



Technische
Universität
Braunschweig

IMLAB

Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen
TU Braunschweig



100
1920
bis
2020
MIT
JUBILÄUMSAUSGABE



JAHRESBERICHT 2019-2021

Elektrische Antriebssysteme
Leistungselektronik

©2021 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	Vorwort	5
2	Personal am Institut	7
3	Forschung	10
	3.1 Forschungsaktivitäten am IMAB	11
	CHYLA - Credible Hybrid Electric Aircraft	11
	NetProsum2030 - Kompakte modulare Wandler und optimierte Systemlösungen zur Energieflusssteuerung für netzdienliche Prosumer 2030 mit HV-Fahrzeuggbatterien	13
	CODAPE - Kollaborative Entwicklungsumgebung für die Leistungselektronik	17
	Ide3AL - Innovationen für dynamische, energie-effiziente elektrische Antriebe mit neuartiger Leistungselektronik in der Industrie & Fertigung	18
	Linearaktuatoren mit elektrischer Leistungsversorgung	20
	ARIEL - Aufladung für Brennstoffzellensysteme durch interdisziplinär entwickelte elektrische Luftverdichter.	22
	SE ² A - ICA C4.1 Electric Propulsion Drive Concepts for Future Electrified Aircraft	28
	SE ² A – Sustainable and Energy-Efficient Aviation – ICA c 4.2: Power System for All Electric Aircraft	30
	EPROREF – Elektrische Propulsoren für Regionalflugzeuge	31
	LISA4CL - Induktive Ladetechnik für den lokalen Lieferverkehr	36
	Verbundprojekt “Energysphere“ – Energiespeicher hoher Energiedichte für regenerative Energieerzeuger	38
	Forschungsprüfstand für direkte Kühlung von E-Maschinen hoher Leistungsdichte	42
	IMAB-internes Forschungsprojekt IMAB-Racer	43
	EFILS-11 – Interoperable induktive Ladetechnik.	45
	Wissenschaftliche Untersuchungen zu elektrifizierten Nutzfahrzeugenantrieben	46
	3.2 Neue Prüfstandstechnik am IMAB	47
	Zuverlässigkeitslabor	48
	Der Lastwechselprüfstand/Power Cycler PWT 2400A	48
	Der Klimaprüfschrank	49
	3.3 Externe Forschungsthemen	51
	3.4 Abgeschlossene Promotionen am IMAB	60
	3.5 IMAB-Externe Aktivitäten	64

4	Lehre	65
	4.1 Vorlesungen und Praktika in 2020/2021	65
	4.2 IMAB Teamprojekt - Messung der Spannungsverteilung in elektrischen Maschinen	72
	4.3 Exkursionen	73
5	Ereignisse 2019 - 2021	75
	5.1 Berichte von besonderen Ereignissen	75
	5.2 Kalender	81
	5.3 Nachruf Prof. Weh.	86
6	Veröffentlichungen in 2019 - 2021	87
7	Das Jubiläumsjahr 2020 Historie - 100 Jahre IMAB	99

1 Vorwort

Liebe Freunde des IMAB,

hinter uns liegen ca. 20 Monate, die wir alle nicht so schnell vergessen und die uns prägen werden. Im Rahmen der weltweiten Pandemie wurde jeder von uns auf eine besondere Probe gestellt. Familien mussten sich neu organisieren, der Arbeitsplatz wanderte nach Hause – und es wurde ruhig um uns herum.

Im IMAB mussten in Windeseile neue Abläufe her, Forschung und Lehre mussten unter Wahrung von Hygienekonzepten gänzlich neu aufgestellt werden. Studierende waren nicht mehr vor Ort sondern wurden fernbetreut und die Vorlesung entschwand ins Netz. Unsere für 2020 geplante 100-Jahr Feier des IMAB musste leider abgesagt werden.

Diese Situation war für alle Beschäftigten am IMAB eine große Herausforderung. Jeder hat mitgeholfen und sich über das geforderte Maß engagiert um das Institut erfolgreich weiter voranzubringen. Die Infrastruktur, die Werkstatt und unsere Verwaltung funktionierten all die Monate einwandfrei. Heute können wir auf diese Teamleistung sehr stolz zurückblicken !

Und trotz allem haben wir unsere Forschung sehr gut vorangetrieben. Mit dem Herstellen und Halten von Kontakten über das Web sind wir mittlerweile vertraut. Wir haben neue Mitarbeiter eingestellt und in das IMAB hineinwachsen lassen. Fachliches Arbeiten und persönlicher Austausch erfordern dabei sehr viel mehr an Disziplin. An den bestehenden Projekten konnten wir jedoch trotz Einschränkungen weiterarbeiten, intensiv diskutieren und hochwertige Publikationen in Journalen und für Konferenzen fertigstellen. Unsere Forschungsergebnisse fanden national und international sehr hohe Anerkennung. Es ist uns auch gelungen, neue hochinteressante Forschungsvorhaben zu gewinnen. Wir haben unsere Laborausstattung erweitert und z.B. ein hochmodernes Labor für Zuverlässigkeitsuntersuchungen aufgebaut. Näheres dazu auf den folgenden Seiten.

Die Studierenden haben unsere digitalen Lehrveranstaltungen sehr gut evaluiert und die Forschung am IMAB wurde nahezu ohne Kompromisse fortgeführt. Neue MitarbeiterInnen und neue Auszubildende fanden zu uns, und große neue Projekte starteten.

Das für 2020 geplante 100-jährige Institutsjubiläum musste entfallen, wir hoffen auf eine entsprechende Feiernmöglichkeit nach der zurzeit noch herrschenden Pandemie.

Leider mussten wir im Jahr 2021 Abschied von unserem langjährigen Institutsleiter Prof. Herbert Weh nehmen. Er verstarb im Alter von 93 Jahren und hat sich bis ins hohe Alter sehr erfolgreich mit zahlreichen Fragestellungen zu elektrischen Maschinen beschäftigt.

Wir danken allen Forschungspartnern aus Wissenschaft und Industrie für die Unterstützung in den letzten Jahren und wünschen Ihnen allen viel Freude beim Lesen dieses Berichtes.



Prof. Regine Mallwitz



Prof. Markus Henke

2 Personal am Institut

Arbeitsgruppen:	Prof. Dr.-Ing. Markus Henke (Institutsleiter)	
	- Elektrische Antriebssysteme	
	Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz	
	- Leistungselektronik	
Professoren i.R.	Prof. a. D. Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Canders	
	Prof. a. D. Dr.-Ing. Jürgen Meins	
Oberingenieur:	Dr.-Ing. Günter Tareilus	
Lehrbeauftragter:	Dr.-Ing. Tobias Böhm, Volkswagen AG	
Geschäftszimmer:	Dorothee Wille	
Auszubildende:	Julia Fischer	
Wiss. Mitarbeiter:	M.Sc. Sridhar Balasubramanian	/ Maschinenberechnung
	M.Sc. Tim-Hendrik Dietrich	/ Ladetechnologie, Leistungselekt.
	M.Sc. Dirk Fischer	/ Leistungselektronik
	M.Sc. Tobias Fricke	/ Leistungselektronik, Prüfstände
	M.Sc. Lucas Hanisch	/ Maschinenberechnung
	M.Sc. Philipp Hauenschild	/ Leistungselektronik, Prüftechnik
	Dipl.-Ing. Jan Hoffmann	/ Maschinenberechnung und -konstruktion
	Dipl.-Ing. Peter Hoffmann	/ Prüfstände, Infrastruktur
	M.Sc. Matthias Klintz	/ Leistungselektronik
	M.Sc. Nikolay Korshunov	/ Leistungselektronik
	Dipl.-Ing. Niklas Langmaack	/ Leistungselektronik, Prüftechnik
	M.Sc. Florian Lippold	/ Leistungselektronik, Prüftechnik
	M.Sc. Lukas Radomsky	/ Leistungselektronik
	M. Eng. Robert Rohn	/ Leistungselektronik
	M.Sc. Hendrik Schefer	/ Leistungselektronik, Prüftechnik
	M.Sc. Henning Schillingmann	/ Maschinenberechnung
	M.Sc. Cengiz Uzlu	/ Leistungselektronik
Buchhaltung:	Ulrike Nissen	
Auszubildende:	Aaliyah Bartsch (Kauffrau für Büromanagement)	
	Julia Fischer (Kauffrau für Büromanagement)	
	Jörn-Torge Lauenstein (Kaufmann für Büromanagement)	

Technischer Angestellter: Herbert Rawe

Werkstatt: Tobias Gaida (Werkstattmeister)
Jan-Niklas Buhr
Carlo Mensing

Auszubildender: Jan-Michel Schulze (Industriemechaniker)

MitarbeiterInnen, die seit dem 01.01.2019 neu hinzugekommen sind:

am 15.01.2019	M.Sc. Dirk Fischer
am 16.04.2019	M.Sc. Hendrik Schefer
am 01.08.2019	Julia Fischer
am 01.04.2020	M.Sc. Philipp Hauenschild
am 01.06.2020	M.Sc. Nikolay Korshunov
am 01.09.2020	Jan-Michel Schulze
am 15.01.2021	M.Sc. Matthias Klintz
am 01.06.2021	M.Sc. Lukas Radomsky
am 01.08.2021	Jörn-Torge Lauenstein
am 01.09.2021	Aaliyah Bartsch

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die seit dem 31.12.2018 ausgeschieden sind:

am 27.01.2019	Jenny Jacobs
am 07.06.2019	Jan-Philipp Scheiner
am 30.06.2019	Fabian Hain
am 31.05.2020	Dr. Christian Heister
am 22.07.2020	Matthias Depner
am 14.08.2020	M.Sc. Oleg Schäfer
am 31.10.2020	M.Sc. Thorben Schobre
am 30.04.2021	Bernd Machus
am 31.05.2021	Dr. Konstantin Siebke
am 15.07.2021	Dipl.-Ing. Quirin Maurus
am 20.07.2021	Joel Hora



Das IMAB im Herbst 2021

Studentische Hilfskräfte am IMAB seit dem 01.01.2019 :

Emanuel Agyekum	Jean Baumann	Philipp Barner
Jonathan Borchers	Jannes Briese	Edona Capric
Chanuch Chaisakdanugull	Minjia Chen	Yannic Cullmann
Lukas Eisele	Abdulrhman Elsaid	Timon Fahlbusch
Marcel Falinski	Jonas Franzki	Ihor Filatov
Nina Fröchtling	Stefan Gehler	Rüdiger Görke
Christian Groll	Kristina Grundey	Meike Hastedt
Lars Hedrich	Laura Heßler	Tobias Hinz
Michael Honkomp	Daiyi Hu	Daniel Jasper
Mauriz Kahmann	Tyll Kapitzky	Felix Klabunde
Andrii Kostytsia	Peer Ulrik König	Nikolay Korshunov
Moritz Landwehr	Xueman Li	Ziwen Liu
Kai Lünne	Johanna Mallmann	Nicole Mursakov
Thomas Müller	Michael Ochs	Lukas Radomsky
Peter-Matthias Reimers	Aymen Riahi	René Schilling Johnson
Andreas Schlerf	Leon Schneider	Fabian Stengel
Lei Tao	Lennard Waschke	Paul Weichold
Renko Willms	Florian Wolgast	Phillip Wollschläger
Elias Yousef		

3 Forschung am IMAB

Neben der Lehre ist die Durchführung von Forschungsprojekten wesentliche Aufgabe der am IMAB tätigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. In den vergangenen Jahren wurde wieder eine Reihe interessanter Forschungsfragen in vielen Projekten mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie bearbeitet. In zahlreichen Verbundprojekten sind Arbeiten eingebunden in das Exzellenzcluster SE²A, in die die Aktivitäten des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik NFF und in andere Zentren der TU Braunschweig.

Im Rahmen von Forschungsprojekten zur Elektromobilität betrachten wir am IMAB grundsätzliche Fragestellungen des Ladens und der Elektrifizierung von Fahrzeugen. Wir erforschen neue Ansätze zu den im Fahrzeug verbauten elektrischen Antrieben und leistungselektronischen Systemen, zum Schnellladen von Elektrofahrzeugen und zu induktiven Ladesystemen. Der Entwurf elektrischer Maschinen beinhaltet heute stark interdisziplinäre Fragestellungen, die nur in einem ganzheitlichen systemischen Ansatz gelöst werden können. Am IMAB erfolgt der Entwurf daher im Team vieler Fachexperten. Für elektromagnetische, thermische und systemorientierte Untersuchungen werden Berechnungsverfahren und Tools eingesetzt, die im Rahmen vieler Forschungsprojekte entwickelt und optimiert werden. Die am IMAB realisierten Maschinenprototypen werden durch eigene leistungselektronische Systeme geregelt angesteuert. In den Antrieb fließen damit neueste Technologien zur Steigerung von Effizienz, Performance und Leistungsdichte. Eine detaillierte Vermessung und Prüfung der Antriebsprototypen erfolgt auf eigenen automatisierbaren Prüfständen bis zu Leistungen von 300 kW.

Der Leistungselektronik kommt heute eine große und sehr vielfältige Bedeutung zu. In der modernen Energieversorgung mit einem hohen Aufkommen an Photovoltaik und Windenergieanlagen werden effiziente Leistungselektronikkomponenten benötigt. Und auch das Thema Energieeffizienz spielt eine zunehmende Rolle z.B. in der Antriebstechnik für die Industrie oder der Batterieladeinfrastruktur für die Elektromobilität. Neue Materialien für leistungselektronische Komponenten, wie z.B. Wide-Band-Gap-Halbleiter auf Basis von Siliziumkarbid und Galliumnitrid, ermöglichen Steigerungen bei der Effizienz und Kompaktheit der leistungselektronischen Wandler. In Elektromobilen profitieren neben den Antriebswechselrichtern besonders die Batterieladegeräte und Wandler zwischen den Bordnetzen von elektrifizierten Fahrzeugen von diesen neuen Halbleitern. In der Mobilität auf der Straße stehen dabei vor allem Effizienz und Kompaktheit im Vordergrund.

Die wissenschaftlichen Herausforderungen sind in der heutigen Leistungselektronikforschung sehr vielfältig. Einerseits ist das extrem schnelle Schalten der WBG-Leistungshalbleiter zu beherrschen, andererseits ist die Verfügbarkeit geeigneter passiver Leistungselektronikbauelemente noch eingeschränkt sowie deren Optimierung notwendig. Die effiziente und zunehmend automatisierte Auslegung leistungselektronischer Wandler stellt mittlerweile ein Forschungsfeld dar. Besonders für Leistungselektronik, die hoch beansprucht oder in so neuen Applikationsfeldern wie der Luftfahrt eingesetzt wird, spielt auch das Thema Zuverlässigkeit und Lebensdauer-orientierte Auslegung eine zunehmende Rolle. All diese Themen finden sich in den aktuellen Forschungsprojekten der IMAB-Leistungselektronik wieder.

3.1 Forschungsaktivitäten und Forschungsprojekte

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, elektrischen Maschinen und Prüfständen.

CHYLA-Credible Hybrid Electric Aircraft

JTI-CS2-2020-CFP11-THT-14: Scalability and limitations of Hybrid Electric concepts up to large commercial aircraft

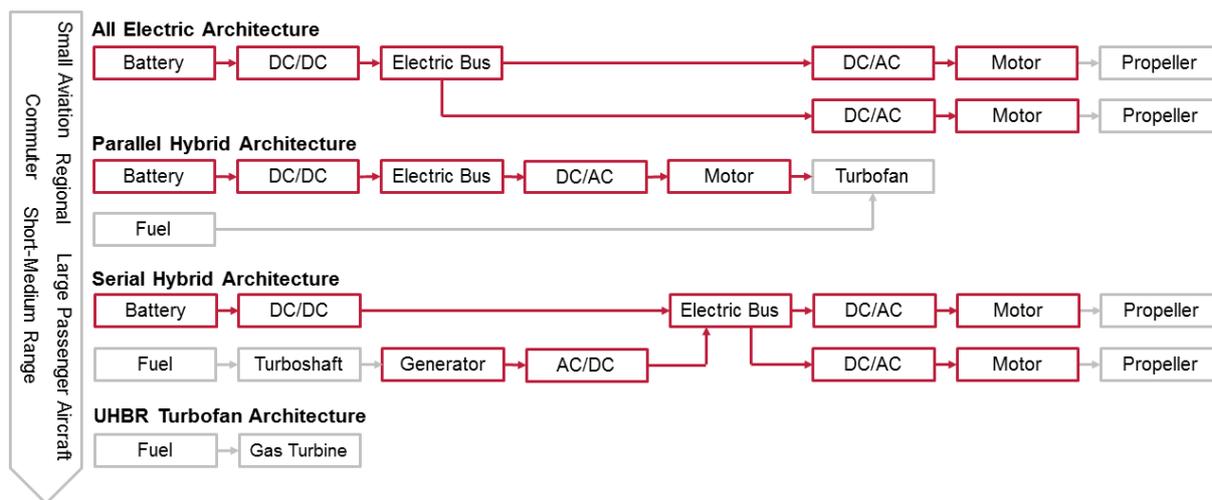
M.Sc. Lukas Radomsky, M.Sc. Lucas Vincent Hanisch

Ziel des Projektes CHYLA ist es, einen Überblick über die Möglichkeiten, Herausforderungen und Grenzen der Skalierung von Technologien im Bereich der hybrid-elektrischen bzw. nachhaltigen Luftfahrt zu geben.

CHYLA stützt sich hierbei auf die Expertise von vier Instituten der TU Braunschweig und zwei Instituten der TU Delft. Zu den Fähigkeiten im Bereich MDO des Institutes für Flugzeugbau und Leichtbau (IFL) kommen die Kompetenzen des IMAB im Bereich der elektrischen Maschinen und der Leistungselektronik, sowie das Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen (IFAS) mit Beiträgen zu den Triebwerken hinzu. Forschungsinitiativen im Bereich der hybrid-elektrischen bzw. nachhaltigen Luftfahrt befassen sich in der Regel nur mit einem einzigen Flugzeug oder einer einzigen Flugzeugklasse. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass für das schnelle Erreichen eines ausreichenden technologischen Reifegrades, wie in anderen Bereichen in denen es auch galt neuartige Antriebslösungen zu etablieren, ein Ansatz verfolgt werden sollte, bei dem eine Technologie im Kleinen erprobt und anschließend auf immer größere Flugzeug- bzw. Fahrzeugklassen hochskaliert wird.

Hierfür ist es wichtig, eine Technologielandschaft zu plausibilisieren und Bereiche zu identifizieren, in denen eine solche Skalierung durchführbar ist. Außerdem gilt es Einschränkungen und Herausforderungen für diese Entwicklung aufzuzeigen.

CHYLA setzt an diesem Punkt an und will einen Beitrag zur Entwicklung hybrid-elektrischer Luftfahrt leisten, indem es einen Überblick über die Möglichkeiten, Herausforderungen und Grenzen der Skalierbarkeit „radikaler“ Schlüsseltechnologien (*engl. key radical technologies*) gibt. Außerdem wird in CHYLA die Plausibilität (*engl. credibility*) von Modellansätzen über einen in die Zukunft reichenden Zeitraum betrachtet. Das heißt, es wird unter dem Begriff des sog. „plausiblen Flugzeugentwurfs“ (*engl. credible aircraft design*) untersucht, ob die getroffenen Parameterannahmen auch in vielen Jahren noch ihre Gültigkeit besitzen.



Architekturen und wesentliche Komponenten

Neben dem Überblick über die Möglichkeiten, Herausforderungen und Grenzen der Skalierung von Hybrid-Elektro-Technologien ist es ein Ziel von CHYLA, sogenannte "Umschaltpunkte" (*engl. cross-over points*) im Zusammenhang mit der Skalierung von Technologien über verschiedenen Flugzeugklassen hinweg herauszuarbeiten. Es werden Chancen und Grenzen für verschiedene Technologien erwartet, wenn diese in Flugzeuge unterschiedlicher Größen (Klassen) zur Anwendung kommen.

Beim Entwurf von (hybrid-)elektrischen Flugzeugen sind die Architektur des Energienetzes, sowie die Komponenten dessen, ein wesentlicher Bestandteil des anfänglichen Auslegungs- und Dimensionierungsprozesses. Das vordergründige Ziel des IMAB ist es im Rahmen dieses Projektes in Kooperation mit den anderen beteiligten Instituten der TU Braunschweig und der TU Delft interdisziplinär Modelle zur Abbildung des Bordenergiesetzes zu entwickeln.

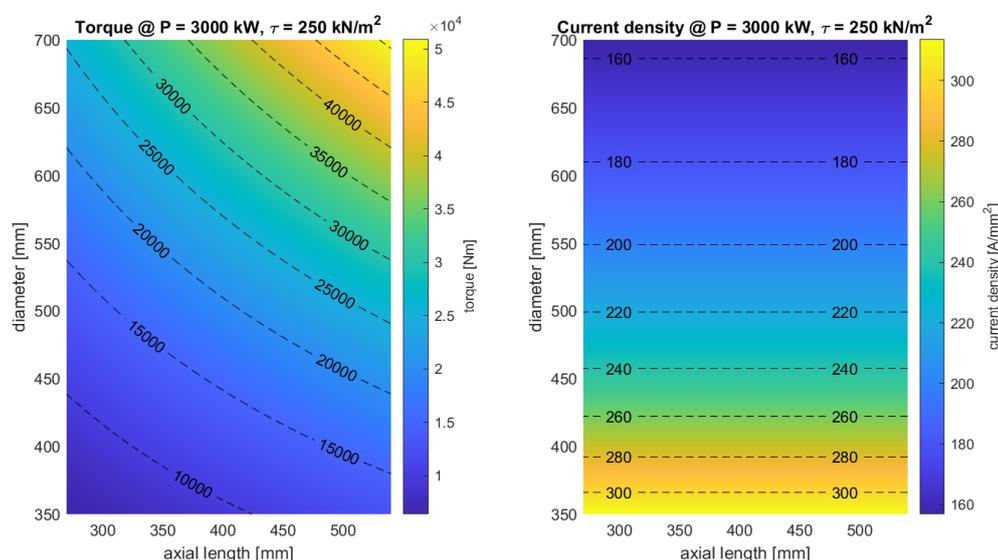
Von Seiten des IMAB werden die Leistungselektronik und die Energieverteilung sowie Energiespeichersysteme und elektrische Maschinen modelliert. Die Modellierung erfolgt in analytischer Form und, soweit wie möglich, physikalisch fundiert. Hierbei wird auf Verluste/Wirkungsgrad, Masse- und Volumenprädiktion eingegangen. Darüber hinaus ist es notwendig, eine Vorhersage für die zukünftige Entwicklung der Energiedichte der Energiespeichersysteme zu treffen.

Die zunehmende Anzahl elektrischer Verbraucher an Bord eines Flugzeugs führt auch zu einer größeren Anzahl leistungselektronischer Wandler. Daher ist die Entwicklung von Leistungselektronik mit Schwerpunkt auf Gewichts- und Volumenminimierung neben der Optimierung des Wirkungsgrads von entscheidender Bedeutung. Die meisten Arbeiten in der Literatur konzentrieren sich auf die Minimierung des Volumens, nicht aber auf die Gewichtsreduzierung. Die Beschreibung von letzterem ist daher ein Hauptmerkmal der im Projekt behandelten Methoden und Funktionsblöcke.

Der hier verfolgte Ansatz besteht darin, zunächst die wichtigsten Teilkomponenten zu ermitteln, die in allen Umrichtertypen, bzw. allen Komponenten, vorhanden sind, und sie anschließend im Hinblick auf Gewicht, Volumen und Verluste zu analysieren, wobei Nichtlinearitäten wie unterschiedliche Schaltungstopologien und Halbleitermaterialien berücksichtigt werden.

Neben der Leistungselektronik und der HVDC-Energieverteilung ist die Energiespeicherung in Form eines Batterie- oder Brennstoffzellensystems eine entscheidende Komponente. Über die definierten Flugzeugkategorien ist ein stetig steigender Energiebedarf zu verzeichnen. Daher sind Batterien und Brennstoffzellensysteme mit möglichst hoher Energiedichte unerlässlich. Sowohl ein skalierbares Batteriesystem als auch ein Brennstoffzellensystem werden modelliert. Wie eingangs erwähnt ist es darüber hinaus notwendig die zukünftige Entwicklung der Masse bzw. Energiedichte der Energiespeichersysteme abzuschätzen.

Die Modellierung der elektrischen Maschine komplettiert das Modell und stellt die Verbindung zum Triebwerk dar. Um ein modulares Maschinenmodell und eine möglichst allgemeingültige Beschreibung verschiedener Maschinentypen zu entwickeln, wurden die elektrischen Maschinen mittels ihres Drehschubs beschrieben. Diese Beschreibungsform erweist sich bei geometrischer Skalierung der Maschinen zusätzlich als vorteilhaft. Neben einem konstanten Drehschub wurde bei der Skalierung eine konstante elektrische Feldverteilung gefordert, um das nichtlineare Maschinenverhalten durch Sättigungseffekte nicht zu verändern.



Drehmoment und Stromdichte bei geometrischer Skalierung

In den Abbildungen ist zu sehen, wie sich beispielsweise das Drehmoment und die Stromdichte einer Maschine in einem Betriebspunkt verändert, wenn diese geometrisch skaliert wird.

NetProsum2030 - Kompakte modulare Wandler und optimierte Systemlösungen zur Energieflusssteuerung für netzdienlichen Prosumer 2030 mit HV-Fahrzeuggbatterien

Verbundprojekt gefördert durch das BMWI, FKZ: 0350021A

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

Das Vorhaben verfolgt netzdienliche und leistungselektronische Fragestellungen zur Steuerung von elektrischen Energieflüssen in zukünftigen Erzeuger-Speicher-Systemen im

häuslichen und gewerblichen Umfeld (Prosumer) mit erhöhtem Energiebedarf. Durch kostengünstige, da aus Massenfertigung stammende, HV-Fahrzeuggatterien wird der Speichereinsatz künftig auch bei großen Speicherleistungen wirtschaftlich, was einerseits eine optimierte Systemtechnik erfordert und andererseits neue Potentiale für die Netzdienlichkeit von Prosumern eröffnet.

Das Projekt wird von insgesamt vier Projektpartnern bearbeitet. Als wertvoller Hochschulpartner im Bereich der Hochspannungstechnik und Energiesysteme übernimmt das Institut elenia der TU-Braunschweig zwei wesentliche Pfeiler.

Zum einen wird eine HV-Fahrzeuggatterie als Second-Life stationäre Batterie in Zusammenarbeit mit der PTB Braunschweig vollständig neu entwickelt, aufgebaut und getestet und zum anderen wird ein neuartiges vollintegriertes Energiemanagementsystem zur Steuerung von vielfältigen Energieflüssen der seitens des IMAB zu entwickelnden Hardware erforscht und entwickelt.

Als wichtiger Industriepartner übernimmt die SMA in Kassel Forschungsarbeiten im Rahmen einer Prototypenentwicklung eines bidirektionalen 2nd-Life HV-Batteriewechselrichters mit Wide-Bandgap-Halbleitern.

Mit dem Know-How von IAV im Bereich der Automobilindustrie wird die Umsetzung einer Sicherheitsüberwachung und Sicherstellung einer stabilen fehlerfreien übergeordneten Kommunikation des entwickelten Gesamtsystems angestrebt.

Im Rahmen des Projektes NetProsum2030 untersucht das IMAB eine multifunktionale, hochkompakte und –effiziente Leistungselektronik-Einheit für den zukünftigen Prosumer. Das Ziel ist neben der theoretischen Untersuchung der Leistungselektronik auch der Aufbau und die Inbetriebnahme funktionsfähiger Demonstratoren. Eine hohe Modularität für die Erweiterbarkeit von Systemen wird umgesetzt.

In der Konzeptphase werden zunächst Topologieuntersuchungen für das Gesamtsystem, bestehend aus einer PV-Quelle, Batteriespeicher, Leistungselektronik-Einheit, einem DC-Zwischenkreis und Netzanschluss, durchgeführt. Bewertungskriterien sind dabei neben den üblichen Anforderungen wie Leistungsdichte und Wirkungsgrad, die Modularität, Mehrfachnutzung von Baugruppen, Bidirektionalität, Erweiterbarkeit des Systems. Die Entscheidung fällt schließlich auf ein galvanisch nicht trennendes System, womit Erzeuger- und Speicherbausteine des Gesamtsystems mit Hilfe der entwickelten Leistungselektronik-Einheit über einen gemeinsamen DC-Zwischenkreis gekoppelt werden können. Dabei können die Leistungselektronikeinheiten als DC/DC-Steller oder Wechselrichter fungieren. Für die Dimensionierung des Gesamtsystems (Leistungsklasse, Batteriegröße etc.) wurden zusammen mit der elenia Erzeugerprofile simuliert und analysiert. Daraus ergibt sich die Grundlage für die Auslegung der Leistungselektronik-Einheit.

In der Prototypen-Entwicklungsphase werden sehr intensive Hardwareentwicklungsarbeiten durchgeführt. Das Erstellen von Schaltplänen und Layouts für die Controllerboards (BRAIN) für die Ansteuerung der Leistungsboards, die modularen Leistungsboards, die für die Energieumformung, und das Peripherieboard welches hauptsächlich als Ansteuerung der zusätzlichen Sicherheitsschaltungen im Leistungspfad erforderlich sind. Der Aufbau und die Inbetriebnahme von allen Leiterplatten. Mit einem Leistungsboard kann schließlich aus Erzeuger-Speicher-Systemen eine bidirektionale Energieumwandlung in dem Spannungsbereich zwischen 300 und 800 V bei einer Nennleistung von 20 kW umgesetzt werden. Die Leistungselektronikeinheiten werden über einen gemeinsamen 800V DC-

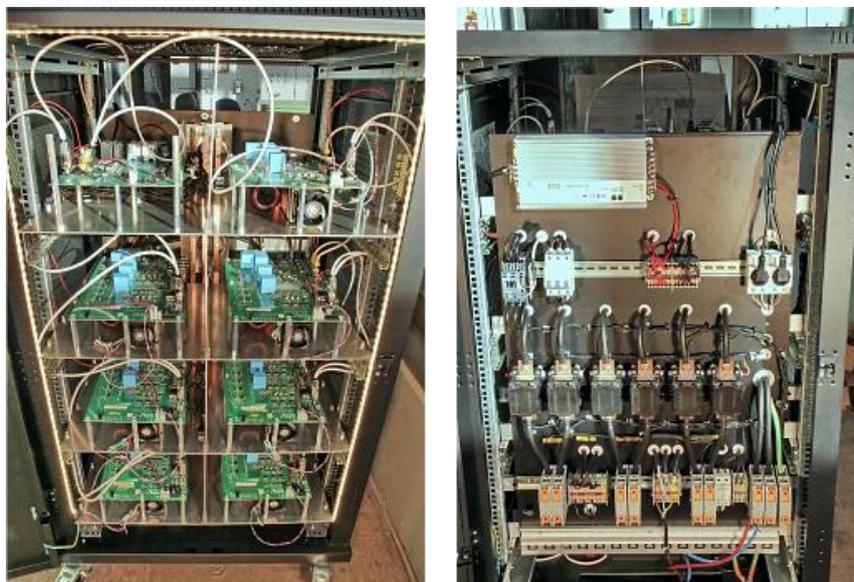
Zwischenkreis zu einer multifunktionalen Leistungselektronik, der diverse Energieflüsse bereitstellen kann zusammenschaltet.

Nach der Optimierungsphase werden die jeweils erforderlichen 14 Controller- und Leistungsboards mit der am Institut vorhandenen Dampfphasenlötanlage, durch Unterstützung von wissenschaftlichen Hilfskräften mit entsprechendem Know-How, innerhalb von kürzester Zeit gelötet und aufgebaut werden. Die passiven Bauelemente wurden vom Auftragnehmer bewickelt.

Für die Überprüfung der Funktionalität der einzelnen Leistungsboards wurden angepasste Software entwickelt. Abschließende Tests für einzelne Leiterplatten folgten unter Spannung. Im Wesentlichen wurden folgende Tests am IMAB durchgeführt:

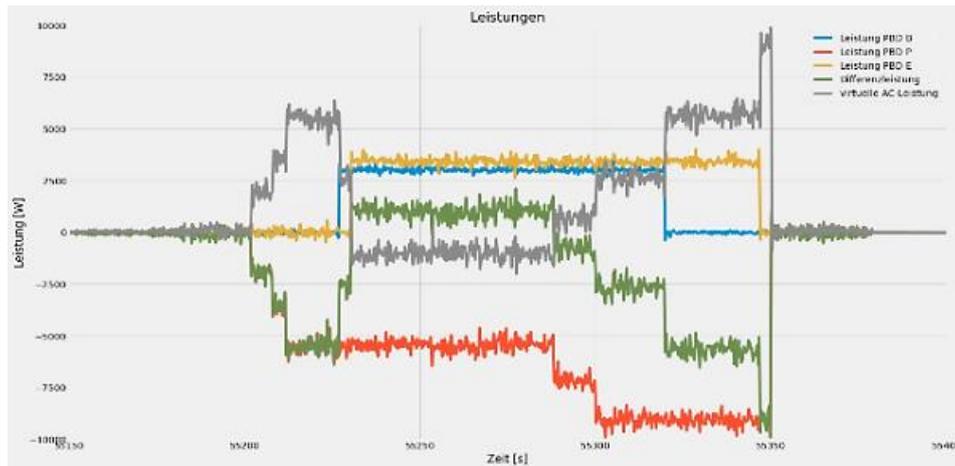
- Isolationstests bis 1000 V
- Doppelpulsversuche (Bis 1000 V) zur Verifizierung der Verlustleistungsberechnungen und zur Bewertung des Schaltverhaltens
- Tests im gesteuerten und geregelten Betrieb mit einer Platine
- Tests von zwei Platinen an einem gemeinsamen Zwischenkreis
- Dauertests bei voller Leistung zur Beurteilung der thermischen Auslegung
- Test des Gesamtsystems im Schaltschrank (Abb. links) inkl. verschiedener Energieflussrichtungen (Abb. rechts)

Vor der Inbetriebnahme des Gesamtsystems wurden alle entwickelten Leiterplatten in einem Schaltschrank eingebaut und verschaltet. Mit einer zusätzlichen Leiterplatte (Peripherieboard) wurden AC- und DC-Schütze angesteuert und der DC-Zwischenkreis vorgeladen.



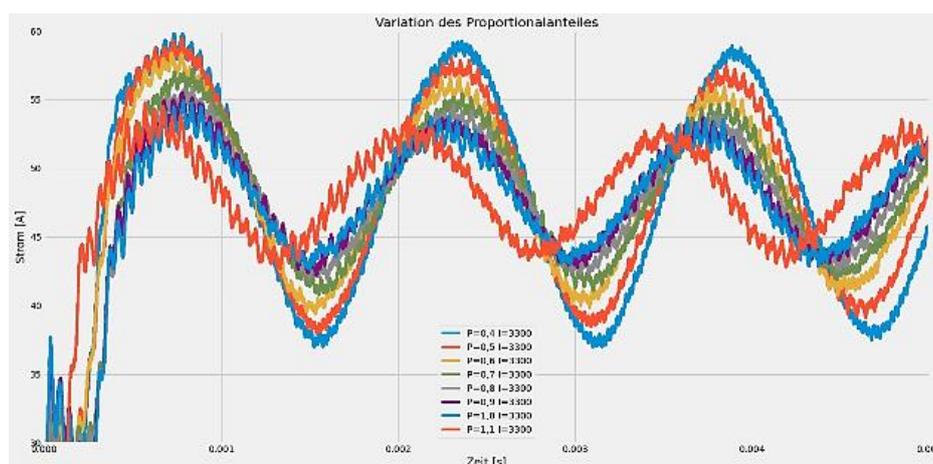
Aufgebauter Netprosum2030-Demonstrator

Vor der Freigabe des Demonstrators wird am IMAB die Inbetriebnahme des Demonstrators stattfinden. Die folgende Abbildung zeigt den abschließenden erfolgreichen Testverlauf des Demonstrators mit unterschiedlichen Lastflüssen inklusive Lastsprüngen. Als Quellen und Senken sind eine Netznachbildung, zwei bidirektionale Batterienachbildungen und eine Photovoltaiknachbildung zum Einsatz gekommen. Die Inbetriebnahme des Gesamtsystems erfolgte abschließend erfolgreich im elenia-energy-lab.



