann auf den hier gezeigten verbessert werden konnte. Eine Möglichkeit den Einbruch noch weiter zu verkleinern, wäre die Regelung mit einer dynamischen Vorsteuerung zu erweitern. Eine Vorsteuerung, die schon im Voraus (prädikativ) den zu erwartenden Spannungseinbruch berechnet und den berechneten Wert dann additiv zu dem aktuellen Sollwert hinzufügt, um so den Spannungseinbruch noch weiter verkleinern zu können. Dadurch würde der tatsächliche Spannungseinbruch von einem höheren Wert ausgehen und ein sehr kleiner Einbruch resultieren. Jedoch ist dieser Weg recht aufwendig zu implementieren, da diese dynamische Vorsteuerung direkt in der Siemenssoftware hinzuzufügen wäre und dies würde somit nur von Siemens selber zu erledigen sein. Deswegen wurde dieser Weg nicht gegangen und auch keine solche Vorsteuerung hinzugefügt, da der jetzige Einbruch soweit akzeptabel ist. Dennoch wäre diese Methode eine Möglichkeit, falls eine zukünftig eine Verbesserung gewünscht ist.

Bei der Messung des Spannungseinbruch und deren Minimierung zeigte sich auch die Wichtigkeit einer hohen Schaltfrequenz des Wechselrichters, da der Regler bei einer höheren Schaltfrequenz schneller regeln könnte und so viel bessere dynamische Ergebnisse zu erzielen wären als dies mit den verwendeten 5kHz möglich ist.

Spannungsanstieg bei Entlastung

Neben dem Spannungseinbruch wurde auch eine Spannungsanstieg in Folge eines negativen Stromsprungs (Entlastung) gemessen und das Ergebnis ist in Abbildung 4.6 aufgetragen. Der Sprung entsteht eigentlich aus dem negativen Drehmomentensprung der vorgegeben wurde. Der resultierende Stromsprung springt von anfangs 120A auf $-60A$ in rund 6ms. Dabei kommt es so zu einer kurzfristigen Anhebung der Spannung. Diese Anhebung wird wie auch bei dem Einbruch vorhin so schnell wie möglich von dem Regler auf die ursprüngliche Spannung zurückregelt. Die Anhebung bei diesem Stromsprung beträgt 2,7V dies entspricht ca. 0,8% bei der 300V-Betriebsspannung und ist damit ein wenig höher als bei dem positiven Stromsprung. Dies kommt aber nur allein von der größeren Sprunghöhe bei dem negativen Sprung der 180A beträgt und so ein wenig höher ist als die 120A beim positiven Sprung. Generell ist das Ergebnis der Messung des Spannungsanstiegs von der Form her gleich derer des Spannungseinbruchs und beweist, dass die Funktion des Reglers bei einer positiven sowie einer negativen Stromänderung gegeben ist und sich gleich gut verhält.

