



JAHRESBERICHT 2017/2018

Elektrische Antriebssysteme
Leistungselektronik

©2018 IMAB

Technische Universität Braunschweig

Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen

Hans-Sommer-Straße 66

38106 Braunschweig

Postfach 3329

38023 Braunschweig

www.imab.de

Inhalt

1	Vorworte	5
2	Personal am Institut	7
3	Forschung	10
3.1	Forschungsaktivitäten am IMAB	10
	IMAB-internes Forschungsprojekt IMAB Racer	11
	Herausforderungen bei der Elektrifizierung linearer Stellantriebe von Nutzfahrzeugen	22
	NetProsum2030 – Kompakte modulare Wandler und optimierte Systemlösungen zur Energieflusssteuerung für netzdienliche Prosumer 2030 mit HV-Fahrzeuggbatterien	25
	Siliziumkarbid-Leistungselektronik in automobilen Anwendungen	29
	Intelligente Treiberschaltung mit robuster serieller Schnittstelle	34
	Auslegung von Axialflussmaschinen	37
	Ide3AL - Innovationen für dynamische, energie-effiziente elektrische Antriebe mit neuartiger Leistungselektronik in der Industrie & Fertigung.	39
	Entwicklungen von netzgekoppelten On-Board-Ladegeräten für Elektrofahrzeuge	42
	Design guidelines and comparison of PMSM-Topologies for high torque and wide field-weakening demands	44
	GEKO - Intelligenter Gegenkolbenmotor zur Verbrennung von inhomogenen Mischgasen bei landwirtschaftlichen Kleinanwendern und Privathaushalten	45
	Optimierungsmethodik flussmodulierter Maschinen am Beispiel der Flux Reversal Maschine	48
	leichtLAST – Leichtes Lastenrad mit leistungsoptimiertem Antriebsstrang in Faserverbundbauweise unter Ausnutzung neuartiger elektronischer Bauelemente zur energetisch optimierten Motorregelung	53
	Standardisierung induktiver Ladesysteme über Leistungsklassen (STILLE)	56
	EMILIA – Der e-Golf ohne Ladekabel.	58
	Katalogbasiertes, interdisziplinäres Systemdesign von Elektrofahrzeugen (KISEL)	59
	Verbundprojekt Enersphere – Energiespeicher hoher Energiedichte für regenerative Energieerzeuger	60
3.2	Neue Prüfstandstechnik am IMAB	65
3.3	Externe Forschungsthemen	68
3.4	Abgeschlossene Dissertationen	76

4	Lehre	80
	4.1 Vorlesungen und Praktika in 2017/2018	80
	4.2 Zusammenstellung studentischer Arbeiten am Institut	89
5	Ereignisse 2017/18	95
	5.1 Berichte von besonderen Ereignissen	95
	5.2 Kalender	100
6	Veröffentlichungen in 2017/18	104

1 Vorworte

Liebe Freunde des IMAB,

dieser Zwei-Jahresbericht über die Jahre 2017/2018 gibt Ihnen einen Überblick über die Aktivitäten des IMAB in Forschung und Lehre, und beschreibt außerdem Teile des Institutslebens abseits des Forschungsalltags.

Auch in diesen beiden Jahren hat das IMAB wieder seine Forschungsaktivitäten durch zahlreiche Veröffentlichungen und Fachvorträge auf nationalen und internationalen Konferenzen darstellen können.

Die Forschungsthemen betreffen weiterhin den gesamten Energiewandlungsprozess von der Energiequelle über leistungselektronische Systeme bis hin zum Elektromotor und zur Last, sowohl in industriellen als auch fahrzeugtechnischen mobilen Anwendungen.

Durch den Gewinn eines DFG-finanzierten Exzellenzclusters zu ‚Nachhaltigen Energiesystemen in der Luftfahrt‘ hat das Thema ‚Elektrisches Fliegen‘ an der TU Braunschweig Fahrt aufgenommen. Hier bringt sich das IMAB im Rahmen der Weiterentwicklung leichter effizienter Maschinen und Wandlerstufen ein und wir erwarten spannende Forschungsfragen dazu in den kommenden Jahren.

Grundlegende Forschungsarbeiten wurden ergänzt durch interessante Forschungsprojekte mit Industriepartnern, hinter denen konkrete Anwendungen stehen. In diesem Umfeld kann das IMAB weiterhin auf eine hohe Kompetenz zur Realisierung von Antrieben und Elektronik in Hardware setzen, sodass theoretische Ansätze und Vorausberechnungen in fast allen Projekten zum Aufbau von Hardware-Prototypen und zu deren Vermessung geführt haben. Herauszuheben ist die Fertigstellung und die Präsentation des IMAB-Racers, eines Shelby Cobra Nachbaus, der am IMAB mit Hilfe von studentischen Arbeiten und viel Engagement der Mitarbeiter elektrifiziert wurde und eine sehr attraktive technische Versuchsumgebung für Lehre und Forschung bietet – mehr dazu in diesem Jahresbericht.

Auch in 2017/2018 sind wieder zahlreiche studentische Arbeiten am IMAB angefertigt worden, in denen Studierende Einblicke in aktuelle Forschungsthemen gewinnen konnten und teilweise hervorragende, mit Preisen ausgezeichnete Ergebnisse erzielt haben.

Wir danken allen Partnern und Freunden des IMAB für die Unterstützung in den letzten zwei Jahren und wünschen Ihnen viel Freude bei der Durchsicht dieses Zwei-Jahresberichtes.

Ihr

Markus Henke



Liebe Freunde des IMAB,

die Leistungselektronik am IMAB ist in den letzten zwei Jahren erfreulich gewachsen. Dies betrifft die Zahl der Mitarbeiter sowie der Themen bzw. Projekte. Natürlich gehören auch neue Geräte und renovierte Räume dazu.

Mit der Zusage zu den vom BMWi geförderten Verbundprojekten Netprosum 2030 und Ide3AL konnten 3 neue Mitarbeiter gewonnen und eingestellt werden. Interessante Projekte mit Partnern aus der Industrie haben die Themenvielfalt abgerundet und für einen Zuwachs an Erkenntnissen und Erfahrungen am IMAB gesorgt. Weitere Projekte befinden sich in den unterschiedlichen Phasen der Beantragung. Darüber hinaus sind eine Reihe interessanter studentische Arbeiten am IMAB angefertigt worden, die Studierenden ihren Studienabschluss aber auch einen Zugang zu aktuellen Forschungsthemen ermöglicht haben.



Ein über alle Projekte greifender Forschungsschwerpunkt ist der Einsatz von Wide-Band-Gap Halbleitern auf Basis von Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). Abgeschlossene, laufende und geplante Arbeiten beschäftigen sich mit dem Einsatz in hart- aber auch weich schaltenden Topologien aber auch mit Untersuchungen zum Schalt- und Ansteuerverhalten, Fragen der Entwärmung oder zur Zuverlässigkeit. Systematische Untersuchungen zu den magnetischen Bauelementen, die für die jetzt sehr hohen Schaltfrequenzen geeignet sind, haben begonnen.

Im Fokus stehen derzeit leistungselektronische Lösungen in der elektrischen Antriebstechnik für Mobilität und Industrie sowie in der Systemtechnik für die Netzanbindung erneuerbarer und gespeicherter Energien bis ca. 50kVA. Für die praktischen Untersuchungen steht in frisch renovierten und neu möblierten Räumen auch neues Equipment zur Verfügung. So wurden neue Nachbildungen von Photovoltaik-Generatoren, Batterien und Netze bis 50kVA und Komponentenprüfgeräte wie Impedanzanalysatoren neu beschafft. Die Anwendungsfelder haben sich damit erweitert, z.B. auf bidirektionale Batterieladegeräte für mobile oder stationäre Anwendungen auch in Kombination mit Photovoltaikanlagen.

In den vergangenen zwei Jahren hat sich die Sichtbarkeit des IMAB auf nationaler und internationaler Ebene erhöht. Dazu gehört die Mitgliedschaft im International Steering Committee der EPE und als auch des Technical Chair Committee der CIPS. Auf der EPE 2018 war das IMAB erstmals mit zwei Beiträgen vertreten.

Ich möchte mich bei allen Partnern und Freunden des IMAB für die Zusammenarbeit aber auch die Unterstützung in den letzten zwei Jahren ganz herzlich bedanken und freue mich auf weitere spannende Jahre.

Ihre

Regine Mallwitz

2 Personal am Institut

Vorstand:	Prof. Dr.-Ing. Markus Henke (Institutsleiter)	
	- Elektrische Antriebssysteme	
	Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz	
	- Leistungselektronik	
Professoren	Prof. a.D. Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Canders	
im Ruhestand:	Prof. a.D. Dr.-Ing. Jürgen Meins	
	Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Herbert Weh	
Oberingenieur:	Dr.-Ing. Günter Tareilus	
Akademischer Direktor i. R.:	Dr.-Ing. Helmut Mosebach	
Geschäftszimmer:	Dorothee Ottow	
Wiss. Mitarbeiter:	M.Sc. Sridhar Balasubramanian	/ Maschinenberechnung
	M.Sc. Tim-Hendrik Dietrich	/ Ladetechnologie, Leistungselekt.
	M.Sc. Tobias Fricke	/ Leistungselektronik, Prüfstände
	M.Sc. Fabian Hain	/ Maschinenberechnung
	M.Sc. Lucas Hanisch	/ Maschinenberechnung
	M.Sc. Christian Heister	/ Maschinenberechnung
	Dipl.-Ing. Jan Hoffmann	/ Maschinenkonstruktion
	Dipl.-Ing. Peter Hoffmann	/ Prüfstände
	Dipl.-Ing. Niklas Langmaack	/ Leistungselektronik, Prüftechnik
	M.Sc. Florian Lippold	/ Leistungselektronik, Prüftechnik
	Dipl.-Ing. Quirin Maurus	/ Maschinenkonstruktion
	M. Eng. Robert Rohn	/ Leistungselektronik
	M.Sc. Oleg Schäfer	/ Ind. Ladetechnologie, Regelung
	M.Sc. Henning Schillingmann	/ Maschinenberechnung

M.Sc. Thorben Schobre	/ Leistungselektronik
M.Sc. Konstantin Siebke	/ Leistungselektronik
M.Sc. Cengiz Uzlu	/ Leistungselektronik

Buchhaltung: Ulrike Nissen
Jan-Philipp Scheiner

Auszubildender: Joel Hora

Technischer Angestellter: Herbert Rawe

Werkstattmitarbeiter: Tobias Gaida (Werkstattmeister)
Jenny Jacobs
Bernd Machus
Carlo Mensing

Auszubildende: Jan-Niklas Buhr
Matthias Depner

Mitarbeiter, die seit dem 01.01.2017 neu hinzugekommen sind:

am 01.07.2017	M.Sc. Sridhar Balasubramanian
am 01.08.2017	Jan-Niklas Buhr
am 01.08.2017	Joel Hora
am 15.11.2017	M. Eng. Robert Rohn
am 15.11.2017	M.Sc. Cengiz Uzlu
am 01.12.2017	M.Sc. Tobias Fricke
am 16.07.2018	M.Sc. Lucas Hanisch

Mitarbeiter, die seit dem 31.12.2016 ausgeschieden sind:

am 31.12.2016	M.Sc. Mang Cai
am 03.04.2017	Stefan Strebe
am 31.05.2017	Dipl.-Ing. Anna-Lena Menn
am 31.07.2017	Lars Moritz

Als wissenschaftliche Hilfskräfte waren seit dem 01.01.2017 tätig:

Emanuel Agyekum	Ibrahim Azimzade	Gerrit Bremer
Kai Tim Bremermann	Jannes Briese	Janick Busse
Feng Chen	Fatos Citaku	Timon Fahlbusch
Christoph Faraji-Tajrishi	Dirk Fischer	Christian Frankenberg
Patrick Freitag	Tobias Fricke	Rüdiger Görke
Jannik Gutbrod	Carsten Hartmann	Nils Henke
Jonas Jäger	Felix Klabunde	Kevin Klarmann
Julius Kohlhepp	Peer König	Nikolay Korshunov
Andrii Kostrytsia	Jan-Niklas Langer	Ziwen Liu
Boris Mendoza Lori	Alexander Lührmann	Nicole Mursakov
Michael Ochs	Korbinian Pfnür	Max Leander Prause
Marvin Rehra	Erik Rohlfers	Enja Rösch
Hendrik Schefer	Andreas Schlerf	Lasse Schumacher
Andrii Shtefaniuk	Qianting Shui	Tomas Slimak
Cengiz Uzlu	Paul Weichold	Joshua Weitzel
Henrik Wienken	Elias Yousef	Lyucheng Zhu



Das IMAB

3 Forschung

Neben der Lehre ist die Durchführung von Forschungsprojekten wesentliche Aufgabe der am IMAB tätigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. In den Jahren 2017/ 2018 wurde wieder eine Reihe interessanter Forschungsfragen in vielen Projekten mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie bearbeitet. In zahlreichen Verbundprojekten sind Arbeiten eingebunden in die Aktivitäten des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik NFF der TU Braunschweig.



Forschungsfelder des Instituts

3.1 Forschungsaktivitäten am IMAB

Im folgenden wird ein Auszug aus diesen Projektthemen dargestellt. Es zeigt sich eine weite Streuung von rein theoretischen Forschungsarbeiten zu Auslegungs- und Berechnungsthemen bis hin zu praktischen Aufbauten von leistungselektronischen Schaltungen und elektrischen Maschinen.

IMAB-internes Forschungsprojekt IMAB Racer

<https://www.tu-braunschweig.de/imab/aktuelles/imab-racer>

Von der am IMAB geborenen Idee Studenten praxisnahe Lehre in Form eines Praktikums im Bereich Elektromobilität mit fahrbarem Versuchs-/Forschungsträger anzubieten, sind inzwischen einige Jahre vergangen. Daraus ist nun eine technologisch ausgereifte Plattform entstanden, die es uns ermöglicht, neueste technologische Ansätze und Verfahren im realen Fahrbetrieb zu erproben.

Das hier vorgestellte Fahrzeug verfolgt damit die wesentlichen Ziele

- **Entwurf und Realisierung aller Antriebs- und Steuerungskomponenten durch studentische Arbeiten und IMAB-interne Aufbauten**, Zukauf von Komponenten nur in Ausnahmefällen
- Darstellung einer offenen Plattform für zukünftige Forschungsarbeiten mit eigenem Zugriff auf sämtliche Hard- und Software
- Didaktisch herausragende Möglichkeit zur Anwendung des Fahrzeugs und der Komponenten in der Lehre (z.B. in Praktikumsversuchen des IMAB)



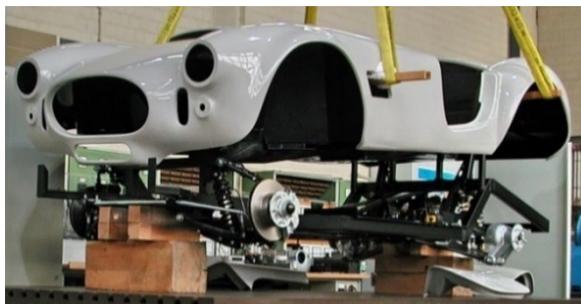
Der fertiggestellte IMAB-Racer als Lehr- und Forschungsplattform

Historie

Die Umsetzung einer Idee erfordert zunächst die Zeit und Arbeitsplanung und daraus resultierend eine Kostenabschätzung. Die Finanzierung des Projektes konnte durch SQM und Eigenmittel abgesichert werden. Dadurch ist es uns möglich die Lehre mit dem seit 2014 angebotenen Praktikum „Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge“ zu verbessern und eine attraktive praxisnahe Ausbildung anzubieten. Der Aufbau von Hardware, die tatsächlich im Versuchsträger verbaut wird, motiviert die Studierenden zusätzlich im Anfertigen ihrer Abschlussarbeiten und bei ihren Tätigkeiten als wissenschaftliche Hilfskräfte. Daher sind die Arbeiten am Versuchsträger dem IMAB-Racer stetig vorangeschritten. Die folgenden Kapitel beschreiben den Aufbau des Versuchsträgers und stellen die am IMAB entwickelten Komponenten des Antriebsstrangs, der Bordelektronik und die erforderlichen mechanischen Konstruktionen und Anpassungen vor.

Versuchsträgerwahl und Vorarbeiten

Begonnen hat die Reise mit der Auswahl eines geeigneten Fahrzeugs, welches die am IMAB entwickelten Komponenten des Antriebsstrangs beinhalten soll. Das Fahrzeug muss dabei nicht nur funktional sein sondern auch als Werbeträger für die Elektromobilität dienen, um die Studenten für das Thema zu begeistern und diese aktiv am Aufbau des Fahrzeugs zu beteiligen. Die Wahl fiel auf ein Kit Car, welches eine Straßenzulassung für Verbrennungsmotoren bereits besitzt, genug Bauraum für die Komponenten bietet und eine attraktive Optik besitzt:



Die Racer-Ausgangsbasis: AC Cobra Kit Car

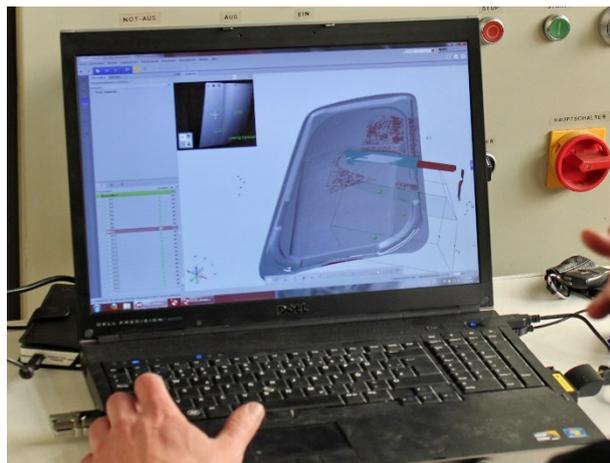
Mit der Wahl des Cobra Replikat Bausatzes konkretisierten sich die Ideen zum Gesamtkonzept des fahrbaren Versuchsträgers. Zielsetzungen sind zum einen die Präsentation der IMAB-Komponenten des Antriebsstrangs insbesondere im eingebauten Zustand und zum anderen die Austauschbarkeit dieser Komponenten durch Weiter- oder Neuentwicklungen. Daraus leitet sich die Aufgabe ab, ein Fahrzeug mit demontierbarer Karosserie zu entwickeln. Die Realisierung dieses Konzept hat weitreichende Folgen und spiegelt sich in der Entwicklung nahezu jeder Komponente wieder. Das Anordnen der einzelnen Komponenten muss jetzt zusätzlich zum Komponentenbauraum den notwendigen Bewegungsraum der Karosserie bei der Demontage berücksichtigen. Weiterhin sind jegliche Verkabelungen und Verschlauchungen genau zu planen, um eine geringe Anzahl an Schnittstellen zu gewährleisten. Diese Schnittstellen sind wiederum nur an zugänglichen Stellen unterzubringen ohne dabei die Kabellängen unnötig zu verlängern. Weiterhin verliert die Bauanleitung des Bausatzes durch dieses Konzept an vielen Stellen wie u. a. der Pedalerie, der Lenkung oder der Sitzmontage seine Gültigkeit und muss durch Neukonstruktionen ersetzt werden. Darüber hinaus ist das Dichtungskonzept an

den abweichenden Fahrzeugaufbau anzupassen, damit kein Spritzwasser in die Fahrgastzelle eindringt oder die empfindliche Bordelektronik beschädigt.

Für eine derart anspruchsvolle konstruktive Aufgabe ist ein CAD-Modell des Gesamtfahrzeugs notwendig geworden, welches beim Erwerb des Bausatzes nicht mitgeliefert wird. Daher hat eine Braunschweiger Firma den Rahmen und die Karosserieteile optisch dreidimensional vermessen und die resultierende Punktwolke der Einzelteile uns zur Verfügung gestellt. Aus dieser Punktwolke ist dann am IMAB ein 3D-Oberflächenmodell für diese Komponenten entstanden.



Vermessung des Fahrzeugs



Visualisierung

Der Rahmen ist eine Schweißkonstruktion, die im Wesentlichen aus Halbzeugen besteht und dadurch einfach mit einem CAD Programm zu modellieren ist. Zur Verifikation des entstandenen Volumenmodells dient das Oberflächenmodell aus der Vermessung. Mit Fortschreiten des Projekts hat sich dieses Modell verbessert, da mittels konventioneller Messmethoden Abweichungen nahezu eliminiert wurden.

Fahrzeugtechnik

Das trennbare Karosseriekonzept stellt zwar eine Herausforderungen dar, ermöglicht jedoch im Gegenzug die Zugänglichkeit der im Fahrzeug verbauten Antriebsstrangkomponenten und Steuergeräten. Die Anforderungen an die Positionierung dieser Komponenten im Fahrzeug sind maßgeblich vom trennbaren Karosserie- sowie dem Antriebskonzept und dem daraus resultierenden Bauraum abhängig. Letzteres hat unmittelbar Einfluss auf den Fahrzeugschwerpunkt und dadurch auf die Achslastverteilung. Das aktuelle Antriebskonzept des IMAB-Racers reduziert zusätzlich die erforderlichen konstruktiven Änderungen am Cobrabausatz, indem keine Rad- oder radnahen Motoren verwendet werden sondern ein Mittelmotor zum Einsatz kommt. Über eine Gelenkwelle wird das erzeugte Moment direkt zum Differential und von dort, über die im Bausatz enthaltenen Antriebswellen, auf die Räder übertragen. Die Anordnung von Wechselrichter und Traktionsbatterie im Vorderwagen und die Positionierung des Motors zwischen den Fußräumen von Fahrer und Beifahrer führt zu einer gleichmäßigen Verteilung des Gewichts auf die Achsen. Im Fahrzeug ist eine Wasserkühlung aus automotive Komponenten eingebaut. Es existieren drei parallele Zweige, die aufgrund angepasster Strömungsquerschnitte den Traktionsmotor, den Wechselrichter und den DC/DC-Wandler entsprechend ihrer unterschiedlichen Anforderungen temperieren. Die Sicherheit der Passagiere ist durch die Erweiterung des Rahmens mit einem geschweißten Mitteltunnel aus Rohren und

durch das Hinzufügen von Crashstrukturen vor der Traktionsbatterie deutlich gesteigert. Der Racer überschreitet mit seiner Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h und seinem Antriebsmoment von 600 Nm die Performancewerte des verbrennungsmotorischen Pendantes nicht, so dass das Fahrwerk und die Bremsen aus dem Bausatz geeignet sind. Der Bremskraftverstärker kann jedoch nicht vom Unterdruck des Verbrennungsmotors gespeist werden, weshalb eine zusätzliche Unterdruckpumpe erforderlich ist. Weiterhin ist ein Gaspedal erforderlich, welches ein Signal der Gaspedalstellung für die Regelung des el. Antriebstrangs zur Verfügung stellt. Diese zwei Beispiele verdeutlichen, dass die Entwicklung spezieller Steuergeräte für den Aufbau eines Elektrofahrzeugs notwendig ist.



Voll ausgerüstete Bodengruppe

Der Racer ist ein Institutsprojekt, in dem Studierende praxisnahe Ausbildung erfahren, indem sie die gelehrt Inhalte in Form von Abschlussarbeiten anwenden können. Die Resultate tragen gezielt zum Erfolg des fast fertigen Fahrzeugaufbaus bei. Das IMAB als Elektrotechnikinstitut löst in diesem Projekt interdisziplinäre Aufgabenstellungen, die von der Umsetzung eines trennbaren Karosseriekonzeptes, über die Rahmenerweiterung zur Befestigung der el. Antriebstrangkomponenten bis hin zur Entwicklung von Einzelkomponenten reichen. Der Racer im attraktiven Gewand einer AC Cobra wird in Zukunft als Plattform dienen, an der Studierende an aktuellen Themen der Fahrzeugtechnik forschen können.

Interieur / Armaturenbrett

Um das Fahrzeug mit einem ansprechenden Interieur auszustatten muss der IMAB-Racer gleich zwei Ansprüchen gerecht werden. Einerseits erfordert die Konzeption als Forschungsfahrzeug und der Umbau zum Elektrofahrzeug eine deutliche Abkehr von den ursprünglich vorgesehenen Innenraumelementen der Cobra, andererseits sollen bei Optik und Haptik keine Abstriche gemacht werden. Dies wird durch einen weitgehenden Eigenbau des Innenraumes erreicht. Hier ist besonders das in Handarbeit gefertigte Armaturenbrett hervorzuheben, um dem Fahrzeugdesign keinen Stilbruch zumuten zu müssen. Hier sollte das elegante 60er-Jahre Sportwagen-Design der Cobra aufgegriffen und durch moderne Bedienkonzepte erweitert werden. Da der originale Armaturenräger in seiner Gestaltung nicht für die Anforderungen eines Elektrofahrzeuges geeignet ist, wurde zunächst die durch die Karosserie definierte Formgebung abgenommen. Zu diesem Zweck wurde ein Hartschaummodell des Armaturenbretts angefertigt und die Form durch perforieren und verkleben der Karosserie angepasst (siehe Abbildung zu Schritt 1). Mithilfe des Hartschaummaterials wurde auch die spätere Dicke des Armaturenbretts nachgebildet.

Die auf diese Art entstandene Urform konnte danach gespachtelt und verschliffen werden. Immer wieder wurde die Form in die Karosserie eingepasst, vermessen und angepasst. Die Ausschnitte für die Bedienelemente wurden eingeplant, sodass sie die Stabilität des späteren Armaturenbretts nicht zu stark beeinträchtigen. Zuletzt wurde die Urform feinverspachtelt und geschliffen. Als Versiegelung wurde hier ein Zwei-Komponenten-Epoxydharz aufgetragen (Abbildung zu Schritt 2).

Nachdem die Form versiegelt war, konnte die eigentliche Negativ-Form erstellt werden. Dazu wurden verschiedene Formbauharze in Verbindung mit Glasfaserschnipseln und entsprechenden Glasgewebematten aufgebracht. Hier galt es, die richtige Reihenfolge der Schichten abzustimmen. So konnte sowohl eine sehr stabile Negativ-Form als auch eine möglichst glatte Oberfläche erzeugt werden. Die Abbildung zu Schritt 3 zeigt die entstandene Form von der Außenseite.



Schritt 1: Hartschaummodell



Schritt 2: Feinverspachtelt und geschliffen

In diese Form konnte nun das Armaturenbrett laminiert werden. Dazu wurde dünnflüssiges Epoxyd-Harz in Kombination mit sehr feinen (für die Oberfläche) und groben (für die Stabilität) Glasgewebematten verwendet. Zur Befestigung im Fahrzeug wurden Metallplatten mit aufgeschweißtem Gewindebolzen einlaminiert. Hier war es erforderlich, die Position der Anzeige- und Bedienelemente zu kennen.

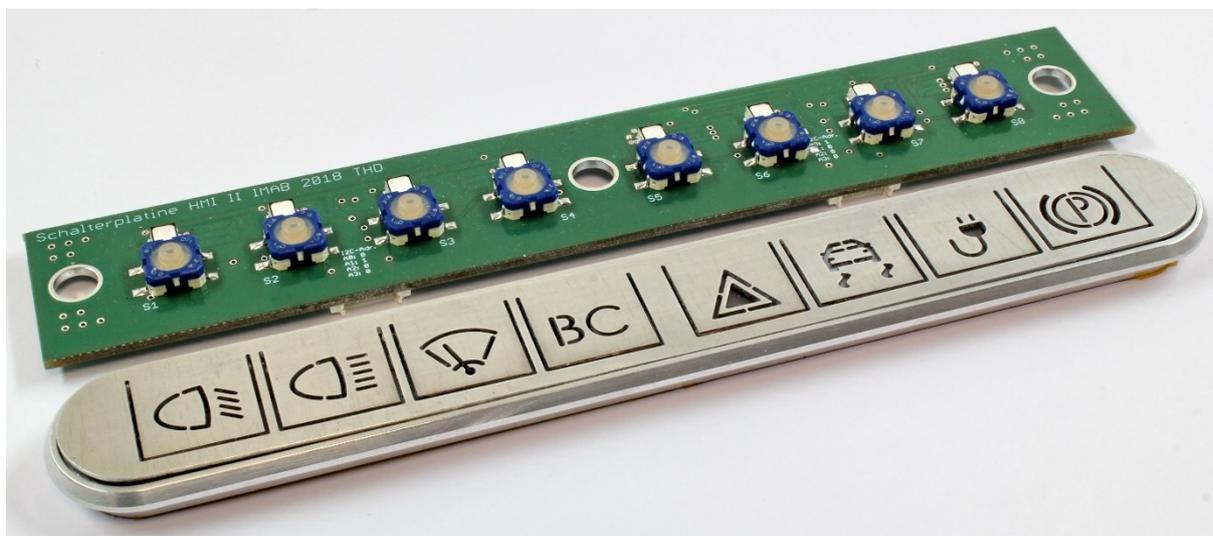


Schritt 3: Negativform

Schritt 4: Fertig bezogenes Armaturenbrett

Das so entstandene Armaturenbrett wurde anschließend verschliffen, gespachtelt und abermals verschliffen. Daraufhin konnte eine Unterpolsterung aufgebracht und das Armaturenbrett von einem Sattler mit Leder bezogen werden. Das fertige Armaturenbrett mit den benötigten Rundanzeigeelementen zeigt die Abbildung zu Schritt 4.

Für die Gestaltung des Innenraumes ist zusätzlich die Benutzerschnittstelle von maßgeblicher Bedeutung. Neben den grundlegenden Bedienelementen für ein konventionelles Fahrzeug erfordert die Eigenschaft als Versuchsträger eine flexible Gestaltungsmöglichkeit für Eingabe und Bedienung. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, wird neben den unveränderlichen Armaturen (Tachometer, Ladestandanzeige, Bedienelemente für Blinker usw.) ein flexibles Bedienkonzept mit einem Display und programmierbaren Eingabetasten in Form einer Schalterleiste in der Mittelkonsole entwickelt, dass eine bedarfsgerechte Anpassung möglich macht. Die Tasten der Schalterleiste können dabei nach Bedarf belegt und farblich beleuchtet werden, die Schalterblende ist austauschbar. Schalterleiste und die zugehörige Platine sind in der folgenden Abbildung zu sehen. Ferner soll dem Beifahrer über die Anschlussoption eines Tablets die Ausgabe von größeren Datenmengen ermöglicht werden.



Schalterleiste und zugehörige Platine

Leistungselektronik

Der Leistungsteil des Antriebswechselrichters ist frühzeitig im Rahmen einer Diplomarbeit entwickelt worden und besteht aus sechs IGBT-Leistungsmodulen in Halbbrückentopologie zur Versorgung der sechs Motorphasen. Als Zwischenkreiskondensatoren kommen langlebige Folienkondensatoren zum Einsatz, die über eine besonders niederinduktive Zwischenkreisverschienung an die Module angebunden sind. Die Gatetreiber und die Steuerungselektronik



Wechselrichter des IMAB Racers

wurden nun (2017/18) komplett ausgetauscht und neu programmiert, um den Fahrbetrieb zu realisieren. Dabei wurden verschiedene in der Zwischenzeit entwickelte Technologien integriert. Dazu gehören eine besonders kompakte Strommessmethode auf Basis von Rogowskispulen sowie ein Steuerungskonzept mit auf den Gatetreiberplatinen verteilten Mikrocontrollern und robusten seriellen Kommunikationsschnittstellen.

Batterie

Das Batteriepaket des IMAB-Racers besteht aus 144 in Serie verschalteten (144S1P) LiFePO₄ Rundzellen. Jede Zelle hat eine Kapazität von 15 Ah. Somit ergibt sich rechnerisch ein Gesamtenergiegehalt des Batteriepakets von circa 7 kWh, welcher durch erste Messungen auch bestätigt werden konnte. Je nach Ladezustand liegt die Spannung der Batterie zwischen 360 V und 526 V. Aktuell ist die Dauerleistung des Batteriestacks thermisch begrenzt. Bei ungekühltem Betrieb des Batteriepakets ist eine Dauerwirkleistungsentnahme von 7 kW bei ca. 1 C Entladestrom möglich. Das Batteriestack ohne Gehäuse ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



links: Batteriestack ohne Gehäuse, rechts: Einbau in das Aluminiumgehäuse

Die Überwachung und Steuerung des Batteriestacks wird durch das am IMAB entwickelte modulare Batterie-Management-System (BMS) übernommen. Die Struktur des BMS besteht aus einem Mastersteuergerät, welche die Kommunikation mit dem Fahrzeug, die Auswertung aller Messwerte und die Entscheidung, welche Zellen gebalanced werden sollen, übernimmt. Die Slave-Platinen werden dafür genutzt jeweils ein Paket aus je 12 Zellen zusammenzufassen und zu verbinden. Der Laststrom wird hierfür über die Platine geführt. Jeder Slave übernimmt die Messwerterfassung und das Balancing der 12 Zellen. Die Messwerte werden über einen Batterieinternen Zweidrahtbus an den Master übertragen, welcher dann die Balancing-Befehle an die Slaves zurückgibt. Es gibt in der IMAB-Racer Batterie insgesamt 12 Slave Platinen. Zusätzlich überwacht das BMS mittels 24 Temperatursensoren die Zelltemperaturen und kann eine Übertemperaturabschaltung realisieren. Der BMS-Master steuert auch die Leistungsschütze des Batteriestacks an und kann so im Fehlerfall die Batterie vom Fahrzeug trennen. Der gesamte Batteriestack ist in einem stabilen Aluminiumgehäuse verbaut. Dieses befindet sich im Fahrzeug an zentraler Position im Vorderwagen.

Elektrische Maschine

Eine 6-Phasen-Elektromaschine wurde für das Fahrzeug entwickelt und am IMAB prototypisch realisiert. Dieses für Serienanwendungen noch ungewöhnliche Konzept führt zu einem leichten Drehmomentanstieg gegenüber Drehstromsystemen, erfordert aber auch eine Gesamtbetrachtung von Motor und Leistungselektronik, um insbesondere das Zusammenspiel der beiden Aggregate beurteilen zu können.



