



Technische
Universität
Braunschweig

IMAB Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen
TU Braunschweig



JAHRESBERICHT 2015/2016



Elektrische Antriebssysteme
Leistungselektronik

©2016 IMAB

Technische Universität Braunschweig

Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen

Hans-Sommer-Straße 66

38106 Braunschweig

Postfach 3329

38023 Braunschweig

www.imab.de

info@imab.de

Inhalt

1	Vorworte	2
2	Personal am Institut	6
3	Forschung	7
	3.1 Forschungsaktivitäten am IMAB	7
	Skalierbarkeit von Synchron-Reluktanzmaschinen	8
	Anwendung und Vermessung von Galliumnitrid (GaN) Leistungshalbleitern	10
	Standardisierung induktiver Ladesysteme über Leistungsklassen	13
	Elektrifizierung des oszillierenden Aktuators für Mähbalken Grob- und Feinauslegung des Resonanzmotors	15
	Verwendung von SMC-Materialien im Elektromaschinenbau – Entwicklungen, Ergebnisse und Erfahrungen	19
	EMILIA – Der e-Golf ohne Ladekabel	21
	Prüfstand zum Test und Vergleich von Regelstrukturen	25
	Neuartige hochintegrierte Strommessmethode für Antriebsumrichter	28
	Treiberschaltung mit hoher Temperatur- und Gleichtaktspannungs- festigkeit für Wide-Band-Gap Leistungshalbleiter	31
	Elektrisch unterstützte Bremsung eines Nutzfahrzeuge	34
	Anisotropiebedingte Wärmeeigenstörungen in Faserverbund Bandagen.	43
	3.2 Prüfstandstechnik am IMAB	58
	3.3 Externe Forschungsthemen	61
	3.4 Abgeschlossene Promotionen	65
4	Lehre	66
	4.1 Vorlesungen und Praktika in 2015/2016	66
	4.2 Exkursionen	73
	4.3 Zusammenstellung studentische Arbeiten am Institut	76
5	Ereignisse 2015/16	80
	5.1 Berichte von besonderen Ereignissen	80
	5.2 Kalender	85
6	Veröffentlichungen in 2015/16	89

1 Vorworte

Liebe Freunde des IMAB,

dieser Zwei-Jahresbericht über die Jahre 2015/2016 gibt Ihnen einen Überblick über die Aktivitäten des IMAB in Forschung und Lehre und beschreibt außerdem Teile des Institutslebens abseits des Forschungsalltags.

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

Die Forschungsthemen betreffen weiterhin den gesamten Energiewandlungsprozess von der Energiequelle über leistungselektronische Systeme bis hin zum Elektromotor und zur Last, sowohl in industriellen als auch fahrzeugtechnischen Anwendungen. Der Fokus der Betrachtungen liegt weiterhin in energieeffizienten und zuverlässigen Komponenten und Systemen. Diese müssen insbesondere im Automotive-Umfeld höchsten Ansprüchen an Leistungs- und Drehmomentdichte bei teilweise sehr niedrigen Spannungsniveaus genügen.

Grundlegende Forschungsarbeiten wurden ergänzt durch interessante Forschungsprojekte mit Industriepartnern, hinter denen konkrete Anwendungen stehen. In diesem Umfeld kann das IMAB weiterhin auf eine hohe Kompetenz zur Realisierung von Antrieben und Elektronik in Hardware setzen, sodass theoretische Ansätze und Vorausberechnungen in fast allen Projekten zum Aufbau von Hardware-Prototypen und zu deren Vermessung geführt haben.

Die Infrastruktur des IMAB wurde nun durch zwei hochwertige Prüfstände und Messeinrichtungen in den Räumlichkeiten des NFF ergänzt. Dieses Zentrum automobiler Forschung wurde in 2014 am Braunschweiger Forschungsflughafen errichtet. Das IMAB ist dort wesentlicher Technologie- und Forschungspartner und leitet das Forschungsfeld Elektromobilität.

Auch in 2015/2016 sind wieder zahlreiche studentische Arbeiten am IMAB angefertigt worden, in denen Studierende Einblicke in aktuelle Forschungsthemen gewinnen konnten und teilweise hervorragende, mit Preisen ausgezeichnete Ergebnisse erzielt haben.

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

Ihr

Markus Henke



Liebe Freunde des IMAB,

seit zwei Jahren vertrete ich die Leistungselektronik am IMAB. Seitdem befinden sich Lehrveranstaltungen zur Leistungselektronik, Forschungsprojekte zu leistungselektronischen Themen sowie die leistungselektronische Infrastruktur im Ausbau.

So konnten zwei neue Prüfstände für die elektrische bzw. thermische Charakterisierung von aktiven bzw. passiven Komponenten der Leistungselektronik beschafft und in Betrieb genommen werden. Erste interessante Projekte mit Partnern aus der Industrie und verschiedenen Forschungseinrichtungen sind in Bearbeitung bzw. befinden sich in der Planung. Darüber hinaus sind eine Reihe interessanter studentischer Arbeiten am IMAB angefertigt worden, die Studierenden ihren Studienabschluss aber auch einen Zugang zu aktuellen Forschungsthemen ermöglicht haben.

Ein Forschungsschwerpunkt liegt dabei auf Wide-Band-Gap Halbleitern wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). Abgeschlossene, laufende und geplante Arbeiten beschäftigen sich mit Untersuchungen zum Schalt- und Ansteuerverhalten aber auch ihrem Einsatz in verschiedenen Applikationen. Im Fokus stehen derzeit leistungselektronische Lösungen in der elektrischen Antriebstechnik in Mobilität und Industrie sowie in der Systemtechnik für die Netzanbindung erneuerbarer und gespeicherter Energien.

In den vergangenen zwei Jahren hat sich die Sichtbarkeit des IMAB auf nationaler und internationaler Ebene erhöht. So wurde das IMAB als akademisches Mitglied in das European Centre for Power Electronics (ECPE) aufgenommen und war als Mitglied des Local Committee auf der EPE 2016 in Karlsruhe mit einem eigenen Ausstellungsstand vertreten.

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

Ihre

Regine Mallwitz



2 Personal am Institut

Vorstand:	Prof. Dr.-Ing. Markus Henke (Institutsleiter)	
	- Elektrische Antriebssysteme	
	Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz	
	- Leistungselektronik	
Professoren	Prof. a.D. Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Canders	
im Ruhestand:	Prof. a.D. Dr.-Ing. Jürgen Meins	
	Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Herbert Weh	
Oberingenieur:	Dr.-Ing. Günter Tareilus	
Akademischer Direktor i. R.:	Dr.-Ing. Helmut Mosebach	
Geschäftszimmer:	Dorothee Ottow	
Wiss. Mitarbeiter:	M. Sc. Mang Cai	/ Maschinenberechnung
	M. Sc. Tim-Hendrik Dietrich	/ Ladetechnologie, Leist.elektronik
	M. Sc. Fabian Hain	/ Maschinenberechnung
	M. Sc. Christian Heister	/ Maschinenberechnung
	Dipl.-Ing. Jan Hoffmann	/ Maschinenkonstruktion
	Dipl.-Ing. Peter Hoffmann	/ Prüfstände
	Dipl.-Ing. Niklas Langmaack	/ Leistungselektronik, Prüftechnik
	M. Sc. Florian Lippold	/ Leistungselektronik, Prüftechnik
	Dipl.-Ing. Quirin Maurus	/ Maschinenkonstruktion
	Dipl.-Ing. Anna-Lena Menn	/ Maschinenentwurf, Regelung
	M. Sc. Oleg Schäfer	/ Ind. Ladetechnologie, Regelung
	M. Sc. Henning Schillingmann	/ Maschinenberechnung
	M. Sc. Thorben Schobre	/ Leistungselektronik
	M. Sc. Konstantin Siebke	/ Leistungselektronik

Buchhaltung:	Ulrike Nissen
Technischer Angestellter:	Herbert Rawe
Werkstattmitarbeiter:	Tobias Gaida / Werkstattleiter
	Bernd Machus
	Carlo Mensing
Auszubildende:	Matthias Depner (Industriemechaniker)
	Jenny Jacobs (Feinwerkmechanikerin)
	Lars Moritz (Feinwerkmechaniker)
	Jan-Philipp Scheiner (Kaufmann für Büromanagement)
	Stefan Strebe (Systemelektroniker)

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die seit dem 01.01.2015 neu hinzugekommen sind:

am 01.08.2015	M. Sc. Florian Lippold
am 01.08.2015	Jan-Philipp Scheiner
am 01.09.2015	M. Sc. Konstantin Siebke
am 01.10.2015	Tobias Gaida
am 01.11.2015	M. Sc. Thorben Schobre
am 01.01.2016	M. Sc. Henning Schillingmann
am 01.06.2016	Dorothee Ottow
am 01.08.2016	Matthias Depner
am 10.08.2016	M. Sc. Oleg Schäfer

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die seit dem 01.01.2015 ausgeschieden sind:

am 30.06.2015	Hans-Joachim Bonney
am 30.09.2015	Dr.-Ing. Sung-In. Jeong
am 31.12.2015	Dipl.-Ing. Christoph Löffler
am 31.12.2015	Dr.-Ing. Jan-Hendrik Psola
am 30.06.2016	Barbara Tiedge

Als wissenschaftliche Hilfskräfte waren seit dem 01.01.2015 tätig:

Emanuel Agyekum	Yvone Barthelmie	Matthias Beck
Adrian Berg	Gerrit Braun	Gerrit Bremer
Janick Busse	Mustafa Cagri Catik	Ubeydullah Cavus
Stefan Estelmann	Christoph Faraji-Tajrishi	Dirk Fischer
Michael Folkers	Christian Frankenberg	Tobias Fricke
Sinem Gülen	Jannik Gutbrod	Carsten Hartmann
Nils Henke	Jan Illgen	Jonas Jäger
Raoul G. Kenfack Zeufack	Felix Klabunde	Sven Koröde
Andii Kostrytsia	Bodo Kramer	Wassili Leibel
Xinjun Liu	Alexander Lührmann	Boris Mendoza Loli
Florian Mittelstädt	Robert Müller	Fabian Noering
Marvin Rehra	Erik Rohlfer	Enja Rösch
Alexander Saul	Hendrik Schefer	Wolfgang Schmid
Sascha Schmidt	Sebastian Schulte	Lasse Schumacher
Andrii Shtefaniuk	Qianting Shui	Robert Urban
Cengiz Uzlu	Kai Vollprecht	Joshua Weitzel
Tobias Wellert	Henrik Wienken	Simon Wilker
Christopher Wruck	Zhou Yu	



Das IMAB

3 Forschung

Neben der Lehre ist die Durchführung von Forschungsprojekten wesentliche Aufgabe der am IMAB tätigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. In den Jahren 2015/ 2016 wurde wieder eine Reihe interessanter Forschungsfragen in einer Vielzahl von Projekten bearbeitet.

Forschungsfelder

Die enge Verzahnung von Leistungselektronik, Maschinenberechnung und konstruktivem Antriebsentwurf spiegelt sich am IMAB sowohl in der fachlichen Ausrichtung der Mitarbeiter als auch in den Forschungsthemen wider.

Leistungselektronik	Elektrische Antriebssysteme	
	Mechanik / Mechatronik	Maschinenentwurf
Auslegung von LE-Systemen	Mechanische Maschinenkonstruktion	Elektromagnetische Auslegung, FEM
Aufbau, Inbetriebnahme, Optimierung	Festigkeitsanalysen	Topologievergleiche el. Maschinen
Verlustmessung und -berechnung	Sensorsysteme	Dynamische Systemmodellierung
Topologien u. Regelung von Wandlern	Kühlung elektrischer Maschinen	Schwungradspeichersysteme
Leistungshalbleiter (Si, SiC, GaN)	Vermessung, Prüfung, Prototypenbau	Hochdrehzahlantriebe
Treiberdesign	LE-Systeme in Fahrzeug+Energienetz	Magnetische Lager, Supraleitung
Passive Bauelemente (Magnetics)	Wandler für elektrische Antriebe	Optimierung von Ansteuerverfahren
Kühlung und Integration von LE	Wandler für Energiespeicher	Parametrierung neuer Werkstoffe
EMV von LE-Systemen	Batteriemanagement	Schwingungsanalyse
Messtechnik (Strom ~)	Induktives Laden, Leistungselektronik	Induktives Laden, Magnetik

Kompetenzen und Forschungsthemen

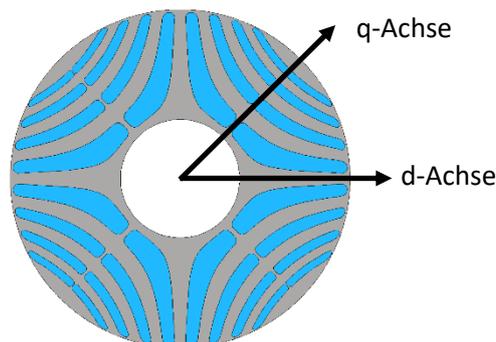
3.1 Ausgewählte Forschungsaktivitäten am IMAB

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

Skalierbarkeit von Synchron-Reluktanzmaschinen

M. Sc. Henning Schillingmann

Das Ziel, Magnetmaterial bei elektrischen Maschinen einzusparen, führt konsequenterweise zu einer Synchron-Reluktanzmaschine (SyRM), bei der vollständig auf Magnete verzichtet wird. Das Erregerfeld der SyRM wird von einer mehrsträngigen Statorwicklung erzeugt. Der Statorstrom ist dabei sowohl für die Felderregung, mit dem d-Anteil des Stroms, als auch für die Drehmomentbildung, mit dem q-Anteil des Stroms zuständig. Der Rotor mit unterschiedlichen magnetischen Widerständen entlang der d- und der q-Achse folgt dem Statorfeld mit synchroner Winkelgeschwindigkeit. Entscheidend für den Rotor ist ein hoher Induktivitätsunterschied zwischen der d- und der q-Achse des Rotors (Anisotropie, bzw. Schenkligkeit im Rotor). Diese Differenz ist proportional zum erzeugten Drehmoment. Eine hohe Rotoranisotropie bieten Rotoren, bei denen Flussbarrieren verwendet werden. Diese Flusssperrern werden so angeordnet, dass sie den d-Fluss möglichst wenig einschränken und den q-Fluss gleichzeitig maximal beschränken.



Rotor einer Synchron-Reluktanzmaschine mit Flussbarrieren

Im Entwurfsprozess zeigt sich, dass die Form der Flussbarrieren nur einen geringen Einfluss auf die Höhe des Drehmoments haben. Dies führt zur Überlegung, einen Rotorblechschnitt zu entwerfen, der sowohl in einer SyRM, als auch in einer PM-Assisted SyRM eingesetzt werden kann. Dabei wird der Blechschnitt mit Ferriten versehen um ein höheres Drehmoment bereit zu stellen und damit einen höheren Leistungsbedarf abzudecken. Die Ferrite führen zu einer Vorsättigung der Stege am Rotoraußenradius und somit zu einer höheren Rotor-Anisotropie. Weiterhin stellen sie magnetischen Fluss bereit, der ebenfalls zur Drehmomentbildung genutzt wird.

Das Drehmoment setzt sich also aus einem Reluktanz- und einem PM-Anteil zusammen. Das Reluktanzmoment entsteht aufgrund der Interaktion zwischen Rotor-Anisotropie ($L_d - L_q$) und der Grundwelle des Statorfeldes, der PM-Anteil resultiert aufgrund der Verknüpfung zwischen der Flussverkettung durch die Ferrite Ψ_{PM} und dem Statorfeld:

$$M = \frac{m_s p}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)$$

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_{PM}$$

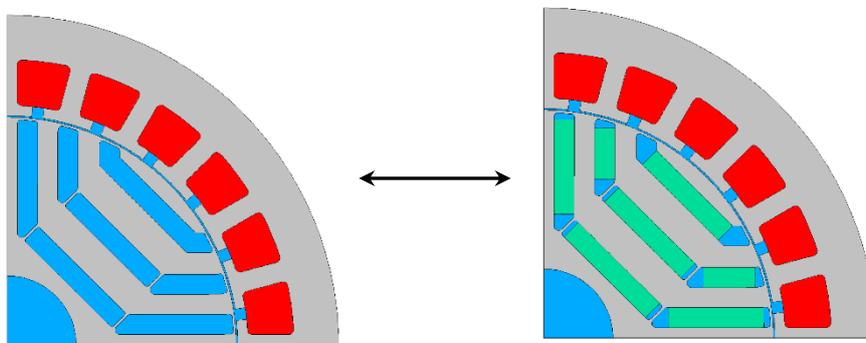
$$\Psi_q = L_q i_q$$

$$\Rightarrow M = \frac{m_s p}{2} [(L_d - L_q) i_d i_q + \Psi_{PM} i_q]$$

Die PM-Assisted SyRM ähnelt vom Aufbau her einer PM-erregten Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten, mit dem Unterschied, dass hier ein größerer Teil des Drehmoments aus den Reluktanzeigenschaften generiert wird. Die exakten Anteile variieren je nach Magnetkreisauslegung und können mit Hilfe der Frozen-Permeability-Methode ermittelt werden. Das Ziel, ein möglichst hohes Gesamtmoment zu realisieren führt zu einer Verteilung, bei der etwas über die Hälfte dem Reluktanzmoment entsprechen.

Der Vergleich zwischen der einfachen SyRM und der PM-Assisted SyRM zeigte, dass die PM-Assisted Maschine ein um etwa 45% höheres Drehmoment liefert. Damit kann, unter Berücksichtigung der relativ geringen Materialkosten für Hartferrit-Magnete, hier eine höhere Gleichteilefertigung der Maschine sinnvoll sein.

Die Materialanpassung erwies sich als geeignete Maßnahme verschiedene Leistungsklassen mit einem Blechschnitt abzudecken. Die Ferrite im Rotor führen zu einer höheren Leistungsdichte, sowie verbessertem Wirkungsgrad und Leistungsfaktor. Dafür ist jedoch neben der Materialbeschaffung ein weiterer Arbeitsschritt notwendig um den Rotor zu fertigen.



SyRM (li.) und PM-Assisted SyRM (re.)

Wird der Gedanke der Leistungsskalierung weiterverfolgt, führt dies zur Überlegung stärkere Magnete aus Seltenen Erden im Rotor einzusetzen, um eine noch höhere Leistung erreichen zu können. Für diese Topologie sind jedoch deutlich abweichende Rotorparameter notwendig um den Magnetkreis ordentlich auszulegen, sodass hier keine deutliche Verbesserung zu verzeichnen ist. Auch ist eine Gleichteilefertigung aufgrund der hohen Materialkosten für diese Anordnung wenig sinnvoll.

Anwendung und Vermessung von Galliumnitrid (GaN) Leistungshalbleitern

M. Sc. Thorben Schobre, M. Sc. Konstantin Siebke

Die Verwendung von Wide-Bandgap-Leistungshalbleitern bietet großes Potential für effiziente und leistungsdichte Leistungselektronik. Sowohl Siliziumkarbid- als auch Galliumnitridleistungshalbleiter haben bereits Marktreife erlangt und die Verfügbarkeit steigt kontinuierlich. Beide Halbleitertypen bilden eine Alternative zu konventionellen, Silizium (Si) basierten Bauelementen um kompaktere und effizientere Schaltungen zu realisieren. Anhand der Verfügbarkeit am Markt lässt sich eine Einteilung nach Spannungsfestigkeitsklassen für die beiden Wide-Bandgap-Materialien feststellen. SiC-MOSFETs decken einen Spannungsfestigkeitsbereich von 900 V bis über 1,7 kV ab. GaN-High-Electron-Mobility-Transistors (HEMT) decken einen Bereich von 30 V bis 650 V ab.

GaN-Leistungshalbleiter haben pro Chipfläche einen vergleichsweise kleinen $R_{DS(on)}$. Darüber hinaus haben diese Halbleiter herausragend geringe Schaltverluste. Dadurch können, im Vergleich zu Si-Halbleitern, hohe Schaltfrequenzen realisiert werden. Ebenso bietet GaN als Halbleitermaterial eine Robustheit gegenüber hohen Betriebstemperaturen und der Einwirkung sowohl von Röntgen- als auch Teilchenstrahlung. Diese Eigenschaften machen GaN-Leistungshalbleiter geeignet für Anwendungen, die einen hohen Wirkungsgrad, eine hohe Leistungsdichte oder eine hohe Anforderung gegenüber Temperatur oder Strahlung erfordern.

Besonders im Bereich der Photovoltaik spielt ein hoher Wirkungsgrad eine große Rolle. Von hohen Leistungsdichten bei guter Effizienz können besonders Mobilitätsanwendungen, wie Elektro- und Hybridfahrzeuge oder die Luftfahrt, profitieren. Aufgrund der Strahlungsfestigkeit kann die Raumfahrt ebenfalls ein Anwendungsfeld dieser Technologie werden.

Am IMAB werden Forschungen in diesem Themenbereich durchgeführt. Dabei liegt der Fokus auf der Analyse der Leistungshalbleiter und der Applikation für verschiedene Anwendungsgebiete. Neben der Vermessung diverser GaN-Bauelemente wurden ein On-Board-Ladegerät für Elektrofahrzeuge, ein bidirektionaler DC/DC-Wandler für Mildhybrid Anwendungen, ein Solarwechselrichter und ein bidirektionaler DC/DC-Wandler für Satellitenstromversorgungssysteme entwickelt.

Technologieüberblick und Vorteile von GaN

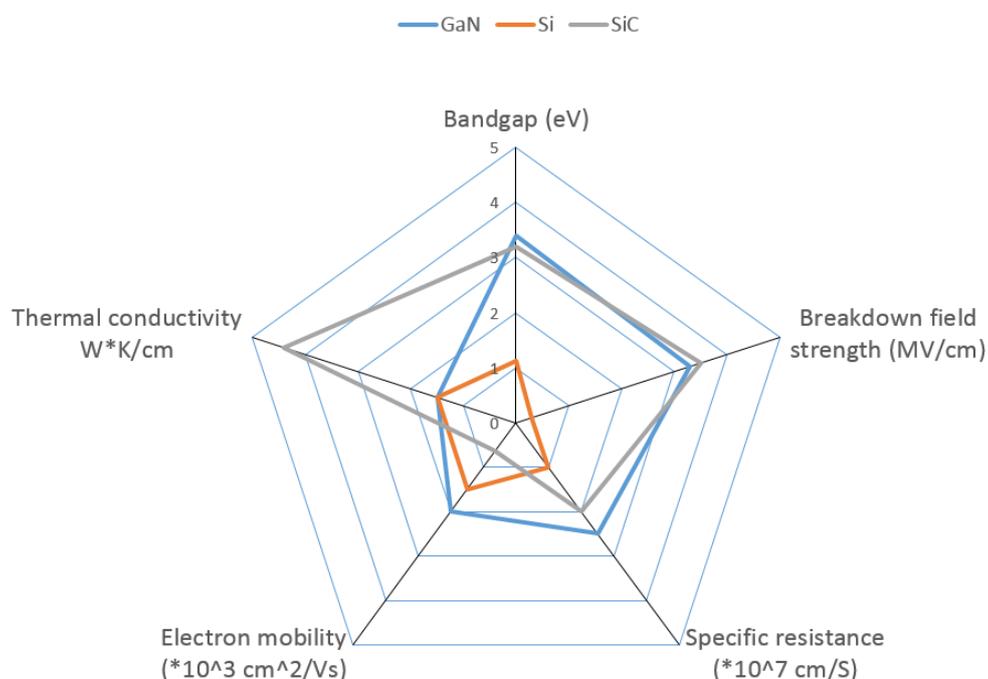
Durch die größere Durchbruchfeldstärke und die höhere Elektronenbeweglichkeit von GaN können die Leistungshalbleiter, verglichen mit Silicium (Si) Leistungshalbleitern gleicher Durchbruchspannung und Nennstrom, kleiner werden.

Insgesamt lässt GaN viele Optimierungsmöglichkeiten einer leistungselektronischen Schaltung zu. Es kann die Leistungsdichte gesteigert, der Wirkungsgrad erhöht oder die Schaltung für

besonders hohe Umgebungstemperaturen optimiert werden. GaN-Leistungshalbleiter verursachen geringere Verluste als vergleichbare Si-Leistungshalbleiter. Insbesondere die Schaltverluste sind durch die sehr schnellen Schaltvorgänge signifikant geringer, wodurch der Wirkungsgrad gesteigert werden kann. Durch die geringeren Schaltverluste der GaN-Leistungshalbleiter kann die Schaltfrequenz erhöht werden, wodurch die passiven Bauelemente (Induktivitäten und Kapazitäten) kleiner werden können. Durch die kleineren passiven Bauelemente und die sehr kleinen GaN-Leistungshalbleiter resultiert eine höhere Leistungsdichte der Applikationen. Durch die geringeren Verluste der GaN-Leistungshalbleiter kann der Kühlaufwand reduziert werden, wodurch die Leistungsdichte auch gesteigert wird.

Insbesondere für Weltraumanwendungen sind GaN-Bauelemente gut geeignet. Aufgrund der großen Bandlücke ist GaN weniger empfindlich gegenüber Höhenstrahlung.

GaN-Leistungshalbleiter sind als normally-off oder als normally-on HEMT erhältlich. Die normally-on Bauelemente werden zwischen den Kaskoden (Si-MOSFET mit normally-on HEMT) und den Enhancement High-Electron-Mobility-Transistor (E-HEMT) unterschieden.

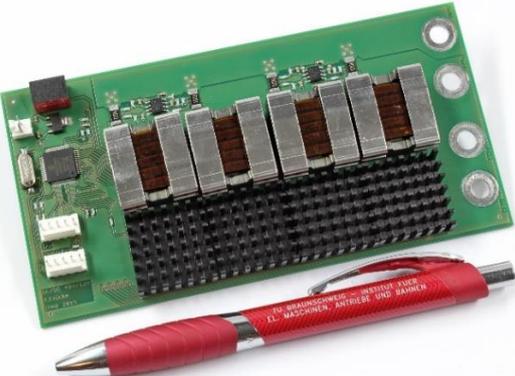


Eigenschaften von WBG Halbleitern

Vermessung von GaN-Leistungshalbleitern durch Doppelpulsversuche

Am IMAB wurden GaN-Leistungshalbleiter umfangreich erforscht. Das Schaltverhalten der GaN-Leistungshalbleiter wurde durch Doppelpulsversuche untersucht. Dabei wurden unterschiedliche GaN-Leistungshalbleiter der Hersteller GaN-Systems, EPC, RFMD und Transphorm vermessen. Dabei handelte es sich um E-HEMTs (normally-off) und Kaskoden aus Si-MOSFETs und normally-on HEMTs. Die Durchbruchspannungen der vermessenen GaN-Leistungshalbleiter liegen im Bereich zwischen 100 V und 650 V. Die verschiedenen Gehäusevarianten dieser Halbleiter wurden untersucht. Für jeden vermessenen Leistungshalbleiter wurde ein optimierter Treiber entwickelt. Anschließend wurden die Schaltenergien bestimmt.

Am IMAB realisierte Applikationen mit GaN Halbleiterbauelementen

	
<p>Bidirektionaler DC/DC-Wandler für Mildhybrid Anwendungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eingangsspannung: 48 V • Ausgangsspannung: 12 V • Nennleistung: 1200 W • Schaltfrequenz: 500 kHz • Topologie: 4-phasiger Tiefsetzsteller • GaN-Leistungshalbleiter: EPC eGaN-FET 	<p>Solarwechselrichter</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einphasige Netzeinspeisung 230 V • MPP-Tracker und Wechselrichter • Nennleistung: 2 kW • Eingangsspannung: 200...400 V DC • Schaltfrequenz: 170 und 120 kHz • Topologie: Hochsetzsteller und Vollbrückenwechselrichter • GaN-Leistungshalbleiter: RFMD Kaskode PQFN 88
	
<p>On-Board-Ladegerät</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einphasiger Netzanschluss 230 V • Nennleistung: 3 kW • Ausgangsspannung: 360...525 V • Volumen: 2,1 l • Schaltfrequenz: 500 kHz • Topologie: Bridgeless PFC und Vollbrückengegentaktwandler (galvanisch getrennt) • GaN-Leistungshalbleiter: RFMD Kaskode TO-247 	<p>Bidirektionaler DC/DC- Wandler für Satellitenstromversorgungen oder Mildhybrid</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eingangsspannung 25-50 V • Ausgangsspannung 50 V • Nennleistung 5 kW • Schaltfrequenz: 500 kHz • Topologie: 4-phasiger Hochsetzsteller • GaN-Leistungshalbleiter GaN Systems enhancement Mode Top-side gekühlt

Herausforderungen der GaN-Applikationen

Schnell schaltende GaN-Leistungshalbleiter in Applikationen bringen viele Herausforderungen, insbesondere auf dem Gebiet der EMV mit sich, die sich von Applikationen mit Si-Leistungshalbleitern deutlich unterscheiden.