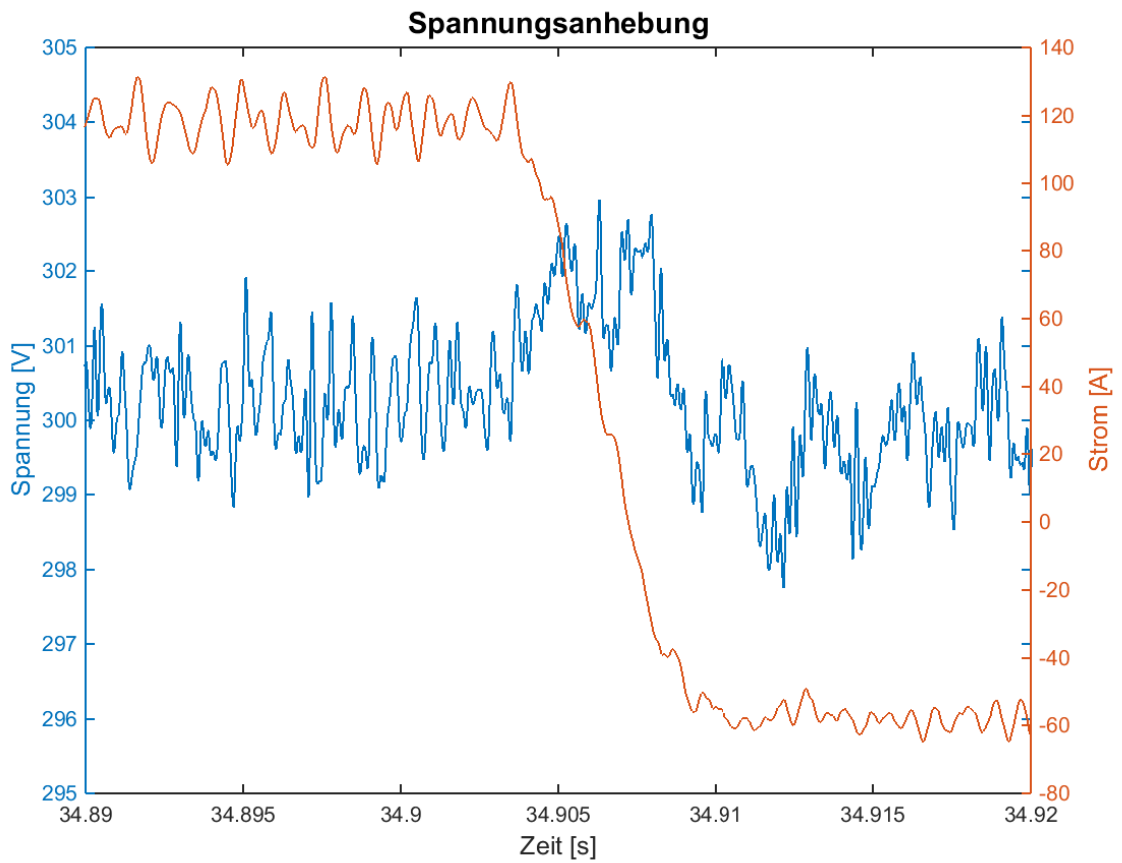


Abbildung 4.6.: Spannungsanhebung bei einem negativen Stromsprung

Wenn von einer generellen Anhebung von 0,8% ausgegangen werden kann, würde dies für eine 48V-Anwendung bedeuten, dass dabei die Spannung nur um 0,38V ansteigen würde, also deutlich unter der Abschaltgrenze des Fahrzeugumrichters bliebe. Aber es kann vermutlich nicht 1:1 von dieser Spannungsüberhöhung bei der niedrigen Betriebsspannung ausgegangen werden, da sich dabei beim Aufbau die Kondensatoren ändern und auch die Reglerparameter angepasst werden müssen. Deswegen ist ein höherer Spannungsanstieg bei Entlastung zu befürchten. Der Anwendungsfall konnte leider im Rahmen der Arbeit nicht getestet werden, da kein geeigneter Motor zur Verfügung stand.

4.3. Vergleich von Simulation und Messungen

Nachdem die Ergebnisse von der Simulation und von den Messungen in den vorherigen Kapiteln einzeln ausgearbeitet und analysiert wurden, dient dieses Unterkapitel zu verifizieren, ob die Simulationsergebnisse durch die Messung bestätigt werden. Dazu werden am besten die Diagramme 4.2 und 4.3 betrachtet und verglichen. Dabei ist generell ersichtlich, dass beide Verläufe von der Form her bis auf das Ende des Anstieges gleich sind.

Die gemessene Kurve besitzt die schon bei der Anstiegszeitmessung erwähnte kleine Welligkeit, die im simulierten Verlauf nicht auftritt. Diese Welligkeit entsteht auf Grund eines schlecht eingestellten Reglers. Der größere Unterschied ist die unterschiedliche Anstiegszeit der beiden Ergebnisse. So ist diese bei der Simulation 9,7ms und bei der Messung aber nur 6,7ms. Der Grund ist die in den Messergebnissen erwähnte Abweichung des Spannungsanstieges von der asymptotischen Steigung ab etwa der Hälfte des Anstieges. Darum ergibt sich auch eine kürzere Anstiegszeit da die Asymptote der Anfangssteigung genommen wurde. Dennoch würde ohne diese vermutete innere Begrenzung die Spannung in dem realen System schneller ansteigen als im simulierten Fall; dies lässt sich aber auch über den schlecht eingestellten Regler begründen.