200 kW Antrieb des IMAB Racers

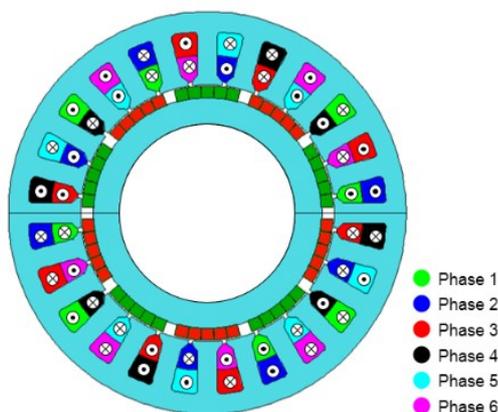


Fertigung der Ständerwicklung in der IMAB Werkstatt

Mehrphasenanordnungen profitieren elektromagnetisch von einem etwas höheren Windungsfaktor, was zu einer geringeren Stromaufnahme des Motors und einer Stromverteilung über mehrere Phasen führt.



Statorwicklung



Blechschnitt der 6~ Wicklung

Die „STORM“ getaufte 6-polige Drehstrom-Synchronmaschine unseres Racers leistet 200 kW (272 PS). Sie entwickelt dabei ein konstantes Drehmoment von 600 Nm bis zu einer Drehzahl von 3200 1/min. Die Maximaldrehzahl im Feldschwächbereich liegt bei 4800 1/min, während das Drehmoment entsprechend abnimmt. Der IMAB Racer ist auf 4,1 s ausgelegt. Bis 150 km/h vergehen lediglich 7,1 s.

Fahrzeugelektrik



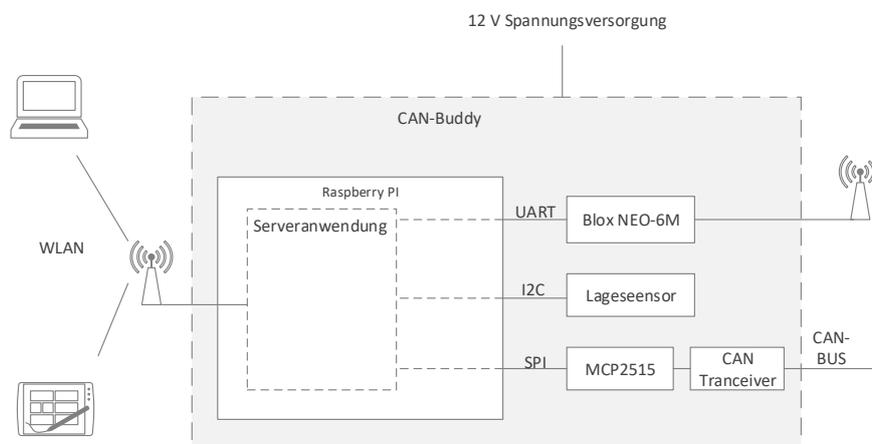
Steuergerät im IMAB Racer

Abseits der Antriebstechnik verfügt der IMAB Racer über ein Fahrzeugbordnetz in 12V-Technik, das vorrangig der Versorgung der einzelnen Steuergeräte und dem Betrieb von fahrzeugspezifischen Funktionen wie Beleuchtung, Bremskraftunterstützung und Anzeigeelementen dient. Als zentraler Punkt der Fahrzeugelektrik dient der im Vorderwagen untergebrachte Batteriekasten, in dem sich eine kompakte 12V-Stützbatterie sowie die notwendigen Sicherungen und Schalteinrichtungen für größere Verbraucher befinden. Abgehend von dieser zentralen Baugruppe verlaufen Kabelbäume durch das gesamte Fahrzeug um die einzelnen

Verbraucher zu versorgen. Auch dabei wurde das Konzept der abnehmbaren Karosserie berücksichtigt, indem alle Kabelbäume grundsätzlich am Rahmen geführt sind. Karosseriefeste Elektrik, wie beispielsweise Beleuchtung und Armaturenbrett sind per Steckverbinder abtrennbar. Die Energieversorgung des Bordnetzes erfolgt über einen galvanisch trennenden DC/DC-Wandler, der die hohe Spannung der HV-Batterie wandelt und als Laderegler für die Stützbatterie fungiert.

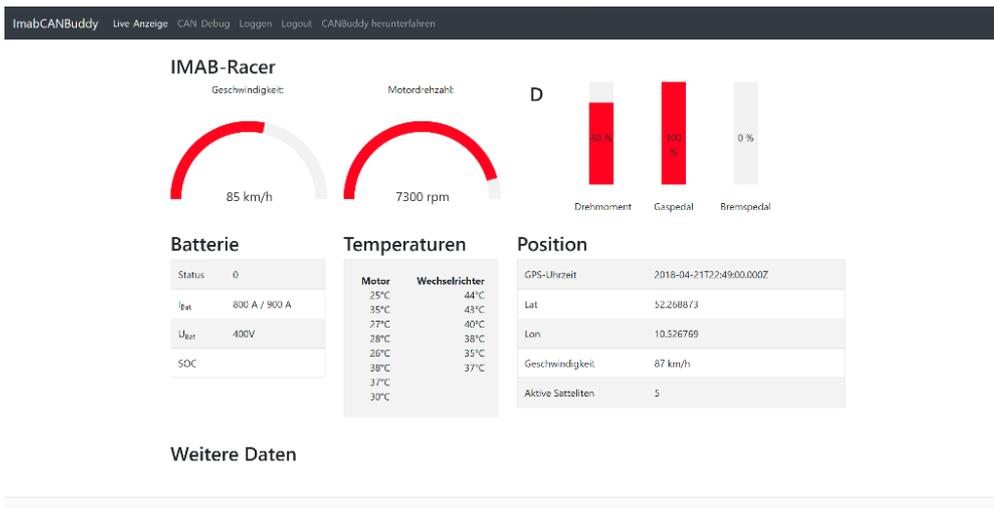
Telemetrieinheit

Die Telemetrieinheit des IMAB-Racers bietet die Möglichkeit den Zustand des Fahrzeugs über WLAN abzurufen. Dazu kann jedes beliebige Endgerät mit Web-Browser und WLAN-Fähigkeit, wie Laptops, Smartphones oder Tablets, verwendet werden. Realisiert ist die Telemetrieinheit auf Basis des Einplatinenrechners „Raspberry-Pi“. Es ist möglich über die Web-Schnittstelle live Fahrzeugdaten zu empfangen. Darüber hinaus können die Fahrzeugparameter auf dem „Raspberry-Pi“ geloggt werden und dann vom mobilen Endgerät als .csv-Datei heruntergeladen werden. Der grundsätzliche Aufbau der Telemetrieinheit ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Das Telemetriesteuergerät stellt eine CAN-Verbindung mit dem Fahrzeugnetzwerk her. Somit können alle Fahrzeugparameter, welche auf dem CAN-Bus gesendet werden, verarbeitet werden. Darüber hinaus hat das Gerät weitere Sensoren integriert. Dazu zählen ein 6-Achsiger Lage- und Beschleunigungssensor sowie ein GPS-Empfänger, mit dem die Position und die Zeit sehr genau bestimmt werden kann. Sowohl die GPS-Verbindung als auch die WLAN-Verbindung wird über eine Multibandantenne hergestellt.



Aufbau der Telemetrieinheit

Auf dem Endgerät kann der Benutzer in Echtzeit alle Daten auf dem CAN-Bus, sortiert nach Identifier, einsehen. Für Debug-Zwecke können in diesem Menü auch beliebige CAN-Nachrichten mit beliebigen Identifiern gesendet werden. Da diese Funktionalität sicherheitsrelevant ist, ist diese durch ein Kennwort geschützt. Eine Übersicht über die wichtigsten Parameter bekommt der Benutzer in der Live-View-Ansicht, welche in der folgenden Abbildung dargestellt ist. Dort werden die wichtigsten Fahrparameter wie Position, Geschwindigkeit und Batteriespannung abgebildet. Auf einer weiteren Seite können die Daten geloggt werden und nach Beendigung der Messung auf das Endgerät heruntergeladen werden.



Live-View der Daten im Web-Browser

Das Finale: Zusammenbau und erste Ausfahrt

Nach langer Vorbereitung erfolgte 2018 einer der bisher größten Schritte in der Geschichte



Erste erfolgreiche Ausfahrt...



...alle Teilnehmer sind sichtlich begeistert

des Fahrzeugs. Nachdem alle Antriebskomponenten soweit einsatzbereit gemacht wurden, konnte das Fahrzeug für seine erste Ausfahrt zusammengebaut werden. Die erste Fahrt erfolgte noch ohne aufgesetztes Chassis im Schrittempo in der institutseigenen Maschinenhalle. Mit der Erkenntnis, dass sich das Fahrzeug aus eigener Kraft bewegen kann, wurde dann der Aufbau der Karosserie vorbereitet. Um diese Schritte auch in Bild und Ton festzuhalten, konnten zwei Studierende gewonnen werden, die das Zusammenfügen des Fahrzeugs und seine erste Ausfahrt mit der Kamera begleitet haben. Aus diesen Aufnahmen entstand anschließend der offizielle Promotionsfilm für den RACER.

Herausforderungen bei der Elektrifizierung linearer Stellantriebe von Nutzfahrzeugen

Projektname: "Linearaktuatoren mit elektrischer Leistungsversorgung" - Phase 1 -, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Aktenzeichen: 31707

Dipl.-Ing. Quirin Maurus

Im Bereich der mobilen Maschinen ist ein zunehmender Trend zum Einsatz elektrischer Antriebe zu beobachten. Die elektrischen Antriebe werden dabei sowohl für rotatorische Fahr- wie auch Arbeitsfunktionen auf den Maschinen selbst oder auf angehängten bzw. angebauten Geräten eingesetzt. Lineare Bewegungen nennenswerter Kraftdichte und Leistung werden jedoch weiterhin mit Hydraulikzylindern realisiert. Die technologische Herausforderung einer vollständigen Elektrifizierung des Gesamtsystems besteht darin, die robusten und zudem mit hoher Kraftdichte gestaltbaren Hydraulikzylinder durch elektrische Linearaktuatoren zu ersetzen.

In diesem Beitrag ist auszugsweise die Vorgehensweise sowie Ergebnisse eines von der Deutschen Bundesstiftung für Umwelt geförderten Projektes dargestellt, das sich der Herausforderung der Elektrifizierung an dem Beispiel einer Kehrbesenarmverstellung für eine kommunale Arbeitsmaschine annimmt.

In der Anwendung reduziert sich durch Separation der Funktion Halten und Positionieren die geforderte Kraft für das Positionieren des Aktuators von 14,2 kN des hydraulischen Systems auf 5 kN. Die Haltefunktion ist in der ersten Projektphase zurückgestellt. Dennoch ist der bisherige Bauraum für eine elektrische Lösung ungenügend. Durch das Auswählen eines alternativen Bauraums, ist die Verwendung einer zusätzlichen Hebelübersetzung möglich, die die erforderliche Kraft auf die Hälfte reduziert.

Aus vorangegangenen FEM-Simulationen existieren Vergleiche bezüglich Schubkraft und Krafttrippl von tubularen PMSM in Außenläuferausführung mit unterschiedlichen Wicklungstopologien. Das größte Potenzial für diese Anwendung stellt die PMSM mit 6 Spulen und 10 Magneten dar, wobei die Wicklung 3 phasig und in Single-Layer ausgeführt ist. In der folgenden Tabelle sind Daten und Anforderungen der untersuchten tubularen PMSM zusammengefasst.

Maschinentyp	Tubulare PMSM
Wicklung	3 strängige Einzelzahnwicklung
Kennung der Wicklung	6-1-2-10
Ausführung	Außenläufer, Kurzstator
Materialien Elektrolech / Magnete	M800-50A / Terramag S40-180
Kühlung	Natürliche Konvektion
Aktive Länge	165 mm
Außendurchmesser	120 mm
Maximale Schubkraft	2500 N
Hub	120 mm
Maximale Geschwindigkeit	0,07 m/s

Tabelle 1: Daten und Anforderungen des Aktuators zur Besenarmverstellung

Die FEM-Simulation erreicht bei Fokussierung auf die erzielbare maximale Schubkraft eine über den Hub gemittelte Schubkraft von 3,05 kN und einen Kraftrippl von 22,5 %. Letzteres ist für die Realisierung der Positionierfunktion zu hoch. Die Optimierung der Endzahngeometrie kombiniert mit der Schrägung der Magnetrings reduziert den Kraftrippl auf 4 % bei gleichzeitiger Verringerung der gemittelten Schubkraft auf 2852 N.

Der für natürliche Konvektion geltende geringe Wärmeübergangskoeffizient erfordert die thermische Überprüfung mittels FEM-Simulation. Die Modellierung des Aktuators ist dabei komplett bis zu den mechanischen Anschlüssen aufgebaut und derart detailliert, dass jegliche Isolation und Einzelader der Wicklung dargestellt ist. Aus den, für den definierten thermisch relevanten Lastfall, ermittelten quadratischen Mittelwert der Schubkraft berechnet sich die Kupferverlustleistung. Aufgrund der geringen Stellgeschwindigkeit können die Eisenverluste vernachlässigt werden. Aus der Simulation resultiert, dass unter Einhaltung der Wärme-Klasse H die geforderte Dauerkraft von 695 N erreichbar ist.

Die Zielsetzung einen möglichst kompakten tubularen Aktuator zu entwickeln, erfordert zusätzlich zur herausfordernden elektromagnetischen Auslegung ein innovatives, hoch integratives Konzept der mechanischen Konstruktion. Das größte Potential zur Verringerung des benötigten Bauraums weist das Lagerkonzept in der Konstruktion auf. In der folgenden Abbildung ist die Integrationsmöglichkeit schematisch von der klassischen hin zur im Projekt bevorzugten Luftspaltanordnung dargestellt.

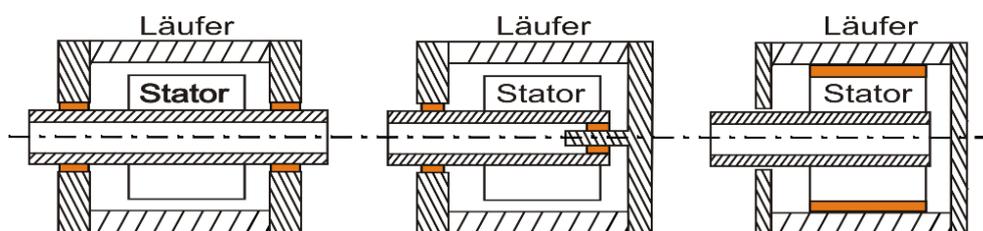


Abb. 1: Lageranordnung beidseitig (l.), einseitig integriert (m.) und komplett integriert (r.)

Die realisierte Luftspaltlagerung nutzt die Pollücke zwischen den geschrägten Magnetrings für Segmente aus tribologischem Material, die die Magnete in radialer Richtung leicht überragen. Der Reibpartner ist ein dünnes Edelstahlrohr, welches den Stator umhüllt. Die Realisierung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

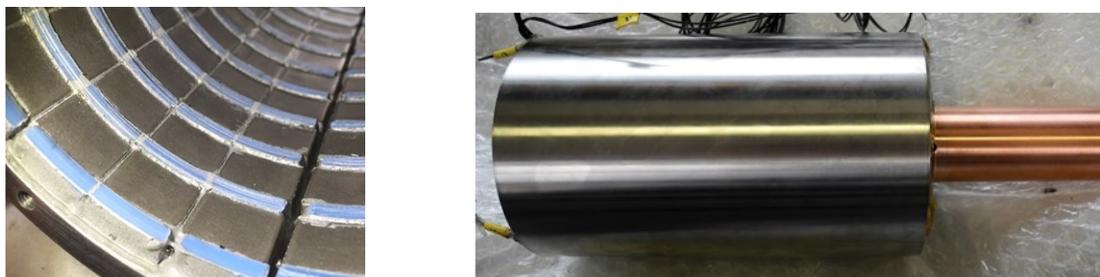


Abb. 2: Luftspaltlagerung Außenläufer mit Gleitlagersegmenten (l.) gekapselter Stator (r.)

Für einen Vergleich der Lagerkonzepte ist es sinnvoll die Schubkraft mit dem erforderlichen Bauraumvolumen ins Verhältnis zu setzen. Dabei geht der theoretisch erreichbare Maximalwert aus der Volumenbetrachtung für die Aktivteile hervor. Bei zusätzlicher Berücksichtigung

des Volumens für die mechanischen Bauteile sinkt dieser ab. Während für die klassische Anordnung die Reduktion noch 25 % beträgt sind es für die Integration des Lagers im Luftspalt 10 %.

In der am IMAB vorhandenen Prüfumgebung [1] erfolgt die Inbetriebnahme. Das Ergebnis der Messung zeigt eine gute Übereinstimmung der stromabhängigen Schubkraft zwischen den Werten der Auslegung und der Messung.

[1] Q. Maurus: "Entwurf, Aufbau und Prüfung von tubularen Linearmotoren", Jahresbericht IMAB TU Braunschweig, 2014

NetProsum2030 – Kompakte modulare Wandler und optimierte Systemlösungen zur Energieflusssteuerung für netzdienliche Prosumer 2030 mit HV-Fahrzeugg Batterien

Verbundprojekt gefördert durch das BMWi, FKZ: 0350021A

M.Sc. Florian Lippold, M.Sc. Tobias Fricke, M.Sc. Cengiz Uzlu

Seit dem 1.09.2017 wird im Forschungsprojekt „Kompakte modulare Wandler und optimierte Systemlösungen zur Energieflusssteuerung für NETZdienlichen PROSUMER 2030 mit HV-Fahrzeugg Batterien“ kurz „Netprosum2030“ untersucht, wie eine multifunktionale Leistungselektronikeinheit optimal dimensioniert, aufgebaut und betrieben werden kann.

Das übergeordnete Ziel besteht darin, durch Bereitstellung von netzdienlichen Funktionen, den Netzausbaubedarf der Energiewende zu senken und durch Inselnetzfähigkeit dem Prosumer weitere Vorteile zur Erreichung einer hohen Autarkiequote zu ermöglichen.

Ziel der Arbeiten am IMAB ist es, eine Vielzahl an Wandlern, welche für die Anbindung von Photovoltaik, Batteriespeicher, Elektroauto und dem Netz, nötig sind, in einem Wandler zu vereinen. Aus leistungselektronischer Sicht stehen hierbei die Modularität, die Kompaktheit und ein hoher Wirkungsgrad im Fokus. Dies kann durch den Einsatz von Wide-Bandgap-Halbleitern wie Siliziumkarbid und eine geeignete Kopplung der Wandler erfolgen.

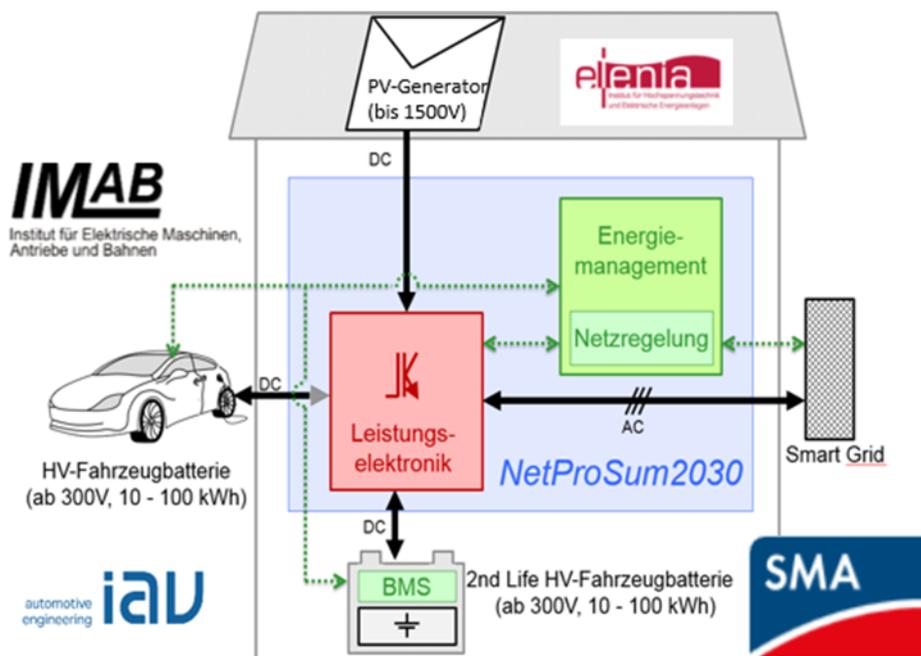


Abb. 1: Projektpartner Netprosum2030

Die Aufgabenteilung in dem Projekt sieht vor, dass das IMAB die multifunktionale Leistungselektronik nach den genannten Kriterien optimal konzeptioniert und aufbaut. Hierzu hat zunächst eine Konzeptauswahl stattgefunden. Darin eingeschlossen sind die Diskussion der Anforderungen sowie der möglichen Konzepte und der Umsetzung. Das gewählte Konzept sieht

vor, alle Wandler aus identischen Synchronwandlern ohne galvanische Trennung aufzubauen. Diese werden drei- oder sechsphasig interleaved betrieben. Auch der Wechselrichter wird aus mehreren dieser Module aufgebaut werden.

Anschließend wurde eine Dimensionierung der einzelnen Wandler durchgeführt. Dazu wurde zunächst die Funktionalität des Wandlers für verschiedene Arbeitspunkte simulativ getestet. Eine Verlustleistungsberechnung wurde für diverse diskrete SiC-Halbleiter und SiC-Halbleitermodule durchgeführt. Die neusten SiC-Halbleitermodule haben sich aufgrund der Verfügbarkeit und der besseren Kühlfähigkeit durchgesetzt. Somit sind hohe Schaltfrequenzen bis 200 kHz für den angestrebten Betriebspunkt theoretisch realisierbar. Zur Verifikation der theoretischen Betrachtungen wurden erste Voruntersuchungen der Leistungshalbleiter mittels Doppelpulsmessungen durchgeführt. Auch hat eine erste Auslegung von magnetischen Bauteilen stattgefunden. Es wurden Ferritmaterialien und Eisenpulverkerne in Betracht gezogen. Damit sind alle Voraussetzungen geschaffen für den Aufbau eines ersten Prototypen noch bis Ende 2018.

Um die Funktionalität des geplanten Gesamtsystems zu untersuchen wurden Simulationen durchgeführt. Dabei wurden Schaltverhalten, Laufzeiten durch Bussysteme und Berechnungen sowie unterschiedliche Modelle des Drehstromnetzes berücksichtigt.

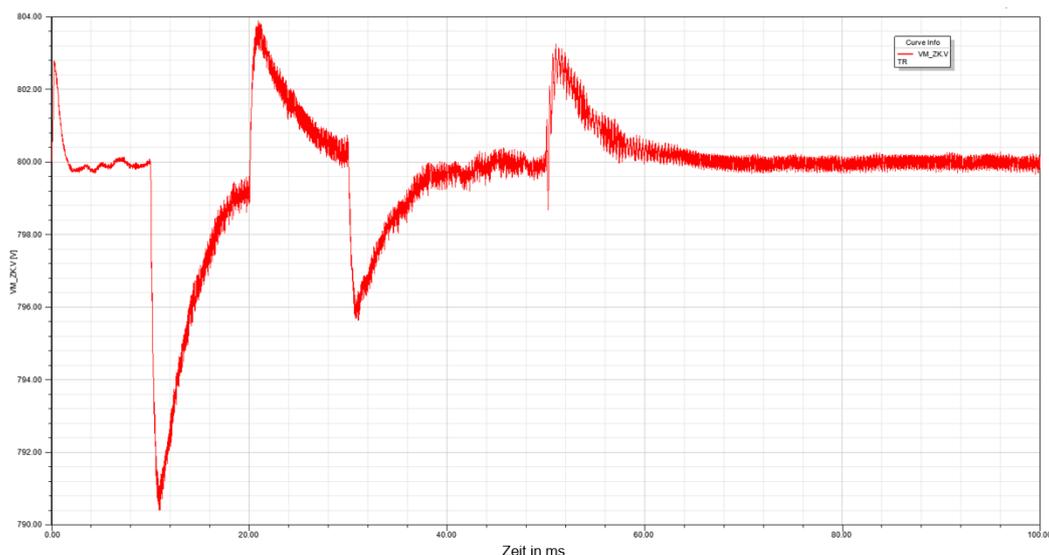


Abb. 2: Simulationsergebnis der Zwischenkreisspannung

Anhand des so entstandenen Simulationsmodells konnten auch Fehlerfälle wie beispielsweise Kurzschlüsse im Netz simuliert werden. Eine Auslegung und Anpassung der Regelung ist ebenfalls anhand dieser Simulation durchgeführt worden.

Weiterhin waren die Auswirkungen von Ableitströmen zu untersuchen, da das System ohne eine galvanische Trennung zum Netz hin aufgebaut werden soll. Das schon vorhandene Simulationsmodell wurde daraufhin erweitert, sodass es um parasitäre Erdkapazitäten ergänzt werden konnte. Die Größe dieser Kapazitäten wurde recherchiert. Mithilfe des erweiterten

Modells konnten nun verschiedene Möglichkeiten zur Reduzierung von Ableitströmen untersucht werden.

Nachdem die grundlegende Struktur des Systems auf leistungselektronischer Ebene festgelegt war, musste noch eine Regelungsstruktur für das System entworfen werden. Dabei kamen verschiedene Ansätze in Frage, welche sich durch eine unterschiedliche Vernetzung der einzelnen Leistungsgruppen PV-Steller, Batteriesteller, Fahrzeugsteller sowie Netzstromrichter auszeichnen. Nach der Konkretisierung der Anforderungen an die Regelung des Systems wurde die im Folgenden abgebildete Variante gewählt. Dabei übernimmt eine der Leistungsgruppen, im Regelfall der Netzstromrichter, die Regelung des Zwischenkreises. Der Netzstromrichter wird ebenfalls aus einzelnen Leistungsmodulen aufgebaut, diese werden untereinander mittels eines schnellen Regelbusses vernetzt. Eines von den zur Leistungsgruppe gehörenden Modulen muss dabei die Funktion des Gruppenmasters übernehmen.

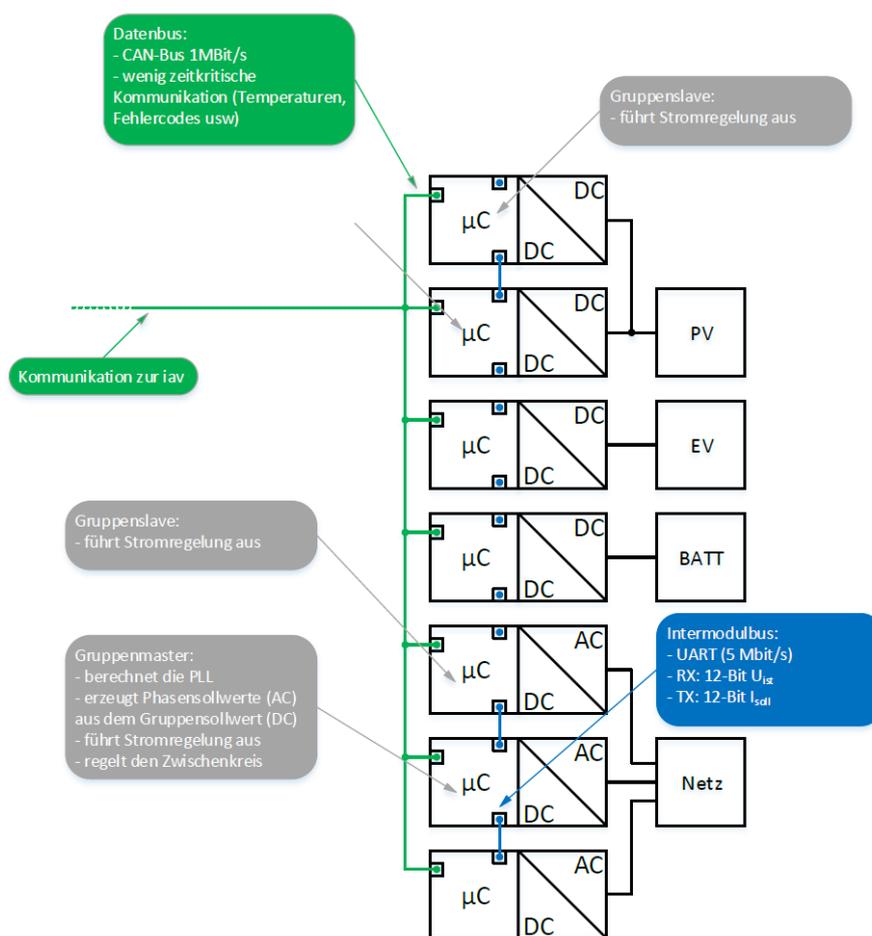


Abb. 3: Regelungskonzept

Um den Modularitätsgedanken des Projektes umzusetzen wurde ein universelles Controllermodul entwickelt, welches auf allen Leistungsmodulen eingesetzt werden kann. Damit ist es möglich, das zuvor beschriebene Regelungskonzept umzusetzen. Dabei wird dieses Modul sowohl für die Ansteuerung der Halbleiter, die Auswertung der Messstellen, die Regelung sowie auch die Kommunikation zuständig sein. Da die benötigte Rechenleistung je nach Einsatzort stark variieren wird sollte es möglich sein, auf dem Controllermodul zwei sich in diesem Punkt

unterscheidende Controller zu verbauen. Als Sockel wurde ein DDR4-SO-DIMM ausgewählt. Diese Bauform bietet sehr viele Pins (260) auf einem vergleichsweise kleinen Bauraum (30mm x 69,6mm). Um später das Programmieren und Debuggen zu vereinfachen wurde eine entsprechende Schaltung die diese Aufgaben übernimmt mit integriert. So ist es möglich, das Modul per Micro-USB direkt zu programmieren und zu debuggen.

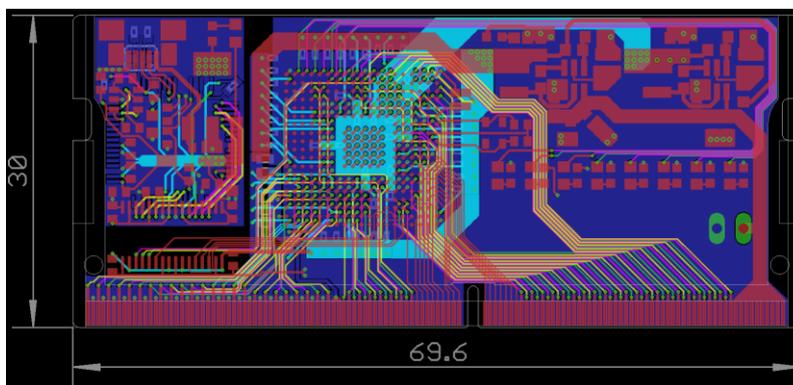
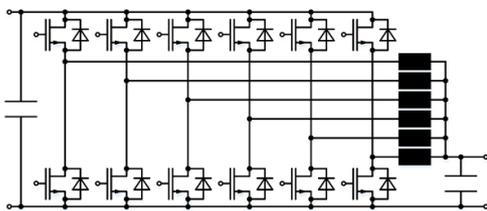
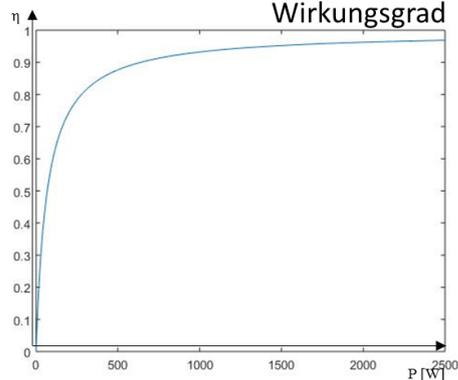


Abb. 4: Controller-Modul im DDR4-SO-DIMM-Format

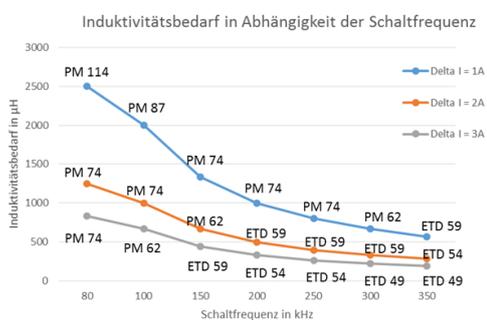
Schaltungstopologie



Wirkungsgrad



Auslegung



Messung



Abb. 5: Teilaspekte Netprosum2030

Siliziumkarbid-Leistungselektronik in automobilen Anwendungen

Zusammenfassung der Beiträge zur APE 2017, Paris, 26./27.04.2017 und EEHE 2018, Würzburg, 12./13.06.2018

von B.Sc. Michael Ochs und Dipl.-Ing. Niklas Langmaack

Die Steigerung von Leistung, Leistungsdichte und Wirkungsgrad bei gleichzeitiger Reduktion von Bauraum, Gewicht und Kosten gehört nach wie vor zu den größten Herausforderungen bei der Entwicklung und dem Entwurf von leistungselektronischen Komponenten für zukünftige elektrische Fahrzeuge. Siliziumkarbid-Leistungselektronik ist eine sich schnell weiterentwickelnde Technologie, die beim Erreichen dieser Ziele helfen kann. Dieser Beitrag versucht die Vorteile von Siliziumkarbid-Leistungshalbleitern zusammenzufassen und legt ein besonderes Augenmerk auf automobiler Systeme.

Leistungshalbleiter auf der Basis von Siliziumkarbid (SiC) weisen eine Reihe von Eigenschaften auf, die ihren etablierten Pendanten auf Siliziumbasis überlegen sind. Dies ermöglicht die Konstruktion von Stromrichtern mit höherer Leistungsdichte, höherer Effizienz oder sogar höherer zulässiger Betriebstemperatur. Es ermöglicht Ingenieuren auf Systemebene neue Konzepte und Topologien zu entwickeln.

Vorteile von Siliziumkarbid-Leistungshalbleitern

Siliziumkarbid ist ein Halbleitermaterial mit sehr großer Bandlücke, welches vielversprechende Eigenschaften für den Einsatz in leistungselektronischen Schaltungen hat. Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich elektrischer und thermischer Eigenschaften von Siliziumkarbid, Silizium und Galliumnitrid.