Durch die, verglichen mit Si-Leistungshalbleitern, steileren Spannungs- und Stromsteilheiten haben die parasitären Eigenschaften des Layouts und der verwendeten Bauelemente wesentlichen Einfluss auf das Schaltverhalten und die Funktion der Schaltung. Für gut gedämpfte Schaltvorgänge müssen parasitäre Eigenschaften durch geeignete Layouts stark reduziert werden. Die geeignete Wahl des Gehäuses der Leistungshalbleiter ist hier ebenso wichtig wie die Wahl der Zwischenkreiskondensatoren und deren Anordnung.

Die Treiber müssen nah und induktivitätsarm an die GaN-Leistungshalbleiter angebunden werden. Die hohen Schaltfrequenzen ermöglichen es einerseits kleinere passive Bauelemente einzusetzen, andererseits wird aber die Konstruktion der passiven Bauelemente durch die hohen Frequenzen zunehmend komplizierter. Insbesondere die Anforderungen an die Kernmaterialien der magnetischen Bauelemente steigen.

Die EMV von Schaltungsbestandteilen untereinander in einer GaN-Applikation stellt weiterhin eine große Herausforderung dar. Durch die hohen Schaltfrequenzen und Spannungssteilheiten werden insbesondere Messschaltungen, die zur Regelung benötigt werden stark beeinflusst. Mögliche Abhilfemaßnahmen werden am IMAB erforscht.

Standardisierung induktiver Ladesysteme

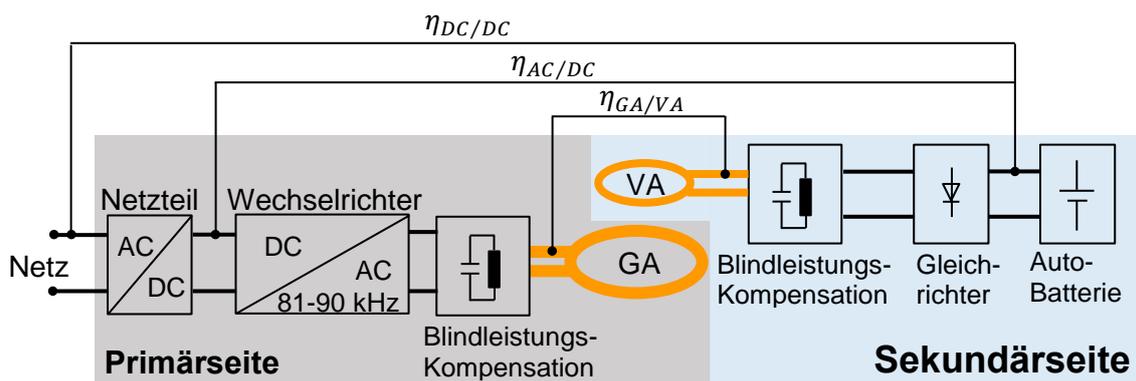
M. Sc. Oleg Schäfer

Induktive Energieübertragung wird aufgrund des potentiellen Komfortaspektes als wichtiger Bestandteil und Treiber der Elektromobilität gesehen. Bei dieser Form der Energieübertragung wird Energie berührungslos von einer Spule auf eine andere Spule übertragen und kann unter anderem zum Laden der Traktionsbatterie elektrifizierter Fahrzeuge genutzt werden. Ein Vorteil ergibt sich hierdurch infolge der Möglichkeit einer Montage der energieabgebenden Einheit innerhalb des Erdreiches wodurch zum einen im öffentlichen Bereich der Verkehrsraum nicht mit den Ladestationen konduktiver Ladesysteme belastet wird und zum anderen ein höherer Schutz vor Vandalismus und vor Witterungseinflüssen gewährleistet werden kann. Darüber hinaus ergibt sich hierdurch der komfortbezogene Vorteil für den privaten Gebrauch infolge der entfallenen Notwendigkeit des häufigen Ein- und Ausstecken eines Stromkabels und einer garantierten sicheren Anwendung.

Forschungsgegenstand

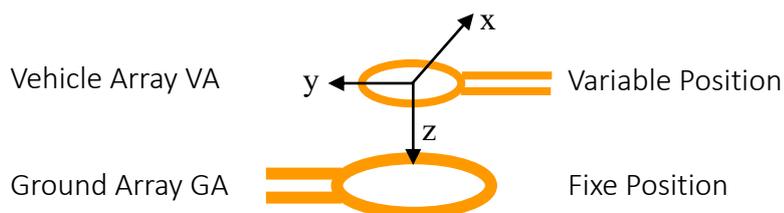
Bei diesem Projekt wird eine Untersuchung der Fähigkeit einer versorgenden Einheit und einer beliebigen fahrzeugseitigen Einheit Energie kontaktlos in sichererer und effizienter Weise zu übertragen durchgeführt. Zu verstehen ist dieser Zusammenhang unter dem Begriff der Interoperabilität. Dabei handelt es sich um eine hersteller- und leistungsübergreifende Standardisierungsvorbereitung mit dem Ziel eine praktische Validierung interoperabilitätsrelevanter Parameter und Funktionen zur effizienten Gestaltung der Markteinführung für den Massenmarkt im Bereich der Elektromobilität zu vollziehen. Ein entscheidender relevanter Parameter hierfür ist der Wirkungsgrad.

Um die Einführung effizient zu gestalten und eine breite Verfügbarkeit an interoperablen Ladestationen zu ermöglichen, soll eine Variantenvielfalt, die beim konduktiven Laden derzeit präsent ist, frühzeitig verhindert werden. Um außerdem hinreichende Attraktivität der Markteinführung induktiver Ladesysteme zu gewährleisten, darf die Einbuße des Wirkungsgrades gegenüber dem bis zu 96 % Energieübertragungs-Wirkungsgrad bei konduktiven Ladesystemen nicht allzu stark ausfallen, sodass die komfortbezogenen Vorteile ausschlagkräftig bleiben. Aus diesem Grund soll im Rahmen der Untersuchungen auch eine Empfehlung an das Design der Übertragungssysteme erfolgen.



Aufbau induktiver Ladesysteme

Zur Evaluierung der Interoperabilität wird ein Prüfstand aufgebaut, an dem unterschiedliche Übertragungssysteme mit unterschiedlichen Spulengeometrien und Kompensationsentwürfen gegeneinander vermessen werden können. Diesbezüglich werden auch die erwarteten Rahmenbedingungen, die bei einer Nutzung induktiver Ladesysteme auftreten können, einbezogen. Das bedeutet, dass unter anderem eine veränderliche relative Position in lateraler und transversaler Richtung der energieaufnehmenden fahrzeugseitigen Spule gegenüber der energieabgebenden Spule berücksichtigt wird. Eine abweichende Position gegenüber der optimalen Position hat einen erheblichen Einfluss auf die Kopplung der Spulen und damit auf die Energieübertragung. Zusätzlich werden Untersuchungen mit unterschiedlichen Spulenabständen durchgeführt, die infolge unterschiedlicher Kraftfahrzeugtypen und Kraftfahrzeugklassen entstehen und ebenfalls Einfluss auf die Kopplung haben.



Schematische Darstellung der Prüf-Prozedur

Elektrifizierung des oszillierenden Aktuators für Mähbalken Grob- und Feinauslegung des Resonanzmotors

M. Sc. Mang Cai, Dipl.-Ing. Quirin Maurus

Anforderungen für die Maschinenauslegung

Aus der Anforderungsermittlung des gesamten Systems gehen für die Auslegung der elektrischen Maschine die in folgender Tabelle zusammengefassten relevanten Daten hervor.

Parameter	Wert
Maximale Schubkraft in kN	1,5
Hub in mm	84
Bewegungsprofil Form/Amplitude/Frequenz	Sinusförmig / 42 mm / 13 1/3 Hz
Max. Stellgeschwindigkeit in m/sec	3,52
Dauerkraft in N für thermische Auslegung	1061
Kühlung Freie Konvektion	
Bauraum in mm	Da: 70 L: 500
Läufergewicht in kg	5 +/- 2

Anforderungen für die Maschinenauslegung

Ableitung des Maschinenkonzepts

Aus Gründen des Gutenflusses ist ein tubularer Aktuator gewünscht, der die benötigte Schubkraft aus der Maschinenlänge und nicht aus dem Durchmesser generiert. Ein derart kompakter Aufbau erfordert eine Permanentmagnet erregte Synchronmaschine.

Daraus ergibt sich eine weitere Anforderung, die der Betriebssicherheit dient. So ist das Magnetsystem innerhalb des Maschinengehäuses zu halten, damit keine Metallteile vom Mähbalken aufgesammelt werden können. Dies und die Forderung eines geringen Läufergewichts führen zu einem Aktuator, der als Langstator mit Innenläufer ausgeführt ist.

Aus Sicht der Maschinenauslegung ist für die Regelung des Aktuators in der Anwendung ein möglichst geringer Krafftrippel zu fordern. Dies begründet sich auf den in der Anwendung angestrebten Resonanzbetrieb. Der Resonanzaktuator ist im Mähbalken permanent im Einsatz bei dem die Bewegungsenergie in den koaxial angeordneten Federn gespeichert wird. Vom Resonanzaktuator sind somit die Verluste, verursacht durch Reibung als auch von Schnittkräften, abzudecken und eine Kraftreserve zur Anregung des schwingfähigen Systems bereitzustellen. Weitere Resonanzfrequenzen können im Betrieb durch die periodisch auftretenden Kraftschwankungen angeregt werden, die durch die Nuten im Stator als auch durch die endlichen Längen von Stator und Läufer verursacht werden. Die Kraftschwankungen des Aktuators können zwar regelungstechnisch reduziert werden, erfordern dann aber eine

hohe Auflösung der Läuferposition, eine schnelle Auswertung des Positionssignals und eine schnelle Regelung. Aus energetischer Sicht führt jede regelungstechnische Minimierung der Kraftschwankungen zu einem erhöhten Energiebedarf. Daher ist dies durch die geringe Krafttripelanforderung an die Maschinenauslegung zu vermeiden.

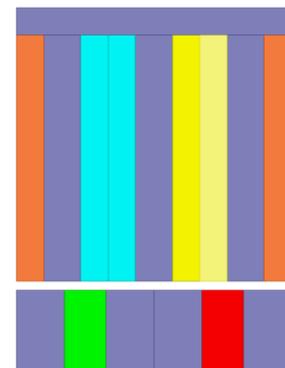
Topologieauswahl - Stator und Wicklung

Da die Kraftschwankungen für die Anwendung eine entscheidende Rolle spielen, sollte eine Maschinentopologie ausgewählt werden, die die Möglichkeit bietet, kleine Kraftschwankungen zu realisieren. Im Falle einer linearen Maschine, bei der der Endeffekt eine starke Kraftschwankung hervorruft, ist eine Maschine aus mehreren Elementarmaschinen für die Unterdrückung der Kraftschwankung sehr vorteilhaft. Dies liegt einerseits daran, dass der Endeffekt lediglich bei einer Elementarmaschine auftritt, welcher nur ein Bruchteil der gesamten Maschine ist. Andererseits kann bei einer Maschine aus mehreren Elementarmaschinen der Ansatz des „Polversatzes“ angewendet werden, welche die Kraftschwankung deutlich reduziert.

Aus diesen Gründen ist die Elementarmaschine so zu wählen, die ausschließlich aus drei Nuten besteht. Die Wicklung ist so ausgeführt, dass drei Nuten zwei Polen im Läufer gegenüberstehen. Unter Berücksichtigung der tubularen Bauform stellt die Verschaltung der Spulen dabei eine innovative Besonderheit dar, da sich der Stromfluss von einer Spule zur nächsten in einem Wicklungsstrang nicht wie sonst üblich umkehrt. Der Wicklungsfaktor ist dadurch maximal.

Rotor

Das Magnetsystem im Läufer ist mit der Sammleranordnung günstiger, da keine radiale Magnetisierung der Ringe erforderlich ist und somit weniger Magnetmaterial durch den Sammlereffekt benötigt wird. Weiterhin vereinfacht sich im Vergleich zur Oberflächenanordnung der mechanische Aufbau des Läufers, der aufgrund der hohen Beschleunigungskräfte robust ausgeführt sein muss. Zu beachten ist, dass sich bei dieser Anordnung die Pole nicht an der Stelle des Magnetmaterials, sondern zwischen den axial magnetisierten Permanentmagneten ausbilden.



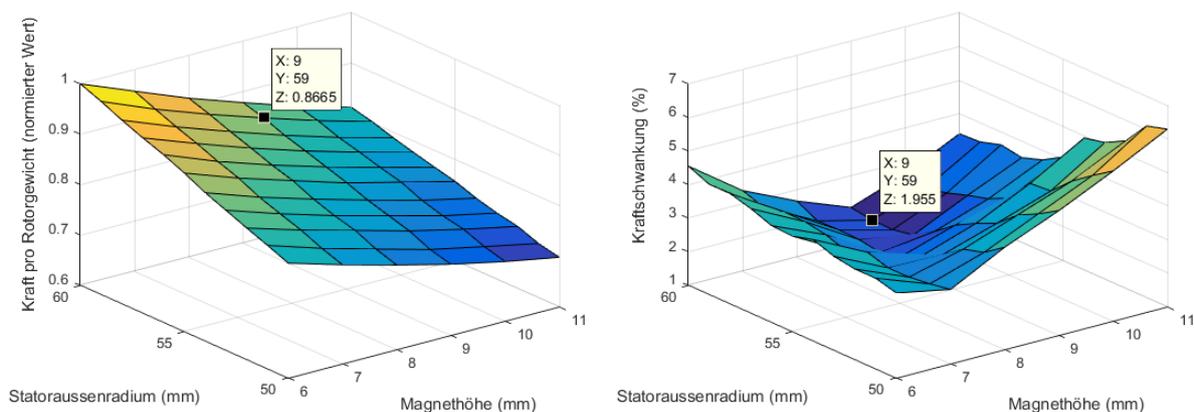
*Elementarmaschine mit
3 Nuten und 2 Polen*

Ergebnisse der Grobauslegung

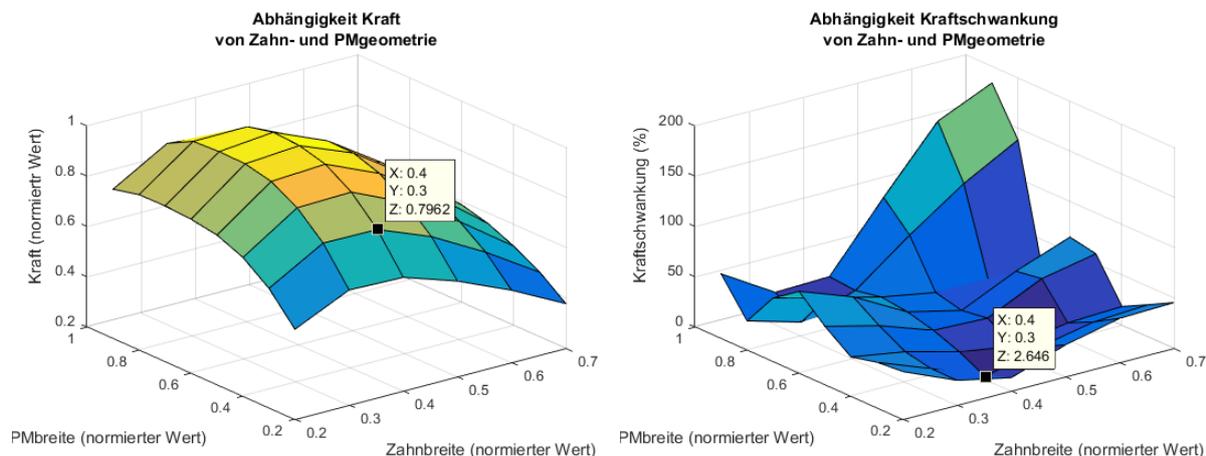
Ziel der Grobauslegung ist die optimale Geometrie einer Elementarmaschine hinsichtlich großer Kraftdichte und kleiner Kraftschwankung zu finden. Um den Kompromiss zwischen Parameterraum und Rechenaufwand zu treffen, wird die Maschine so modelliert, dass der Endeffekt vernachlässigt wird. Dies erfolgt, indem eine periodische Randbedingung für das FEM-Modell eingesetzt wird. Unter dieser Annahme braucht nur eine Elementarmaschine

simuliert werden, welche den Rechenaufwand sehr stark reduziert, so dass es möglich ist, einen großen Parameterraum zu betrachten.

Insgesamt sind 4 Parameter zu untersuchen, welche großen Einfluss auf die Schubkraft und Kraftschwankung ausüben. Dies sind Statoraußenradius, Magnethöhe, Magnetbreite und Zahnbreite, welche in zwei Gruppen aufgeteilt werden. Der Einfluss der jeweiligen Gruppe auf die Schubkraft und die Kraftschwankung ist den folgenden Grafiken zu entnehmen.



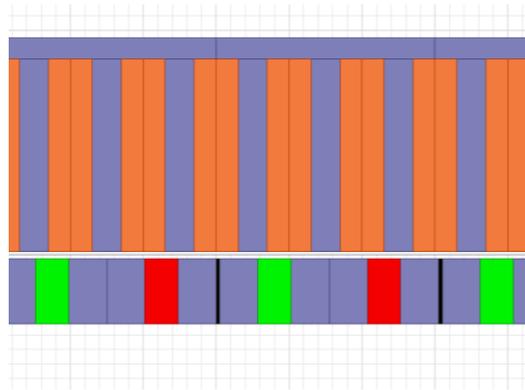
Einfluss der Magnethöhe und des Statoraußenradius auf die Schubkraft und Kraftschwankung



Einfluss der Zahnbreite und Magnetbreite auf die Schubkraft und Kraftschwankung

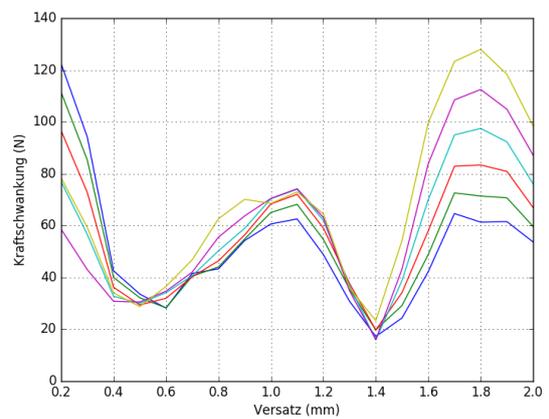
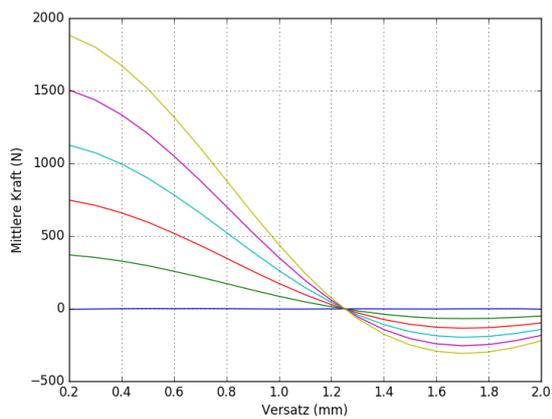
Ergebnis der Feinauslegung

Ziel der Feinauslegung ist die optimale Geometrie der gesamten Maschine zu finden, welche die Kraftschwankung unter Berücksichtigung des Endeffektes minimiert, ohne die Schubkraft stark zu beeinträchtigen. Da die bekannte Maßnahme der Variation der Endzahnbreite nur für eine bestimmte Stromeinspeisung die Kraftschwankung unterdrückt, ist solch eine Maßnahme für einen linearen Resonanzaktuator nicht anwendbar, da für den Betrieb der Maschine alle Stromeinspeisungen möglich sind. Der Ansatz mit dem Versatz zwischen zwei benachbarten Elementarmaschinen („Polversatz“) ist daher erfolgversprechender.



Ansatz des „Polversatzes“

Durch die Variation des Polversatzes ist es möglich, eine kleine Kraftschwankung über die gesamten Stromspeisungen zu realisieren:



Einfluss des Polversatzes auf die Schubkraft und Kraftschwankung bei unterschiedlichen Stromspeisungen

Verwendung von SMC-Materialien im Elektromaschinenbau-Entwicklungen, Ergebnisse und Erfahrungen

Dipl.-Ing. Quirin Maurus

Obwohl Soft Magnetic Composites (SMC) schon lange auf dem Markt sind, ist die Anzahl an realisierten Maschinen, die dieses Material verwenden, begrenzt. SMC ist ein Pulvermaterial, welches in einem pulvermetallurgischen Prozess erst in Form gebracht und anschließend wärmebehandelt wird. Durch Variation der Pulver und der Wärmebehandlung sind die Eigenschaften des Bauteils hinsichtlich Festigkeit oder der magnetischen Eigenschaften optimierbar. Aufgrund der hohen Werkzeugkosten ist die Wirtschaftlichkeit nur in der Massenproduktion zu gewährleisten. Daher bietet inzwischen ein Hersteller für den Versuchsbau ein Prototypenmaterial mit reduzierten magnetischen Eigenschaften an, welches in einer Ebene spanabhebend bearbeitbar ist. Die Weiterentwicklung des Pulvermaterials hat in den letzten Jahren gezeigt, dass im Bereich der Wärmebehandlung Fortschritte erzielt wurden. So konnte durch das Verändern der Isolation die Temperatur von 500 °C auf ca. 600 °C erhöht werden.

In den letzten Jahren wurden am Institut mehrere Maschinen mit SMC Statorelementen berechnet, aufgebaut und vermessen. Es handelt sich dabei nicht um das Prototypenmaterial, so dass hier der pulvermetallurgische Prozess komplett zur Herstellung der Bauteile durchlaufen wurde. Insgesamt sind drei unterschiedliche Pulver und Wärmebehandlungen verwendet worden. Einige Ergebnisse für Somaloy® 500 und Somaloy® 700, die unter Luftatmosphäre wärmebehandelt wurden, sind bereits in den Konferenzen LDIA 2009 und PEMC 2010 veröffentlicht. Die neuesten Ergebnisse beziehen sich auf eine Weiterentwicklung eines tubularen Linearmotors. Hier konnte Somaloy® 1000, welches unter Dampf Atmosphäre wärmebehandelt wurde, eingesetzt werden.

Nach der erfolgreich durchgeführten Machbarkeitsstudie mit einem luftgekühlten tubularen Linearmotor, der berechnet, aufgebaut und auf Prüfständen vermessen wurde, ist die Weiterentwicklung für den Einsatz im Automobil bestimmt. Dadurch ist der verfügbare Bauraum derart limitiert, dass eine Maschine mit hoher Kraftdichte und kompaktem Aufbau erforderlich ist. Um dies zu erreichen, ist eine hochpolige PMSM mit Außenläufer ausgelegt worden. Im Läufer befinden sich die Oberflächenmagnete und der Eisenrückschluss, so dass die aktiv wirkende Fläche zur Krafterzeugung maximal ist. Die Reduzierung der Magnethöhe ist aufgrund der Fertigung limitiert. Realisiert ist eine Höhe von 3 mm. Die hohe Polzahl und die geringe Magnethöhe ermöglichen eine geringe Läuferjochhöhe. Der Luftspalt zwischen Läufer und Stator beträgt fertigungsbedingt 1 mm. Der innenliegende Stator trägt die Wicklung. Um den Magnetkreis maximal auszunutzen, ist ein hoher Wicklungsfaktor erforderlich. Dieser ist zwar für die verteilte Wicklung am höchsten, die Anzahl der erforderlichen Nuten bei einer hochpoligen, dreiphasigen Maschine verringert jedoch den für den Statorzahn benötigten Bauraum. Dadurch wird der Statorzahn früher in die Sättigung getrieben. Eine bessere Ausnutzung des Magnetkreises konnte mit einer Einzelzahnwicklung erreicht werden. Die ausgelegte Maschine besteht aus einer Elementarmaschine mit 24 Nuten

und 22 Magnetpolen. Der Wicklungsfaktor beträgt 0,958. Der Stator ist modular aus einzelnen Scheiben aufgebaut, wobei eine Scheibe einen Statorzahn und eine Nut beinhaltet. Der niedrige Flächeninhalt der Statorscheibe ermöglicht es, diese in einem Stück bei 800 MPa zu pressen. Für die Verschaltung der Einzelzahnspeulen befinden sich Innen und Außen an der Statorscheibe Nuten, die zusammengesetzt einen Kanal ergeben. Das Design der Statorscheibe wurde derart angepasst, dass der Kupferfüllfaktor in der Nut maximal wird. Die Statorscheibe ist in Abbildung 1 dargestellt.



Statorscheibe des tubularen Linearmotors

Die geforderte Spitzenkraft wird bei einem Spitzenwert für die Stromdichte von etwa 25 A/mm² erreicht. Um die thermische Festigkeit zu gewährleisten, benötigt die Maschine eine aktive Wasserkühlung. Diese ist im Innern des Rohres, welches den Stator trägt, integriert. Weiterhin befindet sich hier der Pollagegeber, so dass ein sehr kompakter Aufbau entsteht. Mit dieser Auslegung konnte eine Kraftdichte von bis zu 49 kN/m² erreicht werden. Die Maschinendaten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Name	Wert
Maschinentyp	PMSM
Elementarmaschine	12-2-2-22
Magnetmaterial	N42UH
Statorjochmaterial	Somaloy® 1000 3P
Läuferjochmaterial	Eisen
Luftspalt	1.0 mm
Max. Stromdichte	25.3 A/mm ²
Max. Kraftdichte	49 kN/m ²

Maschinendaten

Einige Einzelteile des Linearmotors wurden von Zulieferern gefertigt. Kleinteile sowie die Wicklung konnten in der institutseigenen Werkstatt hergestellt werden. Nach der Montage aller Bauteile am IMAB konnte der im Jahresbericht 2014 dargestellte Prüfstand verwendet werden, um den Linearmotor in Betrieb zu nehmen und die Auslegung zu validieren. Das Gesamtprojekt ist mit der erfolgreichen Inbetriebnahme des Linearmotors in der Anwendung abgeschlossen worden.

EMILIA – Der e-Golf ohne Ladekabel

M. Sc. Tim-Hendrik Dietrich

Die Elektromobilität und ihre Umsetzung ist aktuell ein gesellschaftsübergreifendes Thema, das von Für- und Widersprechern hitzig diskutiert wird. Neben vielen Vorzügen der Elektromobilität existieren noch einige Einschränkungen, die dem vollständigen Ersatz der VKM im Kraftfahrzeug entgegenstehen. Ein Hindernis ist die geringere Reichweite bedingt durch die begrenzte Batteriekapazität, das andere ist die nicht flächendeckende Ladeinfrastruktur.



*EMILIA-Fahrzeug zusammen mit der EMIL-Flotte
bei der Braunschweiger Verkehrs GmbH (Bild: BS Verkehrs GmbH)*

Durch die geschickte Verknüpfung von geeigneten Fahrprofilen und innovativer Ladetechnologie lassen sich die Einschränkungen der Batterietechnik für bestimmte Anwendungen aber auch abdämpfen. Ein weithin bekanntes Beispiel sind die EMIL-Busse in Braunschweig. EMIL („Elektromobilität mittels induktiver Ladung“) dient als Forschungsprojekt für die Anwendung von Elektromobilität im öffentlichen Personennahverkehr. Das Besondere: EMIL lädt an der Haltestelle kabellos und während der regulären Fahrgastumstiegszeiten. Ermöglicht wird dies durch ein im Haltestellenboden eingelassenes Spulensystem, das während des Ladens ein magnetisches Wechselfeld erzeugt. Am Unterboden des Busses ist eine entsprechende Aufnehmerspule (sog. „Pickup“) angebracht, in die durch das Wechselfeld eine Spannung induziert wird. Die zum Laden der Busbatterien notwendige Energie wird damit ohne elektrische Kontakte und mit bis zu 200 kW Leistung in das Fahrzeug übertragen. Mit nur wenigen elektrifizierten Haltestellen kann damit der Braunschweiger Stadtring in eine Umlaufrichtung völlig elektrisch betreiben werden, denn die Fahrzeugbatterie wird bei jedem Halt an einer ausgerüsteten Haltestelle mit hoher Leistung nachgeladen.

Neben dem ÖPNV weisen auch andere Fahrzeuge ein ähnliches Fahrprofil auf, das eine Nutzung der induktiven Ladestruktur als lohnenswert erscheinen lässt. Taxis im Stadtverkehr fahren häufig bestimmte Punkte in einer Stadt an, an denen sich oftmals auch ein Taxistand findet (Bahnhöfe, Flughäfen etc.). An diesen Stellen könnte mit wenig Infrastrukturbedarf eine E-Taxiflotte eingesetzt werden.