Test von unterschiedlichen Leistungsflüssen inklusive Lastsprüngen

Eine weitere Herausforderung war die Implementierung der Regelung. Folgende Punkte wurden im Wesentlichen umgesetzt: Ausführung der Regelungsschleife auf dem CLA, vollständig unabhängig von dem CPU. Der Reglertakt entspricht der Schaltfrequenz (110 kHz). Aufgrund der aufgebauten 6 Phasen und der hohen Schaltfrequenz ist die Messung analoger Messgrößen herausfordernd. Als Lösung wurde eine Verschiebung des Messfensters in Abhängigkeit der Duty Cycle implementiert, um Messungen in Schaltzeitpunkten zu vermeiden. Weiterhin wurden eine Stromregelung und eine Spannungsregelung implementiert. Mit Hilfe einer selbstentwickelten GUI mit Python konnten schließlich Reglerparameter in Betrieb verändert werden. In der Abbildung ist beispielhaft die Variation des Proportionalanteils des Reglers zu erkennen.



Parametervarianten des Reglers im Betrieb

CODAPE - Kollaborative Entwicklungsumgebung für die Leistungselektronik

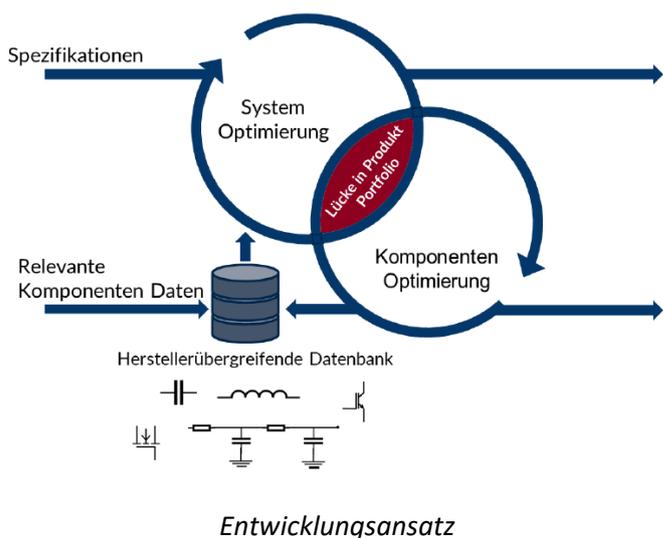
Verbundprojekt gefördert durch das BMBF, FKZ: 16ME0357

M.Sc. Tobias Fricke

Die aktuell bei der Entwicklung leistungselektronischer Systeme vorherrschende Vorgehensweise orientiert sich stark an dem allgemein bekannten V-Modell. Darüber hinaus spielt aber auch der Erfahrungsschatz der Entwickler eine große Rolle. In Summe führt dies oft dazu, dass die Entwicklungsarbeit an einzelne Arbeitsgruppen, Abteilungen oder sogar Unternehmen verteilt wird. Diese Vorgehensweise führt im späteren Verlauf des Entwicklungsprozess bei der Zusammenführung der Ergebnisse durch fehlende Schnittstellendefinitionen und Austauschprozesse zu Problemen und unnötigen zeitlichen Verzögerungen. Die Zielstellung der Projektpartner PE-Systems GmbH (Projekt-Koordinator), BLOCK Transformatoren-Elektronik GmbH, Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) und dem IMAB ist es daher, eine kollaborative Entwicklungsumgebung für leistungselektronische Systeme über Unternehmensgrenzen hinweg zu entwickeln. Diese soll eine systematische Optimierung der Systeme unter Einbezug der Optimierungspotentiale einzelner Teilkomponenten ermöglichen. Dazu werden zunächst Schnittstellendefinitionen zur Interaktion mit verschiedenen Entwicklungsumgebungen erarbeitet. Anschließend werden Methoden zur Entwurfsautomatisierung von Leistungselektronischen Systemen realisiert. Dabei wird die von der PE-Systems GmbH entwickelte, webbasierte Entwicklungsumgebung PE-Finder eine Basis für Erprobungen und Weiterentwicklungen bilden. Um Optimierungspotentiale möglichst effizient ausschöpfen zu können wird das Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) neuartige, kaskadierte Optimierungsalgorithmen integrieren. Der Effizienzzuwachs der digitalen Entwicklungsumgebung wird durch einen Demonstrator sowie Messungen anhand praxisrelevanter Anwendungsbeispiele erfolgen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den zukünftigen Entwicklungsansatz, welcher im Projekt realisiert werden wird. In einem ersten Schritt greift die Entwicklungsumgebung über eine Datenbank auf Eigenschaften am Markt verfügbarer Komponenten zu. Sollte dies zu keiner für den Nutzer akzeptablen Lösung führen gibt es die Möglichkeit, einzelne Teilkomponenten bei den jeweiligen Herstellern optimieren zu lassen. Die Ergebnisse können dank definierter Schnittstellen anschließend wieder an den Systemoptimierer zurückgeliefert und berücksichtigt werden.

Der Hauptaufgabenbereich des IMAB besteht darin, die von der kollaborativen Entwicklungsumgebung produzierten Ergebnisse zu verifizieren. Dazu ist das IMAB an der Spezifikation und dem Aufbau eines ersten System-Design beteiligt. Anschließend werden die einzelnen Komponenten aufgebaut und ihre elektrischen und thermischen Eigenschaften untersucht.



Dazu wird ein bereits vorhandenes Rapid Prototyping-System verwendet und angepasst.

Geplant sind Vermessungen von Halbleitern sowie passiven Komponenten. Darüber hinaus liefert das IMAB wichtigen Input und Feedback in früheren Projektphasen, in welchen es beispielsweise um bestehende Entwicklungshemmnisse oder inkompatible Schnittstellen geht.

IDE3AL - Innovationen für dynamische, energieeffiziente elektrische Antriebe mit neuartiger Leistungselektronik in der Industrie & Fertigung

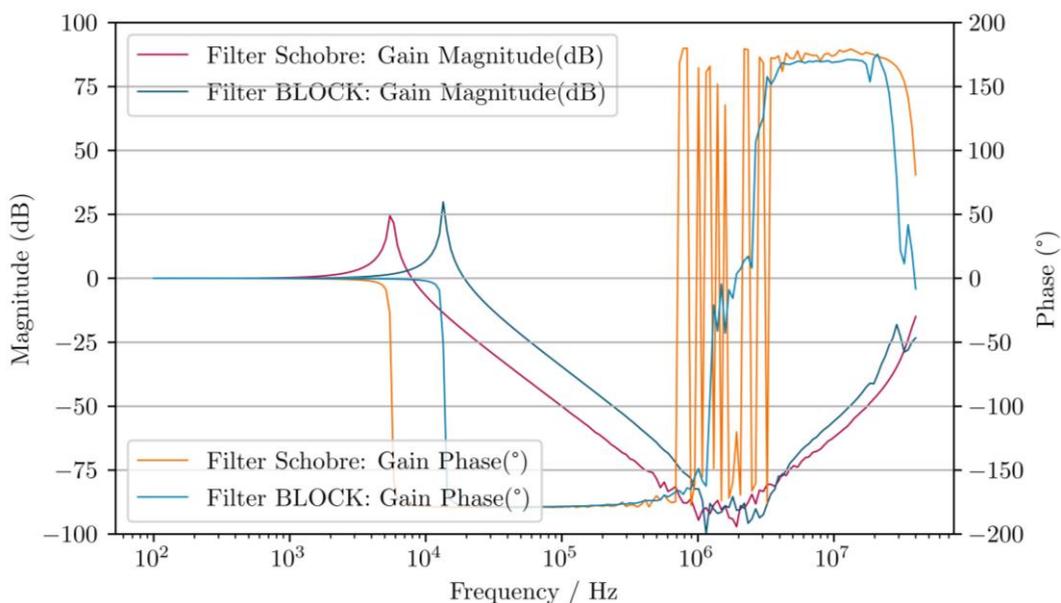
Verbundprojekt gefördert durch das BMWi, FKZ: 03ET1532 A-E

M.Sc. Lukas Radomsky, M.Sc. Thorben Schobre

Im Projekt IDE3AL wird untersucht wie sich durch den Einsatz von SiC-MOSFETs und eines Sinusfilters der Gesamtsystemwirkungsgrad bei Verwendung langer Motorleitungen erhöhen lässt. Ziel ist es, dass der SiC-Umrichter inklusive Sinusfilter einen Wirkungsgrad vergleichbar zu einem konventionellen Industrieantriebsumrichter mit IGBT-Technologie aufweist.

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. Das IMAB hat es 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 erfolgte eine Modellbildung und der modulare Aufbau des Umrichters.

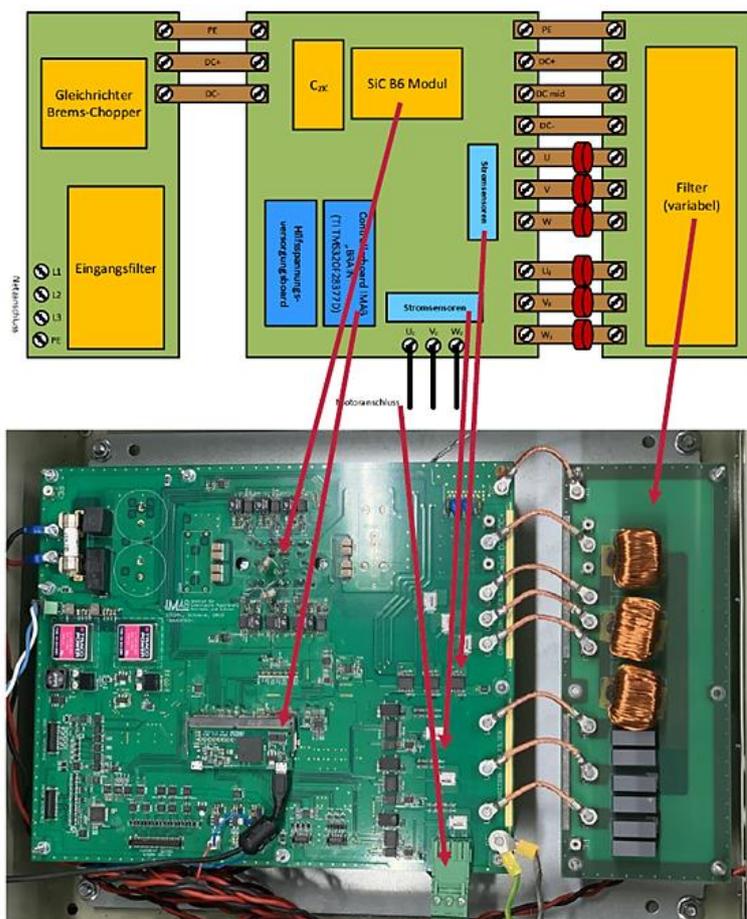
Im Zuge des Abschlusses dieses Projektes zum Jahresende 2021, wurde die Forschungsumrichterplattform aufgebaut und im dynamischen Betrieb untersucht. Darüber hinaus wurden verschiedene Filtervarianten zur Anwendung als Sinusfilter untersucht und aufgebaut. Dabei wurde bei der Auslegung sowohl die Gleichtakt- als auch die Gegentaktdämpfung berücksichtigt. Damit der Antriebsumrichter ohne geschirmter Leitungen mit dem Motor verbunden werden kann muss die Norm DIN EN IEC 61800-3 eingehalten werden. Die Störspannung lässt sich bei Schaltfrequenz zu ca. 165 dB/uV (überlagerte CM/DM-Störspannung) abschätzen.



Übertragungsverhalten des Filters gemessen mit Bode 100 Network Analyzer

Eine entsprechende Dämpfung muss durch das Filter erreicht werden. Der Fokus der Topologiebetrachtungen liegt hier auf Filtern zweiter Ordnung, welche allerdings mit unterschiedlichen Arten der Rückführung des Sternpunktes auf den Zwischenkreis verwendet werden können. Ohne Zurückführung auf den Zwischenkreis verliert das Filter seine Gleichtaktfilterwirkung zweiter Ordnung, es würde nur noch eine Wirkung erster Ordnung erzielt werden. In folgender Abbildung ist das Übertragungsverhalten eines Filters mit Rückführung auf das negative Potential des Zwischenkreises abgebildet. Über eine Messung der Störspannungen und Störströme mit dem Spektrumanalysator kann die Wirksamkeit in der Anwendung überprüft werden.

Für die Aufnahme dieser EMV-Vergleichsmessungen wurde für den U/f-gesteuerten Betrieb eine Controllersoftware inklusive einer intuitiv bedienbaren graphischen Bedienoberfläche programmiert. Als Strommesszangen wurden prototypische Strommesszangen des IEMV verwendet.



Forschungsumrichterplattform und Zuordnung der entsprechenden Komponenten im Blockschaltbild

Linearaktuatoren mit elektrischer Leistungsversorgung

Forschungsprojekt, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt Az: 31707

Dipl.-Ing. Q. Maurus, Prof. M. Henke

Der technologische Fortschritt in der Elektromobilität bietet für Kleinkehrmaschinen das Potential für eine umweltfreundlichere Konzeptionierung. Die Abkehr von Dieselmotoren hin zu elektrischen Antriebskonzepten ermöglicht gerade in belasteten Innenstadtbereichen eine Reduktion von Abgas- und Lärmemissionen. Die Realisierung einer ölfreien Maschine durch den vollständigen Ersatz von hydraulischen durch elektrische Antriebssysteme schließt zudem die Gefahr von umweltgefährdenden Ölhavarien aus und ist Inhalt des hier beschriebenen Forschungsprojektes, das mit den Projektpartnern IMN (Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Prof. Frerichs), OSWALD Elektromotoren GmbH und HAKO GmbH durchgeführt wurde. Die bisher auf mobilen Maschinen implementierte elektrische Antriebsleistung wird nur zur Versorgung rotatorischer Verbraucher und nicht zur direkten Erzeugung linearer Bewegungen verwendet. Dies liegt daran, dass bisher für den rauen mobilen Einsatz geeignete Linearaktuatoren kaum verfügbar sind. Eine vollständige Elektrifizierung des Gesamtsystems ist ohne diese Herausforderung zu überwinden nicht möglich. Deshalb ergibt sich die technologische Herausforderung, die robusten und zudem

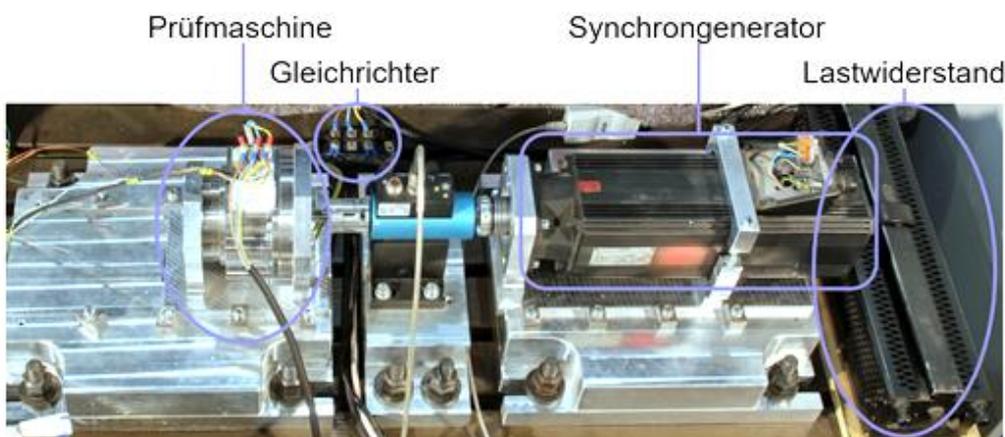
mit hoher Kraftdichte gestaltbaren Hydraulikzylinder durch elektrische Aktuatoren zu ersetzen. Diese Herausforderung wird hier adressiert, indem elektrische Antriebslösungen für zwei typische lineare Beispielantriebe entwickelt, gefertigt und getestet werden. Der Arbeitsumfang des Projektes wurde dazu auf zwei Phasen aufgeteilt. In der ersten Phase erfolgte die Anforderungsanalyse an die zwei betrachteten Beispielsysteme. Die Aktuatoren wurden ausgelegt, als Versuchsmuster aufgebaut und an Versuchständen erfolgreich erprobt.

Für das Beispiel Seitenbesenverstellung wurde der betrachtete Lösungsraum auf kombinierte elektromechanische Lösungen ausgeweitet. Es wurde ein Antrieb mit einer permanent erregten Axialflussmaschine und nachgeschaltetem Wellgetriebe (Harmonic Drive) als geeignete Lösung identifiziert. Diese wurde ausgelegt, gebaut und am Prüfstand getestet.



Komponenten der am IMAB berechneten, und mit Projektpartnern aufgebauten Axialflussmaschine

Weiterhin wurde das Aggregat an die neue Antriebslösung angepasst. Antrieb und Aggregat wurden anschließend am mobilen Prüfstand getestet.



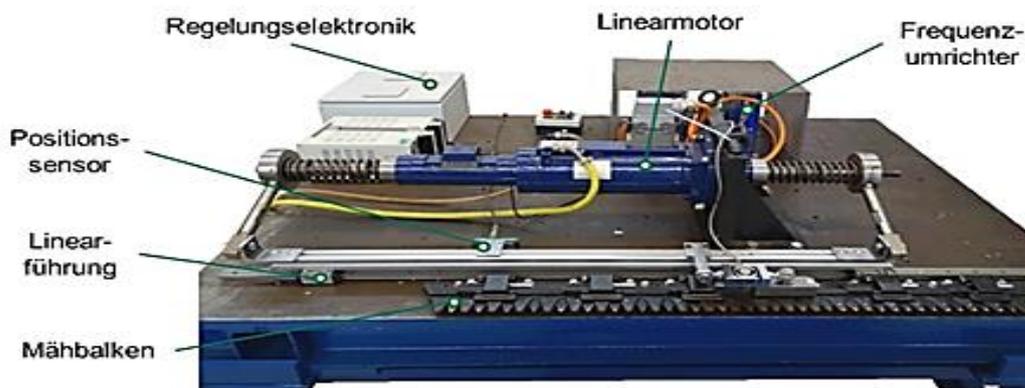
Prüfstand für Axialflussmaschinen am IMAB

Es konnte gezeigt werden, dass die elektromechanische Antriebslösung die erforderlichen Momente und Drehzahlen bereitstellen kann. Gleichzeitig ermöglicht der Ansatz eine Erweiterung des Verstellbereichs der Anwendung.



Prüfstands Aufbau für Stellaktuator

Für Beispielanwendung des direktangetriebenen Balkenmähwerts wurde das Mähwerkskonzept für eine mobile Erprobung weiterentwickelt. In diesem Projekt wurde daher ein alternativer Ansatz zur Erzeugung der benötigten linearen Schwingungsbewegung betrachtet. Dieser besteht darin, den Mähbalken direkt an einen Linearmotor zu koppeln, der eine oszillierende Antriebskraft erzeugen kann. Hierzu wurden zunächst die bestehenden Konzepte sowohl für das Mähwerk als auch für den Linearmotor konzeptionell betrachtet und konstruktiv überarbeitet. Sowohl Mähwerk als auch Aktuator wurden gefertigt. Es wurde zunächst der Aktuator unter Laborbedingungen getestet, anschließend wurde der Aktuator in Verbindung mit dem Mähwerk stationär an der TU Braunschweig erprobt.



Testumgebung für den elektromagnetischen Linearaktuator am IMN

ARIEL - Aufladung für Brennstoffzellensysteme durch interdisziplinär entwickelte elektrische Luftverdichter

03B10105D (BMVI): Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzelle (NIP) - Phase II: Aufladung für Brennstoffzellensysteme durch interdisziplinär entwickelte elektrische Luftverdichter

Dr. N. Langmaack, M.Sc. F. Lippold, M.Sc. S. Balasubramanian

Im Rahmen des Projektes „ARIEL“ werden am IMAB in zwei Arbeitspaketen verschiedene Themen aus den Feldern Hochdrehzahlantrieb, Wechselrichterentwurf und Zuverlässigkeit von Leistungshalbleitern bearbeitet. Das Anwendungsgebiet ist ein elektrischer Luftverdichter für Brennstoffzellensysteme für den automobilen Einsatz.

Entwurf und Optimierung eines Antriebswechselrichters

Beim Entwurf eines optimierten Antriebswechselrichters wird das folgende schrittweise Vorgehen verfolgt:

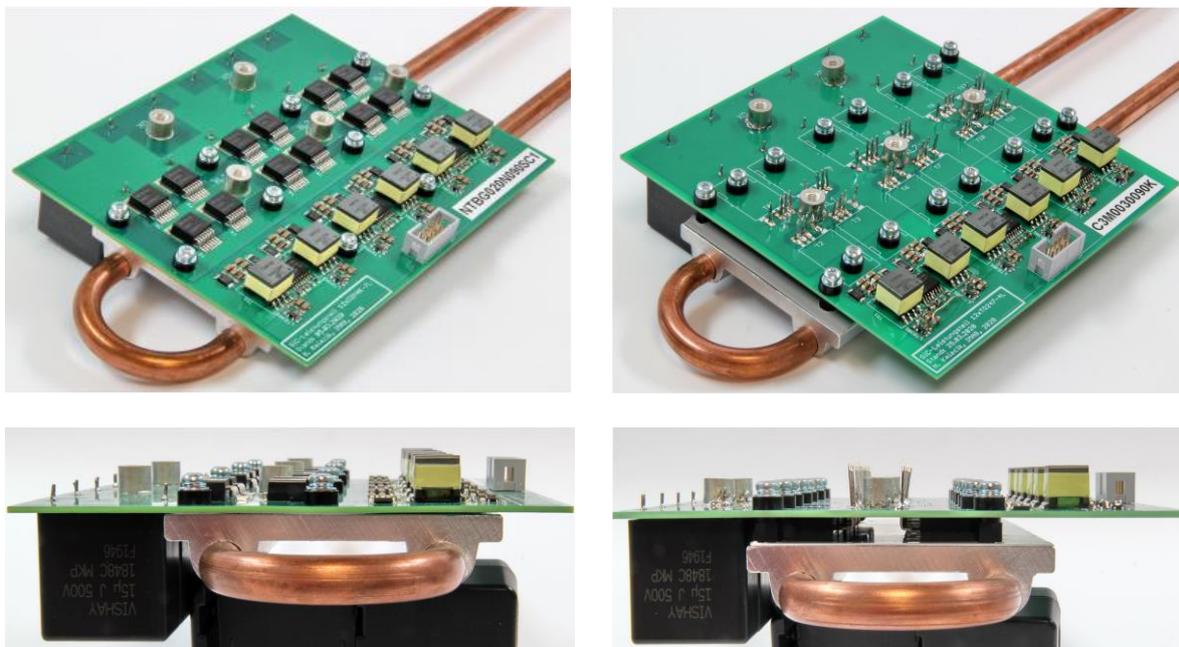
- Sammeln der anwendungsspezifischen Anforderungen
- Definition möglicher Konzepte im Hinblick auf Schaltungstopologie, Halbleitertechnologie und Bauteilbauformen
- Vergleich der Konzepte auf Basis vergleichender Verlustberechnungen
- Entwurf von Leistungsteilprototypen für ausgewählte Konzepte
- Prüfstandsvermessung der Prototypen
- Abschließende Bewertung und Entwurf eines vollständigen Wechselrichterprototypen

Unter den anwendungsspezifischen Anforderungen spielt neben der Versorgungsspannungsebene von nominal 400 V und der angestrebten Antriebsleistung von 15 kW vor allem die zur Reduktion von wechselrichterbedingten Zusatzverlusten in der elektrischen Maschine erforderliche Schaltfrequenz eine wichtige Rolle. Für Zwei-Punkt-Wechselrichtertopologien wird eine Schaltfrequenzanforderung von mindestens 60 kHz spezifiziert.

Mittels einer im Rahmen des Projektes entwickelten einheitlichen Verlustleistungsberechnungsmethode werden für diverse unterschiedliche Bauelemente wie Silizium-IGBTs, Siliziumkarbid-MOSFETs und Galliumnitrid-Kaskoden verschiedener Hersteller Verlustleistungsprognosen aufgestellt. Es zeigt sich, dass die hohe Schaltfrequenzanforderung in Zwei-Punkt-Topologien nur mit Wide-Band-Gap-Leistungshalbleitern sinnvoll erfüllt werden kann. Silizium-IGBTs können beispielsweise in einer Drei-Level-Topologie in T-Type-Konfiguration eingesetzt werden. Insgesamt werden in der breit angelegten Studie mehr als 33 unterschiedliche Konfigurationen analysiert.

In Form von Leistungsteilprototypen werden einige der vielversprechendsten Varianten praktisch umgesetzt und vermessen. Die Abbildung zeigt zwei Platinen für SiC-MOSFETs, einmal in SMD-Bauform und einmal im bedrahteten TO-247-Gehäuse. In jeder Schalterposition werden dabei zwei diskrete Bauteile parallel verschaltet. Die Zwischenkreise, Treiberschaltungen und Kühlkörper sind dabei für alle Aufbauten identisch. Die Platinenlayouts unterscheiden sich vornehmlich im Bereich unmittelbar um die Leistungshalbleiter herum.

Die Kühlung der Halbleiter erfolgt bei den SMD-Bauteilen durch die Platine hindurch. Hierzu ist die achtlagige Platine im Bereich unter den MOSFETs mit einer großen Zahl an gefüllten und übermetallisierten Durchkontaktierungen ausgestattet, um den thermischen Widerstand in vertikaler Richtung zu minimieren. Die von unten unbestückte Platine wird dann flächig mit einer elektrisch isolierenden Wärmeleitfolie an den Kühlkörper angebunden. Im Gegensatz hierzu sind die bedrahteten Bauelemente (TO-247) direkt auf dem Kühlkörper montiert. Dabei kommt die gleiche isolierende Wärmeleitfolie zum Einsatz.



Leistungsteilprototypen mit SiC-MOSFETs

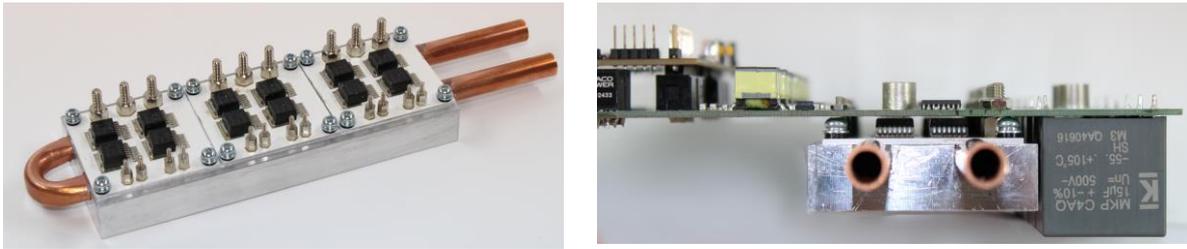
Tabelle 1 zeigt eine Auswahl von Messwerten, die mit den realisierten Leistungsteilprototypen im Prüfstand ermittelt werden können. Betrachtet wird dabei vor allem ein Betriebspunkt bei 400 V Eingangsspannung und einem Laststrom von 42 Aeff.

Tabelle 1: Mit den Leistungsteilprototypen ermittelte Messergebnisse

Leistungshalbleiter	Beschreibung	Spannungsteilheit(V/ns)		Verlustleistung(W) @ 60 kHz		Abweich.
		steigend	fallend	gemessen	berechnet	
SCTH100N65G2-7AG	SiC 650 V, 20 mΩ, D ² PAK	15,8	-14,4	393	349	44
NVBG020N090SC1	SiC 900 V, 20 mΩ, D ² PAK	28,3	-36,2	359	323	36
C3M0030090K	SiC 900 V, 30 mΩ, TO-247	32,4	-36,2	372	335	37
IMZ120R030M1H	SiC 1200 V, 30 mΩ, TO-247	34,5	-41,1	370	338	32
TP65H035WSQA	GaN 650 V, 35 mΩ, TO-247	37,1	-37,7	429	336	93

Es ist zu erkennen, dass mit SiC-MOSFETs ein trotz der hohen Schaltfrequenz erwartungsgemäß hoher Wirkungsgrad erreicht werden kann. Die verwendeten GaN-Halbleiter neigen zu starken Oszillationen und sind leider nur unter Einbeziehung zusätzlicher, verlustbehafteter Snubberschaltungen in Parallelschaltung zu betreiben. Weiterhin wird festgestellt, dass die Kühlung der favorisierten SMD-Bauteile (z.B. NVBG020N090SC1) aufbaubedingt deutlich ineffizienter ist, als diejenige der bedrahteten Bauelemente. Es wird daher im Rahmen einer thermischen Optimierung nach Lösungen gesucht, die Kühlung für SMD-Bauteile zu verbessern.

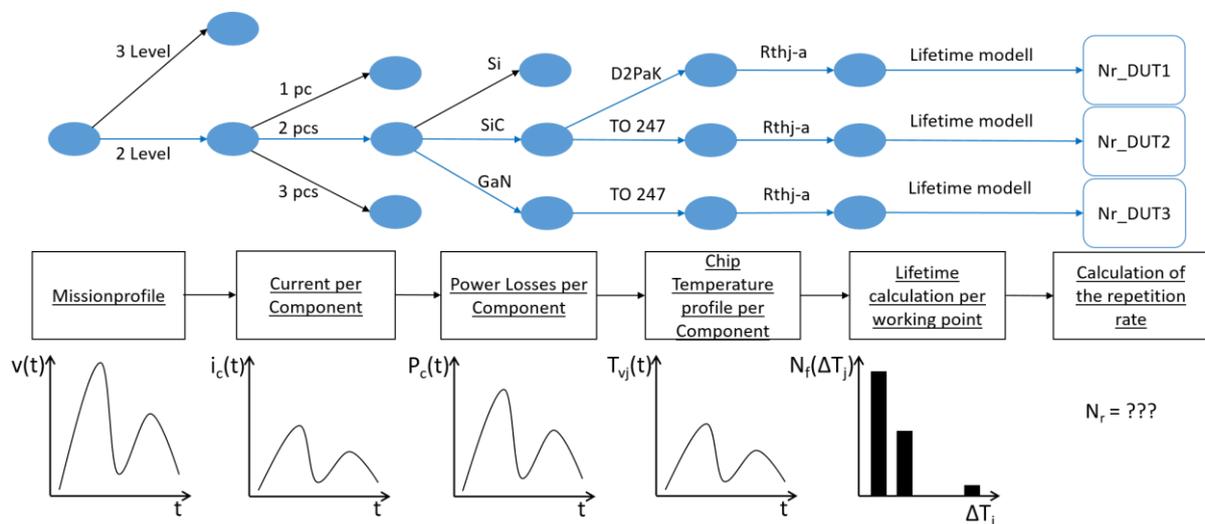
Ergebnis dieser Optimierung ist ein Aufbau mit Aluminiumplatinen. Mit diesem kann ein thermischer Widerstand zwischen der Sperrschicht und dem Kühlmedium erreicht werden, der auf dem Niveau der bedrahteten TO-247-Bauteile liegt. Basierend auf dieser Lösung wird ein vollständiger Wechselrichterprototyp entworfen.



Thermisch optimierter Aufbau mit Aluminium-IMS-Platinen

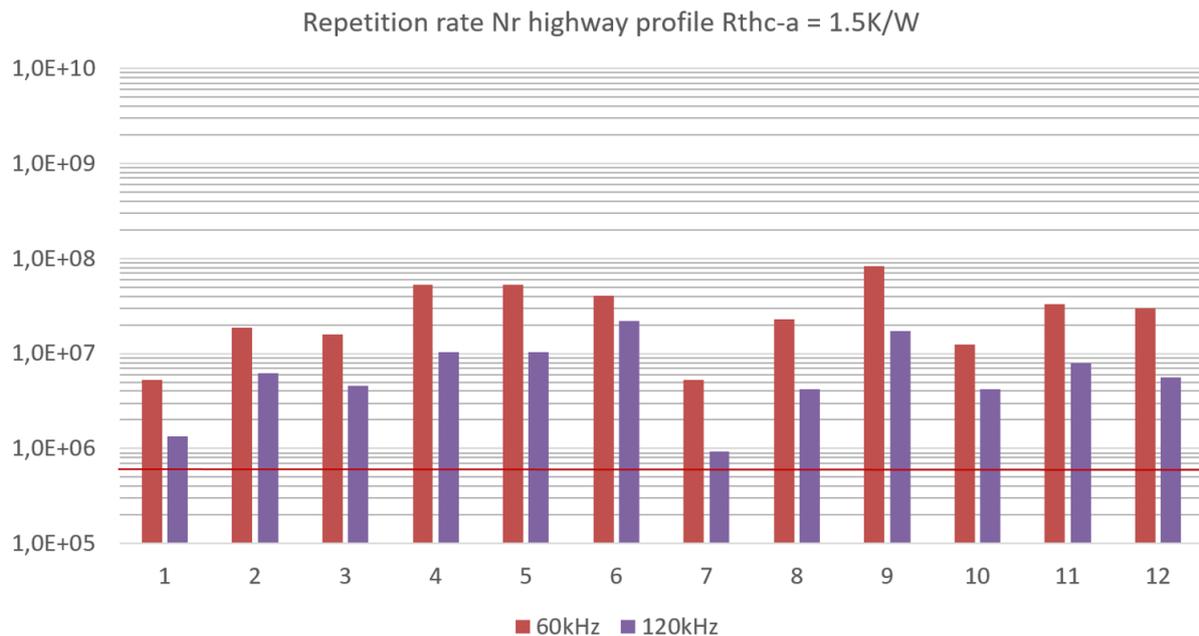
Lebensdauerabschätzung der Leistungshalbleiter

Die Anforderungen an die Lebensdauer eines Brennstoffzellenfahrzeugs sind vergleichbar mit denen eines batterieelektrischen Fahrzeugs. Auch hier sind die Leistungshalbleiter ein limitierender Faktor. Nach der Auswahl der Topologie, der Anzahl an Parallelschaltungen und der verfügbaren Leistungshalbleiter mit unterschiedlichen Technologien, Gehäusen und thermischen Aufbaueigenschaften wurden zunächst für stationäre Betriebspunkte die Verlustleistung und darauf aufbauend die Halbleitertemperatur berechnet (siehe Abbildung).



Methodik zur Lebensdauerabschätzung

Mit den berechneten Temperaturhüben kann dann die zu erwartende Anzahl an Lastwechselzyklen ermittelt werden. Um die Beanspruchung der Leistungshalbleiter in einem Brennstoffzellenfahrzeug nachzubilden, wurden die Berechnungen auf Belastungsprofile übertragen. In der Abbildung sind die Ergebnisse dargestellt. Zu sehen sind die Wiederholraten für eine Auswahl an Leistungshalbleitern für das Belastungsprofil „Autobahnfahrt“. Die Schaltfrequenz hat einen großen Einfluss bei der Verlustberechnung und über die Chiptemperatur auch auf die Lebensdauer.