Zur Erklärung dieser Tatsache muss das grundlegende Verhalten eines reinen P-Reglers betrachtet werden. Denn bei diesem gilt, je größer der Verstärkungsfaktor des P-Reglers ist, desto schneller erreicht die Regelgröße ihren Zielwert. Jedoch umso schneller dieser Anstieg geschieht, desto höher ist auch das Überschwingen des Reglers und daraus resultiert eine längere Ausregelzeit bis der Endwert erreicht wird. Bei einem PI-Regler mit einer nicht zu hohen Verstärkung und einer relativ großen Nachstellzeit, steigt die Kurve wegen des Integralanteils am Beginn schnell an und nähert sich dem Endwert danach aber langsam, wie es das Verhalten des simulierten Verlaufes zeigt. Wenn diese beiden Verhalten nun kombiniert werden, also ein PI-Regler mit einer etwas zu hohen Verstärkung verwendet wird, kann daraus die kleine Welligkeit des gemessene Verhaltens erklärt werden und auch die unterschiedlichen Zeiten. So ist auf Grund des P-Regler-Verhaltens bei einer

4. *Simulation und Messung*

höheren Verstärkung die Ausregelzeit länger, aber die Anstiegszeit dafür kürzer. Diese ergibt sich bei der simulierten Kurve zu 9,7ms gegenüber der gemessenen Kurve wo die Anstiegszeit nur 6,7ms beträgt. Der Preis eines schnellen Anstieges ist eine längere Ausregelzeit und dies ist auch in den beiden Bildern zu sehen.

Mitunter kommt es auch zu Abweichungen zwischen Simulation und Realität auf Grund der Vereinfachungen bei der Modellbildung der Regelstrecke. Es können sicher durch eine bessere Bestimmung dieser Übertragungsfunktionen (z.B. genauere Berücksichtigung der Umrichter-Totzeiten bzw. der Messfilter etc.) bessere Ergebnisse erzielt werden, aber nichtsdestotrotz bilden die Messergebnisse die Simulationsergebnisse relativ gut ab. Deshalb kann das Simulationsmodell auch für eventuelle Erweiterungen des Batteriesimulators in Zukunft verwendet werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die auf Grund der steigenden Elektrifizierung des Antriebsstanges benötigte Testmöglichkeit bzw. Testumgebung wird durch die Erweiterung eines konventionellen Prüfstandes für Verbrennungskraftmaschinen mit einem Batteriesimulator erfüllt. Dabei dient der realisierte Batteriesimulator als Ersatz für die Traktionsbatterie, die dann bei Tests an Hybridmodulen oder Elektromotoren samt Umrichtern nicht physisch vorhanden sein muss.

Die vorliegende Arbeit zeigt den Aufbau und die Regelung eines solchen Batteriesimulators. Dabei wird der gesamte Prozess von Grund auf beschrieben, also begonnen bei der Konzeptfindung über den mechanischen Aufbau bis hin zu den finalen Tests ob der Simulator funktioniert und zur Kennwertfindung. Zum Konzept ist anzumerken, dass nicht die einfachste technische Variante gewählt wurde, die eines Gleichrichters, der aus der dreiphasigen Eingangsspannung einen Gleichstrom erzeugt. Stattdessen wurde ein Zwischenkreisumrichter gewählt, der zwar aus der dreiphasigen Eingangsspannung wieder eine dreiphasige Ausgangsspannung erzeugen könnte. Dieser Umrichter wird hier aber speziell geschaltet bzw. betrieben um einen Gleichstrom am Ausgang erzeugen zu können. Der Grund dafür ist die dazugewonnene Möglichkeit der freien Spannungsverstellung von null bis zu der maximalen Spannung und der hohe mögliche Strom. Es kann somit jede Spannung in diesem Spannungsbereich angegeben werden und sie kann ohne umschalten oder umschließen ausgegeben werden. Der Strom dabei ergibt sich auf Grund der benötigten Leistung und so können maximal bis zu 300A auf Dauer als Ausgangsstrom fließen. Wesentlich ist auch, dass es sich bei den eingesetzten leistungselektronischen Komponenten um Standard-Baugruppen aus der Antriebstechnik handelt, die relativ kostengünstig verfügbar sind und die durch Modifikation der Steuerungssoftware für diesen Sonderbetrieb verwendet werden können und zu einer kostenoptimalen Lösung führen.