Mit der Frage, ob es durch Modifikation eines Elektro-PKW möglich ist die in Braunschweig schon vorhandene Infrastruktur auch für Taxis nutzbar zu machen, befassen sich zu diesem Zweck die TU Braunschweig (IMAB, elenia und IVA) mit den Projektpartnern BS-Netz und der Braunschweiger Verkehrs GmbH in dem vom BMVI-geförderten Projekt „InduktivLaden“. Seit 2014 wird am IMAB auf den einzelnen Arbeitsfeldern zur Umrüstung des E-Golfs auf induktive Ladetechnik geforscht.

Das Funktionsprinzip ist dem der Busse ähnlich, die eingesetzten Komponenten im Fahrzeug sind jedoch komplett neu entwickelt worden:

Zunächst schaltet das Fahrzeug über seine Funkantennen die Bodenstation ein. Dadurch wird am Fahrzeugunterboden mittels der Aufnehmerspule eine Spannung induziert, die dann vom Ladesystem im Fahrzeug so gewandelt werden muss, dass der Fahrzeugbatterie entsprechend den Anforderungen der Fahrzeugladeschnittstelle der notwendige Ladestrom zugeführt wird. Zu diesem Zweck wird die induzierte Spannung zunächst gleichgerichtet und dann über den Ladestromsteller so angepasst, dass der gewünschte Ladestrom in die Fahrzeugbatterie fließt. Die Kommunikation zum Fahrzeug wird dabei über die fahrzeugseitige CCS-Schnittstelle realisiert, sodass die Eingriffe in die Fahrzeugelektronik sehr gering ausfallen.



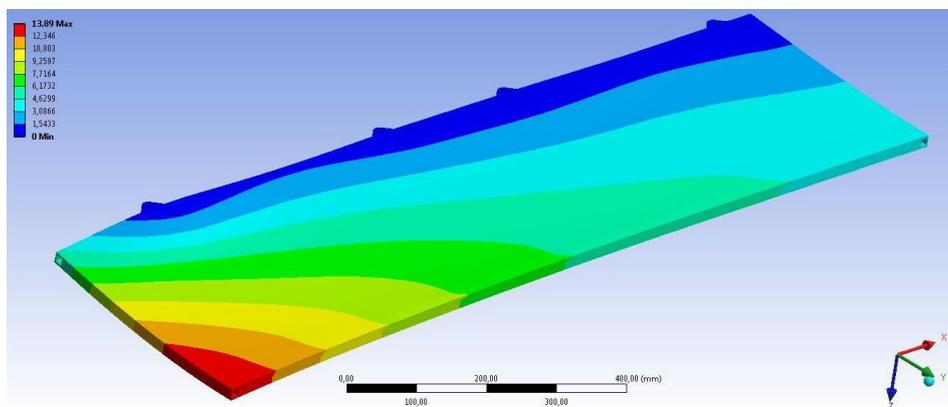
Ladekonzept am e-Golf

Während des Ladevorgangs sendet das Fahrzeug fortlaufend Daten zur Primärstation

Aufnehmerspule (als fertige Baugruppe mit „Induktivaufnehmer“ bezeichnet)

Nachdem schon 2014 die magnetische und elektrische Auslegung der Aufnehmerspule durchgeführt und anhand von Labormustern überprüft wurde, galt es die entstandene Technik in eine am Fahrzeug einsetzbare Form zu überführen. Neben den konstruktiven Anforderungen wie beispielsweise die Nutzung geeigneter Befestigungspunkte am Fahrzeugunterboden mussten bei der Entwicklung auch der äußere Einfluss von Wasser, Salz, Erschütterungen und Steinschlag berücksichtigt werden. Im Rahmen der vollständig am

Institut durchgeführten Konstruktionsarbeiten konnten für alle diese Anforderungen Lösungen gefunden werden. Der Induktivempfänger besteht aus einer verschweißten Aluminiumrahmenkonstruktion, die auf der Unterseite aus funktionalen Gründen mit Kunststoff verkleidet ist. Das innenliegende Spulensystem ist vollständig elastisch vergossen und damit vor äußeren Einwirkungen, insbesondere Feuchtigkeit und Korrosion geschützt. Der Induktivempfänger ist im Bereich zwischen den Achsen und somit außerhalb der Knautschzonen des Fahrzeugs angeordnet. Insbesondere die Fragestellung der mechanischen Stabilität während der Fahrt wurde im Detail untersucht. Dabei wurden sowohl Szenarien starker Beschleunigung und Verzögerung betrachtet, als auch die mechanische Schwingungsanregung des Empfängers durch Erschütterungen im Fahrbetrieb (Straßenbelag, Bodenwellen etc.). Mittels computergestützter Festigkeitsanalysen konnte schon bei der Konstruktion Rücksicht auf die notwendige Steifigkeit genommen werden. Erste Testfahrten mit den Prototypen konnten die errechneten Auslegungen bestätigen.



Festigkeitsanalyse

Mittels Festigkeitsuntersuchungen wurden die Belastungen des Induktivempfängers im Fahrbetrieb nachgebildet und untersucht. Ferner wurden die Fahrzeuge rund um den Induktivempfänger am Unterboden um eine Unterbodenverkleidung ergänzt, die einerseits das magnetische Wechselfeld vom Fahrzeugunterboden abschirmt und zum anderen mechanischen Schutz bietet. Der verbaute Induktivempfänger wurde dem TÜV vorgeführt und das erste ausgerüstete Fahrzeug erlangte die Freigabe zum Fahrbetrieb mit dem modifizierten Unterboden.



Induktivempfänger am Fahrzeugunterboden (schwarz mit Institutschriftzug) und Unterbodenschutz aus Aluminiumblech

Ladestromsteller

Mit Hilfe des Ladestromstellers wird die vom Induktivempfänger gelieferte Spannung so gewandelt, dass die Fahrzeugbatterie entsprechend mit dem vom Ladesystem des Golfs geforderten Ladestrom gespeist wird. Als Topologie für den Ladestromsteller wird ein dreisträngiger Tiefsetzsteller mit phasenverschobener Ansteuerung der einzelnen Stränge eingesetzt. Diese Schaltung bietet den Vorteil, dass durch den phasenverschobenen Betrieb Auslöschungseffekte der einzelnen Strangströme entstehen, die den Filterbedarf und damit das Volumen der notwendigen passiven Komponenten verkleinern. Zur weiteren Verkleinerung der Komponenten kann die Taktfrequenz des Stellers erhöht werden, wobei mit Erhöhen der Taktfrequenz auch eine Erhöhung der Schaltverluste einhergeht. Um diesen Effekt zu vermindern werden im Steller neuartige, auf Siliziumkarbid basierende Halbleiterschalter eingesetzt, die sich u. A. aufgrund kurzer Schaltzeiten als verlustarme Schalter für hohe Taktfrequenzen eignen. Es konnte damit ein Tiefsetzsteller mit 80 kHz Taktfrequenz entwickelt werden, der dennoch mit Luftkühlung betrieben werden kann.

Peripherie im Fahrzeug

Nachdem im zweiten Halbjahr 2015 alle zur Inbetriebnahme des Systems notwendigen Komponenten als Prototypen verfügbar waren, konnten Versuche mit dem Gesamtsystem erfolgen. Kernaufgabe war dabei ein ordnungsgemäßes Zusammenspiel aller beteiligten Komponenten herzustellen und zusätzlich auch schon die Anforderungen für den späteren Betrieb im Fahrzeug zu berücksichtigen. Im Frühjahr 2016 erfolgte dann der erste Ladevorgang mit dem funktionsfähig zusammengebauten Fahrzeug. Dank der eigens für das Projekt im Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) errichteten Versuchsladestation konnten die Forschungen ohne Komplikationen mit dem Linienbetrieb der EMIL-Busse vorgenommen werden. Neben Versuchen auf der Versuchsladestation muss die Funktionalität des Ladesystems auch auf den in Braunschweig installierten Ladestationen überprüft werden. Zu diesem Zweck stellte die Braunschweiger Verkehrs GmbH ihre Ladestation im Busdepot zur Verfügung.



Fertige IMAB-Induktivempfänger auf dem Ladepad im NFF

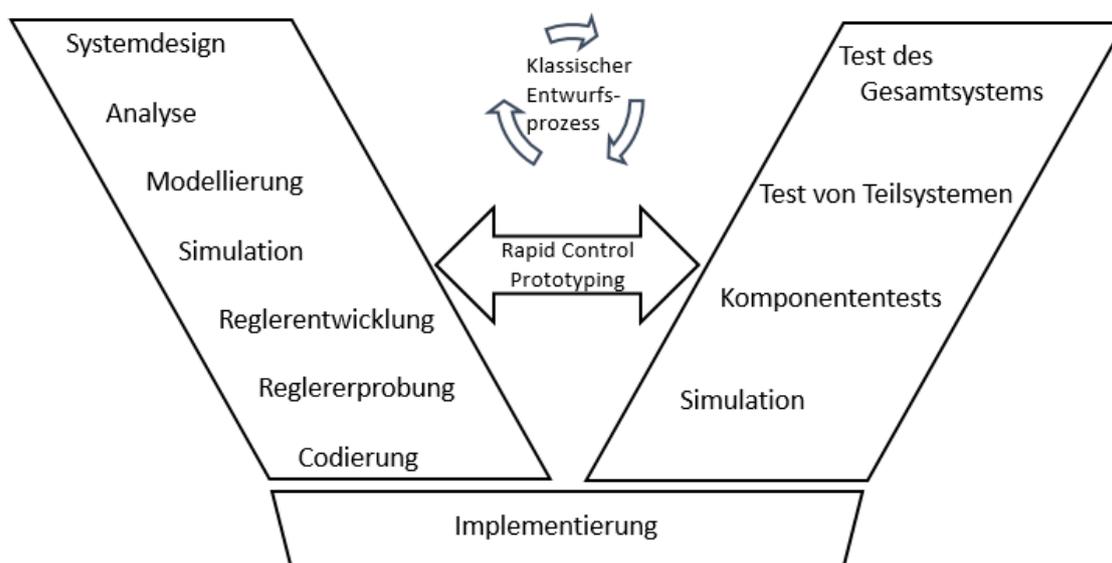
Prüfstand zum Test und Vergleich von Regelstrukturen

Dipl.-Ing. Anna-Lena Menn

In den vergangenen Monaten wurde am IMAB eine Prüfstands Umgebung, als Teil des sehr verbreiteten Entwicklungsprozess „Rapid Control Prototyping“, für Regelkonzepte elektrischer Maschinen am IMAB realisiert.

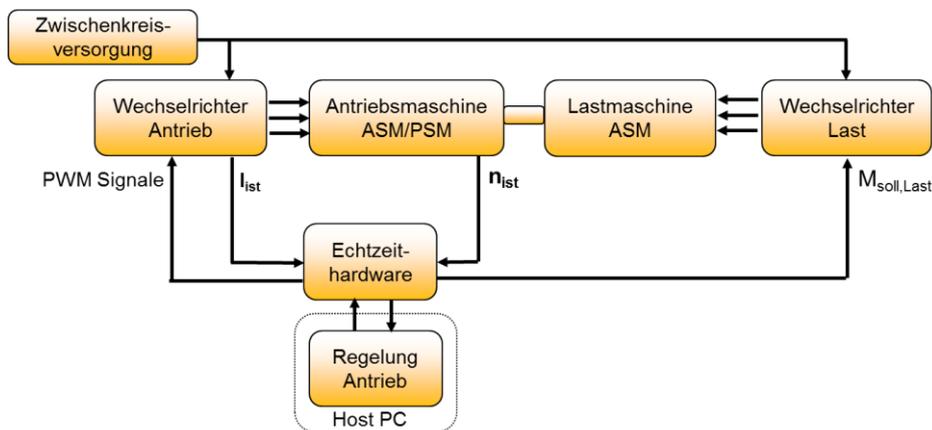
Dieser Entwicklungsprozess unterscheidet sich von klassischen Entwicklungsprozessen (Abb.1) dahingehend, dass einzelne Phasen des Prozesses nicht zwingend in einer bestimmten Reihenfolge durchlaufen werden müssen. Besonders betroffen sind hiervon die Phasen Test, Simulation und Analyse. Bestehend bleibt die Einteilung in verschiedene Entwicklungsschritte wie Spezifikation/Anforderung an das Zielsystem, Grob – und Feinentwurf, Simulation, Komponententest und Analyse.

Im Gegensatz zu der Vorgehensweise im klassischen Entwicklungsprozess ist es beim Rapid Control Prototyping möglich bereits frühzeitig Testphasen durchzuführen und somit auch horizontale Iterationsschleifen zu durchlaufen. Somit ist man in der Lage direkt nach der Reglerentwicklung seine korrekte Funktion an einer Komponente zu testen [1].



Darstellung der Entwurfsprozesse

Das Rapid Control Prototyping wurde genutzt um sensorlose Regelverfahren für eine permanentmagnet-erregte Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten und eine Asynchronmaschine mit Käfigläufer zu implementieren. Hierfür soll der Abbildung gezeigte Prüfstandsaufbau als Zielsystem dienen.



Realisierter HiL Prüfstands Aufbau

Begonnen wurde für beide Antriebsmaschinen gleichermaßen mit der Systemsimulation der Regelung mit Hilfe der Software SIMULINK.

Diese Simulation berücksichtigt noch keine Echtzeit und enthält die gesamte Modellierung der sensorlosen, feldorientierten Regelung und der Regelstrecke (Antriebsmaschine) in rotorfesten Feldkoordinaten, die Lastmaschine wird zunächst nur in der Modellierung der Mechanik berücksichtigt. Die Reglerauslegung- und parametrierung konnte implementiert und direkt im Anschluss getestet werden.

Nach erfolgreich abgeschlossener Systemsimulation folgten der Aufbau und die Durchführung der Hardware-in-the-Loop-Simulation. Beide Wechselrichter werden von einer Spannungsquelle, die eine feste, einstellbare Zwischenkreisspannung ermöglicht, gespeist.

Als Antriebs- und Lastmaschine sind zwei Servomotoren aus der 15kW Leistungsklasse ausgewählt worden. Die Lastmaschine ist eine Servo-Asynchronmaschine, als Prüfling kann sowohl ein Servo-Synchronmotor als auch ein Servo-Asynchronmotor eingesetzt werden.

Der Wechselrichter der Lastmaschine verfügt über eine integrierte Regelung, so dass lediglich die Sollwerte, die Reglerfreigabe und die Drehrichtungsvorgabe von der Echtzeithardware an den Wechselrichter übermittelt werden müssen. Der Wechselrichter der Antriebsmaschinen muss extern geregelt werden und benötigt somit von der Echtzeithardware bzw. aus dem Regelungsblock erzeugte PWM Signale, aus denen dann die jeweiligen Strangspannungen gestellt werden können. Für die praktische Regelung mit der Echtzeithardware muss somit eine Pulsweitenmodulation hinzugefügt werden.

Der Host-PC ist über eine Ethernetverbindung mit der Echtzeithardware verbunden und dient als HMI, auf diesem ist das graphische User-Interface installiert (GUI), wodurch die Eingabe der Sollwerte und die Änderung verschiedener Parameter durch den Bediener erfolgen können. Weiterhin läuft auf dem Host-PC die Regelung der Antriebsmaschine in Simulink.

Weitere notwendige Strukturanpassungen sind die Filterung der gemessenen Ist-Größen mit dazugehöriger Auslegung und die Offsetbereinigung der Stromsensoren.

Das Prinzip der sensorlosen Regelung der Asynchronmaschine basiert im vorliegenden realisierten Fall auf der Schätzung der elektromotorischen Kraft des Motors, diese wird im

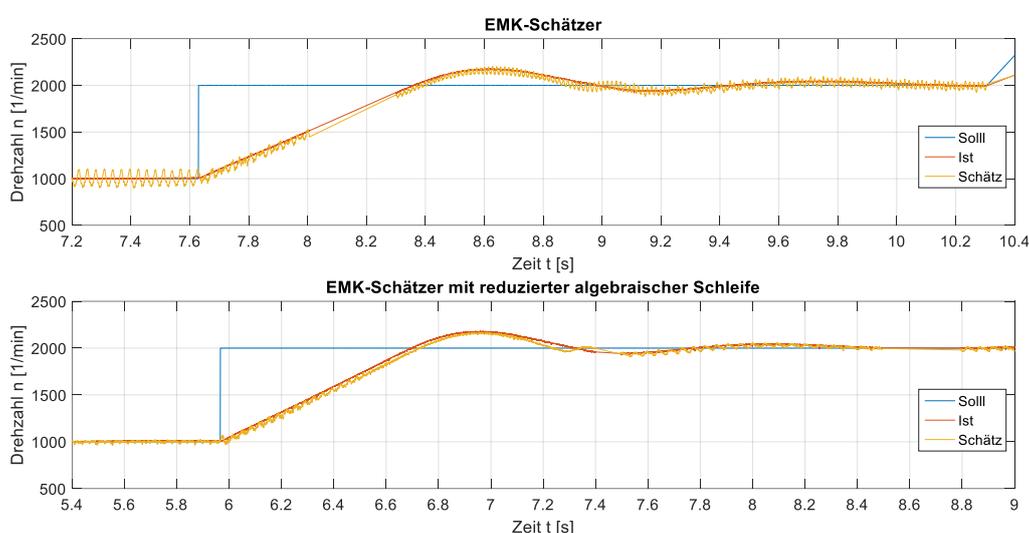
feldorientierten Koordinatensystem durch die Hauptfeldspannung repräsentiert. Ausgangspunkt der Drehzahl-schätzung ist die Querkomponente der Hauptfeldspannung in Feldkoordinaten:

$$u_{Hq} = L_0 \omega_{mR} i_{mR} = u_{Sq} - (R_S i_{Sq} + L_\sigma \frac{d}{dt} i_{Sq} + \omega_{mR} L_\sigma i_{Sd})$$

Diese Gleichung enthält die gesuchte zu schätzende Flussfrequenz:

$$\frac{d}{dt} \rho_M = \omega_{mR,M} = \frac{u_{Sq,M} - (R_S i_{Sq,M} + L_\sigma \frac{d}{dt} i_{Sq,M} + \omega_{mR,M} L_\sigma i_{Sd,M})}{L_0 i_{mR,M}}$$

Die folgende Abbildung zeigt den Drehzahlverlauf bei einem Sollwertsprung von 1000 1/min auf 2000 1/min.



Drehzahlverlauf der feldorientierten Regelung für eine ASM

In beiden Fällen ist zu erkennen, dass die sensorlose und die sensorbehaftete Regelung eine identische Regelgüte aufweisen.

Bei dem Sollwertsprung im unteren Teil der Abbildung erfolgt die Bestimmung der Zustandsgröße, der Flussfrequenz, mit Hilfe einer reduzierten algebraischen Schleife im Schätzer. Durch eine Änderung in der Berechnung der Flussfrequenz (Gleichung 2) entfällt die Rückführung des aktuellen Frequenzwertes an den Eingang des Schätzers.

Dies führt dazu, dass der Schätzer weniger schwingungsanfällig ist und somit auch der Drehzahlverlauf weniger Schwingungen aufweist.

Neuartige hochintegrierte Strommessmethode für Antriebsumrichter

*Zusammenfassung eines Beitrages zur IEEE APEC 2016, Long Beach, USA, 20.-24.03.2016
von Jonas Jäger und Dipl.-Ing. Niklas Langmaack*

Rogowskispulen werden üblicherweise als Stromsonden für tragbare Messgeräte sowie fest installierte Stromsensoren in industriellen Anwendungen eingesetzt. Der entscheidende Nachteil von Rogowskispulen und jedem anderen induktiven Stromsensor ist, dass eine Gleichstromkomponente nicht erfasst werden kann, sondern aus dem Messsignal herausgefiltert werden muss. Dies macht diese Art von Stromsensoren üblicherweise für den Einsatz in Antriebsumrichtern ungeeignet.

Mit der im Folgenden vorgeschlagenen Sensoranordnung und einer speziellen Auswertetechnik können nun jedoch Rogowskispulen verwendet werden, um sowohl die Wechsel- als auch die Gleichstromkomponente des Laststroms der Halbbrücke eines Wechselrichters zu messen.

Grundprinzip von Rogowskispulen

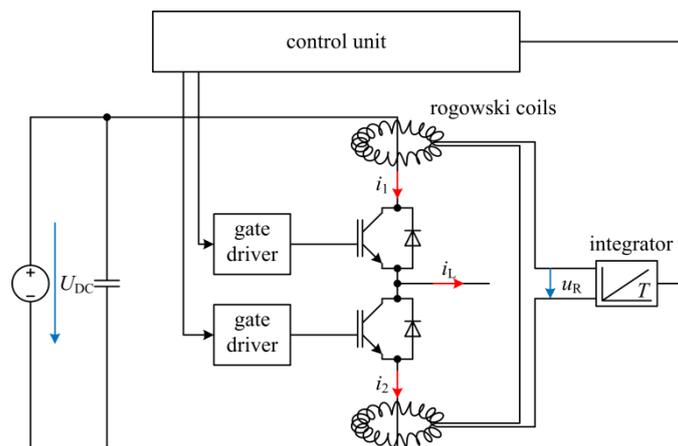
Eine Rogowskispule kann als ringförmige Luftkernspule realisiert werden, die den Leiter mit dem zu messenden Strom umgibt. Die Ringspule sammelt bildlich gesprochen das Magnetfeld entlang einer geschlossenen Schleife um den zu messenden Strom ein. Die in der Spule induzierte Spannung ist nun proportional zur zeitlichen Ableitung des zu messenden Stromes. Ein Integrator wird verwendet, um wieder das Stromsignal im Zeitbereich zu erhalten. Die Gleichstromkomponente des Ausgangssignals muss mit einem Hochpassfilter gefiltert werden, da die Integrationskonstante unbekannt ist.

PCB-Implementierung von Rogowskispulen

Die Rogowskispulen in Wechselrichtersystemen können mittels PCB-Technologie besonders preiswert und mit hoher Präzision realisiert werden. Die Spulenwicklungen bestehen dabei aus Kupferbahnen auf der oberen und unteren Schicht einer Leiterplatte und verbindenden Durchkontaktierungen.

Wechselrichterhalbbrücke mit Rogowskispule zur Laststrommessung

Zur Messung der Wechsel- und Gleichstromkomponente des Laststroms ist der Sensor um die DC-Anschlüsse der Halbbrücke angeordnet. Das Messsignal wird entsprechend der Halbbrücken-Schaltsignale ausgewertet. Über die Information des Schaltzustands der Halbbrücke kann die Gleichstromkomponente aus dem gemessenen Signal bestimmt werden, indem die Differenz zweier aufeinander folgender Werte berechnet wird.



$$u_R = M \cdot di_1/dt + M \cdot di_2/dt$$

$$i_1 = i_L, i_2 = 0, \text{ when high-side switch turned on}$$

$$i_1 = 0, i_2 = -i_L, \text{ when low-side switch turned on}$$

Schaltbild einer Halbbrücke mit beschriebener Stromsensoranordnung

Die Amplitude der induzierten Spannung des Sensors kann verdoppelt werden, indem die vorgeschlagene Spulenanordnung mit in Reihe verschalteten Sensoren um beide DC-Anschlüsse verwendet wird. Im Normalbetrieb ist das di/dt in beiden Leitern (i_1, i_2) gleich, so dass das Signal seine Form nicht verändert, sondern nur seine Skalierung.

Auswertungsmethode

Der Ausgang der Rogowskispule ist direkt mit einer analogen Integratorschaltung verbunden. Die besten Ergebnisse für diese Anwendung lassen sich mit einer einfachen Schaltung mit einem einzigen OPV erreichen. Die Auslegung des Integrators ist dabei mitentscheidend für die Leistungsfähigkeit des Sensors. Die Bestimmung der Bauteilwerte und der Filtergrenzfrequenzen ist jedoch relativ einfach, da das maximale di/dt , der typische Strombereich und die Abtastrate bekannt sind.

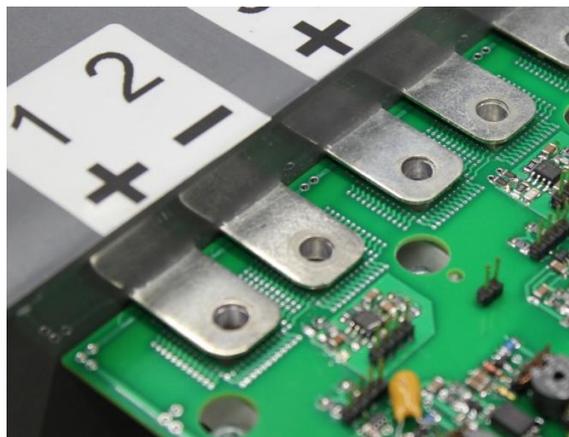
Der Laststrom eines Wechselrichterzweiges kann dann leicht aus dem Zwischenkreisstrom der Halbbrücke und dem Schaltzustand der Leistungshalbleiter der Halbbrücke bestimmt werden, da regelmäßig Zustände erreicht werden, in denen der Strom sicher Null beträgt.

Prototyp

Bei dem ersten aufgebauten Prototyp werden typische Komponenten aus automotiven oder industriellen Antriebsumrichtern verwendet. Die Zwischenkreisspannung soll 560 V bis 700 V betragen, die Nennausgangsleistung beträgt ca. 200 kW.

Der Demonstrations-Wechselrichter besteht nur aus einem DC/AC-Wandler, sodass er eine einzige B6-Brückenschaltung verwendet. Ein gängiges Sixpack-IGBT-Modul (EconoPACK, 1200 V / 450 A) wird ausgewählt. Der Zwischenkreiskondensator (MKP-Folienkondensator, 1 mF / 900 V) stammt aus einem Automotive-Wechselrichter und passt perfekt an die Klemmen des IGBT-Moduls, was zu einer sehr kleinen Zwischenkreisinduktivität führt.

Der Inverter wird durch die Gate-Treiberschaltungen für die sechs IGBTs und ein Controllerboard mit allen notwendigen Schnittstellen vervollständigt. Der implementierte Leiterplatten-Rogowski-Sensor und seine Auswerteelektronik sind für den erwarteten Spitzenstrom von 450 A und einen gewissen Sicherheitsabstand ausgelegt und werden direkt auf der Gatetreiberplatine integriert, wie im Bild zu erkennen ist.

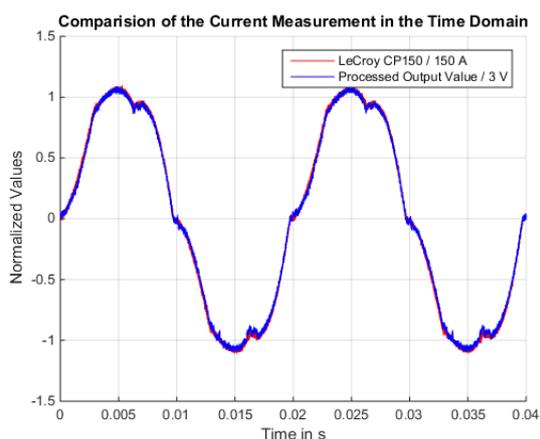


PCB-Rogowskispulen zwischen IGBT-Modul und ZK-Kondensator

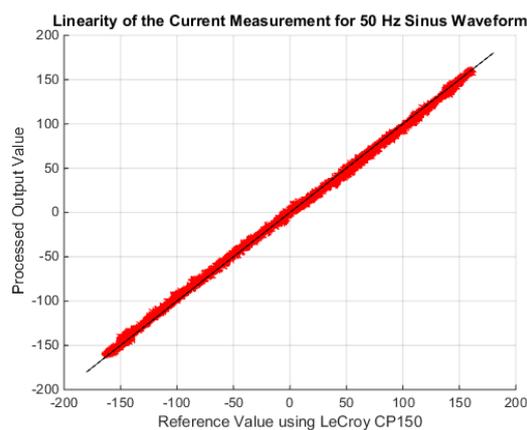
Ergebnisse und Fazit

Der Wechselrichter speist einen nahezu sinusförmigen Strom. Die Referenzmessung erfolgt mit einer genauen Strommesszange CP150 von LeCroy.

Die Messung im Zeitbereich bei einem Spitzenstrom von 150 A bestätigten eine gute Annäherung der durch Sensor- und Auswerteverfahren gemessenen Stromform mit der Referenzmessung.