Wiederholraten für ein Belastungsprofil

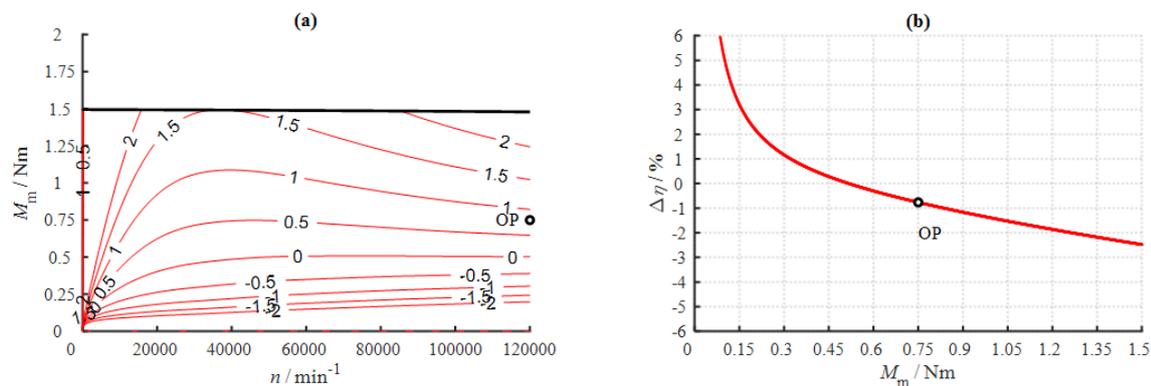
Die Grundlage für die Lebensdauerberechnungen bilden Lebensdauermodelle. Diese basieren auf umfangreichen Messreihen, den Lastwechseltests. Im Rahmen des Projekts ARIEL wurde ein Lastwechselprüfstand beschafft (siehe Kapitel „Neue Prüfstandstechnik am IMAB - Zuverlässigkeitslabor“). Parallel zu den Berechnungen laufen Lastwechseltests um die Lebensdauermodelle zu verbessern und an neue Halbleitertechnologien wie Siliziumkarbid oder Galliumnitrid anzupassen.

Fertigungsgerechte Auslegung der Hochdrehzahlmaschine

Für eine optimale Stromerzeugung mit hoher Effizienz und Leistungsdichte benötigen mobile Brennstoffzellen in Automobilanwendungen eine partikelfreie, hohe Druckluftversorgung (Sauerstoff). In den letzten Jahren geht der Trend zu höheren Massenströmen und Druckverhältnissen, was durch schnelllaufende Turboverdichter erreicht wird. Diese Aggregate werden direkt von berührungslos gelagerten Elektromotoren und leistungselektronischen Umrichtern angetrieben und müssen - wie jedes elektrische Bauteil im automobilen Umfeld - eine optimierte Lebensdauer aufweisen. Zugleich sollten diese Bauteile ressourcenschonend sein, wenig Platz einnehmen und über ein möglichst geringes Gewicht verfügen. Ferner müssen sie auch kostenoptimiert und simpel herstellbar sein, um der Großserienfertigung gerecht zu werden.

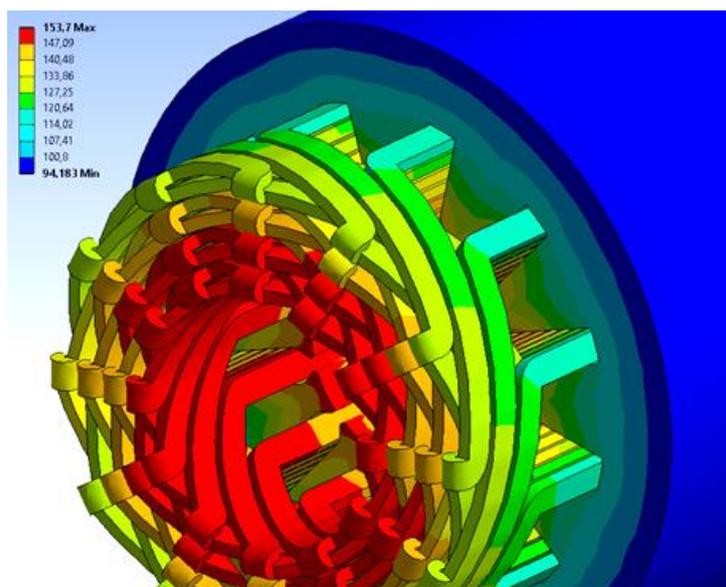
Die fertigungsbedingten Herausforderungen und die Auswahl eines bestimmten Materials/Verfahrens sind abhängig von den Einschränkungen, die in Design und Ingenieurskonstruktion begründet liegen. Im Fokus steht dabei die Frage, wie der Stator des schnelllaufenden Elektromotors gewickelt ist und wie die einzelnen Spulen innerhalb der Nuten angeordnet sind. Rundbündeldrähte mit Einzugstechnik werden heutzutage am meisten verwendet, sind aber mit längeren und komplizierten Fertigungsprozessen verbunden. In den letzten Jahren hat sich die rechteckige Drahtwicklung in Form einer Haarnadelstruktur aufgrund ihres hohen Nutzfüllfaktors, der guten thermischen Eigenschaften und der relativ einfachen Herstellungsweise in Traktionsanwendungen an Bedeutung gewonnen. Für Hochgeschwindigkeitsanwendungen leiden sie jedoch unter zu hohen Wechselstrom-Kupferverlusten und werden normalerweise ohne spezielle

Korrekturmaßnahmen - wie beispielsweise die Verwendung von Litzendrähten, die die Kosten erhöhen - nicht eingesetzt.



(a) Konturlinien, die den Wirkungsgradunterschied zwischen PMSM-RW (Runddrahtwicklung) und PMSM-HW (Haarnadelwicklung) darstellen (b) Wirkungsgradunterschied zwischen PMSM-RW (Runddrahtwicklung) und PMSM-HW (Haarnadelwicklung) für unterschiedlichen Drehmomente bei Nenndrehzahl von $n_N = 120000 \text{ min}^{-1}$

Grundlegende Konstruktionsregeln für einen schnelllaufenden Kompressormotor mit Haarnadelwicklungen wurden vorgestellt und mit einer Prototypmaschine mit runden, gebündelten Wicklungen verglichen. Die Abbildung zeigt, dass die Topologie mit rechteckigen Drahtwicklungen unter erhöhten Hochfrequenzverlusten und damit einem schlechteren Wirkungsgrad (0,8% Reduktion im Arbeitspunkt) leidet, was die Systemkosten in gewissem Maße erhöhen kann. Es wurde eine umfassende Verlustabschätzung für die vorgeschlagene Maschine vorgenommen und durch Simulationen gezeigt, dass die Topologie mit Haarnadelwicklungen mit besserem Wärmeübergang und dem inhärent besseren thermischen Design hinsichtlich der Leistung mit einer Runddrahttopologie vergleichbar ist. Eine Hardware-Validierung war nicht Teil dieser Studie und bleibt der Zukunft vorbehalten.



Temperaturverteilung im Wickelkopfbereich für den Arbeitspunkt. Die "Hot-spot" Temperatur beträgt 154°C

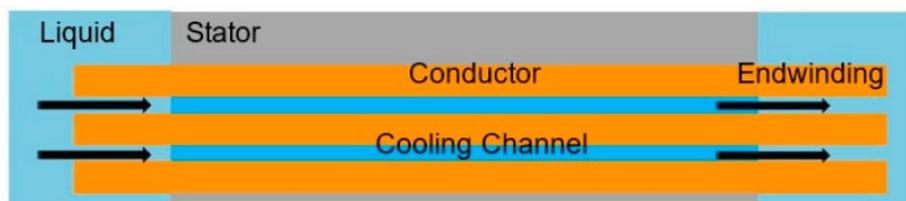
SE²A – ICA C4.1 Electric Propulsion Drive Concepts for Future Electrified Aircraft

Einfluss der Stromdichte und der Kühlung auf die Massenbilanz elektrischer Flugantriebe

gefördert durch die „Exzellenzstrategie“ des Bundes: EXC 2163

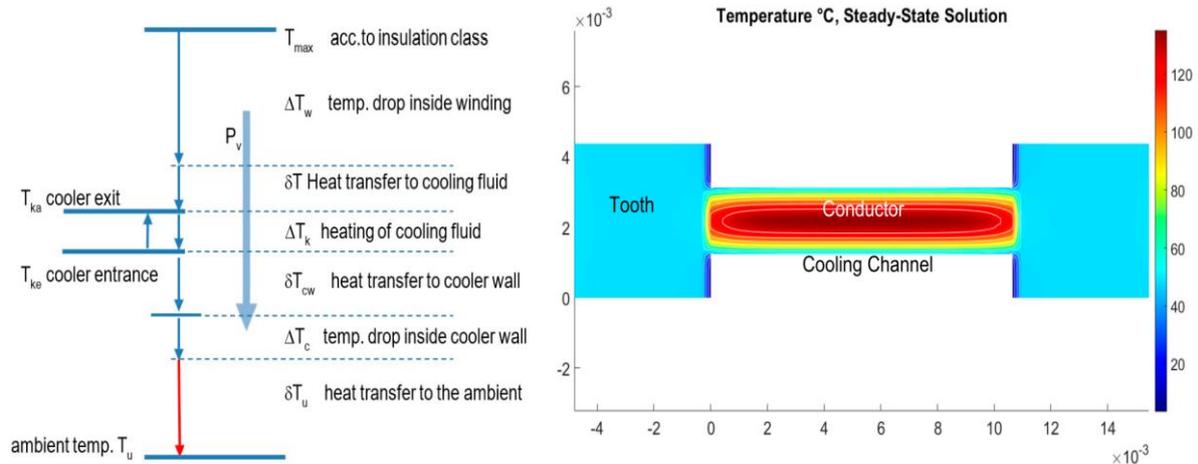
Dipl.-Ing. Jan Hoffmann, Prof. Wolf-Rüdiger Canders

Im Zuge der Forschung für das Exzellenzclusterprojekt SE²A der TU Braunschweig werden am IMAB verschiedene Untersuchungen zur Erhöhung der gravimetrischen Leistungsdichte von elektrischen Flugantrieben durchgeführt. Dieses betrifft sowohl die Maschinen- als auch die Leistungselektronikseite. Zunächst erfolgten Untersuchungen an normal-leitenden elektrischen Antrieben für den Themenbereich des E-Antriebs, mit dem Ziel, eine exemplarische Systembetrachtung für den Antrieb und das Kühlsystem zu erarbeiten. Elektrische Maschinen beinhalten üblicherweise Materialien hoher Dichten, wie z. B. Kupfer und Eisen, im Falle von Hochleistungsantrieben auch Kobalt. Die Einflussgrößen im Maschinendesign mit größter Hebelwirkung auf die Antriebsmasse sind die Ausnutzung des Elektroblechs und die Stromdichte. Eine höhere Stromdichte ermöglicht ein geringeres Kupfergewicht und hat höhere Verluste zur Folge. Es gibt also eine funktionale Abhängigkeit zwischen Verlusten, Temperaturen und Kühlaufwand. Aufgrund dieses Zusammenhangs wurden Betrachtungen zur Bestimmung der optimalen Stromdichte in Wechselwirkung mit dem Kühlsystem durchgeführt, für die sich ein minimales Systemgewicht einstellt. Grundlage der Betrachtungen war ein 100 PAX - Flugzeug für Kurzstreckenverkehr. In dieser Studie wurde eine permanentmagneterregte E-Maschine in Kombination mit einem elektrisch isolierenden Fluid auf Polysiloxan-Basis für das Kühlsystem angenommen. Der Vorteil der Nutzung dieses Kühlmediums liegt hier zudem in dem sehr weit nutzbaren Temperaturbereich, der über Wasser-Glykol-Mischungen liegt, und der geringen Viskosität.



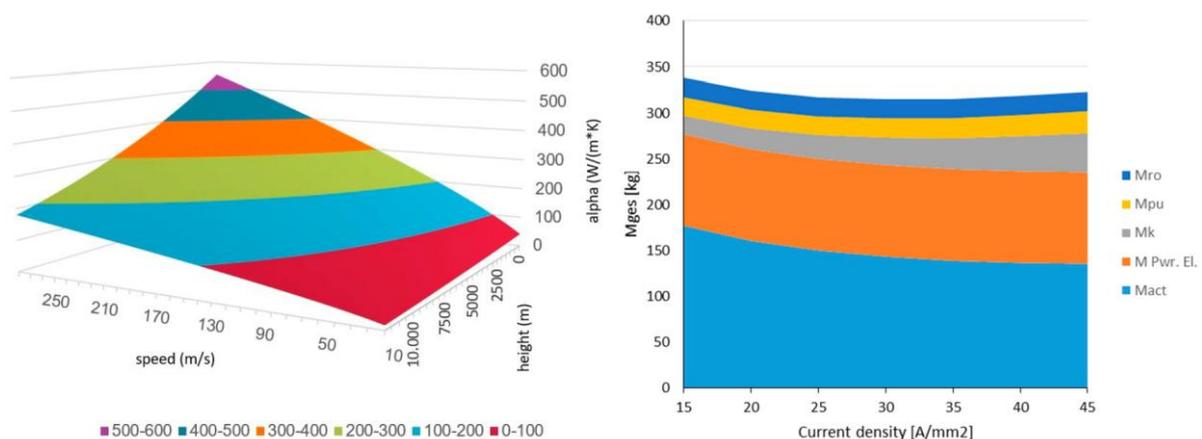
Das Designziel der Gewichtsreduktion wird durch eine Erhöhung der Stromdichte in den Kupferleitern des Stators angestrebt. Die Stromdichteerhöhung bewirkt eine geringere Nutzhöhe, somit kürzere Zähne und folglich eine Materialeinsparung mit Gewichtsreduktion. Die Hotspots in der Verlustwärmeerzeugung liegen im Bereich der Wicklung. Daher wird eine hocheffiziente Kühlmethode untersucht, die direkte Leiterkühlung, bei der das Kühlmedium durch die Nuten und zwischen den Leitern hindurch gepumpt wird. Im Allgemeinen gilt, dass die Temperaturen in der Maschine und im Kühlsystem nur zwischen zwei Grenzen variieren können: der maximal zulässigen Temperatur der Isolation (z. B. Klasse H mit 180 °C, IEC 34, EN-DIN 60034) und der Umgebungstemperatur, hier gewählt mit 40 °C). Die Temperaturdifferenz gliedert sich weiter in kleinere Bereiche, wie aus dem Diagramm unten hervorgeht. Da die Wärmekapazität einer leistungsdichten E-Maschine gering ist, kann man gerade in der Startphase mit hohen Leistungsabgaben über Zeiträume von typischerweise 15 bis 30 min nicht davon profitieren und muss aktiv kühlen. Vorausgegangene Untersuchungen zeigten, dass beim Kühlen mit Gasen hohe Kompressormassen zu erwarten sind. Eine

Fluidkühlung stellt die robusteste und praktikabelste Lösung dar, da neben einer geringeren Pumpenmasse und einer nicht erforderlichen hohen Druckfestigkeit der Maschine auch der Vorteil einer gleichmäßigeren Entwärmung im Nutbereich erfolgt, verglichen z.B. mit einer Siedekühlung.



Temperaturverteilungen

Die thermische Situation in der Nut wurde mittels eines thermischen Netzwerks sowie eines 2D-FEM-Modells untersucht, mit Hilfe dessen automatisierte Matlab-gekoppelte Berechnungen mit variierender Geometrie ausgeführt werden (s. o.). Das Modell beinhaltet neben den Wickelkopfverlusten die Eigenschaften in der Nut mit Nutauskleidung, Leiter, Kühlkanal und die Zähne. Darüber hinaus berücksichtigt die Systemberechnung einen Fluidkreislauf mit Pumpe und Rückkühler. Geschwindigkeits- und höhenbezogene Umgebungsbedingungen bilden die Berechnungsbasis für den Rückkühler. Die Wärmeübergangskoeffizienten zur Luft sind ohne zusätzliche Maßnahmen gering. Aufgrund dessen ist die benötigte Fläche ein Treiber der Systemmasse. Für die Auslegung des Kühlers wurden verrippte Oberflächensysteme betrachtet, die hinter dem Propulsor angebracht werden. Durch diese Kühlflächen wird weniger Drag erzeugt als z. B. mit Stauluftsystemen. Das untere rechte Diagramm zeigt für einen 2-MW-Antriebsstrang die Massenbilanz aus der Überlagerung von Antriebsmasse, Leistungselektronik, Kühlermasse, Verrohrung und Pumpe über der Stromdichte mit verkoppelter Nuthöhenreduktion. Es ergibt sich für diesen Fall eine optimale Stromdichte um 30 A/mm^2 herum.



Wärmeübergang und Massenbilanz

SE²A - Sustainable and Energy-Efficient Aviation - ICA C 4.2: Power Supply System for All Electric Aircraft

gefördert durch die „Exzellenzstrategie“ des Bundes: EXC 2163

M. Sc. Hendrik Schefer

Das Exzellenzcluster SE²A - EXC 2163 ist ein interdisziplinäres Forschungsvorhaben mit dem Ziel, Technologien für die nachhaltige und umweltverträgliche Entwicklung des Luftverkehrs zu erforschen. In dem Cluster arbeiten Wissenschaftler*innen aus Luftfahrt, Elektrotechnik, Energie, Chemie und Design an der Senkung von Emissionen, der Verringerung der Lärmbelastung, der Recyclingfähigkeit von Lufttransportsystemen sowie der Weiterentwicklung des Luftverkehrs-Managements. An SE²A sind neben der TU Braunschweig das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), die Leibniz Universität Hannover (LUH), die Hochschule für Bildende Künste Braunschweig (HBK) und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) auf der Grundlage von Kooperationsverträgen beteiligt. (Zitat: <https://www.tu-braunschweig.de/se2a>)

Das von der deutschen Forschungsgesellschaft geförderte Projekt gliedert sich dabei in viele Teilprojekte. In einem Teilprojekt „ICA C 4.2: Power Supply System for All Electric Aircraft“ ist auch die Arbeitsgruppe von Prof. Dr.-Ing. Mallwitz durch einen wiss. Mitarbeiter vertreten. Das Teilprojekt soll anderen Arbeitsgruppen Daten zu gravimetrischen und volumetrischen Leistungsdichten von leistungselektronischen Wandlern und dem Bordnetz liefern, um das Gesamtflugzeugdesign zu ermöglichen. Die Substitution des konventionellen Antriebsstranges erfordert hohe Leistungsdichten. Im Teilprojekt ICA C 4.2 sind auch das elenia und das IAL der LUH assoziiert.

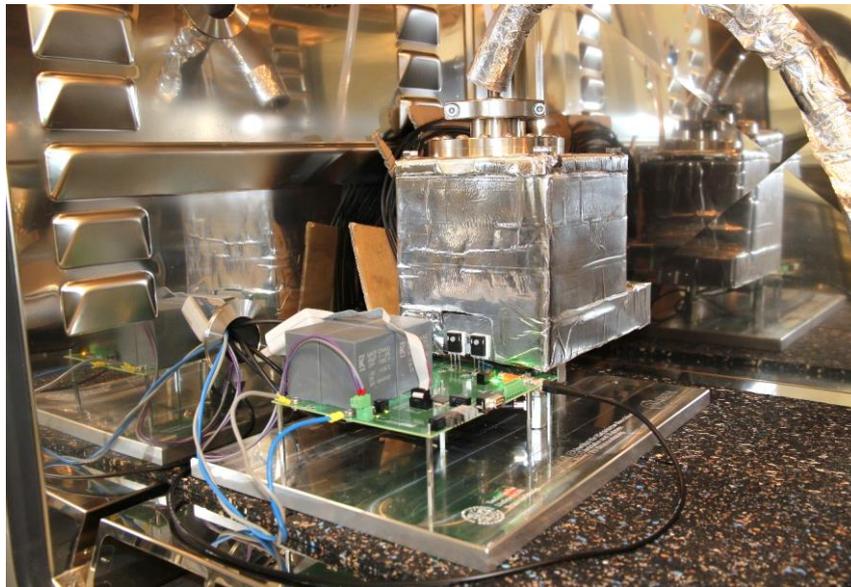
Nach einem Jahr konnte durch eine Veröffentlichung in IEEE OpenAccess eine wichtige Basis für eine Weiterförderung erzielt werden. Für die weiteren Arbeiten wurde das Forschungsthema „Zuverlässigkeit in der Leistungselektronik“ ausgewählt, auch mit Blick auf den weiteren Ausbau des Zuverlässigkeitslabors sowie die Beschaffung von Großgeräten.

Es soll eine Methodik ergründet werden, um im Designprozess von sehr leistungsdichter Leistungselektronik die Zuverlässigkeit des Wandlers abschätzen zu können. Hierzu wird versucht, die Bauteilzuverlässigkeit innerhalb der Leistungselektronik zu modellieren und zu verifizieren, um die Gesamtkomponente robust gegen alterungsbedingte Ausfälle designen zu können.

Bei den Überlegungen der optimalen Bordnetzstruktur zeigt sich, dass ein Hochvoltansatz zu Problemen der Isolationskoordination führt und Zuverlässigkeitsaspekte (Alterung von Isolationen, Höhenstrahlung, Ausfallmechanismen von Kondensatoren und aktiven Bauelementen) unbekannt sind. Die Zuverlässigkeit von Kriechstrecken auf PCBs und Induktivitäten muss gewährleistet sein. Mit der steigenden Bordnetzspannung liegen auch hohe Spannungsänderungsgeschwindigkeiten unter harschen Umweltbedingungen (Flughöhe 5.000 m – 15.000 Metern) vor. Auch die Kondensatoren und die aktiven Bauelemente werden in einem leistungsdichten Aufbau stärker belastet. Der Hochvoltansatz hängt auch von der zukünftigen SiC-Halbleiterentwicklung und deren Zuverlässigkeitsaspekten ab.

Die Supraleitung ist ein weiterer Technologieansatz. Die Halbleiter sind hierbei wichtiger Bestandteil der Energiewandlungskette. Es stellt sich die Frage, ob die Halbleiter bei diesen tiefen Temperaturen ordnungsgemäß arbeiten oder sogar der Betrieb bei tiefen Temperaturen vorteilhaft sein kann und welche konstruktiven Maßnahmen ergriffen werden müssen. Diese Erkenntnisse sind essentiell, um eine optimale Bordnetzstruktur zu erzielen. Für Langstreckenflugzeuge könnte eine Kombination aus beiden Ansätzen extrem

hohe Leistungen ermöglichen. In einer Voruntersuchung wurde das Schaltverhalten verschiedener Halbleiterarten (Si Superjunction MOSFET, IGBT, SiC MOSFET, GaN Cascoden MOSFET) untersucht. Die Abbildung zeigt den selbstentwickelten Versuchsaufbau im Klimaschrank des Zuverlässigkeitslabors.



Selbstentwickelter Versuchsträger für Untersuchungen von Halbleitern in sehr tiefen Temperaturen

Mittels einer DoE (Design of Experiments) werden beim Hochvoltansatz Kriechstrecken auf PCBs verifiziert. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass eine Prüfstandsautomatisierung erforderlich ist, um eine Reproduzierbarkeit zu erzielen. Mit dem designten Prüfstand (Ni cRIO und HV-Netzteil) können Kriechstrecken auf PCBs unter harschen Umweltbedingungen getestet werden. Eine Erweiterung durch einen wassergekühlten du/dt-Belastungsaufbau, um den Einfluss der hart-schaltenden Halbleiter abzubilden, ist angestrebt. Der Belastungsaufbau befindet sich in der Inbetriebnahme.

Des Weiteren sollen Verlustmechanismen in aktiven und passiven Bauteilen ergründet werden. Die Verlustmechanismen werden unter bestimmten Randbedingungen mit Modellen der Zuverlässigkeitsprognose verknüpft. Eine Vielzahl von Versuchsträgern sind im Designprozess.

EPROREF - Elektrische Propulsoren für Regionalflugzeuge

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Förderbereich:

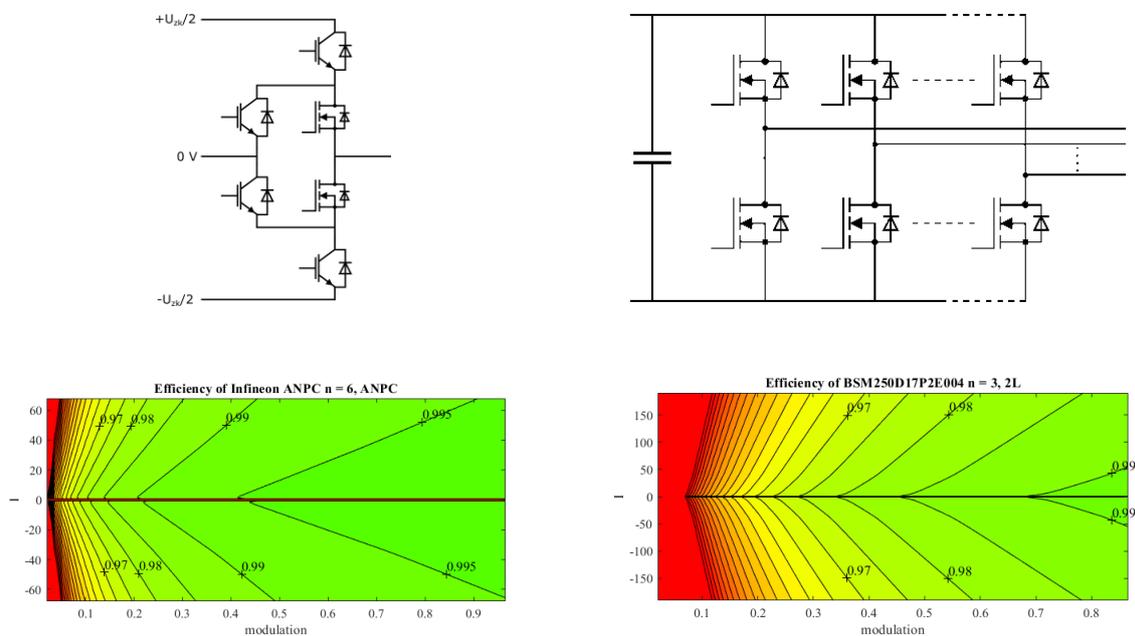
1. Aufruf Luftfahrtforschungsprogramm VI (LuFo VI-1), Förderkennzeichen: 20M1906B

M. Sc. Dirk Fischer M. Eng. Robert Rohn

EPROREF hat die Entwicklung eines elektrischen Antriebsstranges für kleine Passagierflugzeuge mit einer Kapazität von 20-50 Passagieren und einer Flugreichweite ca. 1000 km zur Zielsetzung. Um dabei eine höchstmögliche Effizienz zu erzielen wird das Systems, bestehend aus Propeller, Elektromotor und Umrichter in seiner Ganzheit betrachtet und entwickelt. Neben der Entwicklung und Optimierung der Einzelkomponenten, wird der Bewertung des Zusammenspiels und somit des Gesamtsystemwirkungsgrades höchste Bedeutung zugeordnet. Ebenso dem für den Einsatz im Flugverkehr geforderten hohen

Leistungsgewicht, erhöhte Ausfallsicherheit und Redundanz. Der Entwicklungsprozess baut dabei auf validiertem Grundlagenwissen und langjähriger Erfahrungen wissenschaftlicher und industrieller Partner in den unterschiedlichen Themengebieten auf. Neben der Oswald Elektromotoren GmbH sind von der TU-Braunschweig das Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen (IFAS) und das IMAB an dem Projekt beteiligt. Das IMAB konzentriert sich dabei auf die Entwicklung der Leistungselektronik.

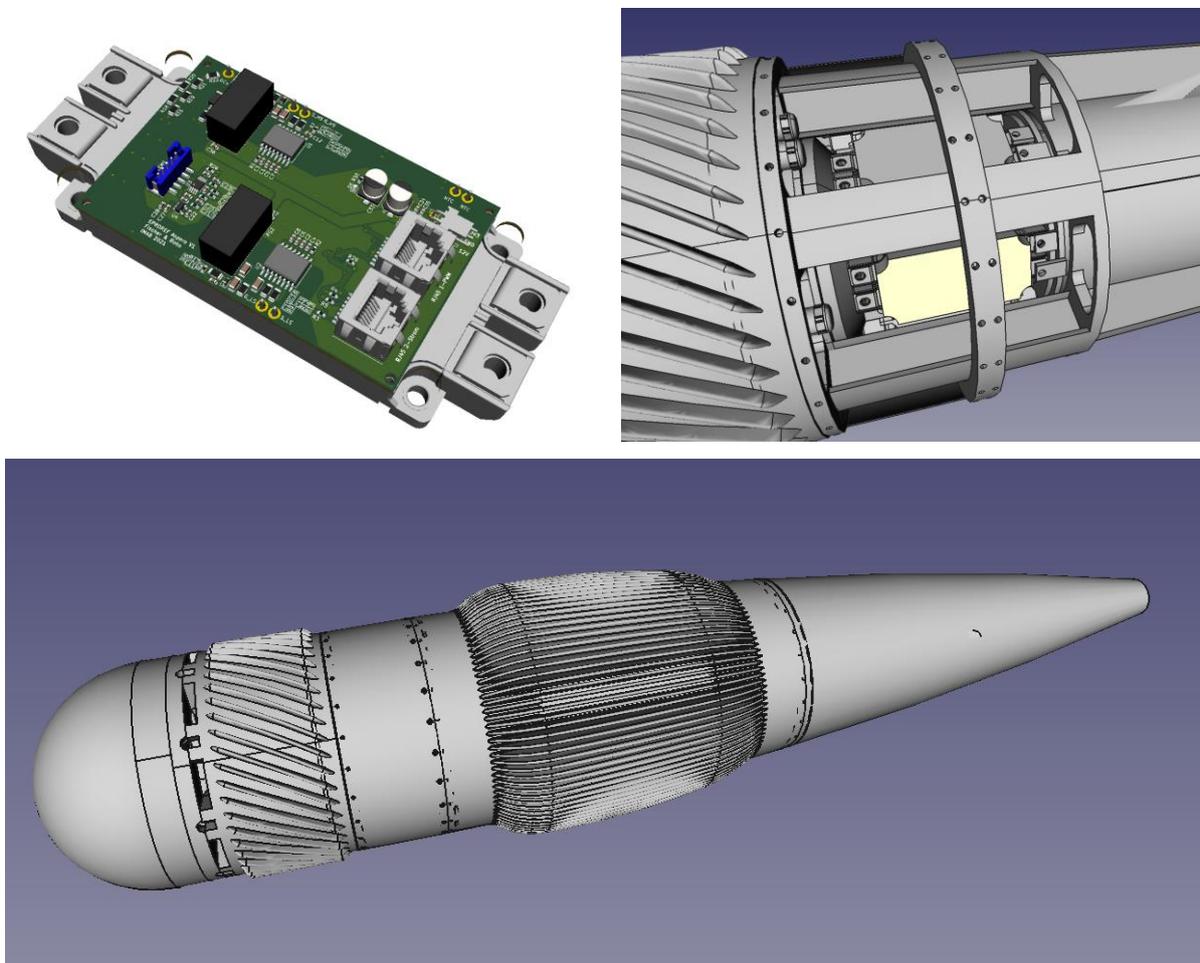
Unter Berücksichtigung der besonderen Anwendung im Flugzeug spielen im Entwurfsprozess die Zwischenkreisspannung von 1 kV und die angestrebte Ausgangsleistung von 250 kW eine entscheidende Rolle bei der Auslegung der Leistungselektronik. Um einen bestmöglichen Wirkungsgrad zu erreichen, werden verschiedenen Halbleiter miteinander verglichen. Bei diesem Vergleich spielen neben der Auswahl einer Halbleitertechnologie auch die Untersuchung verschiedener Topologien und Phasenzahlen eine Rolle. Entscheidend für die erreichbare Effizienz ist auch die Schaltfrequenz, für die ein Optimum ermittelt werden muss.



Vergleich verschiedener Halbleiter und Topologien und ihre Effizienz bei verschiedenen Strömen und Modulationsgraden: links 6-phasige ANPC, rechts 3-phasige 2-Level-Topologie

Neben der elektrischen Auslegung sind konstruktive Beschränkungen zu berücksichtigen. Ziel ist, die Leistungselektronik so nah wie möglich an den Motorklemmen innerhalb der Gondel unterzubringen, um Kabelwege mit gepulsten Spannungen so kurz und damit Ableitkapazitäten so klein wie möglich zu halten. Dieser Ansatz bringt konstruktive Herausforderungen mit sich, da die Leistungselektronik in die Haltestruktur wandert, die im späteren Windkanalversuch Gondel und Flügel miteinander verbindet. Um die räumlichen Gegebenheiten optimal auszunutzen, wird die Leistungselektronik auf Module verteilt. Ein zentrales Controllermodul übernimmt Steuerungs- und Regelungsaufgaben, wertet Messgrößen aus und erzeugt die Schaltsignale für die Halbleiter. Dieses kann in einem hinteren Teil der Gondel montiert werden. Die Leistungsmodule

vereinen Treiberschaltung und Halbleitermodul sowie Sensorik zur Strom-, Spannungs- und Temperaturmessung. Abschließend sei das Zwischenkreismodul erwähnt, dessen konstruktive Ausgestaltung bisher nicht endgültig feststeht. Die angestrebten hohen Schaltfrequenzen erfordern eine niederimpedante Anbindung an die Leistungselektronik.



oben links: einzelnes Leistungsmodul, oben rechts: Anordnung der Leistungsmodule in der Gondel, unten: Gesamtansicht der Gondel

Nach der Festlegung auf geeignete Halbleitermodule werden erste Versuchsträger entwickelt. Im Rahmen von Schaltversuchen lässt sich hiermit das Schaltverhalten beurteilen. Die folgenden Arbeiten umfassen den Aufbau des Gesamtsystems und die schrittweise Inbetriebnahme.

Batterieladen

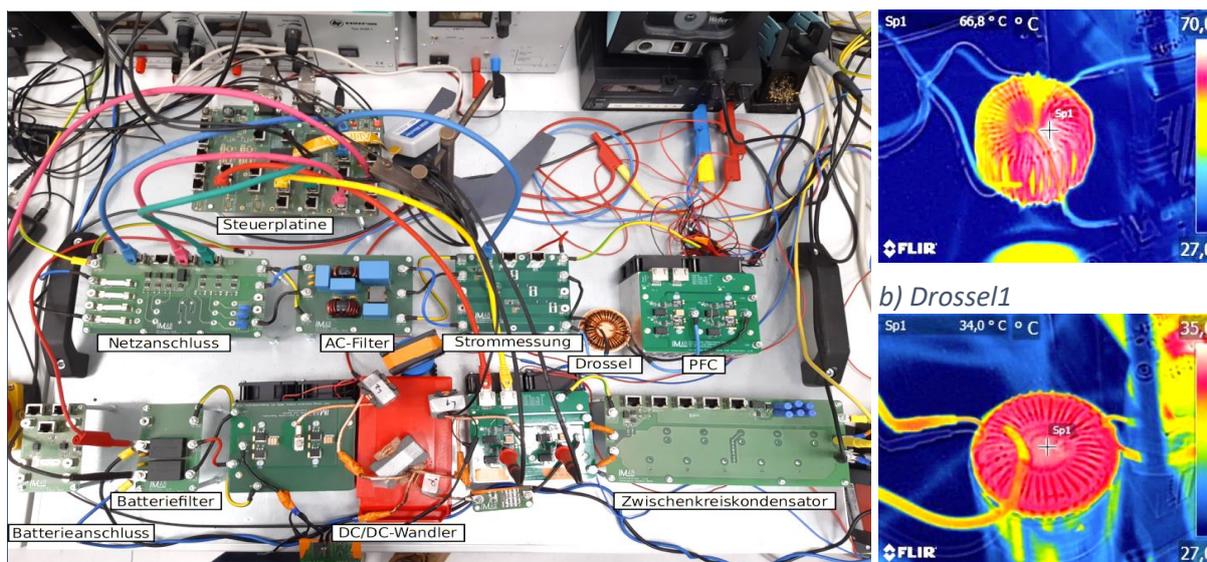
M.Sc. Matthias Klintz, M.Sc. Cengiz Uzlu

Durch die Variation der Batterien, ob als Speicher für stationäre Photovoltaik-Anlagen oder Fahrzeugbatterie, ist es schwierig das ideale Ladegerät zu entwerfen. Bei den Variationen der Batterien kommt es insbesondere auf Ladespannung und Ladeleistung an. Um den Kunden und Nutzern das Laden möglichst zu vereinfachen, werden verschiedene Ladegeräte auf die jeweiligen Einsatzgebiete abgestimmt. Ziele wie Bauraum, Gewicht, Kosten und Wirkungsgrad stehen bei der Entwicklung im Vordergrund. Am IMAB werden solche Ladegeräte bzw. Teile solcher Ladegeräte entworfen, aufgebaut und vermessen.