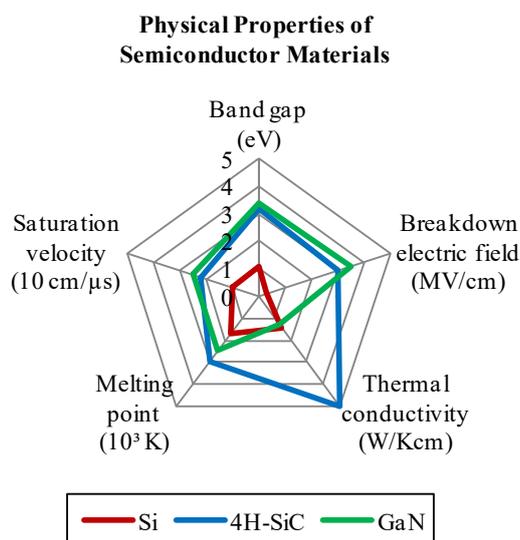


Abb. 1: Vergleich der physikalischen Eigenschaften von Halbleitermaterialien

Sowohl Siliziumkarbid als auch Galliumnitrid haben bessere elektrische Eigenschaften als Silizium und ermöglichen dadurch höhere Schaltgeschwindigkeiten und einen niedrigeren Einschaltwiderstand. Ferner hat SiC hervorragende thermische Eigenschaften, wodurch sehr hohe Betriebstemperaturen möglich sind und der Kühlaufwand reduziert werden kann.

Beim direkten Vergleich zweier Leistungsmodule (1200 V / 300 A) aus Silizium bzw. Siliziumkarbid zeigt sich, dass die Schaltverluste des SiC-Moduls sehr viel geringer sind.

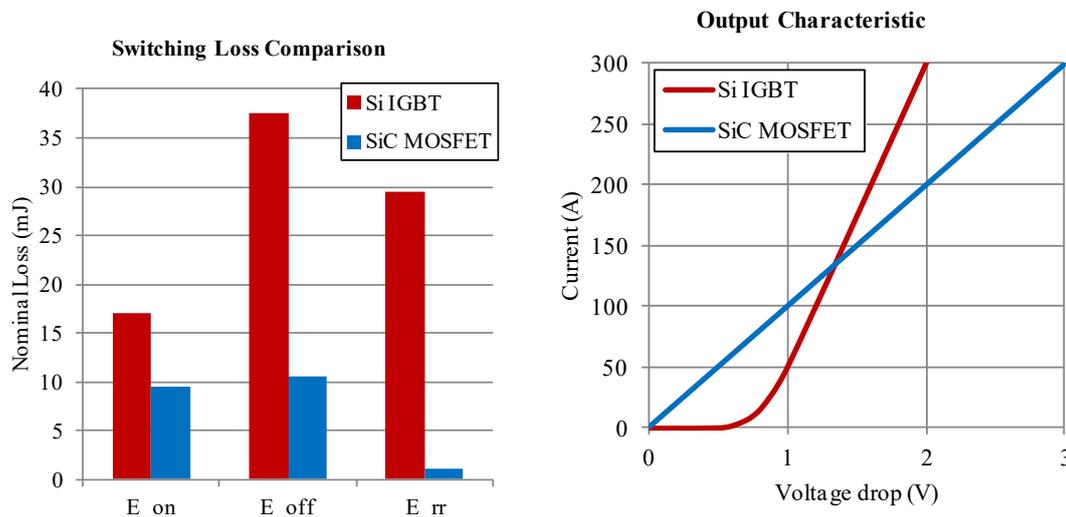


Abb. 2: Vergleich der Schaltverluste sowie des Spannungsabfalls für Si-IGBT und SiC-MOSFET

Der Spannungsabfall beim Nennstrom ist hingegen höher. Neben den geringen Schaltverlusten ist die hohe Temperaturbelastbarkeit von SiC-Bauelemente ein weiterer enormer Vorteil. Dadurch können leistungselektronische Wandler oder Antriebsumrichter mit optimierten Eigenschaften wie sehr hohem Wirkungsgrad oder sehr hoher Schaltfrequenz entworfen werden. Bei Wechselrichtern mit hohem Wirkungsgrad können der Kühlaufwand und damit Größe, Gewicht und Kosten reduziert werden. Eine hohe Schaltfrequenz hat oft einen großen Einfluss auf die Größe von passiven Bauelementen wie Filtern, Drosseln, Transformatoren und Kondensatoren, die direkten Einfluss auf die Größe und das Gewicht des Gesamtsystems haben. Um die Vorteile der verfügbaren und zukünftigen Siliziumkarbid-Bauteile in Kraftfahrzeugsystemen vollständig zu nutzen, sind Veränderungen im Systemdesign von zukünftigen Elektrofahrzeugen notwendig.

Einfluss von Siliziumkarbid-Leistungselektronik auf Automobilsysteme

Unter Verwendung von Siliziumkarbid-Leistungshalbleitern können HV-Aufwärtswandler mit sehr hoher Leistungsdichte entworfen werden. Dadurch kann die Systemspannung des Antriebsstrangs von der schwankenden Batteriespannung entkoppelt werden. In den meisten aktuellen Elektrofahrzeugen besteht diese Kopplung noch. Mit einem Aufwärtswandler kann die Spannung des HV-Busses unabhängig gesteuert werden und im optimalen Betriebspunkt eingesetzt werden.

Die Entkopplung von Batteriespannung und Zwischenkreisspannung eröffnet neue Freiheitsgrade für das Systemdesign. Die gleiche Spannungsebene kann in einer Vielzahl von Fahrzeugklassen und für unterschiedliche Leistungsstufen verwendet werden. Alle Zusatzgeräte können in allen Fahrzeugen verwendet werden. Dies reduziert die Komponentenvielfalt und erhöht das Produktionsvolumen jeder Komponente.

Die Größe der Batterie kann ohne großen Einfluss auf den elektrischen Antrieb angepasst werden, sodass das gleiche Fahrzeug mit den gleichen Komponenten in verschiedenen Batteriekonfigurationen angeboten werden kann.

Durch den Einsatz von Siliziumkarbid-Halbleitern und entsprechenden Wandlern können Veränderungen an den folgenden Systembestandteilen vorgenommen werden:

1. Höhere Systemspannung

Die Anforderungen an Berührungsschutz, Potenzialausgleich, Isolationsüberwachung, aktive oder passive Entladung, HV-Interlock, Crashverhalten und sogar die meisten Prüfspannungen für die Isolationstests sind unabhängig von der Spannungsklasse. Bei höheren Spannungen steigen nur die erforderlichen Werte für Isolationswiderstand, Luft- und Kriechstrecken.

Aus technischer Sicht hat eine höhere Systemspannung mehrere Vorteile. Da viele Komponenten in ihrer Größe und ihrem Gewicht hauptsächlich durch ihre Stromstärke definiert sind, ist es besser, eine notwendige Nennleistung zu erreichen, indem eine höhere Betriebsspannung als ein höherer Strom verwendet wird.

Um eine möglichst hohe Leistungsdichte von Umrichtern zu erreichen, ist es wichtig, den vollen Spannungsbereich der verwendeten Leistungshalbleiter zu nutzen. Da die 1200 V-Leistungshalbleiterklasse sehr beliebt ist, sind hochentwickelte SiC-Bauelemente für 1200 V bereits sehr gut verfügbar. Ein Nennspannungsbereich von 650 V bis 800 V mit einer maximalen Spitzenspannung von 900 V sind dabei sinnvoll.

2. Leitungen und Stecker

Bei der Wahl einer hohen Systemspannung reduzieren sich die fließenden Ströme. Die Folge ist die Möglichkeit zur Reduzierung der Kabelquerschnitte und damit des Gewichts und der Kosten. Bei Verdopplung der Nennspannung kann bis zu 70% Kupfer eingespart werden. Die meisten der heute verwendeten HV-Stecker sind bereits für eine Betriebsspannung von 1000 V spezifiziert, d.h. ihre Größe und ihr Gewicht sind wiederum nur von der erforderlichen Stromstärke abhängig.

3. Antriebsumrichter

Einfache Untersuchungen zeigen, dass die Leistungsdichte von Antriebsumrichtern durch höhere Zwischenkreisspannungen gesteigert werden kann. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Sperrspannungsfähigkeit der jeweiligen Leistungshalbleiter optimal ausgenutzt wird. Neben den Leistungshalbleitern gibt es noch viele andere Teile eines Antriebsumrichtersystems, die hauptsächlich von der Stromstärke abhängig sind und daher durch die Verwendung einer höheren Systemspannung verkleinert werden können. Dies sind z.B. Stromsenso-

ren, Stromschienen, Klemmen, Steckverbinder oder Kabelverschraubungen. Auch der oft voluminöse Zwischenkreiskondensator ist vom Effektivwert des Stroms abhängig und kann entsprechend verkleinert werden.

Bei Siliziumkarbid-Leistungshalbleiterbauelementen besteht eine weitere Möglichkeit darin, die Schaltfrequenz zu erhöhen. Die Phasenströme der elektrischen Maschine haben dadurch weniger Verzerrungen, was sich positiv auf die Effizienz auswirken kann. Auch das akustische Verhalten kann verbessert werden, da Schaltfrequenzen von 20 kHz und höher verwendet werden können, die außerhalb des hörbaren Bereichs liegen. Die höhere Schaltfrequenz wird sich auch positiv auf die Auslegung des Zwischenkreiskondensators des Wechselrichters auswirken, da weniger Kapazität benötigt wird, um eine gewünschte Spannungswelligkeit zu erreichen.

Basierend auf diesen Überlegungen wird derzeit ein Antriebsumrichter mit hoher Leistungsdichte am IMAB entwickelt. Es werden Siliziumkarbid-MOSFET-Leistungsmodule im EconoDual 3-Gehäuse mit 1200 V und 300 A verwendet. Bei einer Schaltfrequenz von 20 kHz kann der Zwischenkreiskondensator vergleichsweise klein sein. Der Umrichter soll eine Nennleistung von 250 kVA bei einem zu erwartenden Gesamtvolumen von 5,5 l einschließlich des gesamten Aluminiumgehäuses erreichen. Dies führt zu einer Leistungsdichte von 45 kVA/l. Das entspricht mehr als der doppelten Leistungsdichte eines Hochleistungs-Kfz-Antriebsumrichters wie des Semikron SKAI2HV (20 kVA/l mit 1200-V-IGBTs).

4. Aufwärtswandler

Eine Schlüsselkomponente der vorgeschlagenen Systemtopologie ist der Aufwärtswandler, der die Batterie mit dem HV-Bus verbindet. Dieser Wandler ist typischerweise ein nicht isolierter synchroner Aufwärtswandler, der in die Gegenrichtung als Abwärtswandler arbeitet. Für die gewünschte Nennleistung ist es von Vorteil, einen Mehrphasenwandler mit mehreren identischen „interleaved“ Schaltstufen aufzubauen. Dadurch reduzieren sich die gesamte Eingangs- und Ausgangswelligkeit (Strom und Spannung) und ermöglicht die Verwendung kleinerer Kondensatoren. Das gesamte Induktivitätsvolumen steht in direktem Zusammenhang mit der Schaltfrequenz der Halbbrücken, sodass aufgrund der Fähigkeit für hohe Schaltfrequenzen der Siliziumkarbid-MOSFETs die Größe und das Gewicht der Komponenten verkleinert werden kann.

Ein Demonstrator wurde 2013 am IMAB aufgebaut. Er zeigt eindrucksvoll den Einfluss der Schaltfrequenz auf die Wandlergröße. Der Wandler nutzt eine Schaltfrequenz von 100 kHz und hat einen Leistungsdurchsatz von bis zu 100 kW (34 kW pro Phase). Das Gewicht der aktiven Komponenten beträgt etwa 4 kg, was weniger als 15% eines früheren Designs unter Verwendung von Silizium-IGBTs bei 20 kHz ist. Die gemessene Effizienz des Wandlers ist für einen breiten Bereich von Betriebspunkten höher als 98%.

5. Batterie

Aufgrund des verwendeten Aufwärtswandlers kann die HV-Batterie freier ausgelegt werden. Die Spannung ist nicht mehr direkt an den Antriebsstrang gekoppelt. Mit dem zuvor vorgeschlagenen Systemspannungsbereich wäre ein Batteriespannungsbereich von z.B. 250 V bis 800 V möglich.

6. Elektrische Maschinen

Der Entwurf von elektrischen Maschinen ist abhängig von der Spannungsebene im Hinblick auf die Wicklungsausführung, nicht aber hinsichtlich des Drehmomentaufbaus. Bei Wahl einer höheren Spannung bestehen die Wicklungen aus mehr Windungen, wobei ein kleinerer Draht verwendet wird, welcher üblicherweise einfacher zu wickeln ist. Eine höhere Schaltfrequenz kann die Effizienz von Permanentmagnet-Synchronmaschinen mit hoher Leistungsdichte verbessern, da sich die Verluste in Magneten, Eisen und Kupfer verringern. Ferner ist das maximale Drehmoment der Maschine im Feldschwächbereich abhängig von der tatsächlichen Spannung. Ein vom SOC abhängiges Antriebsverhalten ist unerwünscht. Mittels eines geregelten DC-Busses kann dieses Problem behoben werden.

7. Integration eines transformatorlosen AC-Ladegerätes

In der Regel kann das Onboard-Ladegerät entweder direkt an die Batterie oder an den HV-Bus angeschlossen werden. Für eine Plattform, die die Verwendung verschiedener Batteriespannungen ermöglicht, ist ein Standardladegerät mit hoher Ausgangsspannung von Vorteil. Über einen Aufwärtswandler kann die Spannung entsprechend angepasst werden. Die meisten gängigen 3-kW-Einphasen-AC-Bordladegeräte könnten leicht auf 800 V Ausgangsspannung umgestellt werden, indem ein leicht angepasstes Transformatorwindungsverhältnis und passende Gleichrichterioden verwendet werden, vorzugsweise Siliziumkarbid-Schottky-Dioden mit extrem niedrigen Verlusten.

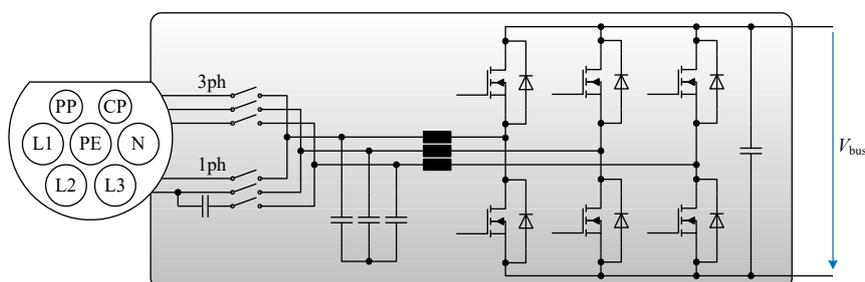


Abb. 3: Aufbau eines transformatorlosen AC-Ladegerätes

Bei einer Systemspannung von über 650 V besteht die Möglichkeit, ein sehr einfaches und hochkompaktes transformatorloses Drehstrom-Bordladegerät zu integrieren, welches bidirektionalen Leistungsfluss unterstützt. In industriellen Anwendungen wird die Schaltung auch als "Active Front End" (AFE) bezeichnet. Das Ladegerät besteht aus einem üblichen Antriebsumrichter mit einem Filter, der mit dem Netz verbunden ist, um bidirektionalen Leistungsfluss zu ermöglichen. Ferner bietet das Ladegerät einen hohen Leistungsfaktor bei guter EMV-Performance, eine stabile, geregelte Zwischenkreisspannung und einen sehr hohen Wirkungsgrad. Dieser Wechselrichter ermöglicht eine Dreiphasen-AC-Schnellladung, die heute typischerweise mit 22 kW (400 V / 32 A) oder 43 kW (400 V / 63 A) über den sogenannten "Typ 2" (IEC 62196 Typ 2)-Anschluss verfügbar ist. Der einphasige Betrieb (230 V / 16 A) kann einfach mit einem kleinen zusätzlichen Kondensator integriert werden.

8. DC/DC-Wandler für 12 V

Zur Versorgung bestimmter Komponenten wird eine Versorgungsspannung von 12 V benötigt, die mit einem DC/DC-Wandler bereitgestellt wird. Dieser Wandler muss galvanisch getrennt sein und ein großes Übersetzungsverhältnis besitzen. Ein Transformator muss daher zwingend eingesetzt werden. Mögliche Topologien sind der Gegentaktwandler oder der LLC-Resonanzwandler. Bei der HV-Seite, die mit 800 V betrieben wird, sollten Siliziumcarbid-MOSFETs gewählt werden, da die Ströme klein sind und die Schaltfrequenz für die Größe des Transformators und damit der gesamten Komponente entscheidend ist. Auf der Niederspannungsseite sind Silizium-MOSFETs für die Synchrongleichrichtung sinnvoll, künftig könnten sie durch Galliumnitrid-Bauelemente ersetzt werden.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die wichtigsten Vorteile der Siliziumcarbid-Leistungselektronik für Automobilsysteme zusammengefasst. Die verschiedenen Komponenten profitieren auf unterschiedliche Weise von den hervorragenden Eigenschaften von Siliziumcarbid-Halbleiterbauelementen wie geringen Verlusten und hoher Schaltfrequenz.

Eine neuartige Antriebsstrangstruktur wurde vorgestellt, bei der mit einem Aufwärtswandler die Zwischenkreisspannung von der Batteriespannung entkoppelt wird. Dies könnte eine Möglichkeit sein, die Kosten von leistungselektronischen Systemen für Automobilanwendungen zu senken, indem die Komponentenvielfalt verringert wird und eine kleine Anzahl gemeinsamer Bausteine für eine große Vielfalt von Fahrzeugklassen geschaffen wird.

Intelligente Treiberschaltung mit robuster serieller Schnittstelle

Zusammenfassung eines Beitrages zur IEEE PEDS 2017, Honolulu, USA, 12.-14.12.2017 von B.Sc. Michael Ochs und Dipl.-Ing. Niklas Langmaack

Leistungselektronische Systeme werden immer komplexer, die Schaltfrequenzen steigen und die Notwendigkeit einer hohen Steuerbandbreite sowie die Integration verschiedener Techniken zur Überwachung der Gate-Treiber und des gesamten Systems nehmen zu. In diesem Beitrag werden die allgemeine Struktur, die Vorteile, Herausforderungen, Möglichkeiten und eine beispielhafte Implementierung eines leistungselektronischen Systems vorgestellt unter Verwendung von intelligenten Gate-Treibern mit verteilter Steuerelektronik, die über eine robuste serielle Schnittstelle mit einem gemeinsamen Host-Controller verbunden sind.

In typischen leistungselektronischen Systemen wie Antriebsumrichtern basiert die Schnittstelle zwischen dem Steuersystem und den Gate-Treibern auf dem Schaltsignal, z.B. dem PWM-Signal und einigen diskreten Statussignalen wie "fault" und "reset". Resultierende Zustandsgrößen wie Temperaturen, Phasenströme oder die Zwischenkreisspannung werden mit

Sensoren gemessen und über analoge Eingänge an die Steuerungseinheit übermittelt. Nachfolgend eine Abbildung eines typischen Systems:

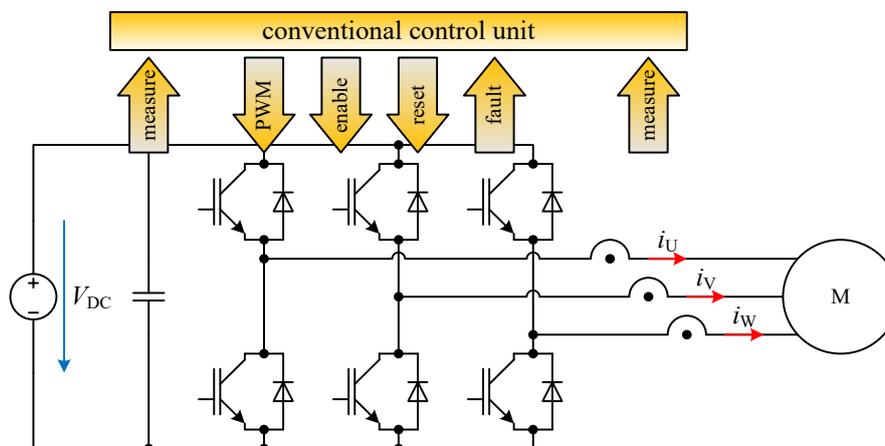


Abb. 1: Typischer Aufbau eines Antriebsumrichters

Die nun vorgestellte Topologie erhöht die Funktionsmöglichkeiten der Gate-Treiber-Schaltung und konzipiert die Schnittstelle zwischen Gate-Treibern und der zentralen Steuereinheit neu. Das System besteht aus Halbrücken-Gate-Treiberplatinen mit einem kleinen Mikrocontroller, der die Schaltsignale erzeugt und die nahegelegenen Sensoren für Temperatur, Phasenstrom und Zwischenkreisspannung auswertet. Die Schnittstelle zur Hauptcontrollerplatine ist als eine sehr robuste asynchrone serielle Vollduplexschnittstelle realisiert, die differentielle Signalleitungen verwendet. Nachfolgend eine Abbildung des neuen Systems:

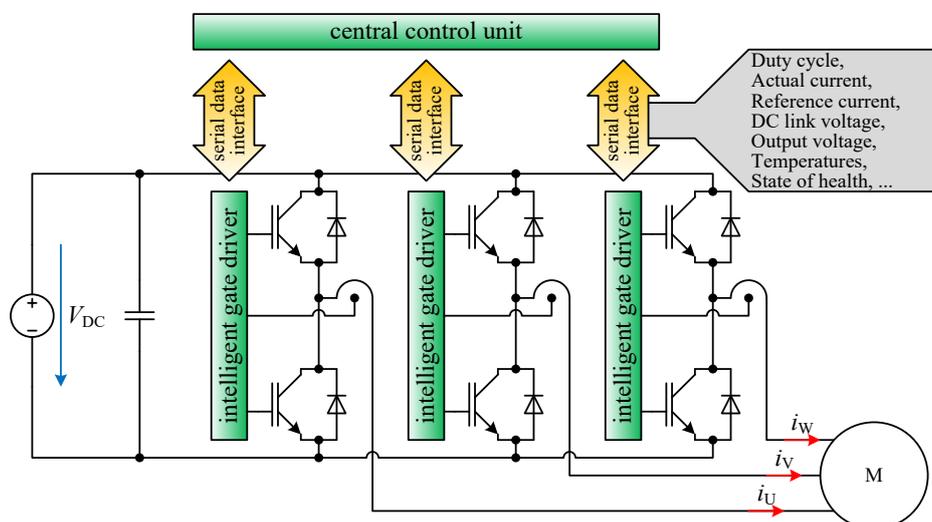


Abb. 2: Neue Topologie mit intelligenten Gate-Treibern und zentraler Steuereinheit

Die serielle Datenschnittstelle kann verschiedene Werte übertragen, entsprechend dem gewählten Controller-Layout und den Funktionen, die in der Gate-Treiber-Steuerung implementiert sind.

Systemeigenschaften und Vorteile

Sehr schnell schaltende WBG-Leistungshalbleiter können in Kombination mit vielen diskreten logischen und analogen Signalen zu EMV-Problemen führen. Bei solchen Topologien ist es von Vorteil, wenn räumlicher Abstand zwischen der Leistungs- und Steuerelektronik gehalten wird. Die Folge sind jedoch längere analoge Signalleitungen der Sensoren. Ferner nimmt in komplexen leistungselektronischen Systemen mit mehreren Leistungsschnittstellen wie in Elektrofahrzeugen oder regenerativen Energiesystemen die Gesamtzahl der einzeln geschalteten Leistungsbaulemente oder Halbbrückenschaltungen sowie die Anzahl der auszuwertenden Sensoren zu. Dies erhöht auch die Komplexität der Steuerelektronik, was eine höhere Anzahl analoger und digitaler Schnittstellen erfordert.

Mit der vorgeschlagenen Topologie wird eine kleine und robuste Mikrocontroller-Elektronik auf jeder Halbbrücken-Gate-Treiberschaltung angeordnet. Diese generieren die Schaltsignale, werten die analogen Sensoren aus und implementieren einige Sicherheitsfunktionen. Die Schaltung kann sogar für eine dezentrale Stromregelung verwendet werden, sodass der Sollwert der Halbbrückensteuerung nicht länger ein Tastverhältniswert ist, sondern ein gewünschter Phasenstromwert.

Die Schnittstelle zur zentralen Steuerelektronik kann eine standardisierte digitale Schnittstelle wie jeder bidirektionale serielle Bus sein, der hinsichtlich der EMV sehr robust und hinsichtlich der Implementierung auf der Seite des Host-Controllers sehr einfach ist. Es ergeben sich die folgenden möglichen vorteilhaften Eigenschaften:

- **Robustheit:** Nutzung von Gegentakt-Signalleitungen zur Besserung der EMV-Performance und Fehlererkennung sowie Fehlerkorrektur mittels Parität-Bits oder Zeichencodierung wie 8b/10b.
- **Flexibilität und Skalierbarkeit:** Einfache Implementierung vieler gleicher Schnittstellen auf der Hauptsteuerplatine und einfache Anpassbarkeit auf geforderte Anwendungen.
- **Sicherheit:** Erhöhung dieser durch einfachen und klaren Aufbau des Systems sowie durch Integration von Überwachung, Fehlererkennung, Alterungsüberwachung und Messungen sowie Verringerung der Verbindungen zwischen Steuer- und Leistungsteil.
- **Galvanische Trennung:** Einfache Umsetzung und Senkung des Aufwands für die galvanische Trennung in der Gate-Treiberschaltung, wodurch Gewicht- und Platzeinsparungen entstehen.
- **Dezentrale Steuerung:** Aufteilung der Regelkreise auf Gate-Treiber-Einheit (innere Regelkreise wie Stromregelung) und zentrale Steuereinheit (äußere Regelkreise wie feldorientierte Motorsteuerung oder Drehzahlregelung).

Aufbau eines Demonstrators

Zur Demonstration der vorgeschlagenen Topologie wird ein 250 kW-Antriebsumrichter für eine sechsphasige Permanentmagnet-Elektromaschine aufgebaut. Die Maschine ist für einen rein elektrischen Sportwagen vorgesehen. Der Umrichter basiert auf sechs Halbbrücken-IGBT-Leistungsmodulen mit 1200 V / 450 A. Die sechs Treiberschaltungen werden direkt auf den

Modulen befestigt und bestehen aus den isolierten Gate-Treibern, dem eingebetteten Mikrocontroller, einer integrierten Strommessung mit Rogowski-Spule, einer Schnittstelle für einen externen Phasenstromsensor, der Spannungs- und Temperaturmessung sowie der bidirektionalen Host-Schnittstelle.

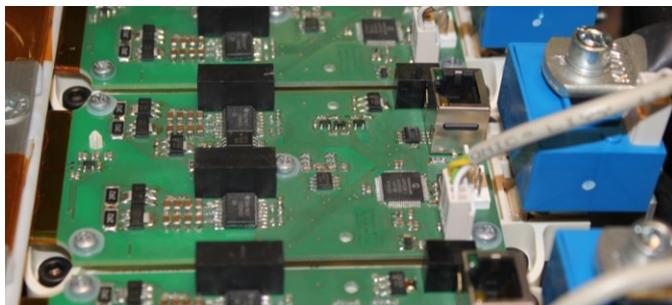


Abb. 3: Gate-Treiber-Platinen auf den IGBT-Modulen



Abb. 4: Zentrale Steuereinheit

Die Hauptsteuerschaltung ist auf einer kleinen separaten Platine angeordnet. Sie enthält den zentralen Mikrocontroller, einige Schnittstellen für zusätzliche Temperatursensoren, verschiedene Drehgeberschnittstellen, USB- und CAN-Schnittstelle, weitere Analogeingänge und die sechs Schnittstellen zu den Treiberschaltungen.

Auslegung von Axialflussmaschinen

M.Sc. Lucas Vincent Hanisch

In vielen Anwendungen wächst der Bedarf an kompakten, leistungsstarken Maschinen stetig. Das Konzept der Axialflussmaschine ist aufgrund der großen Drehmomentdichte bei gleichzeitig großem Verhältnis von Durchmesser D zu Länge L für axial beschränkte Bauräume besonders interessant. Im Vergleich zur konventionellen Radialflussmaschine, bei der die Wirkfläche und folglich auch das Drehmoment M mit der Maschinenlänge L variiert werden können, ist dies bei Axialflussmaschinen nur über den Durchmesser D der Maschine möglich. Die Axialflussmaschine verliert gegenüber der Radialflussmaschine einen Dimensionierungsfreiheitsgrad, ihr Drehmoment M wächst jedoch mit der dritten Potenz des Durchmessers D .

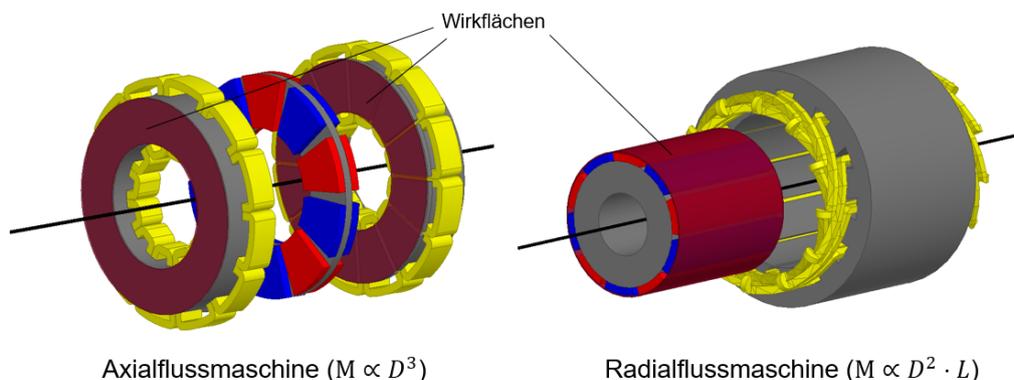


Abb. 1: Vergleich zwischen Axial- und Radialflussmaschinen

Da die Wickelköpfe bei vorgegebenem Bauraum den Durchmesser D der Maschine reduzieren, sind bei Axialflussmaschinen Einzelzahnwicklungen sinnvoll, denn diese besitzen im Allgemeinen geringere Wickelkopfausladungen als verteilte Wicklungen. Die Annahme, den Durchmesser D der Axialflussmaschine beliebig groß zu wählen und so die Drehmomentdichte zu steigern, ist fehlerbehaftet, da mit steigendem Durchmesser D die Umfangsgeschwindigkeiten am Rotor zunehmen und die mechanische Festigkeit beachtet werden muss. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Axialflussmaschinen mit großem Durchmesser D in hohen Drehzahlbereichen beschränkt.

Die häufigsten Ausführungsformen von Axialflussmaschinen sind jene mit zwei Statorn und einem Rotor, oder mit einem Stator und zwei Rotoren. Bei beiden Topologien erweist sich eine Magnetanordnung als zweckmäßig, bei der die Magnetisierungsrichtung gegenüberliegender Magnete identisch ist. Auf diese Weise wird der Fluss axial durch das mittlere Maschinenelement geführt, sodass aus elektromagnetischer Sicht kein Rückschluss notwendig ist. Durch die überwiegend lineare Ummagnetisierung und den schmalen Rückschluss werden der Materialaufwand und die Eisenverluste reduziert. In axialer Länge L lässt sich die Leistung von Axialflussmaschinen beliebig skalieren, indem der Maschine mehrere Rotoren und Statorn hinzugefügt werden. Da sich die Wirkflächen jedoch ebenfalls multiplizieren, bleibt die Drehmomentdichte der Axialflussmaschine konstant.

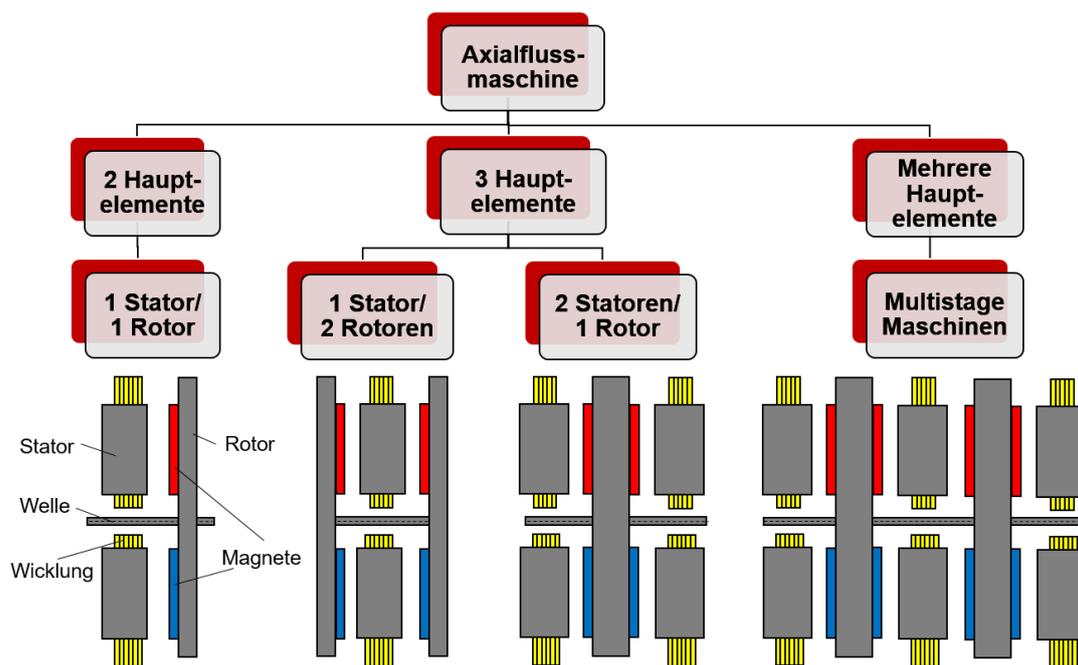


Abb. 2: Übersicht zu möglichen Topologien

Bei der Topologie mit einem Stator und zwei Rotoren zeigt sich ein segmentierter Stator aus SMC vorteilhaft. Durch das Wickeln der einzelnen Segmente können hohe Kupferfüllfaktoren und geringe Wickelkopfausladungen realisiert werden. Der Statorrückschluss entfällt sogar ganz. Der Nachteil dieser Topologie besteht im aufwendigen Kühlkonzept, da ein Großteil der Verluste im Stator anfällt, welcher schwer zugänglich ist.