Vergleichsmessung im Zeitbereich



X-Y Darstellung der Messergebnisse

Das ausgewertete Sensorsignal weist gegenüber dem der externen Stromsonde über 5 Perioden betrachtet einen effektiven Fehler (Linearität und Rauschen) von ca. 2% des Nennstroms von 450 A auf. Zunächst ist das zufriedenstellend, da es noch einige Verbesserungsmöglichkeiten gibt. Die behandelte Strommessmethode hat das Potential, die gängigen Hall-Effekt-basierten Stromsensoren in Antriebsumrichtern zu ersetzen, wenn Gewicht und Raum wichtige Faktoren sind. Folgende Vorteile sind aktuell zusammenzufassen:

- Implementierbar mit Standard-PCB-Technologie (preiswert, gut reproduzierbar)
- Auch für Anwendungen mit höheren thermischen Anforderungen interessant
- Prinzip ist sehr skalierbar und gut für hohe Stromstärken realisierbar
- Messverfahren sehr linear und Varianz zwischen den drei aufgebauten Phasen niedrig
- Laufende Untersuchungen zur Optimierung des Layouts, zur Anpassung der Integratorverstärkung und zur Temperaturabhängigkeit

Treiberschaltung mit hoher Temperatur- und Gleichtaktspannungsfestigkeit für Wide-Band-Gap Leistungshalbleiter

Zusammenfassung des Beitrages zur IEEE PEDS 2015, Sydney, Australia, 09.-12.06.2015

von Jonas Jäger und Dipl.-Ing. Niklas Langmaack

Einleitung

Wide-Band-Gap Leistungshalbleiter (WBG) wie Siliziumcarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) werden immer interessanter, da sie im Vergleich zu ihren Silizium-Gegenstücken höhere Schaltgeschwindigkeiten und höhere zulässige Sperrschichttemperaturen in Ausblick stellen.

Durch höhere Schaltgeschwindigkeiten steigt der Aufwand für die Handhabung der entstehenden elektromagnetischen Störungen (EMI). Für eine geeignete Gate-Treiberschaltung sind die Reduzierung der Gesamtsollationskapazität und die Erhöhung der Gleichtaktunterdrückung (CMR) die zentralen Aufgaben.

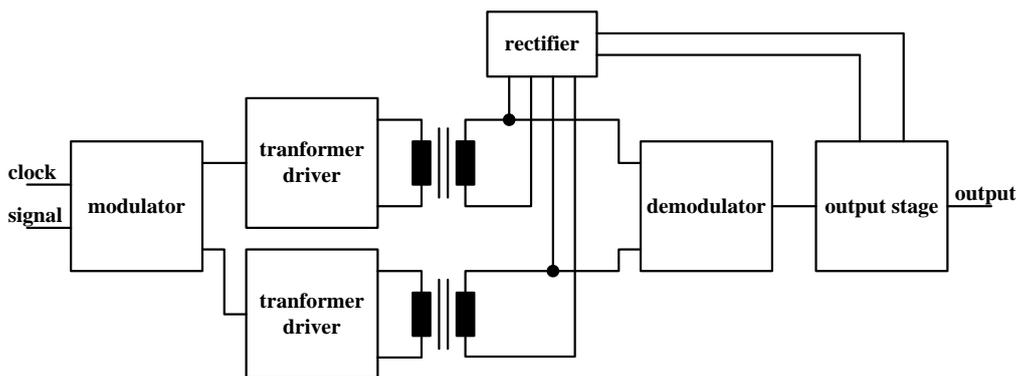
Höhere zulässige Temperaturen bedeuten zunächst weniger Kühlaufwand, aber auch höhere thermische Anforderungen an den Gate-Treiber, und versprechen einen Einsatz bei fordernden Anwendungen wie Bohrlochbohrungen, Luftfahrtelektronik und Hybridfahrzeugen.

Die entwickelte Topologie soll die bestehenden Grenzen aktueller Gate-Treiberschaltungen auf dem Gebiet der CMR und der Umgebungstemperatur erweitern.

Konzept der Schaltung

Die Gleichtaktbeanspruchung einer Gate Treiberschaltung wird durch den maximalen Spannungsgradienten (du/dt) definiert. Parasitäre Kopplungskapazitäten führen einen Umladestrom ($i = C \cdot du/dt$) mit sich, der bei unsymmetrischen Schaltungen ein differentielles Störsignal verursachen kann. Demnach können hohe Gleichtaktunterdrückung und hohe du/dt -Festigkeit erreicht werden, indem die Kopplungskapazitäten minimiert und symmetrische Strukturen erzeugt werden.

Das dargestellte Konzept beruht auf zwei identischen Transformatoren mit identischen Ansteuerschaltungen, die gemeinsam die galvanisch getrennte Spannungsversorgung der Treiberschaltung gewährleisten. Zur galvanisch getrennten Übertragung des Schaltsignals kann die Phasenlage der Transformatorspannungen zu einander genutzt werden. Die Schaltinformationen werden hierbei durch Phasenumtastung (PSK) moduliert, d. h. eine Phasenverschiebung von 0° zwischen den Spannungen der beiden Transformatoren bedeutet z. B. "Ausschalten" und eine Phasenverschiebung von 180° bedeutet "Einschalten".



Grundkonzept der Schaltung

Die PSK-Modulation hat den Vorteil, dass keine Signalverzögerungszeit oder Bandbreitenbegrenzung durch das Trägersignal verursacht wird. Damit ist die optimale Schaltfrequenz für den DC / DC-Wandler mehr oder weniger unabhängig vom Schaltsignal.

Kopplungskapazität und Gleichtaktunterdrückung

Die Gleichtaktunterdrückungsfähigkeit der Schaltung wird hauptsächlich durch die Kopplungskapazität der Transformatoren und die Impedanz der Transformatortreiber bestimmt.

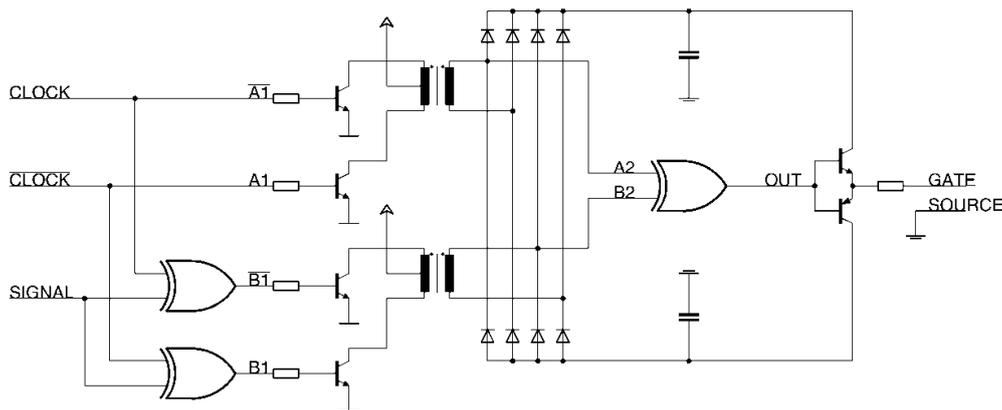
Mit optimierter Kerngeometrie und Wicklungsanordnung kann ein Transformator für eine typische Treiberleistung von einigen Watt mit einem magnetischen Kopplungsfaktor von 0,99 und einer parasitären Kopplungskapazität von 10 pF aufgebaut werden. Bei einer Gleichtaktspannung von $100 \text{ kV}/\mu\text{s}$ führt dies zu einem Ladungsumkehrstrom von etwa 1 A, der durch den Transformatortreiber niederohmig kurzgeschlossen werden muss.

Betrachtung der Temperaturbegrenzung

Bei sehr hoher Schaltgeschwindigkeit, muss die Streuinduktivität in der Gate-Schleife minimiert werden. Dies impliziert, dass die Gate-Treiber-Endstufe möglichst nah am Leistungshalbleiter angeordnet sein muss. Um die Kapazität zwischen der Sekundärseite des Gate-Treibers und dem Rest der Schaltung (oder Masse) klein zu halten, sollte die Isolationsbarriere auch nahe der Leistungsstufe sein. Für eine hohe CMR muss der Abstand zwischen Transformator und Transformatortreiber klein gehalten werden. Alle diese Komponenten müssen also, um die hohe Sperrschichttemperatur von WBG-Halbleitern voll ausnutzen zu können, ebenfalls erhöhten Temperaturanforderungen genügen.

Modulations- und Demodulationsvorgang

Die Aufgabe der Modulationsschaltung ist es die primären Spannungen der Transformatoren zu beeinflussen, um die Schaltinformationen zu codieren. Die gewählte Modulation und Demodulation kann mit der logischen XOR-Funktion realisiert werden, wie in der Abb. gezeigt wird.

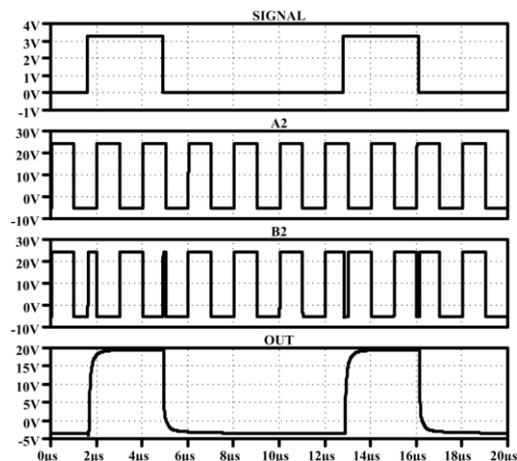


Einfache Realisierung der Gate-Treiber-Kernfunktion mit dem Konzept einer XOR-Logikfunktion zur Modulation und Demodulation

Diese sehr einfache Realisierung führt zu dem in u.a. Abbildung gezeigten Verhalten. Beide Transformatoren tragen zur Energieversorgung bei. Die Sekundärspannung des ersten Transformators ist ein kontinuierliches Rechtecksignal mit 50% Tastverhältnis. Der zweite Transformator trägt das modulierte Signal mit den Phasensprüngen von 180° .

Schaltungsaufbau für erhöhte Umgebungstemperaturen

Für Temperaturen von bis zu 200°C gibt es nur eine sehr kleine Menge an verfügbaren Halbleiterbauelementen wie Bipolartransistoren in Metall- und Dioden in Glasgehäusen. Die einfachste TTL-Implementierung eines XOR-Gatters benötigt nur zwei npn-Transistoren, weshalb sie besonders gut für die Realisierung mit diskreten Bauelementen geeignet ist.



Schema der PSK-Modulation

Ergebnisse

Die Topologie ist hochsymmetrisch und kann für ein hohes Gleichtaktvermögen und hohe thermische Anforderungen eingesetzt werden – ideal für WBG-Leistungshalbleiter. Die Hauptvorteile der Topologie können durch Simulationen und Messungen an einem am IMAB aufgebauten Prototyp bestätigt werden:

- Transformatoren können für Leistungs- und Informationsübertragung genutzt werden
- positive und negative Spannungen können an das Gate des Leistungshalbleiters angelegt werden
- keine Beschränkung für das Schaltsignal
(Extreme Arbeitszyklen oder gleichbleibende Schaltzustände unproblematisch)
- Verzögerungszeit für das Schaltsignal kann sehr kurz sein
- keine Informationsspeichereinrichtung notwendig
- Modulator- und Demodulationsschaltungen verwenden einfache Logikfunktionen

Elektrisch unterstützte Bremsung eines Nutzfahrzeuges

W.-R. Canders, Jan Hoffmann

Bei elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen macht es Sinn, den Bremsvorgang elektrisch zu unterstützen, um die Betriebsbremse zu entlasten und Verschleiß zu reduzieren. Die Antriebsstruktur solcher Fahrzeug wird in naher Zukunft vorerst eine Hybridstruktur mit einem Primärenergiewandler in Form eines phlegmatisierten Diesel- oder Gasmotors oder einer Turbine sein. Als elektrischer Energiespeicher bietet sich eine Lithium-Ionen Batterie an, die – knapp bemessen – nur dynamische Beschleunigungsvorgänge abdeckt. Die anfallende Bremsleistung kann dann nur teilweise in der Batterie aufgenommen werden, da diese deutlich höher als die Beschleunigungsleistung ist. Die überschüssige Energie muss somit in einem Widerstand abgebaut werden.

Grundsätzlich bieten sich zwei Möglichkeiten an:

- Ein Bremschopper im Zwischenkreis zur geregelten Bremsung des Fahrzeugs oder
- ein Widerstand auf der Drehstromseite, der über ein Schütz zugeschaltet wird und eine passive Bremsung ermöglicht.

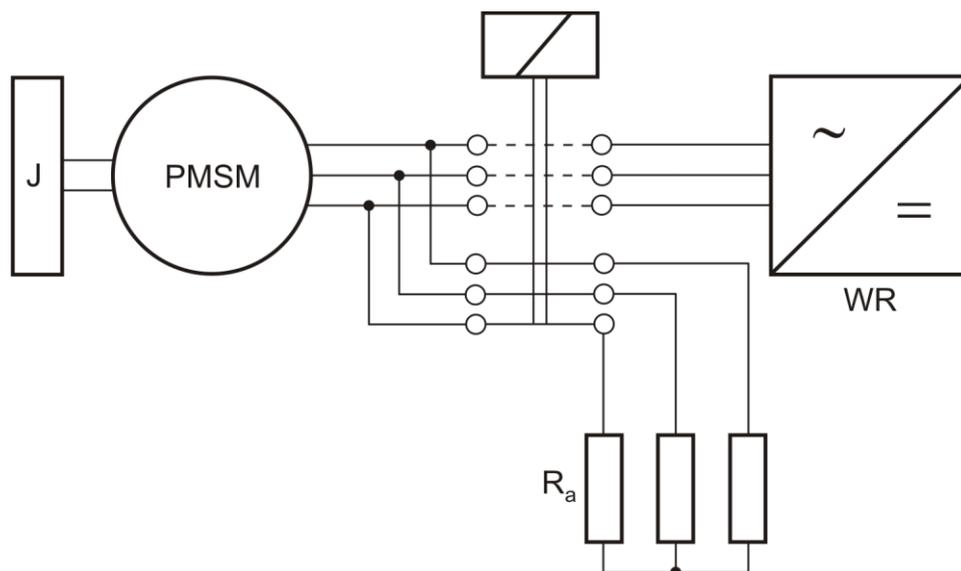


Abb. 1: Bremsschaltung für passive Bremsung

Die Möglichkeit b) nach Abb. 1 bietet die Möglichkeit, die Fahrzeugbremse auch dann zu unterstützen, wenn der Wechselrichter ausgefallen ist, also eine kritische Situation vorliegt.

Eine Umrechnung der Bremswiderstände auf die Zwischenkreisseite ist problemlos mit Hilfe einer Leistungsbilanz möglich, so sich an der grundsätzlichen Rechnung nichts ändert. Da die Polradspannung jedoch proportional zur Drehzahl abfällt, muss der Wechselrichter als Hochsetzsteller arbeiten, solange die Zwischenkreisspannung durch die Batterie konstant gehalten wird und der Bremschopper im Zwischenkreis die Energie auch bei kleineren Drehzahlen abbauen soll. Das setzt voraus, dass der Wechselrichter funktionstüchtig ist, so dass nicht alle Notfallszenarien auf diese Weise abgedeckt werden können.

Die hier angestellten Betrachtungen sollen an einem Beispiel aufzeigen, welchen Beitrag die elektrische Maschine überhaupt zur Fahrzeugbremsung leisten kann. Dazu wird zuerst vom Szenario b) ausgegangen. Die Möglichkeiten von Szenario a) werden dann anschließend diskutiert.

Grundlagen

Es wird ein hypothetisches Fahrzeug mit einer Masse von 44 t Gesamtgewicht angenommen. Die Antriebsmaschine soll eine Leistung von 500 kW bei einer max. Drehzahl von 15000 1/min haben. Die verhältnismäßig hohe Drehzahl ermöglicht ein sehr kompakt bauendes und leichtes Antriebsaggregat, was der Nutzlast zugute kommt. Nimmt man einen Anteil der rotierenden Massen an der Gesamtenergie von 10% an, ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von $v_{\max} = 90$ km/h ein Gesamtenergieinhalt des Fahrzeugs von $W_{\text{ges}} = 4,25$ kWh. Umgerechnet auf die Welle der Antriebsmaschine entspricht dies einer Schwungmasse von $J = 12,4$ kgm².

Bei der Beschreibung der generatorischen Bremsung wird das quasistationäre mittlere Moment und nicht der transiente Vorgang beim Umschalten bzw. Kurzschluss betrachtet. Es wird in den folgenden Betrachtungen angenommen, dass das Fahrzeug ausschließlich durch die Widerstandsbremung zum Stillstand gebracht werden soll.

Die Bewegungsgleichung einer Synchronmaschine mit der trägen Masse J lautet :

$$J \frac{d^2 \beta}{dt^2} = M_A(t) - m_s p [L_d i_d i_q + L_{hd} (i_D - i_f) i_q - L_q i_d i_q - L_{hq} i_d i_Q] \quad (2.1)$$

Drehwinkel: β

M_A : äußeres Drehmoment aus einer Last oder Antriebsmaschine, bremsende Momente negativ, antreibende Momente positiv

m_s : Strangzahl

p : Polpaarzahl.

Das allgemein bekannte innere Drehmoment der Synchronmaschine entspricht dem zweiten Term in der Bewegungsgleichung, hier bremsend:

$$M_b = m_s p [L_d i_d i_q + L_{hd} (i_D - i_f) i_q - L_q i_d i_q - L_{hq} i_d i_Q] \quad (2.2)$$

Hiernach setzt sich das Drehmoment aus den Flussverkettungen und Strömen in der Längs- und Querachse (d,q) der Maschine zusammen. Die einzelnen Komponenten entsprechen den Beiträgen aus Erregerwicklung (f), Dämpferwicklung (D,Q) und der Reluktanzkomponente.

Im vorliegenden Fall einer hoctourigen Permanentmagnet erregten Maschine mit Vollpolcharakteristik ohne Dämpferkäfig vereinfacht sich die Gleichung wegen

$$L_d = L_q \quad (2.2a)$$

$$i_D = i_Q = 0$$

$$\text{zu } M_i = m_s p [L_{hd} (-i_f) i_q] \quad (2.3)$$

Das Produkt $L_{hd} \cdot i_f$ entspricht der Flussverkettung der Permanentmagnete Ψ_{pm} , die in der Ständerwicklung die Polradspannung U_p induziert. Da die Maschine generatorisch auf den Widerstand R_a speist, entsteht ein Bremsmoment (neg. Vorzeichen nach VPS), dem externen

Antriebsmoment entspricht hier ein zusätzliches bremsendes Moment aus Lager-, Luft- und Rollreibung M_r , so dass die Bewegungsgleichung die Form

$$J \frac{d^2 \beta}{dt^2} = m_s p \cdot [\Psi_{pm} \cdot i_q] + M_r \quad (2.4)$$

annimmt. Im allgemeinen Fall ist das Reibmoment nichtlinear drehzahlabhängig, aber wesentlich kleiner als das Bremsmoment. Es wird hier vorerst vernachlässigt.

Bestimmung des Stromes

Die drehmomentbildende q-Komponente des Stromes \underline{I}_s bestimmt man nun aus der komplexen Spannungsgleichung.

$$\underline{U}_p = \underline{I}_s (R_s + R_a) + \underline{I}_s j \omega L_d \quad (3.1)$$

Auflösen nach dem Strangstrom \underline{I}_s und Trennung von Real und Imaginärteil liefert:

$$\underline{I}_s = \frac{\underline{U}_p}{(R_s + R_a)} \frac{1 - j \omega \frac{L_d}{(R_s + R_a)}}{1 + \omega^2 \frac{L_d^2}{(R_s + R_a)^2}} \quad (3.2)$$

Mit

$$\underline{U}_p = j u_p = j \omega \cdot \Psi_{pm} \quad (3.2a)$$

und der Abkürzung

$$T_a = \frac{L_d}{(R_s + R_a)} \quad (3.2b)$$

als Zeitkonstante wird der 2. komplexe Bruch dimensionslos. Die q-Komponente ist der Imaginärteil des Stromes:

$$i_q = \text{Im}\{\underline{I}_s\} = \frac{\omega \cdot \Psi_{pm}}{R_s + R_a} \frac{1}{1 + \omega^2 T_a^2} \quad (3.3)$$

Der q-Strom ist drehzahlabhängig und zeigt eine Charakteristik wie sie uns in ähnlicher Form in der Kloss'schen Formel begegnet.

Aus Gleichung 2.4 kann nun das Drehmoment als Funktion der Drehzahl Ω_m ($\omega = \Omega_m p$) berechnet werden.

$$\underline{M}_b = m_s p^2 \Psi_{pm}^2 \frac{\Omega_m}{R_s + R_a} \cdot \frac{1}{1 + p^2 \Omega_m^2 T_a^2} \quad (3.4)$$

Hierzu werden die Daten des Antriebs gemäß Tab. 1 verwendet.

Tabelle: Verwendete Daten

Größe	Wert
Strangzahl m_s	3
Polpaarzahl p	3
Max. Polradspannung $u_{p,max}$	$400 \text{ V}/\sqrt{2}$
Max. Speisefrequenz ω_{max}	4712 1/sec entspr. $n_{max} = 15\,000 \text{ 1/min}$
Magnetisierende Flussverkettung Ψ_{pm}	$0,06 \text{ Wb}$
Lastwiderstand	$0 \Omega < R_a < 250 \text{ m}\Omega$
Statorwiderstand R_s	$0,75 \text{ m}\Omega$
Gesamt Massenträgheitsmoment J	$12,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Das Bremsmoment für verschiedene Lastwiderstände ist in **Abb. 3.1** dargestellt. Die Kreisdrehzahl ist $\Omega_m = \omega/p$ und wurde von $0,5\% \Omega_{max}$ bis Ω_{max} variiert. Es fällt auf, dass in allen Lastfällen das max. erreichbare Bremsmoment gleich groß ist. Das Maximum wird immer bei der Drehzahl erreicht, bei der $R_a + R_s = \omega L_d$ gilt, also Leistungsanpassung vorliegt.

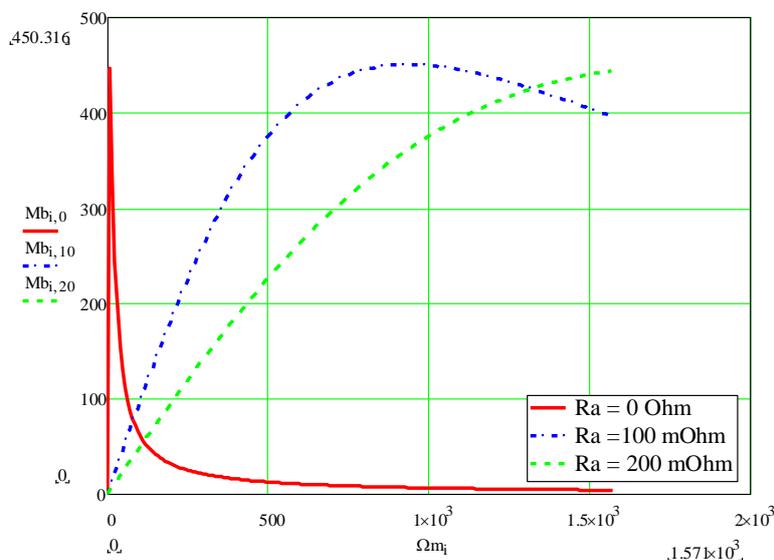


Abb. 3.1 : Bremsmoment bei verschiedenen Lastwiderständen über der Kreisdrehzahl Ω_m .

Es ist erkennbar, dass ein fixer Bremswiderstand um $100 \text{ m}\Omega$ liegen sollte, da in diesem Bereich die Momenten-Drehzahlfläche der drei Kurven am größten ist, so dass die kürzeste Abbremszeit zu erwarten ist. Je kleiner die Drehzahl ist, umso kleiner muss auch der Lastwiderstand sein, um das maximale Moment zu erhalten. Steht also ein Bremschopper im Zwischenkreis zur Verfügung, so könnte dies durch das Taktverhältnis des Choppers eingestellt werden. Damit wäre eine Bremsung mit konstantem max. Moment möglich, was die Bremszeit verkürzen würde.

Bremszeit

Bremsung mit drehzahlabhängigem Moment

Zur Ermittlung der Bremszeit wird die Bewegungsgleichung **2.4** und die Momentengleichung **3.4** herangezogen:

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = m_s p^2 \Psi_{pm}^2 \frac{\Omega_m}{(R_s + R_a)(1 + p^2 \Omega_m^2 T_a^2)} \quad (4.1)$$

Die Trennung der Variablen liefert:

$$\left(1 + p^2 \Omega_m^2 T_a^2\right) \frac{1}{\Omega_m} d\Omega_m = m_s \frac{p^2 \Psi_{pm}^2}{(R_s + R_a) J} dt \quad (4.2)$$

Der Ausdruck auf der rechten Seite lässt sich mit Hilfe der Zeitkonstanten

$$T_k = \frac{J(R_s + R_a)}{p^2 \Psi_{pm}^2} \quad (4.2a)$$

vereinfachen:

$$\left(1 + p^2 \Omega_m^2 T_a^2\right) \frac{1}{\Omega_m} d\Omega_m = \frac{m_s}{T_k} dt \quad (4.3)$$

Die Integration der Gleichung liefert

$$t = \frac{T_k}{m_s} \left(\ln(\Omega_m) + \frac{T_a^2 \Omega_m^2 p^2}{2} \right) + C \quad (4.4)$$

Aufgrund der logarithmischen Komponente wird für $\Omega_m = 0$ die Bremszeit theoretisch unendlich groß, da in der Bewegungsgleichung die Reibung vernachlässigt ist.

Die Integrationskonstante kann aus der Anfangsbedingung $t = 0 \rightarrow \Omega_m = \Omega_{\max}$ bestimmt werden. Damit erhält man für die Bremszeit den Ausdruck

$$t = \frac{T_k}{m_s} \left(\ln\left(\frac{\Omega_m}{\Omega_{\max}}\right) - \frac{T_a^2 p^2}{2} (\Omega_{\max}^2 - \Omega_m^2) \right) \quad (4.5)$$

Mit den Daten aus Tabelle 1 erhält man die Bremszeit als Funktion der Drehzahl (**Abb. 4.1**):

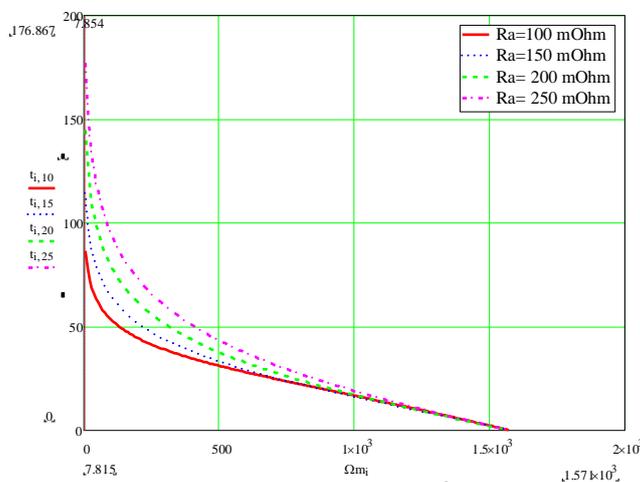


Abb. 4.1: Bremszeit über der Drehzahl für verschiedene Lastwiderstände

Wie schon in **Kap. 3** erwartet liegt die kürzeste Bremszeit um $100 \text{ m}\Omega$. Ein genaueres Ergebnis liefert die Betrachtung der Bremszeit als Funktion des Lastwiderstandes, **Abb. 4.2**.

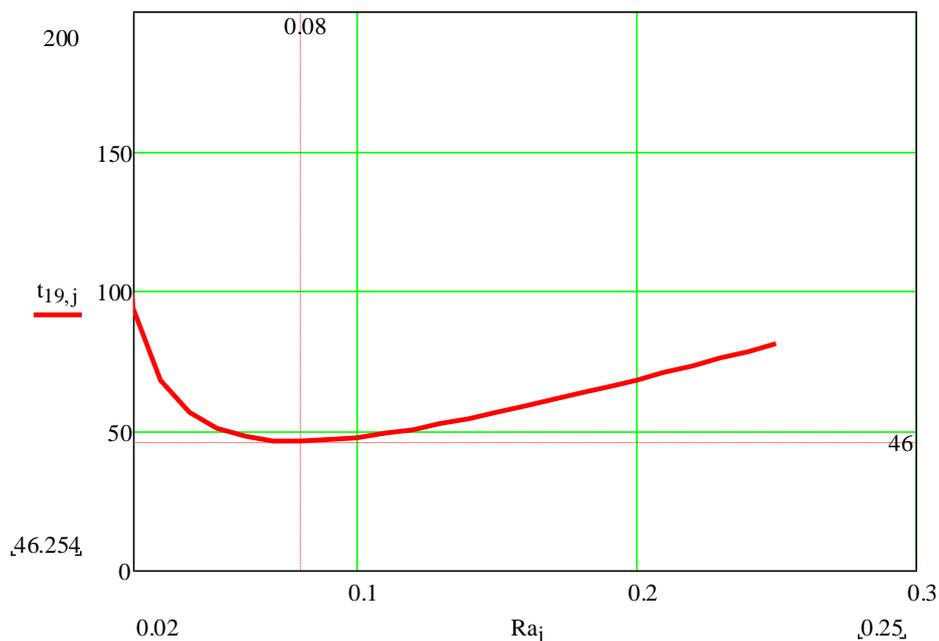


Abb. 4.2: Bremszeit als Funktion des Lastwiderstandes

Für diese Rechnung wurde die Abbremszeit auf 10% der Maximaldrehzahl betrachtet, um den Punkt $\Omega_m = 0$ zu umgehen. Die kürzeste Abbremszeit erhält man hiernach für $R_a = 80 \text{ m}\Omega$ mit $t = 46 \text{ sec}$.