Um erhöhte Reichweiten der Elektrofahrzeuge zu erzielen sind neue Ansätze erforderlich. Im Zuge der Forschungsaktivitäten werden alternative Konzepte für Ladegeräte erarbeitet, die den zukünftigen Trends gerecht werden. Nur durch den Einsatz der Wide-Bandgap-Halbleitertechnologien wie SiC und GaN ist die Erhöhung der Schaltfrequenzen realisierbar. In Abhängigkeit der verwendeten Schaltertechnologien werden des Weiteren eine Vielzahl an unterschiedlichen Topologien in Betracht gezogen. Neben den bewährten 2-Level-Topologien werden auch Mehr-Level-Topologien aufgrund des erhöhten Spannungslevels im Fahrzeug sehr interessant.

Entwicklungsplattform für Ladegeräte am IMAB

Im Zuge der Entwicklung von Ladegeräten ist eine Entwicklungsumgebung für Ladegeräte entstanden, an der auch viele Ergebnisse der Dissertation von Konstantin Siebke verifiziert werden konnten. In Abbildung a ist die entworfene Entwicklungsplattform dargestellt. Der Grund für diesen Aufbau ist eine modulare Entwicklungsmöglichkeit, da einzelne Komponenten ausgetauscht, verbessert und neu vermessen werden können. Zu dem kann die Umgebung flexible erweitert werden, ohne das Grundkonzept zu ändern. Ein Beispiel für die Modularität ist in Abbildung b und Abbildung c dargestellt, zwei PFC-Drosseln, die bei gleichem Betriebspunkt unterschiedliche Erwärmungen aufweisen.



a) Entwicklungsplattform

c) Drossel 2

Entwicklungsplattform für Fahrzeugladegeräte

Weiterentwicklungen und Untersuchungen

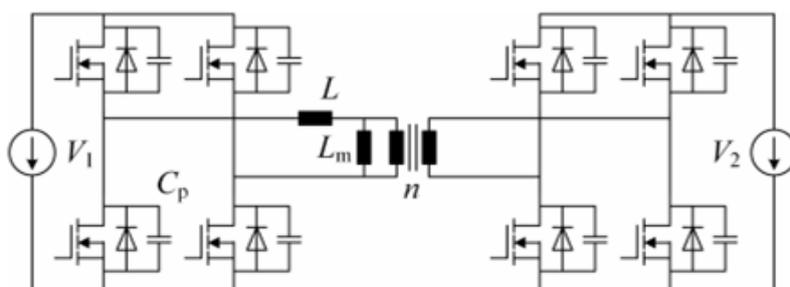
Im Zuge weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten untersuchen wir verschiedene Topologien bis 22kW, unter zur Hilfenahme der Ladegeräteentwicklungsumgebung. Topologien wie

- Leistungsfaktorkorrekturschaltungen,
- Galvanisch trennende DC/DC-Wandler und
- Nicht-Galvanisch trennende DC/DC-Wandler.

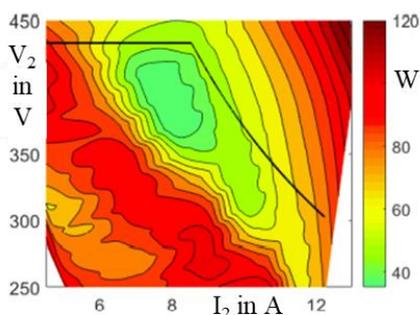
Diese Topologien werden je nach Anforderung unidirektional oder bidirektional betrieben. Zudem werden in diesen Topologien verschiedene Halbleiter eingesetzt, mit der Orientierung auf Wide-Band-Gap Halbleitern aus GaN und SiC. Im Fokus solcher Untersuchungen stehen zu dem auch verschiedene Modulationsarten der jeweiligen Brückentopologie und deren Auswirkungen auf das EMV-Verhalten des Systems.

DC/DC-Wandler

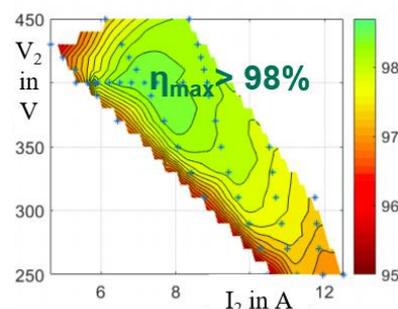
Bei den Nicht-galvanisch trennenden DC/DC-Wandlern werden vor allem die Klassiker, wie der einfache Tiefsetzsteller oder ein Hoch-/Tiefsetzsteller verwendet. Wobei diese teilweise auch im interleaved Mode betrieben werden, um einen optimalen Leistungsfluss zu gewährleisten. Zu den galvanisch trennenden DC/DC-Wandlern gehören die Dual-Active-Bridge (DAB) und der CLLC-Resonanzwandler. In der Abbildung ist eine Dual-Active-Bridge dargestellt, mit einem Verlustkennfeld und einem Wirkungsgradkennfeld.



Dual-Active-Bridge



Verlustkennfeld DAB



Wirkungsgradkennfeld DAB

LISA4CL - Induktive Ladetechnik für den lokalen Lieferverkehr

Förderkennzeichen: 03EMF0106A (BMVI)

M.Sc. T.-H. Dietrich, M.Sc. H. Schillingmann

Im Projekt LISA4CL (Laden – induktiv, schnell, autonom für City Logistik) befasst sich das IMAB erneut mit induktiver Ladetechnik für elektrische Kraftfahrzeuge. Um die Elektrifizierung des innerstädtischen Lieferverkehrs voranzutreiben und damit die lokale Emission von Abgasen in den Städten zu reduzieren, sind geeignete Ladesysteme notwendig, mit denen Fahrzeugflotten unkompliziert und zeitsparend geladen werden können. Für einen wirtschaftlichen Betrieb der Flottenfahrzeuge sind dabei insbesondere die ladebedingten Standzeiten zu reduzieren. Mithilfe von kontaktloser, induktiver Energieübertragung können bei entsprechender Auslegung die Forderungen nach einem praxistauglichen und robusten Ladesystem erfüllt werden.

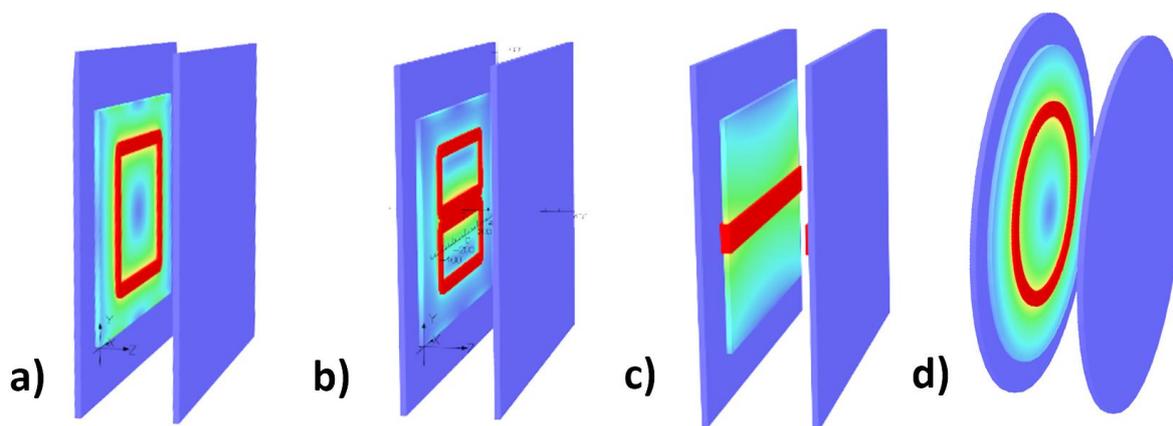


Besonders durch kurze Ladezeiten kann dabei der Bedarf an zu errichtender Ladeinfrastruktur gering gehalten werden, da ein hoher Durchsatz an Fahrzeugen pro Ladestation ermöglicht wird. Im PKW Bereich wurden in den letzten Jahren Standards und Normen entwickelt, die technisch bisher jedoch vorrangig Ladeleistungen bis hin zu 11 kW abdecken (z.B. die Klassen WPT 1 bis WPT 3

der IEC 61980-1). Für Fahrzeuge mit großer Batteriekapazität oder für Fahrzeuge mit hoher täglicher Laufleistung sind allerdings höhere Leistungen notwendig, um die ladebedingten Standzeiten zu verkürzen. Dementsprechend hat die Weiterentwicklung der Standards und Normen hin zu höheren Ladeleistungen (Leistungsklasse WPT 4 mit 22 kW) bereits begonnen.

Davon ausgehend entwickeln die Institute IMAB und elenia der TU Braunschweig zusammen mit dem Industriepartner INTIS – Integrated Infrastructure Solutions GmbH im Rahmen des Projektes LISA4CL ein induktives Ladesystem mit einer Ladeleistung von 22 kW, das für die Anwendung bei leichten Nutzfahrzeugen ausgelegt ist und damit im Flottenbetrieb eingesetzt werden kann. Das IMAB übernimmt dabei im Projekt unter anderem Entwicklungsaufgaben im Bereich der elektromagnetischen Spulenauslegung und der notwendigen Leistungselektronik. Im engen Verbund mit dem Projektpartner INITS sind in den vergangenen Monaten die Übertragerspulen für das induktive Ladesystem untersucht worden.

Für die elektromagnetische Auslegung werden verschiedene Spulentopologien untersucht. Dazu zählen Zirkular- Rechteck- Transversal- oder Solenoidanordnungen, wie in Untersuchte Spulentopologien dargestellt ist.



Untersuchte Spulentopologien

Die übertragene Leistung P_t ist eine Funktion der Gegeninduktivität M ,

$$P_t = \omega M I_1 I_2$$

mit der Kreisfrequenz ω und den Strömen I_1, I_2 in Primär- und Sekundärspule.

Damit wäre eine Topologie mit hoher Gegeninduktivität zu bevorzugen. Wird allerdings außerdem der Wirkungsgrad einbezogen, muss berücksichtigt werden, dass jedes Design zu unterschiedlichen Kupferverlusten führt. Daher wird eine charakteristische Kennzahl definiert, die die übertragene Leistung P_t auf die Kupferverluste P_l bezieht:

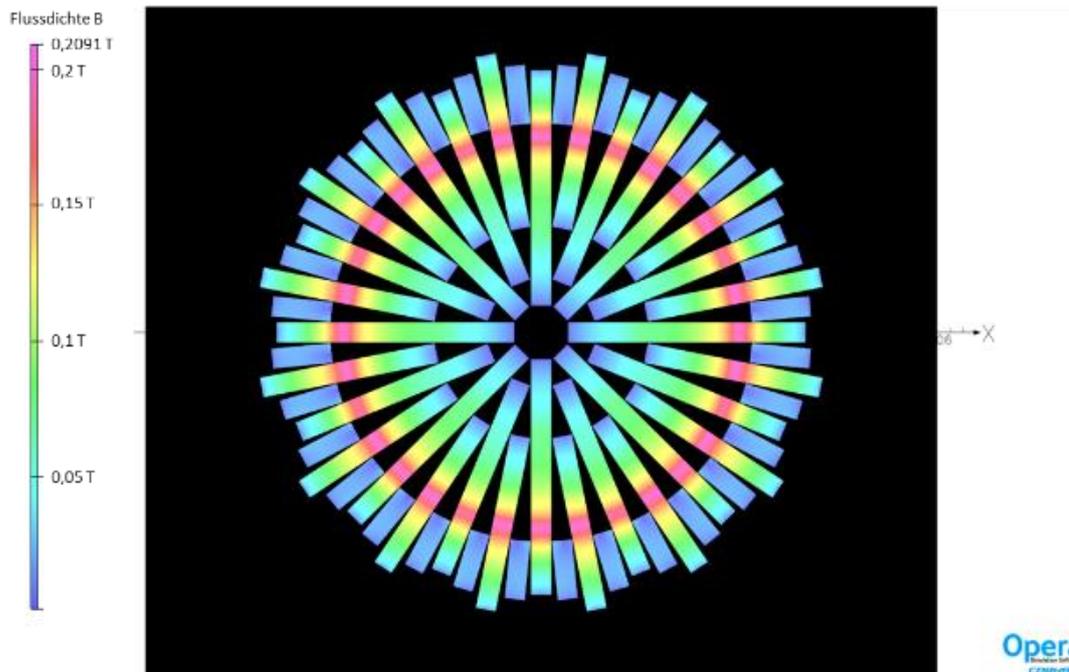
$$\frac{P_t}{P_l} = \frac{\omega M I_1 I_2}{\rho (I_1^2 + I_2^2) \cdot l/A} \stackrel{I_1=I_2}{\cong} \frac{\omega}{2\rho} \cdot \frac{M}{l/A}$$

Mit dem spezifischen Widerstand ρ , der Spulenlänge l , sowie dem Spulenquerschnitt A . Da der Term $\omega/(2\rho)$ unabhängig von der gewählten Topologie ist, gibt $M/(l/A)$ eine spezifische Kenngröße für jede Auslegung aus. Dieser Parameter definiert die Topologie die bei gegebenen Kupferverlusten die höchste Leistung übertragen kann.

Neben der Kennzahl fließen andere Bewertungskriterien in die Topologieauswahl ein. Dazu zählen der Anteil der zu kompensierenden Streuung, die Feldemissionen, die unter einem festen Grenzwert liegen müssen, sowie Sensitivität gegenüber Luftspaltveränderungen und Versatz.

Insgesamt liefert die kreisförmige Zirkularspule (Untersuchte Spulentopologien) die besten Eigenschaften, sodass diese in einer Feinauslegung weiter analysiert wird.

Für die Feinauslegung wird die Ferritstruktur von einer massiven Platte zu schmalen Streifen korrigiert (Ferritstruktur in der Feinauslegung). Hier zeigt die Analyse lokaler Sättigungen Optimierungsbedarf, wie der Anpassung der Ferritdicke an sensiblen Orten.



Ferritstruktur in der Feinauslegung

Ebenfalls in direkter Zusammenarbeit mit INTIS erfolgt momentan am IMAB parallel zu der elektromagnetischen Auslegung des Übertragungssystems die Konzeptionierung und Entwicklung der Leistungselektronik, damit die ersten Laborversuche mit dem neuen Induktivladesystem vorgenommen werden können.

Verbundprojekt „Energisphere“ – Energiespeicher hoher Energiedichte für regenerative Energieerzeuger

Rotorlagerung mit Hochtemperatursupraleitern

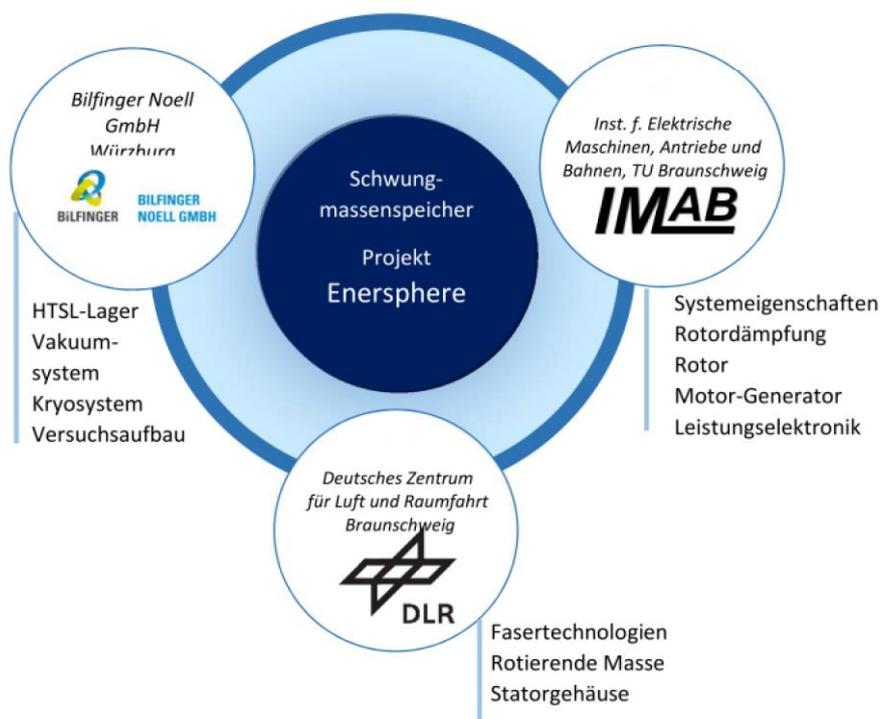
FKZ: 03ET6009B

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

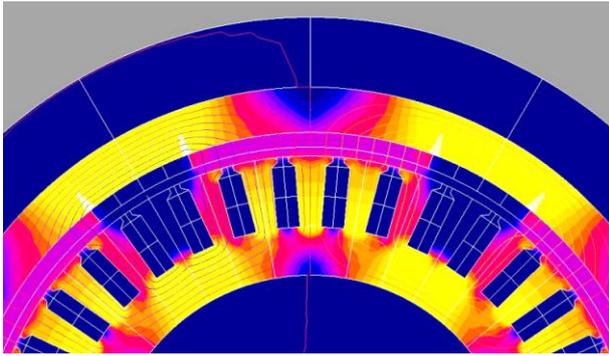
Androsselung der Frischdampfventile der antreibenden Turbinen übernommen. Mit der Energiewende werden diese Einheiten zunehmend vom Netz genommen. Gleichzeitig steigt der Anteil der über Wechselrichter einspeisenden Energieerzeuger, die keine oder nur geringe Überlastreserven und keinen Kurzschlussstrom 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 hochoberflächige 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 Containerhandlungsanlagen 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.



Struktur des Projektkonsortiums

Die Auslegung des Generators erfolgte zusammen mit dem Schwungkörper entsprechend vorabausgeführten Überlegungen bezgl. Massenträgheit und Stabilität der Rotation. Als Drehzahlbereich wurde bedingt durch die Stromtragfähigkeit des Wechselrichters 7500 bis 15000 1/min festgelegt.



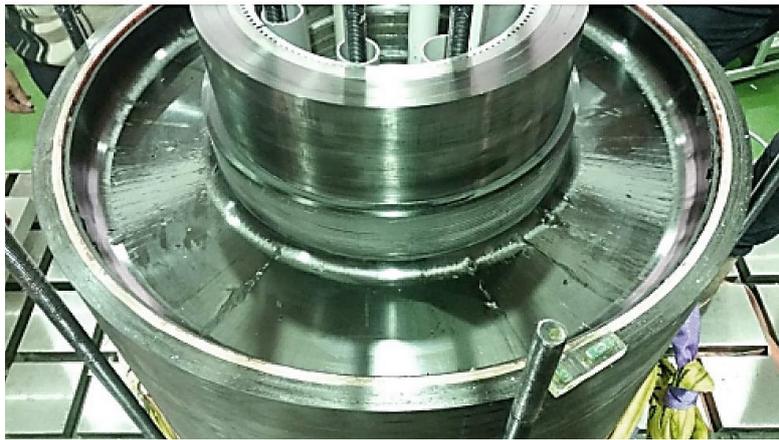
Elektromagnetische Auslegung und Aufbau des Motor/Generatorsystems

Die Motor/Generatorleistung sollte 500 kW und der Energieinhalt mindestens 5 kWh betragen. 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. 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 Außenläuferkonzept 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 muss der Rotor so ausgelegt sein, dass größere Auslenkungen möglich sind. Das hier verfolgte Konzept sieht eine Positionierung des Generators zwischen den HTSL-Lagern vor. Das Generatordesign berücksichtigt dabei, dass die maximale Radialkraft durch den 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 der Luftspalt zwischen Stator und Rotorjoch ausreichend ist, um den EMZ im benötigten Maß zu reduzieren. Zugleich besteht eine Leistungsanforderung an den Generator, die das System liefern muss. Daher musste trotz des hohen Luftspalts eine ausreichende Polradspannung vorhanden sein.

Am IMAB erfolgten die Auslegung und der Aufbau der E-Maschine, Rotordynamikbetrachtungen, Festigkeitsberechnungen für den inneren Rotor, Auslegung des supraleitenden (Hochtemperatursupraleiter) Lagers, Montageassistenz für den Rotoraufbau, Auswuchten des Rotors. Unten ist ein Ausschnitt des Rotors bestehend aus innerem Rotor mit Generator und Lager, sowie dem Schwungrad zu sehen.



Montage des Rotors beim DLR in Braunschweig

Darüber hinaus wurde der maschinenseitige Wechselrichter vom IMAB aufgebaut. Er besteht wegen der hohen Ströme des Speichers aus der Parallelschaltung von drei wassergekühlten Pulswechselrichtern der Fa. Semikron, Baureihe SKAI. Diese erhalten ihr Pulsmuster von einer gemeinsamen Steuerung, die ihre Befehle wiederum vom CAN Bus des Gesamtsystems bekommt.



Schaltanlage enersphere – aufgebaut in der IMAB E-Werkstatt

Da die Wechselrichter nie exakt zum gleichen Zeitpunkt schalten, sondern aufgrund von Bauteiltoleranzen und Laufzeiten Differenzen in den Schaltzeitpunkten bis zu einigen Nanosekunden möglich sind, werden die Wechselrichter durch Saugdrosseln entkoppelt. Dadurch werden kurzzeitige Kurzschlussströme zwischen den Wechselrichtern begrenzt. Die Kopplung des Speichers zum Netz erfolgt durch ein „Active Front End“ (AFE), d. h. ein gesteuerter Gleichrichter mit Hochsetzsteller zur Anhebung der Zwischenkreisspannung. Dadurch wird erreicht, dass die Zwischenkreisspannung unabhängig von Schwankungen der Netzspannung ist und die netzseitigen Ströme nahezu sinusförmig sind. Es kann ein sehr schneller Wechsel zwischen Laden und Entladen des Speichers erfolgen. Die Regelung des Speicherbetriebs erfolgt über die Zwischenkreisspannung. Bei ansteigender Zwischenkreisspannung erfolgt Rückspeisung ins Netz (Entladen des Speichers), bei fallender Zwischenkreisspannung wird Energie vom Netz nachgeliefert (Laden des Speichers).

Forschungsprüfstand für direkte Kühlung von E-Maschinen hoher Leistungsdichte

Jan Hoffmann

Das Ziel des Prüfstandsbaus ist, die Untersuchung verschiedener Aspekte der Kühlung von elektrischen Fahrzeugantrieben zu ermöglichen. Dieses Forschungsthema ist momentan besonders im Fokus in der Betrachtung von leistungsdichten elektrischen Maschinen. Am IMAB wurde daher ein Prüfstand zur direkten Leiterkühlung, in diesem Fall mit Öl, ausgelegt, konstruiert, gefertigt und programmiert.

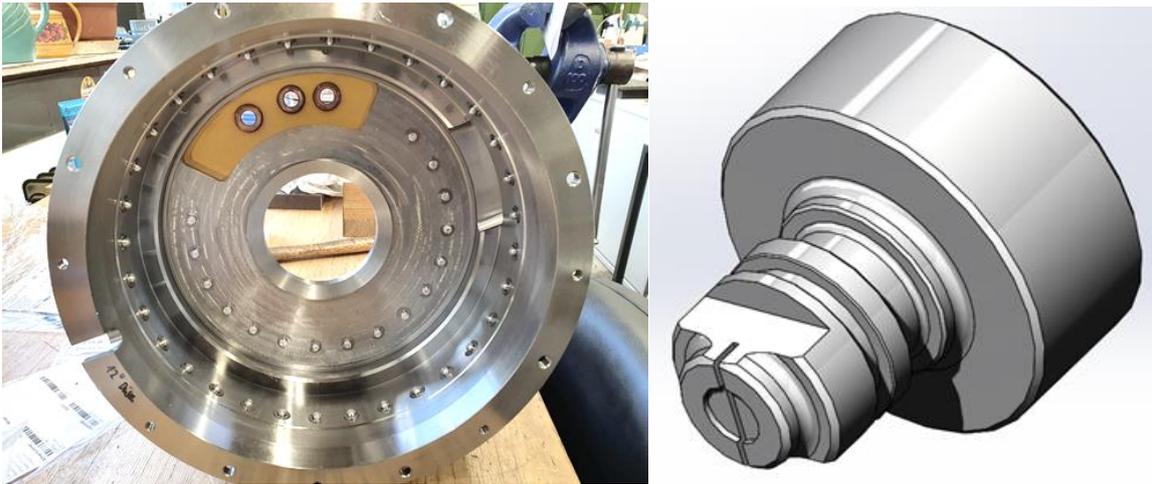
Der Schwerpunkt des entstandenen Aufbaus liegt im Bereich der Ölspritzkühlung. Die modulare Gestaltung des Prüfstandes ermöglicht aber grundsätzlich auch andere Medienführungen. Die Motivation der Untersuchung der Ölspritzkühlung ist in der direkten Kühlung der Wickelköpfe begründet, da die hauptsächliche Wärmeleistung im Bereich der Leiter gewandelt wird. Hier wird ein effizienterer Kühlungsmechanismus erwartet, *insbesondere in Relation zur Dauerlast. Der Prüfstand umfasst umfangreiche Messmöglichkeiten, wie z.B. Temperatur, Druck und Volumenstrom und kann so dazu beitragen, Erkenntnisse in Bezug auf die thermischen Eigenschaften der Gesamtmaschine zu gewinnen.* Am IMAB wurde dazu die Hardware in Form eines Prüfkessels mit angetriebenem Rotor zur Aufnahme und Versorgung eines Prüflings aufgebaut, eine Konditioniereinheit sowie die Steuerung und Auswertung.



Prüfkessel Montage

Ein zentrales Bauteil ist hier die Einspritzdüse, die am IMAB entwickelt und gefertigt wurde, und im jetzigen Zustand einen fächerförmigen Öl-Strahl abgibt. Diese Bauteile, die auch im Prüfstand verwendet werden, sind ringförmig um den Wickelkopf angeordnet und von der Strahlrichtung auf diesen orientiert. Das Designziel war eine leicht zu realisierende Düsenanordnung, die effektiv kühlen kann. Daher wurde, auch aufgrund der bereits durchgeführten Messungen,

eine Konstruktion mit axial und radial angeordneten Düsen gewählt. Die Düsen sind ringförmig am Wickelkopf verteilt und werden wie bereits erprobt mit einem zentralen Kanal versorgt.



Anordnung und CAD Konstruktion des Düsensystems

Die Anordnung der Düsen lässt sich variieren, verschiedene Düsen können verwendet werden. Erste Messungen zeigten eine hoch effiziente Kühlung mit geringen Volumenströmen und Drücken.

IMAB-internes Forschungsprojekt IMAB-Racer

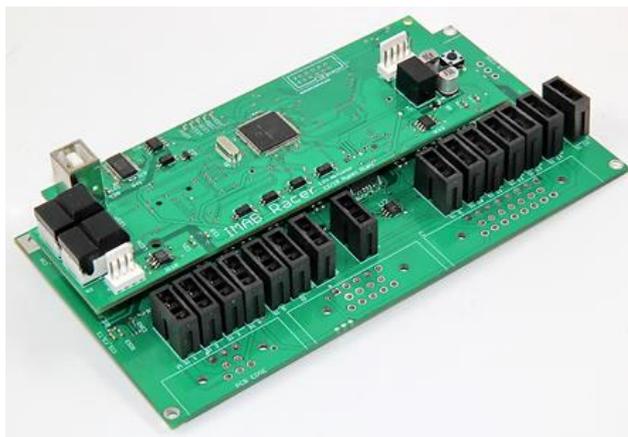
M.Sc. T.-H. Dietrich, Dr. N. Langmaack

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

Nach dem großen Auftritt des IMAB-Racers auf der TU-Night 2018 laufen die Entwicklungen am Fahrzeug weiter. Dabei werden fast alle Komponenten weiterentwickelt oder ergänzt. Getreu dem Anspruch mit dem IMAB-Racer eine Forschungsplattform zu erarbeiten, die es Studierenden ermöglicht im Rahmen von Abschlussarbeiten oder Tätigkeiten als studentische Hilfskraft wertvolles Praxiswissen im Bereich der elektrischen Antriebstechnik, der Leistungselektronik, der Elektronik und der Fahrzeugtechnik aufbauen zu können, wurden auch in den vergangenen drei Jahren wieder viele spannende Komponentenentwicklungen durchgeführt und Abschlussarbeiten verfasst. Michael Honkomp hat eine fachgerechte Durchsicht des Fahrwerks und notwendig gewordene Wartungsarbeiten durchgeführt. Ebenso wurden von ihm Weiterentwicklungsmöglichkeiten im Bereich der Fahrwerkstechnik und des Fahrzeugaufbaus untersucht. Yannic Cullmann befasste sich mit der Entwicklung einer displaybasierten Benutzerschnittstelle. Die bestehenden Eingabemöglichkeiten im Cockpit werden dadurch um eine flexibel anpassbare Datenausgabe an die Fahrzeugbenutzer erweitert.



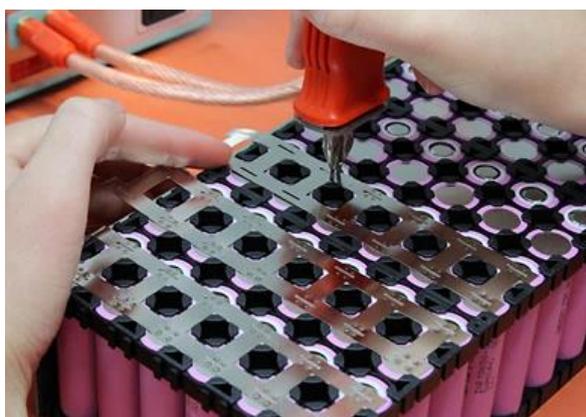
*Display und zugehörige Ansteuerung
in der Entwicklungsphase*



Aktuatoriksteuergerät in überarbeiteter Ausführung

Aymen Riahi überarbeitete das sog. Aktuatoriksteuergerät des Fahrzeugs, mit dessen Hilfe elementare Funktionen wie Beleuchtung oder Feststellbremse elektronisch angesteuert werden können. Die weitere Entwicklung des Steuergerätes wurde von Daniel Jasper übernommen und wird aktuell von ihm weitergeführt.

Der IMAB-Racer erhält dank eines neuen, modularen Batteriekonzeptes im Kofferraum aktuell eine deutliche Reichweitenvergrößerung. Dabei wurde auch die Fertigung der einzelnen Batteriepakete übernommen, sodass Entwicklung und Aufbau der neuen Fahrzeugbatterie des Fahrzeugs bis hin zum Verschweißen der einzelnen Zellen komplett am Institut erfolgt. Meike Hastedt entwickelte aufbauend auf der Bachelorarbeit von Vjaceslav Suchorukov für die neue Fahrzeugbatterie ein neues Batteriemanagementsystem und übernahm auch die Fertigung der neuen Batteriepakete.



*Verschweißen der Einzelzellen zu
Batteriepaketen*



*Batteriepaket mit aufgesetzter BMS-Platine und
fast vollständiger Ummantelung*

Ebenso gibt es Neuigkeiten aus dem Bereich des Wechselrichters und der Antriebsmaschine. Eine zweite Ausführung der STORM getauften Maschine wird aktuell aufgebaut und für umfangreiche Vermessungen und Untersuchungen auf dem Maschinenprüfstand vorbereitet. Damit stehen jetzt zwei Maschinen zu Verfügung, wodurch eine Maschine dauerhaft im Fahrzeug verbleiben kann und eine weitere für Versuche auf dem Maschinenprüfstand zur Verfügung steht, ohne dass jeweils aufwändige Umbaumaßnahmen notwendig sind.

Langfristig kann der Antrieb des IMAB-Racers durch diesen Schritt sowohl auf der Straße als auch unter Laborbedingungen weiterentwickelt werden.

Im Rahmen seiner Masterarbeit hat Michael Ochs einen neuen Anlauf gestartet, einen DC/DC-Wandler zur Versorgung des NV-Bordnetzes zur Integration ins Fahrzeug zu entwickeln und aufzubauen. Es flossen diverse Optimierungen und technische Innovationen ein wie der Einsatz von Planartransformatoren und eine Stromverdopplerschaltung auf der Sekundärseite. Auch der Antriebswechselrichter des IMAB-Racers hat ein Upgrade bekommen: Neue IGBT-Module mit Siliziumkarbid-Schottky-Dioden steigern zukünftig den Wirkungsgrad und die Kollegen aus der Werkstatt haben in gewohnt hoher Qualität das von Jannes Briese konstruierte Aluminiumgehäuse gefertigt.

EFILS-11 - Interoperable induktive Ladetechnik

Förderkennzeichen: 01MV21003B (BMW i)

M.Sc. T.-H. Dietrich, M.Sc. H. Schillingmann

Um den Einsatz von induktiver Ladetechnik in Kraftfahrzeugen attraktiver zu gestalten, ist eine weitgehende, herstellerunabhängige Kompatibilität der Ladesysteme unabdingbar. Aktuell werden zu diesem Zweck wichtige technische und konzeptionelle Vorgaben in international gültige Normen festgelegt. Im Projekt EFILS-11 (*Funktionsmusterentwicklung Elektrofahrzeuge Induktivladesystem 11kW*) befasst sich ein Konsortium aus den Industrieunternehmen Porsche, Brusa, Toyota Gazoo Racing und EnBW zusammen mit dem IMAB mit der Entwicklung eines solchen, normkonformen und damit zu anderen induktiven Ladesystemen kompatiblen Funktionsmuster für ein elektrisches Kraftfahrzeug. Die Ergebnisse des Projektes sollen ferner genutzt werden, um die aktuell in der Festlegung befindlichen Normen in den entsprechenden Abschnitten zu ergänzen.



Das IMAB übernimmt dabei das Teilvorhaben zur Entwicklung einer generisch-wissenschaftlichen Beschreibung interoperabler induktiver Ladesysteme. Kern dieses Teilvorhabens ist dabei die Entwicklung geeigneter Modelle, mit deren Hilfe eine möglichst universelle Beschreibung und Analyse verschiedener Topologien und Systeme

aus dem Bereich der induktiven Ladetechnik ermöglicht wird. Die Kompatibilität von in der Entwicklung befindlichen Komponenten zu den einzuhaltenden Normen kann durch diese Modelle schon während des Auslegungsprozesses untersucht und bewertet werden. Es soll dabei ein allgemein gültiges Beschreibungsmodell entstehen, in dem die für die Funktion relevanten magnetischen und elektrischen Zusammenhänge auf die komplexen Spannungen und komplexen Ströme der beteiligten Wicklungssysteme zurückgeführt werden können. Zu diesem Zweck werden die Simulationsmodelle und –werkzeuge so flexibel wie möglich gestaltet, um verschiedenste topologische Ansätze untersuchen zu können. Dazu zählen z.B. unterschiedliche Spulendimensionen, -geometrien oder auch unterschiedliche Beschaltungen. Anhand der von den Projektpartnern gewonnenen Messergebnisse aus dem praktischen Aufbau und Betrieb des Funktionsmusters erfolgt anschließend die Verifikation der entwickelten Simulationsmodelle.