Die Regelung besteht aus einem kaskadierten Regler der den Strom und die Spannung regelt. Der Stromregler ist dabei der innere und schnellere Regler im Gegensatz zu dem überlagerten langsameren Spannungsregler. Bei dieser Anordnung wird eine Sollspannung vorgegeben, der Spannungsregler gibt daraus einen Sollstrom für den Stromregler vor und der Stromregler generiert daraus letztlich einen Vorgabewert für die Stellgrößen des Wechselrichters. Um die Regelung klassifizieren zu können, wurden die Kennwerte der Regelung anhand von Messungen bestimmt. Bei den Messungen und der Identifikation der Kennwerte lieferte dieser im Großen und

5. Zusammenfassung und Ausblick

Ganzen gute Werte bei der Anstiegszeit und beim Spannungseinbruch in Folge einer Stromänderung (Laststoß). Einzig bei der Dynamik müssen Abstriche gemacht werden, da die Regelung auf Grund der nicht allzu hohen Schaltfrequenz (5kHz) des Wechselrichters hier nicht extrem schnell ist.

Im Generellen erfüllt der Simulator soweit alle an ihn gestellten Anforderungen, wobei noch Raum für weitere Verbesserungen gegeben ist. So könnte etwa noch eine dynamische Vorsteuerung eingebaut werden, die den Spannungseinbruch bei Belastung weiter verbessert. Auch wurden zwar erweiterte Batteriemodelle im Rahmen der Arbeit angesprochen und auch deren theoretische Umsetzung vorgeschlagen, doch wurden diese nicht in die Steuerung des Batteriesimulators implementiert. Die Implementation der Batteriemodelle war eine zu zeitintensive Aufgabe für diese Diplomarbeit und würde sich gut für eine eigene, darauf aufbauende Diplomarbeit eignen.

Eine wesentliche Erkenntnis war die Wichtigkeit einer hohen Umrichter-Schaltfrequenz bei einer derartigen Aufgabe, wenn hohe Dynamik erreicht werden soll. Dafür eignet sich der verwendete Wechselrichter nicht hervorragend, aber ausreichend. Alles in allem war die Aufgabe sehr interessant, so ein Projekt von Anfang an mitzerleben. So war auch die Anzahl und die Unterschiedlichkeit der einzelnen Themengebiete die zu berücksichtigen waren sehr vielfältig, von der mechanischen Auslegung etwa über die Auswahl von Tastern und deren Anordnung bis hin zur Steuerung des gesamten Systems über eine eigene Anwendung viele Detailprobleme zu lösen um am Ende den fertigen Batteriesimulator betreiben und damit messen zu können.