Die Kühlung erleichtert sich signifikant bei der Topologie mit einem Rotor und zwei Statoren, da die Wärme über die Stirnflächen der Statoren abgeführt werden kann. Jedoch entfällt die Segmentierung der Statoren und der Aufwand der Wicklung steigt. Höhere Eisenverluste sowie ein schlechterer Kupferfüllfaktor sind das Resultat.

Ide3AL - Innovationen für dynamische, energie-effiziente elektrische Antriebe mit neuartiger Leistungselektronik in der Industrie & Fertigung

Verbundprojekt gefördert durch das DMWi, FKZ: 03ET1532 A-E

M.Sc. Thorben Schobre

Im BMWi geförderten Projekt IDE3AL wird untersucht wie sich durch den Einsatz von SiC-Mosfets und eines Sinusfilters der Gesamtsystemwirkungsgrad bei Verwendung langer Motorleitungen erhöhen lässt. Das Projekt läuft seit 01.01.2018 für eine Förderdauer von 3 Jahren. Die Konzeptphase ist nahezu abgeschlossen und erste Prototypen werden aufgebaut. Das Konsortium des Projektes setzt sich zusammen aus dem IMAB und dem IEMV der TU Braunschweig, dem Institut für Energieforschung der Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lenze, Infineon, Block Transformatoren und Fricke Abfülltechnik.

Im ersten Teil des Projekts wurde ein umfassender Anforderungskatalog in Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern erstellt. Konventionelle Si-IGBT Umrichter ohne Sinusfilter kommen hier an die Grenzen bezüglich kapazitiver Ableitströme und Wellenreflexionen und daraus folgenden Überspannungen auf den Leitungen. Desweiteren können die Zusatzverluste in der Maschine und im Kabel, welche durch den Betrieb mit getakteten Spannungen und den daraus folgenden Strömen entstehen, reduziert werden. Ein Kostenvorteil ergibt sich bei der Verwendung von Sinusfiltern, da ungeschirmte Motorleitungen verwendet werden können. Die Anforderungen an einen SiC-Wechselrichters mit integrierten Motorfiltern basieren auf den besonderen Herausforderungen der Abfüllanlagen der Firma Fricke. Diese schließen die Verwendung von Motorleitungen von bis zu 100 m ein.

Die Verwendung von SiC-Mosfets ermöglicht, auf Grund der schnellen Schaltvorgänge, eine Verwendung von signifikant höheren Schaltfrequenzen im Vergleich zu konventionellen Si-IGBT Umrichtern. Somit kann das Sinusfilter in der geometrischen Ausdehnung deutlich reduziert werden. Eine Herausforderung in diesem Projekt ist die optimale Auslegung dieser Filter um einen effizienten Umrichter zu entwickeln, welcher inklusive Sinusfilter nicht größer als ein vergleichbarer konventioneller Si-IGBT Umrichter ist.

Das IMAB hat sich zum Ziel gesetzt, das Design des SiC-Umrichters auf minimale Verluste hin zu optimieren. Dazu ist die Kenntnis der Zusammenhänge der Verluste in den Halbleitern und den Filterkomponenten erforderlich. Es erfolgt eine Modellbildung und der modulare Aufbau des Umrichters.

Im ersten Abschnitt dieses Projektes hat sich das IMAB mit der Konzeptionierung des Umrichters beschäftigt. Dabei wurde eine Schaltungssimulation des Gesamtsystems erstellt. Anhand dieser können verschiedene Filterkonzepte untersucht werden und besonders Wirkung der parasitären Eigenschaften der Halbleiter sowie der Filterbauelemente analysiert werden. Weiterhin wurde die Verlustleistung der Halbleiterbauelemente analytisch modelliert und ein Modell für die Kühlung des SiC-Moduls entwickelt. Anhand dieser Modelle kann der Wirkungsgrad der Anwendung abgeschätzt werden und ein geeignetes Kühlkonzept entwickelt werden. Darüber hinaus kann die maximal mögliche Schaltfrequenz des Wechselrichter ermittelt werden, welche die thermischen Grenzen einhält. Abb. 1 zeigt die Verluste des SiC-Modulas für verschiedene Schaltfrequenzen.

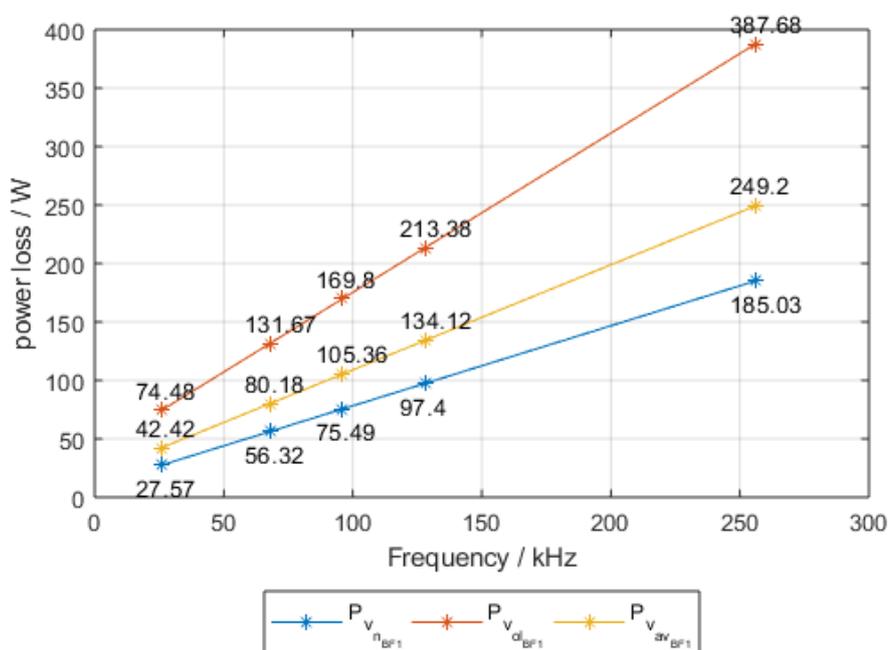


Abb. 1: Verlustleistung des SiC-Moduls

Darüber hinaus wurden in der Konzeptphase verschiedene Filtertopologien zur Anwendung als Sinusfilter untersucht. Dabei wurden verschiedene LC-Filter 2. und 4. Ordnung, sowohl mit integrierter Gleichtaktdämpfungswirkung als auch ohne. Für die verschiedenen Topologien werden Modelle in Form ihrer Übertragungsfunktionen gebildet um die Wirksamkeit der Filter zu untersuchen. Mit einem modularen Ansatz kann in den zu Grunde liegenden einsträngige Ersatzschaltbildern (ESB) sowohl Synchronmaschinen als auch Asynchronmaschinen mit verschiedenen Parametern und Lastpunkten und verschiedene Leitungslängen variiert werden. Ein einsträngiges Ersatzschaltbild ist in Abb. 2 dargestellt. Es werden Ersatzschaltbilder für sowohl den Gegentakt- als auch den Gleichtaktpfad des Antriebssystems erstellt.

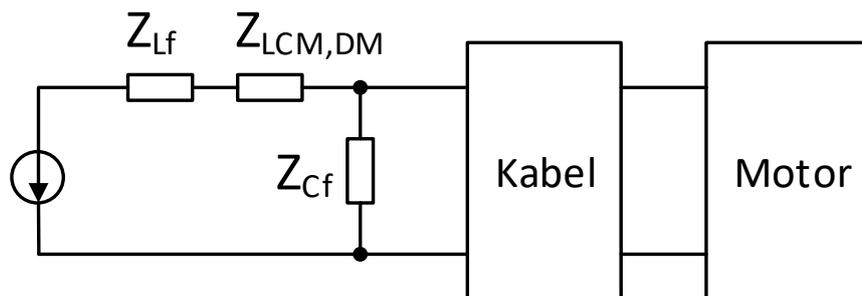


Abb. 2: Einsträngige Ersatzschaltbild Sinusfilter mit Leistung und Motor

Für das dargestellte einsträngige Ersatzschaltbild wird das Übertragungsverhalten für den Gegentaktpfad im Frequenzbereich in Abb. 3 dargestellt. Die Dämpfungswirkung wird oberhalb der Resonanzstelle erreicht. Die Passbandbreite des Filters sollte mindestens etwas größer als die Regelbandbreite des Antriebssystems sein, um eine maximale Dynamik zu ermöglichen. Weiterhin muss unbedingt verhindert werden, dass die Resonanzstelle angeregt wird. Dies kann zum Beispiel durch eine Regelinterruptfrequenz passieren. Somit kann das Filterübertragungsverhalten verschiedenen Randbedingungen unterliegen.

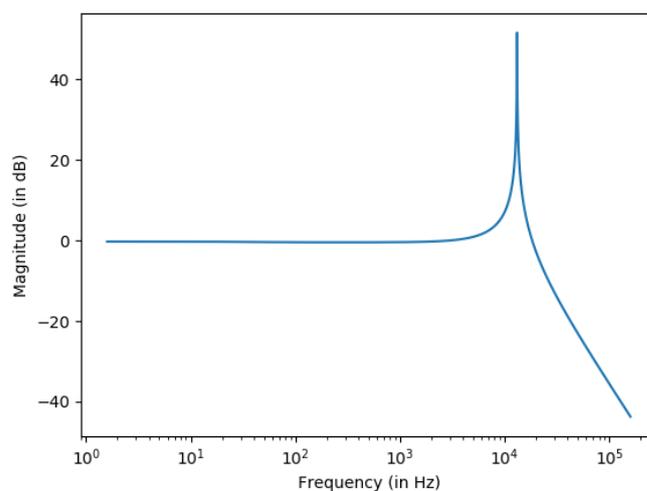


Abb. 3: Gegentakt Spannungsübertragungsverhalten des Filters im Frequenzbereich

Auf Basis der des gewünschten Übertragungsverhalten im Frequenzbereich wird das Sinusfilter verlustoptimal dimensioniert. Dabei werden Randbedingungen, wie der maximale kapazitive Blindstrom bei maximaler Grundfrequenz oder die Lage der Filterresonanzfrequenz, berücksichtigt. Bei dieser Methode wird dann ein analytisches Verlustmodell verwendet um die Dimensionierung auf Verluste sowohl in den Halbleitern als auch den Filterbauelementen zu bewerten.

Im weiteren Verlauf des Projekt wird ein modularer Umrichter am IMAB aufgebaut. In diesem Modularen Umrichter lässt sich der Sinusfilter austauschen um die verschiedenen Ergebnisse der Filterauslegung in Hardware zu testen und das Systemverhalten zu untersuchen.

Entwicklung von netzgekoppelten On-Board-Ladegeräten für Elektrofahrzeuge

M.Sc. Konstantin Siebke

Die netzgekoppelten On-Board-Ladegeräte ermöglichen das Laden am öffentlichen Energienetz ohne weitere stationäre Ladetechnik, wodurch eine hohe Verfügbarkeit des Fahrzeugs gewährleistet werden kann. Aus leistungselektronischer Sicht sind On-Board-Ladegeräte von besonderem Interesse. Bauraum, Gewicht, Kosten und Wirkungsgrad müssen optimiert werden. Zu diesem Zweck lassen sich in On-Board-Ladegeräten Wide-Bandgap-Leistungshalbleiter besonders gut ausnutzen. Am IMAB werden On-Board-Ladegeräte mit Wide-Bandgap-Leistungshalbleitern für die unterschiedlichsten Leistungsklassen entworfen und aufgebaut.

Leistungsklassen der On-Board-Ladegeräte

Für On-Board-Ladegeräte kommen unterschiedliche Leistungsklassen zum Einsatz. Üblich sind maximale Leistungen von 3,6 kW (einphasig), 7,2 kW (zwei- und dreiphasig), 11 kW (dreiphasig) und 22 kW (dreiphasig). Da die Ladeinfrastruktur sehr unterschiedlich ausgeführt sein kann und das zwei- und dreiphasige Laden nicht überall möglich ist, wird in der Regel auch der einphasige Betrieb der mehrphasigen Ladegeräte gefordert. Dieses wird durch eine 4. Phase für den Neutralleiter oder über Umschaltrelais umgesetzt.

Entwurfsprozess der Ladegeräte

Üblicherweise werden On-Board-Ladegeräte mit zwei Stufen, einer Leistungsfaktorkorrektur (PFC) und einem DC/DC-Wandler aufgebaut. Der DC/DC-Wandler hat in der Regel eine galvanische Trennung. Abbildung 1 zeigt ein zweistufiges On-Board-Ladegerät. Optional wird der DC/DC-Wandler zwischen HV und 12 V Bordnetz in den DC/DC-Wandler des Ladegerätes integriert. Zukünftige Ladegeräte sollen auch für den bidirektionalen Energiefluss entworfen werden. Zum einen soll die HV-Batterie als Speicher im Netz dienen und dem Netz Energie zur Verfügung stellen (V2G), zum anderen sollen Elektrische Geräte an einer Fahrzeugsteckdose betrieben werden können (V2D). Zum Vorladen des HV-Zwischenkreises ist der HV/12 V-DC/DC-Wandler ebenfalls bidirektional auszuführen.

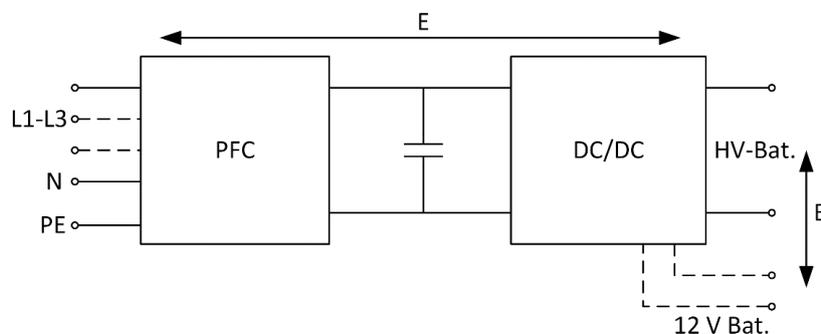


Abb. 1: Zweistufiges On-Board-Ladegerät

Die Wahl der Topologie beider Stufen richtet sich nach der gewünschten Energieflussrichtung und der geforderten Leistung oder Anzahl der Netzphasen. In Tabelle 1 sind einige Beispiele

für Topologien aufgelistet. Diese Topologien können untereinander beliebig kombiniert werden, wodurch sehr viele Realisierungsmöglichkeiten für das On-Board-Ladegerät entstehen.

Leistungsfaktorkorrektur (PFC)	DC/DC-Wandler
1 phasig bidirektional:	bidirektional
Vollbrücke	CLLC Vollbrücke
Totem Pole PFC	CLLC Halbbrücke
Multilevel NPC	Dual Active Bridge (DAB) Vollbrücke
1 phasig unidirektional	Dual Active Bridge (DAB) Halbbrücke
Hochsetzsteller PFC	Vollbrückengegentschaltwandler mit 4 aktiven Schaltern auf der Sekundärseite
Bridgeless PFC	
Mehrere Phasen bidirektional:	unidirektional
B6 (+zusätzliche Phase für N)	Vollbrückengegentschaltwandler
B6 mit geteiltem Zwischenkreis	LLC Vollbrücke
Multilevel NPC	LLC Halbbrücke

Tabelle 1: Beispiele für Topologien

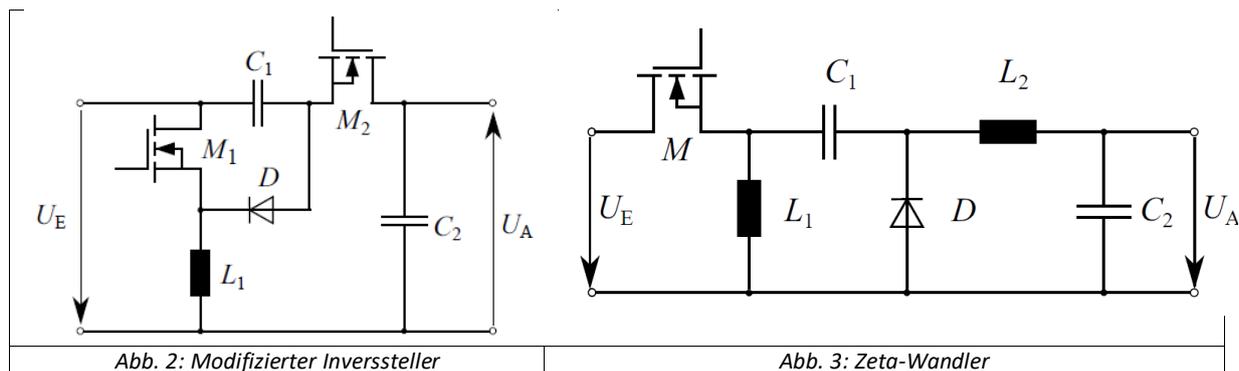
Für eine vergleichbare Gegenüberstellung und Bewertung der Topologien sind die Topologien so auszugestalten, dass die verwendeten Bauteile gleichermaßen ausgenutzt werden. Eine diskrete Auswahl aus verfügbaren Halbleitern führt oft zu einer ungleichmäßigen Ausnutzung der Halbleiter. Ein direkter Vergleich ist somit nicht möglich. Daher wird die Chipfläche und der thermische Widerstand der Halbleiter so skaliert, dass sich für alle Halbleiter die gleiche Chiptemperatur ergibt. Passive Bauelemente wie Kondensatoren oder Kerne sind ebenfalls nur in diskreten Abständen erhältlich, was die Vergleichbarkeit erschwert. Für die passiven Bauelemente (C, L) werden daher zur Abschätzung des Bauraums und des Materialeinsatzes Wachstumsgesetze verwendet.

Zweistufige On-Board-Ladegeräte

Am IMAB sind unterschiedliche zweistufige Ladegeräte mit einer Leistung von 3,6 kW bis 7,2 kW entworfen und aufgebaut worden. Dabei kommen GaN und SiC Leistungshalbleiter und Wasser- und Luftkühlungen zum Einsatz. Je nach Konzept wird auf eine galvanische Trennung verzichtet.

Einstufige On-Board-Ladegeräte

Einstufige Ladegeräte vereinen die beiden Stufen Leistungsfaktorkorrektur und DC/DC-Wandler in einer einzigen Stufe. Ziel ist es Halbleiter und damit Kosten einzusparen. Als Topologie eignen sich u. a. ein modifizierter Invertierer und Zeta-Wandler. Die Herausforderung besteht darin, den Leistungsrippel durch das Netz mit einer akzeptablen Größe des Kondensators zu puffern.



On-Board-Ladegeräte mit integriertem DC/DC-Wandler für das 12 V Bordnetz

Die Integration des HV/12 V-DC/DC-Wandlers in das Ladegerät kann durch Nutzung von Synergien Bauraum und Kosten einsparen. Der HV/12 V-DC/DC-Wandler kann im einfachsten Fall in das Gehäuse des Ladegerätes integriert werden, wodurch die HV-Stecker, die HV-Filter, das Gehäuse und die Anschlüsse zur Wasserkühlung gemeinsam genutzt werden können. Aufwändiger ist eine Gestaltung der DC/DC-Wandler Topologie des Ladegerätes mit einem HV- und einem 12 V-Ausgang. Beide Varianten wurden am IMAB untersucht. Als Topologie für einen DC/DC-Wandler mit zwei Ausgängen eignet sich besonders eine Triple Active Bridge (TAB). Die Kopplung erfolgt über einen gemeinsamen Transformator.

GEKO - Intelligenter Gegenkolbenmotor zur Verbrennung von inhomogenen Mischgasen bei landwirtschaftlichen Kleinanwendern und Privathaushalten

Verbundprojekt, im Rahmen des Förderprogramms "Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)" durch das BMWi gefördert, Förderkennzeichen: 16KN051930

M.Sc. Henning Schillingmann

Freikolben-Antriebe (Abb. 1) bestehen im Wesentlichen aus drei Komponenten, der Verbrennungskammer (1), einem Energiespeicher (2) und einer Last (3). Diese Komponenten werden durch einen Kolben verknüpft. Der Kolben wird Freikolben genannt, da dessen Bewegung keiner kinematischen Einschränkung in translatorischer Richtung unterliegt. Der Energiespeicher wird als pneumatische Feder ausgeführt, die im äußeren Totpunkt maximal komprimiert wird und den Kolben zurück zum Ausgangspunkt beschleunigt. Als Last wird ein Lineargenerator eingesetzt. Dieser wandelt die kinetische Energie der Kolben in elektrische Energie um.

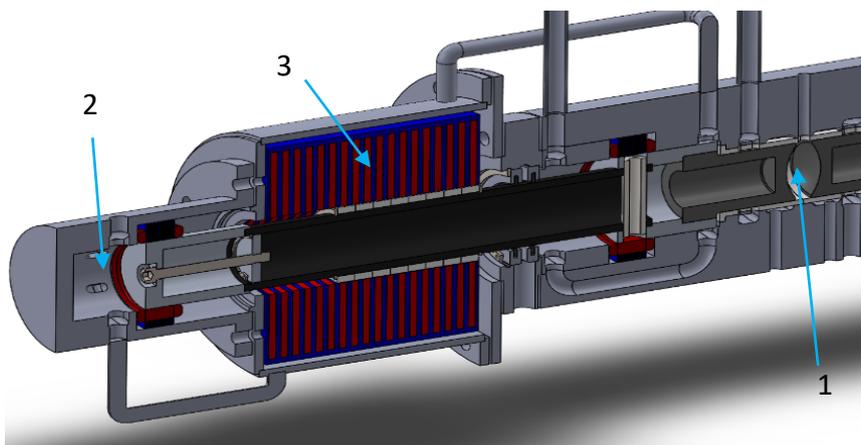


Abb. 4: Gesamtsystem Freikolben-Lineargenerator

Wird der Freikolben-Antrieb mit zwei entgegengesetzt betriebenen Kolben ausgeführt, kann aufgrund des Massenausgleichs eine hohe Taktfrequenz bei stabilem Lauf erreicht werden.

Simulation der Kolbendynamik

Für die Auslegung der oben genannten Komponenten ist zunächst eine detaillierte Simulation der Kolbendynamik erforderlich. Diese wird durch die auf den Kolben wirkenden Kräfte bestimmt und lässt sich aus dem 2. Newtonschen Axiom ableiten. Die Bewegung des Kolbens ist zu jedem Zeitpunkt definiert durch die Summe der Kräfte die auf ihn wirken. Die Zündkraft in der Brennkammer \vec{F}_{BK} , sowie die Gegenkräfte der Gasfeder \vec{F}_{GF} , der Dämpfung \vec{F}_D und der elektrischen Linearmaschine \vec{F}_{EM} :

$$\sum \vec{F} = m_k \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = \vec{F}_{BK} - \vec{F}_{GF} - \vec{F}_D - \vec{F}_{EM} \quad (1)$$

Mithilfe dieses Modellentwurfs werden Informationen zum Systemverhalten und den mechanischen Randbedingungen für die Lineargeneratorauslegung ermittelt. Unterschiedliche Be-

triebsstrategien ergeben sich aus dem Zeitpunkt der Energieauskopplung. Bei der hier gewählten Strategie wird auf dem Hin- und Rückweg elektrische Energie ausgekoppelt und die elektrische Maschine ausschließlich als Generator betrieben. Es ergeben sich die in Abbildung 2 gezeigten Verläufe der Kolbenposition und –geschwindigkeit für einen Takt. Die dabei auftretenden Kräfte können Abbildung 3 entnommen werden.

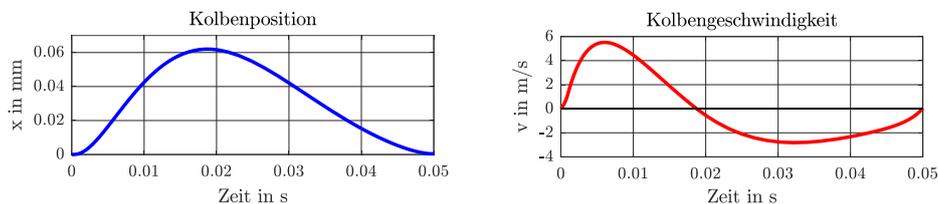


Abb. 5: Positions- und Geschwindigkeitsverlauf der Kolben

Die Verbrennung des Gasgemisches (rote Linie) führt kurzfristig zu einer Kraft von 11,2 kN. Der Lineargenerator (grün) bremst den Kolben mit einer Kraft von 1,7 kN im Maximum. Gleichzeitig wird die pneumatische Feder komprimiert und führt so zu einer entgegengesetzten Kraft von 2,3 kN im äußeren Totpunkt.

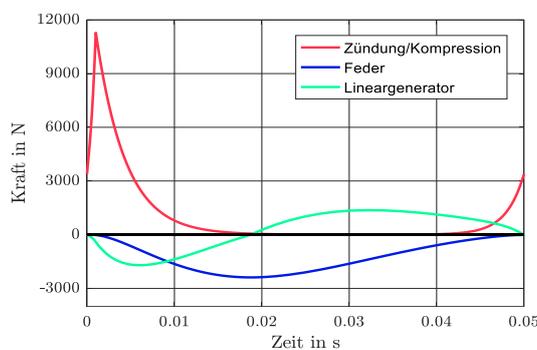


Abb. 6: Übersicht der Kräfte

Auslegung des Lineargenerators

Für den Lineargenerator kommen prinzipiell verschiedene Maschinentopologien in Betracht. Die Herausforderung der Auslegung besteht darin, für eine geringe Geschwindigkeit und einem kleinen Verfahrweg eine möglichst hohe Kraftdichte, bezogen auf die Läufermasse, zu realisieren. Für die Abmessungen senkrecht zur Bewegungsrichtung sind hingegen keine Einschränkungen bezüglich des Bauraums gegeben. Die für die Maschinenauslegung geltenden Randbedingungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Verfahrweg (Hub)	$s = 62 \text{ mm}$
erforderliche Kraft	$F = 1700 \text{ N}$
Läufergeschwindigkeit	$v_{\text{max}} = 5,2 \text{ m/s}$
Umgebungstemperatur	$\vartheta = 150 \text{ °C}$

Tabelle 1 Randbedingungen Lineargenerator

Dafür werden zwei verschiedene permanentmagneterregte Linearmaschinen als Langstator analysiert: Zum Einen die Doppelkamm Bauweise mit einem flachen (planaren) Läufer (Abb. 7a), zum Anderen eine tubulare Geometrie, bei der Stator und Läufer zylinderförmig ausgeführt werden (Abb 7b).

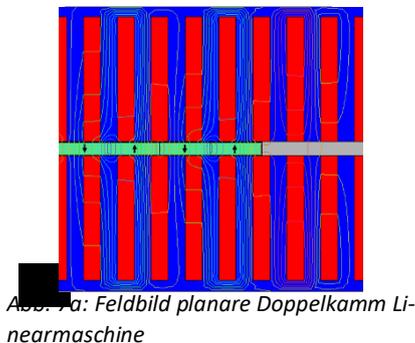


Abb. 7a: Feldbild planare Doppelkamm Linearmaschine

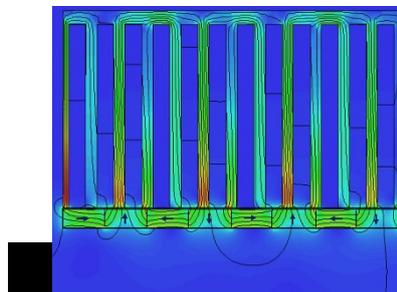


Abb. 7b: Feld- und Flussdichte-Verlauf tubulare Linearmaschine (quasi-Halbach)

Der Stator der planaren Bauweise wird aus Standard-Elektroblech (M250-35A) gefertigt, bei der tubularen Maschine wird aufgrund der dreidimensionalen Flussführung SMC-Material verwendet. Als Permanentmagnetmaterial wird Samarium-Kobalt ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) eingesetzt, das eine hohe Temperaturstabilität aufweist.

Bei der Doppelkamm-Variante übernimmt der gegenüberliegende Stator die Funktion des Läuferückschlusses. Damit existieren zwei kraftbildende Luftspalte und der Läufer braucht lediglich aus den radial magnetisierten Permanentmagneten bestehen. Der Stator wird mit einer Zweischicht-Einzelzahnwicklung versehen.

Die tubulare Bauweise besitzt eine verteilte Einschicht-Wicklung. Der Läufer wird mit einer quasi-Halbach Magnetisierung ausgeführt. Die damit erreichbare Flusskonzentration führt dazu dass ein Läuferückschluss nicht erforderlich ist.

Ergebnisse der Maschinenauslegung

Ein wichtiges Kriterium für den Lineargenerator ist, wie oben beschrieben, mit möglichst geringer Läufermasse eine hohe Kraft bereitstellen zu können. Die Schubkraft lässt sich ausgehend vom Maxwell'schen Spannungstensor durch Integration des Statorstrombelags $A(x, t)$ und der magnetischen Flussdichte $B_y(x, t)$ über eine Kreiszyylinderfläche $d\vec{A}$ ermitteln:

$$F_x = \oint A(x, t) \cdot B_y(x, t) dA \quad (2)$$

Da die Außenabmessungen des Lineargenerators keinen Einschränkungen unterliegen, können die Nuten relativ hoch – unter Berücksichtigung des Streuflusses - ausgeführt werden. Abbildung 5a und 5b zeigen die Ergebnisse der Kraftdichte als Funktion der Magnet- und Nuthöhe, normiert auf das Maximum, das mit planarer Geometrie erreicht wird.

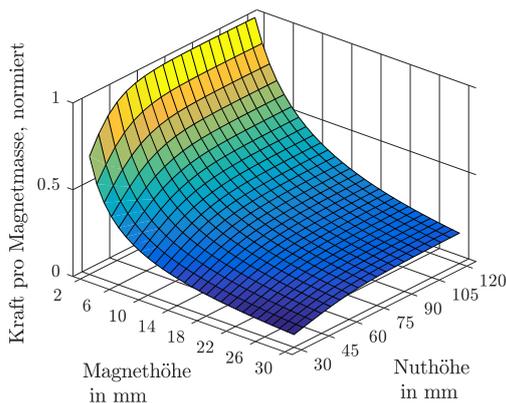


Abb 8a: Kraftdichte Planar

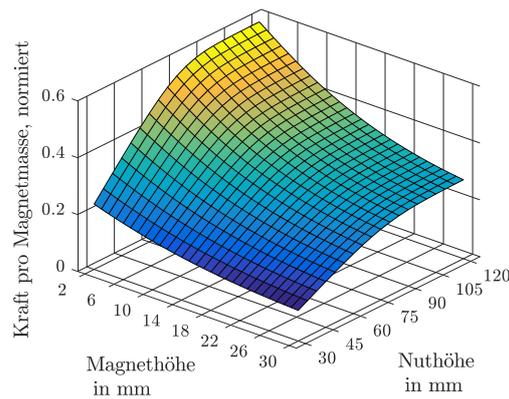


Abb. 8b: Kraftdichte Tubular

Die Ergebnisse zeigen, dass für beide Maschinentypen eine höhere Kraftdichte mit geringer Magnethöhe erreicht wird, sodass diese an der Entmagnetisierungsgrenze gewählt werden sollte. Insgesamt wird bei vergleichbaren Randbedingungen mit der planaren Doppelkamm Bauweise eine höhere Kraftdichte (+74%) erreicht, was primär auf den doppelten Luftspalt zurückzuführen ist.

Optimierungsmethodik flussmodulierter Maschinen am Beispiel der Flux Reversal Maschine

M.Sc. Christian Heister

Am IMAB wurde eine Toolkette entwickelt, mithilfe derer sich flussmodulierte Maschinentopologien im Rahmen von Topologiestudien untersuchen lassen. Hierzu wurde eine umfangreiche Veröffentlichung [1] erstellt, in der als Beispiel die Flux Reversal Maschine betrachtet wird. Es wurde ein analytisches Modell entworfen, welches mithilfe konformer Abbildungen den Modulationseffekt infolge der Rotornutung berücksichtigt. Darauf aufsetzend wurde ein Algorithmus eingeführt, welcher auf Basis der analytisch gewonnenen Feldlösung eine Wicklungsauslegung vornimmt. Mithilfe dieser Toolkette werden im Rahmen einer breit angelegten Topologiestudie Flux Reversal Maschinen untersucht. Die hier dargestellte Toolkette lässt sich ebenfalls auf andere Maschinentopologien, wie Permanentmagneterregte Synchronmaschinen, anwenden.

Problemstellung

Aufgrund ihrer einfachen und mechanisch robusten Rotorstruktur, sowie ihrer hohen Kraftdichte sind flussmodulierte Maschinen in zahlreichen Applikationen anzutreffen. Insbesondere die Tatsache, dass sich Magnete und Kupferleiter ausschließlich im Stator befinden und damit hervorragende Anbindungen an das Kühlsystem möglich sind, macht diese Maschinen

besonders interessant für Hochtemperatur- und Hochdrehzahlanwendungen. Der Rotor enthält aufgrund seines einfachen Aufbaus (Abb.1) keine temperaturempfindlichen Komponenten.

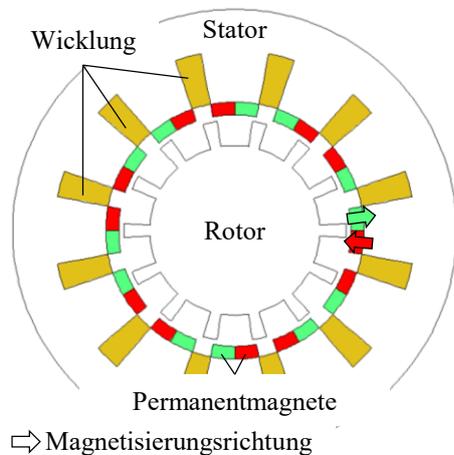


Abb. 1: Flux Reversal Maschine mit $N_s=12$ Statornuten and $N_r=14$ Rotornuten.