Wissenschaftliche Untersuchungen zu elektrifizierten Nutzfahrzeugantrieben

M.Sc. Lucas Vincent Hanisch

Der schnell wachsende E-Commerce-Markt erhöht die Transportleistung im Straßen-güterverkehr, welcher zunehmend elektrifiziert wird, damit die weltweiten Klimaziele erreicht werden können. Da sowohl die Anforderungen bezüglich Lebensdauer und Zuverlässigkeit an elektrische Maschinen für Langstreckentransporter hoch sind, gleichzeitig jedoch auch die Belastung der elektrischen Maschine durch neue Halbleitertechnologien auf Basis von Siliziumkarbid oder höhere Spannungsniveaus steigt, beschäftigt sich das IMAB im WUN-Projekt mit Untersuchungen zu Schädigungsmechanismen und dem Alterungsverhalten elektrischer Isolationssysteme, die den zuverlässigen Betrieb der Maschine gewährleisten.

Auf zwei am IMAB entwickelten Prüfständen können elektrische Maschinen oder Prüfkörper, die das Verhalten elektrischer Maschinen simulieren, elektrisch und thermisch variabel belastet werden. Die Beurteilung des Zustands dieser Prüfkörper während der Belastungszyklen erfolgt über Isolationswiderstands- und Teilentladungsmessungen.



Alterungsprüfstände zur thermisch-elektrischen-Belastung (links) und zur Belastung mit Temperaturzyklen (rechts)

Die variable Belastung ermöglicht die Untersuchung der Wirkweisen verschiedener elektrischer und thermischer Erosionsvorgänge, die das Isolationssystem beschädigen und zum Ausfall der elektrischen Maschine führen. Eine Schwachstelle elektrischer Isolationssysteme stellt der Nutaussgang dar. An diesem Triplepunkt führen erhöhte Feldstärken zu elektrischen Durchschlägen. Bei erhöhter thermischer Belastung über der vorgegebenen Wärmeklasse des Isolationssystems, wird die Temperatur zum signifikanten Alterungsfaktor. Die Temperatur beschädigt einerseits kontinuierlich das Isolationssystem, begünstigt jedoch ebenfalls das Auftreten von Teilentladungen, die zu einer zusätzlichen transienten Beschädigung des Isolationssystems führen. Die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Alterungseffekten kann sehr effizient mit der Methodik des Design of Experiments (DoE) durchgeführt werden und wird vom IMAB zukünftig weiter fokussiert.



Elektrisch bedingter Durchschlag am Nutausgang (links) und thermisch bedingter Ausfall (rechts)

3.2 Neue Prüfstandstechnik am IMAB

*Dipl.-Ing. Peter Hoffmann, Dipl.-Ing. Jan Hoffmann, M.Sc. Florian Lippold,
M.Sc. Hendrik Schefer,*

Prüfstand zur Untersuchung und Optimierung von direkten Ölkühlverfahren

E-Maschinen mit hoher Leistungsdichte benötigen sehr effektive Kühlverfahren. Die direkte Leiterkühlung und Wickelkopfkuhlung stehen hier im Focus der Entwicklung und müssen daher untersucht werden. Mit dem am IMAB neu aufgebauten Prüfstand sind wir in der Lage, neue Motorkonzepte z.B. mit Spitzölkühlung thermisch umfassend zu betrachten. Hierbei können Rotoren und Statoren der Leistungsklassen bis einige 100 kW in einem abgeschlossenen Gehäuse (rechts im Bild) mit bis zu 7000 1/min angetrieben werden. Die thermische Konditionierung des Öls, Heizen und Kühlen im Bereich von 15 bis 120 °C, erfolgt durch eine separate Einheit (links im Bild). Der jeweilige Stator wird über eine externe Quelle (z.B. Umrichter oder Sinuseinspeisung) bestromt. Diverse Messkanäle geben Einblick in die thermischen Verhältnisse im Motor und werden in LABVIEW erfasst und dort mit der übergeordneten Anlagensteuerung zusammengeführt.



Messprüfstand für Kühlsysteme elektrischer Maschinen in den IMAB Laboren

Als laufendes Projekt ist der Antrieb eines Elektrofahrzeugs verbaut, bei dem u.a. die optimale Anordnung von Düsen setups zur Wickelkopfkuhlung für einen OEM untersucht werden.

Zuverlässigkeitslabor

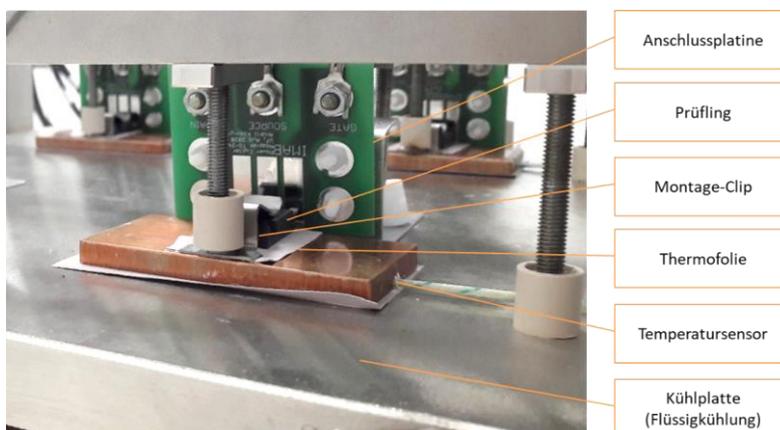
Am IMAB entstand in den letzten zwei Jahren ein eigenständiger Forschungsbereich, welcher sich intensiv mit der Bewertung der im Betrieb zu erwartenden Lebensdauer von diskreten Bauteilen und ganzen Baugruppen beschäftigt. Baulich wurde hierzu ein Raum ertüchtigt, welcher die erforderliche Infrastruktur bzgl. Wasserkühlung, Klimatisierung und Energieversorgung für diese Geräte bereitstellt.

Der Lastwechselprüfstand/Power Cycler PWT 2400A

Mit steigendem Einsatz von Leistungshalbleitern in diversen Anwendungsbereichen rückt die Frage der Zuverlässigkeit in den Focus. Speziell im Bereich „Automotive“ und „Elektrisches Fliegen“ sind Untersuchungen in thermischen Grenzbereichen durchzuführen. Der beschaffte Lastwechselprüfstand ist in der Lage sowohl einen breiten thermischen Testbereich als auch einen großen Leistungsbereich abzudecken. Verschiedenste Halbleitertechnologien und Gehäuseformen können vollautomatisiert untersucht werden. Dabei können mehrere Millionen Lastwechsel in einem Test absolviert werden.



Lastwechselprüfstand



Prüfling auf Konditionierplatte

Parameter	Grenzen
Maximale Chiptemperatur	Üblicherweise bis 150°C oder 175°C
Minimale Chiptemperatur	Üblicherweise zwischen 50°C und 75°C
Temperaturhub des Chips	Üblicherweise zwischen 60K und 130K
Einschaltzeit	0,5s ... 100s
Ausschaltzeit	0,5s ... 100s
Kühlmitteltemperatur	-55°C bis 200°C
Laststrom	0,1A bis 2400A

Tabelle Testkriterien

Der Klimaschrankschrank



*Klimaschrankschrank (Konfiguration:
Untersuchungen
von Halbleitern in sehr tiefen
Temperaturen)*

Mit Hilfe des Klimaschranks können Umweltbedingungen für Leistungselektroniken und Kleinantriebe simuliert werden. Der Klimaschrankschrank ist dabei Bestandteil einer modularen Zuverlässigkeitsumgebung, welche in den kommenden Jahren kontinuierlich erweitert werden soll. Die modulare Zuverlässigkeitsumgebung wird komplettiert durch einen echtzeitfähigen Prüfstandsrechner „Ni cRIO“, den Chiller „Lauda VC 1200“ und ein HV-Netzteil „Heinzinger EVO 5000-600“. Mittels selbstentwickelter Belastungsaufbauten sollen passive und aktive Bauteile gezielt gealtert werden.

Der Klimaschrankschrank wurde im Jahr 2019 beschafft und im Sommer 2020 im Zuverlässigkeitslabor in Betrieb genommen. Neben der Errichtung des Zuverlässigkeitslabors (Idee [2019] bezugsfertiges Labor [2020]), war der Transport des Großgerätes in den ersten Stock der Maschinenhalle (Leistungselektroniklabore) eine wesentliche Herausforderung. Das Bild zeigt die komplizierte Verbringung des Klimaschrankschrankes.



Einbringung des Klimaschranks in den ersten Stock der Laborräume (Langes Labor)

Der Klimaschrank besitzt 600 Liter-Prüfraumvolumen. Für die Einbringung von Wellen, elektrischen Energieversorgungen oder Kühlschläuchen stehen zwei 125 mm Durchführungen zur Verfügung. Mess- und Steuerleitungen können über zwei 50 mm Durchführungen verbracht werden. Im Prüfraum können Temperaturen von -70°C bis 180°C eingestellt werden. Der Klimabetrieb bietet eine Regelung der Luftfeuchtigkeit von 5 % bis 98 % r.F bei Temperaturen von 10°C bis 95°C . Des Weiteren kann die Zuluft getrocknet werden und ein Druckluftanschluss ermöglicht einen Schutz gegen Betauung. Über einen weiten Temperaturbereich kann der Klimaschrank eine thermische Leistung von 5 kW ausregeln. Eine Temperaturabweichung von 0,1 K und einer Temperaturhomogenität von 1 K eröffnet dem Anwender viele Möglichkeiten. Eine mittlere Temperaturänderungsgeschwindigkeit von 5 K pro Minute sorgt für ein schnelles Auf- und Abkühlen des Prüfraumes. Ferner besitzt der Schrank einen Betauungsschutz und eine Vielzahl von elektrischen Anschlussmöglichkeiten (I/Os, potentialfreier Öffner/Schließer und serielle Schnittstelle).

Untersuchungen: Kriechstrecken, Verhalten verschiedener Halbleiterarten bei tiefen Temperaturen

3.3 Externe Forschungsthemen

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

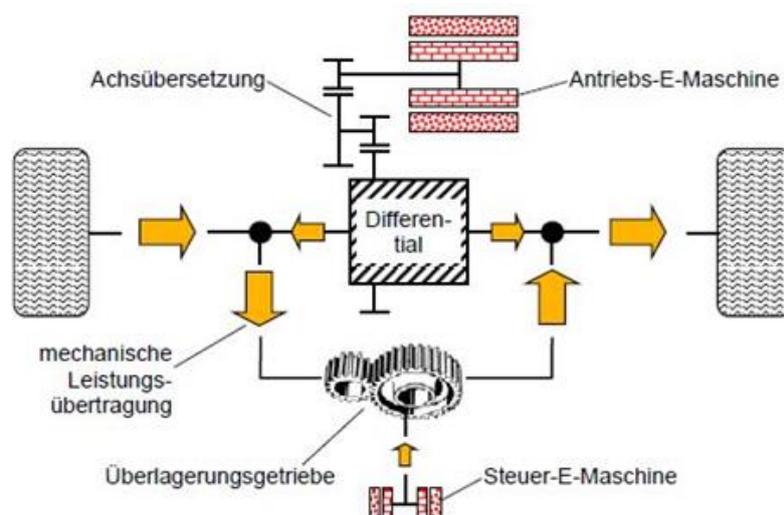
Konzept und Regelung elektrifizierter Hinterachsen

M.Sc. Nils Gruner, Volkswagen AG betreut durch Prof. M. Henke

In der elektrifizierten Welt soll zu vertretbaren Kosten ein Konzept für eine elektrifizierte Hinterachse erforscht werden. Die Erwartung ist, eine „emotionale Querdynamik“ mithilfe der Elektrifizierung zu erreichen. Hierbei sollen Erlebbarkeit, Individualisierung, Kundenrelevanz, Performance, Sicherheit und Energieeffizienz eines solchen Konzeptes beleuchtet werden.

In allradgetriebenen Fahrzeugen werden bereits heute schon Antriebsmomente bei Beschleunigung, Bremsmanövern und Kurvenfahrten auf einzelne Räder verteilt. Anhand von Erfahrungswerten und Testfahrten ist jedoch bekannt, dass eine Verteilung der Antriebsmomente im normalen Verkehr immer nur für kurze Zeitspannen erfolgt. Es scheint demnach, dass ein Allradsystem im normalen Straßenverkehr kaum genutzt wird. Die Hypothese lautet deshalb, dass eine Verteilung der Antriebsmomente nur für kurze Zeitspannen im normalen Straßenverkehr erfolgen muss.

Ein Allradsystem hat hohe Kosten. Im Zeitalter der Elektrifizierung erscheint es sinnvoll, ein Konzept einer elektrifizierten Hinterachse zu verfolgen. Das Ziel hierbei ist es, mithilfe radindividueller Antriebsmomente an der Hinterachse kurzzeitig bei normalen Fahrmanövern zu unterstützen – ähnlich wie auch beim Allradantrieb. Das neuartige Konzept soll jedoch auf kurze Zeitspannen und für den normalen Fahrbereich ausgelegt sein. Umgangssprachlich könnte dieses neuartige Konzept als „Low-Cost“ Allradsystem bezeichnet werden.



Überlagerungsgetriebe zur radindividuellen Ansteuerung einer elektrifizierten Hinterachse

Untersuchung von Ummagnetisierungsverlusten in weichmagnetischen Materialien

M.Sc. Korbinian Pfnür (PTB Braunschweig), betreut durch Prof. M. Henke

Das EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research) Projekt *HEFmag* bearbeitet von Korbinian Pfnür an der PTB in Braunschweig, untersucht Ummagnetisierungsverluste in weichmagnetischen Materialien unter normierten Bedingungen. Im ersten Projektteil wurde ein europäischer Ringvergleich zwischen mehreren nationalen metrologischen Instituten (NMI) und mehreren Interessenvertretern aus der Wirtschaft durchgeführt. Das dient sowohl dem gegenseitigen Vergleich der NMIs, als auch der Einordnung der industriellen Kalibrierlabore hinsichtlich der Rückführbarkeit und Unsicherheit der Messergebnisse.

Des Weiteren wird ein verbesserter Aufbau zur Verlustmessung konzipiert, entwickelt und gebaut. Dabei stellt sich die große Bandbreite der zu erreichenden Parameter: Messfrequenz, Leistung, Strom und Spannung als die größten Herausforderungen dar. Definiertes Ziel des HEFmag Projektes ist es, die bisherige maximale Messfrequenz von 1kHz auf 5kHz zu erhöhen, da die Erfordernisse aus der Wirtschaft nach Messdaten zu höheren Frequenzen in der Vergangenheit stetig zugenommen haben. Zukünftig wird der experimentelle Aufbau mit einer MOIF-(magneto optical indicator film) Kamera kombiniert, die die Ummagnetisierungsprozesse einzelner Domänen von kornorientierten, magnetischen Blechen optisch darstellen kann. Das soll zu neuen Erkenntnissen führen, wie beispielsweise Randeffekte in Blechen die Verlustmessung beeinflussen. Schlussendlich sollen zwischen beiden Messverfahren (elektrisch und optisch) qualitative Zusammenhänge hergestellt werden.

Prädiktives Energiemanagement für ein Elektrofahrzeug mit Brennstoffzellen-Range-Extender zur energieoptimierten Fahrt im digital vernetzten Verkehr

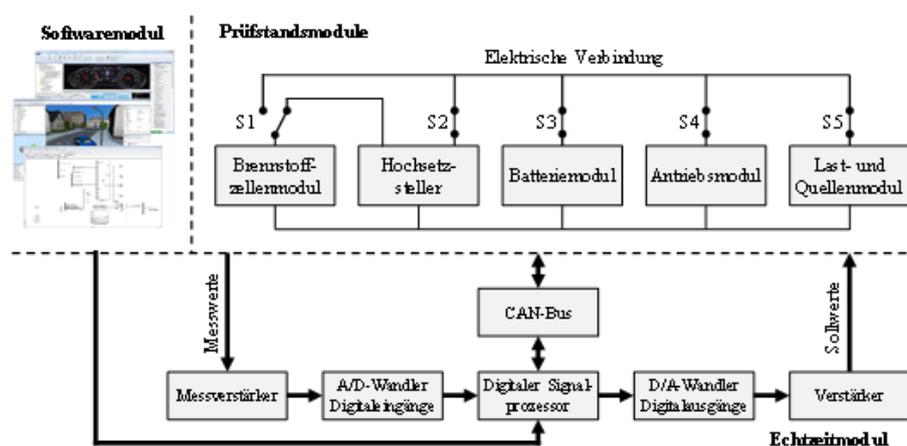
M.Eng. Sören Scherler, betreut durch Prof. M. Henke.

Das an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Wolfenbüttel durchgeführte Vorhaben thematisiert ein prädiktives Energiemanagement für den energieoptimierten Fahrbetrieb eines Elektrofahrzeugs mit Brennstoffzellen-Range-Extender im digital vernetzten Verkehr. Zur Erzielung des optimierten Fahrbetriebs erfolgt der modellbasierte Entwurf intelligenter Funktionen zur Zielführung („Welche Route ist zur Erfüllung der Fahraufgabe optimal?“), zur Bahnplanung („Welche Fahrzeugführung ist auf der gewählten Route zur Erfüllung der Fahraufgabe optimal?“) und zum Energiemanagement („Welche Verteilung der zur Erfüllung der Fahraufgabe notwendigen Leistung auf Batterie und Brennstoffzelle ist optimal?“).

Die energie- und infrastruktureoptimierte Zielführung wird unter Berücksichtigung von Fahrzeug-, Umwelt- und V2X-Informationen ermittelt zur Erreichung des Fahrtziels eine optimale Route, in welcher notwendige Tank- und Ladestopps eingeplant werden. Diese Route wird durch die Bahnplanung genutzt, um ein hinsichtlich Zeit und Energieverbrauch optimiertes Geschwindigkeitsprofil für die gesamte Fahrt zu planen. Aus diesem Geschwindigkeitsprofil wird ein Antriebsleistungsprofil prädiziert, welches gemeinsam mit einer Prognose der zukünftigen elektrischen Leistungsbedarfe aller weiteren Bordnetzkomponenten die Grundlage des prädiktiven Energiemanagements darstellt. Ein

wesentliches Ziel des Energiemanagements ist die verlustminimierende Leistungsbereitstellung durch Verteilung der prädierten Leistungsbedarfe auf Batterie und Brennstoffzelle. Hierbei werden Restriktionen wie minimal und maximal zulässiger Batterieladestand, Leistungsgrenzen der Energiequellen oder verfügbare Wasserstoffmenge während des Optimierungsverfahrens berücksichtigt.

Begleitend zur modellbasierten Entwicklung werden verschiedene CAE-Werkzeuge (weiter-)entwickelt. Es handelt sich um einen virtuellen Prüfstand zur Durchführung von MiL- und SiL-Simulationen und um einen flexibel konfigurierbaren HiL-Prüfstand (vgl. Abbildung), welcher eine Vielzahl relevanter Anwendungsfälle während des gesamten Projektverlaufs von der Parameteridentifikation und Modellvalidierung bis zur Erprobung, Verifikation und Optimierung entwickelter Funktionen abdeckt.



Struktur des flexibel skalierbaren HiL-Prüfstands bestehend aus Software-, Echtzeit- und Prüfstandsmodulen. Dargestellt ist die Verschaltung aller Module für Funktionstests des prädiktiven Energiemanagements.

Design Methodology for Drive Inverters with Integrated Sine Wave Filters based on Multi Objective Optimization Algorithms

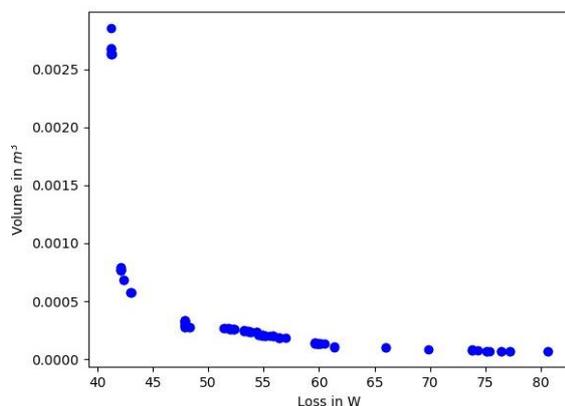
M.Sc. Thorben Schobre, betreut durch Prof. R. Mallwitz

Leistungselektronik soll möglichst effizient, kompakt und kostengünstig sein. Das stellt die Auslegung dieser Schaltungen vor große Herausforderungen, da sich diese Ziele gegensätzlich gegenüber stehen. Somit bedeutet die Auslegung, um diese Ziele zu erreichen, eine Suche nach dem optimalen Kompromiss. Der Lösungsraum einer Leistungselektronischen Schaltung ist mitunter sehr groß. Das Angebot an Leistungshalbleitern und Halbleitertechnologien wächst. Es gibt ein riesiges Angebot an Kondensatoren und das Design von magnetischen Bauelementen bietet viele Freiheitsgrade im Hinblick auf Kernmaterialien, Kernformen, Wicklungstopologien und Kernmaterialien. Aber auch Parameter wie die Schaltfrequenz und die Topologie der Schaltung selbst vergrößern den Lösungsraum. Wie kann aus so einem großen Lösungsraum der optimale Kompromiss gefunden werden? Viele Auslegungen werden sicher erfahrungsbasiert durchgeführt. Dabei wächst der Erfahrungsschatz, sowohl eines einzelnen Ingenieurs:in, als auch der Erfahrungsschatz, der in der Literatur festgehalten ist, je

mehr Schaltungen ausgelegt, berechnet und experimentell untersucht worden sind. Dieser Ansatz ist aber mitunter sehr zeitintensiv und es ist schwierig sicherzustellen, dass der beste Kompromiss mit diesem „Best-Praxis-Ansatz“ wirklich gefunden wird. Ein weiterer Ansatz ist die computergestützte Variation von Designparametern. Dieser Lösungsansatz ist aber auch nur zielführend, wenn der Parameterraum begrenzt ist, da sich sonst eine zu große Komplexität ergeben würde. Wenn man sieben Parameter hat und jeder dieser zehn unterschiedliche Varianten hat, sind das schon Lösungen. Wenn jede Lösung 3 s Zeit zur Berechnung benötigt, muss 347 Tage gerechnet werden. Hier gibt es also großes Potenzial die Berechnung effektiver zu gestalten. Dieses Potential kann durch die Anwendung von geeigneten statistischen Mehrzieloptimierungsalgorithmen erreicht werden. Der Vorteil dieser Algorithmen ist, dass nicht mehr alle Variationen berechnet werden müssen, sondern der Algorithmus das Ziel schneller findet.

In diesem Dissertationsvorhaben wird die Anwendung von genetischen Mehrzieloptimierungsalgorithmen für die optimale Auslegung von leistungselektronischen Schaltungen untersucht. Diese Algorithmen simulieren prinzipiell den Evolutionsmechanismus aus der Natur. Das bedeutet für die Anwendung in der Leistungselektronik, dass es eine Generation von Schaltungsdesigns gibt, welche der Folgegeneration ihre besten Eigenschaften weitergibt. Durch genetische Operatoren, sog. Cross-Overs oder Mutationen, werden darüber hinaus auch neue Varianten in der Nachkommengeneration erzeugt. Die besten Lösungen setzen sich dann wieder durch und der Prozess wird wiederholt. Jede Generation wird an den Zielfunktionen gemessen. Diese Zielfunktionen sind in diesem Vorhaben das Volumen und die Verluste der gesamten Schaltung. Der Algorithmus findet in dieser Arbeit Anwendung für die Optimierung eines dreiphasigen Antriebswechselrichters mit Sinusfilter. Dabei wird hier ein besonderes Augenmerk auf die Untersuchung des NSGA2 Algorithmus gelegt. Eine Besonderheit ist, dass als Halbleitertechnologie SiC gewählt wird, was grundsätzlich die Verwendung von sehr kleinen Filtern ermöglicht und somit in einen Bauraum passt, welcher von Antriebswechselrichtern mit konventioneller Si-IGBT Technik benötigt wird. Ebenfalls hat die SiC-Technologie das Potential, dass die Gesamtverluste des Sinuswellenwechselrichters nicht größer als die des konventionellen Wechselrichters werden.

Eine Herausforderung, welche in diesem Vorhaben behandelt wird, ist die möglichst genaue aber rechenzeitoptimale Modellierung der Eigenschaften der Schaltung. Hier wird besonders die Modellierung der Verluste der magnetischen Bauelemente und Halbleiter betrachtet. Darüber hinaus ist auch die korrekte Beschreibung von Randbedingungen, wie beispielsweise die Sättigung von magnetischen Kernmaterialien, die Einhaltung von Temperaturgrenzen durch thermische Modelle der Bauelemente oder die Einhaltung von Limits der leitungsgebundenen Störaussendung zu berücksichtigen. Das Ergebnis eines Optimierungsvorgangs ist im Bild dargestellt. Es lässt sich eine Pareto-Front von optimalen Lösungen im Hinblick auf minimale Verlustleistung und minimales Volumen identifizieren. Aus diesen kann jetzt der beste Kompromiss gewählt werden. Beispiele aus diesen Lösungen werden als Case-Study aufgebaut und mit Hilfe einer für dieses Vorhaben entwickelten Forschungswechselrichterplattform vermessen. Anhand dieser Ergebnisse wird dann die Gültigkeit der verwendeten Modelle nachgewiesen.



Pareto-Front der optimalen Auslegungen für einen SiC-Antriebswechselrichter mit Sinusfilter

Anhand dieser Arbeit wird das Potential von Mehrzieloptimierungsalgorithmen in der Anwendung der Leistungselektronik gezeigt, um die optimale Schaltungsauslegung mit sehr vielen Designparametern effizient durchzuführen und den besten Kompromiss zu finden.

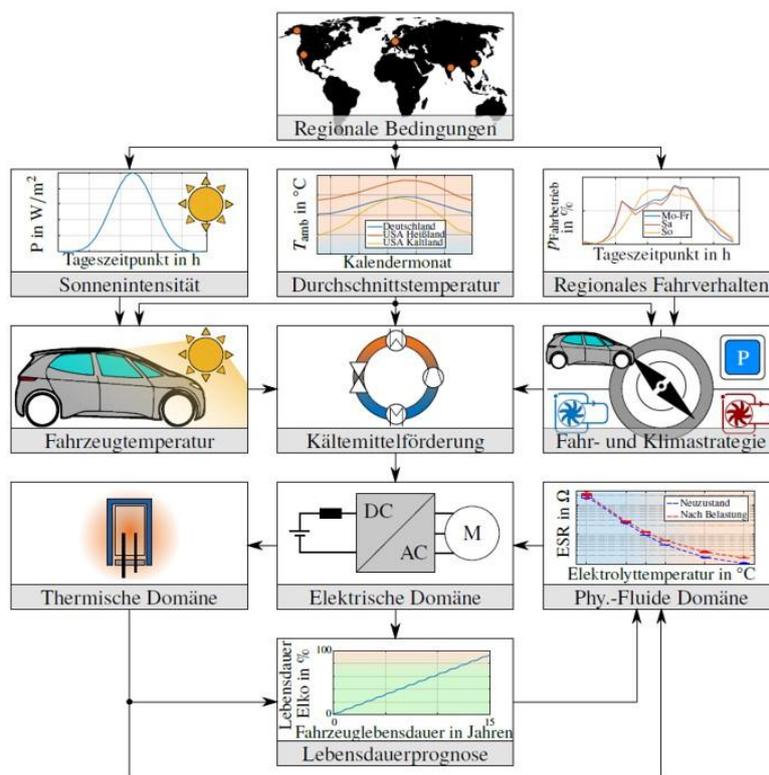
Empirische Lebensdauerprädiktion von Elektrolytkondensatoren in hochbeanspruchten Applikationen elektrifizierter Fahrzeuge

M.Sc. Philipp Adler, betreut durch Prof. R. Mallwitz

Durch die Elektrifizierung des Automobils erhalten elektrisch angetriebene Nebenaggregate neben dem eigentlichen Fahrbetrieb zusätzliche Aufgaben. Der elektrische Kältemittelverdichter ist beispielsweise, ergänzend zur Klimatisierung der Fahrzeugkabine, unter anderem auch für das Kühlen und Heizen der Hochvoltbatterie während des Ladevorgangs zuständig. Durch diese zusätzlichen Aufgaben verdoppeln sich die Lebensduranforderungen der Komponente und dementsprechend auch der eingebauten Leistungselektronik des Verdichters.

Eine der Hauptausfallursachen dieser Komponenten ist der Elektrolytkondensator im Zwischenkreis, welcher aufgrund seiner hohen Energiedichte und geringen Kosten eingesetzt wird. Während der Alterung dieser Bauelemente ändern sich die elektrischen Eigenschaften des Kondensators, wie bspw. eine Reduzierung der Kapazität. Diese Parameterdrifteffekte können zu Spannungswelligkeiten auf dem Bordnetz führen, welche andere Komponenten beeinflussen könnten.

Um sicherzustellen, dass die Zuverlässigkeit dieser Zwischenkreisenergiekapazitäten über eine Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren gewährleistet ist, wird eine Multi-Domänen-Simulation entwickelt. Hierbei werden verschiedene physikalische Disziplinen miteinander verknüpft, um eine realitätsnahe und applikationsspezifische Nachbildung der Alterung der Elektrolytkondensatoren zu erhalten. Zur Parametrierung des Simulationsmodells werden empirische Versuche verwendet, um das elektrische, thermische sowie alterungsspezifische Verhalten der Kapazitäten nachzubilden. Dieses somit hochparametrisierte Modell simuliert anschließend die 15 Jahre Fahrzeuglebensdauer in verschiedenen klimatischen Zonen der Erde. Durch die daraus resultierende virtuelle Lebensdauerprädiktion der Elektrolytkondensatoren können bereits während der Entwicklungsphase Abhilfemaßnahmen getroffen werden, um ggf. die Lebensdauer der Kondensatoren zu erhöhen und folglich die Spannungswelligkeiten auf dem Bordnetz zu reduzieren.



Schematischer Ablauf der Multi-Domänen Simulation zur Lebensdauerprädiktion von Elektrolytkondensatoren in Kältemittelverdichter elektrifizierter Fahrzeuge

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

Jan-Henrik Fey, M.Eng., 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.



350-kVA-MMC-Demonstrator

Analyse und Optimierung der parasitären Elemente in integrierten SiC-Traktionsumrichtern hoher Leistungsdichte

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

Parasitäre Effekte sind beim Einsatz von Wide Band Gap (WBG) - Leistungshalbleitern nicht zu vernachlässigen, da sie sowohl die Funktionsweise als auch die Sicherheit der elektronischen Schaltung beeinträchtigen. Die Untersuchung und die Beherrschung der daraus resultierenden Phänomene stellen mittlerweile eine zentrale Disziplin der modernen Leistungselektronik dar. Am Beispiel eines integrierten Traktionsumrichters auf Basis von SiC werden die parasitären Elemente des Leistungs- und Ansteuerteils analysiert und optimiert.

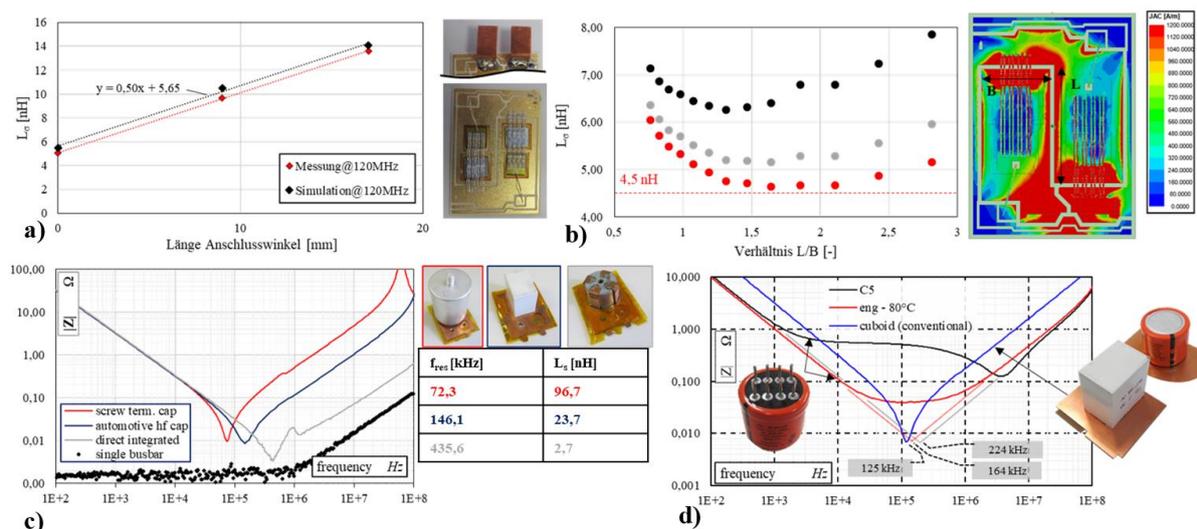
Der Einsatz von WBG-Leistungshalbleitern erfordert zunächst, dass der Zwischenkreis-kondensator mitsamt der Sammelschiene eine sehr hohe Bandbreite besitzt. Die Höhe der Bandbreite wird maßgeblich vom ESL des Kondensators definiert. Die kommerzielle Verfügbarkeit von ESL-reduzierten Zwischenkreiskondensatoren sorgt zudem dafür, dass in der Praxis die Folien- den Elektrolytkondensatoren vorgezogen werden. Mit Blick auf die parasitären Elemente werden zunächst die bisher wenig systematisch untersuchten Optimierungsansätze für die Anbindung der Kapazitäts-bildenden Mehrschichtgüter bezüglich maximaler Bandbreite und entstehender Resonanzen entwickelt. Obwohl die planare Leitungsführung einer Sammelschienenstruktur bekanntermaßen eine geringe Streuinduktivität besitzt, liegt eine große Herausforderung in der Umsetzung der Kondensatorwickelanbindung. Im Rahmen dieser Arbeit werden busbarintegrierte Folienkondensatoren entwickelt, die einen $ESL < 3 \text{ nH}$ besitzen (siehe Abb. 1c). Bei den Aluminium Elektrolytkondensatoren herrscht eine erhöhte Nachfrage nach einem reduzierten ESR. Ein niedriger ESR sorgt für eine größere Lebensdauer und geringere Verlustleistung in dem Kondensator und somit eine höhere Effizienz des Umrichters. Elektrolytkondensatoren sind außerdem bekannt für einen höheren ESL als Folienkondensatoren. Daher gelten diese i. A. als ungeeignet für schnellschaltende Applikationen. Dennoch zeigt sich auch bei dieser Technologie großes Potential zur Reduktion des ESL insbesondere über die Optimierung der Zwischenverbindung von Wickel zu Außenschnittstellen. Im Rahmen dessen, werden Elektrolytkondensatoren präsentiert, die im Vergleich zum Stand der Technik (EPCOS-B43634) einen 55% niedrigeren ESR und einen 45% niedrigeren ESL besitzen (siehe Abb. 1d).