Literatur

- [1] Siemens AG. *Einbaugeräte SINAMICS S120*. Siemens AG. 2015. URL: <http://w3.siemens.com/mcms/mc-solutions/de/umrichter/niederspannungsumrichter/sinamics-s/servoantrieb/seiten/sinamics-s120.aspx> (besucht am 27.07.2015).
- [2] Siemens AG. *SIMOTION, SINAMICS S120 und SIMOTICS - Ausrüstungen für Produktionsmaschinen*. 6SL3097-0AT00-0AP0. Version Katalog PM21. Siemens AG. 2013.
- [3] Siemens AG. *Sinamics - S120 Leistungsteil Booksize. Gerätehandbuch*. 6SL3097-4AC00-0AP6. Siemens AG. 4/2014.
- [4] Siemens AG. *Sinamics - S120 Leistungsteil Chassis. Gerätehandbuch*. 6SL3097-2AE00-0AP3. Siemens AG. 10/2008.
- [5] Siemens AG. *Sinamics - Schaltschrankintegration Sinamics S120/Simodrive*. 6SL3097-0AT00-0AP0. Siemens AG. 9/2007.
- [6] Siemens AG. *SINAMICS G/S: PROFINET Anbindung an LabVIEW*. Beitrags-ID: 99684399. Version 2. Siemens AG. 1/2015. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/99684399/sinamics-gs-profinet-anbindung-an-labview?dti=0&lc=de-WW> (besucht am 04.08.2015).
- [7] Siemens AG. *SINAMICS S120/S150 - Inbetriebnahmehandbuch*. 6SL3097-4AF00-0AP4. Siemens AG. 4/2014.
- [8] Siemens AG. *SINAMICS S120/S150 - Listenhandbuch*. 6SL3097-4AP00-0AP5. Siemens AG. 4/2014.
- [9] Dieter Anke. *Leistungselektronik*. 2. Aufl. München: Oldenbourg, 2000. 352 S. ISBN: 978-3-486-59378-5. URL: http://search.obvsg.at/primo_library/libweb/action/dlDisplay.do?vid=ACC&docId=ACC_aleph008382808&afterPDS=true (besucht am 17.06.2015).
- [10] Wolfgang Bernhart und Stefan Gutberlet. *Engineering Services*. Marketstudy. Roland Berger Strategy Consultants, 2014. URL: https://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Engineering_Services_20141015.pdf (besucht am 15.06.2015).
- [11] Prof. Dr. Johann Ertl. *Leistungselektronik und Stromrichtertechnik*. Vorlesungsskript. WS 2009/2010.

- [12] Peter Keil und Andreas Jossen. *Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen*. München: Technische Universität München - Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1162416/1162416.pdf> (besucht am 06.08.2015).
- [13] Manfred Michel. *Leistungselektronik: Einführung in Schaltungen und deren Verhalten*. 4. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-75610-1. DOI: 10.1007/978-3-540-75611-8.
- [14] Konrad Reif. *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik*. Hrsg. von Robert Bosch GmbH. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. ISBN: 978-3-8348-1274-2. URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC08296420> (besucht am 22.07.2015).
- [15] Joachim Specovius. *Grundkurs Leistungselektronik: Bauelemente, Schaltungen und Systeme*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2008. ISBN: 978-3-8348-0229-3. DOI: 10.1007/978-3-8348-9428-1.
- [16] Serge Zacher und Manfred Reuter. *Regelungstechnik für Ingenieure : Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011. ISBN: 9783834898371. URL: <http://permalink.obvsg.at/AC08293133> (besucht am 16.07.2015).

Abbildungsverzeichnis

1.1. Anteil von Hybrid- und Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 [10]	2
2.1. Umwandlungsrichtungen	5
2.2. Übersicht von elektronischen Ventilen	6
2.3. Kennlinie einer Diode [15, S.15]	7
2.4. Kennlinie eines Thyristors [15, S.75]	8
2.5. Aufbau und Schaltsymbol eines Mosfets [15, S.50]	10
2.6. Aufbau und Schaltsymbol eines IGBT [15, S.56]	11
2.7. Zwischenkreisumrichter	12
2.8. B6-Brückengleichrichter [15, S.149]	13
2.9. Ausgangsspannung des B6-Brückengleichrichter [15, S.150]	14
2.10. Wechselrichter [11]	15
2.11. Spannungen des Wechselrichters	16
2.12. allgemeiner Regelkreis (oben), vereinfachter Regelkreis (unten) . . .	18
2.13. Steuerkette	18
2.14. Kaskadierter Regelkreis	19
2.15. Ruhezustandskennlinie einer Lithium Ionen Batterie [12]	20
3.1. Konzept mit dem Gleichrichter	24
3.2. Konzept mit Gleichrichter und DCDC-Wandler	25
3.3. Konzept mit Umrichter und Filter	27
3.4. Batteriesimulator	28
3.5. Schaltschrank mit den Gleichrichtern	30
3.6. Schaltschrank mit dem Ausgangsfilter	33
3.7. Schaltschrank mit dem Trenntransformator	35
3.8. Schaltung des Batteriesimulators	37
3.9. Topologie des Siemens Bussystems Drive Cliq	40
3.10. Regelkreis des Batteriesimulators	42
4.1. Modell für die Simulation	46
4.2. Simulationsergebnis einer Sprungantwort der Ausgangsspannung . .	48
4.3. Messergebnisse der Anstiegszeit	53
4.4. Verhältnis von Strom zu Drehmoment	54
4.5. Spannungseinbruch bei einem positiven Stromsprung	55
4.6. Spannungsanhebung bei einem negativen Stromsprung	57
A.1. Gesamte Messung von Spannungs- und Strom	68