Bremsung mit konstantem Moment

Erfolgt die Bremsung mit konstantem Moment über einen geregelten Widerstand im Zwischenkreis, vereinfacht sich Gl. 3.4 deutlich. Wegen

$$\omega L_d = R_s + R_a \quad (4.6)$$

ist das Bremsmoment konstant:

$$M_b = \frac{m_s}{2} p \frac{\Psi_{pm}^2}{L_d} \quad M_b = 450,32 \text{ Nm} \quad (4.7)$$

Dementsprechend vereinfacht sich die Gleichung für die Bremszeit zu einer linearen Funktion.

$$t = -\frac{J}{M_b} (\Omega_m - \Omega_{\max}) \quad (4.8)$$

Betrachtet man wieder die Zeit bis zum Erreichen von 10% der Maximaldrehzahl, erhält man eine Bremszeit von 38,9 sec, bis zum Stillstand sind es 43 sec. Im Vergleich zur Bremsung mit drehzahlabhängigem Moment ist das ein Gewinn von 15,5% Bremszeit, also nicht dramatisch viel kürzer. Aus Sicherheitsaspekten kann der Gewinn von 7 sec schon Bedeutung haben, jedoch sollte man bedenken, dass das Fahrzeug normalerweise zusätzlich mit der Betriebsbremse abgebremst wird, die dann nur etwas stärker entlastet wird.

Umgesetzte Leistungen

Für die Bemessung der Lastwiderstände ist die Kenntnis der umgesetzten Leistungen notwendig, auch wenn die Belastung nur kurzzeitig auftritt und rasch abfällt. Somit kann die Erwärmung des Lastwiderstandes mit einer adiabaten Rechnung gut abgeschätzt werden.

Die Leistung ist mit dem Strom I_s und dem conj. kompl. Strom I_s^* :

$$\underline{I}_s = \frac{j\omega\Psi_{pm}}{R_s + R_a} \frac{1 - j\omega T_a}{1 + \omega^2 T_a^2} \quad (5.1)$$

$$P_b = m_s R_a \underline{I}_s \underline{I}_s^* \approx M_b(\Omega_m) \cdot \Omega_m = P_{mech}$$

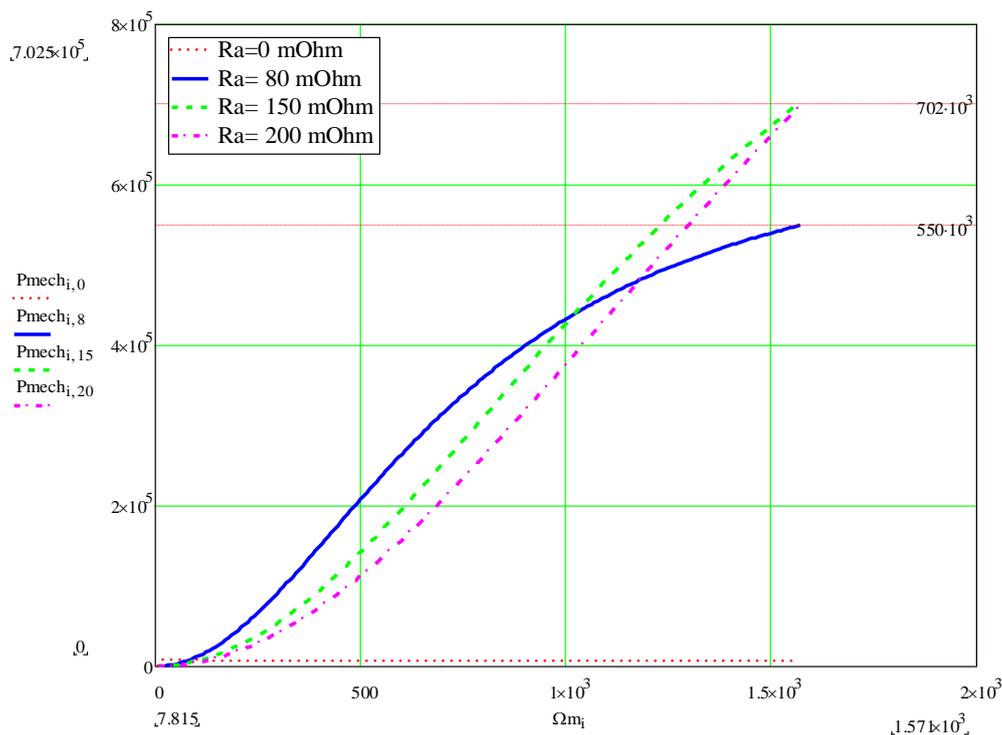


Abb. 5.1: Mechanische Leistung in der Maschine

Die mechanische Leistung ist nahezu identisch mit der im Lastwiderstand umgesetzten Leistung, was auch zu erwarten war. Sie unterscheiden sich nur um die Verluste in der Maschine, die auch zum Bremsmoment beitragen:

$$P_v = m_s R_s \underline{I}_s \underline{I}_s^* \quad (5.3)$$

Aus **Abb. 5.2** ist zu entnehmen, dass die Verluste in der Maschine beim optimalen Widerstand am größten sind, die Verluste bei den größeren Lastwiderständen sind etwas geringer, es bestehen also aus Sicht der Kühlung der Maschine und angesichts des flachen Minimums in **Abb. 4.2** gewisse Kompromissmöglichkeiten bei der Wahl des Bremswiderstandes.

Aus Sicht der Energiebilanz ergibt sich ein recht einfaches Bild: Die kinetische Energie aus der trägen Masse wird nahezu vollständig auf den Lastwiderstand übertragen, die in der Maschine anfallenden Verluste treten nur für kurze Zeit auf, fallen rasch ab und sind im Vergleich zu denen im Lastwiderstand sehr gering. In einer adiabaten Rechnung kann die Erwärmung des Lastwiderstandes aus dem Energieeintrag und der Wärmekapazität des Lastwiderstandes berechnet werden.

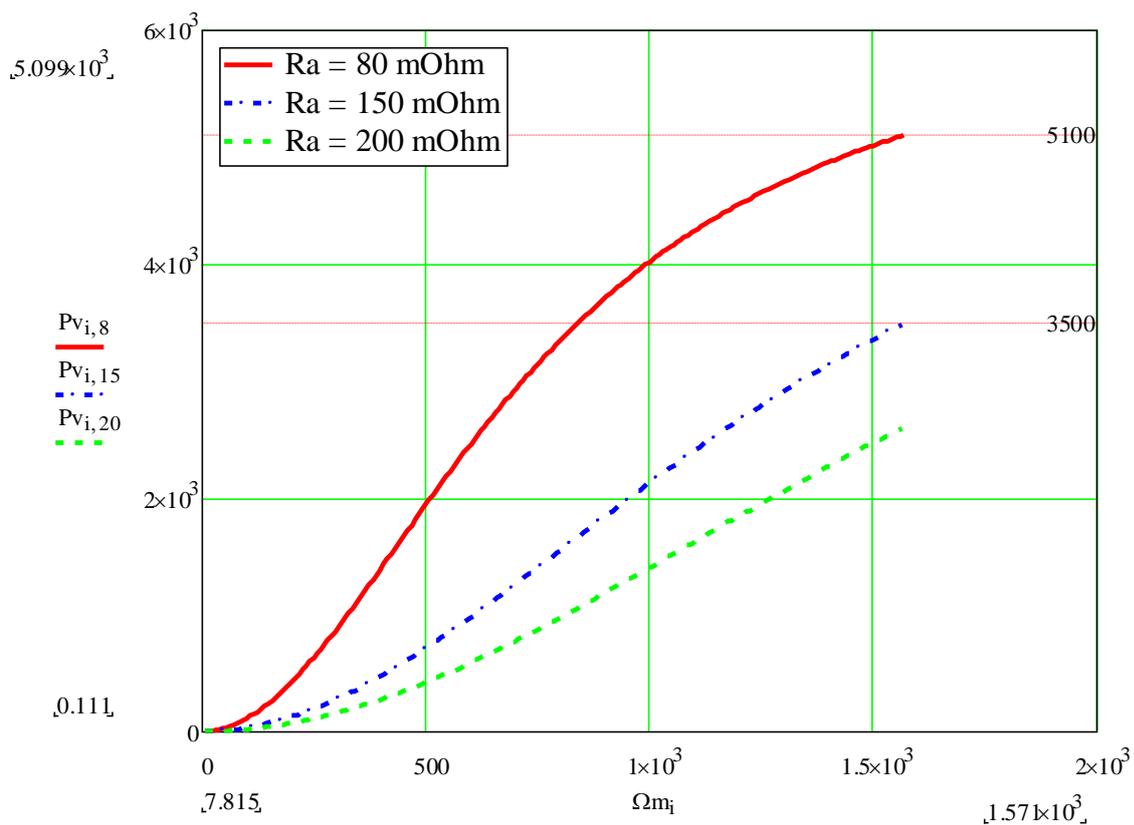


Abb. 5.2: Verluste in der Maschine beim Bremsvorgang

Im Fall der Bremsung mit konstantem Moment vereinfachen sich Gl. 3.2 und 3.3 für den Strom zu

$$\underline{I}_s = \frac{1}{2} \frac{\Psi_{pm}}{L_d} (j+1) \quad i_q = \frac{1}{2} \frac{\Psi_{pm}}{L_d} \quad \text{mit } i_q = 833,6A \quad (5.4)$$

Imaginärteil und Realteil des Stromes sind wie zu erwarten gleich groß. Zusammen mit dem jetzt variablen Lastwiderstand

$$R_a = p\Omega_m L_d - R_s \quad (5.5)$$

ergeben sich konstante Verluste in der Maschine zu $P_v = 3127 \text{ W}$, während die Verluste im Lastwiderstand linear mit der Drehzahl abfallen (Abb. 5.3).

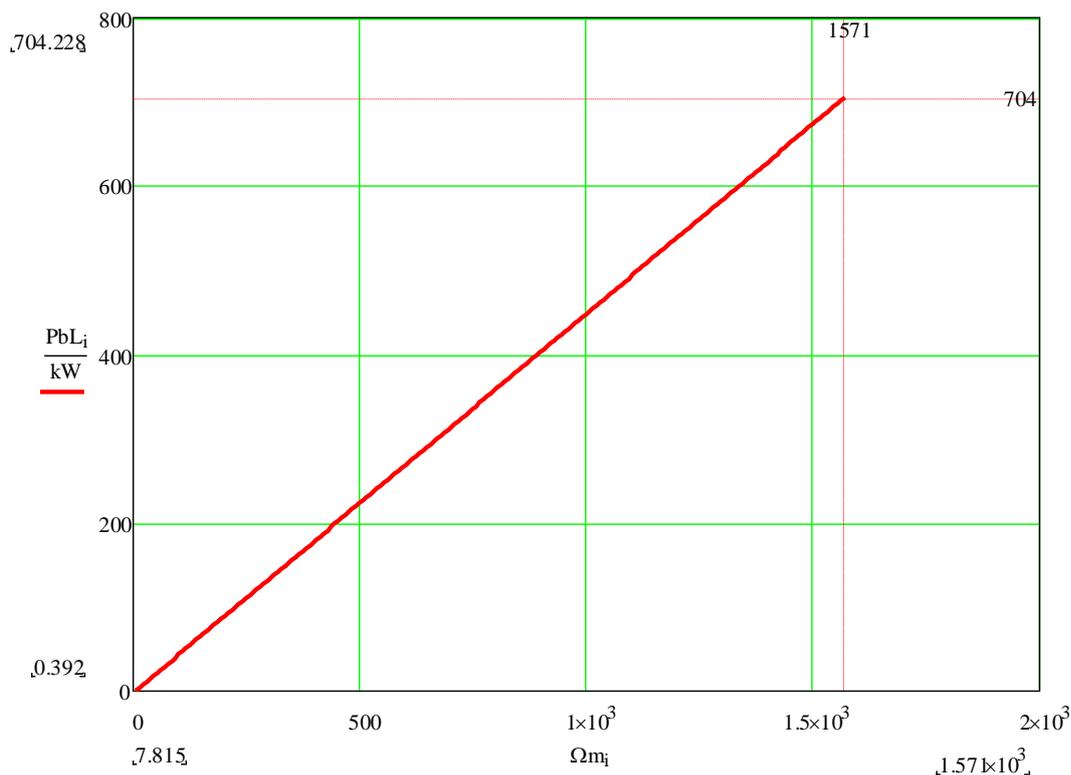


Abb. 5.3: Verluste im Lastwiderstand bei konstantem Bremsmoment

Zusammenfassung

Die Bremsanlage eines Nutzfahrzeuges mit hybrider Antriebsstruktur kann durch eine Widerstandsbremsung mit Hilfe der Antriebsmaschine unterstützt werden. Dabei sind zwei Ansätze vorstellbar: Bremsung auf einen drehstromseitigen Lastwiderstand oder Bremsung auf einen geregelten Widerstand im Zwischenkreis des Antriebsumrichters.

Das von der Maschine entwickelte Bremsmoment hat einen nichtlinearen Verlauf mit einem Maximum, das durch die Impedanz der Maschine bestimmt ist und dessen Drehzahl Lage von der Wahl des Bremswiderstandes im Verhältnis zur Impedanz abhängt. Ausgehend von einer alleinigen Bremsung mit Hilfe der Bremswiderstände können die Bremszeiten bestimmt werden. Die minimal erreichbare Bremszeit wird am kürzesten für eine Bremsung auf den geregelten Widerstand. Die Größe der Bremsmomente und die auftretenden Verluste werden für beide Fälle diskutiert.

Anisotropiebedingte Wärmeeigenstressungen in Faserverbund Bandagen

W.-R. Canders

Einleitung

Faserverbundwerkstoff Bandagen sind bei hochtourigen Permanentmagnet erregten Synchronmaschinen ein wichtiges Bauteil, um die geforderten hohen Umfangsgeschwindigkeiten zu erreichen.

Anisotrope Verbundwerkstoffe weisen jedoch naturgemäß auch richtungsabhängige Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Somit können in solchen Werkstoffen bei Erwärmung des Bauteiles infolge der richtungsabhängigen Wärmeausdehnungen Eigenstressungen auftreten, die den übrigen Belastungen, z.B. aus dem Fügevorgang als Pressverband [1] zu überlagern sind. Je nach Abmessung des Bauteiles und Temperatur können diese Eigenstressungen nicht zu vernachlässigende Werte aufweisen und sollten bei der Bemessung der Bauteile berücksichtigt werden.

Während ein freier Stab mit beispielsweise orthogonalen Wärmedehnungen keine Dehnungsbehinderung aufweist, die Eigenstressungen also Null sind, will sich ein Ring aus demselben Material in tangentialer und radialer Richtung unterschiedlich dehnen, so dass sich wegen der geometriebedingten Kopplung zwischen Radial- und Tangentialdehnung Verzerrungen und temperaturbedingte Eigenstressungen ausbilden müssen.

1 Werkstoffmodell

Ein Standardbauteil im Elektromaschinenbau ist der unidirektional gewickelte Ring aus Faserverbundwerkstoff (GFK, CFK), der die höchste Festigkeit in Umfangsrichtung, aber auch die größte Anisotropie aufweist (**Bild 1**). Eine Temperaturbelastung solcher Bandagen ist bei Elektromaschinen zwangsläufig gegeben, sei es durch die Zusatzverluste in den unter der Bandage liegenden Bauteilen oder durch Wirbelstromverluste in der Bandage selbst, wenn sie z.B. aus leitfähigen Carbonfasern mit hohem Füllfaktor gewickelt ist.

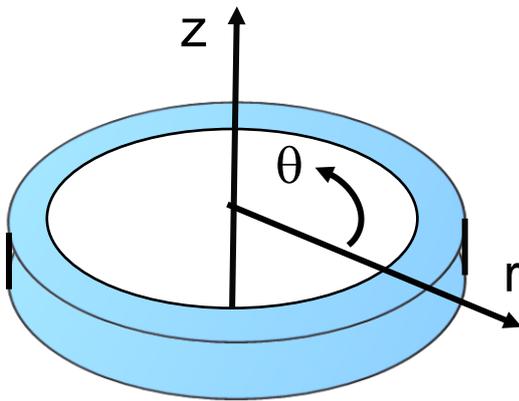


Bild 1: Koordinatensystem für polar orthotrope Werkstoffe

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{rz} \\ \gamma_{z\theta} \\ \gamma_{\theta r} \end{bmatrix} = \bar{S} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_\theta \\ \sigma_r \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \\ \tau_{z\theta} \\ \tau_{\theta r} \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad \bar{S} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_\theta} & -\frac{\nu_{\theta r}}{E_r} & -\frac{\nu_{\theta z}}{E_z} & & & & \alpha_\theta \\ -\frac{\nu_{r\theta}}{E_\theta} & \frac{1}{E_r} & -\frac{\nu_{rz}}{E_z} & & & & \alpha_r \\ -\frac{\nu_{z\theta}}{E_\theta} & -\frac{\nu_{zr}}{E_r} & \frac{1}{E_z} & & & & \alpha_z \\ & & & \frac{1}{G_{rz}} & & & \\ & & & & \frac{1}{G_{z\theta}} & & \\ & & & & & \frac{1}{G_{\theta r}} & \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Es handelt sich hier um polar orthotrope Werkstoffe mit rhombisch besetztem Hookeschem Tensor (Gl. 1.1). In Gl. 1.1 ist hierfür das Hookesche Gesetz mit den Dehnungen und Gleitungen als Funktion der Spannungen σ und Schübe τ mit der Nachgiebigkeitsmatrix \bar{S} dargestellt.

Die zweifachen Indizes der Querkontraktionszahlen beschreiben hier an erster Stelle die Kontraktionsrichtung und an zweiter Stelle die Lastrichtung ($\nu_{\theta r}$ – Kontraktion in Umfangsrichtung bei Last in radialer Richtung)

Beispielsweise folgt aus Gl. 1.1 für den orthotropen Ring mit den Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) α_θ , $\alpha_r \neq 0$ und $\alpha_z = 0$ (ebener Spannungszustand), der um die Temperaturdifferenz ΔT erwärmt wird:

$$\begin{aligned}\varepsilon_\theta &= \frac{1}{E_\theta} \sigma_\theta - \frac{\nu_{\theta r}}{E_r} \sigma_r + \Delta T \cdot \alpha_\theta \\ \varepsilon_r &= \frac{1}{E_r} \sigma_r - \frac{\nu_{r\theta}}{E_\theta} \sigma_\theta + \Delta T \cdot \alpha_r\end{aligned}\quad (1.2)$$

2 Differentialgleichung für die Wärmeeigenstressungen

Für isotropes Material findet man die entsprechenden Gleichungen und ihre Lösungen beispielsweise bei Timoshenko [2]. Analog lässt sich die Erweiterung auf anisotropes Material durchführen. Der Zusammenhang zwischen den Dehnungen ε und den Verschiebungen u ist durch Gl. 2.1 gegeben:

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \quad (2.1)$$

Die Auflösung von Gl. 1.2 nach den Spannungen liefert mit dem Anisotropieverhältnis ke als Abkürzung:

$$ke^2 = \frac{E_\theta}{E_r} \quad (2.2a)$$

$$\sigma_r = \frac{E_\theta}{ke^2(1-\nu_{\theta r} \cdot \nu_{r\theta})} \left[\varepsilon_r + \varepsilon_\theta \nu_{r\theta} - \left(\frac{\alpha_r}{\alpha_\theta} + \nu_{r\theta} \right) \alpha_\theta \Delta T \right] \quad (2.2.b)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E_\theta}{(1-\nu_{\theta r} \nu_{r\theta})} \left[\varepsilon_\theta + \varepsilon_r \nu_{\theta r} - \left(\frac{\alpha_r}{\alpha_\theta} \nu_{\theta r} + 1 \right) \alpha_\theta \Delta T \right] \quad (2.2.c)$$

Für Kreisringe gilt nach [2] die Gleichgewichtsbedingung:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2.3)$$

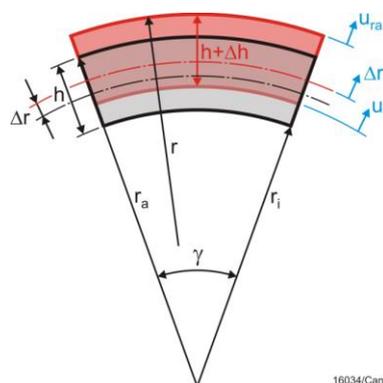


Bild 2.1: Geometrische Bedingungen geschlossenen Ring

Einsetzen der Spannungen aus Gl. 2.2 in Gl. 2.3 führt zu der Differentialgleichung:

$$r \frac{d}{dr} (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta \nu_{r\theta}) + \varepsilon_r (1 - \nu_{\theta r} k e^2) - \varepsilon_\theta (k e^2 - \nu_{r\theta}) = A \cdot \alpha_\theta \Delta T + \left(\frac{\alpha_r}{\alpha_\theta} + \nu_{r\theta} \right) \alpha_\theta \cdot r \frac{d\Delta T}{dr} \quad (2.4)$$

Mit der dimensionslosen Konstanten A:

$$A = \frac{\alpha_r}{\alpha_\theta} (1 - \nu_{\theta r} k e^2) + \nu_{r\theta} - k e^2 \quad (2.5)$$

Interessant ist ein Vergleich mit der DGl. für den isotropen Fall nach [2]:

$$r \frac{d}{dr} (\varepsilon_r + \nu \cdot \varepsilon_\theta) + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) \cdot (1 - \nu) = r \frac{d}{dr} [(1 + \nu) \cdot \alpha \cdot \Delta T] \quad (2.4.a)$$

Gl. 2.4 geht im isotropen Fall in Gl. 2.4a über, wenn $A = 0$ gilt. Dies lässt sich sofort nachprüfen für $\nu_{\theta r} = \nu_{r\theta} = \nu$, $\alpha_r = \alpha_\theta = \alpha$, $ke = 1$. Im isotropen Ring treten nur innere Spannungen auf, wenn dieser ungleichmäßig erwärmt wird. Die Konstante A ist somit im anisotropen Fall für die inneren Spannungen auch bei homogener Erwärmung verantwortlich.

Für eine gleichmäßige Erwärmung des Ringes mit $d\Delta T/dr = 0$ steht auf der rechten Seite der Gleichung nur die Konstante A. Diese Annahme ist in den meisten Fällen gerechtfertigt, da im Elektromaschinenbau die Bandagenringe üblicherweise dünn sind ($h \ll r$), so dass in den meisten Fällen von einer gleichmäßigen Erwärmung ausgegangen werden kann. Die Gleichung 2.4 kann aber auch für den Lastfall einer in radialer Richtung inhomogenen Erwärmung verwendet werden.

Mit den so gemachten Annahmen können die Dehnungen ε in Gl. 2.4 durch die Verschiebungen u gemäß Gl. 2.1 ersetzt werden. Dies führt auf eine Differentialgleichung 2. Ordnung:

$$\frac{d^2}{dr^2} (u_r(r)) + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (u_r(r)) \cdot (\nu_{r\theta} + 1 - \nu_{\theta r} k e^2) - \frac{u_r(r)}{r^2} k e^2 = \frac{A}{r} \alpha_\theta \Delta T \quad (2.6)$$

bzw.

$$r^2 \frac{d^2 u_r(r)}{dr^2} + r \frac{du_r(r)}{dr} \cdot (\nu_{r\theta} + 1 - \nu_{\theta r} k e^2) - k e^2 u_r(r) = r \cdot A \alpha_\theta \Delta T$$

Die Dgl. 2.6 ist eine Eulersche Differentialgleichung 2. Ordnung [4], die mit Hilfe weiterer Abkürzungen von konstanten Termen in eine besser handhabbare Form gebracht wird:

$$A_1 = A \cdot \alpha_\theta \Delta T \quad (2.7)$$

$$B = \nu_{r\theta} + 1 - \nu_{\theta r} k e^2 = 1$$

Die Aussage $B = 1$ gilt aufgrund der Zusammenhänge zwischen den elastischen Konstanten,

$\nu_{\theta r} = \nu_{r\theta} \frac{E_r}{E_\theta}$ [3] zumindest für die Werkstoffe mit rhombisch besetztem Hookeschen Tensor. Die

Dgl. für den gleichmäßig erwärmten Ring lautet dann

$$r^2 \frac{d^2 u_r(r)}{dr^2} + r \frac{du_r(r)}{dr} - u_r(r) \cdot k e^2 = A_1 \cdot r \quad (2.8)$$

3 Lösung der Differentialgleichung

Ein Fundamentalsystem der Eulergleichung bilden die beiden Funktionen

$$u_r(r) = e^{\pm k e \cdot \ln(r)} = r^{\pm k e} \quad (3.5)$$

Für die homogene Lösung gilt somit:

$$u_r(r) = c_1 r^{k e} + c_2 \frac{1}{r^{k e}} \quad (3.6)$$

Die spezielle Lösung findet man mit dem Ansatz

$$u(r) = a \cdot r \quad (3.7)$$

$$ar - ar \cdot k e^2 = A_1 r, \quad a = \frac{A_1}{1 - k e^2}$$

Für den Sonderfall der Isotropie der E-Module, $k_e = 1$, wird der Ansatz

$$u_r(r) = b \cdot r \ln(r) \quad (3.8)$$

$$\frac{du_r(r)}{dr} = b + b \cdot \ln(r), \quad \frac{d^2 u_r(r)}{dr^2} = \frac{b}{r}$$

verfolgt. Einsetzen in die Dgl. und Auflösung nach b liefert:

$$b = \frac{A_1}{2} \quad (3.9)$$

$$\text{Somit als spezielle Lösung} \quad u_r(r) = \frac{A_1}{2} r \ln(r) \quad (3.10)$$

Der Fall eines Ringes mit isotropen E-Modulen, jedoch anisotropen Wärmedehnungen ist äußerst selten. Es ist aber bekannt, dass z.B. Permanentmagnete aus Seltenen Erden (z.B. NdFeB) anisotrope Wärmeausdehnungseigenschaften haben, während die E-Module //c-Achse und \perp c-Achse kaum voneinander abweichen [5, Tabelle 4.2]. Fertigt man Ringe aus solchem Material liegt dann dieser Sonderfall vor und kann mit dem angegebenen Verfahren behandelt werden.

Die weiteren Betrachtungen beschränken sich auf den Fall $k_e \neq 1$ mit der Lösung:

$$u_r(r) = c_1 r^{ke} + \frac{c_2}{r^{ke}} + \frac{A_1}{1-ke^2} r \quad (3.11)$$

Die Konstanten c_1 und c_2 müssen aus den Randbedingungen bestimmt werden. Hierzu werden die Radialspannungen an den Rändern des Ringes benutzt. Im allgemeinsten Fall entsprechen diese den Fugendrücken aus der Pressverbandsberechnung bzw. sind für den freien Ring gleich Null. Hier wird der einfachste Fall des freien Ringes betrachtet, so dass man einen Eindruck von der Größe der thermisch bedingten Eigenspannungen bekommt. Da die Bandagenwerkstoffe (GFK, CFK) alle ein linear elastisches Verhalten aufweisen, können zusätzliche mechanische Lasten überlagert werden. Damit ist auch die Einschätzung, ob die Eigenspannungen ggfs. vernachlässigt werden können, möglich.

Für den Innenrand gilt mit $r = r_i$:

$$u_r(r_i) = c_1 r_i^{ke} + \frac{c_2}{r_i^{ke}} + \frac{A_1 r_i}{1-ke^2} \quad (3.12)$$

$$\frac{du_r(r_i)}{dr} = c_1 ke \cdot r_i^{ke-1} - c_2 \frac{ke}{r_i^{ke+1}} + \frac{A_1}{1-ke^2}$$

Mit den Gleichungen 2.1 und 2.2 lassen sich nun die Spannungen an der Stelle $r = r_i$ berechnen und analog auch die Spannungen bei $r = r_a$. Setzt man hierfür die Radialspannung gleich Null erhält man nach einigen Umformungen die Konstanten c_1, c_2 für den freien Ring:

$$c_1 = \frac{\left[\frac{A_1}{1-ke^2} (1 + \nu_{r\theta}) - \left(1 + \nu_{r\theta} \frac{\alpha_\theta}{\alpha_r} \right) \alpha_r \Delta T \right]}{ke + \nu_{r\theta}} \left(\frac{r_i^{ke+1} - r_a^{ke+1}}{r_a^{2ke} - r_i^{2ke}} \right) \quad (3.13)$$

$$c_2 = \frac{\left[\left(1 + \nu_{r\theta} \frac{\alpha_\theta}{\alpha_r} \right) \cdot \alpha_r \Delta T - \frac{A_1}{1-ke^2} (1 + \nu_{r\theta}) \right] (r_i^{ke-1} - r_a^{ke-1}) \cdot (r_a^{ke+1} \cdot r_i^{ke+1})}{(r_i^{2ke} - r_a^{2ke}) \cdot (\nu_{r\theta} - ke)}$$

4 Bestimmung der thermischen Eigenspannungen für den freien Ring

Mit den jetzt erarbeiteten Ergebnissen können die Spannungen und Verschiebungen des freien Ringes berechnet werden. Hierzu wird das Beispiel herangezogen, das auch in [5] verwendet wird.