Der Einsatz von WBG-Leistungshalbleitern erfordert, dass die Aufbautechnik für das Package oder Modul eine parasitätsarme Anbindung der Halbleiter-Chips ermöglichen. Bei der Untersuchung des Halbleitermoduls mit Außenschnittstellen können die Zwischenkreisschnittstellen sowie eine zweidimensionale Substratstruktur als Grund für eine hohe parasitäre Induktivität in der Kommutierungsmasche identifiziert werden. Kommerzielle Beispiele zeigen, dass das coplanare 2D-Substrat keine Streuinduktivität $L\sigma < 4,5 \text{ nH}$ erzielen und die Schnittstellen problemlos für eine 55-prozentige Erhöhung der Kommutierungsmascheninduktivität sorgen können (siehe Abb. 1a,b). Optimierungsstrategien für Aufbau, Layout und Schnittstellen sind aus vielen Vorarbeiten bekannt. Dennoch fehlen oft Ansätze für systematische Strategien, sodass aus Entwicklersicht nur eine Vielzahl von Maßnahmen zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund sollen für die vorliegende Arbeit Teile des Leistungsmodulaufbaus analysiert werden, sodass einzelne Maßnahmen unter Einsatz potenter Leistungsmodultechnologien (u.A. mehrlagige DCB und Cu-Leadframe) zur Verbesserung des gesamten Schaltungsaufbaus entwickelt und bewertet werden. Mithilfe der optimierten Kondensator- und Zwischenkreisanbindung wird zudem der

Übergang auf ein konsequent planares Leitungs-konzept im Leistungsteil ermöglicht, sodass eine minimale Kommutierungsmascheninduktivität erzielt werden kann.

Mit Blick auf die Anbindung der Ansterelektronik sollen die Untersuchungen Konzepte und Richtlinien der Anbindung vom Treiber IC bis zum Halbleiterchip liefern. Insbesondere die Leitungsführung der Ansteuersignale auf dem Leistungsmodul soll mit Blick auf die parasitären Elemente genauer betrachtet werden. Der Schwerpunkt liegt hier auf der parasitären Induktivität $L_{\sigma G}$ und der Streukapazitäten $C_{\sigma GH}$, C_{gd} , C_{gs} und C_{ds} sowie dem Resonanzverhalten des Ansteuerpfades. Es wird ein flexibles Anbindungssystem entwickelt, dass die Anbindung der Halbleiter auf dreidimensionalen Schaltungsträgern mit einem sehr geringen $L_{\sigma G}$ und einer reduzierten kapazitiven Einkopplung ermöglicht.

Um die gewonnenen Erkenntnisse über die Systemkomponenten gewinnbringend einzusetzen, wird abschließend ein Antriebsumrichter Gesamtsystem unter der Bedingung eines hohen Integrationsgrades in komplexen Bauräumen entwickelt. Die Untersuchungen haben zum Ziel, neue mechatronische Konzepte für Traktionsumrichter mit reduzierten parasitären Elementen darzustellen. Diese Arbeit liefert einen Beitrag für Design-Richtlinien von Systemkomponenten aus Sicht des Gesamtsystems, sodass Barrieren für den erfolgreichen Einsatz der WBG-Leistungshalbleiter im Antriebsumrichter überwunden werden können.



a) Einfluss der Außenschnittstellen als Schraubkontakte auf die Streuinduktivität der coplanaren Leiterschleife, b) Optimales Länge zu Breite Verhältnis der coplanaren Leiterschleife (Simulation per Ansys Q3D bei 10 MHz Extraktionsfrequenz), c) Einfluss der Terminalkonfiguration von busbarintegrierten Folienkondensatoren auf die Resonanzstelle bzw. den ESL, d) Vergleich der Impedanzkurven von einem kommerziellen HF-Folienkondensator zu entwickeltem ESL- und ESR-optimierten Elektrolytkondensator

3.4 Abgeschlossene Promotionen am IMAB

In den Jahren 2019 - 2021 konnten zahlreiche Promotionen erfolgreich abgeschlossen werden. Im Folgenden ein kurzer Überblick:

Analyse segmentierter elektrischer Maschinen in einem Kfz-Antriebsstrang

*Dr.-Ing. Sebastian Schulte (Volkswagen AG), Promotion am IMAB TU Braunschweig, 2021
(Erstberichter Prof. M. Henke)*

Ausgehend von den Einsatzszenarien elektrischer Maschinen in Kfz-Antriebssträngen werden die Anforderungen und Randbedingungen an elektrische Maschinen hergeleitet. Es wird die Segmentierung des Stators elektrischer Maschinen zur verbesserten Ausnutzung nicht zylindrischer Bauräume vorgestellt. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen und Restriktionen der Segmentierungen werden der Maschinentyp und die Wicklungsart für die weiteren Betrachtungen ausgewählt.

In einer analytischen Bewertung wird der vorteilhafte Einsatz segmentierter elektrischer Maschinen vorgestellt und Analysen bezüglich einer präferierten Ausgestaltung durchgeführt. Mittels FEM werden im Folgendem die Ergebnisse der analytischen Analyse anhand einer Referenzmaschine überprüft. Es wird eine unsegmentierte Referenzmaschine mit segmentierten Maschinen mit einer konstanten Überdeckung von Rotor zu Stator von 0,5 jedoch mit einer variierenden Anzahl an Segmenten verglichen. Die in der Untersuchung aufgezeigten Effekte der Segmentierung werden im Anschluss mittels Einfügen eines optimierten Flussleitstücks behandelt und deren negative Auswirkungen auf die Performance weitestgehend behoben. Zum Abschluss werden die simulierten Ergebnisse anhand eines Prototypen validiert.

Systemorientierte Entwurfsmethodik für Fahrzeugladegeräte

*Dr.-Ing. Konstantin Siebke, Promotion am IMAB TU Braunschweig, 2021
(Erstberichter Prof. M. Henke, Zweitberichterin Prof. R. Mallwitz)*

In der Arbeit wird eine Entwurfsmethodik für Fahrzeugladegeräte entwickelt, die eine ganzheitliche Analyse des gesamten Ladesystems ermöglicht. Als Ladesystem werden dabei die Bestandteile Netz, Ladegerät und die Fahrzeugbatterie aufgefasst. Die Entwurfsmethodik orientiert sich am V-Modell eines Entwicklungsprozesses. Wesentliche Bestandteile der entwickelten Entwurfsmethodik sind eine einheitliche Methode zur analytischen Modellbildung der Leistungselektronik sowie eine Rapid Prototyping Umgebung. Durch die Methode zur Modellbildung ist eine Analyse der Ladegeräteentwürfe sowie des Ladesystems mit sehr geringem Zeitaufwand möglich. Die Rapid Prototyping Umgebung erlaubt eine schnelle praktische Validierung der Bauelemente, Topologien und Betriebsstrategien des Ladegerätes unter realen Bedingungen. Beide Bestandteile der Entwurfsmethodik werden in der Arbeit entwickelt und dienen der frühzeitigen Eigenschaftenabsicherung im Entwicklungsprozess, die in einem konventionellen Entwurfsprozess nicht zur Verfügung

stunden. Für den Entwurf eines Fahrzeugladegerätes mit einer Nennleistung von 3,6 kW und Galliumnitrid Leistungshalbleitern wird die Entwurfsmethodik angewendet. Die Vielfalt der zur Verfügung stehenden Topologien wird auf eine aktive Vollbrücke für die Leistungsfaktorkorrektur sowie einen CLLC-Wandler und eine Dual Active Bridge für den DC/DC-Wandler eingegrenzt. Im Anschluss werden diese Topologien im Rahmen der Entwurfsmethodik auf Komponenten- und Topologieebene modellbasiert und durch Einsatz der Rapid Prototyping Umgebung praktisch analysiert und optimiert. Auf Systemebene werden insbesondere Betriebsstrategien mit variabler Zwischenkreisspannung betrachtet. Alle Komponenten des Ladegerätes werden unter realen Bedingungen validiert. Auf den Ergebnissen dieser Arbeit kann ein optimiertes und eigenständiges Funktionsmuster eines Fahrzeugladegerätes entwickelt werden.

Mehrphasige elektrische Antriebssysteme mit permanentmagneterregten Synchronmaschinen in automobiler Anwendung

*Dr.-Ing. Julian Berlinecke (Volkswagen AG), Promotion am IMAB TU Braunschweig, 2020
(Erstberichter Prof. M. Henke)*

Mehrphasige elektrische Antriebssysteme mit Strangzahlen größer als drei werden in heutigen Fahrzeuganwendungen nur vereinzelt eingesetzt. Obwohl Mehrphasensysteme bereits seit mehreren Jahrzehnten bekannt sind, werden Freiheitsgrade und Vorteile der Mehrphasigkeit beispielsweise vor dem Hintergrund einer Kondensator- und Bauraumreduktion nur selten genutzt. Ziel der Arbeit ist es daher, mit Hilfe eines Untersuchungsansatzes die Mehrphasigkeit bei konstanten Randbedingungen sowohl im Hinblick auf die elektrische Maschine als auch aus systemischer Sicht zu untersuchen. Anhand eines systematischen Vorgehens werden dabei vorteilhafte Strangzahlen identifiziert und Kriterien definiert, die eine Bewertung der Strangzahl mit Bezug auf eine automobile Fahrzeuganwendung ermöglichen. Aufbauend auf einer Wicklungsbewertung mehrsträngiger Ganzloch- sowie Zahnspulenwicklungen werden Untersuchungsvarianten permanentmagneterregter Synchronmaschinen ausgelegt und im Hinblick auf strangzahlbedingte Änderungen in Parametern und Betriebseigenschaften analysiert. Im Vergleich zur dreisträngigen Wicklungsauslegung ist speziell bei hohen Strangzahlen und einer Vielzahl von Koppelfaktoren unterschiedlicher Beträge und Vorzeichen eine deutliche Erhöhung der Stromwelligkeit festzustellen. Ein aus der Literatur bekannter Ansatz zur Bestimmung der taktungsbedingten Spitze-Spitze-Stromwelligkeit wird daher im Rahmen dieser Arbeit um den Einfluss induktiver Strangverkopplungen erweitert. Anhand zuvor definierter Bewertungskriterien wird im Anschluss an die Maschinen- und Systemanalysen eine begründete Wahl einer Strangzahl vorgenommen und eine Versuchsmaschine mit mehreren Teilsystemen ausgelegt, die bei hohen Drehmoment- und Leistungsdichten für eine Anwendung im Elektrofahrzeug geeignet ist. Durch Prüfstandsmessungen werden neben einer Oberschwingungsregelung insbesondere die Modelle zur Bestimmung der taktungsbedingten Stromwelligkeit unter Berücksichtigung induktiver Strangverkopplungen validiert.

Optimierung leistungselektronischer Wandler in Fahrzeugantriebssträngen basierend auf Siliziumkarbidleistungshalbleitern

*Dr.-Ing. Niklas Langmaack, Promotion am IMAB TU Braunschweig, 2021
(Erstberichter Prof. M. Henke)*

Die Dissertation behandelt die Optimierung der Leistungsdichte und Effizienz unterschiedlicher leistungselektronischer Wandler, die in den Antriebssträngen von Elektrofahrzeugen Verwendung finden. Hierzu werden unterschiedliche technische, strukturelle und methodische Ansätze detailliert beschrieben, entwickelt und analysiert. Im Rahmen von drei prototypischen Aufbauten werden die unterschiedlichen Optimierungsansätze praktisch erprobt, um ihre jeweilige Wirksamkeit, ihr Zusammenspiel miteinander sowie die Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung bewerten zu können. Die Optimierungsansätze umfassen den Einsatz von Siliziumkarbidleistungshalbleitern, Möglichkeiten zur besonders kompakten Erfassung von Lastströmen, Schaltungstopologien zur Reduktion der Volumina von passiven Bauelementen durch versetztes Schalten sowie neue Ansätze für intelligente Treiberstufen mit dezentralen Mikrocontrollern. Im Bereich der strukturellen und methodischen Optimierungsstrategien werden der Einfluss der Bordnetzspannung auf die Auslegung und Performance der daran angebotenen Wandler untersucht, Ansätze zum streng modularen Aufbau hoch integrierter Wandlerysteme beschrieben, eine neuartige Berechnungsmethode zur Voraussage von Verlustleistungen in Leistungshalbleiterbauelementen entwickelt und die Herausforderungen bei der Vermessung schnell schaltender Leistungshalbleiter analysiert. Erprobt werden die unterschiedlichen Optimierungsansätze im Rahmen von drei Wandlern unterschiedlicher Funktion und Leistung. Ein bidirektionaler 100-kW-Hochsetzsteller, der als Schnittstelle zwischen Hochvoltbatterie und Fahrzeugbordnetz oder in Brennstoffzellenfahrzeugen zum Einsatz kommen kann, zeigt die Auswirkungen des Einsatzes von Siliziumkarbid-MOSFETs mit einer Schaltfrequenz von 100 kHz auf die benötigten Glättungs-drosseln sowie die erreichbare volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte. In einem 22-kW-Onboard-Ladegerät werden noch höhere Schaltfrequenzen umgesetzt und der Einsatz magnetisch gekoppelter Glättungs-drosseln erprobt. Das verfolgte transformatorlose Konzept profitiert darüber hinaus von den strukturellen Überlegungen zur Spannungsfestlegung im Bordnetz. In einem Antriebswechselrichter mit einer Nennleistung von 250 kW werden die Praxistauglichkeit der intelligenten Treiberstufen und der integrierten Strommessmethode auf Grundlage von Rogowskispulen erprobt und Siliziumkarbid-MOSFETs für einen hohen Wirkungsgrad bei einer Schaltfrequenz von 20 kHz eingesetzt. Abschließend werden alle betrachteten Technologien auf Grundlage der theoretischen und praktischen Untersuchungen einzeln und im Zusammenspiel bewertet.

Effiziente Methoden zur Auslegung und Berechnung mehrphasiger flussmodulierter elektrischer Maschinen am Beispiel der Flux-Switching-Maschine

*Dr.-Ing. Christian Heister, Promotion am IMAB TU Braunschweig, 2021
(Erstberichter Prof. M. Henke)*

Die Arbeit beschäftigt sich mit der effizienten Auslegung und Berechnung von mehrphasigen flussmodulierten Maschinen. Auch wenn die entwickelten Methoden und Modelle am Beispiel von Flux-Switching-Maschinen angewendet werden, sind sie allgemeingültig und lassen sich für weitere flussmodulierte Maschinen, wie Vernier- und FluxReversal-Maschinen, einsetzen. Die Arbeit liefert dabei vier wesentliche wissenschaftliche Beiträge:

Die Beschreibung des Funktionsverhaltens einer flussmodulierten Maschine mithilfe der i.d.R. auf der Grundwelle basierenden Drehfeldtheorie ist nicht einmal ausreichend, um auch nur die Entstehung einer Komponente des Drehmoments zu erklären. Daher wird die Drehfeldtheorie um harmonische Effekte, Mehrphasigkeit und um die Berücksichtigung von Nutung erweitert. Anschließend erfolgt unter Anwendung des vollständig mathematisch hergeleiteten Instrumentariums eine Analyse des Funktionsprinzips der Flux-Switching-Maschine. Das aus der Modulation resultierende harmonische Spektrum erfordert ein gegenüber konventionellen Maschinen abweichendes Vorgehen bei der Auslegung der Wicklung. Hierzu wird ein automatisierter und deterministischer Algorithmus entwickelt, welcher auf Flussgrößen basiert, das gesamte harmonische Spektrum an Feldwellen berücksichtigt und die Auslegung von Wicklungen beliebiger Phasenzahlen zulässt. Zur Berechnung von magnetischen Flussgrößen wird ein auf magnetisch äquivalenten Netzwerkelementen basierendes generisches Maschinenmodell entwickelt und in Software umgesetzt, welches gleichermaßen Nutungs- und Sättigungseffekte berücksichtigt. Dieses erlaubt es dem Anwender die Geometrie frei vorzugeben und nimmt ihm die Aufstellung und Lösung des numerischen Gleichungssystems vollständig ab. Die Entwicklung des Maschinenmodells erfolgt dabei eng an den Anforderungen an numerisch effizient lösbare Gleichungssysteme. Dabei wird auch eine hybride Formulierung, welche auf einer formalen Lösung der Maxwellgleichungen im Luftspalt basiert, untersucht. Sie erweist sich trotz einer Reduktion an zu bestimmenden Unbekannten als numerisch aufwändiger und damit ineffizienter als eine ebenfalls in dieser Arbeit entwickelte Implementierung basierend auf magnetisch äquivalenten Netzwerkelementen. Die hohe Genauigkeit der mit dem entwickelten Maschinenmodell berechneten Feldlösung wird mithilfe der Finite Elemente Methode nachgewiesen. Die entwickelten Methoden und Modelle werden zu einer Toolkette kombiniert, mit deren Hilfe eine Topologiestudie über Flux-Switching-Maschinen mit drei bis zwölf Phasen erfolgt. Sie umfasst 218 ausführbare global optimierte Topologien, von denen viele Topologien mit mehr als drei Phasen erstmalig in dieser Arbeit beschrieben werden. Ein Abgleich mit Ergebnissen aus anderen Forschungsarbeiten weist nach, dass entweder nachweislich bessere Wicklungsauslegungen gefunden werden oder bereits bekannte Auslegungen als optimal verifiziert werden können.

3.5 IMAB-Externe Aktivitäten

CIPS (<https://www.cips.eu/en>)

Prof. Mallwitz ist Topic Group Chair bei der im 2-Jahres-Rhythmus stattfindenden International Conference on Integrated Power Electronics Systems- CIPS. Die Ausgestaltung der Themenbereiche „Components to be integrated & Mechatronic systems and their applications“ für die CIPS 2020 und 2022 gehört zu ihrem Aufgabenbereich. Eingereichte sowie eingeladene Beiträge aus der internationalen Fachwelt beschäftigen sich hier mit den Bauelementen der Leistungselektronik, den Gehäusen und ihrer Montage in mechatronischen Systemen sowie der daraus resultierenden Zuverlässigkeit und Aspekten der elektromagnetischen Verträglichkeit. Diese Themen sieht der Fachbereich als Schlüsselthemen der modernen Leistungselektronik, wie sie für diverse Stromversorgungen und Antriebslösungen benötigt wird, an.

ETG (<https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/q1>)

Prof. Mallwitz ist seit 2018 Vorsitzende des Fachbereichs Q1-Leistungselektronik in der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) des VDE und Mitglied im wissenschaftlichen Beirat der ETG. Dieser ist u.a. für die Ausgestaltung der regelmäßig stattfindenden ETG Kongresse verantwortlich. In ihren Verantwortungsbereichen fielen die Kongresse in 2019 und 2021. Für den ETG-Kongress 2021 hat sie das Programm durch eingeladene Vorträge, die den Blick auf die Systemdetails der Energietechnik richten, verstärkt.

EPE (<https://www.epe-association.org/wordpress/about-us/>)

Prof. Mallwitz ist Mitglied der European Power Electronics (EPS) Association und auch hier an der Ausgestaltung der jährlich stattfindenden European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)_Konferenz prägend beteiligt. Bei dieser Tagung handelt es sich um die umfassendste Fachkonferenz zur Leistungselektronik.

ECPE (<https://www.ecpe.org/>)

Die TU Braunschweig und damit auch das IMAB sind auf Initiative von Prof. Mallwitz seit 2015 Mitglied im European Center for Power Electronics e.V. (ECPE). Diese international agierende Vereinigung -gegründet in 2003- ist das führende Forschungs-Netzwerk in der Leistungselektronik und vereint Industrie und Akademie. Zur Zeit sind in der ECPE mehr als 200 Mitglieder (Unternehmen, Universitäten, Forschungseinrichtungen etc.) vertreten. Prof. Mallwitz ist Mitglied in den Vorständen von NFF und SE2A.

HEV (<https://hybrid-tagung.de>)

Auch in der Pandemie wurde in Gifhorn das Symposium HEV- Hybrid and Electric Vehicles unter der Tagungsleitung von Prof. Henke durchgeführt. In zahlreichen Beiträgen aus der Automobil- und Zulieferindustrie werden alljährlich Themen zum elektrifizierten Antriebsstrang in PKW, LKW und mobilen Arbeitsmaschinen präsentiert und diskutiert. Unterstützt wird dieses sehr anwendungsnahe Symposium maßgeblich von IAV und ITS mobility.

4 Lehre

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. Die Durchführung der Lehre in 2020/2021 war aufgrund der COVID19-Pandemie sehr herausfordernd. Aufgrund der Einschränkungen waren Präsenzveranstaltungen kaum möglich, sodass fast alle Lehrveranstaltungen durch Online-Formate ersetzt werden mussten.

Dies war bei den Praktika, bei denen die vermittelten Inhalte anhand von exemplarischen Hardwareaufbauten und Prüfstandsversuchen unter praktischen Gesichtspunkten behandelt werden, besonders anspruchsvoll. Durch den Einsatz von interaktiven Online-Lehrformen war jedoch auch hier eine erfolgreiche Durchführung möglich.

4.1 Vorlesungen und Praktika

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 Maschinenbau	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
	Regelung in der elektrischen Antriebstechnik	Prof. Henke	WS
	Angewandte Leistungselektronik	Prof. Mallwitz	SS
	Erweiterte Leistungselektronik	Prof. Mallwitz	WS
	Studienseminar Elektromechanische Energieumformung	Dr. Tareilus	SS/WS

Praktika	Durchführung	Semester
Praktikum Leistungselektronik	Dietrich, Fricke, Hauenschild, Lippold, Rohn, Uzlu	WS
Praktikum Elektrische Maschinen	Schillingmann, Balasubramanian, Hanisch, Dietrich	WS
Antriebssysteme für E-Fahrzeuge	Schillingmann, Korshunov, Klintz, Hanisch, Hauenschild, Balasubramanian	SS
Labor Master Elektromobilität	Schillingmann, Fischer, Balasubramanian	WS

Eine neue Lehrveranstaltung am IMAB ist die erstmals im Wintersemester 2021/22 stattfindende Vorlesung „Regelung in der elektrischen Antriebstechnik“, die zuvor am Institut für Regelungstechnik angesiedelt war. Sie richtet sich an Studierende der Masterstudiengänge Elektrotechnik und Elektromobilität und vermittelt tiefgehende Kenntnisse aus den Bereichen Modellbildung und Regelungsauslegung für typische elektromechanische Antriebssysteme.

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 ‚Grundlagen der elektromechanischen Energieumformung‘ wird von Prof. Henke gelesen und behandelt grundlegende Wirkzusammenhänge der elektromechanischen Energiewandlung in elektrischen Maschinen. Der Abschnitt ‚Grundlagen der 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. Dabei wird auch zwischen rotatorischen 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 Klemmengrößen 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 elektrischen 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.

Elektrische Grundlagen der Energietechnik für das Verkehrs- und Umweltingenieurwesen

In dieser Vorlesung erhalten die Studierenden der Umwelttechnik zunächst eine Einführung in die elektrotechnische Grundlagen und die Grundlagen der elektrischen Energieversorgung (Vorlesungsteil elenia). Anschließend folgt der dritte Vorlesungsteil von Prof. Henke, in dem die Grundlagen der elektromechanischen Energieumformung vermittelt werden. 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. Ergänzt wird die Vorlesung durch das Seminar ‚Technikfolgenbewertung‘, das die Themen Umwelt und Nachhaltigkeit mit der Energietechnik verknüpft und auf der systematischen Analyse und Bewertung der Auswirkungen von Technologien auf die Gesellschaft basiert.

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. Die in der Vorlesung erarbeiteten Modelle werden den Studierenden zur Verfügung gestellt, um im Rahmen der Übung eigene Simulationen durchführen zu können.

Elektrische Antriebe für den spurgebundenen Verkehr

In dieser Vorlesung, die gemeinsam ein Modul mit Prof. Engel bildet, 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

Diese Veranstaltung wird von Dr. Böhm (Volkswagen AG) und Prof. Henke gemeinsam gehalten. Den Studierenden werden ausführliche Inhalte rund um das Thema elektrische Antriebstechnik in mobilen Fahrzeugen vermittelt, wobei das Hauptaugenmerk auf Antriebskonzepten im Bereich PKW/Nutzfahrzeuge 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 baut die Dimensionierung elektrischer Antriebsstränge von der Energiequelle bis zur Last auf. Daneben werden auch Hybridantriebe und grundlegende Kenntnisse der Verbrennungskraftmaschine behandelt. Ebenso wird detailliert auf die elektrischen Maschinen in hybriden Antriebstopologien und auf Brennstoffzellenantriebe eingegangen. Der zweite Teil der Veranstaltung zielt auf die Vertiefung der Kenntnisse im Bereich der Komponenten und vermittelt detaillierte Kenntnisse im Bereich Energiespeicher, elektrischer Antrieb und Energiemanagement für mobile Antriebe.

Entwurf elektrischer Maschinen

Die Studierenden lernen in dieser Vorlesung von Prof. Henke den Entwurfsprozess elektrischer Maschinen kennen. Neben den Grundlagen der Drehmomentbildung stehen sowohl wichtige Spezifikationsgrößen als auch der konkrete Maschinenentwurf 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 Verluste und daraus resultierende thermische Einflüsse detailliert betrachtet.

Regelung in der elektrischen Antriebstechnik

Die Vorlesung „Regelung in der elektrischen Antriebstechnik“ wird nach dem Ausscheiden von Prof. Walter Schumacher (IfR) aus dem aktiven Dienst im Wintersemester 2021/22 erstmalig von Prof. Markus Henke am IMAB gehalten. Zu den Inhalten zählen die Modellbildung von Gleichstrom- und Drehfeldmaschinen, die Auswahl geeigneter Reglerstrukturen für typische Antriebssysteme sowie die systematische Auslegung der jeweiligen Reglerparameter. Ergänzend werden Aspekte aus den Bereichen Sensorik und Leistungselektronik thematisiert. In der Übung zur Lehrveranstaltung werden die Inhalte anhand typischer Prüfungsaufgaben und beispielhafter Simulationen gefestigt.

Erweiterte Leistungselektronik

In der Mastervorlesung „Erweiterte Leistungselektronik“ 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.

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“ und ein Kennenlernen aller wichtigen Komponenten des Antriebsstrangs ermöglicht. Hierfür 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 Fahrdynamik 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.

4.2 IMAB Teamprojekte

Am IMAB können Studierende in kleinen Teams Projekte durchführen, in denen die praktische Erfahrung im Vordergrund steht und die Studierenden ihr theoretisch erlerntes Wissen anwenden können. Neben der fachlichen Projektarbeit sind die Studierenden auch für die Projektplanung und Koordination untereinander verantwortlich. So können unter anderem agile Projektmanagementmethoden erlernt und direkt umgesetzt werden.

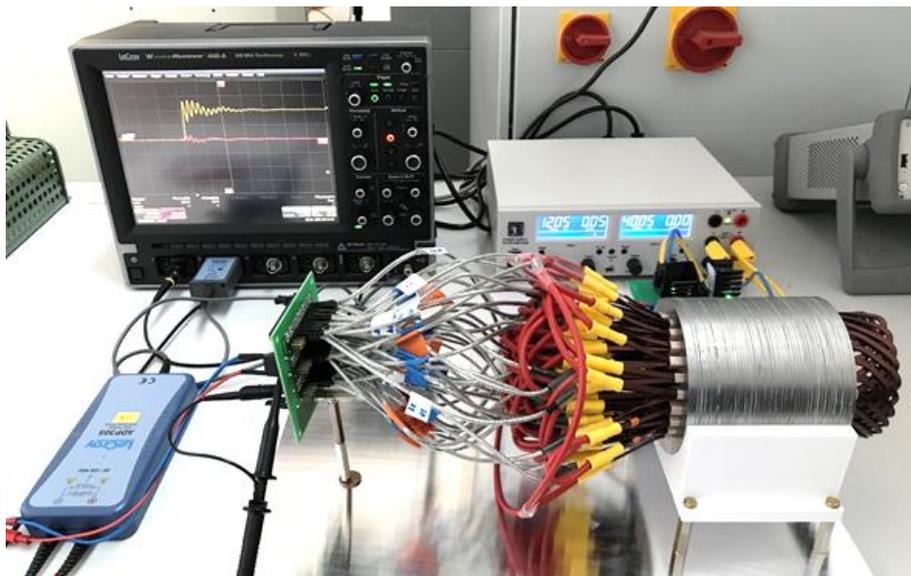
Messung der Spannungsverteilung in elektrischen Maschinen

Betreuer: M.Sc. Lucas Vincent Hanisch

Studenten: Lukas Eisele, Kai Lünne, Dan Han, Malte Kaminski, Mauriz Kahmann

Im Teamprojekt „Messung der Spannungsverteilung in elektrischen Maschinen“ wurde ein Prüfstand entwickelt, mit dem die Spannungsverteilung entlang der Wicklung einer elektrischen Maschine gemessen werden kann. Der Hintergrund ist, dass durch schnell schaltende Halbleiter in der Leistungselektronik transiente Spannungserhöhungen in der Maschinenwicklung auftreten. Ein genaues Verständnis dieser transienten Spannungserhöhungen hilft dabei, die elektrische Belastung der Maschine zu reduzieren und die Lebensdauer der Maschine zu erhöhen.

In diesem sehr interdisziplinären Projekt wurden die Studierenden vor Herausforderungen verschiedener Fachrichtungen gestellt. Es wurde eine Leistungselektronik mit SiC-Halbleitern entwickelt, die die Maschine mit Spannungsimpulsen erregt, eine Vorrichtung entworfen, mit der elektrische Maschinen mit Hairpinwicklungen aufgebaut werden können und eine Messtechnik erstellt, mit der die Spannungssignale an den einzelnen Hairpins gemessen werden können. In der nachfolgenden Abbildung ist der fertige Versuchsaufbau dargestellt.



Gesamtaufbau des Prüfstands zur Spannungsmessung in elektrischen Maschinen

4.3 Exkursionen

Lüneburg-Lübeck-Hamburg

M.Sc. Hendrik Schefer

Im Jahr 2019 haben wir eine Exkursion in den Raum Lüneburg-Lübeck-Hamburg unternommen. Mit 19 Studierenden und drei Betreuern (Dr.-Ing Tareilus, Quirin Maurus, Hendrik Schefer) besuchten wir in drei Tagen vier Unternehmen in der Region. Die Anreise nach Lüneburg am ersten Tag gestaltete sich als schwierig, denn der gemietete Bus erlitt eine Panne. Wir absolvierten mit den öffentlichen Verkehrsmitteln die letzten Kilometer zum ersten Unternehmen „Panasonic Industrial Devices Europe“. Das Unternehmen zeigte seine beeindruckenden Labore und die Tätigkeitsfelder im Bereich der Leistungselektronik. Die Studierenden konnten einen tiefen Einblick in die Entwicklung von zuverlässiger Leistungselektronik für industrielle und automobiler Anwendungen gewinnen.

Der Abend bot Möglichkeiten, die schöne Altstadt der Hansestadt Lüneburg zu erkunden. In der Gastwirtschaft Lanzelot ließen wir den Abend bei einem Feierabendbier ausklingen. Die Jugendherberge Lüneburg bot uns für die Nacht eine entsprechende Unterkunft.

Am nächsten Tag besuchten wir die Firma Sieb und Meyer, ebenfalls ansässig in Lüneburg. S&M zeigte uns die Entwicklung ihrer CNC-Steuertechnik, Frequenzumrichter und Servoverstärker für das Anwendungsgebiet der Leiterplattenbearbeitung. Der 300 kVA 3-Level-Umrichter für Drehfeldfrequenzen von bis 2 kHz war beeindruckend. Im Anschluss haben wir uns die Instandhaltung von DB Cargo im Werk Maschen angeguckt. Die Dimensionen und der schwere Maschinenbau der Bahntechnik imponierte den Studierenden. Den Abend und die Nacht verbrachten wir in der schönen Hansestadt Lübeck. Unsere Jugendherberge war ideal gelegen. Die Altstadt konnte fußläufig erkundet werden. Am letzten Tag der Exkursion besichtigten wir Lufthansa Technik in Hamburg. Die Instandhaltung sowie Spezialumbauten für Kunden aus der ganzen Welt standen im Fokus der Besichtigung. Besonders die Umbauten der Flugzeuge für Scheichs weckten das Interesse der Studierenden. Auch das neue Flugzeug der Bundesregierung konnten von außen begutachtet werden. Nach der Besichtigung traten wir unseren Heimweg nach Braunschweig an.



Exkursion 2019: Gruppenbild vor der Firma Sieb und Meyer in Lüneburg

Digitale Exkursion 2021 - IMAB Career Day 2021

Im Jahr 2020 musste leider die geplante Exkursion ausfallen. Die Corona-Pandemie verhinderte die Durchführung der geplanten Fahrt ins rheinische Land. Durch Digitalisierung war es im darauffolgenden Jahr möglich, die Exkursion 2021 digital zu veranstalten. Hierzu wurde am IMAB eine ausgefeilte Studioteknik angeschafft, um die Vorlesungen und Labore zwar digital - aber mit hohem didaktischen Mehrwert halten zu können.

Der sogenannte „IMAB Career Day 2021“ richtete sich an interessierte Studierenden, welche sich für die Themenfelder des IMABs begeistern können. Zu den Referenten zählten derzeitige Studierende, derzeitige wissenschaftliche Mitarbeiter, abgeschlossene Masteranden und ehemalige Mitarbeiter*innen.

Die Themenauswahl deckte die Themenfelder des Instituts ab. Die Vortragsrunde begann mit Hendrik Schefer, der den Studierenden das Tätigkeitsfeld eines wissenschaftlichen Mitarbeiters näher brachte. Er verdeutlichte am „Kryogenen Doppelpulsprüfstand“ im Zuverlässigkeitslabor die Promotionsmöglichkeiten am IMAB. Anschließend berichtete der Student Qu über seine Praktikumszeit bei Volkswagen Shanghai. Der ehemalige Masterand und Firmengründer Alexander Lührmann präsentierte tiefe Einblicke in sein Unternehmen ESDI EV Technologies. Sein Unternehmen widmet sich der Elektrifizierung von Fahrzeugen. Julien Gerber, ein weiterer ehemaliger Masterand, zeigte die Entwicklung und die Problemstellung von Schaltnetzteilen in der Signaltechnik im Bahnwesen auf. Die ehemaligen wissenschaftlichen Mitarbeiter*innen Thorben Schobre, Dr.-Ing. Anna-Lena Menn und Christian Heister berichteten über ihre Zeit am Institut und Erfahrungen im Berufseinstieg als Ingenieur*in. Des Weiteren zeigten die Drei auf, wie sich ihr damaliger Institutsalltag vom jetzigen Industriealltag unterscheidet und inwiefern die Zeit am Institut die fachlichen Kenntnisse geschult hat. Die gesamte Veranstaltung ließ viel Raum für einen Dialog zwischen den Vortragenden und den Studierenden und war ein großer Erfolg. In 2022 hoffen wir auf eine Durchführung in Präsenz.

5 Ereignisse 2019-2021

5.1 Berichte von besonderen Ereignissen

Präsentationen des **IMAB** *Racer* in 2019

Auch in 2019 hatte der IMAB-Racer zwei wichtige Auswärtsauftritte: Im Februar auf dem Hybrid-Symposium in der Braunschweiger Stadthalle und Anfang April auf der Hannover Messe.



Präsentation des IMAB Racer auf der Tagung HEV

Bei der Tagung „Hybrid- und Elektrofahrzeuge“ HEV verschaffte T.-H. Dietrich dem anwesenden Fachpublikum mit seinem Vortrag „IMAB-Racer – Research Platform for Efficient Drive Train Components with high Power Density“ einen umfassenden Überblick über die Anwendungen, Komponenten und technischen Details des IMAB-Racers. Während der Pausen konnte das Fahrzeug im Foyer besichtigt werden.



Präsentation des IMAB Racers auf der Hannover Messe

Auf der Hannover Messe 2019 war der IMAB-Racer auf dem Gemeinschaftsstand des Landes Niedersachsen prominent positioniert und zog die Blicke der Besucher auf sich. Der Stand war durchgängig von mindestens zwei Institutsmitarbeitern besetzt, die vielfältige fachliche und grundlegende Fragen zum Racer im Besonderen und der Elektromobilität im Allgemeinen zu beantworten hatten.