Auch wenn die Flux Reversal Maschine in der Literatur durchaus behandelt wird, existieren wenig ganzheitliche Untersuchungen hinsichtlich vorteilhafter Stator-Nut und Rotor-Nut Kombinationen. In [1] wurde eine Methodik dargestellt, mit der sich sämtliche Topologien der Flux Reversal Maschine untersuchen lassen. Zu diesem Zweck sind zwei Teilprobleme zu lösen: Zum einen muss eine Feldlösung gewonnen werden. Dies kann grundsätzlich mit kommerzieller Finite-Elemente-Software realisiert werden, was aber bei der Vielzahl an zu betrachtenden Topologien und dem Umstand, dass für jede Topologie ein optimiertes Design erforderlich ist, aufgrund der hierzu erforderlichen Rechenzeit nicht zielführend ist. Stattdessen wird ein ana-

lytisches Rechenmodell, welches auf einer analytischen 2D-Feldlösung für eine ungenutzte Maschine im Zusammenspiel mit einer komplexen relativen Funktion des Luftspaltleitwertes basiert, vorgeschlagen. Letztere wird mit einer Reihe von konformen Abbildungen berechnet. Das zweite Teilproblem ist in der Ermittlung einer geeigneten Topologie der Drehstromwicklung zu sehen. Diese ist a priori nicht bekannt und muss für jede Maschinentopologie ermittelt werden. Hierzu wird eine Systematik eingeführt, welche auf dem Prinzip maximaler Flussverkettung basiert und als Eingangsgröße den magnetischen Flussdichteverlauf im Luftspalt unter Leerlaufbedingungen benötigt.

Funktionsprinzip der Flux-Reversal-Maschine

Auch wenn die Rotorbauform an eine geschaltete Reluktanzmaschine erinnert, so liegt das Arbeitsprinzip einer Synchronmaschine näher. Durch die Modulation des von den Permanentmagneten erregten Feldes durch die Rotornuten bei einer Rotation des Rotors, wirkt in den Statorspulen eine sinusförmige Flussverkettung, wie in Abb. 2 dargestellt. Die in dieser Abbildung dargestellte Topologie weist eine Einzelzahnwicklung auf. Auf dem Statorzahn befinden sich zwei Magnete mit den ausgewiesenen Magnetisierungsrichtungen. Zudem ist die hier betrachtete Einzelspule ausgewiesen und der mit ihr verkettete Erregerfluss für eine elektrische Periode aufgetragen.

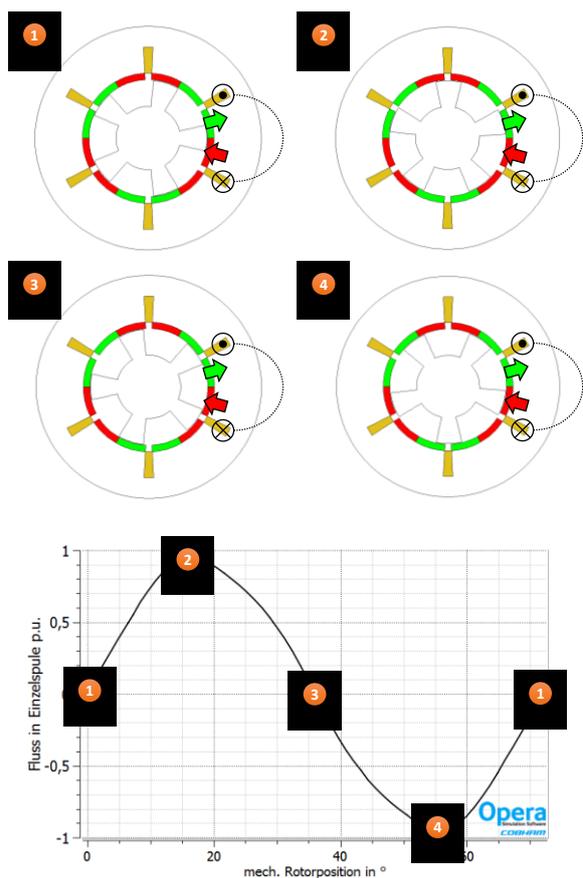


Abb. 2: Funktionsprinzip der Flux Reversal Maschine.

Berechnung einer analytischen Feldlösung

Da die Drehmomentbildung der Flux Reversal Maschine auf dem Flussmodulationseffekt der Rotorntung basiert, welcher auf das durch die Statormagnete erregte Leerlauf Feld wirkt, ist die Rotorntung explizit in einer analytischen Feldlösung zu berücksichtigen. Eine Berücksichtigung durch den Carterfaktor, wie bei anderen Maschinentypen üblich, ist hier nicht ausreichend. Hierzu existieren grundsätzlich drei Möglichkeiten: Einerseits kann die Beschreibung der Nutung durch Sub-Domänen im Nutbereich bei der analytischen Lösung der Felddifferentialgleichungen erfolgen. Alternativen sind in der Verwendung magnetisch äquivalenter Netzwerke oder konformer Abbildungen zu sehen. Da magnetisch äquivalente Netzwerke

bei größeren Designänderungen zu ungenauen Lösungen führen können, was entsprechende Verfeinerungen erforderlich machen würde, erscheinen konforme Abbildungen als effizienteste Wahl für eine schnelle und gleichzeitig genaue Ermittlung der Feldlösung. Sobald die Funktion komplexer Leitwerte $\underline{\lambda}_{rel,k}(r, \varphi)$ im Luftspalt bekannt ist, kann die analytische Lösung des Luftspaltfeldes der genutzten Maschine als Produkt des Luftspaltfeldes der ungenutzten Maschine $\underline{B}_{oN}(r, \varphi)$ und der komplex konjugierten Funktion der Luftspaltleitwerte $\underline{\lambda}_{rel,k}^*(r, \varphi)$ berechnet werden. Dabei steht der Index k für die aktuelle Rotorposition.

$$\underline{B}_k(r, \varphi) = \underline{B}_{oN}(r, \varphi) \cdot \underline{\lambda}_{rel,k}^*(r, \varphi)$$

Dieses Konzept wurde bereits für den Fall einer Statorntung eingeführt. Bei der Flux Reversal Maschine ist allerdings gerade die Rotorntung von Interesse und muss für die weitere Rechnung ermittelt werden.

Ermittlung der relativen Luftspaltleitwerte durch konforme Abbildungen

Wie Abb. 1 zu entnehmen ist, sind die Magnete auf den Statorzähnen befestigt und verfügen damit immer über denselben Eisenrückschluss. Dadurch beeinflusst die Statorntung das Luftspaltfeld nicht, solange keine Sättigungseffekte zum Tragen kommen. Dies konnte auch anhand einer FEM-Analyse bestätigt werden und vereinfacht die Rechnung drastisch, da diese nun auf einem Ein-Nut-Modell basieren kann.

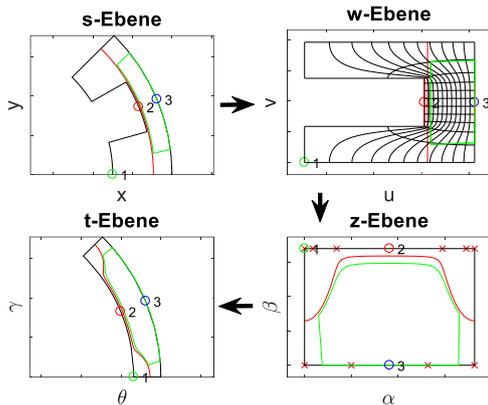


Abb. 3: Konforme Abbildungen am Beispiel einer Einzelzahn-geometrie.

gebracht werden, muss die Lösung für einen Außenläufer verwendet werden. Damit lässt sich unter Berücksichtigung des Polbedeckungsfaktors mithilfe des Superpositionsprinzips die Lösung $\underline{B}_{oN}(r, \varphi)$ bestimmen.

Einen Vergleich der Luftspaltflussdichte der analytischen Lösung und der FEM-Lösung einer Maschine mit ‚NS-SN‘-Magnetisierung, $N_s=12$ Statornuten und $N_r=14$ Rotornuten (vgl. Abb. 1) zeigt Abb. 5. In Abb. 5a) ist das Luftspaltfeld ohne Nutungseffekt und in Abb. 5c) das Luftspaltfeld mit Nutungseffekt dargestellt und es zeigt sich eine gute Übereinstimmung beider Feldlösungen.

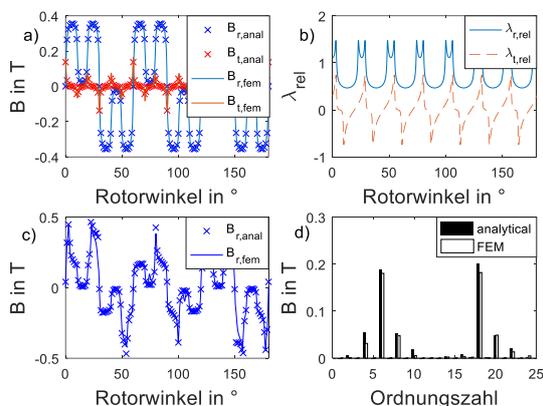


Abb. 4: a) Luftspaltflussdichte ohne Nutung, b) Funktion relativer Luftspaltleitwerte, c) Luftspaltfeld mit Nutungseffekt und d) Spektrum der Luftspaltflussdichte in radialer Richtung in der Mitte des Luftspaltes. ‚r‘ steht für die radiale und ‚t‘ für die tangentielle Feldkomponente

sind. Die Magnetbreiten sind über das Verhältnis von Statornut zu Statorzahn bestimmt. Die Spulenwindungszahl w_s wird derart angepasst, dass die magnetomotorische Kraft (MMF) über alle betrachteten Varianten konstant bleibt und ist somit eine Funktion der Statornutenzahl N_s . Die in Abb. 6 gezeigte Optimierungsprozedur wird zweimal durchlaufen: Einmal auf Basis einer analytischen Feldberechnung und anschließend auf Basis einer FEM-Feldberechnung, mit dem Optimierungsergebnis der vorangegangenen analytischen Rechnung als Startwert. Zur Verifikation der Rechnung erfolgt eine FEM-Rechnung mit Stromspeisung. Hierzu wird die kommerzielle Software Opera Vectorfields eingesetzt, mit welcher weitere Zielgrößen, wie Drehmomentrippel, Rastmomente und Normalkräfte berechnet werden.

Analytische Lösung der ungenutzten Maschine

Die Lösung der ungenutzten Maschine $\underline{B}_{oN}(r, \varphi)$ in der t-Ebene kann durch die Lösung des bekannten Problems einer permanentmagneterregten Synchronmaschine ohne Nutung erfolgen. Da hier eine Innenläufervariante der Flux Reversal Maschine untersucht wird, bei der die Magnete am Innendurchmesser des Stators an-

Optimierungsmethodik

Nach einer Toolgestützten Wicklungsauslegung [1] und der damit möglichen Berechnung des verketteten Flusses pro Phase lässt sich das Drehmoment über bestimmen. Für die Optimierung werden die Schritte in Abb. 6 vollzogen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden der Statorinnen- und der Statorausendurchmesser, die Magnethöhe sowie Stator- und Rotornuthöhe konstant gehalten. Variiert werden die Verhältnisse von Statornut zu Statorzahn sowie von Rotornut zu Rotorzahn, da diese Größen maßgeblich für den Modulationseffekt

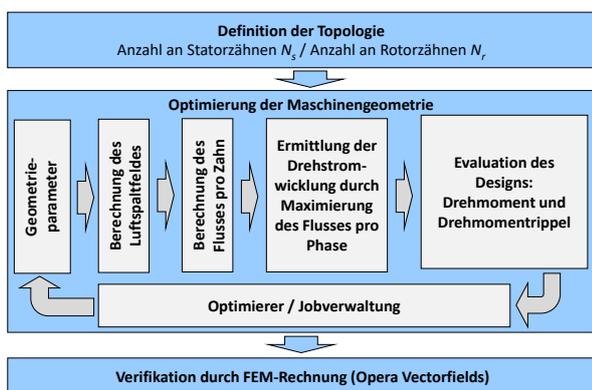


Abb. 5: Optimierungsschritte für Flux-Reversal-Maschine

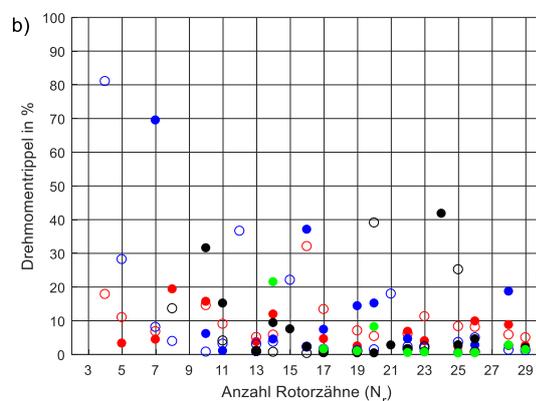
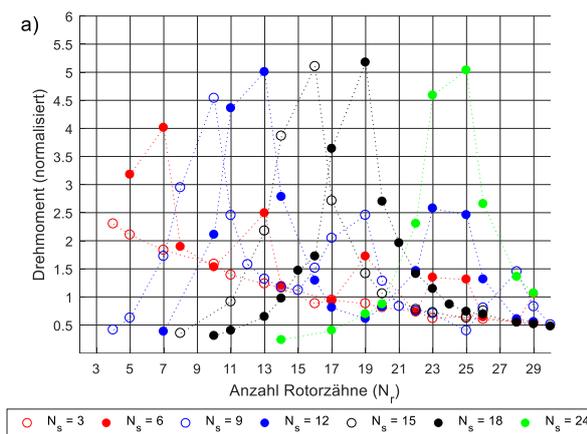


Abb. 6: a) Drehmoment und b) Drehmomenttrippel in % für NS-NS-Magnetisierung

Ergebnisse

Als Ergebnis der Methodik werden die Performance-Kennwerte der optimierten Topologien, wie mittleres Drehmoment, Drehmomenttrippel, Normalkraft und die gefundenen Drehstromwicklungen betrachtet. Abb. 6 zeigt beispielhaft die Drehmomente und Drehmomenttrippel für alle Topologien für dreiphasige Flux Reversal Maschinen mit bis zu 24 Statornuten und bis zu 30 Rotorzähnen für den Fall einer NS-NS-Magnetisierung.

[1] C. Heister, Prof. M. Henke: „Optimierungsmethodik flussmodulierter Maschinen am Beispiel der Flux Reversal Maschine“, *elektrotechnik und informationstechnik*, Springer 2018

leichtLAST – Leichtes Lastenrad mit leistungsoptimiertem Antriebsstrang in Faserverbundbauweise unter Ausnutzung neuartiger elektronischer Bauelemente zur energetisch optimierten Motorregelung

Verbundprojekt gefördert durch VDI/VDE Innovation + Technik, FKZ: 16EMO0162

M.Sc. Fabian Hain, Dipl.-Ing. Quirin Maurus

Um das Potenzial der Elektromobilität gerade für den innerstädtischen Wirtschaftsverkehr zukünftig erschließen zu können, sind innovative Lösungen für entsprechende Transportfahrzeuge zu erarbeiten. Insbesondere Lasträder können dabei eine wichtige Rolle übernehmen, sofern die derzeit noch erheblichen Restriktionen hinsichtlich Reichweite, Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit überwunden werden können.

Dies will das Konsortium im Rahmen des Projekts „leichtLAST“ mit der Erarbeitung neuartiger Antriebslösungen erreichen, die erstmals hocheffiziente Motoren mit konsequenten Leichtbaukonstruktionen zusammenführen.

Um ein möglichst geringes Gesamtgewicht zu erreichen, wird die gesamte Rahmenstruktur aus festen und teils hochsteifen Kohlefasern aufgebaut. Fertigungsverfahren werden hinsichtlich Automatisierbarkeit erforscht und auf die komplexen Anforderungen von Lastenrädern adaptiert. So entstand ein z. B. in C-SMC (Carbon Sheet Moulding Compound) hergestellter Tretlagerknoten, der alle Festigkeitsanforderungen erfüllt und zudem Raum für den komplett integrierten Antriebsstrang bietet. Das damit erreichte Gewicht der Rahmenstruktur ist mit 3,5 kg extrem gering, dennoch kann eine enorme Nutzlast von bis zu 100 kg transportiert werden.



Abb. 9: Aus CFK gefertigte Rahmenstruktur ohne Transportbox vom Projektpartner CarboFibretec. Die Antriebseinheit befindet sich im Unterrohr und ist über ein Getriebe mit dem Tretlagerknoten verbunden.

Das IMAB befasst sich in dem Förderprojekt „leichtLAST“ mit der Motor-Getriebeeinheit und bringt Know-How in dem Bereich des elektromagnetischen Entwurfs, der prototypischen Realisierung und der Ansteuerung von Elektroantrieben ein. <

Mechanische Daten

Drehmoment	1,165 Nm
Drehmomentrippl	3,6 %
Drehzahl	2050 U/min
Leistung	250 W
Aktive Eisenlänge	85 mm
Außenradius	28 mm
Luftspalt	1 mm
Gewicht Stator	478 g
Gewicht Statorwicklung	285 g
Gewicht Rotor o. M.	358 g
Gewicht Magnete	85 g
Gesamtgewicht Aktiveile	1247 g

Elektrische Daten

Leiter pro Zahn	12
Aktive Eisenlänge	85 mm
Wicklungswiderstand pro Phase	0,21 Ohm
Phasenstrom (eff.)	6,2 A
Phasenspannung (eff.)	16,1 V
Zwischenkreisspannung	48 VDC
Verluste	
Kupferverluste	24,2 W
Eisenverluste Rotor	0,1 W
Eisenverluste Stator	9,6 W
Gesamtverluste	33,9 W
Wirkungsgrad	88,1 %

In der Auslegung des Antriebs wird der elektromagnetische Kreis mittels FEM-Berechnungen systematisch auf Energieverbrauch und Kraftdichte optimiert und zusätzlich der Einfluss der sensorlosen Regelung berücksichtigt. Die Winkelerfassung des Antriebsmotors erfolgt mit einem einfachen, preiswerten magnetischen Sensor, der nur sechs Winkelbereiche auflöst. Auf der Basis eines neuartigen $\Delta\Sigma$ -PWM-Modulators mit effektiver Winkelauflösung wird vom Institut für Regelungstechnik ein innovativer Ansatz verfolgt, um dennoch den Antrieb effizient mit sinusförmigen und glatten Strömen zu betreiben. Diese PWM wird erstmals mit einer feldorientierten Regelung auf Permanentmagnet-Motoren angewendet. Neben einer schnelleren Stromregelung gegenüber Standardverfahren erlaubt sie eine höhere Spannungsausnutzung im Feldschwähebereich und eine Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Reduktion der Umrichterverluste in der Ansteuerelektronik. Der Gesamtwirkungsgrad des Antriebs steigert sich enorm.

Die explizite Ausrichtung des Magnetkreises auf die Antriebselektronik betreffende Effekte, stellt einen Ansatz dar, diese Sensorverfahren motorseitig zu unterstützen. Dabei stellen insbesondere die Leerlaufspannungsanforderungen und geringe Drehmomentenwelligkeit zusätzliche Anforderungen an das Motordesign. Außerdem erfordert die Zielsetzung für eine möglichst kompakte Antriebseinheit ein hohes innovatives Konzept hinsichtlich der elektromagnetischen und mechanischen Komponenten.



Abb. 10: Einzelne Motorkomponenten während der Fertigung am IMAB. Der bewickelte Stator (l.) wurde mit Sensor vergossen (m.) und wurde mit dem fertigen Rotor (r.) in das speziell entwickelte Gehäuse gefügt.

Für die gefundene Antriebslösung wurden die mechanische Anbindung und das Motorgehäuse konstruktiv umgesetzt und hinsichtlich der Bauraumanforderungen optimiert. Besonders Potential zur Verringerung des benötigten Bauraum weist die Integration des Sensors in das Motorgehäuse, sowie das Motorgehäuse selbst auf. So wurde z. B. der Rotor 5 mm länger als der Stator ausgeführt, um mit Hilfe der magnetischen Sensoren die Pollage zu erfassen. Dieses Verfahren ermöglicht eine besonders hohe Integration an den Wickelkopf, bei ausreichend hoher Genauigkeit der Pollage.

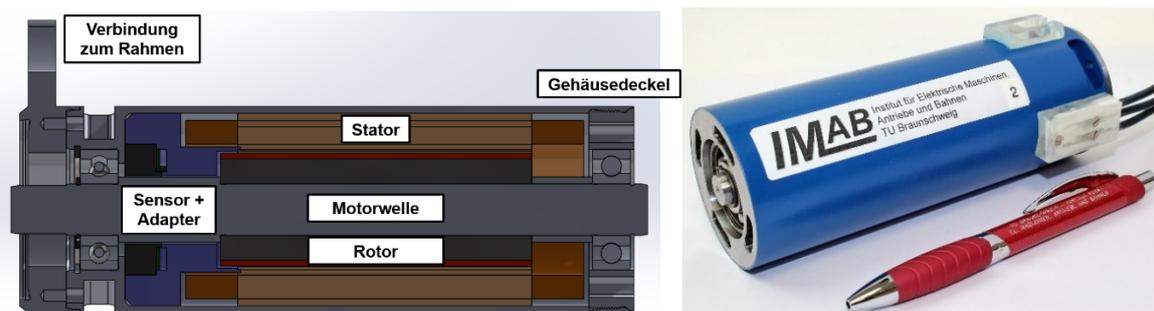


Abb. 11: Integration der aktiven Motorkomponenten mit Sensorik in das Motorgehäuse (l.), sowie der fertige Motor ohne Gehäusehalterung und Getriebe (r.).

In der am IMAB erfolgten Inbetriebnahme zeigten die Messungen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Werten aus der Auslegung, sodass die ersten Fahrversuche Ende 2018 durchgeführt werden können, um das Verhalten des Antriebes zu verifizieren. Dabei sollen sowohl die Performance und Effizienz als auch die entwickelten Regelungen erprobt und analysiert werden.

Standardisierung induktiver Ladesysteme über Leistungsklassen (STILLE)

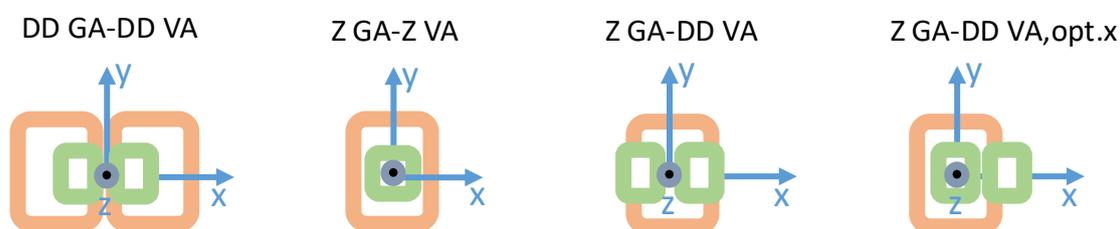
Verbundprojekt, gefördert durch das BMWi, Förderkennzeichen: 01MX16001K

M.Sc. Oleg Schäfer

Die induktive Energieübertragung wird aufgrund des potentiellen Komfortaspektes als wichtiger Bestandteil und Treiber der Elektromobilität gesehen. Bei dieser Form der Energieübertragung wird Energie berührungslos von einer Spule auf eine andere Spule übertragen und kann unter anderem zum Laden der Traktionsbatterie elektrifizierter Fahrzeuge genutzt werden.

Im Zuge der angestrebten Standardisierung induktiver Ladesysteme muss vorab eine hersteller- und leistungsübergreifende Interoperabilität der Ladesysteme gewährleistet werden. Zu diesem Zweck wurden am IMAB im Rahmen des Projektes „STILLE“ vorbereitend messtechnische Untersuchungen einiger aktueller Ladesysteme durchgeführt. Die Evaluierung hinsichtlich der Interoperabilität erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden die reinen Primär- und Sekundärspulen der einzelnen Systeme in einer Low Voltage (LV) – Messung gegeneinander vermessen und die Kopplungsfaktoren ermittelt. Im zweiten Schritt erfolgte eine High Voltage (HV) – Messung der Spulen einschließlich der Kompensationsnetzwerke, bei der die geforderte Leistung übertragen wurde.

Die LV-Messung zeigte unter anderem die Notwendigkeit einer optimalen Ausrichtung der Primär- zur Sekundärspule einer unpassenden Paarung, die gegeben ist, wenn eine zirkulare und eine doppel D Spule die Paarung bilden. Die beiden rechten veranschaulichen den Unterschied des Koppelfaktors k einer unpassenden Paarung bei Ausrichtung der geometrischen Mittelpunkte zueinander und im Vergleich dazu bei Ausrichtung des magnetischen Mittelpunktes infolge einer geometrischer Verschiebung in der entsprechenden Achse. Dieser Sachverhalt ist auf die Induktionswirkung in der jeweiligen sekundären Leiterschleife zurückzuführen, welche als Basis für die Berechnung des Koppelfaktors zugrunde gelegt wurde.



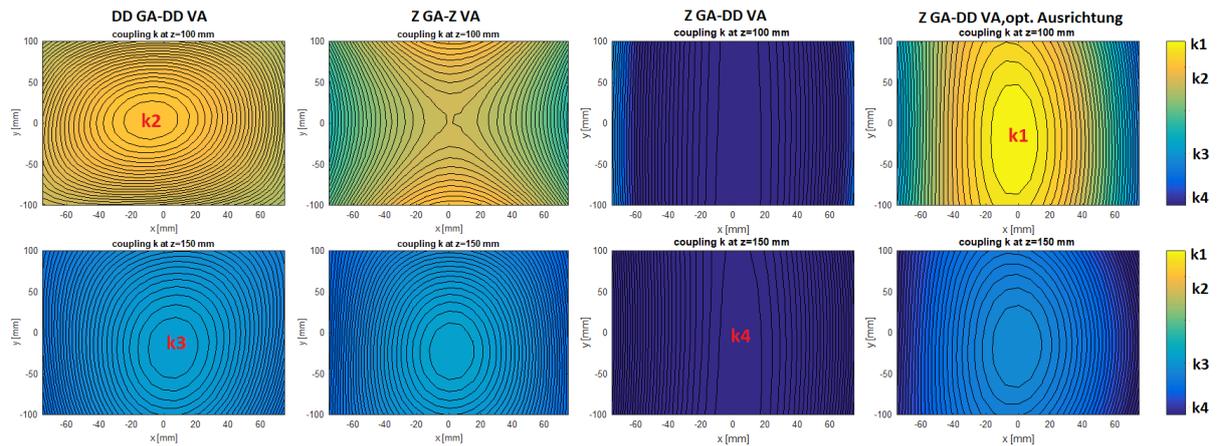


Abb. 1: Kopplungsfaktoren einiger exemplarischer LV-Messanordnungen

In den der Leistungsübertragung dienenden anschließenden HV Messungen werden die Kompensationsnetzwerke der Übertragungssysteme berücksichtigt. Hierdurch entstehen zusätzliche Freiheitsgrade hinsichtlich des Übertragungsverhaltens und damit auf den Wirkungsgrad. Bei einer Festlegung des gleichstromseitigen Wirkungsgrades zum systemrelevanten Wirkungsgrad fließt die Güte des primärseitigen Wechselrichters mit ein. Unter anderem zeigt die Aussteuerung des Umrichters deutliche Unterschiede. Die folgende Abbildung verdeutlicht den Einfluss des Duty-Cycles des Wechselrichters auf den DC-Systemwirkungsgrad. Bei gleicher Übertragungsleistung wurde im linken Bild ein Duty-Cycle von 33% und im rechten Bild ein Duty-Cycle von 50% (Vollaussteuerung) eingestellt. Bei Vollaussteuerung ergibt sich in diesem Beispiel ein um 1% höherer Wirkungsgrad.

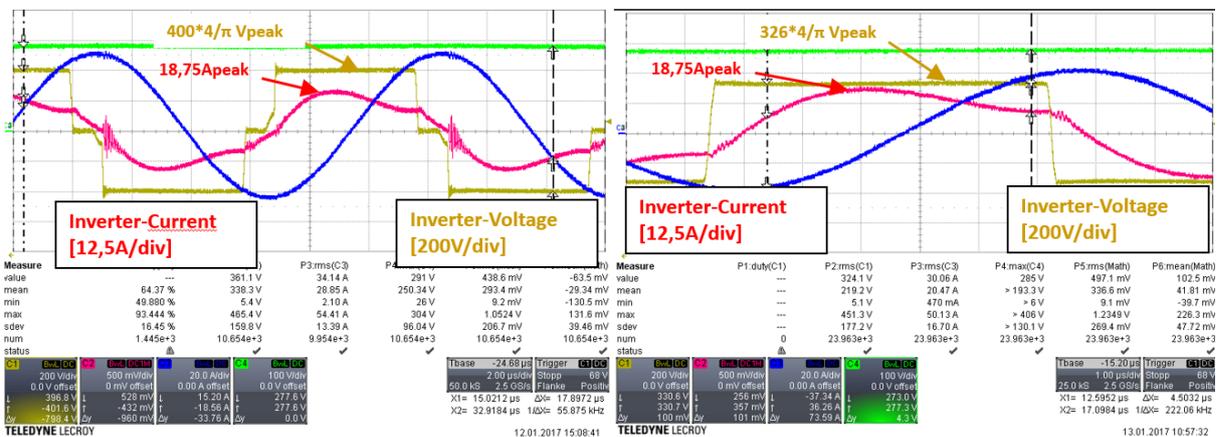


Abb. 2: Einfluss des Duty Cycle des Wechselrichters auf den Systemwirkungsgrad

Demzufolge sollte generell ein möglichst großer Duty-Cycle (im Idealfall eine Vollaussteuerung) zum Betrieb des Primär-Wechselrichters verwendet werden.

Das entscheidende Kriterium bezüglich des Systemwirkungsgrades ist der primärseitige Leistungsfaktor, welcher den Blindstromanteil im System widerspiegelt. Die Hersteller verfolgen unterschiedliche Prinzipien zur Kompensation des Blindstromanteils, teils mithilfe passiver und aktiver Bauelemente in den Kompensationsnetzwerken, teils über eine die Reaktanzen



Induktive Energieübertragung im Busdepot der Braunschweiger Verkehrs GmbH

Katalogbasiertes, interdisziplinäres Systemdesign von Elektrofahrzeugen (KISEL)

Verbundprojekt, gefördert durch das BMBF, Förderkennzeichen: 16EM00245

M.Sc. Oleg Schäfer

Die hohe Entwicklungsdynamik in der Elektromobilität und die damit einhergehenden neuen Anforderungen an Fahrzeuge, sowohl im PKW- als auch im Nutzfahrzeugbereich generieren eine Vielzahl von Komponentenlösungen der Energiewandler im Fahrzeug. Die Entwicklung dieser Komponenten erfordert geeignete Werkzeuge, wie z.B. MATLAB/SIMULINK, um aus möglichen Systemkonzepten und Betriebsstrategien die energetisch und ökonomisch günstigste Konfiguration auswählen zu können. Um den Aufwand bei der Erstellung der erforderlichen direkten und abgeleiteten Modell-Modifikationen der einzelnen Varianten möglichst gering zu halten, ist eine strukturierte Modellbildung der Energiewandler unabdingbar.

So wurde am IMAB mithilfe der Plattform MATLAB/SIMULINK ein standardisiertes Modell eines elektrischen Antriebsstrangs auf Basis einer Katalogplattform für Komponenten- und Systemmodelle entwickelt. Dieses Modell wiederum besteht aus standardisierten parametrierbaren Komponentenmodellen, welche sich nach einem Katalogprinzip anlegen und verwalten lassen. Die Simulation wird vollständig in SIMULINK durchgeführt und kommt ohne Aufrufe von Skripten in MATLAB aus.

Die Entwicklung der Modelle orientiert sich am realen Antriebsstrang nach dem Prinzip eines kausalen Systems. Hierbei sind die Schnittstellen gemäß dem Energie- und Informationsfluss

zwischen den den elektrischen und mechanischen Komponenten definiert. Zudem wurde eine geeignete Busstruktur gewählt. Die einzelnen Systeme beinhalten die Zustandsräume in Abhängigkeit der realisierten Modellierungstiefe. Diese Maßnahmen bilden die Voraussetzung für eine standardisierte Struktur, die anwendungs- und anwenderübergreifend ohne einen Rüstaufwand auskommt.

Es wurden zwei Konzepte realisiert (Application Mode und Developer Mode). Beide beinhalten eine Bibliothek aus Komponenten einer angelegten Anzahl von vom Anwender entsprechend realer Datenblätter angelegten Varianten. Aus den auswählbaren Varianten lassen sich Systembeispiele diverser Antriebsstränge zusammenstellen. Der Unterschied der Konzepte liegt strukturbedingt in der Trennung der Daten(-eingabe) und des physikalischen Modells, welches sich primär für das Testing neuer Varianten eignet. So lässt sich eine übersichtliche Modellstruktur realisieren, die keine detaillierte Kenntnis der physikalischen Vorgänge erfordert. Die Komponenten lassen sich variieren, indem Datensätze getauscht werden. In anschließenden Simulationsdurchläufen können die entsprechenden Ergebnisse z.B. im Energieverbrauch des Fahrzeugs untersucht werden. Im Developer Mode werden die Dateneingabe und -übergabe mit der impliziten Physik in einem Subsystem aufgeführt. Dies vereinfacht die Weiterentwicklung der Komponenten um weitere Zustandsgrößen.