Tabelle 4.1: Daten zur Berechnung der anisotropiebedingten Wärmespannungen

In Umfangsrichtung unidirektional gewickelte Carbonfaserbandage, Faservolumenanteil ca. 70%		
Innenradius	r_i	41,25 mm
Außenradius	r_a	43,4 mm
Wärmeausdehnungskoeffizienten		
- in Umfangsrichtung	α_θ	$-1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
- in radialer Richtung	α_r	$32 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
Erwärmung um	ΔT	100 K
Elastische Konstanten		
E-Modul in Umfangsrichtung	E_θ	164 GPa
E-Modul in radialer Richtung	E_r	9,5 GPa
Querkontraktionszahl quer zur Faser bei Last parallel zur Faser	$\nu_{r\theta}$	0,3
Querkontraktionszahl parallel zur Faser bei Last quer zur Faser	$\nu_{\theta r}$	0,017
Querkontraktionszahl quer zur Faser bei Last quer zur Faser	ν_{rr}	0,3 (wird hier nicht benötigt)

Die thermisch bedingten Verschiebungen und Eigenspannungen wurden sowohl mit der analytischen Gleichung als auch mit einem numerischen Finite Elemente Programm (ANSYS) berechnet. Die analytischen Ergebnisse sind in den **Bildern 4.1 bis 4.3** zusammengestellt:

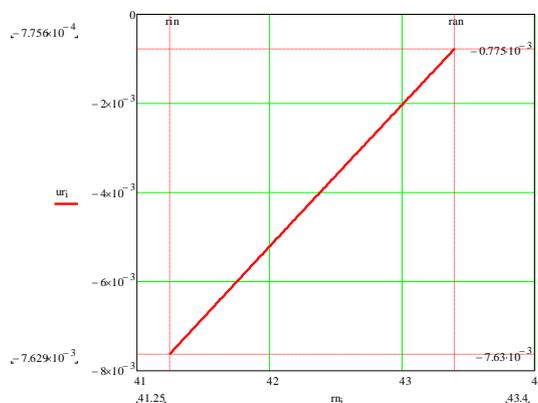


Bild 4.1: Radialverschiebungen des warmen Ringes u_r [in mm] über dem Radius r_n [in mm]

Aufgrund des dominanten negativen WAK der Carbonfaser schrumpft der Ring zusammen.

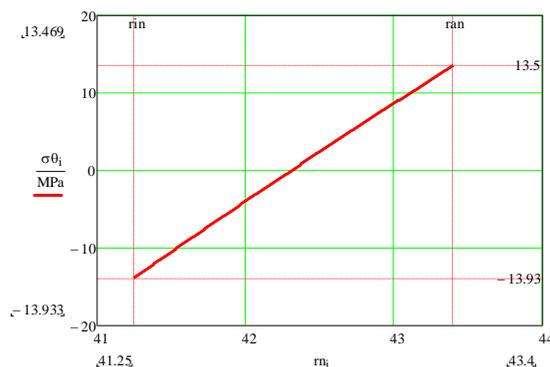


Bild 4.2: Tangentialspannungsverteilung im warmen Ring über dem Radius r_n [in mm]

Die Tangentialspannungen sind nahezu symmetrisch und wechseln von positiven Werten am Außenrand zu negativen Werten am Innenrand (Nulldurchgang in der Ringmitte).

Die Radialspannungsverteilung hat ihr Maximum in der Ringmitte. An den Rändern sind die Radialspannungen Null, wie vorgegeben (freier, unbelasteter Rand).

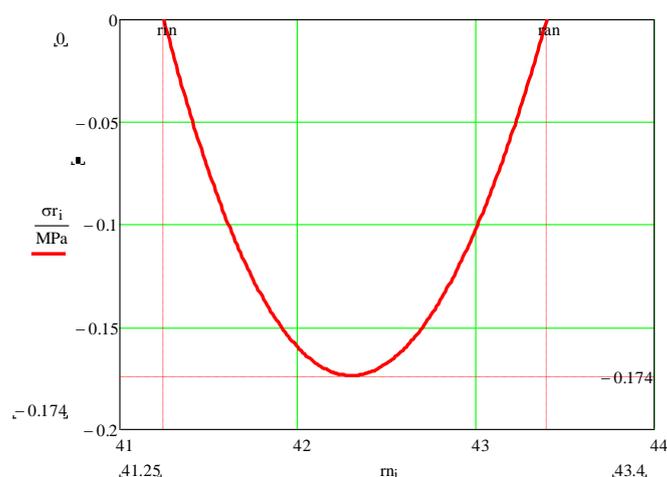


Bild 4.3: Radialspannungsverteilung im warmen Ring über dem Radius r_n [in mm]

Insgesamt sind die Werte nicht sehr hoch und für den Ring, der gemäß [5] mechanisch mit ca. 40 MPa radial und 800 MPa tangential belastet wird, als unkritisch anzusehen.

Die numerischen Ergebnisse zur Kontrolle der Rechnung (Bild 4.4 bis 4.6) wurden dankenswerterweise von Dipl. Ing Jan Hoffmann (IMAB) zur Verfügung gestellt. Aufgrund der Symmetrie des Problems genügt die Berechnung eines Ringsegmentes, das entsprechend hoch vernetzt werden kann, um die numerische Genauigkeit zu gewährleisten. Verwendet wurden quaderförmige Volumenelemente mit 20 Knoten. Die Rechnung zeigt die zu erwartende symmetrische Verschiebung des Ringes bei Erhaltung der kreisförmigen Kontur. Die Auflagerbedingungen des Segmentes

gestatten eine radiale Verschiebung im konstantem Winkelbereich, die Wärmeausdehnung in z-Richtung wurde zu Null gesetzt und die Bewegung in z-Richtung auf einer Seite fixiert. Mit diesen Auflagerbedingungen konnten numerische Artefakte wie z.B. Randeffekte weitgehend vermieden werden, so dass das Rechenmodell die analytische Rechnung gut annähert.

Die Güte der beiden Lösungen zeigt der Vergleich in **Tabelle 4.2**.

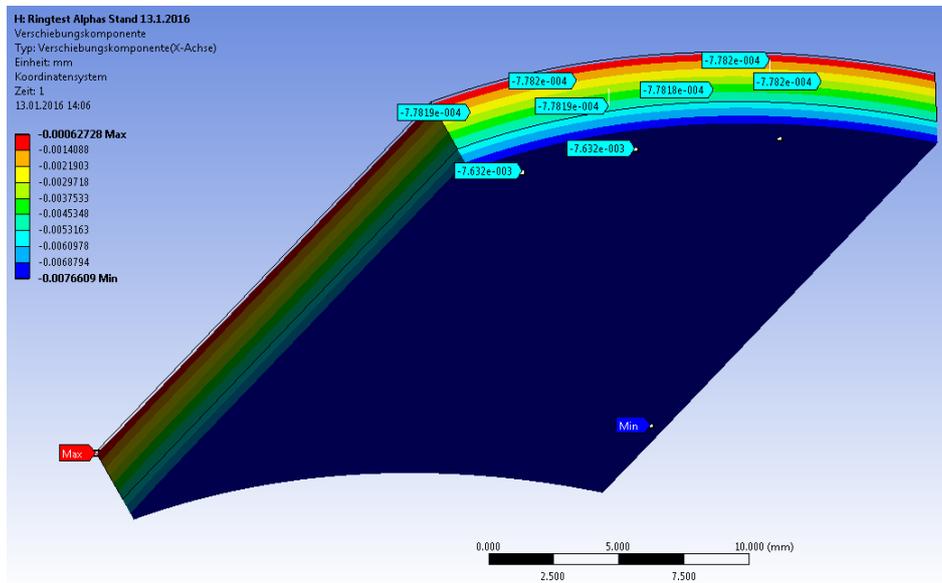


Bild 4.4: Auswertung der num. Rechnung: Radialverschiebungen des warmen Ringes u_r [in mm] über der Ringdicke

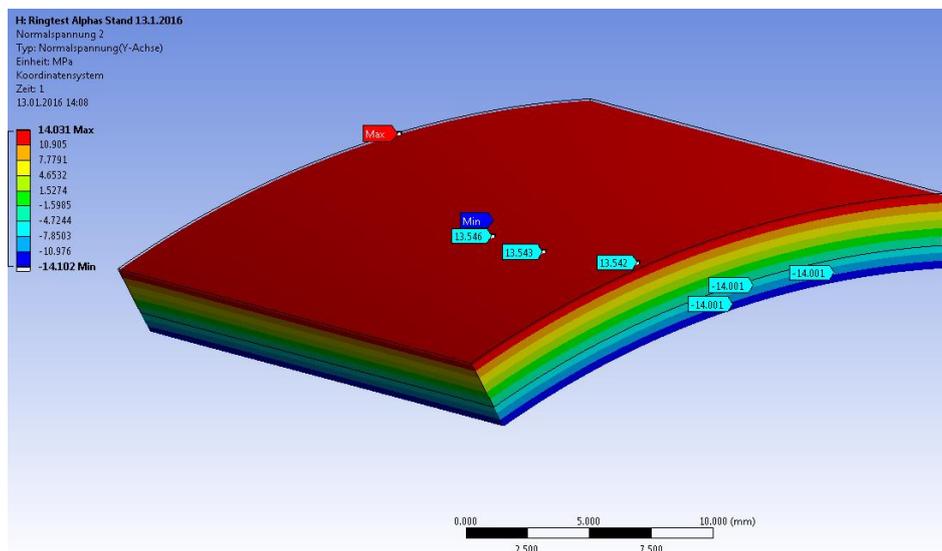


Bild 4.5: Auswertung der num. Rechnung: Tangentialspannungen des warmen Ringes [in MPa] über der Ringdicke.

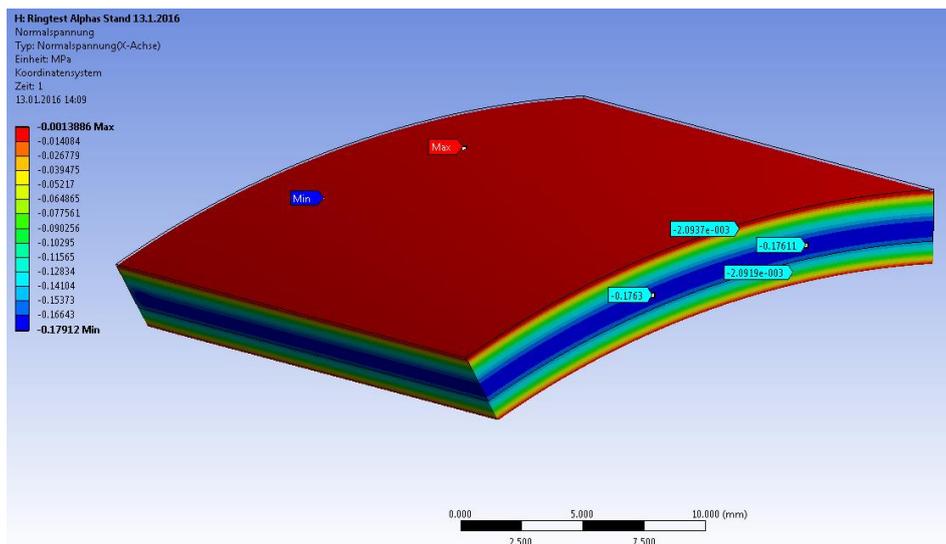


Bild 4.6: Auswertung der num. Rechnung: Radialspannungsverteilung des warmen Ringes über der Ringdicke.

Tabelle 4.2: Vergleich der analytischen mit der numerischen Lösung

	analytisch	numerisch
Radialverschiebung u_r		
Innenrand	-7,63 μm	-7,63 μm
Außenrand	-0,776 μm	-0,778 μm
Tangentialspannung		
Innenrand	-13,93 MPa	-14 MPa
Außenrand	+13,5 MPa	+13,52 MPa
Radialspannung in Ringmitte	- 0,174 MPa	-0,176 MPa

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Werte, so dass von einer Verifizierung des analytischen Verfahrens ausgegangen werden kann.

5 Einfluss von Ringdurchmesser und Ringdicke

Für diese Untersuchung sind die beiden wichtigen Größen das Radienverhältnis k_r (Ringdicke) und der Außenradius r_a , der gleichzeitig auch die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors für weitergehende Festigkeitsbetrachtungen beeinflusst ($v_u = r_a \Omega$). Diese beiden Größen werden für $44 \text{ mm} \leq r_a \leq 100 \text{ mm}$ (Index j) und $0,95 \geq k_r \geq 0,7$ (Index n) variiert. Damit deckt man den in der Praxis häufig vorkommenden Wertebereich ab. Alle elastischen Konstanten bleiben unverändert (Tabelle 4.1). Als

Haupt - Beanspruchungsgrößen werden die tang. Randspannungen und die max. Radialspannung verglichen.

Aus den Gleichungen 5.9 bis 5.11 geht hervor, dass

- die Verschiebungen an den Rändern proportional zum Radius anwachsen und natürlich vom Radienverhältnis k_r abhängen,
- die Spannungen jedoch nur vom Radienverhältnis k_r abhängig sind. Ein absoluter Größeneinfluss ist nicht vorhanden und
- die Spannungen wachsen proportional zur Temperaturlast.

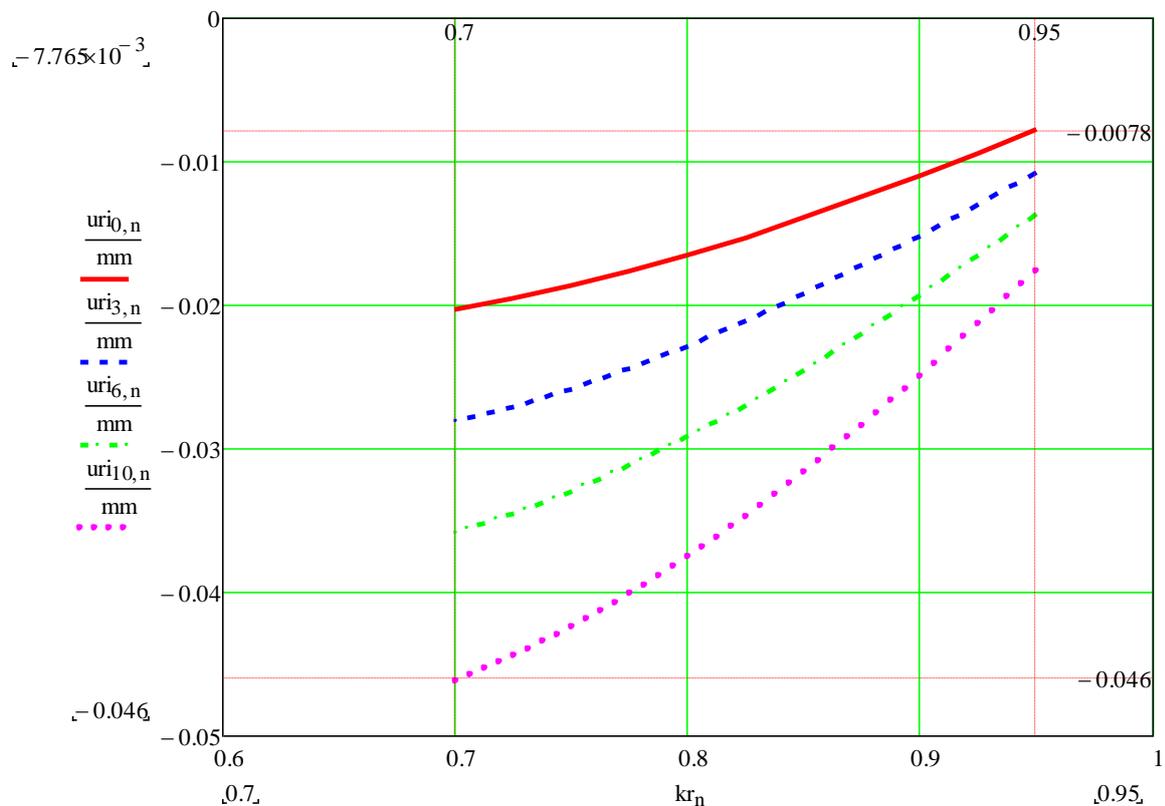


Bild 6.1: Verschiebungen am Innenrand des Ringes als Funktion des Radienverhältnisses, Parameter: Außenradius r_a

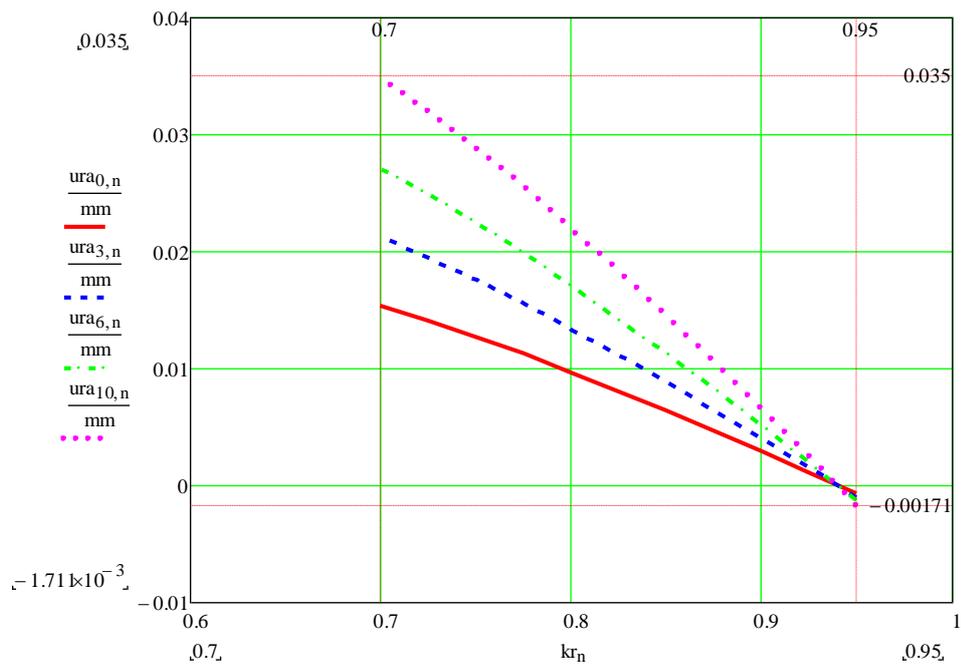


Bild 6.2: Verschiebungen am Außenrand des Ringes als Funktion des Radienverhältnisses k_r ,
Parameter: Außenradius r_a

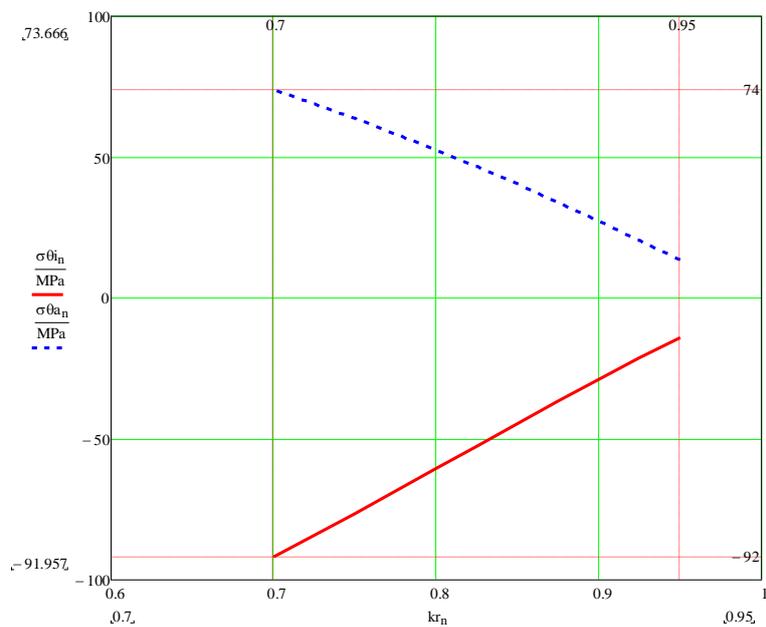


Bild 6.3: Tangentiale Randspannungen (rot: Innenrand, blau: Außenrand) als Funktion des Radienverhältnisses.

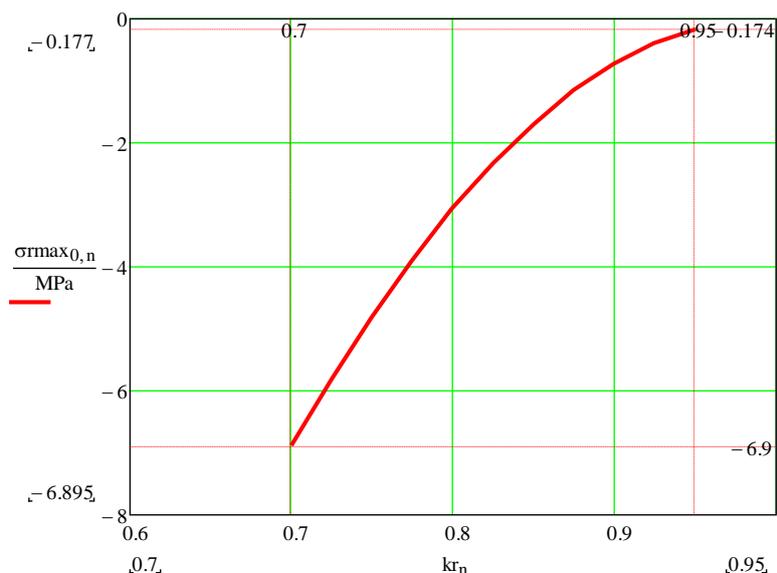


Bild 6.4: Maximum der Radialspannung als Funktion des Radienverhältnisses.

Die untersuchten polar orthotropen Ringe (in Umfangsrichtung gewickelte Ringe aus Carbonfaser verstärktem Kunststoff) weisen die maximal mögliche Anisotropie auf, stellen also für die anisotropiebedingten Eigenspannungen den „worst case“ dar.

Die thermisch bedingten Verschiebungen müssen bei der Konstruktion von Rotoren berücksichtigt werden, da diese z.B. die Randlasten in Pressverbänden erhöhen können. Sie sind bei sehr dünnen Ringen ($k_r > 0,94$) negativ. Bei dickeren Ringen werden sie dagegen am Außenrand positiv und nur am Innenrand negativ.

Um beispielsweise die Innenrand Verschiebung einer Bandage zu kompensieren, müsste am Innenrand ein Druck q angebracht werden, der der thermischen Schrumpfung entgegenwirkt. Dieser hat dann natürlich auch eine Tangentialspannung $\sigma_{\theta i}$ zur Folge, die sich den übrigen Belastungen der Bandage überlagert.

Daten für einen Beispielrotor: CFK Bandage mit den Daten nach Tab. 4.1

Drehzahl	n	15 000 1/min
Umfangsgeschwindigkeit	v_u	157 m/s
Somit Rotordurchmesser D , Radius	r_a	200 mm, $r_a = 100$ mm
Radienverhältnis der Bandage	k_r	0,85
Temperaturlast	ΔT	100 K

Der Einfachheit halber wird der Unterbau der Bandage als starr angenommen, so dass sich die Rechnung deutlich vereinfacht. Für die hier gewünschte Abschätzung des Effektes genügt das. Will

man genau rechnen, sind die Gleichungen nach [5] zu verwenden. In [5] werden alle Einzeleffekte linear überlagert, da keine plastische Verformung berücksichtigt wird und die Rotorbandagen aus CFK und GFK ohnehin ein linear elastisches Verhalten bis zum Bruch aufweisen. Dies gilt nun auch für die elastischen Verschiebungen und Spannungen aus der Temperaturlast.

Gemäß **Tabelle 5.2** ergibt sich eine Verschiebung des Innenrandes

$$u_{ri} = \vartheta_{iT} \cdot \Delta T = -32 \text{ } \mu\text{m}$$

Ein Innendruck q soll diese Verschiebung kompensieren (**Tabelle 5.1**):

$$-u_{ri} = q \cdot \beta_{iq}, \quad q = \frac{-u_{ri}}{\beta_{iq}} \text{ ergibt } q = -8,3 \text{ MPa}$$

Der Innendruck würde eine Tangentialspannung (**Tab. 5.1**)

$$\sigma_{\theta i} = q \cdot c_i = +58,64 \text{ MPa zur Folge haben.}$$

Zu überlagern ist die Tangentialspannung aus der Erwärmung (**Tabelle 5.2**)

$$\sigma_{\theta iT} = \vartheta_{iT} \cdot \Delta T = -44,7 \text{ MPa, so dass als resultierende Zusatzlast}$$

$$\sigma_{\theta i} + \sigma_{\theta iT} = 13,9 \text{ MPa}$$

übrigbleiben.

Man erkennt hier die entlastende Wirkung des dominanten negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die Vorspannung im Pressverband steigt also nur leicht an.

Die thermisch bedingten Eigenspannungen bei einer Erwärmung mit praxisnahen Temperaturhüben sind im Vergleich zu den strukturmechanischen Belastungen eher als gering anzusehen. Nur bei „dicken Ringen“ mit $k_r < 0,8$ treten Tangentialspannungen auf, die bei der Dimensionierung berücksichtigt werden sollten. Sie erreichen dann etwa 6% der üblicherweise zulässigen Tangentialspannung. Dabei ist die Tangentialspannung am Innenrand stets negativ, am Außenrand positiv. Da die dimensionierenden Tangentialspannungen aus den mechanischen Lasten am Innenrand bei z. B. Innendruck und Fliehkraftbelastung hier ein positives Maximum haben, wird die Struktur entlastet.

Die auftretenden Radialspannungen sind stets Druckspannungen, sie erreichen bei dicken Ringen 10..15% der radialen Druckfestigkeit. Bei einer Belastung durch z.B. Fliehkraft wirken auch diese entlastend. Bei reiner Innendruckbelastung wird jedoch die Beanspruchung erhöht.

Zusammenfassung

Die bei der homogenen Erwärmung von Ringen aus anisotropen Faserverbundwerkstoffen auftretenden Eigenspannungen wurden mit einem analytischen Ansatz berechnet. Hierzu wurde mit Hilfe des Werkstoffgesetzes die Differentialgleichung für die Radialverschiebungen des Ringes unter Temperaturlast aufgestellt und gelöst. Aus den Lösungsgleichungen folgen dann die Radialverschiebungen und die Tangential- und Radialspannungen, die analog [5] als Produkt aus Einflussziffer und Temperaturlast dargestellt werden können. Die analytischen Gleichungen lassen sich sehr gut mit der numerischen Rechnung (ANSYS) verifizieren, so dass ihre Tragfähigkeit als gesichert angesehen werden kann. Die Analyse der Gleichungen zeigt, dass die thermisch bedingten Eigenspannungen auch bei extremer Anisotropie (unidirektional gewickelte Bandagen) relativ zu den zulässigen Spannungen nur moderate Werte erreichen und in vielen Lastfällen eher entlastend wirken.

Werden Pressverbände mit Fliehkraftbelastung und CFK Bandagen an der Grenze der zulässigen Spannungen dimensioniert (i. a. der Regelfall), dann ist auf jeden Fall die Berücksichtigung der Lasten aus der Erwärmung notwendig.