Hocheffiziente Leistungselektronik für die Energieversorgung



Das IMAB ist aktives Mitglied im EFZN und beteiligt sich an diversen EFZN-Veranstaltungen. Auch beim EFZN-Forschungstag am 19.02.2019 im Haus der Wissenschaft an der TU Braunschweig waren Frau Prof. Mallwitz und die Mitarbeiter Tobias Fricke und Cengiz Uzlu aus dem Team des Netprosum 2030-Forschungsvorhabens mit Vortrag und Poster vertreten.

EPE-ECCE (Conference on Power Electronics and Applications - Energy Conversion Congress) Europe, 2019-2020-2021

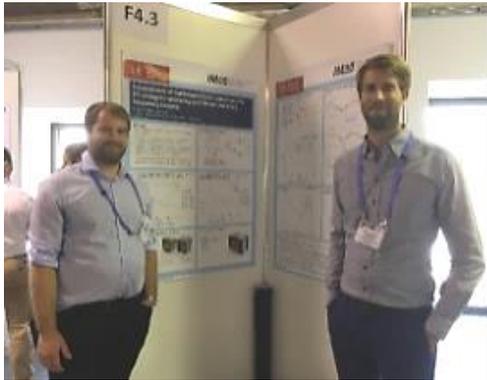


Diese Konferenz zählt zu den wichtigsten Konferenzen in der Leistungselektronik-Community und findet jährlich in einer europäischen Metropole statt. Die Konferenz wird organisiert durch die EPE Association und IEEE PELS. Das IMAB ist dort jährlich vertreten. Während 2019 noch in Präsenz stattfand, gab es in 2020 und 2021 online-Formate.

EPE-ECCE Europe 2019 in Genua

Vom 2.9.bis 6.9.2019 fand die EPE – eine der wichtigsten Leistungselektronik-Konferenzen - die Genua statt. Die Lecture Session „Photovoltaics“ wurde von Frau Prof. Mallwitz geleitet. Die vom IMAB präsentierten Poster luden zum Fachsimpeln ein. Diese Möglichkeit wurde

reichlich in Anspruch genommen, so dass Frau Prof. Mallwitz, Thorben Schobre und Konstantin Siebke viele neue Kontakte gewinnen konnten.



EPE-ECCE Europe 2020

In 2020 war die Konferenz in Lyon geplant und musste online stattfinden. Frau Prof. Mallwitz übernahm die Leitung einer Lecture und einer Poster Session. Das IMAB war mit drei Beiträgen vertreten, darunter ein von Thorben Schobre als Lecture Talk gezeigten Präsentation.

EPE-ECCE Europe 2021

Auch in 2021 fand die Konferenz online statt. Das IMAB war dort als Session Chair (Frau Prof. Mallwitz) und Vortragender (Niklas Langmaack) vertreten.

Besuch der University of Rhode Island



Prof. Mallwitz mit der Präsidentin an der University of Rhode Island - Partneruniversität der TU Braunschweig

Die damalige Präsidentin Frau Prof. Kaysser-Pyzalla stattete gemeinsam mit einer Delegation der TU Braunschweig der University of Rhode Island vom 8.10. - 9.10.2019 einen Besuch ab. Ziel war es die seit vielen Jahren bestehenden guten Kontakte zu pflegen und zu intensivieren. So wurde u.a. vereinbart, den regelmäßiger Austausch von Wissenschaftlern und Studierenden weiter auszubauen. Frau Prof. Mallwitz vertrat dabei die Fakultät 5. Die amerikanischen Kollegen bereiteten den Deutschen einen herzlichen Empfang und es konnten viele Themen diskutiert werden. Der wissenschaftliche und persönliche Austausch zum IMAB ist nun sehr lebendig.

Prof. Mallwitz trägt zur Begeisterung junger Leute für die Elektrotechnik bei.



Frau Prof. Mallwitz übernahm im Rahmen der DPG-Lehrerfortbildung „Festkörperphysik“ vom 18. bis 22.10.2019 im Physikzentrum Bad Honnef einen Beitrag. Aufbauend auf den Kenntnissen der Schulphysik zeigte sie praktische Anwendungsbeispiele. MOSFETs als Halbleiter, deren Einsatz in der Leistungselektronik und ein Exkurs in den Aufbau und Funktionsweise von Photovoltaik-Wechselrichtern standen dabei im

Vordergrund. Der Beitrag wurde von den anwesenden Physiklehrer*innen sehr gut aufgenommen und führten zu anregenden Gespräche auch in den Pausen und der Abendveranstaltung.

Ingenieurin – ein spannender und vielseitiger Beruf
 Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz
 B. Sc. Edona Capric, B. Sc. Johanna Mallmann
 Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen - IMAB
 Braunschweig, 13.4.2021

Speziell für Abiturientinnen gestaltete Prof. Mallwitz gemeinsam mit den IMAB-Hiwis Edona Capric und Johanna Mallmann einen Infoabend. Die doch sehr unterschiedlichen Aufgabengebiete und inhaltliche Arbeitsfelder von Ingenieurinnen und standen dabei im Vordergrund. Frau Capric konnte dabei viele nützliche Hinweise für das Studium geben.

TU Night mit IMAB-World am 29.06.2019

Nach der TU Night 2018 mit dem großen IMAB-Racer-Stand kam 2019 die IMAB-World auf einem Stand in der Schleinitzstraße für das Institut zum Einsatz. Große und vor allem kleine Besucher erfreuten sich an der gerade noch rechtzeitig fertiggestellten Anlage und den dargestellten bewegten und unbewegten „Attraktionen“ aus den Themenfeldern erneuerbare Energien, Elektromobilität, induktives Laden, elektrisches Fliegen und natürlich Bahntechnik.



IMAB-World im Foyer des E-Tower

Die IMAB-Expertise ist gefragt: CIGRE/CIRE Informationsveranstaltung 2021 (www.vde.com/cigre-cired-2021)



Die diesjährige CIGRE/CIRE D Informationsveranstaltung am 12.10.2021 in Hamburg bzw. virtuell fand unter dem Motto „ Die Netze werden grüner!“ statt. Hier bot sich Experten aus der Energieversorgung bzw. Netzbetrieb eine Plattform zur Information und zum Austausch. Frau Prof. Mallwitz trug in einem eingeladenen Beitrag über künftige Batterieladetechnik und Infrastruktur zu. Im Fokus stand dabei natürlich die Auswirkung

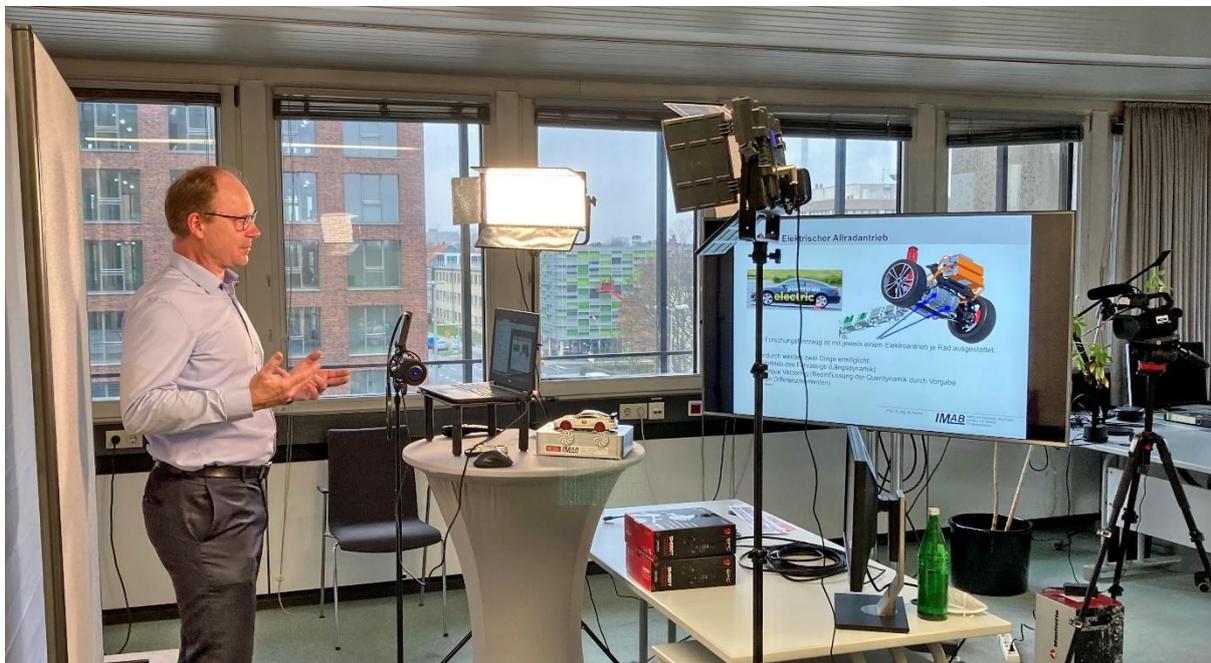
dieser Technologien auf die Netze.

Auswirkungen der Corona-Pandemie auf Arbeiten, Lehren und Lernen am IMAB

Die Auswirkungen der COVID19-Pandemie haben natürlich auch uns im März 2020 erwischt und unseren Arbeitsalltag auf einen Schlag grundlegend verändert. Tägliche Videokonferenzen, das virtuelle Mumble-Institut sowie haufenweise Headset- und Webcam-Bestellungen haben dabei geholfen, den Kontakt zwischen den Kollegen zuhause so gut es ging aufrecht zu halten.

Im Anschluss an die kurzfristigen Sofortmaßnahmen und die sich überschlagenden Ereignisse zum Beginn der Pandemie hat sich das Institut schnell und in allen Bereichen an die veränderte Situation angepasst. So wurden in kürzester Zeit digitale Alternativen für alle Lehrformate etabliert, Prüfungen auf unterschiedliche digitale Formate umgestellt sowie Belegungspläne

für Laborbereiche eingerichtet. Um den Studierenden auch ohne Präsenz im Hörsaal eine bestmögliche Qualität der Veranstaltungen bieten zu können, wurde mit dem IMAB-Digitalstudio eine perfekte Umgebung für Aufnahme und Streaming von Online-Vorlesungen eingerichtet.



Vorlesung im IMAB-Digitalstudio

Dank der großzügigen Platzverhältnisse in der Maschinenhalle und einer konsequenten Organisation für Büro- und Laborräume lief der Forschungsbetrieb im IMAB bereits nach kurzer Zeit wieder weitgehend unbeeindruckt und unter bestmöglichen und zugleich für alle sicheren Bedingungen weiter.

TU Präsidentin Prof. Ittel besucht die Fakultät und informiert sich im IMAB Technikum über aktuelle Forschungsthemen

Die in 2021 neu gewählte Präsidentin der TU Braunschweig Frau Prof. Ittel besichtigte am 27.07.2021 die Fakultät und damit auch die Aktivitäten in der Maschinenhalle des IMAB. Unser Auszubildender Jan-Michel Schulze präsentierte die Forschungsarbeiten und praktische Aspekte zum IMAB-Racer und Philipp Hauenschild erläuterte Forschungsergebnisse zur Leistungselektronik im Umfeld des Exzellenzclusters SE²A.



5.2 Kalender

In den vergangenen Jahren fanden auch zahlreiche Ereignisse und Events statt, die abseits des Institutsalltags für Aufsehen sorgten.



19.03.2019

Besuch von SchülerInnen der Neuen Schule Wolfsburg am IMAB



15.04.2019

Dienstjubiläum (25) Peter Hoffmann



25.04.2019

Feuerlöschübung



18.09.2019
Institutsausflug Tankumsee 2019



12.12.2019
Weihnachtsfeier Kegel-Bahnhof 2019



12.12.2019
Die Leiden des jungen Wahlhelfers H. Rawe



27.02.2020
50.Geburtstag von Frau Prof. Mallwitz



Dezember 2019
Neues Glas in der Maschinenhalle



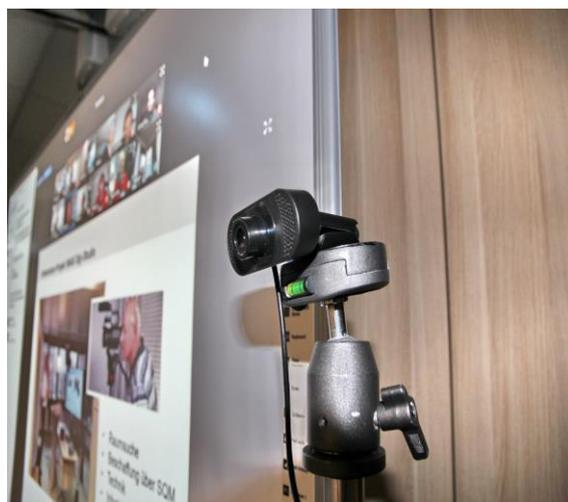
16.03.2020
Hochzeit Dorothee Wille



10.06.2020
Langes Labor Umbauten



30.06.2020
Jubiläum (40) Herbert Rawe



15.12.2020
Weihnachtsfeier digital



15.12.2020

Azubis und Weihnachten 2020



19.04.2021

Abschiedsgeschenk für Bernd Machus



7.05.2021

Abschiedsgeschenk für Konstantin Siebke



6.07.2021

60. Geburtstag von Carlo Mensing



15.07.2021

Abschied Quirin Maurus



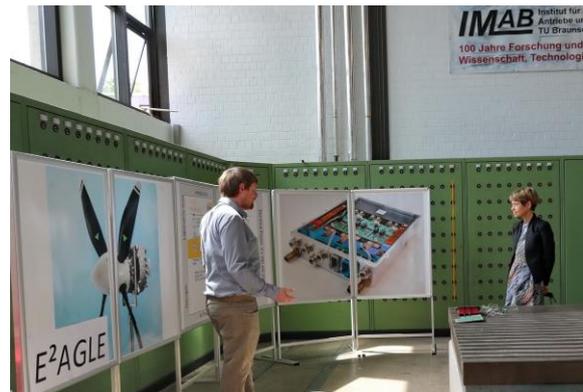
20.07.2021
30.Geburtstag von Hendrik Schefer



3.08.2021, 25.08.2021
Vater Cengiz Uzlu und Vater Florian Lippold



27.07.2021
Promotionsvortrag von Konstantin Siebke



21.07.2021
TU Präsidentin Prof. Ittel in Fakultät und IMAB



12.10.2021
Promotionsvortrag von Niklas Langmaack



15.10.2021
Promotionsvortrag von Christian Heister



16.11.2021

30. Geburtstag und Vater Philipp Hauenschild



Weihnachten 2021

Die strammen Jungs aus der Werkstatt

5.3 Nachruf Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Weh

Herr Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Herbert Weh ist am 07. April 2021 im Alter von 93 Jahren verstorben. Professor Weh leitete das Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen von 1961 bis zu seiner Emeritierung 1995. In diesem Zeitraum widmete er sich intensiv der Weiterentwicklung elektromagnetischer Energiewandler. Neben den Arbeiten zu rotierenden Antrieben etablierte er den Forschungsbereich der elektrischen Linearantriebe mit Magnetschwebetechnik. Diese Arbeiten führten unter anderem auch zur Entwicklung des Transrapid. Seine enorme wissenschaftliche Leistung wurde durch zahlreiche Ehrungen und der Verleihung des Bundesverdienstkreuzes gewürdigt.



Prof. Weh

6 Veröffentlichungen 2019-2021

1. L. V. Hanisch, M. Henke: Lifetime Modelling of Electrical Machines using the Methodology of Design of Experiments, SNE-Journal 31(2), 2021, 95-100, DOI: 10.11128/sne.31.tn.10568
2. N. Langmaack, R. Mallwitz, M. Henke: "Thermally optimized High Speed Drive Inverter Design using Surface Mount Silicon Carbide Devices", SIA Powertrain & Power Electronics 2021, Paris
3. L. V. Hanisch, T.-H. Dietrich, M. Henke: Analysis of Partial Discharges and Failure Mechanism in Electrical Machines with Hairpin Winding, 13th IEEE Int. Symp. on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED'2021
4. T. Fricke, C. Uzlu, R. Mallwitz: Netprosum2030: Ein effizientes Energieverteilungssystem zur Netzentlastung mit DC-Schnellademöglichkeit. 18. Symposium: Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Braunschweig, Februar 2021.
5. K. Siebke, R. Mallwitz: Entwurf von Fahrzeugladegeräten unter Einsatz von Galliumnitrid Leistungshalbleitern. 18. Symposium: Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Braunschweig, Februar 2021.
6. J. Schnack, S. Brückner, H. Sünksen, U. Schümann, R. Mallwitz: Analysis and Optimization of Electrolytic Capacitor Technology for High Frequency Integrated Inverter. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, June 2021.(doi: 10.1109/TCPMT.2021.3084371)
7. R. Mallwitz, F. Turki: Ladetechnik für Elektrofahrzeuge. ETG Kongress 2021, 18.-19.Mai 2021.
8. N. Langmaack, R. Mallwitz, M. Henke: Thermally optimized High Speed Drive Inverter Design using Surface Mount Silicon Carbide Devices. SIA_PowertrainPower Electronics 2021. International congress & Exhibition, Juni 2021.
9. R. Mallwitz: Energietechnologien für das Elektrische Fliegen im Exzellenzcluster SE2A. 11.Braunschweiger Energieseminare, 23.-24.6.2021
10. D. Fischer, R. Rohn, R. Mallwitz: BENEFICIAL CONTROL OF REDUNDANT ELECTRIC DRIVES IN AVIATION. DLRK, September 2021.
11. N. Langmaack, S. Balasubramanian, M. Henke, R. Mallwitz: Comparative Analysis of High Speed Drive Inverter Designs using different Wide-Band-Gap Power Devices. EPE 2021.
12. R. Mallwitz: Effiziente und störungsarme Leistungselektronik für künftige Batterieladeinfrastruktur. 19.CIGRE/CIRED Infoveranstaltung, Hamburg, 12.10.2021.
13. S. Scherler, X. Liu-Henke, M. Henke: Predictive Energy Management for an Electric Vehicle with Fuel Cell Range Extender in Connected Traffic Systems, IEEE Conf. 19th Mechatronika 2020, Prag
14. M. Henke, J. Hoffmann, L. Waschke: Modulare Entwicklungsplattform für elektrische Luftfahrtantriebe, 25. Symp. Simulationstechnik ASIM 2020

15. L. V. Hanisch, M. Henke: Lifetime modelling of electrical machines using the methodology of design of experiments, 25. Symp. Simulationstechnik ASIM 2020
16. L. V. Hanisch, M. Sun, M. Henke: Novel Modeling Approach for Voltage Distribution within Automotive Electrical Machines, Int. Conf. of Electrical Machines, ICEM 2020
17. S. Balasubramanian, M. Henke: Performance Evaluation of a High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machine with Hairpin Winding Technology, Int. Conf. of Electrical Machines, ICEM 2020
18. N. Langmaack, T. Schobre, Q. Maurus, M. Henke: Battery System Design applied on IMAB-Racer Research EV, Int. Conf. on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2020
19. N. Yogal, C. Lehrmann, M. Henke: Experimental measurement of eddy current loss in permanent magnets of electrical machines with a PWM signal generated by a frequency converter, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) 2020
20. J. Schnack, V. Golev, J. P. Gördes, U. Schümann, R. Mallwitz: Low-Inductance DC-link Design dedicated to SiC-based Highly Integrated Inverters. 11th International Conference on Integrated Power Electronics Systems – CIPS (ETG), Nuremberg, 2020.
21. H. Schefer, T. Kopp, L. Fauth, R. Mallwitz, J. Friebe, M. Kurrat: Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft. IEEE Open Access Journal, 2020.
22. H. Neemann, T. Schobre, R. Mallwitz: Impact of Wide Band Gap Semiconductors on DC-link Considerations in Servo-drive Applications. Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2020, Nuremberg.
23. T. Schobre, N. Langmaack, R. Mallwitz: Analytical Modeling of Ripple Currents in a Drive Inverter with a LC Sine Wave Filter. Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2020, Nuremberg.
24. D. Fischer, R. Mallwitz: Analysis of short circuit impact on Solid State Transformers. Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2020, Nuremberg.
25. T. Fricke, C. Uzlu, F. Lippold, G. Tareilus, R. Mallwitz, J. Ries, J. Wussow, J. Brockschmidt, M. Kurrat, B. Engel, P. Jungklass, F. Grieger, A. von Daake, N. Falke, F. Lienesch: NetProsum2030: A Contribution to the Solution for Distributed Energy Supply in 2030. Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2020, Nuremberg.
26. N. Langmaack, D. Fischer, R. Mallwitz: High Performance Drive Inverter For An Electric Turbo Compressor In Fuel Cell Applications . EPE 2020 – ECCE Europe, Lyon.
27. T. Schobre, R. Mallwitz: Automated Design Method for Sine Wave Filters in Motor Drive Applications with SiC-Inverters. EPE 2020 – ECCE Europe, Lyon.
28. T. Schobre, R. Gonzales Ariztegui, R. Mallwitz: Genetic Algorithm Based Multi Objective Optimization for Inductor Design. EPE 2020 – ECCE Europe, Lyon.
29. K. Siebke, M. Giacomazzo, R. Mallwitz: Dual Active Bridge (DAB) Converter for On-Borad Vehicle Chargers using GaN and into Transformer Integrated Series Resonance. EPE 2020 – ECCE Europe, Lyon.

30. L. Fauth, H. Schefer, T. Kopp, R. Mallwitz, J. Friebe, M. Kurrat: Power Supply Systems for All Electric Aircrafts. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress – DLRK 2020, Aachen, 1.-3-9-2020.
31. K. Siebke, R. Mallwitz: Comparison of a Dual Active Bridge and CLLC Converter for On-Board Vehicle Chargers using GaN and Time Domain Modeling Method. ECCE America, 2020.
32. R. Mallwitz: Challenges in Electrifying Future Aircrafts. SE2A-Workshop, Braunschweig, 2020.
33. M. Henke, G. Narjes, J. Hoffmann, C. Wohlers, S. Urbanek, C. Heister, J. Steinbrink, W.-R. Canders, B. Ponick: Challenges and Opportunities of Very Light High-Performance Electric Drives for Aviation Energies 2018, 11(2), 344; doi: 10.3390/en11020344; MDPI AG, Basel, Switzerland
34. H. Schillingmann, Q. Maurus, M. Henke: Linear Generator Design for a Free-Piston Engine with high Force Density, 12th Int. Symp. on Linear Drives for Industry Applications LDIA 2019, Neuchatel, Switzerland
35. S. Balasubramanian, C. Heister, M. Henke: Design Guidelines for Synchronous Machine Topologies with High Torque and Wide Field Weakening Demands, Int. Machines and Drives Conference IEMDC 2019, San Diego, USA
36. C. Heister, M. Henke: Improvements on Hybrid Analytical Modeling by using Fourier Subdomains in Slot Regions, Int. Machines and Drives Conference IEMDC 2019, San Diego, USA
37. N. Langmaack, G. Tareilus, M. Henke: SiC Drive Inverter using Intelligent Gate Drivers and Embedded Current Sensing, SIA Power Train & Electronics 2019, Paris
38. W.-R. Canders, J. Hoffmann, M. Henke: Cooling Technologies for High Power Density Electrical Machines for Aviation Applications, Energies 2019, 12, 4579, MDPI AG, Basel, Switzerland, <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/23/4579/pdf>
39. N. Yogal, C. Lehrmann, M. Henke: Magnetic loss measurement of surface-mounted permanent magnet synchronous machines used in explosive environments, IET Journal of Engineering, 2019
40. R. Mallwitz, T. Fricke, F. Lippold, C. Uzlu: Modulare hocheffiziente Leistungselektronik für Erzeuger-Speicher-Systeme mit Schnelllademöglichkeit. EFZN-Forschungstag 2019, Braunschweig.
41. T. Fricke, G. Tareilus, R. Mallwitz: Simulation der Zwischenkreisregelung eines DC-gekoppelten Erzeuger-Speicher-Systems mit Schnelllademöglichkeit. ASIM (AG Simulation der DLR) Workshop 2019, Braunschweig.
42. K. Siebke, R. Mallwitz: Operation Mode Analysis of the CLLC Resonant Converter. 13th Intern. Conf. on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering - CPE-Powereng (IEEE) 2019, Sonderborg.
43. J. H. Fey, F. Hinrichsen, R. Mallwitz: Development of a Modular Multilevel Converter Demonstrator with EtherCAT Communication. 13th Intern. Conf. on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering - CPE-Powereng (IEEE) 2019, Sonderborg.

-
44. J. Schnack, U. Schümann, R. Mallwitz: An Investigation in DC-link Film Capacitors for Reduced Parasitic Inductances. Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2019, Nuremberg.
 45. T. Schobre, K. Siebke, R. Mallwitz: Design of a GaN based CLLC Converter with Synchronous Rectification for On-Board Vehicle Charger. Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2019, Nuremberg.
 46. T. Schobre, K. Siebke, R. Mallwitz: Operation Analysis and Implementation of a GaN Based Bidirectional CLLC Converter with Synchronous Rectification. EPE 2019 – ECCE Europe, Genova.
 47. K. Siebke, T. Schobre, R. Mallwitz: Comparison of GaN based CLLC converters for EV chargers operating at different switching frequency ranges. EPE 2019 – ECCE Europe, Genova.
 48. T.-H. Dietrich, C. Heister, N. Langmaack, Q. Maurus, C. Uzlu, M. Henke: IMAB-Racer – Research Platform for Efficient Drive Train Components with high Power Density. 16th Symposium on Hybrid and Electric Vehicles, 20./21.02.2019, Braunschweig
 49. N. Langmaack, G. Tareilus, M. Henke: High Power Density Modular Six Phase Drive Inverter. Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement IX, HdT Fachbuch Band 148, 2019 Expert Verlag
 50. N. Langmaack, G. Tareilus, G. Bremer, M. Henke: Transformerless Onboard Charger for Electric Vehicles with 800 V Power System. IEEE 13th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2019), 09.-12.07.2019, Toulouse, France
 51. N. Langmaack, T. Schobre, M. Henke: Fast and Universal Semiconductor Loss Calculation Method. IEEE 13th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2019), 09.-12.07.2019, Toulouse, France
 52. N. Langmaack, G. Tareilus, M. Henke: Modular Power Electronics for Electric Vehicles and Aviation Applications. IEEE 13th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2019), 09.-12.07.2019, Toulouse, France
 53. T. Schobre, N. Langmaack, R. Mallwitz: Analytical Modeling of Ripple Currents in a Drive Inverter with a LC Sine Wave Filter. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe digital days 2020)
 54. N. Langmaack, G. Tareilus, R. Mallwitz: High Performance Drive Inverter for an Electric Turbo Compressor in Fuel Cell Applications. IEEE 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)
 55. N. Langmaack, G. Tareilus, M. Henke: Power Electronic Components based on Silicon Carbide Devices for Future Vehicle Power Systems. SIA Power Train & Energy (PWTE 2020)
 56. N. Langmaack, S. Balasubramanian, R. Mallwitz, M. Henke: Comparative Analysis of High Speed Drive Inverter Designs using different Wide-Band-Gap Power Devices. IEEE 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe)

-
57. H. Schillingmann, S. Gehler, M. Henke: Life cycle assessment of electrical machine production considering resource requirements and sustainability. Electric Drives Production Conference (E|DPC) 2021
58. H. Schefer, L. Fauth, T. H. Kopp, R. Mallwitz, J. Friebe, M. Kurrat: Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft. in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 84188-84216, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991804.

Studentische Arbeiten am Institut

Am IMAB finden im Laufe des Jahres zahlreiche Seminarvorträge zu Themen statt, die direkt in Forschungsgebiete am IMAB eingebunden sind oder aber auch interessante Randthemen betreffen.

Seminarvorträge

Christopher Prange	Antriebe mit integrierter Elektronik: Stand der Technik und Entwicklungstrends
Henrik Walter	Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen: Einsatzbereiche und aktueller Stand der Technik von Oberleitungs-LKWs
Paul Weichhold	Übersicht über Gate Treiber mit Impulstransformatoren
Markus Klages	Elektrobusse im ÖPNV - Einsatzorte, Technik und Verfügbarkeit
Lars Groppe	Stand der Forschung: Hybridflugzeuge
Tadoum Tomeze Raoul	Schneller, kompakter, leistungsdichter - zukünftige Trends und Innovationen in der Leistungselektronik
Martin Wernicke	Wasserstoffantriebe im Rahmen der Elektromobilität
Cai Qisheng	System Comparison of the Conventional Aircraft and More Electrical Aircraft (MEA)
Ibrahim Azimzade	Zustandsüberwachung und Diagnosemöglichkeiten elektrischer Maschinen
Arnold Walker	Digitalisierung von Datenblattkennlinien

Patrick Vieth	Dynamisches induktives Laden elektrischer Fahrzeuge
Jonas Jäger	Car2X - technischer Stand und Markteinführung
Christian Klein	Batteriespeichersysteme im Megawattbereich
Nikolay Korshunov	Innovative Lösungsansätze für die Realisierung von Hochstrom-Leiterplatten
Nikolas Herr	Hyperloop
Alexander Rostock	Autonome Fahrzeuge in der Landwirtschaft
Yuhang Xie	Einsatz von Multi-functional Fuel Cells (MFC) in Flugzeugen
Matthias Klintz	Batterietechnologien in der E-Mobilität
Artur Günter	Das Elektromotorrad: Stand der Technik und Potenzial
Jean Baumann	Elektrische Durchschläge und Teilentladungen in gasförmigen und festen Isolationsmitteln
Chris Lütge	Elektrische Antriebe in Flugzeugen
Andrii Kostytsia	Entwicklungsstand und Potenziale unbemannter, solarunterstützter Elektrosegelflugzeuge
Peer König	Historische Entwicklung der elektronischen Navigationstechnik in der Luftfahrt
Julius Mumme	Regelung von sensorlosen Synchronmaschinen
Ricardo Lima da Silva	Soft-Switching in Wechselrichtern
Rodolpho Lima da Silva	Ausfallmechanismen von passiven Bauelementen
Eray Cinkaya	DC - Versorgungsnetze
Christopher Prange	Schädigungsmechanismen der elektrischen Isolation
Chris Hevermann	Wechselrichtertopologien und Anwendungen für Hochspannungssysteme
Leon Schneider	Aktuelle Entwicklung der Energiedichte von Akkus
Andrii Shtefaniuk	Missionprofile für Powercycling-Tests: Methodik, Herangehensweise und Beispiele
Malte Kaminski	Prüfverfahren von Isolationssystemen in elektrischen Maschinen
Yaser Zyade	Antriebssysteme in elektrischen Sportflugzeugen
Dilane Jordan Dongmo Tadoum	Überarbeitung und Verbesserung des Wikipediaartikels zu Siliziumkarbid als Halbleitermaterial
Daiyi Hu	Hochsetzsteller mit 1700V-SiC-Leistungshalbleitern für Flugzeuganwendungen
Rene Schilling Johnson	Einsatz induktiver Ladetechniken im Verkehr - Projektübersicht und Ausblick für die Zukunft

Dan Han	Technologiescreening: Elektrische Maschinen in Fahrzeugen
Julian Wehr	NASA's X-57 Maxwell
Rico Wosnitza	Überblick über modulare Automobilplattformen
Timon Fahlbusch	Potenziale von GaN-Halbleitern zur Ansteuerung von BLDC-Motoren im Kleinleistungsbereich
Thomas Zebermann	Python - Eine Alternative zu MATLAB?
Benedict Coenen	Design of Experiments (DoE) mit Cornerstone
David Skorupa	Stand der Forschung in der Batterietechnologie
Tobias Hinz	Anwendungen des maschinellen Lernens in der Leistungselektronik
Henriette Reineke	Technologiescreening zur Steigerung der Leistungsdichte elektrischer Maschinen in der Luftfahrt

Bachelorarbeiten

Yi Zhang	Entwicklung eines mehrphasigen Synchon-Tiefsetzstellers zur Anwendung als Batterieladegerät
Edona Capric	High-Voltage electrical power supplies for all electrical aircraft
Fares Jmili	Entwicklung einer Hardware-in-the-Loop Umgebung für μ C-basierte Regler
Leon Schneider	Entwurf und Aufbau eines einphasigen Wechselrichterprototyps für einen elektrischen Flugzeugantriebsstrang
Stefan Gehler	Bewertung der Produktion elektrischer Maschinen unter Berücksichtigung von Ressourcenbedarf und Nachhaltigkeit
Malte Kaminski	Erstellung von Simulationsmodellen zur Bestimmung der Lebensdauer von Leistungshalbleitern
J. Tietge	Parametrierbare thermische Modellierung magnetischer Bauelemente für die Leistungselektronik
Mauriz Kahmann	Aufbau und Regelung einer bidirektionalen Leistungsfaktorkorrektur für Fahrzeugladegeräte
Edgar Zeitler	Wachstumsgesetze in der Leistungselektronik

Timon Fahlbusch	Entwurf eines leistungsfähigen Class-D-Verstärkers mit GaN-Leistungshalbleitern
Nikolas Herr	Untersuchungen zum Einsatz von Axialflussmaschinen im Feldschwächbereich
Thomas Müller	Entwurf einer Drossel für eine bidirektionale Leistungsfaktorkorrektur für Fahrzeugladegeräte
Amine Ben Othmane	Analyse und Modulation der Verluste einer Permanenterregten Synchronmaschine
Johanna Mallmann	Analyse und Design von Hairpinwicklungen
Mohamed Aymen Riahi	Weiterentwicklung eines Steuergerätes für die Fahrzeugbeleuchtung und weitere kraftfahrzeugspezifische Funktionen für das Versuchsfahrzeug IMAB-RACER
Yannic Cullmann	Weiterentwicklung und Aufbau eines HMI-Systems für das Forschungsfahrzeug IMAB-Racer

Masterarbeiten

Nikolay Korshunov	Entwicklung eines aktiven Frontends zur 4-Phasigen Leistungsfaktorkorrektur
Jano Sommer	Entwurf und Aufbau einer Dual Active Bridge Topologie mit einem weiten Eingangsspannungsbereich für die Versorgung einer multifunktionalen Leistungselektronik
Tobias Hinz	Entwicklung eines Propellerantriebsmodells in Matlab/Simulink
Chris Hevermann	Entwurf und Aufbau eines modularen Laborwechselrichters für Fluganwendungen
Zhenghao Zhuang	Simulation verschiedener Wechselrichtertopologien und Ansteuerstrategien mit MATLAB/Simulink
Yuyang Zhao	Entwurf und Aufbau eines Versuchswechselrichters mit variabler Phasenzahl
P. Hauenschild	Konzeptionierung und Inbetriebnahme eines Prüfstandes zur Zuverlässigkeitsuntersuchung von Elektrolytkondensatoren in leistungselektronischen Systemen
J. Dong	Topologievergleich von unterschiedlichen HV-DC/DC-Convertern für ein elektrifiziertes Flugzeug