Abbildungsverzeichnis

A.2. Gesamte Messung von Drehmoment und Drehzahl 69

Tabellenverzeichnis

- 2.1. Schalterstellungen und resultierende Spannungen [11, 13] 15
- 3.1. Technische Daten des Batteriesimulators 23

A. Anhang

A.1. Messungen

In den Bildern A.1 und A.2 ist die gesamte Messung dargestellt woraus die einzelnen Bilder zu der Anstiegszeit und dem Spannungseinbruch beim Stromsprung stammen. Die Messung ist in Spannung/Strom und Drehmoment/Drehzahl aufgeteilt.

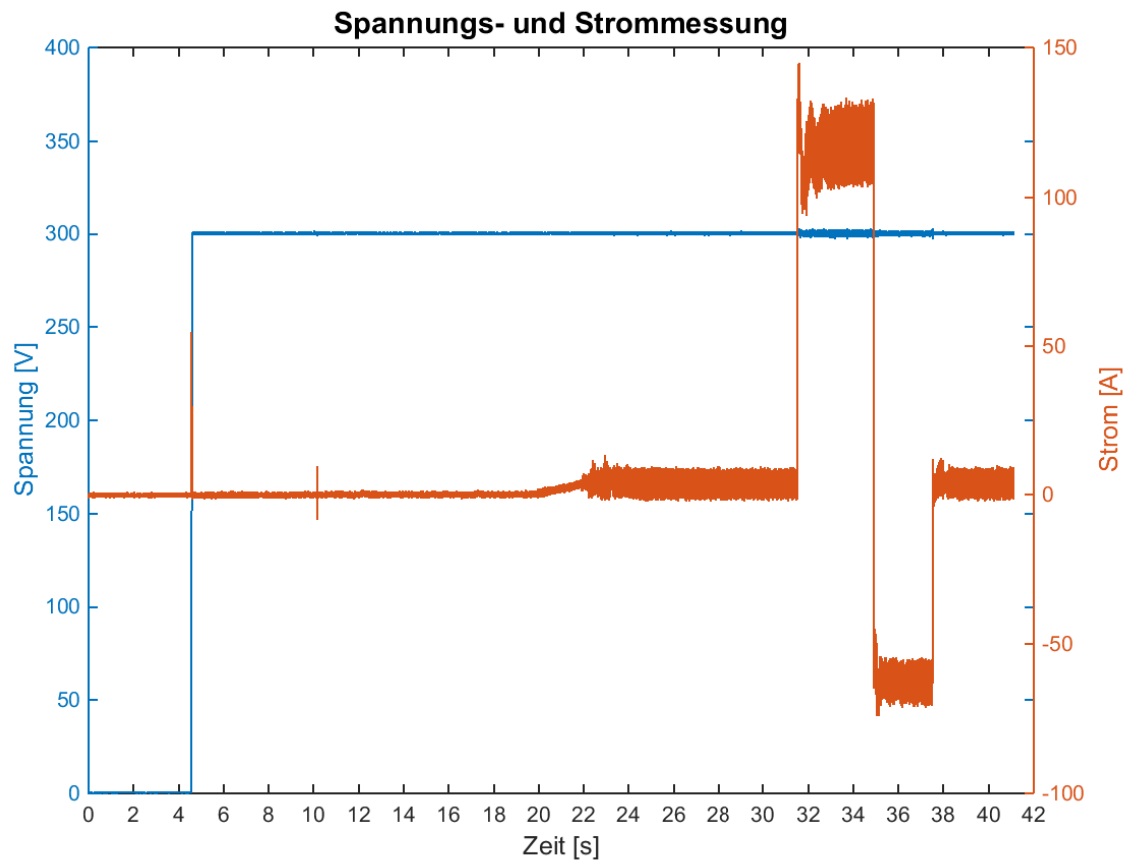


Abbildung A.1.: Gesamte Messung von Spannungs- und Strom

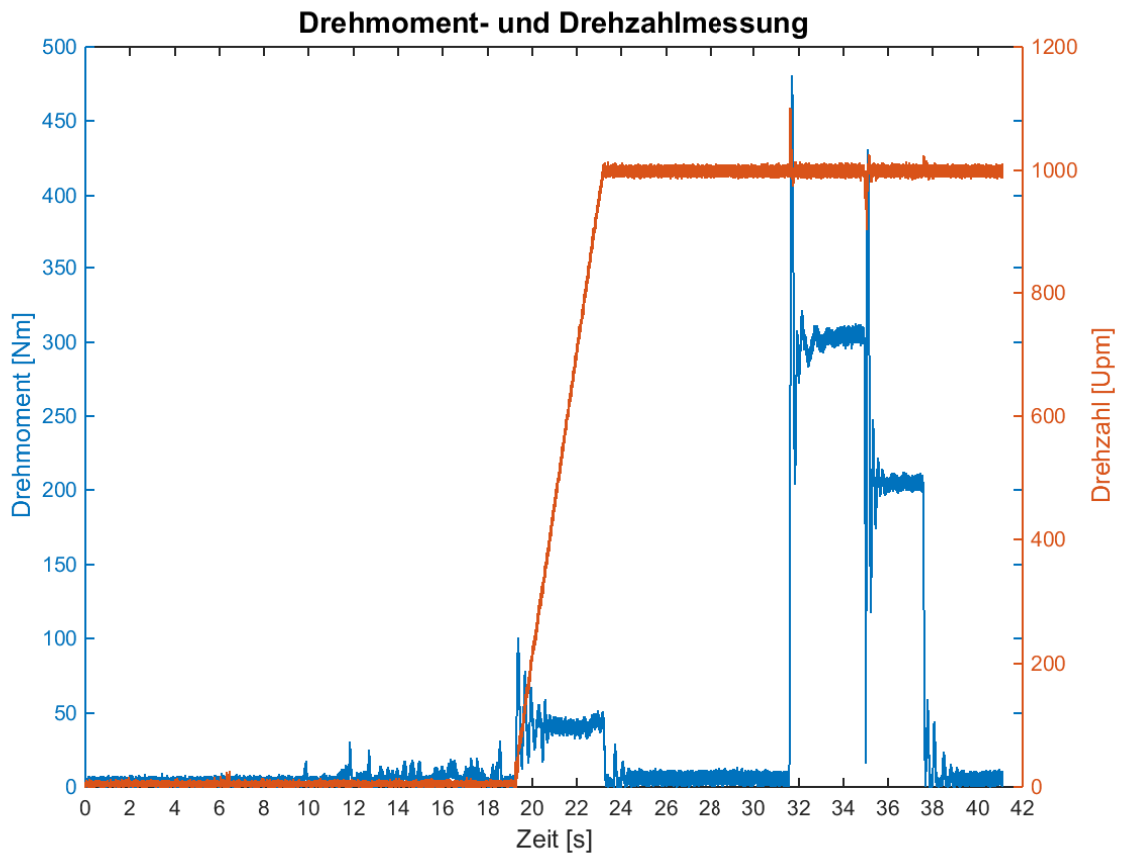


Abbildung A.2.: Gesamte Messung von Drehmoment und Drehzahl