Literatur

1	W.-R. Canders: Patente DE 4320894, EP 0 584 608, US5,457,870, JP 3491166, „Rotor für permanenterregte elektrische Maschinen“, (Kegelpressverband), 1993
2	S. Timoshenko, J.N. Goodier, Theory of Elasticity, Mac Graw Hill Book Company, 1951
3	S.G. Lekhnitskii: Theory of Elasticity of an Anisotropic Body, Mir Publishers Moscow, 1981, UDSSR
4	Burg/Haf/Wille: Höhere Mathematik für Ingenieure, Bd. III, B.G. Teubner Verlag Stuttgart, 3. Aufl., 1993
5	W.-R. Canders, J. Hoffmann: TB 14-05-01, Berechnung von Mehrschicht-Pressverbänden mit anisotropen Materialeigenschaften, Änderungsstand 14.1.2016
6	Wiedemann / Kellenberger, Konstruktion elektrischer Maschinen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1967
7	W.-R. Canders, D. Röstermundt, C. Lee: Entwurf von Schwungradspeichern mit integriertem Energiewandler, Teil 1: Festigkeitsrechnung, IMAB TB 000602, Juni 2000

Danksagung:

Für die Unterstützung bei der Charakterisierung und Lösung der Differentialgleichung für die Wärmeeigenspannungen gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Marten vom Institut Computational Mathematics, AG Partielle Differentialgleichungen, Carl-Friedrich-Gauß Fakultät der TU Braunschweig.

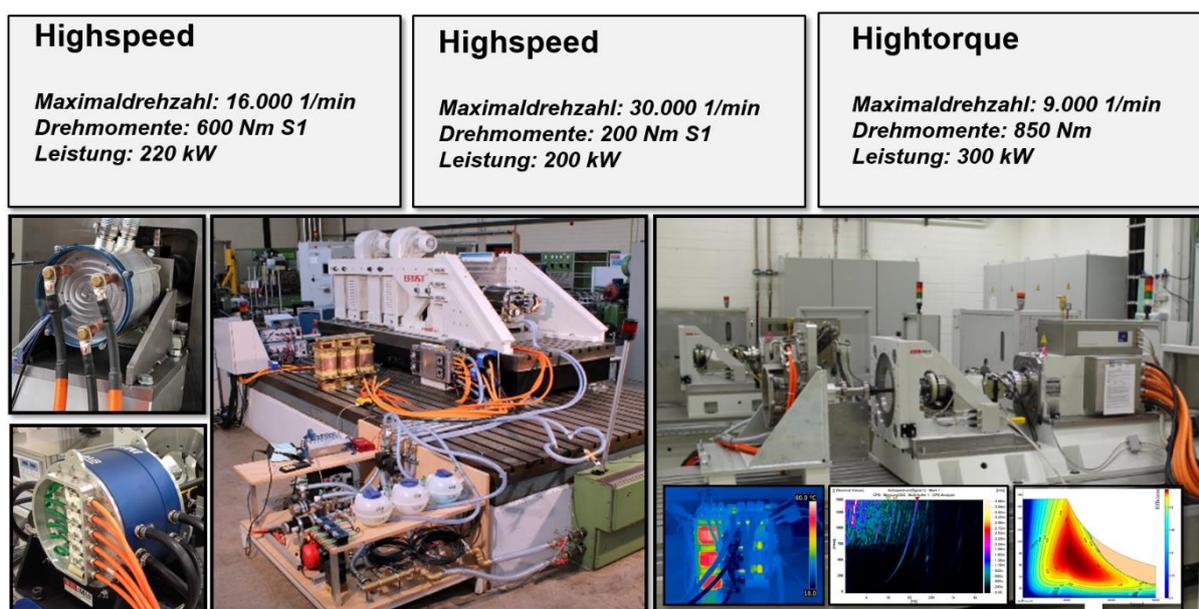
3.2 Prüfstandstechnik am IMAB

Vermessung Elektrische Antriebe

Sowohl am ‚Hauptsitz‘ des Instituts an der Hans-Sommer Straße als auch im NFF befinden sich umfangreiche Möglichkeiten zur Vermessung sowohl gesamter Antriebssysteme als auch zur Ermittlung gezielter Effekte in elektrischen Maschinen. In vielen Forschungsprojekten muss eine sehr genaue Bestimmung von elektrisch aufgenommener und mechanisch abgegebener Leistung erfolgen. Flankiert werden diese Analysen von Schwingungsmessungen, Temperaturmessungen und Festigkeitsanalysen.

Hierzu werden am IMAB zertifizierte Messeinrichtungen und Sensorsysteme genutzt, um hochgenaue Messungen zur Verifikation von Vorausberechnungen durchführen zu können.

Insbesondere im NFF können Antriebe auf modernen Prüfständen bis zu Leistungen von 500 kW analysiert und bezüglich Effizienz und Performance vermessen und appliziert werden.



Prüfstände für elektrische Antriebe in den IMAB Laboren HS-Straße und NFF

Über Batteriesimulatoren (DC-Spannungsquellen) können Antriebe mit Zwischenkreisspannungen bis zu 1000 V versorgt werden, und Konditioniereinrichtungen versorgen den Antrieb und leistungselektronische Ansteuereinrichtungen mit den erforderlichen Kühlmedien.

Hiermit werden am IMAB realitätsnahe, auf die jeweilige Fragestellung angepasste Versuchsbedingungen in den Maschinenlaboren sowohl für zahlreiche automotive-Anwendungen als auch für Industrieantriebe und Ansteuerkomponenten abgebildet.

Vermessung Leistungselektronische Bauelemente

Prüfplatz zur Vermessung von Leistungshalbleiterbauelementen und –modulen mittels Doppelpulstest

Wichtige Kenngrößen zur Beurteilung von Halbleitern sind die Durchlass- und die Schaltverluste. Mit ihnen kann der Entwickler den Wirkungsgrad des Wandlers im Vorfeld abschätzen und eine entsprechende Kühlung der Schaltung auslegen. Zur Ermittlung dieser Verluste wurde ein Prüfplatz verwendet, an welchem Bauteile und Module mittels Doppelpulstest vermessen werden können. Der Prüfling wird hierzu in einer Halbbrückenschaltung mit dem Spannungszwischenkreis verbunden. Die Last wird mit verschiedenen Spulen nachgebildet. Gesteuert wird der Prüfstand über einen Messrechner, welcher die Pulsdauer berechnet und an den Pulsgenerator weitergibt. Zur Einstellung des Laststromes wird die Pulsdauer angepasst. Der Pulsgenerator sendet bei der Messung zwei kurz aufeinander folgende Pulse an den Gate-Treiber (Auflösung 1 μ s). Dies bewirkt beim Schalten hohe dynamische Belastungen am Prüfling. Durch Änderung des Gate-Widerstandes kann darauf Einfluss genommen werden. Aus den gemessenen Größen UCE und IC wird über die Zeit die Schaltenergie beim Einschalten Eon und beim Ausschalten Eoff ermittelt. Mit den Messergebnissen kann dann der optimale Betriebspunkt der Halbleiter ermittelt werden. Auf diese Weise lassen sich Schaltverluste minimieren. Es können ganze Messreihen bezüglich Strom und Spannung bei verschiedenen Temperaturen autonom abgefahren werden.

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

Wichtige Kenngrößen des Prüfplatzes sind:

- Spannungszwischenkreis: Der Zwischenkreis mit einer Kapazität von 1,55 mF erlaubt Prüfströme bis 60 A und Prüfspannungen bis 1200 V. Über eine Adapterplatine wird der Prüfling (Modul oder Diskretes Bauteil) mit der Zwischenkreisplatine verbunden. Beide Platinen sind bezüglich Strom und Spannung erweiterbar. Die Hochspannungsversorgungseinheit kann den Spannungszwischenkreis auf maximal 2 kV aufladen.
- Treiberschaltung: Der Treiber kann einen maximalen Spitzengatestrom von 14 A liefern. Der Gatewiderstand kann beliebig verändert werden.
- Heizplatte: Die Heizplatte kann mit bis zu 100 W Heizleistung betrieben werden. Hiermit ist eine Maximaltemperatur von 200 °C erreichbar.

Der Prüfplatz ist erfolgreich erprobt. Die Angaben der Halbleiterhersteller konnten reproduziert werden. An dem Prüfplatz können umfangreiche und zuverlässige Messreihen zeitnah aufgenommen werden. Auch Treiberschaltungen können hier erprobt werden.



Schaltzelle mit Zwischenkreis und Adapterplatine

Kalorimetrischer Verlustleistungsmessplatz

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

Am IMAB ist im vergangenen Jahr ein auf Kalorimetrie basierender Messplatz zur Verlustleistungsmessung in Komponenten aber auch in ganzen Schaltungen in Betrieb genommen worden. Mit diesem Messplatz können Prüflinge mit einer minimalen Verlustleistung von 5...10 W bei verschiedenen Umgebungstemperaturbedingungen bis 100 °C gemessen werden.

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

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



Kalorimetrischer Messplatz

3.3 Externe Forschungsthemen

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

Optimierte Auslegung und Bewertung multiphasiger permanentmagnet-erregter Synchronmaschinen für Fahrzeuganwendungen

M. Sc. Julian Berlinecke (Volkswagen AG) betreut durch Prof. Henke

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

Die Aspekte des Explosionsschutzes bei der permanentmagnet-erregten Synchronmaschine und Synchron-Reluktanzmaschinen

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

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

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

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Ermittlung des Einflusses verschiedener Lastzustände und denkbarer Frequenzrichterfehler auf die Maschinenerwärmung und eine eventuelle partielle Entmagnetisierung der Magnetwerkstoffe. Hier sollen auch Berechnungen über die Methode der Finiten Elemente (FEM) zur Anwendung kommen. Ziel ist dabei auch die Entwicklung von FEM-Modellen, um die Erwärmung und das Verhalten der Permanentmagnete bei verschiedenen Lastzuständen berechnen zu können, und somit die Zahl notwendiger Versuche bei der Typprüfung des Motors zu reduzieren.

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

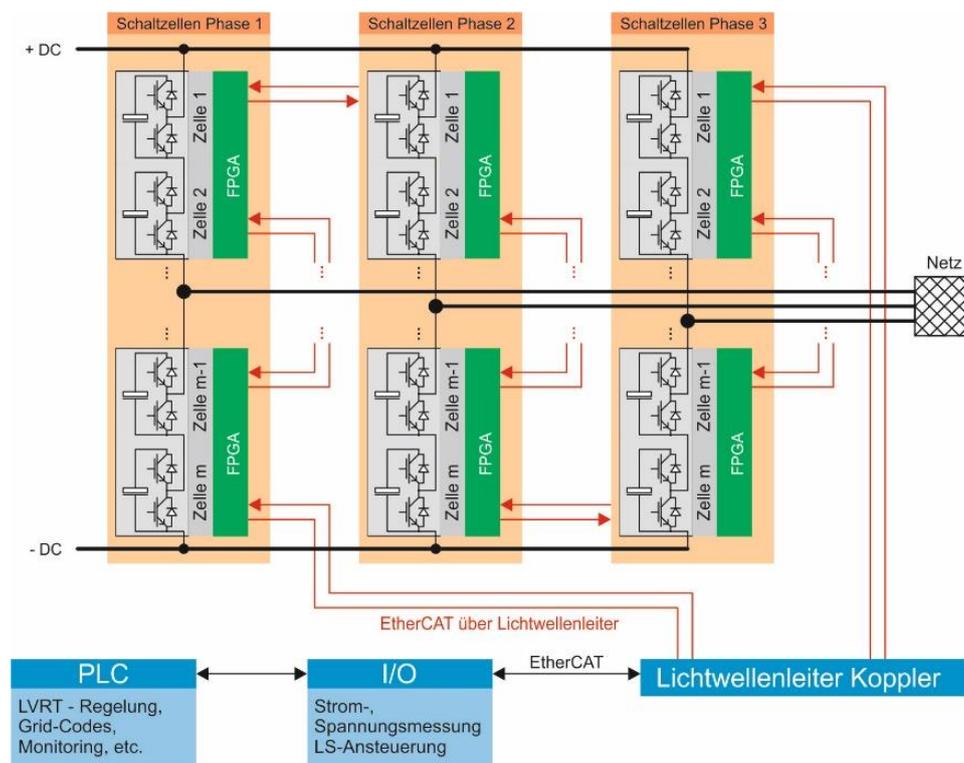
Netzfrenderlicher modularer Windenergie-Mittelspannungs-Umrichter mit dezentraler Steuerung

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

Die Hochschule Flensburg (HS FL) liegt zwischen Nord- und Ostsee an der Grenze zu Dänemark. Nicht nur maritime Themen, sondern auch regenerative Energien spielen eine große Rolle im Norden. Passend dazu fördert die Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein (EKSH) kooperative Projekte zwischen Hochschulen und Wirtschaft. Im konkreten Fall wird in Zusammenarbeit mit einem lokalen Umrichterhersteller und einem Marktführer für Automatisierungslösungen am Projekt „Netzfrenderlicher modularer Windenergie-Mittelspannungs-Umrichter mit dezentraler Steuerung“ geforscht.

Ziel ist es, einen modularen Mehrpunktumrichter (MMC) per Bussystem – statt bisher zentral – zu steuern. Dies soll die Skalierbarkeit für die jeweilige Anwendung erleichtern und eine Erweiterbarkeit, z. B. um redundante Zellen, gewährleisten.

Zu Testzwecken entsteht ein Umrichter für 3 kV Drehspannung im Prüffeld der HS FL. Die Kommunikation zwischen den Schaltzellen mit FPGA-Technologie wird über eine Ringtopologie mittels Lichtwellenleitern erfolgen. Die aktuellen Simulationsergebnisse und Berechnungen bestätigen die bisherigen Annahmen auf dem Weg zum Ziel, das Mitte 2018 erreicht sein soll.



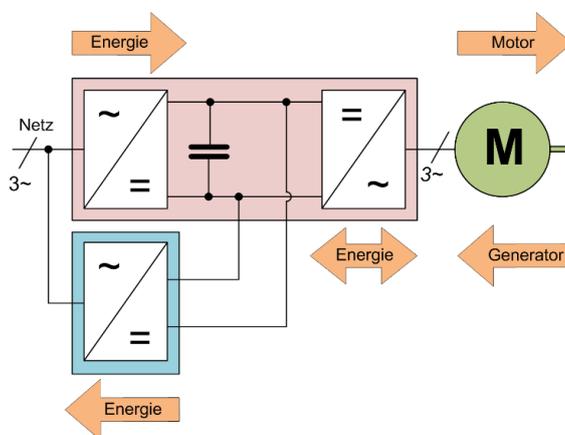
Skizze eines MMC zur Netzeinspeisung inkl. Busstruktur

Rückspeisestromrichter mit geregeltm Zwischenkreis

Johann Austerman, M. Sc., HS Ostwestfalen-Lippe betreut durch Prof. Mallwitz

Die Hochschule Ostwestfalen-Lippe zeichnet sich durch ein sehr aktives Labor Leistungselektronik und Elektrische Antriebe aus. Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich elektrische Industrieantriebe. Das Thema des vorliegenden Forschungsvorhabens liegt in der Energieeffizienzsteigerung.

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



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

Entwicklung einer bürstenlosen Rotorspeisung für fremderregte Motortopologien

M.Sc. Julian Veitengruber (DLR Stuttgart) betreut durch Prof. Henke

Fremderregte Synchronmaschinen stellen für einige Zielanwendungen einen guten Kompromiss im Hinblick auf Betriebsverhalten, Leistungsdichte sowie Fertigungskosten dar.

Eine systeminhärente Herausforderung liegt jedoch oftmals bzgl. der Erregerenergieübertragung auf rotierenden Maschinenteilen vor. Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens ist daher die Substitution von herkömmlichen Systemen, wie Schleifringen oder Erregermaschinen, durch eine kontaktlose, induktive Energieübertragung hoher Leistungsdichte. Im Zuge der Arbeit wird eine Entwicklungsmethode konzipiert, welche die optimale Gestaltung einer bürstenlosen elektronischen Rotorspeisung (BERS) im Zielkonflikt von Effizienz, Leistungsdichte und Bauteil Aufwand evaluiert. Wesentliche Arbeitsschwerpunkte liegen in der Modellbildung der elektromagnetischen Komponenten, der Leistungselektronik sowie der konstruktiven Integration in den bestehenden Bauraum eines rotierenden Aggregateträgers. Die Methode wird anhand zweier aussichtsreicher Systemansätze dargestellt und durch prototypische Realisierung bzw. Messdaten verifiziert.

Thermische Modellierung elektrischer Antriebe im Parallelhybridfahrzeug

M.Sc. Holger Hinrich betreut durch Prof. Henke

Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung einer Methode zur Erstellung von validierten Thermalmodellen für die Gesamtfahrzeugumgebung.

Die Arbeit umfasst die Vorstellung einer geeigneten Modellstruktur mit der Möglichkeit zur freien Diskretisierung und Parametrisierung des thermischen Netzwerks. Aus der Gesamtfahrzeugsimulation werden die Anforderungen an die Modelllandschaft und Simulationsgüte abgeleitet. Fokus liegt in der Untersuchung der aus der Umgebung resultierenden Einflüsse auf Basis des Vergleichs von Prüfstands-, Fahrzeugvermessungen und Simulation in unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Es wird ein geeigneter Messablauf für die erforderliche Datenbasis vorgestellt.

Zum Abgleich der Disziplinen wird eine automatisierte Modelloptimierung implementiert und die resultierenden Ergebnisse kritisch bewertet.

Topologieoptimierung von Elektromotoren unter Berücksichtigung von Kosten, Gewicht und Bauraum

M. Eng. Jian Zhang betreut durch Prof. Henke

In dem Beitrag wird die Funktionalität einer Topologieoptimierung für rein mechanische Bauteile um die Optimierung von Elektromotoren erweitert. Durch die Mehrfeldoptimierung von mechanischen und magnetischen Strukturen soll eine optimale Geometrie des magnetischen Kreises eines Elektromotors unter Einhaltung der mechanischen Anforderungen gefunden werden. Neben den Vorteilen bei Kosten und Gewicht ermöglicht der Einsatz des automatischen Optimierungswerkzeugs kürzere Entwicklungszeiten.

3.4 Abgeschlossene Dissertationen

Thermisch-elektrische Analyse und Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen für den elektrischen Antrieb eines Plug-In Hybridfahrzeugs

*Dr.-Ing. Franziska Beste, Dissertation am IMAB TU Braunschweig, 2016
(Erstberichter Prof. Henke)*

Die Antriebsstruktur von Plug-In Fahrzeugen gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sie einen elektrischen sowie einen uneingeschränkten hybriden Betrieb ermöglicht. Mit dem Einsatz dieser komplexen Antriebsstrukturen wird ein anspruchsvolles Wärmemanagement, insbesondere für die Hochvoltsysteme notwendig. Die Hochvoltkomponenten besitzen verschiedene Charakteristika, die aufgrund des thermischelektrischen Verhaltens beeinflusst werden. Diese Mechanismen der Bauteile hängen maßgeblich von der Einhaltung der optimalen Temperatur ab. Gleichzeitig müssen die realen Fahrzeugbedingungen zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung beachtet werden. Ein gesamtheitliches Wärmemanagement ist erforderlich, um die Kernpunkte wie Energieverbrauch, Leistung, Lebensdauer, Kosten und Bauraum umzusetzen.

Die im Rahmen der Arbeit von Frau Beste dargestellten neuen Ansätze beinhalten eine bedarfsgerechte Kühlung abhängig von dem aktuellen Betriebszustand der jeweiligen Komponente. Diese Methode stellt sicher, dass die garantierte Lebensdauer der Komponente und ein minimaler Energieverbrauch für die Kühlung erreicht werden.

Ein Versuchsträger und reale Messungen sind wesentlich für die Erfassung der Wärmeübergänge und für die Überprüfung der Signalgüte in den Berechnungen. Mit Hilfe der messtechnischen und simulativen Untersuchungen werden Wärmeverluste und die Zuverlässigkeit in verschiedenen Fahrbereichen vorgenommen und die Methodik wird am realen Fahrzeug verifiziert.

Betriebs- und Einsatzmöglichkeiten von Energiespeichern im Kontext einer nachhaltigen Energieversorgung

*Dr.-Ing. J.-H. Psola, Dissertation am IMAB TU Braunschweig, 2016
(Erstberichter Prof. Candors)*

Herr Psola untersuchte in seiner Arbeit unterschiedliche Energiespeichertechnologien und klassifizierte sie bezüglich ihrer Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten. Anhand einer strukturierten Einordnung wurden geeignete Speichertechnologien für den dezentralen Einsatz zur Wirkleistungsbereitstellung in Energieversorgungsnetzen identifiziert. Eine Analyse erfolgte in unterschiedlichen Szenarien bei variierenden Netzparametern und verschiedenen Speicherbetriebsansätzen. Auch Kombinationen unterschiedlicher Speichertechnologien wurden analysiert, bewertet und ökonomisch eingeordnet.

4 Lehre

Auch in 2015/2016 wurden wieder interessante und sehr gut besuchte Lehrveranstaltungen für unsere Studierenden angeboten. Die Vorlesungen des IMAB beinhalten theoretisches Grundlagenwissen zu allen Komponenten und Systemen im elektrischen Antrieb, gepaart mit praktischen Anwendungsbeispielen aus Industrie und Forschung und sind in zahlreiche Studiengänge der TU Braunschweig eingebunden.

In den Praktika werden die vermittelten Inhalte anhand von exemplarischen Hardwareaufbauten und Prüfstandsversuchen unter praktischen Gesichtspunkten behandelt. Neu hinzugekommen ist das Praktikum "Elektromobilität" für Studierende des gleichnamigen Masterstudiengangs. Das Praktikum wird von fünf Instituten gestaltet, wobei der vom IMAB gestaltete Teil den elektrischen Maschinen und leistungselektronischen Systemen im Fahrzeug gewidmet ist, verbunden mit Prüfstandsmessungen an einem elektrischen Antrieb.

4.1 Vorlesungen und Praktika in 2015/16

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

Praktika	Durchführung	Semester
Praktikum Leistungselektronik	Langmaack, Dietrich, Siebke, Schobre	WS
Praktikum Elektrische Maschinen	Langmaack, Tareilus, Cai, Heister	WS
Antriebssysteme für E-Fahrzeuge	Dietrich, Siebke, Hain, Menn	SS
Labor Master Elektromobilität	Dietrich, Siebke	WS

Lehrveranstaltungen für Bachelorstudiengänge

Grundlagen der elektrischen Energietechnik

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

Elektrische Antriebe

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

Grundsaltungen der Leistungselektronik

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

Grundlagen der Energietechnik für Umweltingenieure

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

Lehrveranstaltungen für Masterstudiengänge

Angewandte Leistungselektronik

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

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

Drehstromantriebe und deren Simulation

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

Elektrische Antriebe für den spurgebundenen Verkehr

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

Elektrische Antriebe für Straßenfahrzeuge

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

Entwurf elektrischer Maschinen

Die Studierenden lernen in dieser Vorlesung von Prof. Henke den Entwurfsprozess elektrischer Maschinen kennen. Wichtige Spezifikationsgrößen als auch der konkrete Maschinenentwurf stehen im Vordergrund. Hierbei findet ausgehend vom systematischen Wicklungsentwurf die Wicklungsauslegung statt und es schließt sich eine elektromagnetische Gesamtauslegung unter Nutzung von numerischer Feldberechnung an. Ebenso werden das dynamische Verhalten sowie thermische Einflüsse detailliert betrachtet.

Leistungselektronische Systeme

In der Mastervorlesung „Leistungselektronische Systeme“ (regulär im Wintersemester) werden den Studierenden leistungselektronische Systeme als der Verbund aus den zuvor in den Grundlagen erlernten Einzelbaugruppen und Schaltungstopologien nähergebracht. Neben der Vermittlung von theoretischen Konzepten liegt der Fokus auch auf Systemen der Leistungselektronik mit einem realen Anwendungszweck, beispielsweise für PV-Anlagen, Windenergieanlagen oder auch Fahrzeugantriebe.

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.



Praktischen Tätigkeiten am IMAB

Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge

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

Labor zum Masterstudiengang Elektromobilität

Das Praktikum "Elektromobilität" für Studierende des gleichnamigen Masterstudiengangs wird von fünf Instituten gestaltet. In diesem Praktikum werden zum einen die Grundlagen in den Bereichen Batterieforschung und -produktion, Antriebe, leistungselektronische Systeme, elektrische Energieversorgung sowie 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 Exkursionen

IMAB on Tour - Exkursionen

Dipl.-Ing. Anna-Lena Menn

„Wo mache ich mein Praktikum und kann ich meine Bachelor- oder Masterarbeit in einem Unternehmen schreiben? Wie sieht eigentlich der Arbeitsalltag eines Ingenieurs aus? “

Diese Fragen stellt sich jeder Studierende im Rahmen seines Studiums. Um die Studierenden bei diesen wichtigen Fragen rund um das Thema Praxiserfahrung und Berufseinstieg zu unterstützen, organisiert das IMAB regelmäßig Exkursionen zu interessanten Firmen aus dem Bereich der elektrischen Antriebstechnik.

Tagesexkursion nach Leipzig

M. Sc. Thorben Schobre

Im Februar 2015 und 2016 fuhren wir jeweils für einen Tag zur Produktion der Elektrofahrzeuge der BMW-i Serie nach Leipzig und bekamen spannende Einblicke in die Herstellung von Elektrofahrzeugen.

Dort wurde der gesamte Produktionsprozess, beginnend mit der Kohlefaserverbundkarosserie und abschließend mit der Endmontage, des BMW i3 präsentiert. Die Studierenden konnten einen modernen, unkonventionellen Elektrofahrzeugfertigungsprozess hautnah miterleben. Besonders spannend waren die aufgeschnittenen Fahrzeugmodelle, bei denen alle Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs aus der Nähe in Augenschein genommen werden konnten.



Exkursion zum BMW-Werk in Leipzig

Studentenexkursion nach Ostwestfalen/Lippe vom 17.-19.05.2016

B. Sc. Hendrik Schefer

Im Mai 2016 fuhren wir für drei Tage in die Region Ostwestfalen/Lippe und besuchten dort vier Firmen aus dem Bereich der Antriebstechnik: Beckhoff Automation, dSPACE, Lenze und CLAAS.

Am Anreisetag präsentierte sich das innovative Unternehmen Beckhoff Automation, ein innovatives Unternehmen im Bereich Automatisierung und Antriebstechnik. Den Studierenden konnte das Unternehmen einen Eindruck in die Displays- und Elektronikfertigung vermitteln. Für Fragen standen viele firmeneigene Studierende und Mitarbeiter stets zur Verfügung. Des Weiteren stellt Beckhoff ein neuartiges Antriebskonzept im Bereich der Linearantriebe vor.

Am zweiten Tag bot Lenze den Studenten eine Führung durch die Fertigung der Umrichter. Dabei konnte ein Einblick über die komplexe Fertigung von Umrichter-Modulen im Bereich Antriebstechnik gewonnen werden. Zudem legte eine Mitarbeiterin die Karriere-Chancen beim Unternehmen anhand eines Vortrages dar.

Am Nachmittag stellt sich dSpace aus Paderborn vor. dSpace gewährte einen Einblick in die Entwicklung und Produktion der MicroLabBox, der Fertigung der Hardware-In-The-Loop-Test-Racks sowie den aktuellen Forschungsschwerpunkten in den Bereichen Energietechnik und Automotive. Nach einer Vortragsrunde konnten Eindrücke über aktuelle Projekte gewonnen werden. Hier stellte dSpace HIL-Tests im Bereich Lenkungssimulation und Fahremulatoren vor.

Am Abreisetag bot CLAAS einen Einblick in die landwirtschaftliche Technik. Die hiesige Produktion war ein Schwerpunkt des Besuches. Besonders beeindruckend war der Betriebsablauf der Produktion von großen landwirtschaftlichen Maschinen. Ein Entwicklungsingenieur verdeutlichte anhand eines Vortrages die Problematiken und Vorteile der Elektrifizierung von landwirtschaftlichen Fahrzeugen.

An den Abenden hatten die Studenten die Möglichkeit die Stadt Paderborn zu erkunden. Herr Prof. Henke stand den Studierenden an einem Abend für einen Austausch zur Verfügung. Die Nächte verbrachten die Teilnehmer der Exkursion in der zentralgelegenen Jugendherberge in Paderborn.



Exkursionsteilnehmer bei Fa. CLAAS

Wir bedanken uns bei allen Firmen und besonders bei den Mitarbeitern, die uns an den Tagen begleitet haben, für Ihre Unterstützung.

Erlebnistag – Elektrofahrzeug

Dipl.-Ing. Anna-Lena Menn

„Wer von Ihnen ist schonmal selbst ein Elektrofahrzeug gefahren oder in einem mitgefahren?“

So eine Frage an die Hörerschaft in einer Vorlesung, die das Thema „Elektrische Antriebe für Straßenfahrzeuge“ trägt, ist nicht abwegig.

Der ein oder andere Zuhörer konnte auch schon mit einem Erlebnisbericht glänzen. Die überwiegende Mehrheit allerdings ist bislang noch nicht in den Genuss gekommen. Das brachte uns auf die Idee einen „Erlebnistag-Elektrofahrzeug“ am IMAB durchzuführen.