Verbundprojekt Enersphere – Energiespeicher hoher Energiedichte für regenerative Energieerzeuger,

gefördert durch das BMWi, FKZ: 03ET6009B

Prof. W.-R. Canders und Dipl.-Ing. Jan Hoffmann

Im Zuge der Energiewende werden sowohl Langzeitspeicher für die Überbrückung längerer wetterbedingter Ausfallzeiten regenerativer Erzeuger als auch schnell reagierende Kurzzeitspeicher für die Abweichungen zwischen Prognose und tatsächlicher Energielieferung sowie die Pufferung kurzzeitiger Schwankungen der Energielieferung (Böen, Wolkendurchzug) benötigt. Diese Kurzzeitspeicher können aufgrund ihrer kurzen Reaktionszeiten auch für Systemdienstleistungen – Stabilisierung des Netzes herangezogen werden. Typisch für Kurzzeitspeicher ist ihre hohe Zahl von Lade- und Entladezyklen, die dazu führt, dass z.B. Batterien schnell das Ende ihrer Lebensdauer erreichen. Großspeicher wie Pumpspeicherkraftwerke oder Druckluftspeicher sind in ihren Reaktionszeiten zu träge, um auf schnelle Ereignisse im Netz reagieren zu können. Diese Aufgabe der Sekundenreserve haben bisher die Schwungmassen der großen Kraftwerksgeneratoren in Kombination mit einer Androsselung der Frischdampfventile der antreibenden Turbinen übernommen. Mit der Energiewende werden diese Einheiten zunehmend vom Netz genommen. Gleichzeitig steigt der Anteil der über Wechselrichter einspeisenden Energieerzeuger, die keine oder nur geringe Überlastreserven und keinen Kurzschlussstrom aufweisen. Als Kurzzeitspeicher gut geeignet sind daher Schwungmassenspeicher oder Superkondensatoren. Wie die im Projekt „Forschungsverbund

Energie Niedersachsen (FEN)“ am IMAB durchgeführten Untersuchungen zeigten, können Superkondensatoren sowohl hinsichtlich Alterung, energetischem Wirkungsgrad, Kosten und Bauvolumen die in sie gesetzten Erwartungen nicht erfüllen. Besser geeignet sind offenbar Schwungmassenspeicher entweder in konventioneller Ausführung oder als kompakte hoch-tourige Speicher ausgeführte Systeme.

Ziel des hier durchgeführten Vorhabens war die Entwicklung eines Schwungmassenspeichers mit supraleitender verschleißfreier und verlustfreier Lagerung für hohe Lastspielzahlen, der für Prozesse mit starken Leistungsvariationen eingesetzt werden kann. Als Beispiel seien hier nur die Glättung der Leistungsschwankungen von Solaranlagen oder die Reduzierung der Leistungsgradienten von Windenergieanlagen, die Pufferung der periodisch anfallenden Leistungsspitzen von Containerhandlinganlagen oder der stochastisch anfallenden Leistungsspitzen von Anlagen mit diskontinuierlichen Zentrifugen (Zuckerindustrie) genannt.

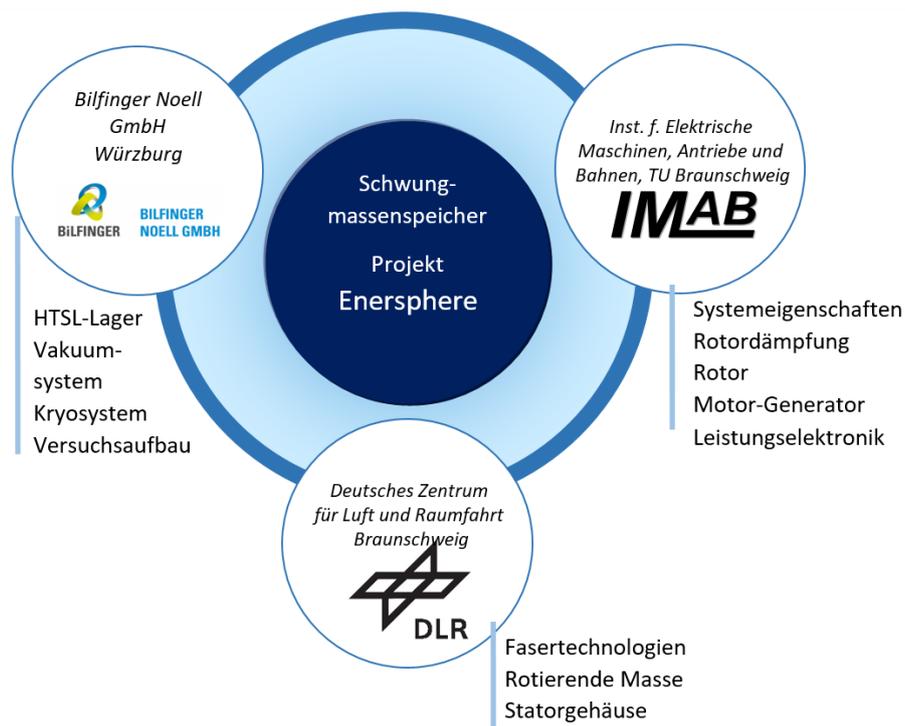
Die Entwicklung solch eines Speichersystems erfordert die Bündelung von Kompetenzen auf den Gebieten Elektromaschinenbau, Leistungselektronik, Supraleitung, Kryotechnik, Faserverbund Technologie und Strukturmechanik. Deshalb wurde ein Konsortium aus der Firma Bilfinger Noell (BNG) in Würzburg, dem IMAB der TU Braunschweig und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Braunschweig gebildet.

Das IMAB konnte sich hier auf den Erfahrungen aus dem Leitprojekt „Dynastore“, abstützen. Für die Magnetlagerung mit Supraleitern wurde umfangreiches Know How an den Projektpartner BNG transferiert.

Für die theoretischen Untersuchungen konnte auf den bereits existierenden numerischen Rechenprogrammen des Institutes – insbesondere für die Berechnung der HTSL-Magnetfeld-Interaktion – aufgesetzt werden.

Das Vorhaben wurde zwischen den Projektpartnern entsprechend den dargestellten Kompetenzen aufgeteilt. Aufgabe der TU Braunschweig, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB) war dabei die Konzipierung und Konstruktion des Speichers, die Auslegung des Energiewandlers und der zugehörigen Leistungselektronik mit Drehzahl und Pollagesensorik. Das Vorhaben begann im Jahr 2014 und war für eine Laufzeit von 3 Jahren geplant.

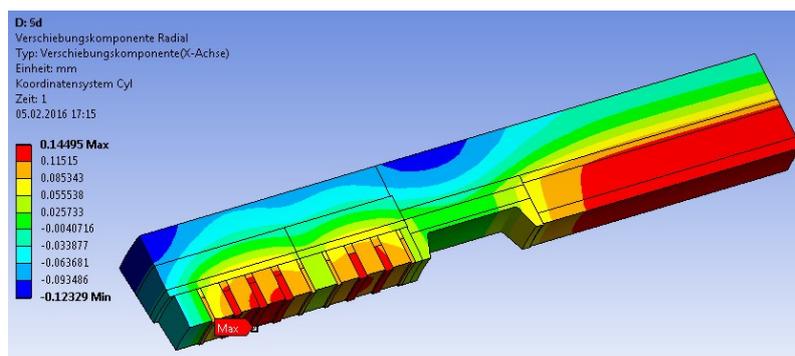
Die Herausforderung der Generatorauslegung für ein supraleitend gelagertes Schwungrad besteht darin, die hohe wechselnde mechanische Belastung, die Rotordynamik, die supraleitende Lagerung und den magnetischen Kreis des Generators im Design zu berücksichtigen und die zum Teil widersprüchlichen Anforderungen und Randbedingungen in einem funktionierenden System zusammenfließen zu lassen. Ein Teilziel bestand u. a. darin, eine kompakte Maschine zu entwerfen, wodurch der Eisenanteil und damit die Massenbelegung im Rotor des Generators reduziert und dabei zugleich die Verwendung eines supraleitenden Lagers ermöglicht werden konnte.



Projektkonsortium enersphere

Für das Schwungrad wurde eine hochintegrierte Bauweise gewählt, so dass der Rotor nicht, im Gegensatz zu einigen bestehenden Konzepten, über eine Welle an einen Generator angebunden werden muss. Im vorliegenden Projekt wurde ein Außenläufer-konzept verfolgt. Durch die Verwendung von supraleitenden passiven Lagern weisen die Lagerstellen des Rotors eine deutlich verminderte Steifigkeit im Vergleich zu klassischen Spindellagern auf. Aus diesem Grund müssen Rotor und Lagerung so ausgelegt sein, dass ein überkritischer Lauf im gesamten Arbeitsdrehzahlbereich möglich ist und ein Rotororbit in der Lagerung mit einigen zehntel mm zugelassen werden kann.

Das hier verfolgte Konzept sieht eine Positionierung des Generators zwischen den HTSL-Lagern vor. Das Generator-design berücksichtigt dabei, dass die maximale Radialkraft durch den Einseitigen Magnetischen Zug (EMZ) kleiner als die rückstellende Kraft des Lagers sein muss. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde das hier verwendete PM-Maschinen-Konzept so optimiert, dass den bestehenden Randbedingungen z. B. durch das HTSL – Lager, oder die geforderte Leistung, entsprochen werden konnte.



Am IMAB erfolgte die mechanische und elektromagnetische Berechnung, Simulation und Optimierung der HTSL – Lager, der Motor – und Generatoreinheit, der Dämpfer, sowie die Berechnung der Rotordynamik und der Festigkeit des CFK-Rotors. Durch die enge Verzahnung der physikalischen Effekte war das Durchlaufen mehrerer Iterationen notwendig. Zudem wurde die Kühlung des Generators berechnet und konstruiert.



Prototyp des enersphere Motor / Generators – Werkstatt IMAB

An die theoretischen Betrachtungen der ersten Projektphase schlossen sich die praktischen Umsetzungen am IMAB an. Im Bereich der Werkstatt des IMAB bietet sich die Möglichkeit zur Fertigung von kompletten Elektromotoren.



Rotorsystem auf der IMAB Wuchtbank

Daher konnte hier der Stator der Motor/ Generator-Einheit vervollständigt und mit der Maschinenwicklung und Sensorik versehen werden. Auch der Rotor des Schwungradgenerators wurde hier hergestellt. Nach mehreren Arbeitsschritten und nach Fertigung von Anschlussteilen wurde der Rotor mit dem CFK-Faserwickel durch die DLR versehen und am IMAB ausgewuchtet. Neben der Projektierung des eigentlichen Schwunghmassenenergiespeichers wurde am IMAB die Peripherie für den Prototyp aufgebaut. Diese besteht aus einer netzseitigen Anbindung über ein Active Front-End (AFE), einem Umrichterschrank für das Schwungrad, der Schütztechnik, den Bremswiderständen und einem Schrank mit der Kühltechnik für AFE, Umrichter und Schwungrad. Alle Komponenten sind per CAN-Bus

mit einem zentralen Steuerrechner verbunden.



Leistungselektronik und Ansteuertechnik, Aufbau und Inbetriebnahme am IMAB

Am Jahresende 2018 soll am IMAB die Inbetriebnahme des Gesamtsystems erfolgen.

3.2 Neue Prüfstandstechnik am IMAB

Prüfplatz zur Vermessung von Leistungshalbleiterbauelementen und –modulen mittels Doppelpulstest

Wichtige Kenngrößen zur Beurteilung von Halbleitern sind die Durchlass- und die Schaltverluste. Mit ihnen kann der Entwickler den Wirkungsgrad des Wandlers im Vorfeld abschätzen und eine entsprechende Kühlung der Schaltung auslegen. Zur Ermittlung dieser Verluste wurde ein Prüfplatz verwendet, an welchem Bauteile und Module mittels Doppelpulstest vermessen werden können. Der Prüfling wird hierzu in einer Halbbrückenschaltung mit dem Spannungszwischenkreis verbunden. Die Last wird mit verschiedenen Spulen nachgebildet. Gesteuert wird der Prüfstand über einen Messrechner, welcher die Pulsdauer in Anhängigkeit der Last berechnet und ausgibt. Zur Einstellung des Laststromes wird die Pulsdauer angepasst. Der Messrechner sendet bei der Messung zwei kurz aufeinander folgende Pulse an den Gate-Treiber. Dies bewirkt beim Schalten hohe dynamische Belastungen am Prüfling. Durch Änderung des Gate-Widerstandes kann darauf Einfluss genommen werden. Aus der gemessenen Spannung U_{DUT} und dem Strom I_{DUT} wird über die Zeit die Schaltenergie beim Einschalten E_{on} und beim Ausschalten E_{off} ermittelt. Mit den Messergebnissen kann dann der optimale Betriebspunkt der Halbleiter ermittelt werden. Auf diese Weise lassen sich Schaltverluste minimieren. Es können ganze Messreihen bezüglich Strom und Spannung bei verschiedenen Temperaturen autonom abgefahren werden.

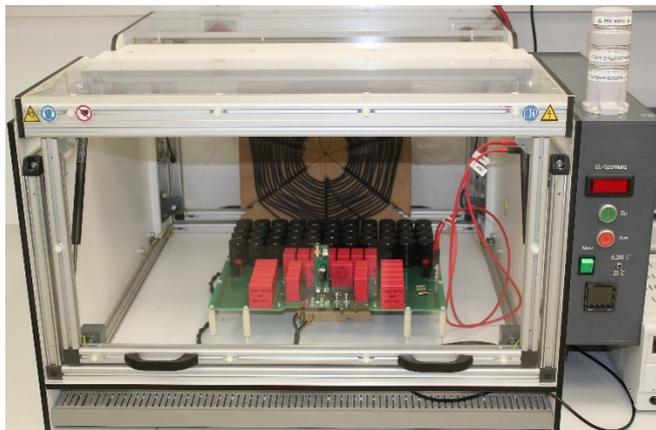
Zudem lassen sich mit einer weiteren Platine die Durchlassverluste von Halbleiterbauelementen und Modulen ermitteln. Hierfür wird der Prüfling bestromt und der Spannungsabfall gemessen.

Wichtige Kenngrößen des Prüfplatzes sind:

- Spannungszwischenkreis: Der Zwischenkreis mit einer Kapazität von 1,55 mF erlaubt Prüfströme bis 150 A und Prüfspannungen bis 1200 V Spitze. Über eine Adapterplatine wird der Prüfling (Modul oder Diskretes Bauteil) mit der Zwischenkreisplatine verbunden. Beide Platinen sind bezüglich Strom und Spannung erweiterbar. Die Hochspannungsversorgungseinheit kann den Spannungszwischenkreis auf maximal 2 kV aufladen.
- Treiberschaltung: Der Treiber kann einen maximalen Spitzengatestrom von 14 A liefern. Der Gatewiderstand kann beliebig verändert werden.
- Heizplatte: Die Heizplatte kann mit bis zu 100 W Heizleistung betrieben werden. Hiermit ist eine Maximaltemperatur von 200 °C erreichbar.

An dem Prüfplatz wurden neben aktuellen IGBT-Schaltern in Siliziumtechnologie auch diverse MOSFETs in Siliziumkarbidtechnologie und einige MOSFETs in Galliumnitridtechnologie vermessen. Auch die Schaltverluste von Siliziumkarbidioden wurden bereits gemessen. Für das Projekt Netprosum2030 (siehe oben) wurden hier neben diskreten Halbleitern auch neuartige

Siliziumkarbidmodule von Semikron und Infineon vermessen. Hierbei wurden wichtige Informationen zum Schaltverhalten und den gewünschten Betriebsparametern gesammelt.



Schaltzelle mit Zwischenkreis und Adapterplatine

Kalorimetrischer Verlustleistungsmessplatz

M.Sc. Thorben Schobre

Die Messung von Verlustleistungen ist in der Leistungselektronik zur Bestimmung von Wirkungsgraden aber auch zur Ermittlung von Verlustleistungsmodellen von Komponenten von besonderer Relevanz. Diese Verlustleistung kann dabei mit elektrischen und thermischen Verfahren gemessen werden.

Am IMAB steht hierfür ein auf Kalorimetrie basierender Messplatz zur Verlustleistungsmessung in Komponenten aber auch in ganzen Schaltungen in zur Verfügung. Mit diesem Messplatz können Prüflinge mit einer minimalen Verlustleistung von 5...10 W bei verschiedenen Umgebungstemperaturbedingungen bis 100°C gemessen werden.

Mit Hilfe des Prüfplatzes sind bereits Messungen zur Verlustleistungsbestimmung von weichmagnetischen Bauelementen durchgeführt worden. Die Messumgebung erlaubt eine Verlustleistungsmessung dieser Bauelemente mit sinusförmigen Strömen bis 100 kHz.

Neben diesen Bauelementen lassen sich aber auch beispielsweise Kondensatoren und ganze leistungselektronische Schaltungen mit einer Platinengröße von ca. 30 cm x 30 cm vermessen.



Impedanzanalysator Keysight E4990A

Der Impedanzanalysator ermöglicht die Kleinsignalmessung von leistungselektronischen Komponenten über einen weiten Frequenzbereich von 20 Hz bis 120 MHz. Am IMAB wird das Gerät zurzeit zur Bestimmung von Bauteilparametern und parasitärer Eigenschaften passiver Bauelemente, wie Transformatoren, Drosseln und Kondensatoren, verwendet. Darüber hinaus eignet sich das Gerät auch zur Bestimmung von Frequenzgängen von Filterbaugruppen. Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Messung parasitärer Eigenschaften von Leiterplatten und Halbleitermodulen. Aus den Messwerten können dann die Ersatzschaltbildgrößen wie Eigen- und Gegeninduktivität bestimmt werden. Anhand der Messdaten kann auch die Frequenzabhängigkeit des ohmschen Widerstands bestimmt werden.



Impedanz Analysator E4990A

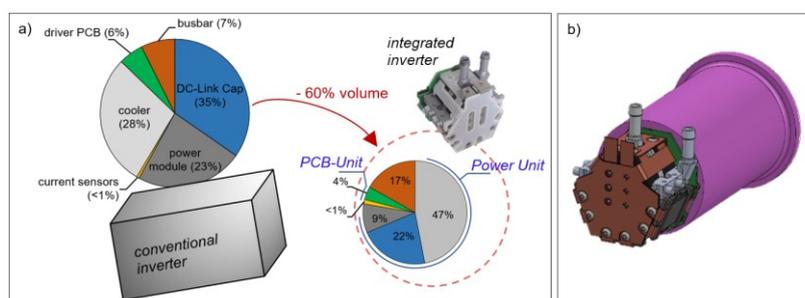
3.3 Externe Forschungsthemen

Im Rahmen von Promotionsvorhaben bei wissenschaftlichen und industriellen Partnern sind folgende wissenschaftliche Untersuchungen unter Leitung des IMAB in der Bearbeitung.

Mechanisch- und Thermisch-Elektrische Auslegung eines Fahrzeug-Traktionsumrichter hoher Leistungsdichte

M.Eng. Jasper Schnack (Fachhochschule Kiel) betreut durch Prof. R. Mallwitz

Der Traktionsumrichter eines Elektrofahrzeugs symbolisiert eine Schlüsselkomponente für ein erfolgreiches und marktfähiges Antriebskonzept. Der niedrige Integrationsgrad sowie die Trennung von Teilsystemen eines heutigen Antriebs steht jedoch im Widerspruch zu Anforderungen an moderne Antriebskonzepte im Hinblick auf Kosten, Modularisierbarkeit, Flexibilität und hohe Leistungsdichte. Im Bereich der leistungselektronischen Wandler für elektrische Fahrzeugantriebe spielt daher die Integration von Komponenten eine zunehmend wichtigere Rolle. Ein stetig steigender Integrationsgrad bringt jedoch auch ein deutlich gesteigertes Anforderungsprofil für die Einzelkomponenten eines Umrichters mit sich.



a) erhebliche Reduktion des Bauraumvolumens im Vergleich zu konventionellen Traktionsumrichtern und
b) Beispiel für ein Integrationskonzept eines Umrichters

In diesem Rahmen wird ein integrierter Antriebsinverter entwickelt, bestehend aus den Hauptkomponenten Leistungsmodul, Kondensator, Gate-Treiber und Zwischenkreisverschienung. Das Zusammenrücken dieser Komponenten hat zur Folge, dass ungewünschte Wechselwirkungen zwischen diesen begünstigt und die mechatronische Integration behindert wird. Diese äußern sich in neuartigen Problemstellungen für die Subkomponenten aus mechanischer, thermischer und elektrischer Sicht. Im Hinblick auf die eingesetzten schnellschaltenden Halbleiter (WBG) wird ein besonderer Fokus auf die niederinduktive Verbindung der Komponenten im Kommutierungskreis gelegt, sodass neuartige Anbindungskonzepte und Integrationsarten untersucht und bewertet werden. Gleichzeitig führt die gestiegene Integration zu erhöhten thermischen Anforderungen an Leistungsmodul, Kondensator und Gate-Treiber, sodass ganzheitlich thermische Systemuntersuchungen und Optimierungen durchgeführt werden. Mechatronische Herausforderungen resultieren vor allen Dingen aus der direkten Verbindung von Maschine und Umrichter, aus den zunehmend komplexeren Bauräumen so-

wie der Außenschnittstellen unter der Bedingung eines hohen Integrationsgrades. Die Untersuchungen haben das Ziel, eine möglichst kompakte und hochintegrierte Antriebseinheit zu entwerfen.

Aus den diskutierten thermischen und elektrischen Anforderungen werden Richtlinien und Vorgaben für neuartige Systeme abgeleitet, mit dem Ziel neue mechanische Konzepte und Design Rules für hochintegrierte Traktionsumrichter in zukünftigen Elektrofahrzeugen zu entwickeln.

Entwicklung, Konstruktion und Steuerung eines modularen Mehrpunktumrichters für Mittelspannungsanwendungen mit EtherCAT Kommunikation

M.Eng. Jan-Henrik Fey, HS Flensburg, betreut durch Prof. R. Mallwitz

Der modulare Mehrpunktumrichter (MMC) hat sich in der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) bewährt. Es zeigt sich jedoch allmählich, dass die Topologie auch eine geeignete Lösung für Mittelspannungsanwendungen wie z. B. zur Netzeinspeisung von Windenergie sein kann. Einen modularen Mehrpunktumrichter per Bussystem – statt bisher zentral – zu steuern ist das Ziel der Untersuchungen. Die Modularität für die jeweilige Anwendung auch auf Seiten der Steuerung erleichtern und eine Erweiterbarkeit, z. B. um redundante Zellen, gewährleisten.

Zu Testzwecken entstand ein 350 kVA-Umrichter für 3 kV-Drehspannung sowie ein neues Prüffeld der HS Flensburg an dem das Regelungs- und Kommunikationskonzept untersucht und validiert wird. Im Falle des Demonstrators wurden zwei Submodule zu einem Doppelsubmodul (DSM) kombiniert. Ein DSM besteht aus zwei IGBT-Module (Halbbrückenmodule), zwei Kondensatoren, mehreren Sigma-delta-Wandlern für Messungen und einem gemeinsamen Field Programmable Gate Array (FPGA). Dieser Aufbau ermöglicht den Einsatz von schnell schaltenden Niederspannungs-IGBTs und reduziert den Anteil an dezentralen Steuerungen. Mit dem Busprotokoll EtherCAT wurde eine Echtzeitkommunikation zwischen den verteilten DSM und einer zentralen Steuereinheit (PLC) realisiert. Die Kommunikation zwischen den Powerstacks mit FPGA-Technologie erfolgt über eine redundante Ringtopologie. Die Schwerpunkte der Untersuchungen liegen auf Regelung und auf der Synchronisation der einzelnen dezentralen Steuerungen. Geeignete Methoden zur Reduzierung von negativen Auswirkungen auf die Harmonischen sollen Anwendung finden. Die aktuellen Messungen und Berechnungen bestätigen die bisherigen Annahmen auf dem Weg zum Ziel, das Ende 2019 erreicht sein soll.



Foto des 350-kVA-MMC-Demonstrators

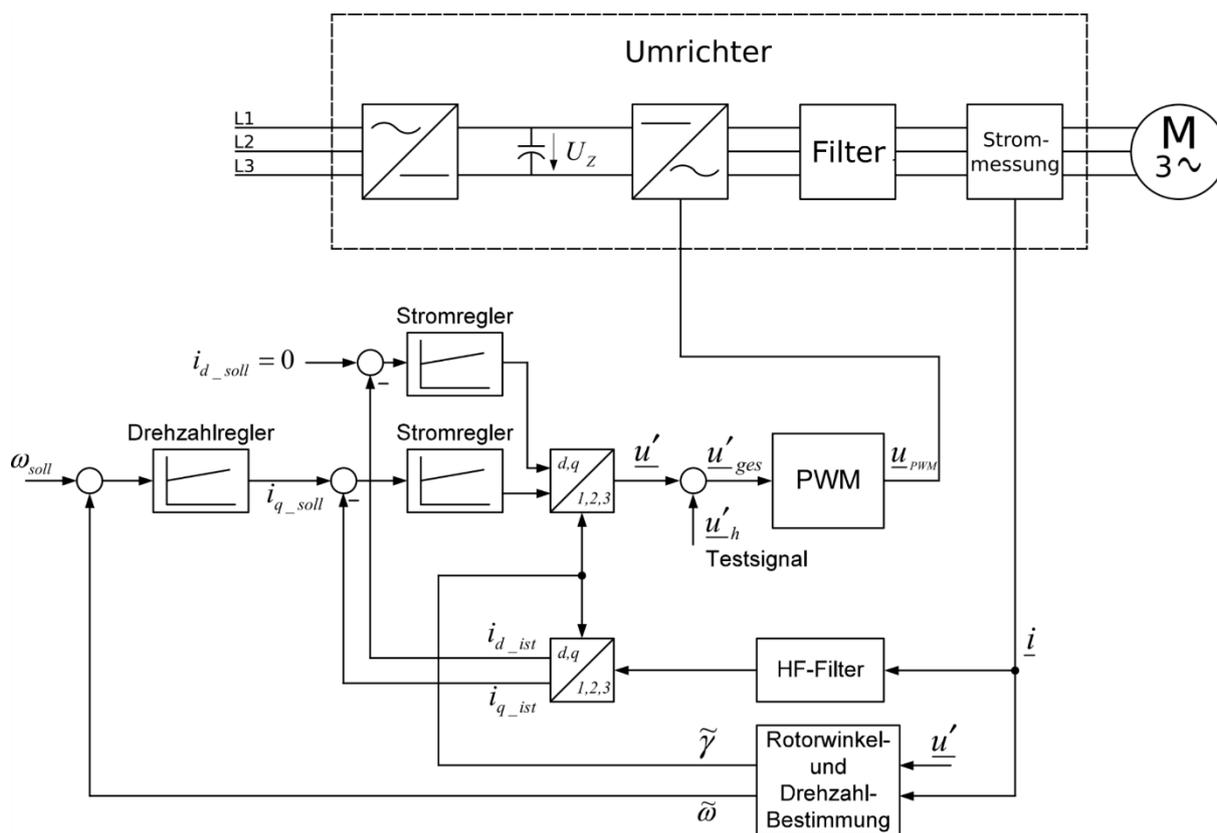
Regelungstechnik für SiC-Leistungselektronik

M.Eng. Benjamin Jerwan, HS Ostwestfalen-Lippe betreut durch Prof. R. Mallwitz

Die Hochschule Ostwestfalen-Lippe zeichnet sich durch ein sehr aktives Labor Leistungselektronik und Elektrische Antriebe aus. Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich elektrischer Industrieantriebe.

In einem Verbundprojekt aus Partnern der Industrie und Forschung wird an neuartigen dynamischen energieeffizienten Antrieben geforscht. Das Forschungsvorhaben beschäftigt sich in erster Linie mit der innovativen Leistungselektronik für Frequenzumrichter. Dabei soll ein Frequenzumrichter mit schnellschaltenden SiC-Halbleitern und integrierten Ausgangsfilter aufgebaut werden. Durch den Filter soll eine störungsfreie Ausgangsspannung auf der Motorleitung ausgegeben werden, sodass auf einen Motorschirm selbst bei Leitungen von 100 m und mehr verzichtet werden kann.

Diese neuartigen SiC-Basierten Frequenzumrichter stellen neue Anforderungen an die geberlose Antriebsregelung. In dem konkreten Forschungsthema werden Konzepte untersucht, die eine Regelung ohne Gebersystem vom Stillstand (Motordrehzahl = 0) bis Maximaldrehzahl ermöglichen. Eine große Herausforderung stellt dabei der integrierte Filter. Dieser verändert die Eigenschaften der Phasenströme und muss bei der Rotorwinkelbestimmung aus den Phasenströmen berücksichtigt werden. Weiter muss der Frequenzbereich des einzuprägenden Testsignals unterhalb der Grenzfrequenz des Filters liegen, damit eine Bestimmung des Rotorwinkels auch bei Motorstillstand möglich ist.



Konzept Regelstruktur SiC-Basierter Frequenzumrichter mit integriertem Ausgangsfilter

Aspekte des Explosionsschutzes bei permanentmagnet-erregten Synchronmaschinen und Synchron-Reluktanzmaschinen

M.Sc. Nijan Yogal (PTB Braunschweig) betreut durch Prof. M. Henke

Das globale Ziel dieser wissenschaftlichen Untersuchungen ist die Vereinfachung des Einsatzes von permanentmagneterregten Synchronmaschinen sowie Synchron-Reluktanzmaschinen in explosionsgefährdeten Bereichen der chemischen und petrochemischen Industrie.

Ein wichtiger Zwischenschritt ist dabei die Untersuchung und Kategorisierung der an der Maschine im Normalbetrieb sowie im Störfall auftretenden potentiellen Zündquellen. Ein wichtiger Punkt ist dabei auch die Untersuchung der Beeinflussung der verwendeten Materialien bzw. Magnetwerkstoffe im Rotor sowie der nicht kornorientierter Elektrobleche durch die beim späteren Einsatz der Maschine zu erwartenden Umwelteinflüsse.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Ermittlung des Einflusses verschiedener Lastzustände und denkbarer Frequenzumrichterfehler auf die Maschinenerwärmung und eine eventuelle partielle Entmagnetisierung der Magnetwerkstoffe. Hier sollen auch Berechnungen über die Methode der Finiten Elemente (FEM) zur Anwendung kommen. Ziel ist dabei auch die Entwicklung von FEM-Modellen, um die Erwärmung und das Verhalten der Permanentmagnete bei

verschiedenen Lastzuständen berechnen zu können, und somit die Zahl notwendiger Versuche bei der Typprüfung des Motors zu reduzieren.

Eine weiterer wichtiger Aspekt hinsichtlich des Explosionsschutzes ist dabei auch die Betrachtung potentiell zündfähiger Entladungen im Bereich der Statorwicklung aufgrund der transienten Überspannungen durch die Frequenzumrichterspeisung.

Methode für die thermische Modellierung elektrischer Traktionsmaschinen für Hybridfahrzeuganwendungen

M.Sc. Holger Hinrich betreut durch Prof. M. Henke

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Erarbeitung einer effizienten Methode zur Erstellung thermischer Modelle für elektrische Traktionsantriebsmaschinen in Parallelhybridfahrzeugen. Ziel ist es, durch Kombination von Prüfstands- und Fahrzeugversuch sowie durch den Einsatz von thermischen Netzwerken und 3D CFD-/CHT-Simulation maximale Simulationsgüte bei minimalem Aufwand zu erreichen. Die physikalisch verfügbare Komponente soll als thermisches Modell bestmöglich nachgebildet werden. Hierfür werden neue Ansätze zur Bestimmung der thermischen Kennwerte und Ansätze zur Quantifizierung und Lokalisierung der einzuleitenden, betriebspunktabhängigen Wärmemengen genutzt. Unterstützt wird die theoretische Betrachtung durch eine erweiterte Methodik der Erprobung im dynamischen Fahrzeugbetrieb und eine erweiterte Vorschrift zur zielgerichteten Erprobung der Einzelkomponente im Prüfstandbetrieb. Der Abgleich der verschiedenen Methoden belegt die Übertragbarkeit der Erkenntnisse. Das resultierende Modell kann direkt für den umgebenden Fahrzeugentwicklungsprozess zur Steigerung der Produktqualität vor Kunde genutzt werden.

Prädiktives Energiemanagement für autonome Elektrofahrzeuge mit Range Extender

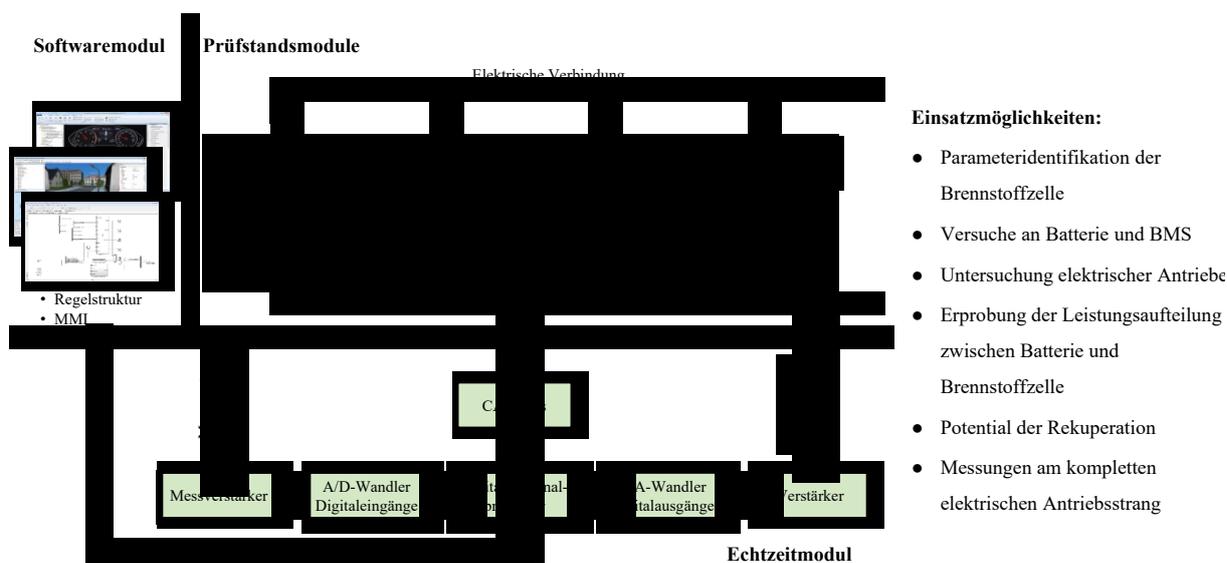
M.Eng. Sören Scherler, betreut durch Prof. M. Henke

Das an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Wolfenbüttel als kooperative Promotion durchgeführte Vorhaben thematisiert den energieoptimierten Fahrbetrieb eines autonomen Elektrofahrzeugs mit Brennstoffzelle als Range Extender.