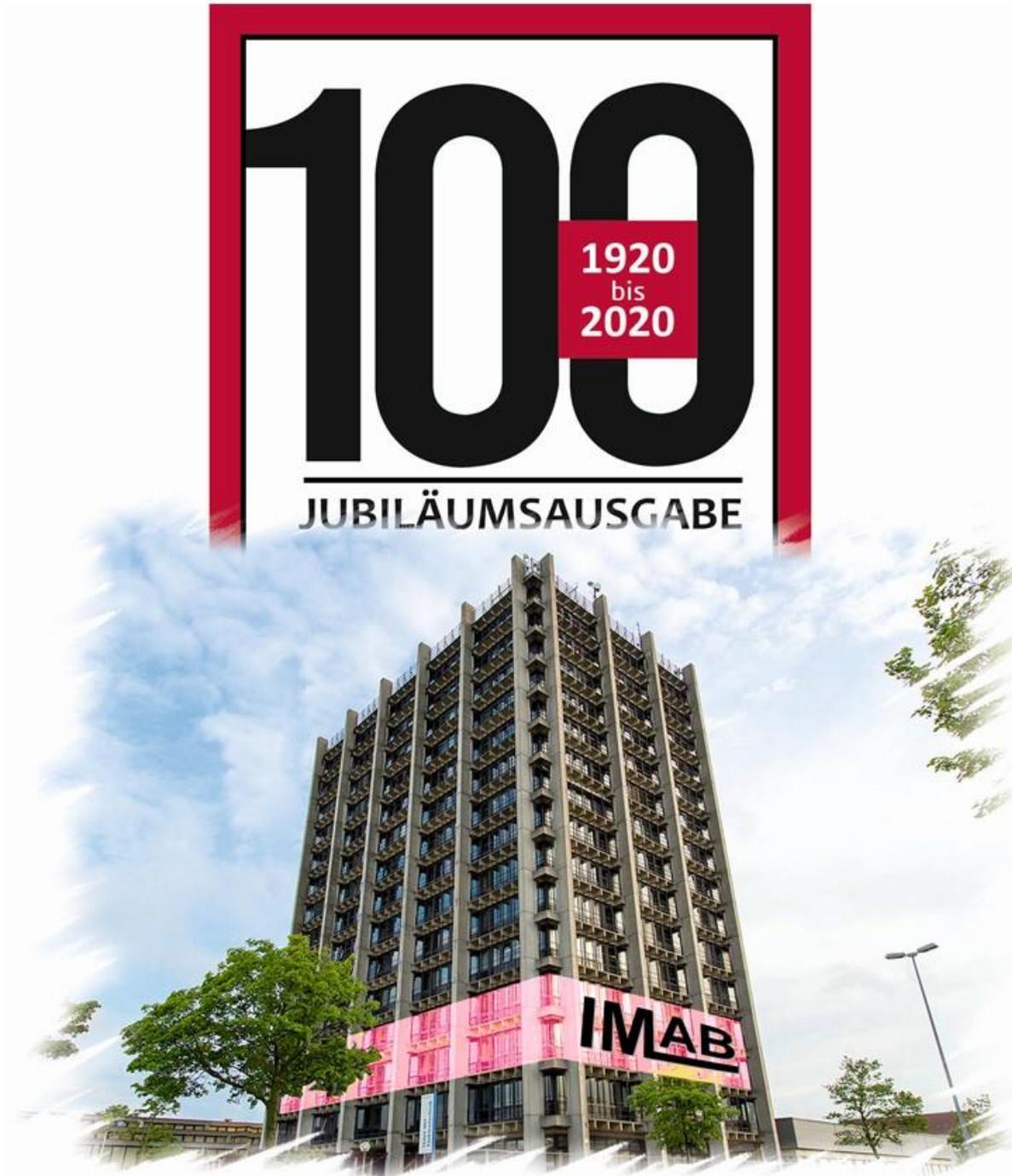
H. Xu	Entwicklung und Konstruktion eines Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Schaltverhaltens von Leistungshalbleitern in sehr niedrigen Temperaturbereichen
C. Yuying	Entwicklung eines Wechselrichtersystems für konstruktionsbedingte Zuverlässigkeitsuntersuchungen aktiver sowie passiver Bauelemente
Youqi Duan	Untersuchung von Kriechstrecken auf Platinen für leistungselektronische Anwendungen in der Luftfahrt
H. Roggenkamp	Simulative Analyse der Wärmeübertragung in Kühlkörpern für leistungselektronische Bauteile
R. Lima Da Silva	Konzeptionierung und Entwicklung eines Rippelstromgenerators für die Alterung von Kondensatoren
Z. Xu	Modelling and investigation of creepage distances on circuit boards for power electronic applications in aviation
Y. Guo	Konfiguration eines Controller Area Network IP Cores
Guolin Zhang	Development of an Electric Drive Concept for a Modular Multistage Pump Application with Counter-Rotating Impellers
Zheng Zhang	Electromagnetic Analysis of a Flux-Switching Machine with Counter-Rotating Rotors used in a Multistage Pump application
Tobias Kreußel	Auslegung von Asynchronmaschinen mit Hilfe der magnetoharmonischen Finite-Elemente-Rechnungen
Simon Wilker	Entwicklung eines parametrierbaren Generatormodells in Zustandsraumdarstellung mit adaptiver Eingangswernerfassung
Lasse Schuhmacher	Auslegung und Optimierung einer synchronen Reluktanzmaschine mit Ferritmagneten als alternativen Traktionsantrieb für Hybridfahrzeuge
Justyna Malicka	Entwicklung eines Regelkonzeptes für den effizienten und sicheren Betrieb eines Freikolbenlineargenerators
Hendrik Marks	Auslegung elektrischer Linearmaschinen mit passivem Läufer für thermisch hochbelastete Anwendungen
Hongyu Wang	Thermische Modellierung elektrischer Linearmaschinen im Rahmen von Freikolbenmotoren

Tianyao Sun	Auslegung und Regelung eines Antriebssystems für elektrische Longboards
Xianzhang Luo	Analyse der Kraftbildung elektrischer Linearmaschinen mit Berücksichtigung der Kraftwelligkeit
Yiwen Ma	Regelung und Ansteuerung eines aktiven Magnetlagers
Zheyi Chong	Berechnung und Verifikation der Verluste einer elektrischen Linearmaschine
Zhenning Zhou	Simulation und Auslegung eines aktiven Magnetlagers für lineare elektrische Maschine
Henrik Walter	Untersuchungen zu Wachstumsgesetzen von Linearmaschinen anhand einer tubularen PM-erregten Synchronmaschine
Martin Hahn	Abschätzung der Lebensdauer von Leistungshalbleitern in mobilen Stromrichtern - Vorgehensweise, Software-Implementierung und Vergleiche
Arne Dreyer	Entwicklung, Simulation und Entwurf eines Spulensystems zur induktiven Energieübertragung für Elektrofahrzeuge
Niklas Weber	Entwicklung einer elektronischen Schaltvorrichtung und Inbetriebnahme eines Systems zur Lichtbogenerkennung in 48-V-Bordnetzen in einem Fahrzeug
Christopher Prange	Untersuchungen zur Steigerung der Leistungsdichte von Schaltnetzteilen
Marco Giacomazzo	Design and implementation of an GaN based dual active bridge converter for electric vehicle charger
Maximilian Kamp	Entwurf und Aufbau eines e-Bikes mit einem seriellen Hybridantrieb (Studienarbeit)
Korbinian Pfnür	Entwurf, Auslegung und Aufbau einer leistungselektronischen Schaltung zur Messung von Eisenverlusten
Niklas Kmiecik	Untersuchungen zu kompakten Treiberschaltungen für Siliziumkarbid-MOSFETs (Studienarbeit)

Niklas Kmiecik	Entwurf und Untersuchung von Wechselrichterschaltungen für einen Hochdrehzahlantrieb
Jonas Jäger	Untersuchungen zu aktiven Zell-Balancing-Systemen für Elektrofahrzeuge
Mingyuan Sun	Modeling of the voltage distribution in the stator winding of permanent magnet synchronous motors
Paul Weichold	Entwicklung eines Prüfstandsantriebes mit bidirektionalem Energiefluss basierend auf intelligenten Leistungsmodulen
Jiachao Ni	Optimierung und Implementierung einer Regelung für ein e-Bike mit einem seriellen Hybridantrieb
Vjaceslav Suchorukov	Entwicklung eines neuartigen modularen Batteriemangement- und Zellbalancingsystems
Jiake Wang	Entwurf und Aufbau eines SiC-Hochsetzstellers für ein Automotive-Batteriesystem
Zihang Song	Measurement of eddy current losses in permanent magnets of permanent magnet synchronous machines during operation
Sebastiano Principale	Erprobung eines aktiven Zell-Balancing-Konzeptes für Batteriesysteme
Yang Sun	Entwurf und Aufbau einer Messvorrichtung zur Bestimmung der Eisenverluste weichmagnetischer Materialien bei hohen Frequenzen mit einer universellen digitalen Rückkopplung
Matthias Klintz	Entwurf einer bidirektionalen Leistungsfaktorkorrektur für Fahrzeugladegeräte unter Nutzung einer Rapid Prototyping Umgebung
Yingji Ma	Optimierung der Regelung einer sechsphasigen PMSM
Xuhui Sun	Development of neural networks for the lifetime modelling electrical machines for the use in electric mobility
Jiao Wang	Development and construction of bending devices for hairpin wires

Ji Wu	Entwurf und Aufbau der Leistungselektronik für ein induktives Energieübertragungssystem mit hoher Übertragungsfrequenz
Ibrahim Azimzade	Validierung und Erweiterung eines Simulationsmodells für eine umrichter-gesteuerte Asynchronmaschine
Hui Cheng	Modellierung und Untersuchung von Energieflüssen innerhalb des Bordnetzes für ein elektrifiziertes Flugzeug
Marvin Rau	Entwurf und Aufbau einer zentralen Steuerung für ein Elektrokleinkraftrad
Zekai Wang	Erprobung von Lebensdauermodellen diskreter Leistungshalbleitern in einer B6-Wechselrichtertopologie in definierten Arbeitspunkten
Chanuch Chaisakdanugull	Weiterentwicklung und Überarbeitung eines Prüfstandes für Hardware-in-the-Loop-Anwendungen
Dilane Jordan Dongmo Tadoum	Untersuchung, Weiterentwicklung und Inbetriebnahme eines Wechselrichters für induktive Energieübertragungssysteme

7 Das Jubiläumsjahr 2020



100 Jahre IMAB

Das Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der Technischen Universität Braunschweig feierte im Jahr 2020 sein 100-jähriges Bestehen.



Die Geschichte des IMAB

Die hundertjährige Geschichte des Instituts beginnt im Jahr 1920 mit der Berufung von Prof. Franz Unger auf den zweiten elektrotechnischen Lehrstuhl der Technischen Hochschule zu Braunschweig für die Lehrfächer Elektromaschinenbau, Starkstromanlagen und elektrische Bahnen.

In dem "Plan für die Einrichtung des Instituts für Elektromaschinenbau" heißt es:

"Das Institut soll zunächst den Zweck haben, im Anschluss an die Vorlesungen im Elektromaschinenbau die dort theoretisch erörterten Eigenschaften der elektrischen Maschinen im praktischen Betrieb vorzuführen und die Studierenden durch Vornahme eigener Messungen und Untersuchungen mit der Schaltung und dem Verhalten der Maschinen vertraut zu machen." ... "Daneben hat das Institut noch eine andere Aufgabe zu erfüllen. Die Hochschule soll ihre Studierenden zu selbstständiger technischer Arbeit erziehen, das kann sie aber nur, wenn ihre Institute selbst Stätten wissenschaftlicher Forschung und technischen Fortschrittes sind. Es muss also die Möglichkeit bestehen, laufend neuartige Maschinen und Apparate zu untersuchen."

Im Jahr 1951 emeritierte Prof. Unger und Prof. Kübler übernahm die Leitung des Instituts bis zum Jahr 1961. Im Jahr 1961 übernahm Prof. Weh die Institutsleitung für die nächsten 34 Jahre.

F. Unger. — Am 19. Januar 1962 vollendete o. Prof. em. Dr. techn. Franz Unger, Technische Hochschule Braunschweig, sein 80. Lebensjahr. Professor Unger wurde in Pressburg geboren. Nach dem Studium an der TH Wien nahm er seine praktische Tätigkeit bei den Siemens-Schuckertwerken in Berlin auf. Von 1910 bis 1911 war er Oberingenieur an der Deutschen Technischen Hochschule in Prag. Er promovierte 1911 zum Dr. techn. in Wien. Anschließend ging er zu den österreichischen Siemens-Schuckertwerken in Wien. Seine akademische Laufbahn begann er bei Prof. Kloss in Berlin, dessen Aufgaben er in den Jahren 1918 bis 1920 vertretungsweise übernahm.

1920 wurde Prof. Unger zum ordentlichen Professor und Leiter des Institutes für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen an die TH Braunschweig berufen. An der Gründung einer selbständigen Abteilung für Elektrotechnik im Jahre 1926 hatte er wesentlichen Anteil. Planung und Einrichtung des 1928 fertiggestellten Neubaus des Institutes für elektrische Maschinen wurden von ihm durchgeführt. Die zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen und von ihm betreuten Doktorarbeiten haben seinen Namen in weiten Fachkreisen bekanntgemacht. Erwähnt seien hier nur seine Arbeiten über elektrische Bahnen, Induktionsmaschinen,



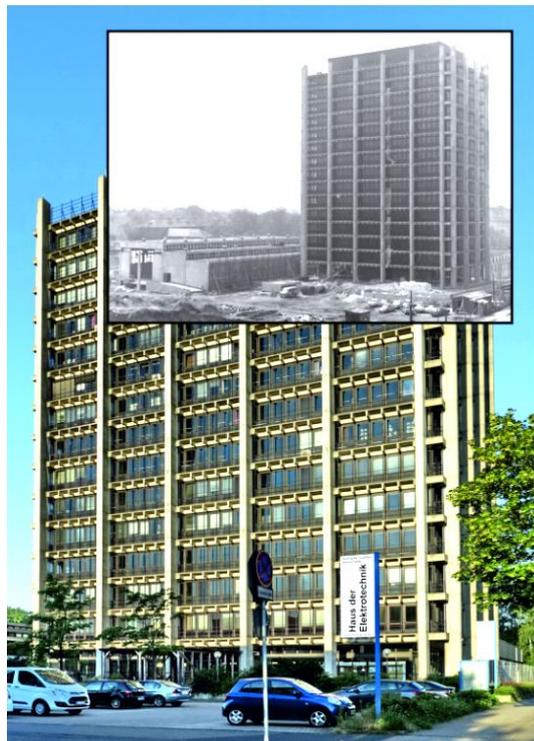
über die Streuung bei elektrischen Maschinen, die magnetische Schweißnahtprüfung und über die Erwärmung von elektrischen Maschinen und Transformatoren. Ebenso stammen mehrere Lehrbücher über elektrische Maschinen und Transformatoren ganz oder teilweise aus seiner Feder, so z. B. wurde das Kapitel „Transformatoren“ im Handbuch „Starkstromtechnik“ von E. v. Rziba von ihm bearbeitet. Von seiner erfolgreichen Lehrtätigkeit zeugt die große Zahl seiner Schüler, die er in seiner über 40-jährigen Hochschularbeit ausgebildet hat und von denen viele leitende Stellungen bekleiden.

In den Wiederaufbaujahren nach 1945 lag für längere Zeit die gesamte Ausbildung an der Abteilung für Elektrotechnik in seinen Händen. 1951 wurde Prof. Unger emeritiert. Er blieb jedoch weiterhin auf dem Gebiet der wissenschaftlichen Forschung und Lehre tätig. Seine Lebensarbeit wurde 1959 durch die Verleihung des großen Verdienstkreuzes des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland durch den Bundespräsidenten Prof. Heuss gewürdigt. Im Jahre 1961 stellte Prof. Unger seine ganze Schaffenskraft noch einmal in den Dienst der Hochschule, indem er für das Sommersemester an Stelle des erkrankten Prof. Kübler die Leitung des Institutes für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen übernahm. In dieser Zeit konnte Prof. Unger auch das seltene Fest des goldenen Doktorjubiläums feiern.

Seine Kollegen, seine heutigen und ehemaligen Schüler und die Angehörigen des Institutes für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der TH Braunschweig gratulieren ihm zu seinem Ehrentag aufs herzlichste und wünschen ihm noch viele Jahre der Gesundheit und erfolgreichen Schaffens.

H. Weh

In diesen Zeitraum fällt auch der Umzug des Instituts in das neu errichtete "Haus der Elektrotechnik" an der Hans-Sommer-Straße 66 in Braunschweig.



Neubau des Elektrotechnik-Hochhauses der TU-Braunschweig

Dort wurden dem Institut umfangreiche Räumlichkeiten und technische Ausstattung bereitgestellt. Dies ermöglichte Prof. Weh die Etablierung des neuen Forschungsgebiets der elektrischen Linearantriebe mit Magnetschwebetechnik, die unter anderem zur Entwicklung des Transrapsids führte.

Im Jahr 1966 wird das Institut um eine Professur für die "Berechnung und Konstruktion elektrischer Maschinen" erweitert, zunächst besetzt durch Prof. Frohne und von 1968 bis 1993 durch Prof. Eckhardt. Nach dessen Ausscheiden wurde diese Professur mit der Berufung von Prof. Meins thematisch durch das Fachgebiet der Leistungselektronik besetzt, sodass seit diesem Zeitpunkt eine ganzheitliche Forschung und Lehre bezüglich elektromechanischer Energiewandlung gewährleistet ist. Im Jahr 1995 folgte Prof. W.-R. Canders auf Prof. Weh. Seine Forschungsarbeiten lagen in supraleitenden Lagerungen, schnell-drehenden Maschinen und der Einführung der Fahrzeugantriebe am Institut.



1920
IEM, TU Braunschweig (Universitätsaltgebäude)



1927
IEM, TU Braunschweig (Mühlenpford Gebäude)



1974
Umzug in das neue Gebäude
Haus der Elektrotechnik,
Hans-Sommer-Straße 66



2015
TU Braunschweig-IMAB ist Mitglied im
Niedersächsischen
Forschungszentrum (NFF)

Forschungshistorie – Meilensteine

1997



Solarflugzeug icarè2 mit IMAB-E-Motor und Leistungselektronik

2004



Laboraufbau; Induktive Batterie-ladung;Transrapid (P = 2 x 250 kW)

1972-1979



Zusammenstellung der wichtigsten Meilensteine in der Geschichte der Entwicklung von Magnetschwebebahnen im Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IEM) IMAB

1998



Spark-Generator für moderne Windkraftanlagen 15 kW mit Axialfeld-Synchronmaschine. TU Braunschweig - (IEM) IMAB

2008



Erprobung TR09; Induktive Batterie-ladung; Transrapid (P=500 kW) (Versuchsanlage Transrapid)77

1995



Permanentmagneterregte Transversalfussmaschine (TFM) für ein Elektrofahrzeug ohne Schaltgetriebe (CityStromer). TU Braunschweig-(IEM) IMAB

2000



Permanentmagneterregte Transversalfussmaschine (TFM) als Traktionsantrieb für Bahnen

2010



Hochleistungs-Linearantrieb mit besonders hoher Kraftdichte für Fahrsimulator

1997



Berührungslose Energieübertragung (2 x 25 kW Containerkran, Virginia USA). TU Braunschweig - IMAB

2007



Straßenbahn ohne Oberleitung

2011



Superleitend gelagerter Schwunngmassen-energiespeicher (DynaStore), 2 MW
Schwungrad mit HTSL-Lager 10.000 U/min.
TU Braunschweig - IMAB

2016



Schaltzelle mit Zwischenkreis und Adapterplatine

2019



Leistungselektronik für Batterielader am IMAB

2014



Leistungselektronische Wandler mit Schnellschaltenden Halbleitern
100 kW, 100 kHz

2018



Schaltschrank-Aufbau

2020



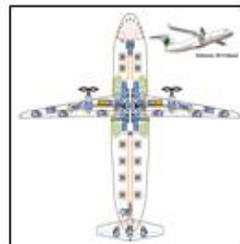
Prüfstand zur Durchführung von Kühlungsuntersuchungen an E-Maschinen

2015



Emilia auf induktiver Ladestation im NFF, TU Braunschweig-IMAB

2019



Elektrifizierung von Flugzeugen

2020



Inbetriebnahme Zuverlässigkeits-Labor

2013



Entwicklung eines 3D-Linearmotors mit Versuchsanlage.
TU Braunschweig - IMAB

2018



Lehr- und Forschungsfahrzeug für elektrische Fahrzeugantriebe;
IMAB Racer

Professuren am IMAB



1920
Prof. Dr.-Ing.
Franz Unger



1952
Prof. Dr.-Ing.
Erwin Kübler



1961
Prof. Dr.-Ing.
Herbert Weh



1968
Prof. Dr.-Ing.
Hans Karl Eckhardt
(Abteilungsvorsteher)



1993
Prof. Dr.-Ing.
Jürgen Meins



1995
Prof. Dr.-Ing.
W.-R. Canders



2012
Prof. Dr.-Ing.
Markus Henke
(Elektrische
Antriebssysteme)



2014
Prof. Dr.-Ing.
Regine Mallwitz
(Professur
Leistungselektronik)

Das IMAB heute

Im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte, verbunden mit attraktiven Lehrveranstaltungen betrachten die Wissenschaftler am IMAB leistungselektronische und antriebstechnische Fragestellungen im Umfeld vieler sehr unterschiedlicher Anwendungen. Themen aus den Bereichen elektrische Fahrzeugantriebe, induktive und leitungsgebundene Ladesysteme, Systeme für das elektrifizierte Fliegen sowie Flugzeugbordnetze aber auch Speichertechnologien wie Schwungradspeicher werden am IMAB theoretisch und praktisch in zahlreichen Forschungsprojekten mit wissenschaftlichen und industriellen Partnern bearbeitet. An all diesen Fragestellungen arbeiten Doktoranden und viele Studierende in ihren Abschlussarbeiten, unterstützt von mehreren Auszubildenden und MitarbeiterInnen in Technik und Verwaltung. Dabei teilt sich das Institut nach wie vor auf zwei Lehrstühle auf, die jedoch interdisziplinär in Forschung und Lehre zusammenarbeiten. Dies sind die Lehrstühle für Elektrische Antriebssysteme unter dem Institutsleiter Prof. Markus Henke und der Lehrstuhl für Leistungselektronik unter Prof. Regine Mallwitz.

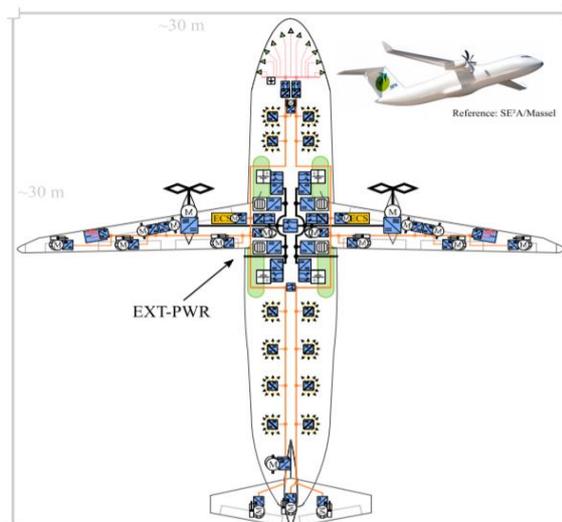
Ein großes Forschungsfeld am IMAB ist die Elektromobilität. Hier werden grundsätzliche Fragestellungen bezüglich des Ladens, der Energieverteilung im Bordnetz und der Elektrifizierung von mobilen Antriebssträngen betrachtet. Dabei werden neue Ansätze zu den verbauten elektrischen Antrieben und leistungselektronischen Systemen erforscht, wie zum Beispiel das induktive Laden von Fahrzeugen, hochkompakte und -effiziente On-bord-Lader, der Integration von Leistungselektronik in die elektrische Maschine oder Hochdrehzahlantriebe.

Der Entwurf elektrischer Maschinen beinhaltet heute stark interdisziplinäre Fragestellungen, die nur in einem ganzheitlichen systemischen Ansatz gelöst werden können. Am IMAB erfolgt der Entwurf daher im Team vieler Fachexperten.

Für elektromagnetische, thermische und systemorientierte Untersuchungen werden Berechnungsverfahren und Tools eingesetzt, die im Rahmen vieler Forschungsprojekte entwickelt und optimiert werden. Die am IMAB realisierten Maschinenprototypen werden

durch eigene leistungselektronische Systeme geregelt angesteuert. In den Antrieb fließen damit neueste Technologien zur Steigerung von Effizienz, Performance und Leistungsdichte ein. Eine detaillierte Vermessung und Prüfung der Antriebsprototypen erfolgt auf eigenen automatisierbaren Prüfständen bis zu Leistungen von 300 kW. Einige Forschungsprojekte, die am IMAB aktuell im Bereich Elektromobilität bearbeitet werden, sind nachfolgend kurz beschrieben.

Innerhalb des DFG Cluster of Excellenz **SE²A - Sustainable and Energy-Efficient Aviation** wird auf leistungselektronischer Seite das Electrical Power Supply System eines All Electric Aircrafts untersucht. Es stehen zurzeit mehrere Ansätze im Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten: Das



Bordnetzstruktur el. Flugantrieb

Hochvoltbordnetz und die Einbindung supraleitender Elemente. Für die harschen Umgebungsbedingungen werden in Versuchen passive sowie aktive Bauelemente unter den Randbedingungen belastet, Dimensionierungsgesetze abgeleitet und eine auf Zuverlässigkeitsaspekten basierende Dimensionierungsmethodik für leistungsdichte Leistungselektronik erhoben. Parallel erfolgt auf Elektromaschinenseite die Betrachtung leistungsdichter Flugantriebe. Der Schwerpunkt der Forschung liegt auf der Erhöhung der Leistungsdichte durch effiziente Maschinenkühlung mit einer Gesamtsystembetrachtung einschließlich

der Rückkühlung. Darüber hinaus finden Untersuchungen, Modellbildungen und Versuche zu supraleitenden Antrieben statt.

Ein weiteres Projekt (**EPROREF**) beschäftigt sich damit, einen vollständigen hochkompakten und hocheffizienten elektrischen Antriebsstrang, vom Wechselrichter bis zum Propeller zu entwerfen, aufzubauen und zu vermessen. Am IMAB entsteht dafür ein auf Siliziumkarbid basierender, sechsphasiger Wechselrichter mit einer Leistung von 200 kW.

Ein Forschungsprojekt im Rahmen der Elektromobilität ist das von der DBU geförderte Projekt „**Linearaktuatoren mit elektrischer Leistungsversorgung**“, in welchem die Elektrifizierung eines Nutzfahrzeuges untersucht wird. Die Herausforderung besteht darin, im vorhandenen Bauraum von hydraulisch dominierten Stellgliedern ein konkurrenzfähiges Antriebssystem zu entwickeln. Gelingt dies, profitiert das Gesamtsystem von einer höheren Energieeffizienz als auch der Minimierung der Umweltgefährdung durch Entfall der Leckagegefahr.

In anwendungsnahen Projekten werden die Auswirkungen schneller Schaltvorgänge auf die Isolation der elektrischen Maschine untersucht. Hierzu werden die durch hohe Spannungsgradienten ausgelösten Vorgänge mathematisch modelliert und im Versuch mittels Teilentladungsmessungen verifiziert.

In einem weiteren Projekt, **LISA4CL**, geht es um den Entwurf, den Aufbau und die Erprobung eines induktiven Ladesystems für elektrische Nutzfahrzeuge im Bereich der Logistik. Bei



Fig. 10: Rapid prototyping environment with GaN full bridge modules and transformer of DAB in the front

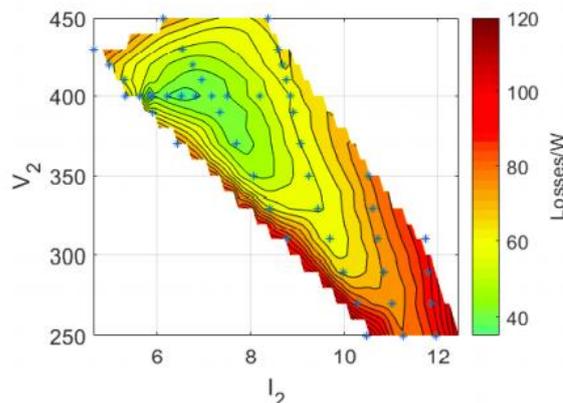


Fig. 11: DAB measured map of losses

Leistungsklasse von 22 kW und mehr sollen die elektrischen Kleintransporter effizient und kontaktlos geladen werden.

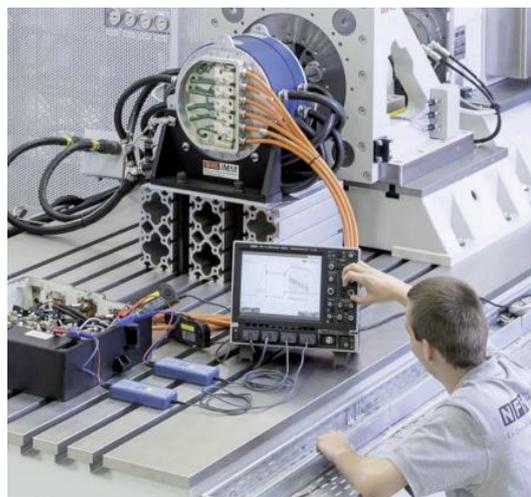
Der systematische Vergleich verschiedener Leistungselektronik-Konzepte für das kabelgebundene Laden steht im Projekt Sysal im Fokus. Bezüglich Effizienz aber auch Leistungsdichte interessante Konzepte bzw. Schaltungsvarianten können für verschiedene Leistungsbereiche (z.Z. bis 20kW) systematisch untersucht und verglichen werden.

Ziel des **ARIEL**-Projektes ist die Entwicklung eines hochdrehenden elektrischen Luftverdichters mit Permanentmagneterregung für ein Brennstoffzellensystem. Dabei soll der Luftverdichtermotor hinsichtlich Bauraum, Wirkungsgrad und Leistungsfähigkeit optimiert werden und somit einen Beitrag zur Kostenreduzierung eines gesamten Brennstoffzellensystems für mobile Anwendung liefern. Untersuchungen zur Effizienz und Kompaktheit des Wechselrichters innerhalb des Antriebs runden das Projekt ab. Dafür werden systematisch verschiedene schnell schaltenden Leistungshalbleiter und ihr Einsatz in geeigneten Schaltungstopologien in Theorie und Praxis verglichen.

Um die Untersuchungen und die Auslegung der Antriebssysteme auch überprüfen zu können verfügt das IMAB in seiner Maschinenhalle über zahlreiche Prüfstände, die ein breites Leistungs- und Drehzahlspektrum abdecken. Darüber entstand mit dem neu hinzugekommenen Standort am Niedersächsischen Forschungszentrum für Fahrzeugtechnik (NFF) die Möglichkeit, mit zwei vollautomatisierbaren Prüfständen neuester Prüfstandstechnologie auch auf die ständig steigenden Anforderungen der Elektromobilität reagieren zu können. Dabei bieten die Prüfstände beispielsweise die Möglichkeit die Prüflinge thermisch zu konditionieren, automatische Prüfläufe zur Vermessung von Kennfeldern abzufahren oder aber auch Schwingungsmessungen durchzuführen.



*Vermessung der sechsphasigen E-Maschine STORM
aus dem IMAB-Racer*

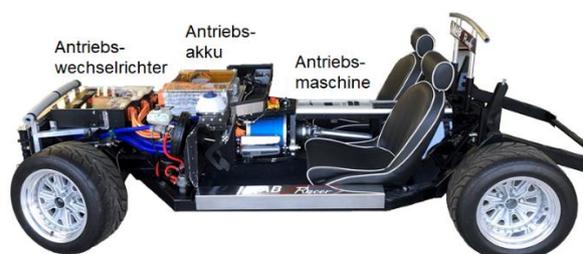


NFF-High-Torque Prüfstand

Zur besseren Verknüpfung von Forschung und Lehre zur Elektromobilität, wurde mit dem **IMAB-Racer** eine institutseigene fahrbare Plattform entwickelt, die Studierenden und Wissenschaftlern als praxisnaher Erprobungsträger für Antriebs- und Ladetechnologien dient. Dabei wurden viele der Komponenten des Fahrzeuges von Studierenden entwickelt, denen dieses Projekt einen wertvollen, praktischen Einblick in die Herausforderungen der Elektromobilität bietet. Der IMAB-Racer basiert dabei auf einem Kit-Car welches mit selbst entwickelten Komponenten wie dem Antriebsakku, einem auf SiC-Technologie basierenden Antriebswechselrichter, der Bordnetzversorgung sowie einer sechsphasigen permanentmagneterregte Synchronmaschine ausgestattet wurde.



Der fahrbereite IMAB-Racer



Blick unter die Karosserie

Ein weiteres Forschungsfeld, welches am IMAB bearbeitet wird, greift Themen der Energiewende auf. Hierbei werden Fragestellungen zur Energieumformung und -speicherung aber auch der Energieeffizienz betrachtet.

Im Forschungsprojekt **Enersphere** wurden dabei supraleitend gelagerten Schwungmassenspeicher konstruktiv ausgelegt, realisiert und erprobt.

Weiterhin reicht das Spektrum über Leistungselektronik für hocheffiziente und besonders kompakte Bordnetzrichter für Flugzeuge bis hin zur Entwicklung neuartiger Energieverteilungssysteme zur effizienteren Anbindung von Erneuerbaren Energien, Batteriespeichersystemen und Ladesäulen.

Ein beispielhaftes Projekt aus diesem Forschungsbereich ist das **BMW-geförderte NetProsum2030**. In diesem Projekt beschäftigt sich das IMAB mit einem auf SiC-basierenden

Gesamtsystem für einen normalen Haushalt zur effizienten Kopplung von PV-Anlage, einem HV-Speichersystem aus 2nd-Life-Traktionsbatterien, einer DC-Schnelllademöglichkeit und dem öffentlichen Versorgungsnetz. Dabei unterscheidet sich das System von herkömmlichen PV-Speicher-Anordnungen vor allem durch den transformatorlosen Aufbau und die 800 V DC-Kopplung der modular aufgebauten Komponenten. IM BMWI-geförderten Projekt Ide3AI wird das Potenzial zur Effizienzsteigerung von WBG-Halbleitern in Industrieantrieben untersucht. Dabei werden auch Filtertechnologien in die Betrachtung einbezogen.

Hier wird auch erkennbar, dass eine der Kernkompetenzen am IMAB in der Applikation von Wide-Bandgap-Halbleitern wie Siliziumcarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) besteht. Es werden einerseits allein die Halbleiter, Treiberschaltungen und das Design der Kommutierungszellen untersucht, und andererseits Schaltungen entworfen, aufgebaut untersucht, die mithilfe dieser Halbleiter Schaltfrequenzen bis in den Gigahertz-Bereich hinein erreichen. Ziel ist es, hocheffiziente, hochkompakte aber auch zuverlässige und EMV gerechte Energiewandlung zu ermöglichen. Die durch die Applikation dieser Halbleiter entstehenden Vorteile wie aber auch die daraus resultierenden Herausforderungen wie das veränderte EMV-Verhalten oder die hochfrequenten Eigenschaften passiver Bauelemente sind dabei Gegenstand der aktuellen Forschungen am IMAB.



Ein auf GaN basierender PV-Inverter

Zuverlässigkeit und Lebensdauer stehen schon früh bei der Auswahl von Energiewandlungskonzepten, Topologien und Bauelementen im Fokus. Um hier in frühen Dimensionierungsphasen Aussagen z.B. auch zu neuen Bauelementen wie SiC- oder auch GaN-Halbleitern treffen zu können, sind verschiedene z.T. lang anhaltende Zuverlässigkeitstest notwendig. Darüber hinaus variieren die Umgebungsbedingungen zwischen den Applikationen. Im kürzlich neu aufgebauten Zuverlässigkeitslabor am IMAB sind nun auch diverse Untersuchungen zu Zuverlässigkeit

und Lebensdauer der Leistungselektronikbauelemente und –baugruppen möglich. Derzeit verfügt das IMAB über eine Klimakammer, einen Wechsellastteststand zur definierten Zyklisierung der Halbleiter und einige weitere bei solchen Untersuchungen notwendige Geräte wie Hochspannungsnetzteil, Messwerterfassungen und Steuerungsequipment.

Dieser kleine Einblick in die Aktivitäten und Möglichkeiten des IMAB zeigt, dass am Institut ein breites Spektrum an Forschung und Lehre in den Bereichen Elektromobilität und Energiewende stattfindet. Dadurch hoffen wir, dass wir auch in Zukunft der langjährigen Tradition des nun 100 Jahre alten IMAB gerecht werden können.



...die ersten 100 Jahre IMAB Forschung