Mit unserem Projektfahrzeug „emilia“, ein VW Golf, und einem BMW i3 konnten die interessierten Studierenden zwei rein elektrisch betriebene, aber sehr unterschiedliche Autos entdecken. Beide Fahrzeuge wurden vor der Probefahrt genau inspiziert und die sichtbaren Komponenten umfangreich analysiert. Ebenso konnten Vergleiche zum bekannten konventionell betriebenen Fahrzeuge gezogen werden. Somit wurde jedem schnell klar, was sich hinter den grad erlernten Begriffen „Conversion und Purpose-Design“ denn wirklich verbirgt.

Anschließend kam jeder Studierende in den Genuss in beiden Fahrzeugen mitfahren zu können.



Vorführung von Elektrofahrzeugen am IMAB

Wir danken dem Autohaus Block am Ring in Braunschweig für die freundliche Leihgabe des i3!

4.3 Zusammenstellung studentischer Arbeiten am Institut

Seminarvorträge

Florian Mittelstädt	Strategien zur Verlustminimierung einer Asynchronmaschine
Robert Keilmann	Energietechnik der Internationalen Raumstation ISS
Thorben Schobre	Moderne passive Komponenten für leistungselektronische Systeme
Ahmad Suliman	Innovative Regelstrategien der elektrischen Maschinen für Elektrofahrzeuge
Saige Ni	Perfekt geregelt oder eher gerätselt? - Wie funktioniert die akkurate Reglerauslegung?
Christopher Towara	Anwendungsorientierter Vergleich von Fahrmotoren mit besonderem Blick auf die Asynchronmaschine
Zheran Li	Die Asynchronmaschine als Fahrzeugantrieb?! Top oder Flop?
Michael Schweins	Elektrifizierungstrends in der Landmaschinentechnik
Qianting Shui	Darstellung des aktuellen Stands im Bereich der Kleinstfahrzeuge vom Kei-Car bis zum People Mover
Yu Zhang	Kugelförmige elektrische Maschine: Stand der Technik
Thilo Coenders	Metallisches Glas für elektrische Maschinen
Martin Blohm	EMV gerechter Entwurf von Platinen für schnell schaltende Leistungshalbleiter
Lars Groppe	Elektrische Antriebe in der Raumfahrttechnik
Clemens Schmidt	Bordnetze in modernen Verkehrsflugzeugen
Constantin Matthes	Wirtschaftlichkeit von heimischen PV-Anlagen und Speichersystemen
Boyke Vehring	Einsatz von Elektromotoren und Leistungselektronik im Motorsport
Jürgen Kiesler	Qi-Standard: Induktive Energieübertragung für Mobiltelefone und Tablets
Manuel Ockfen	Der perfekte Antriebsstrang - Wie simuliert man ihn richtig?
Yungin Hu	Aktueller Entwicklungsstand von Solarzellen

Julien Gerber	Automatisierte Leiterplattenfertigung - Verfahren und Stand der Technik
Ronny Haink	Elektromechanischer Bremskraftverstärker
Özen Fidan	Brennstoffzellenfahrzeuge

Bachelorarbeiten

Marc-Daniel Bednarek	Entwurf eines Aufbaus zur zuverlässigen Vermessung von Halbleiterbauelementen
Ubeydullah Cavus	Breitbandige Stromsensorik für schnell schaltende Leistungshalbleiter
Holger Assmann	Entwurf und Aufbau von Klasse-D-Leistungsverstärkern
Christian Frankenberg	Entwurf und Aufbau kompakter DC/DC-Wandler kleiner Leistung mit indirekter Spannungsregelung
Tobias Fricke	Einsatz von Galliumnitrid-Leistungshalbleitern in einem besonders kompakten DC/DC-Wandler für Mild-Hybrid-Fahrzeuge
Lasse Hass	Vergleich unterschiedlicher Regelstrategien für eine fremderregte Synchronmaschine als Fahrzeugantrieb
Simon Brüge	Vergleich unterschiedlicher Magnetformen für eine Außenläufersynchronmaschine
Lucas Vincent Hanisch	1D-Simulation des elektromagnetischen Aktors für einen PKW-Dieselinjektor
Maximilian Kamp	Auslegung eines Rotors mit vergrabenen Magneten für ein Elektrofahrzeug
Maik Schnieders	Analyse und Implementierung von Messverfahren zur Verlustbestimmung in weichmagnetischen Bauelementen
Sven Ripken	Auslegung des Kühlsystems für einen elektrischen Antriebstrang eines E-Fahrzeugs
Tongyang Shi	Untersuchung von Hall-Effekt-basierten Winkelsensoren zur Regelung elektrischer Maschinen
Stefan Czybik	Planung und Aufbau eines Prüfplatzes für PV-Wechselrichter geringer Leistung zur Bestimmung des Wirkungsgrades
Enja Rösch	Programmierung einer flexiblen Wechselrichtersoftware mit CAN-Anbindung
Sven Cholewa	Entwurf eines effizienten bidirektionalen Netzumrichters
Diep The Dung	Programmierung eines Wechselrichters mit intelligenten Treiberstufen

Jan-Iver Iversen	Automatisiertes Wicklungsdesign unter Verwendung eines Kürzeste-Wege-Algorithmus
Mazlum Demir	Untersuchungen zu einem geschalteten Rolling-Rotor Reluktanzmotor-Ansatz zur direkten Förderung von Medien in der Rotorkammer

Studienarbeiten

Michael Folkers	Erstellung eines virtuellen Prüfstands als Vorbereitung eines HiL-Systems im automobilen Bereich (Fak. Maschinenbau)
-----------------	--

Masterarbeiten

Andrej Balakin	Entwicklung, Aufbau und Erprobung eines Li-Ion-Batterie-Überwachungssystems
Julian Berlinecke	Auslegung und Optimierung schnelllaufender Asynchronmaschinen für Elektrofahrzeuge
Marc Fink	Entwurf und Aufbau eines Prüfgerätes für induktive Bauelemente
Stefan Urbanek	Effizienzoptimierter Einsatz der Asynchronmaschine für Traktionsantriebe
Birthe Remmers	Entwurf eines kompakten Schnellladegerätes für ein Elektrofahrzeug
Christian Tacke	Aufbau einer intelligenten Treiberstufe
Thorben Schobre	Entwurf und Aufbau eines einphasigen Solarwechselrichters mit GaN-Leistungshalbleitern
Florian Rewald	Einfluss variabler Magnetisierung auf permanentmagneterregte Synchronmaschinen mit Reluktanzstruktur
Konstantin Siebke	Einsatz von Galliumnitrid-Leistungshalbleitern in einem besonders kompakten Ladegerät für Elektrofahrzeuge
Michael Folkers	Optimierte Auslegung der Boost-Funktion eines Hybrid-Fahrzeugs unter Einbeziehung prädiktiver Streckendaten
Timo Haage	Erstellung eines Simulationsmodells einer Synchronreluktanzmaschine zur Beurteilung des Explosionsschutzes

Oleg Schäfer	Sensorlose Regelung einer Asynchronmaschine im Umfeld einer HiL Simulation
Florian Mittelstädt	Die geregelte Asynchronmaschine als Antrieb für ein leichtes Nutzfahrzeug
René Noack	Die sensorlose Regelung einer permanent erregten Synchronmaschine als Antrieb für ein Elektrofahrzeug im Umfeld einer HiL Simulation
Sebastian Manegold	Systematische Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Antriebsstrangs eines Wasserkraftwerkes mit Hilfe von Simulationsverfahren (extern)
Zheran Li	Simulation und Implementierung von Maximum-Powerpoint-Tracking-Verfahren für den Betrieb von Solarzellen
Hao Wang	Elektromagnetische Evaluation der permanentmagnet-erregten Flux-Swicking-Synchronmaschine (FSPM) als Anwendung in einem Elektrofahrzeug
Ou Xu	Elektromagnetische Auslegung einer linearen permanentmagneterregten Flux-Switching-Synchronmaschine (FSPM) als Resonanzaktuator
Hao Zheng	Untersuchung des Verhaltens weichmagnetischer geblechter Materialien unter besonderer Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit
Robert Müller	Identifikation von Bordnetzparametern im Elektrofahrzeug mittels Impedanzspektroskopie über den DC/DC-Wandler
Thomas Tittlepp	Entwurf einer netzwerkbasierter Messdatenerfassung
Dieyu Chen	Vergleich unterschiedlicher Rotorstrukturen mit Reluktanzeffekt für eine permanentmagneterregte Außenläufer-Synchronmaschine als Wickelantrieb
Andreas Matthiesen	1D-Simulation eines elektromagnetischen Aktors für einen GDI-Injektor
Sebastian Schule	Optimierung Permanentmagneterregter Synchronmaschinen für Hochdrehzahlkonzepte unter Betrachtung von Wechselwirkungen zu Festigkeitsanforderungen
Henning Schillingmann	Untersuchungen von Drehzahl-Wachstumsgesetzen bei Synchron-Reluktanzmaschinen für Automobilanwendungen

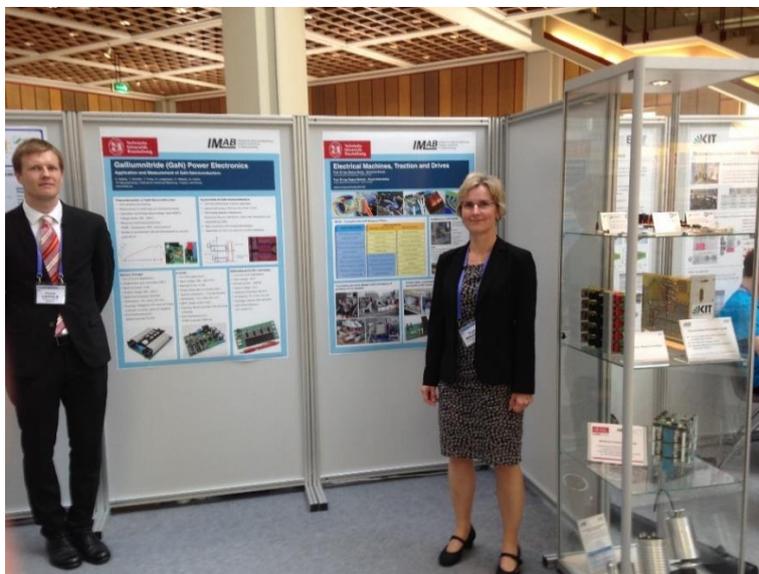
5 Ereignisse 2015/16

5.1 Berichte von besonderen Ereignissen

Das IMAB auf der EPE 2016

Prof. Dr.-Ing R. Mallwitz, M. Sc. Florian Lippold

Die EPE ist eine der größten Konferenzen bezüglich Leistungselektronik und deren Anwendung in Europa und fand 2016 zwischen dem 5. und 9. September in Karlsruhe, Deutschland statt. Organisiert wurde die Konferenz in diesem Jahr vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Es kamen mehr als 700 Teilnehmer und es wurden ca. 400 Beiträge angenommen. Hinzukamen etwa 50 Aussteller. Das IMAB war mit zwei Postern und einem Ausstellungsstück (SiC-Hochsetzsteller) bei der University Exhibition vertreten (siehe Foto). Diese wurden sehr gut angenommen, insbesondere das Poster mit den GaN-Applikationen weckte Interesse.



Frau Professor Mallwitz und Herr Lippold am IMAB-Stand

Täglich gab es interessante Vorträge und Diskussionsrunden. Die sehr gut besuchte Diskussion „Fast switching semiconductors“ wurde von Frau Professor Mallwitz moderiert. Die Postersessions waren ebenfalls sehr zu empfehlen. In persönlichen Gesprächen konnte diskutiert und informiert werden.

Der wissenschaftliche Focus der EPE lag dieses Jahr auf Wide-Band-Gap-Halbleitern, Leistungselektronik für Erneuerbare Energien, Entwicklungen für Elektrofahrzeuge und Herausforderungen in der Energieversorgung.

Weitere wichtige Trends:

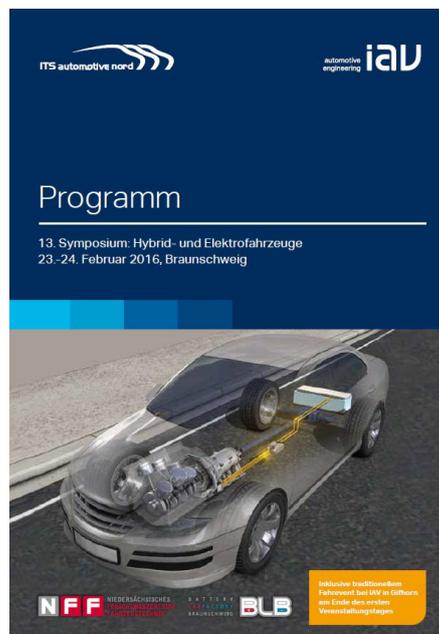
- Future Grids und Ertüchtigung von Erneuerbaren Energien
- Grid Pollution
- IT-Sicherheit

Neben zahlreichen Fachvorträgen bestand die Möglichkeit sich mit Vertretern namhafter Firmen auszutauschen. Ein Anziehungspunkt war der Stand von Daimler an dem der Antriebsstrang eines Hybridfahrzeugs ausgestellt war.

Symposien Hybrid- und Elektrofahrzeuge in Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Markus Henke

Auch in 2015 und 2016 wurde das Symposium Hybrid- und Elektrofahrzeuge in der Braunschweiger Stadthalle maßgeblich durch das IMAB unterstützt. Prof. Henke leitete die Tagung in enger Zusammenarbeit mit Prof. Voß (IAV), Prof. Mallwitz hielt einen Vortrag zum Thema „Kompakte Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge“ und Tim-Hendrik Dietrich berichtete im Rahmen seines Vortrages „Fahrzeugintegration und Systemkonzept beim induktiven Schnellladen“ von den Forschungsergebnissen des Verbundprojektes InduktivLaden.

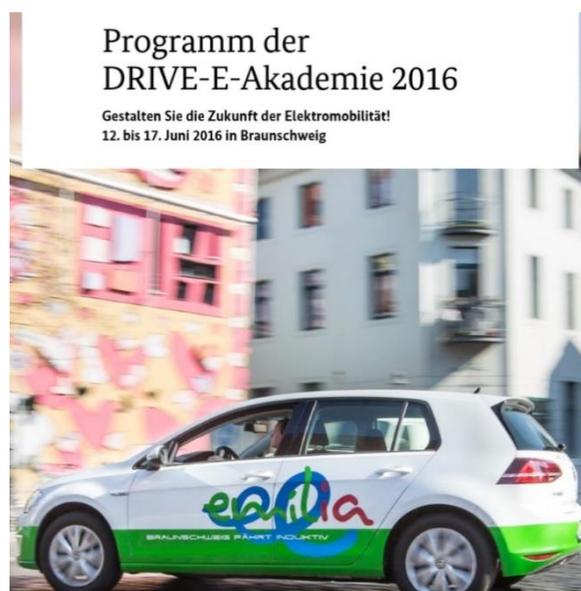


Tagungsleitung Prof. Henke

Die Drive-E-Akademie zu Besuch in Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz, Dipl.-Ing. Anna-Lena Menn

Vom 12.06.2016 - 17.06.2016 machte das Nachwuchsprogramm der Elektromobilität, die Drive-E-Akademie in Verbindung mit dem Drive-E-Studienpreis, des Bundesministeriums für Bildung und Forschung halt am Niedersächsischen Forschungszentrum für Fahrzeugtechnik. Frau Prof. Mallwitz gelang es die Vertreter des BMBF zu überzeugen, dass die Drive-E Akademie 2016 in Braunschweig bestens aufgehoben und ein würdiger Gastgeber ist.



Drive-E-Akademie

Unser Institut gehörte somit zu den Gastgebern und war mit Prof. Regine Mallwitz und Dipl.-Ing. Anna-Lena Menn maßgeblich an der Organisation und Programmgestaltung dieser Akademie beteiligt.

Ausgewählte Nachwuchsexperten der Elektromobilität, 54 Studierende aus der gesamten Republik beschäftigten sich sechs Tage lang mit spannenden Aspekten rund um die Elektromobilität. Das abwechslungsreiche Programm enthielt neben 34 spannenden wissenschaftlichen Vorträgen am NFF auch viele praktische Einblicke in die Welt der alternativen Antriebe. Es wurden verschiedene wissenschaftliche Einrichtungen und Firmen in unserer Region besucht, dazu gehörten die Firmen Alstom und Robert Bosch in Salzgitter, die Volkswagen AG am Standort Isenbüttel und die Battery Lab Factory in Braunschweig.

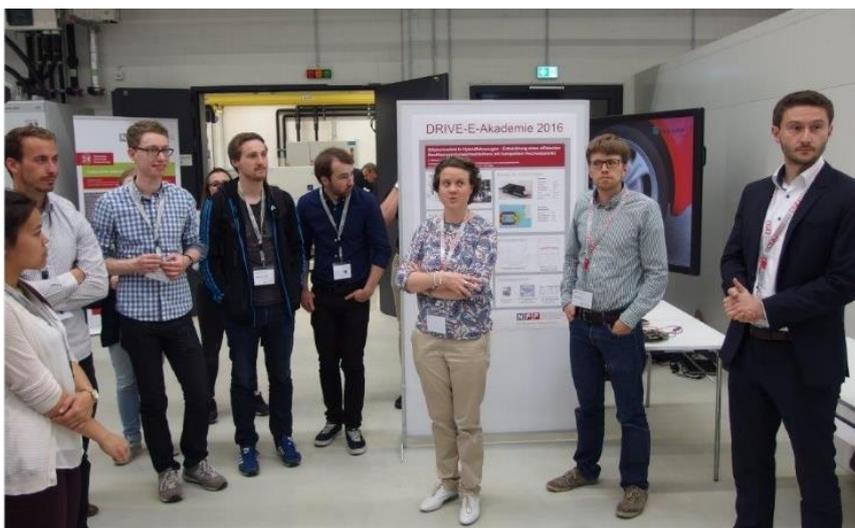
Zu der Riege der Redner gehörten aus unserem Institut Frau Prof. Mallwitz und Prof. Henke, die über aktuelle Herausforderungen aus ihren jeweiligen Forschungsbereichen berichteten.



Vorträge von Prof. Mallwitz und Prof. Henke auf der Drive-E Akademie

Aber auch die Unterhaltung sollte nicht zu kurz kommen, so konnten die Studierenden die Elektromobilität bei einem eigens organisierten Fahrevent und einem Besuch der E-Mobility Station in Wolfsburg live erleben.

Einen weiten Blick über den nationalen Tellerrand bekamen die TeilnehmerInnen beim internationalen Austausch, der unter dem Motto „Mobility of the future – Exchange of Ideas“ stand und bei dem international agierende Experten der Elektromobilität von ihren Tätigkeiten berichteten. Auch hier war das IMAB mit einem Beitrag vertreten, Herr Thorben Schobre gab einen interessanten Einblick in seine Praktikantenzeit bei dem Elektroautomobilhersteller Tesla in Palo Alto, Kalifornien.



Drive-E Akademie im NFF Technikum

Einer der Höhepunkte der Akademiewoche war die Verleihung der Drive-E-Studienpreise, die im Rahmen eines würdigen Festabends in Braunschweigs guter Amtsstube, der Dornse, stattfand. In diesem Jahr kamen fünf Nachwuchswissenschaftler in den Genuß zu den glücklichen Preisträgern zu gehören.

In diesem Zusammenhang gratulieren wir unserem Kollegen Henning Schillingmann, der für seine Abschlussarbeit über die Auslegung einer Synchron-Reluktanzmaschine den 2.Preis in der Kategorie Masterarbeiten erhielt.

Abschließend möchten wir uns nochmal recht herzlich bei allen Unterstützern, Vortragenden und Firmenvertretern dieser Woche recht herzlich bedanken!



M. Sc. Henning Schillingmann erhält den DRIVE-E Studienpreis

Bildquelle Drive-E: Massel

Elektrische Antriebe in der Kinder-Uni der TU

Prof. Dr.-Ing. Markus Henke

Im Rahmen der Kinder-Uni der TU Braunschweig hielt Prof. Henke eine Vorlesung vor 600 sehr interessierten Kindern und deren Eltern. Thema war: „Was summt denn da im Elektromotor?“ Die Jungforscherinnen und Jungforscher wurden auf anschauliche Weise in die Geheimnisse elektrischer Maschinen eingeweiht und zahlreiche interessante Experimente untermauerten die Erklärungen und begeisterten die jungen Studierenden.



Vorlesung vor 600 Kindern und ihren Eltern

5.2 Kalender

14.01.2015

Tagesexkursion BWM-Leipzig im Rahmen der Vorlesung ‚Elektrische Antriebe für Straßenfahrzeuge‘



20.01.2015

Erlebnistag – Elektrofahrzeug am IMAB



11.02.2015

Einweihung des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik und des Standortes IMAB / NFF mit Prüfständen.



01.06.2015

70. Geburtstag Prof. Meins

Das IMAB gratulierte dem immernoch in Projekten aktiven Prof. Meins zum 70.



18.-19.06.2015

Das Projektabschlussstreffen des BMBF-Projektes „e-generation“ fand unter Teilnahme von Anna-Lena Menn und Prof. Canders statt.

24.06.2015

Behörden Staffel-Marathon



Teilnehmer: Fabian Hain, Henning Schillingmann, Kai Vollprecht, Bin Shen, Christian Heister, Mang Cai

26.08.2015

50. Geburtstag Dr. Tareilus

Das IMAB gratuliert dem Oberingenieur sehr herzlich !



17.09.2015

Institutsausflug – Erlebnisführung im Oberharzer Wasserregal und Nationalpark Harz



16.12.2015

Weihnachtsfeier – Gliesmaroder Thurm



25.-29.04.16

Hannover Messe

Das IMAB präsentiert das Forschungsfahrzeug „emilia“ auf der Hannovermesse.



Ministerin für Wissenschaft und Kultur
Heinen-Kljajic am NFF Messestand

17.05.-19.05.16

Exkursion für Studierende in die Region Ostwestfalen/Lippe mit Besuch der Firmen Beckhoff, Lenze, dSpace und Claas

Die Exkursion war ein toller Erfolg und wurde von Anna-Lena Menn und Christian Heister geleitet.

01.06.2016

1. Tag Dorothee Ottow – wir begrüßen unsere neue Leiterin des Sekretariats !

**08.06.2016**

Behörden Staffel-Marathon

Teilnehmer: Henning Schillingmann, Christian Heister, Konstantin Siebke, Miriam Hermann, Prof. Markus Henke, Lasse Hass, Mang Cai

**12.06.-17.06.16**

Drive-E Akademie, Nachwuchsprogramm zur Elektromobilität des BMBF zu Gast am NFF/IMAB

Prof. Mallwitz und Frau Menn leiteten die Drive-E Akademie im NFF, eine interessante Woche für Studierende im Umfeld der Elektromobilität.

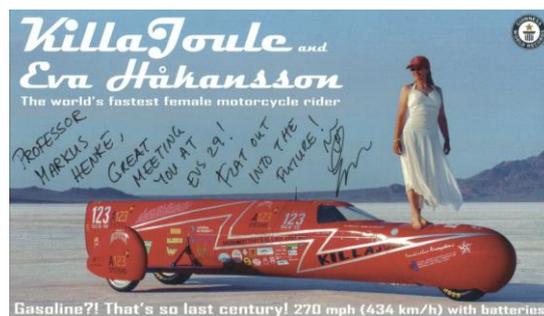
18.06.2016

Das IMAB präsentierte Forschungsthemen zur Leistungselektronik und zu Antrieben auf dem TU-Day der TU Braunschweig.

**19.-22.06.2016**

Konferenz EVS 29, Montréal, Kanada

Frau Menn und Prof. Henke stellten Untersuchungen zur optimalen Ausnutzung der Zwischenkreisspannung in Nutzfahrzeugen vor – und trafen die schnellste Frau der Welt, Eva Hakansson, die in selbstgebautem E-Motorrad 434 km/h auf einem Salzsee realisiert hat.



30.06.2016

Ausstand Barbara Tiedge

Wir verabschiedeten unsere langjährige ‚treue Seele‘ des IMAB, Barbara Tiedge.



29.09.2016

Institutsausflug – Wanderung auf den Brocken und zurück in der Brockenbahn



18.08.2016

Neue CNC-Maschine für die Werkstatt



Große Freude herrschte bei unseren Auszubildenden über die neue CNC-Bearbeitungsstation.

6 Veröffentlichungen in 2015/2016

1. F. Beste: „Thermisch-Elektrische Analyse und Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen für den elektrischen Antrieb eines Plug-In Hybridfahrzeuges“, Dissertation IMAB TU Braunschweig, 2016
2. J.-H. Psola: „Betriebs- und Einsatzmöglichkeiten von Energiespeichern im Kontext einer nachhaltigen Energieversorgung“, Dissertation IMAB TU Braunschweig, 2016
3. C. Bode, W.-R. Canders, M. Henke: “Anew analytical approach to determine slotting based eddy current losses in permanent magnets of PMSM taking into account axial and circumferential segmentation”, International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2015
4. N. Langmaack, G. Tareilus, M. Henke: “High Temperature and High CMR Gate Driver Circuit for Wide-Band-Gap Power Semiconductors”, IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2015, Sydney
5. N. Yogal, C. Lehrmann, M. Henke: “Investigations on Permanent Magnetic Materials to be used in Explosion-Protected Permanent Magnet Synchronous Machines”, IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2015, Sydney
6. J. Kerner, L. Spiegel, N. A. Daqqa, H. Hinrich, M. Henke: „Einfluss der Rotorspaltstärke auf das Dauerleistungsvermögen von außen laufenden PSMs“, FVA-Tagung E-Motive München 2015
7. N. Yogal, C. Lehrmann, M. Henke, B. Shen: “Loss Comparison of Non-Oriented Electrical Steel Materials to be used in PMSM under Explosion Protection Aspects”, 17th Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15-ECCE Europe), 8-10 September, Geneva, Switzerland.
8. C. Heister, M. Henke: “Typology Comparison of Synchronous Machines to Substitute Rare-Earth Magnets by Ferrites”, ISEF 2015 - XVII International Symp. on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Valencia, Spain
9. M. Cai, M. Henke, W.-R. Canders: “A Simple Approach to Extract Induction Motor per Phase Parameters from Finite Element Analysis”, ISEF 2015 - XVII International Symp.

on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Valencia, Spain

10. T.-H. Dietrich, C. Löffler, J. Meins, M. Henke, J. Wussow, B. Engel, T. Kurczveil, J. Callegari: „Conceptual design and integration of a high power inductive charging system into a series vehicle“, Braunschweiger Hybridsymposium 2016
11. C. Heister, M. Henke: „Topology Comparison of Ferrite Magnet Synchronous Machines with Consideration of Low Inertia“, 11th Int. Conf. on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monaco 2016
12. A.-L. Menn, F. Mittelstädt, M. Henke: Energy Consumption of an Electrified Light Duty Vehicle by considering the Link Voltage's Variation, Electric Vehicle Symposium EVS29, Montréal 2016
13. N. Langmaack, G. Tareilus, M. Henke: “Novel Highly Integrated Current Measurement Method for Drive Inverters”, IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC 2016
14. N. Yogal, C. Lehrmann, M. Henke, C. Heister, H. Zheng: “Measurement and Simulation of Non-Oriented Electrical Steel Sheets Used in PMSM for Higher Frequency”, Electric Vehicle Symposium EVS29, Montréal 2016
15. N. Yogal, C. Lehrmann, M. Henke, H. Zheng: “Measurement, Simulation and Calculation Using Fourier Transformation of Iron Losses for Electrical Steel Sheets with Higher Frequency and Temperature Effects”, Int. Conference of Electrical Machines, ICEM 2016, Lausanne
16. K. Siebke: „Einsatz von GaN-Leistungshalbleitern in einem besonders kompakten Ladegerät für Elektrofahrzeuge“. 44. Halbleiter-Kolloquium 2015, Freiburg, 2015.
17. R. Mallwitz, F. Lippold: “Photovoltaic Inverters in μ -Scale”, CIPS 2016 – 9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems – March, 8 – 10, 2016 – Nuremberg / Germany.
18. R. Mallwitz: „Moderne Leistungshalbleiter im e-Drive - Herausforderung im Grenzbe-
reich zwischen Elektrotechnik und Maschinenbau“, Drive-E-Akademie 2016, Braun-
schweig, 12.06 - 17.06.2016.
19. R. Mallwitz, N. Langmaack, T. Schobre, K. Siebke: “GaN based DC-DC Power Conversion – Experiences from Earth to Space”. 8th Wide Bandgap Semiconductor and Components Workshop (ESA/ECSAT), September, 12 – 13, 2016, Harwell, UK.
20. J. Austermann, H. Borcharding, R. Mallwitz: „Einsatz eines SiC-MOSFETs in einem Energierückspeisungsmodul für Frequenzumrichter“, 45: Halbleiter-Kolloquium 2016, Freiburg 2016.

... zu guter Letzt ...



IMAB ...bei uns steht keiner im Regen ...