Aus einer energieoptimierten Zielführung wird unter Berücksichtigung dynamischer Verkehrs- und Infrastrukturinformationen ein optimaler Geschwindigkeitsverlauf zur Erreichung des

Fahrtziels bestimmt, aus welchem die notwendige Antriebsleistung zur Erfüllung der Fahraufgabe prädiert werden kann. Kern des Vorhabens ist die modellbasierte Entwicklung eines prädiktiven Energiemanagements, welches mithilfe des prädizierten Leistungsbedarfs eine über die gesamte Fahrt wirkungsgradoptimierte Leistungsverteilung zwischen den Energiequellen Batterie und Brennstoffzelle berechnet. Hierbei werden Restriktionen wie minimal und maximal zulässiger Batterieladestand, Leistungsgrenzen der Energiequellen oder verfügbare Wasserstoffmenge während des Optimierungsverfahrens berücksichtigt.

Zur Parametrierung und Validierung der zugrundeliegenden Simulationsmodelle sowie zur Verifikation und Optimierung des entwickelten Energiemanagements unter Echtzeitbedingungen wird ein flexibel konfigurierbarer HiL-Prüfstand entwickelt und realisiert (vgl. Abbildung 1), welcher eine Vielzahl relevanter Anwendungsfälle abdeckt.



Struktur des flexibel skalierbaren HiL-Prüfstands bestehend aus Software-, Echtzeit- und Prüfstandsmodulen.

Segmentierung elektrischer Maschinen im Kfz-Antriebsstrang

M.Sc. Sebastian Schulte, betreut durch Prof. Henke

In der Arbeit wird die Bauweise einer permanentmagneterregten Synchronmaschine als Segmentmotor untersucht. Hierbei wird der Stator im Umfang segmentiert. Durch diese Bauweise kann auf komplexe Bauraumrestriktionen reagiert werden, wodurch sich Vorteile bei der Drehmomentbildung ergeben können.

Es werden die Einflüsse der Segmentierung auf das Drehmoment, sowie die Abhängigkeiten der elementaren Maschinenparameter wie z. B. die Polpaarzahl auf die Bauweise untersucht.

Durch eine optimierte geometrische Auslegung der Randbereiche sollen die Einflüsse der Randeffekte an den Segmentgrenzen minimiert und Designregeln abgeleitet werden.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse erfolgt der Aufbau eines Prototypen, welcher hinsichtlich Drehmomentrippel und elementarer Maschinenparameter wie z. B. Induktivitäten und Kurzschlussströme vermessen wird.

Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur Systemoptimierung eines elektrischen Antriebsstranges

M.Sc. Steffen Jäger, betreut durch Prof. M. Henke

Die Arbeit beinhaltet die Entwicklung eines Systemmodells bestehend aus Elektromotor samt Inverter mit der Möglichkeit gegebene Magnetkreisgeometrien, Wicklungsverteilungen und Taktverfahren zu variieren. Es wird eine FEM-Berechnung der magnetischen Flussdichte im Luftspalt mit einer Strombelagsberechnung in Matlab gekoppelt. Fokus liegt dabei auf der Abbildung und Analyse des Verhaltens des Antriebes als Gesamtsystem im Frequenzbereich. Die akustischen Eigenschaften des Antriebssystems werden mithilfe eines mechanischen Bewegungsmodells des Stator dargestellt.

Das Modell wird genutzt um den Einfluss unterschiedlicher Taktverfahren, Magnetkreisgeometrien sowie Wicklungsverteilungen auf die Effizienz und akustischen Eigenschaften des Antriebes zu bewerten. Auf dieser Basis wird eine Optimierungsstrategie für das Antriebssystem erarbeitet.

Modellierung der Verluste elektrischer Maschinen

M.Eng. Johannes Wende, betreut durch Prof. M. Henke

Ausgangspunkt der Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, welche es ermöglicht die Verlustleistungen aller Elemente einer elektrischen Maschine bestimmen und separieren zu können. Der Einfluss der jeweiligen Elementtemperaturen auf Werkstoffkennwerte, Regelungs- und Betriebsstrategie wird detailliert betrachtet.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden verwendet, um die bestehende Elektromagnetik von Traktionsmaschinen an einem Wechselrichter wirkungsgradoptimal zu betreiben. Hierzu werden Maschine und Wechselrichter durch für den gesamten Betriebsbereich gültige Modelle beschrieben.

Anhand dieser Modelle werden die optimalen Parameter für die gesamte Regelungsstruktur des Wechselrichters automatisiert ermittelt. Das Systemmodell und die ermittelten Parameter werden mittels Prüfstandversuchen verifiziert.

Optimierte Auslegung und Bewertung multiphasiger permanentmagnet-erregter Synchronmaschinen für Fahrzeuganwendungen

M.Sc. Julian Berlinecke, betreut durch Prof. M. Henke

Multiphasige Maschinen mit Strangzahlen > 3 eröffnen neue Potentiale und Freiheitsgrade in der Antriebsauslegung. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Eigenschaften und Merkmale multiphasiger Maschinen am Beispiel der permanentmagneterregten Synchronmaschine erarbeitet und aufgezeigt. Mögliche Vor- und Nachteile bezüglich antriebsrelevanter Kennziffern wie Drehmomentdichte, Effizienz oder Bauraumintegration werden gegenübergestellt und bewertet. Der Fokus liegt dabei primär auf den maschinenseitigen Parametern multiphasiger Antriebe. Übergeordnete Ziele der Arbeit sind die Verbesserung von Antriebseigenschaften durch Nutzung der Mehrphasigkeit sowie eine Vereinfachung der Maschinenauslegung.

3.4 Abgeschlossene Dissertationen

Systematische Konzeption und praktische Verifizierung von bürstenlosen elektronischen Rotorspeisungen für fremderregte Synchronmaschinen in mobilen Anwendungen

*Dr.-Ing. Julian Veitengruber (DLR Stuttgart) Promotion am IMAB TU Braunschweig, 2017
(Erstberichter Prof. M. Henke)*

Eine Entwicklungsherausforderung fremderregter Maschinengattungen stellt die notwendige Erregerstromübertragung dar, welche den Energiefluss auf den rotierenden

Läufer zu gewährleisten hat. Systemansätze auf Basis von Schleifringen und Kohlebürsten stellen hierbei eine häufig verwendete Lösung dar, um eine galvanische Verbindung auf drehende Teile zu ermöglichen. Da diese Bauteile jedoch drehzahlabhängiger Reibung und Verschleiß unterliegen, müssen sie in zyklischen Abständen erneuert werden. Um die Nachteile eines kontaktbehafteten Systemansatzes zu umgehen, kann dieser durch ein bürstenloses Energieübertragungssystem substituiert werden. Diese Form der kontaktlosen Rotorspeisung ermöglicht einen sicheren Betrieb auch unter rauen Umgebungsbedingungen und hohen Motordrehzahlen.

Eine aktuelle Herausforderung im Zuge der Entwicklung solcher kontaktlosen Rotorspeisungen stellt die Definition eines optimalen Systemkonzepts im Zielkonflikt

von Leistungsdichte, Effizienz sowie Kosten dar. Allgemeine Auslegungsroutinen und Designrichtlinien für solche Systemansätze sind dabei leider nicht vorhanden. Überdies erschwert eine breite Vielfalt an unterschiedlichen bekannten sowie möglichen Gestaltungsformen der bürstenlosen Rotorspeisung die Auslegung. Die Arbeit leistet hierbei einen wissenschaftlichen Beitrag zur Diskussion hinsichtlich der optimalen Integration einer bürstenlosen Rotorspeisung hoher Leistungsdichte in den Bauraum einer fremderregten Synchronmaschine der Leistungsklasse $S < 250\text{kVA}$. Die Hauptzielsetzung ist hierbei die systematische Konzeption und praktische Verifizierung eines methodischen Entwicklungsansatzes zur optimalen Auslegung einer hochintegrierten bürstenlosen elektronischen Rotorspeisung (BERS). Die systematische Konzeption des Übertragungssystems wird in Bezug auf definierte Gütekriterien und Randbedingungen in mobilen Applikationen.

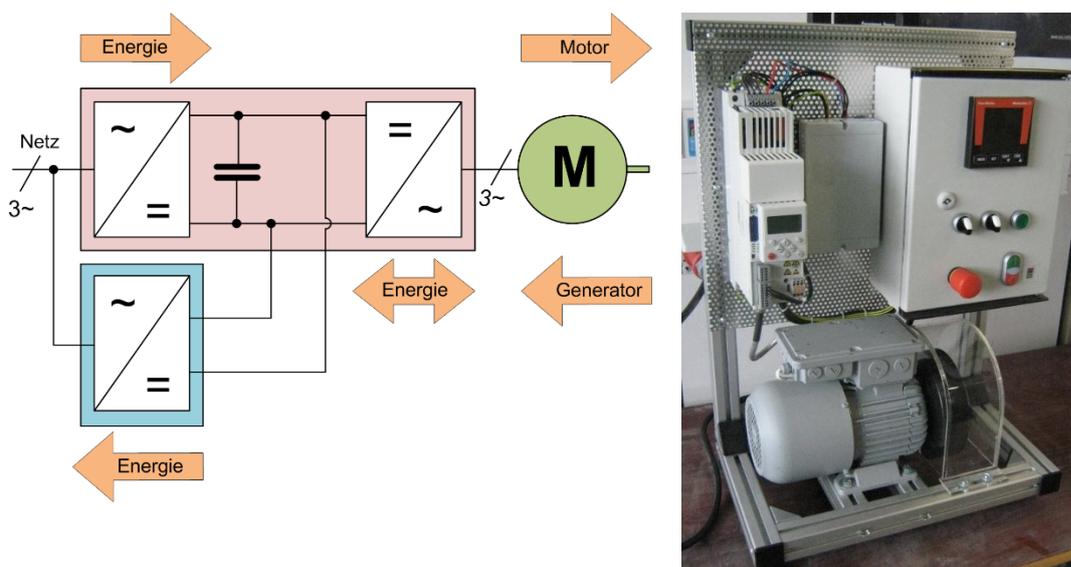
Rückspeisestromrichter mit geregeltm Zwischenkreisstrom

Dr.-Ing. Johann Austermann, Promotion am IMAB TU Braunschweig, 2018

(Kooperative Promotion mit der HS-Ostwestfalen-Lippe, Erstberichterin: Prof. R. Mallwitz, Zweitberichter: Prof. H. Borchering (HS-OWL))

Durch steigende Anforderungen bezüglich der Wirkungsgrade von Antriebskomponenten gewinnt die Nutzung von Bremsenergie in den letzten Jahren mehr und mehr an Bedeutung. In der Arbeit von Herrn Austermann wird ein Rückspeisestromrichter für Standardfrequenzumrichter vorgestellt. Hierbei wird der Leistungsbereich bis etwa 5 kW Rückspeiseleistung fokussiert, da ein großer Teil der industriellen Antriebe in diesem Leistungsbereich liegt, aber derzeit hierfür kein kostengünstiges Rückspeisekonzept existiert.

Beim Abbremsen von drehzahlvariablen elektrischen Antrieben fließt Bremsenergie zurück in den Zwischenkreis der typischerweise eingesetzten Frequenzumrichter. Diese Bremsenergie wird heute meistens in Bremswiderständen in Wärme umgesetzt und wird damit nicht genutzt. Innerhalb der Arbeit wurden Schaltungskonzepte untersucht, die an Stelle des Bremswiderstands eingesetzt werden können. Die Schaltungen ermöglichen das Rückspeisen der Bremsenergie in das Stromnetz und steigern somit die Energieeffizienz der elektrischen Antriebe. Der Fokus der Arbeit liegt auf einer Schaltungstopologie, die gegenüber dem Stand der Technik erhebliche Kosten- und Volumenvorteile bietet. Die Schaltung nutzt die Vorteile neuer Wide-Bandgap-Halbleiter in Kombination mit optimierten magnetischen Komponenten auf Basis von Eisenpulver. Messungen praktische Messungen belegen, dass mit der Schaltung bei Hubanwendungen ca. 25% der Energie der aufgenommenen Energie wieder zurückgespeist werden kann.



Rückspeiseschaltung (blau) angeschlossen an Standard-Frequenzumrichter (links)
Versuchsaufbau bestehend aus Motor mit Schwungrad, Frequenzumrichter und
Rückspeiseschaltung (rechts)

Auslegungsmethodik für Asynchronmaschinen unter Berücksichtigung der Reichweitenprädiktion im Elektrofahrzeug

*Dr.-Ing. Anna-Lena Menn, Promotion am IMAB TU Braunschweig, 2018
(Erstberichter Prof. M. Henke)*

Die Arbeit liefert einen Beitrag zur Bewertung des Einsatzes von Asynchronmaschinen in einem rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeug. Diese Bewertung bezieht sich auf Untersuchungen im Hinblick auf eine mögliche Reichweitenerhöhung. Um den Einfluss einer elektrischen Maschine an der Reichweite eines solchen Fahrzeugs untersuchen zu können, wird eine spezielle Auslegungsmethodik angewendet. Ausgehend von Anforderungen, die an die elektrische Antriebseinheit, gestellt werden, wird im ersten Schritt der Methodik ein Maschinenentwurf erstellt. Dieser wird nach erfolgreicher Beendigung mittels einer zweistufigen Reichweitenprädiktion auf sein Potential zur Reichweitenerhöhung untersucht. Die erste Stufe der Reichweitenprädiktion basiert auf simulativen Berechnungen mittels Wirkungsgrad-kennfeldern und Gesamtfahrzeugsimulationen. Die zweite Stufe, die realitätsnahe Reichweitenprädiktion, enthält Untersuchungen, die mit einem real modellierten Elektrofahrzeug durchgeführt werden und die somit auf realen Streckendaten basieren.

Zwei wichtige Einflüsse, die in Bezug auf die Reichweitenerhöhung behandelt wurden, sind die wirkungsgradoptimale Auslegung und die wirkungsgradoptimale Regelung. Beide Aspekte werden berücksichtigt. Die wirkungsgradoptimale Auslegung begleitet in Form von Hinweisen für den Ausleger den Auslegungsprozess, die wirkungsgradoptimale Regelung wird in der Reichweitenprädiktion berücksichtigt.

Contribution to the winding theory – Introduction of a unified method for the treatment of winding topology

*Dr.-Ing. Mang Cai, Promotion am IMAB TU Braunschweig, 2017
(Erstberichter Prof. W.-R. Canders)*

In der Arbeit werden Methoden zur Behandlung von Wicklungstopologien systematisch klassifiziert. Darüberhinaus wird eine einheitliche und deterministische Methode entwickelt, um Wicklungstopologien zu analysieren und ein optimiertes Wicklungsdesign daraus abzuleiten. Die Methode wird zunächst mathematisch formuliert und anschließend in höheren Programmiersprachen (Python) implementiert. Es schließt sich die Anwendung auf konkrete Entwurfprozesse für 3- und 6-phasige Systeme an.

Aspekte analytischer und numerischer Kraftberechnungsmethoden bei der Auslegung permanentmagneterregter Synchronmaschinen

*Dr.-Ing. Nils Domann, Promotion am IMAB TU Braunschweig, 2018
(Erstberichter Prof. W.-R. Candors)*

Die Arbeit behandelt Verfahren zur Kraftberechnung in elektromagnetischen Kreisen und die Auslegung elektrischer Maschinen. Basierend auf den Maxwell'schen Gleichungen werden Kraftberechnungsmethoden vorgestellt und verglichen. Dabei werden die verwendbaren Materialmodelle analysiert und es wird gezeigt, dass verschiedene Prozeduren zu unterschiedlichen lokalen Kraftverteilungen führen – trotz identischer physikalischer Grundlagen. Weiterhin wird in der Arbeit ein analytisches Modell zur Kraftberechnung entwickelt, welches insbesondere parasitäre Effekte und Exzentrizitäten berücksichtigt. Die in der Arbeit entwickelten Verfahren zeigen sich bezüglich ihrer Rechengeschwindigkeit sehr vorteilhaft. Die Arbeit schließt mit Betrachtungen zu speziellen Wicklungstopologien, die geringe Wicklungsüber- und unterwellen bei gleichzeitig hohem Wicklungsfaktor beinhalten.

4 Lehre

Auch in 2017/2018 wurden wieder interessante Lehrveranstaltungen für unsere Studierenden angeboten. Die Vorlesungen des IMAB beinhalten theoretisches Grundlagenwissen zu allen Komponenten und Systemen im elektrischen Antrieb, gepaart mit praktischen Anwendungsbeispielen aus Industrie und Forschung und sind in zahlreiche Studiengänge der TU Braunschweig eingebunden.

In den Praktika werden die vermittelten Inhalte anhand von exemplarischen Hardwareaufbauten und Prüfstandsversuchen unter praktischen Gesichtspunkten behandelt.

Eine neu hinzugekommene Lehrveranstaltung ist die Vorlesung "Elektrotechnik II für Maschinenbau". Sie richtet sich an Studierende des Maschinenbaus im Bachelorstudium und schließt inhaltlich an die Vorlesung "Elektrotechnik I für Maschinenbau" an. Basierend auf den dort vermittelten grundlegenden Kenntnissen der Elektrotechnik werden in dieser Vorlesung zunächst zeitlich veränderliche Vorgänge in elektrischen Netzwerken und anschließend die Themengebiete "Drehstromsysteme", "Elektrische Maschinen" und "Leistungselektronik" behandelt.

4.1 Vorlesungen und Praktika in 2017/18

Am IMAB wird in zahlreichen Vorlesungen und Praktika Grundlagenwissen zur elektromechanischen Energiewandlung vermittelt. Die Vorlesungsinhalte sind dabei eng verzahnt mit aktuellen Forschungsthemen und die am IMAB stattfindenden Praktika geben einen fundierten Einblick in die anwendungsorientierte Forschung des Instituts.

	Vorlesungstitel	DozentIn	Semester
Bachelor	Grundlagen der elektrischen Energietechnik	Prof. Henke Prof. Mallwitz	SS
	Grundlagen der Energietechnik für Umweltingenieure	Prof. Henke	WS
	Elektrische Antriebe	Prof. Henke	WS
	Grundsaltungen der Leistungselektronik	Prof. Mallwitz	WS
	Elektrotechnik II für Maschinenbauer	Prof. Mallwitz	SS
	Studienseminar Elektromechanische Energieumformung	Dr. Tareilus	SS/WS
Master	Elektrische Antriebe für den spurgebundenen Verkehr	Prof. Henke	SS
	Drehstromantriebe und deren Simulation	Prof. Henke	SS
	Entwurf elektrischer Maschinen	Prof. Henke	WS
	Elektrische Antriebe für Straßenfahrzeuge	Prof. Henke	WS
	Angewandte Leistungselektronik	Prof. Mallwitz	SS
	Leistungselektronische Systeme	Prof. Mallwitz	WS
	Studienseminar Elektromechanische Energieumformung	Dr. Tareilus	SS/WS

Praktika	Durchführung	Semester
Praktikum Leistungselektronik	Langmaack, Dietrich, Siebke, Schobre, Uzlu, Rohn, Fricke, Lippold	WS
Praktikum Elektrische Maschinen	Langmaack, Schäfer, Balasubramanian, Heister, Tareilus	WS
Antriebssysteme für E-Fahrzeuge	Schillingmann, Heister, Schäfer, Dietrich, Siebke, Schobre, Hain	SS
Labor Master Elektromobilität	Dietrich, Siebke	WS

Lehrveranstaltungen für Bachelorstudiengänge

Grundlagen der elektrischen Energietechnik

Die Grundlagenvorlesung für Bachelor im vierten Semester bietet den Studierenden im Sommersemester eine Übersicht der Energietechnik und behandelt neben den Bereichen der Energieübertragung und der elektrischen Antriebe auch den Bereich der Leistungselektronik. Der Teil ‚Elektrische Antriebe‘ wird von Prof. Henke gelesen und behandelt grundlegende Wirkzusammenhänge der elektromechanischen Energiewandlung in elektrischen Maschinen. Der Abschnitt ‚Leistungselektronik‘ wird von Prof. Mallwitz gelesen und führt die Studierenden an die Bauelemente, die Anwendungsgebiete und die grundlegenden Schaltungskonzepte der Leistungselektronik heran. Da diese Vorlesung noch vor der Vertiefung der Studierenden in die einzelnen Richtungen gehalten wird, stellt sie eine gute Möglichkeit dar, interessierte Studierende für den Besuch vertiefender Fächer zu werben.

Elektrische Antriebe

In dieser Veranstaltung werden den Studierenden grundsätzliche Zusammenhänge über die Kraftbildung in Elektromagnetischen Systemen aufgezeigt. Auf dieser Basis werden im Weiteren alle relevanten Typen von Elektroantrieben und deren Funktionsweise erläutert. Dazu gehören Gleichstrom-, Asynchron- und Synchronmaschine und exotische Bauformen wie die Transversalflussmaschine. Dabei wird auch zwischen rotorischen und translatorischen Motoren unterschieden und die entsprechende mechanische Umsetzung aufgezeigt. Die Veranstaltung befasst sich darüber hinaus mit der Wirkungsgradoptimierung solcher Maschinen. Dazu gehört das Arbeiten und Verstehen von Wirkungsgradkennfeldern und damit verbundene Rückschlüsse über die Einsatzmöglichkeiten der Antriebe und deren Optimierungspotenzial. Auf der anderen Seite werden verschiedenste Ansätze für die Entwicklung von E-Antrieben erläutert, von der groben Variation geometrischer Aspekte bis hin zur Nutzung von Finite-Elemente-Software zur detaillierten Simulation. Natürlich spielen auch die verschiedenen Betriebsarten der E-Maschinen eine wichtige Rolle, ob einfach am Drehstromnetz oder mit einem Frequenzumrichter betrieben. Für beide Alternativen wird das notwendige Wissen über Art und Weise der einzuprägenden Klemmgrößen vermittelt um E-Antriebe effizient zu betreiben.

Grundsaltungen der Leistungselektronik

Die Veranstaltung „Grundsaltungen der Leistungselektronik“ (ehemals Elektrische Energieumwandlung) findet regelmäßig im Wintersemester statt. Sie richtet sich an Studierende der Elektrotechnik im Bachelorstudium und schließt inhaltlich an die Vorlesung „Grundlagen der Energietechnik – Teil 3“ an. Behandelt werden Grundsaltungen wie Gleichstromsteller und Topologien von DC/DC-Wandlern. Des Weiteren werden die Eigenschaften und das Verhalten von aktiven und passiven leistungselektronischen Komponenten eingehend betrachtet. Notwendige Peripherie wie Messstellen und Treiberschaltungen werden ebenfalls thematisiert.

Grundlagen der Energietechnik für Umweltingenieure

Studierende der Umwelttechnik bekommen hier im dritten Teil der Vorlesung von Prof. Henke die Grundlagen der elektromechanischen Energieumformung vermittelt. Der Aufbau und die physikalische Funktionsweise von marktüblichen elektrischen Antrieben werden behandelt und es werden grundlegende mathematische Beschreibungsmöglichkeiten der Antriebssysteme erarbeitet. Dies soll die Studierenden der Umwelttechnik in die Lage versetzen, Antriebssysteme in der Praxis einschätzen und anwenden zu können.

Elektrotechnik II für Maschinenbau

Diese Vorlesung im Sommersemester richtet sich an Studierende des Maschinenbaus im Bachelorstudium und schließt inhaltlich an die Vorlesung Elektrotechnik I für Maschinenbau an. Basierend auf den dort vermittelten grundlegenden Kenntnissen bezüglich elektro- bzw. magnetostatischer Größen, werden in dieser Vorlesung von Prof. Mallwitz zunächst zeitlich veränderliche Vorgänge in elektrischen Netzwerken behandelt. Mit deren Kenntnis werden dann anschließend die Themengebiete "Drehstromsysteme", "Elektrische Maschinen" und "Leistungselektronik" näher betrachtet.

Lehrveranstaltungen für Masterstudiengänge

Angewandte Leistungselektronik

Die Mastervorlesung „Angewandte Leistungselektronik“ findet immer im Sommersemester statt und schließt an die Bachelorvorlesung „Grundsaltungen der Leistungselektronik“ an.

In der Vorlesung erlangen die Studierenden Wissen über gesetzliche Vorgaben bezüglich Elektromagnetischer Verträglichkeit. Sie lernen Aufbau, Funktion, Anwendung und Auslegung von passiven und aktiven Filterschaltungen. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist es, einen möglichst sinusförmigen Netzstrom in Phase mit der Netzspannung mit Hilfe sogenannter Power Factor-Correction (PFC) zu erhalten. Die Studierenden sollen die Funktionsweise und die Anwendung von Resonanz-Stromrichtern und quasi-Resonanzschaltungen - auch anhand von Simulationen - verstehen. Abschließend sollen sie den Aufbau und die Funktionsweise von Multi-Level-Umrichtern nachvollziehen können. Mit Hilfe der Vorlesung sollen die Studierenden in der Lage sein, entsprechende Baugruppen konzeptuell zu entwerfen, zu dimensionieren und (auch per Simulation) zu analysieren.

Drehstromantriebe und deren Simulation

Die Mastervorlesung „Drehstromantriebe und deren Simulation“ von Prof. Henke findet im Sommersemester statt und vermittelt Kenntnisse zur Modellbildung und Simulation der Komponenten in elektrischen Antriebssystemen. Dies beinhaltet neben elektrischen Maschinen die Betrachtung unterschiedlicher Lasten und Lastverhalten auf mechanischer Seite sowie die Leistungselektronik und deren Ansteuerung auf elektrischer Seite. Dabei werden die Verfahren der Raumzeiger- und der Pulsweitenmodulation in der Abbildung im Rechner und im Zusammenwirken mit der elektrischen Maschine behandelt. Die Betrachtung zusätzlicher Verlustmechanismen rundet die Vorlesung ab. Hier wird auf die Entstehung von Lagerströmen, und auf Oberschwingungsverluste bei Asynchronmaschinen infolge nichtsinusförmiger Speisung eingegangen.

Elektrische Antriebe für den spurgebundenen Verkehr

In dieser Veranstaltung werden den Studierenden von Prof. Henke ausführliche Inhalte rund um das Thema elektrische Antriebstechnik im Schienenverkehr vermittelt, wobei das Hauptaugenmerk auf Antriebskonzepten im Bereich Personenverkehr liegt. Die Inhalte dieser Veranstaltung umfassen verschiedene Aspekte, dazu gehören die Anforderungen, die an moderne Züge gestellt werden. Darauf aufbauen lässt sich die Dimensionierung eines elektrischen Antriebs für Personen-, Güter-, und Hochgeschwindigkeitszüge. Daneben werden auch gegenwärtige und innovative Antriebskonzepte für Stadt- und Fernverkehr beleuchtet. Dazu gehören u.a. die Linear- und Schwebetechnik. Diese Vorlesung zielt verstärkt auf eine Vertiefung der Kenntnisse im Bereich der Komponenten ab und vermittelt detaillierte Kenntnisse in den Bereichen Antriebsmaschinen und Leistungselektronik für die Bahntraktion.

Elektrische Antriebe für Straßenfahrzeuge

In dieser Veranstaltung von Prof. Henke werden den Studierenden ausführliche Inhalte rund um das Thema elektrische Antriebstechnik im Straßenverkehr vermittelt, wobei das Hauptaugenmerk auf Antriebskonzepten im Bereich PKW liegt. Die Inhalte dieser Veranstaltung umfassen verschiedene Aspekte, dazu gehören die Anforderungen, die an die Elektro- und Hybridfahrzeuge der Gegenwart und Zukunft gestellt werden. Darauf aufbauen lässt sich die Dimensionierung einer elektrischen Antriebseinheit für einen Antriebsstrang. Aber nicht nur die reinen E-Fahrzeugarchitekturen werden beleuchtet, sondern auch die Hybridantriebe. Somit ist es nötig grundlegende Kenntnisse der Verbrennungskraftmaschine zu vermitteln. Ebenso wird detailliert auf die unterschiedlichen hybriden Antriebstopologien und die notwendige Betriebsstrategie eingegangen. Der zweite Teil der Veranstaltung zielt auf die Vertiefung der Kenntnisse im Bereich der Komponenten ab und vermittelt detaillierte Kenntnisse im Bereich Energiespeicher und automotive Antriebssysteme.

Entwurf elektrischer Maschinen

Die Studierenden lernen in dieser Vorlesung von Prof. Henke den Entwurfsprozess elektrischer Maschinen kennen. Wichtige Spezifikationsgrößen als auch der konkrete Maschinenentwurf stehen im Vordergrund. Hierbei findet ausgehend vom systematischen Wicklungsentwurf die

Wicklungsauslegung statt und es schließt sich eine elektromagnetische Gesamtauslegung unter Nutzung von numerischer Feldberechnung an. Ebenso werden das dynamische Verhalten sowie thermische Einflüsse detailliert betrachtet.

Leistungselektronische Systeme

In der Mastervorlesung „Leistungselektronische Systeme“ von Professorin Mallwitz werden den Studierenden leistungselektronische Systeme als der Verbund aus den zuvor in den Grundlagen erlernten Einzelbaugruppen und Schaltungstopologien nähergebracht.

Neben der Vermittlung von theoretische Konzepten liegt der Fokus auch auf Systemen der Leistungselektronik mit einem realen Anwendungszweck, beispielsweise für PV-Anlagen, Windenergieanlagen oder auch Fahrzeugantrieben. Dabei wird in der Veranstaltung immer wieder die Frage nach den Anforderungen an die Leistungselektronik für den konkreten Anwendungsfall gestellt.

Im Wintersemester 2018/19 wird die Veranstaltung unter dem Titel „Erweiterte Leistungselektronik“ mit neuer Struktur angeboten und Erfahrungen aus den Durchläufen seit der Einführung werden eingepflegt.

Praktika

Praktikum Leistungselektronik

Im Praktikum Leistungselektronik werden verschiedene Themen der Leistungselektronik, insbesondere für die Antriebstechnik, unter praktischen Gesichtspunkten behandelt. Zu den Themen gehören die Simulation und Auslegung leistungselektronischer Schaltungen wie Gleichstromsteller und Wechselrichter, die Behandlung typischer Peripherie wie Messstellen für Ströme und Spannungen oder Treiberschaltungen für Leistungshalbleiter, Grundlagen der Regelungstechnik für elektrische Antriebe sowie die Programmierung eines Demonstrationswechselrichters für einen Kleinantrieb.

Praktikum Elektrische Maschinen

Im Praktikum Elektrische Maschinen werden die wichtigsten elektrischen Maschinen unter praktischen Gesichtspunkten behandelt. Zunächst werden Funktionsweise, Schaltungsarten und Anwendung der Gleichstrommaschine untersucht. Anschließend werden die Asynchronmaschine und die Synchronmaschine als klassische Vertreter der Drehfeldmaschinen betrachtet. Das prinzipielle Betriebsverhalten wird zunächst für Netzspeisung analysiert, um dann am Beispiel der wechselrichtergespeisten Asynchronmaschine die Möglichkeiten der Drehzahlregelung mittels moderner Leistungselektronik kennenzulernen. Abschließend wird der praxisnahe Einsatz von modernen Drehfeldmaschinen auch am Beispiel von Linearantrieben für Werkzeugmaschinen behandelt.

Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge

In dieser Veranstaltung werden den Studierenden ausführliche praktische Inhalte rund um das Thema elektrische Antriebstechnik im Straßenverkehr vermittelt. Den Studenten wird ein vertiefter Einblick in das Gesamtsystem „Elektrofahrzeug“ gewährt und soll ein Kennenlernen aller wichtigen Komponenten des Antriebsstrangs ermöglichen. Um dies zu ermöglichen, wird von den Studierenden mit Hilfe der Simulationssoftware SIMULINK ein Gesamtfahrzeugmodell, welches ein Elektrofahrzeuge abbildet, erstellt und parametrisiert. In Kolloquien werden alle wichtigen Informationen über die Einzelkomponenten des Fahrzeugs besprochen und diskutiert. Begleitet wird das Praktikum von einem E-Maschinen-Prüfstandsversuch, in dem eine Maschine vermessen wird und die Ergebnisse fließen in die Simulation mit ein.

Labor zum Masterstudiengang Elektromobilität

Das Praktikum "Elektromobilität" für Studierende des gleichnamigen Masterstudiengangs wird von fünf Instituten gestaltet. In diesem Praktikum werden zum einen die Grundlagen in den Bereichen Batterieforschung und -produktion, Antriebe, leistungselektronische Systeme, elektrische Energieversorgung sowie Fahrodynamik behandelt und zum anderen in praktischen Versuchen exemplarisch vertieft. Der vom IMAB gestaltete Teil ist den elektrischen Maschinen und leistungselektronischen Systemen im Fahrzeug gewidmet, verbunden mit Prüfstandsmessungen an einem elektrischen Antrieb. Daneben gibt es noch Beiträge der anderen Institute in Form von Fertigung einer Labor-Batteriezelle, Messungen an Batteriemodulen, Hochvoltbordnetz und Ladesäulen sowie Versuchen im Bereich Längs-, Quer- und Vertikaldynamik eines Fahrzeugs.



Praktische Versuche und Aufbauten am IMAB

4.2 Exkursionen

Exkursion 2017

B.Sc. Felix Klabunde, M.Sc. Florian Lippold

Die Exkursion im Jahr 2017 ging in Richtung Emsland. Die Gruppe bestand aus 15 Studierenden und 3 Betreuern. Übernachtet wurde in den Jugendherbergen in Münster und in Leer. Es wurden die folgenden vier Stationen besucht:

Station 1: Schöma in Diepholz

Schöma ist ein führender Hersteller von Tunnellokomotiven mit Sitz in Diepholz. Neben dem Bergbau werden die Lokomotiven auch als Torfbahnen und als Werkstattlokomotiven in U-Bahntunneln eingesetzt. Durch einen Werksrundgang und einer Präsentation über die Technik wurden uns die speziellen Anforderungen dieser Lokomotiven sowie aktuelle Entwicklungen bezüglich Hybrid- und Elektrolokomotiven gezeigt.

Station 2: Benteler in Lingen

Im Wald versteckt bei Lingen haben wir das Elektrostahlwerk von Benteler gefunden. Hier wird Recyclingstahl mit Strom im Lichtbogenofen zu neuem Stahl verarbeitet. Das Stahlwerk liegt sehr nahe an einem Kraftwerk, wobei das nahegelegene Umspannwerk wohl weit wichtiger für den Betrieb ist. Der größere der beiden Lichtbogenöfen hat eine Leistungsaufnahme von ca. 130 MW und besitzt wassergekühlte Stromkabel. Bei der sehr interessanten Führung durften wir tief in die Kessel gucken und einem Anstich beiwohnen.

Station 3: Meyer-Werft in Papenburg

In der Meyer-Werft in Papenburg haben wir einen tiefen Einblick in den Bau von Kreuzfahrtschiffen erhalten. Die Meyer-Werft hat das größte überdachte Trockendock der Welt, in dem Kreuzfahrtschiffe für mehr als 6000 Passagiere gebaut werden können. Die Dimensionen dieser schwimmenden Städte sind außergewöhnlich. Aufgrund dieser Dimensionen und der großen Bedeutung von Theatern auf Kreuzfahrtschiffen gilt die Meyer-Werft auch als größter Theaterbauer Deutschlands. Während dem Rundgang konnten den Bau zwei neuer Kreuzfahrtschiffe für die Norwegian Cruise Line und AIDA Cruises beobachten.

Station 4: Enercon in Aurich

Der Windenergieanlagenhersteller Enercon in Aurich war die letzte Station dieser Exkursion. Enercon ist der größte Hersteller von Windenergieanlagen in Deutschland. Die Anlagen von Enercon können aktuell bis zu 7,6 Megawatt Nennleistung erreichen und können bis zu 200 Meter an Höhe erreichen. Neben der Besichtigung einer Gondel (auf dem Boden) wurde uns auch die Blattfertigung gezeigt. Die Blätter können über 60 Meter lang sein. Es war sehr beeindruckend an den fertigen Rotorblättern vorbeizulaufen und die Dimensionen großer Windenergieanlagen zu spüren.

Fazit:

Die Exkursion in Richtung Emsland erhielt von den Teilnehmern positives Feedback. Es wurden viele interessante Einblicke gesammelt und Kontakt zu Unternehmen hergestellt.



Exkursionsgruppe bei Fa. Schöma

Exkursion 2018

B.Sc. Felix Klabunde, M.Sc. Florian Lippold

Die Exkursion im Jahr 2018 ging in Richtung Mannheim. Dafür haben sich insgesamt 21 Studierende zusammengefunden. Übernachtet wurde in den Jugendherbergen in Mannheim und Heidelberg. Es wurden folgende fünf Stationen besucht:

Station 1: Linde Material Handling in Aschaffenburg

Hinter dem Namen Linde Material Handling versteckt sich die Transportsparte von Linde; hier werden Gabelstapler in unterschiedlicher Größe und Ausführung gebaut. Neben konventionellen Staplern mit Verbrennungskraftmaschine werden auch Elektrostapler mit Bleiakku und neuerdings auch mit Li-Ionen-Technologie produziert. Hier erhielten wir eine interessante Werksführung, bei welcher wir alle Stationen des Staplerbaus kennenlernen durften.

Station 2: Daimler in Mannheim

Bei Daimler in Mannheim haben wir die Produktion von Linien- und Reisebussen, vom Schweißen der Karosserien bis hin zur fertigen Ausstattung, hautnah erleben dürfen. Vieles davon geschieht von Hand. Auch bei Daimler arbeitet man intensiv an der Elektromobilität.

Station 3: Mannheimer Hafen

Der Mannheim Hafen ist einer der größten Binnenhäfen in Deutschland. Nachdem wir die Aussicht auf dem Dach des Verwaltungsgebäudes (12. Stock) genossen haben, wurde uns die Landstromversorgung für Schiffe demonstriert. Diese soll dafür sorgen, dass Kreuzfahrtschiffe während sie im Hafen liegen nicht ihre Dieselmotoren für die Stromversorgung benutzen müssen. Danach wurden uns noch ein ca. 100 Jahre alter, deaktivierter Ladekran für 100t und eine der ältesten genieteten Drehbrücken Deutschlands gezeigt. Wir konnten dabei zu sehen, wie die Drehbrücke für den Autoverkehr gesperrt wurde und gedreht wurde.

Station 3: Autovision in Altlußheim

Im Autovisionmuseum in Altlußheim haben wir viele interessante Hintergründe zur Automobilgeschichte kennengelernt. Neben der Besichtigung vieler Oldtimer haben wir auch ein Bereich mit den ältesten Fahrrädern der Welt sowie eine Zukunftsecke mit Elektro- und Wasserstoffautos begutachtet.

Station 4: LTI Motion in Lahnau

Die Firma LTI Motion mit Sitz in Lahnau ist im Bereich Automatisierungstechnik und Elektromotoren tätig. Neben interessanten Präsentationen zu neuen Entwicklungen und der Firma haben wir eine ausführliche Führung durch die Motoren- und Platinenfertigung bekommen. Hier konnte man sehen, wie Elektromotoren zusammengesetzt werden und wie eine moderne Platinenfertigung für moderne Antriebsregler aufgebaut ist.

Fazit:

Für die Exkursion in Richtung Mannheim gab es positives Feedback seitens der Teilnehmer. Es war sehr interessant auch Einblicke in Unternehmen wie den Hafen Mannheim zu gewinnen, die nicht direkt im Bereich der Elektrotechnik arbeiten.



Exkursionsgruppe bei Linde Material Handling

4.3 Zusammenstellung studentische Arbeiten am Institut

Seminarvorträge

Junyuan Huang	Elektroantrieb von (zivilen) Drohnen
Simon Wilker	Der perfekte Antriebsstrang – Wie simuliert man ihn richtig?
Jan Illgen	Aktueller Stand autonom fahrender Fahrzeuge
Frank Oberst	Internet of Things für die Vernetzung von leistungs-elektronischen Systemen
Nils Wolter	Redundante Antriebe und ihre Anwendungen
Wilhelm Aschenbrenner	Aktuelle Prüfstandtechnik
Alexander Lührmann	Vom Verbrenner zum Elektroauto in der eigenen Garage
Jin Hao	Überblick über Kleinspannungsantrieb im KFZ (48 Volt)
Christian Körte	Hybriderregte Elektrische Maschinen
Christopher Wruck	Die Verlustanalyse der Asynchronmaschine
Tobias Fricke	Charakterisierung von Leistungs-MOSFETs
Niklas Aksteiner	Leistungselektronische Komponenten von Windenergieanlagen der MW-Klasse
Christian Klein	Batteriespeichersysteme im Megawattbereich
Gerrit Braun	Möglichkeiten zum Erzeugen von grafischen Benutzeroberflächen mit geringem Hard- und Softwareaufwand
J. Gilvanni Kwajiep Seuyip	Entwicklung, Stand und Trends bei der Hochspannungsgleichstromübertragung (onshore und offshore)
Marc-Daniel Bednarek	Der Delta-Sigma-ADC - Funktion und Anwendung in der Leistungselektronik
Robert Urban	Brennstoffzellen
Tobias Kreußel	Hyperloop - Transport der Zukunft?
Cedrick Guy Kue Mouoffo	Thermische Eigenschaften von Leistungshalbleitern
Daniel Kaufmann	Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen mit Schwerpunkt Gütertransport
Matthias Raisich	Effizienzsteigerung durch den Einsatz von Gleichstromnetzen in der Gebäudetechnik
Gerrit Bremer	Schattenseiten der Ressourcenbeschaffung für die Elektromobilität

Uwe Schlenker	Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen
Dirk Fischer	Elektrische Antriebssysteme in Unterwasserfahrzeugen
Malte Stock	Herausforderungen und Grenzen autonomer Elektrofahrzeuge als Transportsystem
Peter Reimers	Hochdrehzahlantriebe - von der Carrerabahn über den Zahnarztbohrer zur Vakuumpumpe
Yin Li	Aktueller Entwicklungsstand und Ausführungsbeispiele von Elektro-Lastenfahrrädern
Lennard Waschke	Anwendungsmöglichkeiten künstlicher neuronaler Netze in der Leistungselektronik
Daniel Schubert	Echtzeitfähige Feldbussysteme – Möglichkeiten, Funktionsweise und Implementierungsaufwand
Florian Wolgast	Elektrofahrzeugtechnik um 1900
Timo Haakert	Aktuelle Fertigungsmöglichkeiten mittels 3D-Druckverfahren
Tim Knobbe	Vergleich verschiedener Controllerfamilien zum Einsatz in der Leistungselektronik
Jonas Tietge	Aktueller Entwicklungsstand und Anwendungsbeispiele von Elektroflugzeugen für die Personenbeförderung
Hardy van Limburg	Integration von Leistungshalbleitern in Platinwn durch Embedded Technologien
Edgar Zeitler	Übersicht über die Antriebsstrangkomponenten aktueller Elektro-Sportwagen
Andrii Shtefaniuk	Aktuelle Speichertechnologien, neue Forschungsansätze und Trends
Eike Leon Wendt	Aktueller Entwicklungsstand der Aufbau- und Verbindungstechnik von Leistungshalbleitern
Henrik Wienken	Power to Gas Technologie - Potenziale und Herausforderungen
Clemens Schmidt	Aktuelle Offshore-Windpark-Projekte - Trends bei Technik, Volumen und Anforderungen

Bachelorarbeiten

Sven Ripken	Auslegung des Kühlsystems für einen elektrischen Antriebsstrang eines E-Fahrzeugs
Nils Wolter	Entwurf einer Implementierung eines Opera-2D-Modells in MATLAB/Simulink
Jan Baumann	Vergleich unterschiedlicher Rotorstrukturen für eine Außenläufer-Synchronreluktanzmaschine
Michael Ochs	Entwurf und Aufbau eines ultrakompakten Schalt-netzteils
Vjaceslav A. Suchorov	Untersuchung von Stromsensoren in der Leistungs- elektronik
Oliver Lassek	Entwurf und Aufbau einer Solar-Inselversorgung für mobile Anwendungen mit DC- Netzen kleiner Spannung
Tobias Kreuzel	Reduzierung der Normalkraft eines Linear motors am Beispiel eines Pedelec-Motors
Felix Klabunde	Untersuchung und Weiterentwicklung von ultrakompakten Schaltnetzteilen in der Leistungsklasse von 65 W
Christian Klein	Entwurf und Aufbau eines 1kW DC/DV Wandlermoduls mit GAN-Leistungshalbleitern
Wahied Noorzai	Bestimmung von Messunsicherheiten bei der Wirkungsgradermittlung permanentmagneterregter Synchronmaschinen über direkte Messmethode
Christian Körte	Auslegung einer hybriderregten Synchronmaschine für den Einsatz in einem 48-Volt-Mildhybrid-Antrieb
Lukas Stichnoth	Entwicklung einer CAN-basierten Funktelemetrieinheit mit Webinterface für das Versuchsfahrzeug IMAB-Racer
Hendrik Gundelach	Elektromagnetische Auslegung einer hochdynamischen elektrischen Maschine für den Einsatz als Brennstoffzellen-Verdichterantrieb
Robin Frederick Herman	Untersuchung einer Methode mittels Magnetfeldmessung für die Spulenpositionierung bei induktiver Energieübertragung
Florian Wolgast	Untersuchung zur Regelung des gemeinsamen Gleichspannungszwischenkreises unterschiedlicher leistungselektronischer Wandler
Cornelius Freybott	Entwurf des Antriebsstrangs eines e-Bikes mit einem seriellen Hybridantrieb

Rene Schilling Johnson	Entwurf und Aufbau eines 3 kW DC/DC-Wandlers für die Bordnetzversorgung eines Elektrofahrzeugs
Christian Schomburg	Entwurf einer Steuerplatine für einen SiC-Wechselrichter mit intelligenten Treiberstufen
Tim Knobbe	Virtueller Prüfstand zur spannungsoptimalen Regelung von 48V E-Maschinen für die Hybridisierung von Personenkraftwagen

Masterarbeiten

Tobias Pundt	Design und Aufbau eines bidirektionalen Batteriestromrichters mittlerer Leistung
Christopher Wruck	Test und Simulation von Antriebsmaschinen im Elektrofahrzeug mittels Kennlinienskalierung im Umfeld einer HiL-Simulation
Jannik Gutbrod	Auslegung eines elektrischen Kardanwellenantriebes für ein Leichtbau-Lastenfahrrad
Boyke Vehring	Modelling, design and validation of a wireless cadence measurement sensor for light electric vehicles
Feng Chen	Entwurf einer permanentmagneterregten Synchronmaschine mit integriertem Magnetgetriebe
Bin Shen	Aufbau eines leistungsfähigen bidirektionalen Resonanzwandlers
Eike Gellermann	Investigation of incidents of inverter-fed permanent magnet excited synchronous machines in explosive atmospheres
Zhou Yu	Untersuchungen zum Vergleich von Energieverbräuchen in Elektrofahrzeugen
Christian Altner	Optimierung der Geschwindigkeits- und Zugregelung der Tauchrollen einer Bandbehandlungsanlage
Cengiz Uzlu	Aufbau eines universellen Demonstrationswechselrichters
Timo Janssen	Optimierung, Aufbau und Inbetriebnahme eines bidirektionalen Batteriestromrichters
Alexander Saul	Entwurf, Auslegung und Aufbau der Leistungselektronik für ein bidirektionales induktives Energieübertragungssystem

Wassili Leibel	Charakterisierung des elektrischen Fehlers eines Rotorlagensystems anhand haptischer Einflüsse am Lenkrad
Christian Frankenberg	Entwicklung eines universell einsetzbaren beidseitig gefilterten Leistungsmoduls
Tobias Fricke	Entwicklung eines Systems zur flexiblen Energie-speicherung und -verteilung im Umfeld von Elektro-mobilität, Photovoltaik und Smart-Grid
Henrik Wienken	Erweitern und Automatisieren eines Linearprüfstands zur Schubkraftmessung
Malte Stock	Evaluation verschiedener Topologien für die elektrische Maschine in einem Freikolben-Lineargenerator
Pelin Özkiral	Modernisierung der Antriebs- und Messtechnik sowie Optimierung der Regelung zur Walzölaufbringung im Kaltwalzprozess
Jin Hao	Auslegung einer Klauenpolmaschine für den Einsatz in einem 48-Volt-Mildhybrid-Antrieb
Peter Kandora	Konstruktion und Inbetriebnahme eines controllerbasierten Prototypen zur automatisierten Betätigung von Pkw-Fahrpedalen
Lasse Schumacher	Auslegung und Optimierung einer synchronen Reluktanzmaschine mit Ferritmagneten als alternativen Traktionsantrieb für Hybridfahrzeuge
Dennis Polej	Entwurf und Aufbau eines low-cost Ladegerätes für Elektrofahrzeuge
Hendrik Schefer	Inbetriebnahme und Programmierung eines Wechselrichtersystems zum Betrieb eines segmentierten Langstatorlinearantriebes
Alexander Lührmann	Untersuchung eines kommerziellen Antriebssystems für Elektrofahrzeuge und Implementierung einer Regelung mittels universell verwendbarer Hard- und Software
Gerrit Bremer	Entwurf und Aufbau eines dreiphasigen Onboardladege-rätes höchster Leistungsdichte für Fahrzeuge mit 800 V Bordnetz
Jeevanesan Madaven	Design of a general AC machine model with variable modeling depth for an electric power train application
Fatma Taktak	Grundlegende Betrachtungen für ein katalogbasiertes elektrisches Antriebsstrangmodell

Simon Wilker	Entwicklung eines parametrierbaren Generatormodells in Zustandsraumdarstellung mit adaptiver Eingangswertfassung in Matlab/Simulink
David Rakidzija	Entwicklung einer Versorgungseinheit für die Leistungselektronik eines PV- und Energie-Speicher-Systems
Zahra Goljany	Untersuchungen zum Störverhalten eines bidirektionalen Netzumrichters
Qianting Shui	Erweitern und Automatisieren eines Linearprüfstands zur Schubkraftmessung
Lyucheng Zhu	Design of a coil positioning technique in interoperable inductive power transfer based on magnetic field sensing
Dirk Fischer	Weiterentwicklung, Optimierung und Aufbau eines sekundärseitigen Ladestromstellers für ein induktives Energieübertragungssystem
Lucas Hanisch	Auslegung eines Scheibenläufers für den Einsatz in einem 48-Volt-Mildhybrid-Antrieb
Marvin Rehra	Analyse und Messung von Wirbelstromverlusten in Magneten zur Beurteilung des Explosionsschutzes von permanentmagneterregten Synchronmaschinen
Xinjun Liu	Untersuchung der Magnetverluste am Beispiel einer Permanentmagneterregten Synchronmaschine mit Anlaufkäfig

5 Ereignisse 2017/18

5.1 Berichte von besonderen Ereignissen

Präsentation des **IMAB Racer** auf der TU-Night 2018

Wie schon zuvor erwähnt, hat sich an unserem Versuchsfahrzeug eine Menge getan. Grund genug für das IMAB den Racer mit einem eigenen Stand auf der TU Night 2018 zu präsentieren.

Um den IMAB Racer angemessen in Szene zu setzen, wurde für die erste öffentliche Präsentation auf der TU-Night 2018 ein Standkonzept mit Überdachung, Bühne und Lichtinstallation entworfen. Mit dem Racer als zentrales Element und der unmliegenden Darstellung von Einzelkomponenten wurde den Besuchern ein breiter Einblick in die vielfältigen Themengebiete und Tätigkeitsfelder bei der Entwicklung des Fahrzeugs geboten. In idealer Lage direkt vor dem Haus der Wissenschaft konnte ein großes Publikum und viel Laufkundschaft angesprochen werden, sodass für viele der professionell beleuchtete und gut plazierte IMAB Racer der erste Eindruck beim Besuch der TU Night war.



Verladen des Protagonisten



Der IMAB Racer betritt die Bühne



Sitzprobe Prof. Henke

Als besonders attraktiv erwies sich der große Kontrast des IMAB Racers zwischen aktueller Forschung auf dem Gebiet der Elektromobilität und der klassischen Karosserieform und Eleganz des Fahrzeugs.



Bereit zur Abfahrt: Frau Prof. Dr.-Ing. Kaysser-Pyzalla am Steuer des IMAB Racers

Das einerseits bekannte aber im Straßenbild selten anzutreffende Design des Fahrzeugs sprach dabei ein sehr breites Publikum ganz unterschiedlicher Altersgruppen an. Besonderer



Projektleiter Dipl.-Ing. Quirin Maurus erläutert die Details des Fahrzeugs

Höhepunkt des Abends war der Standbesuch der Präsidentin im Rahmen ihres Rundganges über die TU-Night. Unter großem Presseaufgebot nahm die Präsidentin auf dem Fahrersitz des Racers Platz und zeigte sich sichtlich interessiert an den vielen ausgestellten Details zum Fahrzeug.

Da der Racer als Forschungs- und Lehrplattform intensiv in der Lehre des IMAB eingesetzt wird, konnten viele Kontakte zu Studierenden geknüpft werden, die Abschlusarbeiten oder auch Forschungsarbeiten in dessen technologischen Umfeld anstreben.

TU Präsidentin informiert sich über aktuelle Leistungselektronik-Forschung, 19.01.2018

Prof. R. Mallwitz

In 2017 wurde u.a. das vom BMWI geförderte Verbundforschungsprojekt Netprosum2030 unter Koordination der IMAB-Leistungselektronik gestartet. Dabei konnten im Rahmen des Vorhabens knapp 2 Mio. € Forschungsgelder für die TU Braunschweig eingeworben werden. Die Mittel werden für die Energieforschungsthemen wie Nutzung und Anbindung von stationären und mobilen Speichern genutzt. Das IMAB wird dabei die Umsetzbarkeit einer modularen multifunktionalen Leistungselektronik untersuchen, die Energieflüsse zwischen PV-Generator,

stationärer (PV-) und mobiler (Fahrzeug-)Batterie sowie dem öffentlichen Versorgungsnetz ermöglicht. An der KickOff-Veranstaltung am 19.01.2018 informierte sich die Präsidentin der TU Braunschweig Frau Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla über das Vorhaben Netprosum2030 und den aktuellen Stand der Leistungselektronik-Forschung am IMAB.



Prof. R. Mallwitz und Prof. A. Kaysser-Pyzalla in der IMAB-Maschinenhalle

LE-Nord-Treffen, 26.02.2018

Prof. R. Mallwitz

Einmal im Jahr tauschen sich Professoren und wissenschaftliche Mitarbeiter der Leistungselektronik-Lehrstühle norddeutscher Universitäten zu ihrer aktuellen Forschungsarbeit aus. Am 26.02.2018 fand die Veranstaltung erstmals an der TU Braunschweig in den Räumlichkeiten des BRICS statt. Ca. 35 Teilnehmer waren zu Gast.

Cluster-Schulung der ECPE „Leistungshalbleiter-Bauelemente & Technologien“, 28.02. – 01.03.2018

Prof. R. Mallwitz

Die ECPE führt regelmäßig Veranstaltungen mit Seminarcharakter zu Themen der Leistungselektronik durch. Die Schulung „Leistungshalbleiter-Bauelemente & Technologien“ fand erstmals in den Räumen des NFF in Braunschweig statt und war mit ca. 25 Teilnehmern – vielfach aus dem norddeutschen Raum - sehr gut besucht. Das IMAB war an der Organisation und Durchführung der Veranstaltung maßgeblich beteiligt.

International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS) 20.-22.03.2018 in Stuttgart www.cips-conference.de

Prof. R. Mallwitz

Vom 20. bis 22.03.2018 fand die **10. International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)** in Stuttgart statt. Etwa 100 eingereichte und eingeladene Beiträge aus der internationalen Fachwelt widmeten sich den Bauelementen der Leistungselektronik, ihrer Montage, Gehäusen als und in mechatronischen Systemen sowie der daraus resultierenden Zuverlässigkeit und Aspekten der elektromagnetischen Verträglichkeit. Die Konferenz beschäftigte sich damit mit Schlüsselthemen der modernen Leistungselektronik als Komponente verschiedenster Systeme der Stromversorgungs- und Antriebstechnik und bietet alle 2 Jahre ein Austauschforum zu elektrotechnischen und maschinenbaulichen Aspekten. Frau Prof. Dr. Regine Mallwitz war als Technical Chair maßgeblich an der fachlichen Organisation beteiligt.



Feierliche Übergabe des POSTER-Awards durch Prof. R. Mallwitz als Jury-Vorsitzende sowie Mitglieder der ECPE an Frau Bianca Böttge

Neues aus der Energietechnische Gesellschaft (ETG)

Prof. R. Mallwitz

Seit vielen Jahren ist Frau Prof. Dr. Regine Mallwitz Mitglied der ETG – der Energietechnischen Gesellschaft im VDE – und dort aktiv im Fachbereich Q1 – Leistungselektronik und Systemintegration.

Der Fachbereich Q1 richtet verschiedene Tagungen aus, die die aktuellsten Entwicklungen in diesem Gebiet aufnehmen und Gelegenheit zum fachlichen Austausch bieten. So fand im Jahr 2017 die in Kooperation mit ECPE – dem European Center for Power Electronics e.V – ausgerichtete Tagung „Bauelemente der Leistungselektronik und Ihre Anwendungen“ statt. Diese traditionell in Bad Nauheim stattfindende Fachtagung gibt einen Überblick über die seit der einige Jahre zurückliegenden vorigen Tagung erreichten Fortschritte auf dem Gebiet der Leis-

tungselektronik, und einen Ausblick auf kommende Innovationen. Die Beschränkung auf eingeladene Übersichtsvorträge verleiht der deutschsprachigen Tagung einen eigenen Charakter; Teilnehmer schätzen sie wegen ihrer hohen Qualität und ihrem großen Informationsgehalt. Frau Prof. Dr. Regine Mallwitz war aktiv an der Organisation und Durchführung der Veranstaltung beteiligt.

In der Fachbereichs-Sitzung vom 07.06.2018 wurde sie einstimmig zur Vorsitzenden des Fachbereichs gewählt und trat dieses Amt zum Juli 2018 an.

European Conference on Power Electronics and Applications (EPE) Riga

Prof. R. Mallwitz

Vom 17. Bis 21.09.2018 fand die **20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)** in Riga statt. Bei dieser Tagung handelt es sich um die umfassendste europäische Tagung zur Leistungselektronik. Sie bietet eine Austausch-Plattform zwischen Spezialisten aus Industrie, Instituten und Hochschulen zu den Schwerpunkten leistungselektronische Systeme und Komponenten. Die Leistungselektroniker des IMAB waren dort mit zwei Posterbeiträgen vertreten.



Prof. R. Mallwitz auf der EPE in Riga

5.2 Kalender

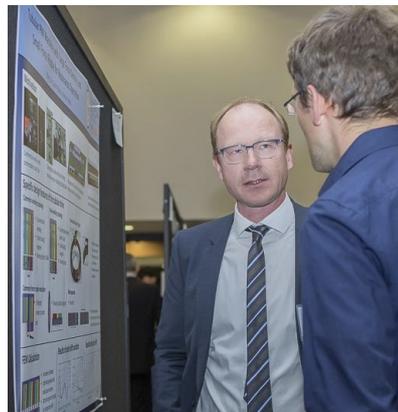
02.02.2017

Erfolgreicher Abschluss der Ausbildung zur/zum Feinwerkmechaniker/in von Jenny Jacobs und Lars Moritz mit anschließender Übernahme in ein festes Arbeitsverhältnis



Mai 2017

Präsentation von Forschungsergebnissen zu tubularen Linearmotoren auf der IEMDC 2017 in Miami / USA



14.02.2017

Promotionsprüfung Mang Cai in der Institutsbibliothek



05/2017 – 07/2017

Shubhangi Jha und Akshaya Ravi besuchen als Gaststudenten das IMAB

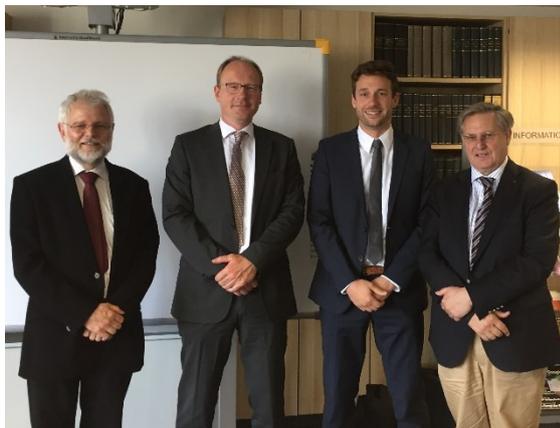


21.2. – 22.2.2017

Präsentation von Forschungsergebnissen zu High-Speed Antrieben auf der Tagung HEV 2018 in Braunschweig

04.07.2017

Promotionsprüfung Julian Veitengruber in der Institutsbibliothek



19.01.2018

IMAB-Besuch der TU-Präsidentin Prof. Anke Kaysser-Pyzalla zum Projekt NetProsum2030



17.08.2017

Institutsausflug – Besuch der Hängebrücke „Titan“ an der Rappbodetalsperre und Besichtigung der Wendefurthertalsperre



21.2. – 22.2.2018

Prof. Henke - Tagungsleitung Hybrid- und Elektrofahrzeuge HEV 2018 in Zusammenarbeit mit IAV und ITS



20.12.2017

Institutsweihnachtsfeier im Restaurant „Grüner Jäger“



12.03.2018

Besuch von O. Blume (CEO Porsche AG) am NFF



11.04.2018

Besuch von Niedersachsens Ministerpräsident Stephan Weil am NFF im Rahmen der Veranstaltungsreihe der Forschungsstelle Mobilitätsrecht



17.6.2018

Präsentation und Roll-Out des IMAB Racers auf der TU-night



21.06.2018

Vortrag Prof. Henke im Rahmen der Veranstaltung PS Speicher in Einbeck



26.09.2018

Institutsausflug – Kanutour auf der Aller



03.12.2018

Promotionsprüfung Dr.-Ing. Nils Domann
in der Institutsbibliothek



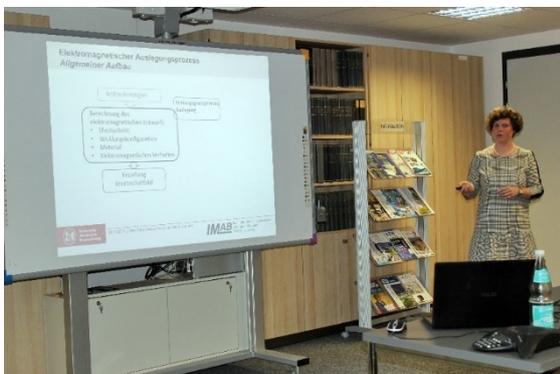
12.2018

Fertigstellung der „IMAB-World“ im Foyer
der Fakultät für Elektrotechnik



06.12.2018

Promotionsprüfung Dr.-Ing. Anna-Lena
Menn in der Institutsbibliothek



6 Veröffentlichungen in 2017/2018

1. N. Yogal, C. Lehrmann, M. Henke: "Determination of the Measurement Uncertainty of Direct and Indirect Efficiency Measurement Methods in Permanent Magnet Synchronous Machines", Int. Conference of Electrical Machines, ICEM 2018, Alexandroupolis
2. N. Yogal, C. Lehrmann, M. Henke: „Magnetic loss measurement of surface mounted permanent magnet synchronous machines used in explosive environments“, 9th Int. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives, PEMD 2018, Liverpool
3. C. Heister, M. Henke: „Optimierungsmethodik flussmodulierter Maschinen am Beispiel der Flux Reversal Maschine“, elektrotechnik und informationstechnik, Springer 2018
4. M. Henke, Gerrit Narjes, Jan Hoffmann, Constantin Wohlers, Stefan Urbanek, Christian Heister, Jörn Steinbrink, W.-R. Canders, Bernd Ponick: "Challenges and Opportunities of Very Light High-Performance Electric Drives for Aviation", Energies 2018
5. W.-R. Canders, J. Hoffmann, M. Henke: „Design of electrical high speed drives for applications in vehicle drive trains“, Braunschweiger Hybridsymposium 2017
6. C. Faraji-Tajrishi, K. Siebke, M. Henke: "Simulationsgestützter Entwurf eines 48 V/ 12,5 kVA Wechselrichters für Mild-Hybrid Fahrzeuge", ASIM/GI 2017, Ulm
7. A.-L. Menn, M. Henke: "Verlustanalyse im elektrischen Antrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen bei variierender Zwischenkreisspannung", ASIM/GI 2017, Ulm
8. H. Schillingmann, C. Heister, M. Henke: "Scaling Process of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications", IEEE Transportation Electrification Conference ITEC 2017, Chicago, USA
9. M. Henke, T.-H. Dietrich: "High Power Inductive Charging System for an Electric Taxi Vehicle", IEEE Transportation Electrification Conference ITEC 2017, Chicago, USA
10. M. Henke, M. Cai, Q. Maurus: "Tubular PM Machine with Large Force Density and Small Force Ripple for Resonance Operation, IEEE Int. Electric Drives and Machines Conf. IEMDC 2017, Miami, USA
11. N. Yogal, C. Lehrmann, M. Henke, X. Liu: "How to Measure the Demagnetization of Permanent Magnet Synchronous Machines Used in Explosive Environments", IEEE Int. Electric Drives and Machines Conf. IEMDC 2017, Miami, USA
12. N. Langmaack, G. Tareilus, M. Henke: "Silicon Carbide Power Electronics in Fuel Cell and Battery Electric Vehicle Applications", Int. Conf. on Automotive Power Electronics APE 2017, Paris

13. Q. Maurus, W.-R. Canders, M. Henke: "Increasing the Force per Unit Volume of Tubular Drives by Raising the Integration Degree", 11th Int. Symp. On Linear Drives for Industry Applications LDIA 2017, Osaka, Japan
14. C. Heister, M. Henke: "A Fast Analytical Calculation Methodology for a Topology Study of Flux Reversal Machines", 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, ISEF 2017 Lodz, Polen
15. N. Langmaack, G. Tareilus, M. Henke: "Intelligent Driver Circuit with Robust Serial Interface", IEEE Int. Conference on Power Electronics and Drive Systems PEDS 2017, Honolulu, Hawaii, USA
16. E. Kiel, K. Rigbers, H. Wolf, R. Mallwitz: „Leistungselektronik in der Photovoltaik – aktueller Status und zukünftige Trends“. ETG Tagung Bauelemente und ihre Anwendungen 2017. Bad Nauheim.
17. Siebke, K., Schobre, T., Langmaack, N., Mallwitz, R.: High Power Density GaN Interleaved Bidirectional Boost Converter with Extended Cooling Capability. PCIM 2017. Nürnberg.
18. Fey, J.-H.; Hinrichsen, F.; Mallwitz, R.: Study on the total harmonic distortion of a 5 MW wind turbine with modular multilevel converter and development of a demonstrator. NEIS Conference 2017, 21. - 22.9.2017, Hamburg.
19. Lumbreras, D., Schobre, T., Mallwitz, R.: Systematic and Easy-To-Use Design Procedure for Proportional-Integral-Resonant Controllers. EPE 2018, Riga.
20. Siebke, K., König, P., Mallwitz, R.: Methodical comparison of voltage measurement points for wide bandgap applications. EPE 2018, Riga.
21. N. Langmaack: "Impact of Wide-Band-Gap Semiconductor Devices on the Design of Electronic Power Converters", International Wide Band Gap Power Electronics Applications Workshop (IWBGPEAW 2017), 22./23.05.2017, Stockholm, Sweden
22. N. Langmaack, M. Henke: "Silicon Carbide Power Electronics for Electric Vehicles with 800 V Power System", Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement VIII, Haus der Technik Fachbuch Band 147, erschienen 2018 im Expert Verlag